

**NANO BOR TOZU İLE YÜZEYİ ALAŞIMLANDIRILAN
ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİĞİN MEKANİK ÖZELLİKLER
VE KOROZYON DAVRANIŞININ ARAŞTIRILMASI**

ALİ GÜNEN

**Doktora Tezi
Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Nuri ORHAN**

HAZİRAN-2012

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FENBİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANO BOR TOZU İLE YÜZEYİ ALAŞIMLANDIRILAN ÖSTENİTİK PASLANMAZ
ÇELİĞİN MEKANİK ÖZELLİKLER VE KOROZYON DAVRANIŞININ
ARAŞTIRILMASI

DOKTORA TEZİ
ALİ GÜNEN
05122202

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 07 Mayıs 2012

Tezin Savunulduğu Tarih: 11 Haziran 2012

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nuri ORHAN (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Ahmet HASÇALIK (F.Ü)

Doç. Dr. Sermin OZAN (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Soner BUYTOZ (F.Ü)

Yrd. Doç. Dr. Mehmet KAYA (Adıyaman Ü.)

HAZİRAN- 2012

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, endüstriyel uygulamalarda %70 ile en fazla kullanım oranına sahip olan 304 östenitik paslanmaz çelik, 10-50 nm boyutundaki Nanobor ve EKabor 3 tozları ile farklı sıcaklık ve sürelerde yüzeyi alaşımlandırılmış numunelerin mikroyapı, mekanik özellikler ve korozyon davranışları araştırılmıştır.

Bu çalışmanın yürütülmesinde en büyük desteği gördüğüm doktora danışmanım sayın Prof. Dr. Nuri ORHAN hocama teşekkür eder saygı ve şükranlarımı sunarım. Deneysel çalışmalar için gerekli olan cihazları 1985 numaralı proje ile beni destekleyen Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma projeleri (FÜBAP) birimine teşekkür ederim. Doktora eğitimim sırasında ve tez çalışmamda hiçbir zaman desteğini esirgemeyen çalışmanın her aşamasında bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan Bartın Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanı Doç. Dr. Bülent KURT hocama teşekkürü borç bilirim. Mekanik testler için Yrd. Doç. Dr. İlyas SOMUNKIRAN'a ve Prof. Dr. Ramazan KAÇAR'a, korozyon sonuçlarının yorumlanmasındaki yardımlarından dolayı Doç. Dr. Adnan Çalık'a, aşınma deneylerindeki yardımlarından dolayı Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a, Yrd. Doç. Dr. Mustafa ULUTAN'a, Yrd. Doç. Dr. M. Sabri GÖK'e, korozyon deneylerindeki yardımlarından dolayı Fizik Mühendisi Serhat ERGÜVEN'e, Makina Mühendisi Bülent AKKOÇ'a, Metalurji Yüksek Mühendisi Aykut KARABULUT'a, Ekaborlamalardan dolayı Vezneli A.Ş ve Rıza Girgin Bey'e, metalografi çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Arş. Gör. Muzaffer KARAGÖZ'e ve Emre ÖNDER'e deneylerin yapımı sırasında yardımlarından dolayı iş arkadaşım Ahmet Yaşar YAMAN'a ve torna ve freze işlemlerindeki yardımlarından dolayı Necati SALİHOĞLU'na (Çayeli Almus A.Ş) teşekkür ederim.

Son olarak doktora çalışmam sırasında zaman zaman ihmal ettiğim fakat hiçbir zaman fedakârlık ve desteklerini esirgemeyen, yılmamlıkla beni kendime getiren sevgili eşim ve çocuklarıma, emekleri geçen ve beni yetiştiren aileme teşekkürlerimi sunarım.

Ali GÜNEN
ELAZIĞ-2012

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VII
ABSTRACT	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
SEMBOLLER ve KISALTMALAR.....	XV
1. GİRİŞ	1
1.1. Nano Teknoloji	2
1.1.1. Dünyada ve Türkiye’de Nano Teknoloji	3
1.1.2. Nano Teknolojinin Kullanım Alanları	4
1.1.3. Nano Yapılı Malzemeler	5
1.1.3.1. Nano Yapılı Malzemelerin Sınıflandırılması	5
1.1.3.2. Nano Yapılı Malzemelerin Özellikleri	6
1.1.3.3. Nano Yapılı Malzemelerin Üretim Yöntemleri	6
1.1.3.4. Nano Yapılı Malzemelerin Aşınma ve Korozyon Dayanımı	7
1.2. Bor Elementi	8
1.2.1. Atomik Yapısı	9
1.2.2. Kimyasal Özellikler.....	9
1.2.3. Fiziksel Özellikler	10
1.2.4. Bor Mineralleri ve Nanobor	10
1.3. Borlama	12
1.3.1. Borlama Yöntemleri.....	17
1.3.1.1. Katı Borlama Yöntemi	17
1.3.1.2. Sıvı Borlama Yöntemi	21
1.3.1.3. Gaz Borlama Yöntemi	22
1.3.1.4. Plazma Borlama Yöntemi	23
1.3.2. Borlanabilen Malzemeler	24
1.3.3. Alaşım Elementlerinin Borlama İşlemine Etkisi	25
1.3.4. Borür Tabakası.....	27

1.3.4.1.	Borür Tabakasının Gelişimi	28
1.3.4.2.	Borür Tabakasının Yapısı	29
1.3.4.3.	Geçiş Bölgesi	30
1.3.5.	Borür Tabakasının Özellikleri.....	31
1.3.5.1.	Tabaka Kalınlığı.....	31
1.3.5.2.	Tabaka Sertliği	32
1.3.5.3.	Borür Tabakasının Aşınma Dayanımı	33
1.3.5.4.	Borür Tabakasının Korozyon Dayanımı	38
1.3.5.5.	İç Gerilmeler	40
1.4.	Bor'un Endüstriyel Uygulamaları.....	42
1.5.	Paslanmaz Çelikler.....	43
1.5.1.	Paslanmaz Çeliklerin Metalurjik Özellikleri.....	45
1.5.2.	Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması.....	47
1.5.2.1.	Ferritik Paslanmaz Çelikler.....	47
1.5.2.2.	Martenzitik Paslanmaz Çelikler	48
1.5.2.3.	Östenitik Paslanmaz Çelikler	49
1.5.2.4.	Östenitik-Ferritik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler.....	49
1.5.2.5.	Çökelti Sertleştirilmiş Paslanmaz Çelikler	49
1.5.3.	Paslanmaz Çeliklerin Korozyon Dayanımları	50
1.6.	Aşınma	51
1.6.2.	Aşınmayı Etkileyen Faktörler	53
1.6.2.	Aşınma Mekanizmaları.....	54
1.6.2.1.	Adhesiv Aşınma.....	54
1.6.2.2.	Abrasiv Aşınma	55
1.6.2.3.	Delaminasyon veya Yorulma Aşınması.....	57
1.6.2.4.	Korozif (Oksidasyon) Aşınma	58
1.6.2.5.	Erozif Aşınma	58
1.6.2.6.	Öğütmeli Aşınma	58
1.6.2.7.	Oymalı Aşınma	59
1.6.2.8.	Kazımalı Aşınma	59
1.6.3.	Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Metotları.....	59
1.6.3.1.	Ağırlık Farkı Metodu	60
1.6.3.2.	İz Değişimi Metodu	60

1.6.3.3.	Kalınlık Farkı Metodu.....	61
1.6.3.4.	Radyoizotop Metodu.....	61
1.7.	Korozyon.....	61
1.7.1.	Korozyon Oluşum Mekanizması	62
1.7.2.	Paslanmaz Çeliklerde Karşılaşılan Başlıca Korozyon Çeşitleri	62
1.8.	Literatür Araştırması	64
1.8.1.	Literatür Değerlendirilmesi ve Çalışmanın Amacı	75
2.	MATERYAL ve YÖNTEM	78
2.1.	Giriş.....	78
2.2.	Deneylerde Kullanılan Malzemeler	79
2.2.1.	Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Paslanmaz Çelik	79
2.2.2.	Borlama Fırını	80
2.2.3.	Borlama Ortamı Malzemeleri	80
2.3.	Deneylerin Yapılması	82
2.3.1.	Borlanacak Numunelerin Hazırlanması	82
2.3.2.	Borlama Ortamının Hazırlanması	83
2.3.3.	Borlama İşlemi	83
2.3.4.	Mikroyapı İncelemeleri için Numune Hazırlanması ve Mikroyapı Çalışmaları	83
2.3.5.	Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri	85
2.3.6.	Optik Mikroskopi İncelemeleri ve Borür Tabakası Kalınlık Ölçümleri	85
2.3.7.	Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği	86
2.4.	Borür Tabakasının Sertlik Ölçümlerinin Yapılması.....	87
2.5.	EDX Analizleri	87
2.6.	Tabaka Yapısı	88
2.6.1.	X ışınları Analizi.....	88
2.7.	Çekme Deneyi.....	88
2.8.	Üç Noktalı Eğme Deneyi	90
2.9.	Aşınma Deneyi.....	92
2.10.	Korozyon Deneyleri.....	94
2.10.1.	Asit Çözeltisi Deneyleri	94
2.10.2.	Tuz Püskürtme Testi Deneyi.....	95
2.10.2.1.	Korozif Ortamın Hazırlanması	95
2.10.2.2.	Numunelerin Yerleştirilmesi ve Test Süreci	96

3.	BULGULAR.....	98
3.1.	Giriş.....	98
3.2.	Metalografik İncelemeler.....	98
3.3.	Mikrosertlik Sonuçları	113
3.4.	Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği	116
3.5.	Tabaka Yapısı	118
3.5.1.	EDX Sonuçları	121
3.5.2.	XRD Analiz Sonuçları	126
3.6.	Çekme Deneyi Sonuçları	130
3.7.	Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları	144
3.8.	Aşınma Deneyi Sonuçları	151
3.9.	Korozyon Deneyleri Sonuçları	172
3.9.1.	Asit Çözeltisi Sonuçları	172
3.9.2.	Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları.....	184
4.	SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	191
4.1.	Sonuçlar	191
5.	ÖNERİLER	195
6.	KAYNAKLAR	196
	ÖZGEÇMİŞ.....	207

ÖZET

Gelişen teknoloji ile birlikte endüstride kullanılan malzemelerin günümüz ihtiyaçlarına cevap vermemesi ya da arzu edilen özellikleri karşılayamaması insanoğlunu yeni malzeme oluşumları konusunda araştırmaya sevk etmiştir. Bu çalışmada, endüstriyel uygulamalarda kullanılan paslanmaz çelikler içerisinde %70 ile en fazla kullanım oranına sahip olan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 10-50 nm boyutundaki Nanobor ve 1400 µm boyutundaki EKabor 3 tozları ile yüzeyi alaşımlandırılarak mikroyapı, mekanik özellikleri ve korozyon davranışları araştırılmıştır.

Bu çalışma öncesi, yüzey sertleştirme alanında literatürde µm boyutuna sahip Ekabor tozları ile birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, nano boyutlu bor tozları ile yapılan herhangi bir çalışmaya rastlanamamıştır. Bu çalışma ile elde edilecek veriler önümüzdeki yıllarda nano boyutlu bor tozları ile yapılacak çalışmalara ışık tutacaktır.

Bu çalışmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin yüzeyine kutu borlama tekniği ile katı ortamda Nanobor ve EKabor 3 tozları kullanılarak farklı sıcaklık ve sürelerde yüzey alaşımlandırma işlemi uygulanmıştır. Yüzeyleri alaşımlandırılan numuneler, optik mikroskobu, SEM, X-ışını, mikrosertlik, çekme, eğme, aşınma ve korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Böylece; Nanobor tozu ile borlanmış numuneler, hem EKabor 3 tozu kullanılarak borlanan numuneler ile hem de herhangi bir işleme tabi tutulmayan ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çelik ile kıyaslanmıştır.

Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin aynı koşullarda Ekabor tozları ile borlanan numunelere göre yüzey sertlik değerlerinde 2 kat'a kadar daha fazla sertlik değerleri elde edilmiş, çekme, üç noktalı eğme dayanımları ve aşınma dayanımlarında da daha iyi sonuçlar alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nanobor, Ekabor, Mekanik özellikler, Aşınma, Korozyon

ABSTRACT

Investigation of Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steel the Surface of Which Alloyed with Nanoboron powder

The materials, used in today's developing technology, haven't been met the requirements, so this situation has stimulated humankind to develop new material solutions. In this study has aimed to research the mechanic and corrosion specifications of AISI 304 austenitic stainless steel, the most used stainless steel with %70 usage in industrial applications, whose surface is alloyed with the powder of Nanoboron having 10-50 nm in size.

There are so many research exists in literature about surface hardening with EKabor powder, however no research has been found for the powder, whose size is in nano dimensions. The data acquired in this study will enlighten the studies about Nanoboron powders in next coming years.

In this research, AISI 304 austenitic stainless steel surface is alloyed with box boriding technic with Nanoboron and EKabor 3 powders with different temperatures and different periods. The prototype whose surface are hardened have been tested for optic microscope, SEM, X-ray, microhardness, pulling, bending, wear and corrosion. Thus and so, prototype hardened with Nanoboron powder is compared to both prototype hardened with Ekaboron and original AISI 304 stainless steel.

Consequently, the prototype alloyed with Nanoboron powder is two times more hard than the prototype alloyed with Ekabor powder and also it is determined that Nanoboron prototype is more durable in aspect of pulling, 3 points bending and wear.

Keywords: Nanoboron, Ekabor, Mechanic Properties, Wear, Corrosion

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Fe-B denge diyagramı.....	14
Şekil 1.2. Katı borlama yönteminin şematik resmi	19
Şekil 1.3. Sıvı borlama ünitesi.	22
Şekil 1.4. Gaz borlama ünitesi.....	23
Şekil 1.5. Tek ve iki fazlı borür tabakalarının şematik görünüşü.....	30
Şekil 1.6. Ekabor-I ile borlanmış Ck 45 çeliğinin tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi .	32
Şekil 1.7. 42CrMo4 çeliğinde farklı yüzey tabakalarının dinamik sıcaklık sertlikleri.....	33
Şekil 1.8. Düşük karbonlu çelikte farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma davranışları.....	35
Şekil 1.9. Tek fazlı ve çift fazlı borür tabakalarındaki iç gerilme dağılımı.....	41
Şekil 1.10. Fe-Cr alaşımlarında Cr miktarının korozyon direncine etkisi.....	44
Şekil 1.11. Abrasiv a) sürülme b) kesilme c) çatlama aşınma mekanizmalarının gösterimi.....	56
Şekil 1.12. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi	57
Şekil 2.1. Yüzey alaşımlandırma işleminde kullanılan Protherm PTF 12/38/450 boru tipi fırın	80
Şekil 2.2. Nanobor tozunun SEM görünümü	81
Şekil 2.3. Yüzey alaşımlandırma işlemi esnasında a) Kullanılan deney düzeneği b) Paslanmaz çelik borlama potası.....	82
Şekil 2.4. Nanobor tozu ile yüzey alaşımlandırma işleminde kullanılan a) Mekanik test numuneleri	83
Şekil 2.5. Metkon metacut-M250 marka hassas kesme cihazı	84
Şekil 2.6. a) Bakalite alınan numuneler b) Metkon forcipol 2v parlatma cihazı görünüşü	84
Şekil 2.7. EVO LEQ Scanning elektron mikroskobu (SEM) ve EDX analiz cihazı	85
Şekil 2.8. Bilgisayar kontrollü Nikon MA100 optik mikroskop ve Clemex görüntü analiz sistemi...	86
Şekil 2.9. Future Tech FM-700 Mikrosertlik ölçüm cihazının görüntüsü.....	87
Şekil 2.10. Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü XRD analiz ünitesinin görünümü	88
Şekil 2.11. TS EN ISO 6892 standarda göre çekme deney numunesi resmi ve ölçüleri	89
Şekil 2.12. Shimadzu marka 50 KN kapasiteli bilgisayar kontrollü nümerik çekme deney cihazı ..	90
Şekil 2.13. ASTM B528-83a standardına göre hazırlanmış eğme deney numunesi ölçüleri.....	90
Şekil 2.14. a) ASTM B528-83a standardına göre eğme şematığı b) Eğme deneyi aparatı resmi	92
Şekil 2.15. Oscilating TRIBOtester marka karşıt hareketli aşınma cihazı	92
Şekil 2.16. Aşınma izinin derinliği ve genişliğinin şematik olarak gösterimi.....	93
Şekil 2.17. a) Asit çözeltisi deneyi düzeneği b) Precisa hassas terazi	95
Şekil 2.18. Tuz püskürtme testi cihazı görünümü	96
Şekil 2.19. Deney numunelerinin tuz püskürtme ünitesine yerleştirilme şekli	97
Şekil 3.1. AISI 304 paslanmaz çeliğin 950 °C'de a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat sürede Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri.....	100

Şekil 3.2. AISI 304 paslanmaz çeliğin 1000 °C’de a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat sürede Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri.....	102
Şekil 3.3. AISI 304 paslanmaz çeliğin 950 °C’de a) 2 saat b) 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri.....	103
Şekil 3.4. AISI 304 paslanmaz çeliğin 950 °C’de a) 2 saat b) 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri.....	105
Şekil 3.5. AISI 304 paslanmaz çeliğin 950 °C’de a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat sürede Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin optik mikroyapı görüntüsü	107
Şekil 3.6. AISI 304 paslanmaz çeliğin 1000 °C’de a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat sürede Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin optik mikroyapı görüntüsü	109
Şekil 3.7. AISI 304 paslanmaz çeliğin 950 °C’de a) 2 saat b) 4 saat EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin optik mikroyapı görüntüsü	110
Şekil 3.8. AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 1000 °C’de a) 2 saat b) 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin optik mikroyapı görüntüsü	111
Şekil 3.9. AISI 304 paslanmaz çeliğin 1000 °C’de 6 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve kaplama tabakası dökülen numunenin makro görünümü	112
Şekil 3.10. 950 °C’de 2 saat süre ile yüzeyi Nanobor tozu ile alaşımlandırılmış numunenin mikrosertlik izleri.....	114
Şekil 3.11. Nanobor ve EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 çeliğin a) 950 °C b) 1000 °C yüzeyden itibaren elde edilen sertlik değerleri değişimi.....	115
Şekil 3.12. Yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin d ² -t diyagramı	117
Şekil 3.13. Yüzey alaşımlandırma farklı bor tozlarının Arrhenius denklemi.....	118
Şekil 3.14. Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 paslanmaz çeliğin a) kaplama tabakası b) difüzyon bölgesi c) matris SEM görüntüsü	120
Şekil 3.15. a) 1000 °C’de 4 saat Nanobor tozu b) 1000 °C’de 4 saat EKabor3 tozu c) 1000 °C’de 6 saat Nanobor tozu yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin EDX görünümü ve % ağırlık oranları	125
Şekil 3.16. 950 °C’de 2 saat süre ile yüzeyi Nanobor tozu ile alaşımlandırılan numunenin XRD diyagramı	127
Şekil 3.17. 950 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi Nanobor tozu ile alaşımlandırılan numunenin XRD diyagramı	128
Şekil 3.18. 950 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi EKabor 3 tozu ile alaşımlandırılan numunenin XRD diyagramı	129
Şekil 3.19. 1000 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi EKabor 3 tozu ile alaşımlandırılan numunenin XRD diyagramı	129
Şekil 3.20. Çekme deneyi sonrası numunelerin görünümü	131
Şekil 3.21. Çekme deneyine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kırık yüzey a) uç kısım b) orta kısım SEM görünümü	132
Şekil 3.22. Nanobor tozu ile 950 °C’de 2 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve çekme deneyine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kırık yüzey a) uç kısım b) orta kısım SEM görüntüsü.....	133

Şekil 3.23. Nanobor tozu ile 1000 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve çekme deneyine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kırık yüzey a) uç kısım b) orta kısım SEM görüntüsü.....	135
Şekil 3.24. EKabor3 tozu ile 950 °C’de 2 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve çekme deneyine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kırık yüzey a) uç kısım b) orta kısım SEM görüntüsü.....	136
Şekil 3.25. EKabor3 tozu ile 1000 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve çekme deneyine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kırık yüzey a) uç kısım b) orta kısım SEM görünümü	138
Şekil 3.26. Çekme deneyi sonucu a) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik b) 950 °C 2 saat c) 950 °C 4 saat d) 1000 °C 2 saat e) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu f) 950 °C 2 saat g) 950 °C 4 saat h) 1000 °C 2 saat ı) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin kopma dayanımlarının karşılaştırılması.....	140
Şekil 3.27. Çekme deneyi sonucu a) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik b) 950 °C 2 saat c) 950 °C 4 saat d) 1000 °C 2 saat e) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu f) 950 °C 2 saat g) 950 °C 4 saat h) 1000 °C 2 saat ı) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin maksimum gerilme oranları	141
Şekil 3.28. Çekme deneyine tabi tutulan a) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik b) 950 °C 2 saat c) 950 °C 4 saat d) 1000 °C 2 saat e) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu f) 950 °C 2 saat g) 950 °C 4 saat h) 1000 °C 2 saat ı) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin gerilim % uzama diyagramları	142
Şekil 3.29. Çekme deneyi sonucu a) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik b) 950 °C 2 saat c) 950 °C 4 saat d) 1000 °C 2 saat e) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu f) 950 °C 2 saat g) 950 °C 4 saat h) 1000 °C 2 saat ı) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin kuvvet uzama eğrileri.....	146
Şekil 3.30. Ekabor tozu ile borlanmış ve borlanmamış AISI 304 paslanmaz çeliğin çekme diyagramı	147
Şekil 3.31. Eğme deney düzeneği	144
Şekil 3.32. Üç nokta eğme deneyi sonrası numunelerin a) iç katlama b) dış katlama bölgesi görünümü	145
Şekil 3.33. a) Ticari AISI 304 b) Nanobor tozu ile 1000 °C’de 4 saat c) EKabor 3 tozu ile 1000 °C’de 4 saat süre ile alaşımlandırılmış numunelerin eğilme deneyi sonrası optik resimleri	147
Şekil 3.34. Üç nokta eğme deneyi sonucu a) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik b) 950 °C 2 saat c) 950 °C 4 saat d) 1000 °C 2 saat e) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu f) 950 °C 2 saat g) 950 °C 4 saat h) 1000 °C 2 saat ı) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin kuvvet uzama eğrileri.....	148
Şekil 3.35. Üç nokta eğme deneyine tabi tutulan a) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik b) 950 °C 2 saat c) 950 °C 4 saat d) 1000 °C 2 saat e) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu f) 950 °C 2 saat g) 950 °C 4 saat h) 1000 °C 2 saat ı) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin eğilme dayanımı (σ) değerleri	149
Şekil 3.36. Borür tabakalarının kırılma tokluğu (K _{1c}) değerleri	149
Şekil 3.37. a) 950 °C ‘de 2 saat b) 950 °C ‘de 4 saat c) 1000 °C ‘de 2 saat d) 1000 °C ‘de 4 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan e) 950 °C ‘de 2 saat f) 950 °C ‘de 4 saat g) 1000 °C ‘de 2 saat h) 1000 °C ‘de 4 saat EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ı) İşlemsiz AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin 5 N yük altındaki aşınma oranı değişimleri.....	154

Şekil 3.38. Nanobor tozu ile a) 950 °C’de 2 saat b) 1000 °C’de 2 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 5 N yük altında sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi	155
Şekil 3.39. Nanobor tozu ile a) 950 °C’de 4 saat b) 1000 °C’de 4 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 5 N yük altında sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi	157
Şekil 3.40. Aşınma deneyine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunenin 5 N yük altında sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi	158
Şekil 3.41. 5 N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimleri	159
Şekil 3.42. EKabor 3 tozu ile a) 950 °C’de 2 saat b) 1000 °C’de 2 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 5 N yük altında sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi	160
Şekil 3.43. EKabor 3 tozu ile a) 950 °C’de 4 saat b) 1000 °C’de 4 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 5 N yük altında sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi	162
Şekil 3.44. EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve 5 N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimleri.....	162
Şekil 3.45. Nanobor tozu ile a) 950 °C’de 2 saat b) 1000 °C’de 2 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan ve 5 N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin 250X SEM yüzey morfolojisi	164
Şekil 3.46. Nanobor tozu ile a) 950 °C’de 4 saat b) 1000 °C’de 4 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan ve 5 N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin 250X SEM yüzey morfolojisi	165
Şekil 3.47. EKabor 3 tozu ile a) 950 °C’de 2 saat b) 1000 °C’de 2 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan ve 5 N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin 250X SEM yüzey morfolojisi	167
Şekil 3.48. EKabor3 tozu ile a) 950 °C’de 4 saat b) 1000 °C’de 4 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan ve 5 N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin 250X SEM yüzey morfolojisi	168
Şekil 3.49. 5 N yük altında aşınma deneylerine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunenin 250X SEM yüzey morfolojisi	169
Şekil 3.50. Nanobor tozu ile 950 °C 2 saat (Numune1), 950 °C 4 saat (Numune 2), 1000 °C 2 saat (Numune 3), 1000 °C 4 saat (Numune 4), süre ile yüzeyleri alaşımlandırılmış numunelerin aşınma deneyleri sonrası EDX analizi yapılan bölgelerin yüzeysel görünümü	170
Şekil 3.51. 950 °C’de 2 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H ₂ SO ₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü	173
Şekil 3.52. 950 °C’de 2 saat süre ile EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H ₂ SO ₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü	173
Şekil 3.53. 950 °C ’de 4 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H ₂ SO ₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görüntüsü	174

Şekil 3.54. 950 °C’de 4 saat süre ile EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H ₂ SO ₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görüntüsü	175
Şekil 3.55. 1000 °C’de 2 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H ₂ SO ₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü	176
Şekil 3.56. 1000 °C’de 2 saat süre ile EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H ₂ SO ₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü	176
Şekil 3.57. 1000 °C’de 4 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H ₂ SO ₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü	177
Şekil 3.58. 1000 °C’de 4 saat süre ile EKabor 3 tozu ile borlanan ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H ₂ SO ₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü	178
Şekil 3.59. AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H ₂ SO ₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü	179
Şekil 3.60. %10 H ₂ SO ₄ asit çözeltisi deneyine tabi tutulan a) 950 °C 2 saat b) 950 °C 4 saat c) 1000 °C 2 saat d) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu e) 950 °C 2 saat f) 950 °C 4 saat g) 1000 °C 2 saat h) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ı) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin % periyodik ağırlık kayıpları	182
Şekil 3.61. %10 H ₂ SO ₄ asit çözeltisi deneyine tabi tutulan a) 950 °C 2 saat b) 950 °C 4 saat c) 1000 °C 2 saat d) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu e) 950 °C 2 saat f) 950 °C 4 saat g) 1000 °C 2 saat h) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ı) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin % kümülâtif ağırlık kaybı	182
Şekil 3.62. %10 H ₂ SO ₄ asit çözeltisi deneyine tabi tutulan a) 950 °C 2 saat b) 950 °C 4 saat c) 1000 °C 2 saat d) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu e) 950 °C 2 saat f) 950 °C 4 saat g) 1000 °C 2 saat h) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ı) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin 4 saat sonundaki % ağırlık kaybı	183
Şekil 3.63. Hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan numunelerin 24 saat sonunda yüzey fotoğrafları	185
Şekil 3.64. EDX analizi yapılan bölgelerin kaplama tabakası (object 7), difüzyon (object 8) matris bölgesinden (object 9) SEM görüntüsü	186
Şekil 3.65. Hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan a) 950 °C 2 saat b) 950 °C 4 saat c) 1000 °C 2 saat d) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu e) 950 °C 2 saat f) 950 °C 4 saat g) 1000 °C 2 saat h) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ı) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin kümülâtif ağırlık kaybı	188
Şekil 3.66. Hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan a) 950 °C 2 saat b) 950 °C 4 saat c) 1000 °C 2 saat d) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu e) 950 °C 2 saat f) 950 °C 4 saat g) 1000 °C 2 saat h) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ı) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin periyodik ağırlık kaybı	188
Şekil 3.67. Hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan a) 950 °C 2 saat b) 950 °C 4 saat c) 1000 °C 2 saat d) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu e) 950 °C 2 saat f) 950 °C 4 saat g) 1000 °C 2 saat h) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ı) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin % ağırlık kaybı oranı	189

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Farklı malzemelerde çeşitli yüzey işlemleri ile elde edilebilecek sertlik değerleri	16
Tablo 1.2. Bazı malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları.....	34
Tablo 1.3. Borlanmış çeliklerin H ₂ SO ₄ çözeltisi içerisindeki korozyon dayanımları	39
Tablo 1.4. Borür tabakası ve saf demir ve AISI 304 ait ısı genleşme katsayıları.....	41
Tablo 2.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi	79
Tablo 2.2. Deneylerde kullanılan Nanobor tozunun kimyasal bileşimi	81
Tablo 2.3. Asit çözeltisi deneylerinde kullanılan sıvı çözeltinin bileşimi.....	95
Tablo 2.4. Hızlandırılmış korozyon deney şartları	96
Tablo 3. 1. Yüzey alaşımlandırma işlemi deney parametreleri	98
Tablo 3.2. Tüm deney koşullarında ölçülen ortalama borür tabakası kalınlıkları	113
Tablo 3.3. Yüzeyden 20-50 µm arası uzaklıktaki bölgede ölçülen maksimum mikrosertlik değerleri	116
Tablo 3.4. Yüzey alaşımlandırma işlemindeki difüzyon katsayıları	117
Tablo 3.5. Aktivasyon enerjisi değerleri.....	118
Tablo 3.6. Çekme deneyi verileri	139
Tablo 3.7. Üç nokta eğme deneyi sonuçları	148
Tablo 3.8. Yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin aşınma deneyi sonucu elde edilen veriler.....	151
Tablo 3.9. Karşıt hareketli aşınma cihazı ile aşındırılan malzemelerin aşınma iz alanı, aşınma iz hacmi ve aşınma hızı değerleri	153
Tablo 3.10. Aşınma deneyi sonrası numunelerin EDX analizleri % oranları	170
Tablo 3.11. Asit deneyi öncesi ve sonrası borür tabakası EDX analizi	180
Tablo 3.12. Asit çözeltisi içerisindeki numunelerin kümülâtif ağırlık kaybı	181
Tablo 3.13. Asit çözeltisi içerisindeki numunelerin periyodik ağırlık kayıpları	181
Tablo 3.14. 1000 °C’de 4 saat süre ile nano bor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan malzemenin kaplama tabakası (object 7) , difüzyon (object 8) matris bölgesinden (object 9) alınan EDX analiz sonuçları	186
Tablo 3.15. Hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan numunelerin kümülâtif ağırlık kaybı	187
Tablo 3.16. Hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan numunelerin periyodik ağırlık kaybı	187

SEMBOLLER ve KISALTMALAR

μ	: Sürtünme katsayısı
μm	: Mikrometre
D	: Aşınma izinin derinliği olarak tanımlanmıştır.
D_0	: Difüzyon katsayısı
E	: Elastisite modülü
HV	: Vickers sertliği
K	: Karşıt hareket genliği
K_{IC}	: Kırılma tokluğu
NANOTAM	: Nanoteknoloji araştırma merkezi
nm	: Nanometre
P	: Yük
Q	: Aktivasyon enerjisi
R	: Gaz sabiti
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
T	: Mutlak sıcaklık (K)
T	: Zaman
UNAM	: Ulusal nanoteknoloji araştırma merkezi
V	: Aşınma iz hacmi
W	: Aşınma izinin genişliği

Numunelerin İsimlendirilmesi:

- a: 950 °C’de 2 saat sürede Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numune
- b: 950 °C’de 4 saat sürede Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numune
- c: 1000 °C’de 2 saat sürede Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numune
- d: 1000 °C’de 4 saat sürede Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numune
- e: 950 °C’de 2 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numune
- f: 950 °C’de 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numune
- g: 1000 °C’de 2 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numune
- h: 1000 °C’de 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numune
- i: Herhangi bir işlem uygulanmayan ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numune

1. GİRİŞ

Günümüzde metal yüzeylerinin dış ortamların etkilerinden korunması, kullanımları sırasında maruz kaldıkları korozyon, yorulma, aşınma ve sürtünme etkilerini en aza indirmek amacıyla çok geniş çeşitlilikte yüzey alaşımlandırma işlemleri uygulanmaktadır. Malzeme yüzeyinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde en kolay ve en ekonomik yöntemlerin başında yüzey sertleştirme işlemleri gelir. Bu yöntemler malzeme yüzeyinin sert, mukavemetli ve aşınmaya dayanıklı olmasını; matris kısmının da enerjiyi absorbe ederek tok kalmasını sağlar. Yüzey sertleştirme işlemlerinin başında endüstride geniş uygulama alanı olan borlama işlemi gelir (Şen vd, 2001; Ulutan, 2007).

Bor, yeryüzünde nadir bulunan elementlerdendir. Bor, 230'dan fazla mineralin bileşiminde bulunmasına rağmen tabiatta serbest olarak bulunmaz. Türkiye bor mineralleri açısından oldukça zengindir. Dünya rezervinin yaklaşık %72'si Türkiye'de olmakla birlikte, mineral çeşitliliği ve cevher tenörü açısından da doğal bir zenginliğe sahiptir (Anonim, 2003; Turhal, 2008). Fakat; ülkemiz bor uç ürünleri üretiminde, dünyadaki bor üreticileri olarak adlandırılan ülkelere göre çok geridedir.

Bor bileşikleri; çeşitli makine parçaları, tekstil, kimya, seramik, plastik endüstrisi kollarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bor, demir esaslı malzemelerde ise alaşım elementi veya yüzey sertleştirme amacı ile kullanılır. Ayrıca borlama işleminin demir esaslı tüm malzemelere uygulanabilmesi, ekonomik açıdan bir üstünlük oluşturmaktadır (Anonim, 2003; Addemir, 2007).

Termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olan borlama, esas olarak metal yüzeyine bor difüzyonu olarak tanımlanabilir. Borlama işleminin fiziksel durumu katı, sıvı, gaz ya da plazma halinde olabilir. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma dirençleri ile karakterize edilirler. Bu nedenle borlanmış malzemelerde oluşan borür tabakası üzerindeki çalışmalar daha çok sertlik, aşınma ve korozyon üzerine yoğunlaşmaktadır (Şen vd., 2001).

Borür tabakasının önemli bir özelliği ise sahip olduğu yüksek sertlik değerini, 900-1000 °C' ye ulaşan sıcaklıklarda dahi kendini koruyabilmesidir. Bu sayede yüksek sıcaklıklarda da sahip olduğu tribolojik özellikleri kaybetmeden aşınma ve korozyona karşı daha iyi direnç gösterir (Karamış vd., 1995).

Bu çalışmada AISI 304 östenitik paslanmaz çelikten hazırlanan deney numunelerin yüzeyi, 10-50 nm boyutunda % 99,7 saflıkta ticari olarak temin edilen Nanobor ve patentli olarak satılan EKabor 3 tozları ile alaşımlandırılmıştır. Nanobor tozu ile yüzey alaşımlandırma işlemi için 950 ve 1000 °C'de; 2, 4 ve 6 saatlerde olmak üzere 6 farklı parametre seçilmiştir. EKabor 3 tozu ile yine aynı sıcaklarda 2 ve 4 saat sürede yüzey alaşımlandırma işlemi yapılmıştır. İşlem sonrası numunelerde oluşan borür tabakası kalınlığı, sertlik, faz dağılımı, çekme mukavemeti, basma mukavemeti, aşınma ve korozyon dayanımı incelenmiştir.

Çalışmanın birinci bölümünde nano teknoloji, borlama, paslanmaz çelikler, aşınma ve korozyon konuları kapsamlı olarak ele alınmıştır. İkinci bölümde materyal ve metot verilmiştir. Üçüncü bölümde deney bulgularıyla birlikte deney sonuçları verilmiş ve değerlendirilmiştir. Dördüncü bölümde sonuçlar verilmiş olup elde edilen veriler yorumlanmıştır. Beşinci bölümde konu ile ilgili öneriler verilmiştir. Altıncı bölüm ise yapılan araştırma ve deneysel çalışmalarda yararlanılan ulusal ve uluslararası kaynaklardan oluşmaktadır.

1.1. Nano Teknoloji

Nano teknoloji ultra ince/küçük parçaların/malzemelerin kullanım bilimidir. Bir nano metre (1 nm) milimetrenin milyonda birine eşittir ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m} = 10^{-6}\text{ mm}$). Nano bilimi malzemelerin büyük ölçekteki özelliklerinden farklı olarak malzemeleri atomik, moleküler ve makro moleküler ölçekte inceler.

Nano boyutlarda sistemlerin fiziksel davranışlarında normal sistemlere kıyasla farklı özellikler gözlemlenmektedir (TÜBİTAK, 1994). Nano malzemeler daha kuvvetli, daha hafif veya daha farklı şekilde ısı ve elektrik iletme özelliklerine sahiptir. Örneğin; makro boyutta bor elementinin elektrik iletkenliği zayıf iken nano ölçekteki bor malzemesinin

elektrik iletkenliği yüksektir. Parça boyutu inceldikçe birim kütle için yüzey alanı artışı, malzemenin kimyasal reaktivitesini artırır. Bu yüzden nano-malzemeler yakıt hücreleri ve pillerde katalizör görevi görebilmektedir.

Nano teknolojinin amaçları; nanometre ölçekli yapıların analizi, nanometre boyutunda yapıların fiziksel özelliklerinin anlaşılması, nanometre ölçekli yapıların imalatı, nano ölçekli ve/veya duyarlı cihazların geliştirilmesi, uygun yöntemler bulunarak nanoskopik ve makroskopik dünya arasındaki bağı kurulmasıdır (Demirel, 2007). Örneğin, iletim özellikleri (momentum, enerji ve kütle) artık sürekli olarak değil ancak kesikli olarak tarif edilmektedir. Benzer olarak, optik, elektronik, manyetik ve kimyasal davranışlar klasik değil kuantum olarak tanımlanmaktadır (TÜBİTAK, 1994). Nano teknolojiye birincil rol, klasik fizik kuralları ile yer değiştiren moleküler ve atomik boyutlar yaklaşımıdır. Fizikotekniksel ve kimyasal konulu yaklaşımlar, nanoteknolojik yapıların fabrikasyonu, kullanımı ve uygulamaları üzerinde etkilidir (Köhler ve Fritzche, 2004).

1.1.1. Dünyada ve Türkiye’de Nano Teknoloji

Nano teknolojinin çok kuvvetli, hafif malzemeler, çok küçük bilgisayar parçaları, çok hızlı çalışan nano boyutlu elektronik ve optoelektronik teknolojileri ile çok küçük boyutlu ve aynı zamanda öngörüleemeyecek kadar etki gücü yüksek savunma sistemlerini üretebilme yeteneğine sahip olduğuna inanılmaktadır. Geliştirilmeye müsait ve pazarlama potansiyeli yüksek olan bu yeni teknolojinin önemini ve gücünü fark eden ve ileride dünya ekonomisini, devletlerarası güçler dengesini belirleyici olacağına inanan ABD, Rusya, AB, Japonya ve Çin gibi gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler Nano teknolojinin çeşitli alanlarında dev Ar-Ge yatırımları yapmaktadırlar. Öte yandan, bu ülkelerde sayıları süratle artan nano teknoloji tabanlı çeşitli ölçeklerde şirketler kurulmakta ve devlet destekli üniversite-sanayi işbirliğine büyük önem verilmektedir. Özellikle büyük sanayi kuruluşları, nano teknoloji alanında araştırma ve geliştirmeye yönelik önemli yatırımlar yapmaktadırlar (TÜBİTAK, 1994; Özkan, 2006; Demirel, 2007)

Avrupa Birliği, nano teknoloji alanında öncü konumunda bulunan ABD ve Japonya’yı takip edebilmek için FP 6. çerçeve programı içinde desteklenmesi gereken öncelikli alanlardan biri olarak belirlediği nano teknolojiye, Ar-Ge faaliyetlerinde

kullanılmak üzere yaklaşık olarak 1.30 milyar Euro ayırmıştır. Bu yatırımı FP 7. çerçeve programı içinde de 4 milyar Euro ayırarak nano teknolojinin önemini vurgulamış oldu. Özellikle Almanya, Fransa ve İngiltere’de nano teknoloji alanındaki Ar-Ge merkezlerinin kurulması ve projelerin geliştirilmesi için yüksek miktarda maddi destek sağlanmaktadır. Birçok AB ülkesinde (Almanya, Çek Cumhuriyeti, Danimarka, Fransa, Hollanda, İngiltere, İtalya ve Norveç), üniversitelerde nano teknoloji konusunda araştırma merkezleri ve enstitüler kurulmuş olup, yüksek lisans ve doktora programları açılmıştır. Hatta lisans seviyesinde, nano bilim ve nano teknoloji konusunda eğitim-öğretim yapan bölümler açılmıştır. Almanya, Hollanda, Fransa, İngiltere, Danimarka, İspanya başta olmak üzere tüm Avrupa ülkelerinde ve Kanada’dan Avustralya’ya kadar birçok dünya ülkesinde pek çok yeni araştırma merkezinin yanı sıra üniversitelerde de nano bilim ve nano teknoloji faaliyetlerine her yıl milyarlarca dolarlık yatırımlar yapılmaktadır (URL-8).

Türkiye’de nano teknoloji yatırımları ve nano teknoloji hakkındaki gelişmelere bakacak olursak, gelişmiş ülkelerden ciddi bir süre gecikme içinde olduğumuzu görmekteyiz. Dünyadaki gelişmelere uymak ve uluslararası standardı yakalamak için, ülkemizde disiplinler arası işbirliğini güçlendirmek gerekmektedir (TÜBİTAK, 1994). Ülkemizin gelecekteki menfaatlerini korumak amacıyla nano teknolojideki gelişmeleri yakından takip etmek ve tedbirler alabilmek amacıyla bu konuda yatırımlar yapmak bir zorunluluk arz etmektedir. Türkiye’de Bilkent Üniversitesi bünyesinde NANOTAM ve UNAM adında 2 ve Sabancı Üniversitesi bünyesinde 1 nano teknoloji merkezi bulunmaktadır. Ayrıca Akdeniz, İnönü, ODTÜ, İTÜ ve Gebze İleri Teknoloji Enstitüsünde öğretim üyeleri tarafından küçük çaplı çalışmalar yapılmaktadır (URL-9).

1.1.2. Nano Teknolojinin Kullanım Alanları

Nano teknoloji hızlı bir şekilde hayatımıza girmektedir. Şuan nano teknolojinin 3. devresindeyiz, 2020 yılı itibari ile de 4. nesil nano teknolojik ürünlerin çıkması beklenmektedir (Chong, 2004). ABD’de de bulunan Project On Emerging Nanotechnologies adlı kurumun internette yayınladığı listede Ocak 2009 itibari ile 803 nano teknolojik ürün bulunduğunu belirtmiştir. Listede sağlık, tekstil, elektronik, otomotiv, gıda ürünlerinden örnekler bulunmaktadır (URL-11).

Nano teknolojinin mevcut uygulama konularını şöyle sıralayabiliriz:

- Kaplamalar,
- Nano kompozitler,
- Nano mekanik,
- Moleküler elektronik ve nano elektronik,
- Nano robotlar,
- Nano partiküllerin biyolojik uygulamaları,
- Nano mekanik,
- Foto elektrokimyasal hücreler (Guozhong, 2004),
- Süper plastik malzemeler,
- Manyetik uygulamalar,
- Katalizör ve hidrojen depolama malzemeleri (Suryanarayana ve Koch, 1999).

1.1.3. Nano Yapılı Malzemeler

Nano kristalli malzemeler, 100 nm' ye kadar olan yapısal uzunluk veya tane boyutları ile karakterize edilirler. Nano kristalli malzemeler çok farklı şekil veya formlarda olabilirler ve üstün kimyasal, fiziksel veya mekanik özellikler gösterirler. Tane boyutu kritik değerin (~10-20 nm) altına indiği zaman, atomların % 50'den fazlası tane veya ara yüzey sınırlarında bulunurlar. Bu durumda dislokasyonlar oluşmaz ve konvansiyonel iri tanelerde gözlenen Hall-Petch ilişkisi artık gözlenmez. Bundan dolayı tane sınırları, nano kristalli malzemelerin deformasyonunda çok büyük role sahiptir. Nano kristalli malzemeler, geleneksel mikro boyutlu taneli malzemelere oranla, akma ve süper plastiklik özelliklerini daha düşük sıcaklıklarda gösterir. Benzer şekilde, nano kristalli kaplamaların plastik deformasyonun, tane sınırı difüzyonu veya rotasyonu tarafından desteklenen tane sınırı kayması ile bağlantılı olduğu düşünülmektedir (Tjong ve Chen, 2004).

1.1.3.1. Nano Yapılı Malzemelerin Sınıflandırılması

Nano yapıları malzemeler tek veya çok fazlı polikristallerdir, kristal boyutu en az tek boyutta 1-100 nanometre'dir. Böylece, uzunluk birimi nanometre olan boyutlara dayanarak sınıflandırılabilir: (a) nano partiküller, (b) tabakalı veya lamelli yapılar (c) teli yapılar (d)

kütlesel nano yapıları malzemeler. Nano partiküller aslında atom salkımları halindedir ve doğada sıfır-boyutlu (0-D) olarak adlandırılırlar. Tabakalı veya lamelli yapılar bir-boyutlu (1-D) nano yapıları malzemelerdir, uzunluk ve genişlik büyüklükleri kalınlık büyüklüğünden çok daha fazladır. İki-boyutlu nano yapıları malzemelerin, tersi olarak da adlandırılırlar, uzunlukları genişlikleri ve çaplarına oranla çok daha büyüktür. En sık rastlanan nano yapıları, nano yapıları kristalitler olarak da adlandırılan üç-boyutlu (3-D) nano yapılarıdır. Nano yapıları malzemeler kristal ve amorf fazlar içerebilirler ve metal, seramik, polimer veya kompozit olabilirler. Eğer taneler, kristallerden oluşmuş ise malzeme, nano kristalli olarak adlandırılır (Suryanarayana ve Koch, 1999).

1.1.3.2. Nano Yapılı Malzemelerin Özellikleri

Çok küçük tane boyutlarından dolayı, nano kristalli malzemeler, konvansiyonel iri taneli polikristalli malzemelerle karşılaştırıldığında, daha farklı ve genellikle çok iyileştirilmiş özellikler gösterirler. Bu özellikler, artan mukavemet/sertlik, yüksek yayılım, düşük yoğunluk, daha yüksek elektrik direnci, artan özgül ısı, daha yüksek termal genleşme katsayısı, daha düşük termal iletkenlik daha yüksek korozyon direnci ve üstün nitelikli yumuşak manyetik özellikler olarak belirtilebilir (Suryanarayana ve Koch, 1999).

1.1.3.3. Nano Yapılı Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Nano yapıları elde edilmesinde iki ana yöntem bulunmaktadır. Bottom-up (Aşağıdan yukarıya) ve top-down (yukarıdan aşağıya) olarak adlandırılan bu iki yaklaşımı şu şekilde özetleyebiliriz.

1-Bottom-up: Aşağıdan yukarıya yaklaşımı (küçükten büyüğe), moleküler nano teknolojiyi belirtir ve organik veya inorganik yapıları, maddenin en temel birimi olan atomlardan başlayarak atom, molekül inşa edilmesi yöntemini ifade eder.

2-Top-down: Yukarıdan aşağıya yaklaşımı (büyükten küçüğe), makineler, asitler ve benzeri mekanik ve kimyasal yöntemler kullanılarak nano yapıların fabrikasyonu ve imal edilmesi yöntemlerini ifade eder.

Teknolojinin bu günkü seviyesi sebebi ile yapılan çalışmaların birçoğu yukarıdan aşağıya (top-down) klasmanında değerlendirilir.

1.1.3.4. Nano Yapılı Malzemelerin Aşınma ve Korozyon Dayanımı

Mühendislik malzemelerinde hatalar mekanik özellikler açısından önemlidir. Birçok durumda hatalar (aşınma ve korozyon gibi) malzeme yüzeyinde başlar. Bu nedenle malzemenin yüzey özelliklerinin bilinmesi ve yüzey iyileştirmesi işleminin yapılması, malzemenin performansının artırılmasında etki sahibidir (Wang ve Li, 2003).

Termal olarak yapılan birçok proses aşınmayı minimize etmek amacıyla yüzey kompozisyonunu değiştirmek için kullanılmıştır. Yüzeyin aşınmaya karşı direnç kapasitesi, yüzey kompozisyonunu değiştirerek veya yüzeyi aşınmaya karşı dirençli kimyasal içeren bir malzemeyle kaplayarak iyileştirilebilir (Ramnarayan, 2004).

Yüzeydeki morfolojik yapılar makro ve mikro seviyede malzemeyi aşınma ve korozyona karşı koruyan önemli faktörlerdir. Makro seviyede yüzeyin genel topografyası, yüzey morfolojisi için indeks olarak kabul edilmektedir. Malzemelerin aşınması yüzeyde bulunan farklı fazların dağılımına, miktarına ve tipine bağlıdır. Mikro bileşenlerin miktarı ve dağılımı kadar matrisin tipide malzemenin aşınma ve diğer özelliklerine etki eden önemli faktörlerdir. İyileştirilmiş yüzeyde bulunan daha küçük taneler aşınma ve çatlak dayanımını artırıcı rol oynarlar (Ramnarayan, 2004).

İnce ve düzgün olarak dağıtılmış sert çökelti fazları, (karbürler, boritler, alüminatlar vs.) malzemenin aşınma direnci özelliğini iyileştirirler. Örneğin; motor valflarında kullanılan Ni-Cr-Fe-Si-C alaşımında, karbür ve silisitlerin miktarı ve dağılımı malzemenin yüksek sıcaklık aşınma özelliklerini belirlemekte önemli rol oynamaktadır (Ramnarayan, 2004).

1.2. Bor Elementi

Türkiye’de bol miktarda bulunan bor, kökeni Farsça’da Burah, Arapça’da Buraq (Baurach) kelimelerinden gelmektedir. Genellikle doğada Na ve Ca’nın tuzları şeklinde bulunmaktadır. Bor’lu malzeme üretimi için bor cevherinden ve rafine edilmiş bileşiklerinden faydalanılmaktadır. Bor bileşikleri Uluslararası Standart Sanayi Tasnifi’ne (I.S.I.C) göre grup kodu 311 olan Kimya Sanayi Sektörü içerisinde yer almaktadır (Irmak, 2006).

Bor, periyodik cetvelde “B” simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 olan 3A gurubunun metal olmayan tek elementidir (Delikanlı vd, 2003). Bor elementi genellikle tetragonal ve hagzagonal yapıda olmakla birlikte amorf yapıda da olabilir. Amorf yapıdaki yoğunluğu $2,34 \text{ gr/cm}^3$ olan bor elementinin sertliği 9,3 Mohs’dur (Özbek, 1999). Genellikle başka elementlerle bileşikler halinde bulunan bor, oksijene affinitesi en yüksek olan elementtir (Delikanlı vd., 2003). Doğada yaklaşık olarak 230 çeşit bor mineralinin varlığının bilinmesine rağmen, ekonomik olarak kullanım imkânı sağlayan sadece bir kaç tane vardır. Bu minerallerden Borik asit (H_3BO_4), Anhidrit Borik Asit (BO_3), Boraks Pentahidrat ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), Boraks Dekahidrat ($\text{Na}_2\text{O}_2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ve Anhidrit Boraks ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{B}_2\text{O}_3$) gibi satılabilir ürün haline getirilir. Bu ürünler % 99,5 veya daha da üzerinde saflıklarda olabilmekte ve kristalin granüller veya toz halinde arz edilebilmektedir. Metalik bor % 90–99 arasında bor içerir. Kristalize bor görünüm ve optik özellikleri bakımından elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir (Uluköy, 2005).

Bor elementi tabiatta serbest şekilde bulunmamaktadır. Yapay bor ise amorf ve kristal yapıda olmak üzere iki şekilde üretilmektedir. Amorf bor, siyah veya kahverengi toz halinde, kristal bor ise siyah, sert ve kırılmandır. Üç değerli bor, iyonik yarıçapının dört değerli silisten daha küçük olması sebebiyle, magmanın ilk kristalleşmesi esnasında meydana gelen minerallerin kristal kafeslerinde yer alamaz. Turmalin, danburit, dumortiyerit gibi borosilikatlar, granit pegmatitleri içinde ve granit dokularından oluşan pnömatolitik cevherlerde bulunmaktadır (Sümer, 2004).

Amorf Bor: Günümüzde askeri amaçlarla karakteristik yeşil renkli hedef aydınlatma malzemesi ve roketlerde ateşleyici olarak kullanılmaktadır. Amorf bor, bor karbür' ün KBF_4 ile birlikte, ergimiş tuz rafinasyon elektrolizi ile elde edilmektedir.

Kristalin Bor: Wolfram filament üzerinde bor klorürün hidrojen gazı altında ayrıştırılması ile üretilir. Oda sıcaklığında yarı iletken bir malzemedir. Yüksek sıcaklıkta metaller gibi elektriği iyi iletir. 2180°C 'de ergir, 3650°C 'de kaynar. Metal berillerin hazırlanmasında kullanılır. Yan iletkenlerde dopant element olarak ve lazer teknolojisinde kullanılmaktadır (Addemir, 2007).

1.2.1. Atomik Yapısı

- Atomik Çapı: $1.17\text{\AA}$
- Hacmi: $4.6\text{ cm}^3/\text{mol}$
- Kristal yapısı: Rhombohedral
- Elektron Konfigürasyonu: $1s^2 2s^2 2p^1$
- İyonik Çapı: $0.23\text{\AA}$
- Elektron Sayısı (yüksüz): 5
- Nötron Sayısı: 6
- Proton sayısı: 5
- Valans Elektronları: $2s 2p 1$ (URL-2).

1.2.2. Kimyasal Özellikler

- Elektrokimyasal Eşdeğer: 0.1344 g/amp-hr
- Elektronegativite (Pauling): 2.04
- Füzyon Isısı: 50.2 kJ/mol
- İyonizasyon potansiyeli:
- Birinci: 8.298
 - İkinci: 25.154
 - Üçüncü: 37.93
- Valans elektron potansiyeli (-eV): 190 (URL-2).

1.2.3. Fiziksel Özellikler

- Atomik Kütlesi: 10.811
- Kaynama Noktası: 4275 K 4002 °C 7236 °F
- Termal Genleşme Katsayısı: 0,0000083 cm/°C (0 °C)
- Kondüktivite: - Elektriksel: 1.0-12 10⁻⁶cm /Ω
- Termal: 0.274 W/cmK
- Yoğunluk: 2.34 g/cc
- Görünüş: Sarı-Kahverengi ametal kristal
- +Elastik Modülü: Bulk: 320 GPa
- Atomizasyon Entalpisi: 573,2 kJ/mole
- Füzyon Entalpisi: 22.18 kJ/mole
- Buharlaştırma Entalpisi: 480 kJ/mole
- Sertlik:
 - Mohs: 9.3
 - Vickers: 49000 MN m⁻²
- Buharlaştırma Isısı: 489,7 kJ/mol
- Ergime Noktası: 2573 K 2300 °C 4172 °F
- Molar Hacmi: 4.68 cm³/mole
- Fiziksel Durumu: (20 °C & 1 atm): Katı
- Spesifik Isısı: 1.02 J/gK
- Buhar Basıncı: 0.348 Pa (2300°C 'de) (URL-2).

1.2.4. Bor Mineralleri ve Nanobor

Bor mineralleri ve bunlardan elde edilen ticari ürünlerin gruplandırılması konusunda literatürde kesin bir sınıflandırma bulunmamaktadır. Bor üretim ve tüketimi ile dünya ticareti konusundaki kaynaklar da oldukça sınırlıdır. Bu konudaki en önemli kaynaklardan biri Roskill Information Services Ltd. dir. Bu şirketin 3 yılda bir yayınladığı bor raporlarında; Bor rezervi oluşumları bor mineralleri, bunlardan elde edilen zenginleştirilmiş bor cevherleri boratlar rafine ürünler bor bileşikler ve bor ürünleri olarak adlandırılmaktadır. Raporun farklı bölümlerinde Tabii Boratlar ve Rafine Boratlar tanımlamaları şu şekilde sınıflandırılmaktadır:

- Tabii Boratlar;

- Tinkal,
- Kolemanit,
- Üleksit gibi konsantre bor cevherlerini,

-Rafine Boratlar; Tabii boratların rafinasyonu ya da kimyasal reaksiyonu ile elde edilen;

- Boraks pentahidrat,
- Boraks dekahidrat,
- Susuz boraks,
- Borik asit,
- Sodyum perborat gibi rafine bor ürünlerini ifade etmek üzere kullanılmaktadır.

Raporda üçüncü bir grup olarak özel bor kimyasallar olarak adlandırılan ürünler yer almıştır. Bunlar:

- Elementel Bor (Nanobor),
- Bor karbür,
- Bor Halidler,
- İnorganik Boratlar,
- Fluoroboratlar,
- Borik asit esterleri,
- Bor hidridler,
- Organobor bileşikleri,
- Bor-Azot bileşikleri bu ürünler arasında sayılmaktadır.

Ayrıca bu ürünlerin kullanım alanları ile ilgili olarak düzenlenen bir tabloda

- Sodyum borhidrür,
- Çinko borat,
- Bortriklorür,
- Bortriflorür,
- Trimetilborat,
- Özel sodyum boratlar,
- Trimetilborat,
- Fluoborikasit özel bor ürünleri örnekleri olarak yer almaktadır (URL-2).

1.3. Borlama

Borlama, termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olup, esas itibarıyla metal yüzeyine borit atomlarının difüzyonu olarak adlandırılabilir. Bu işlem yüksek sıcaklıkta bor atomlarının metalik malzemelerin yüzeyinden içeriye doğru difüzyonu ile gerçekleşmektedir. Bor atomları ısı enerjisi etkisiyle metal yüzeyine yayınır ve esas metal atomlarıyla uygun borürler meydana getirirler. DIN 17014'e göre ise borlama, "termokimyasal işlem yoluyla iş parçası yüzeyinin bor atomları ile zenginleştirilmesi" olarak tarif edilmektedir. Yani termal enerji yoluyla bor atomlarının iş parçasının yüzeyindeki metal latisin içerisine yayınması ve orada ana malzemenin atomları ile borürlerin oluşturulmasıdır (Özbek, 1999). Bu işlem kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlara dayanmakta ve sabit sıcaklıkta veya termal çevrimli olarak uygulanabilmektedir (Er ve Par, 2004). Matuschka (1980) yapılan deneyler sonucu optimum borlama sıcaklığını 2, 4 ve 6 saat süre için 900-950 °C arasında olduğunu belirtmektedir. Hutchings (1992) borlama yöntemine bağlı olarak östenit dönüşüm sıcaklığı üzerinde 800-1050 °C arasında ve 1-8 saatlik işlem sürelerinin uygun olduğunu belirtmektedir. Genel uygulamada ise borlama işlemi 700-1050 °C sıcaklık aralıklarında ve 1-12 saatlik işlem sürelerinde yapılabilmektedir (Boylu vd., 2003).

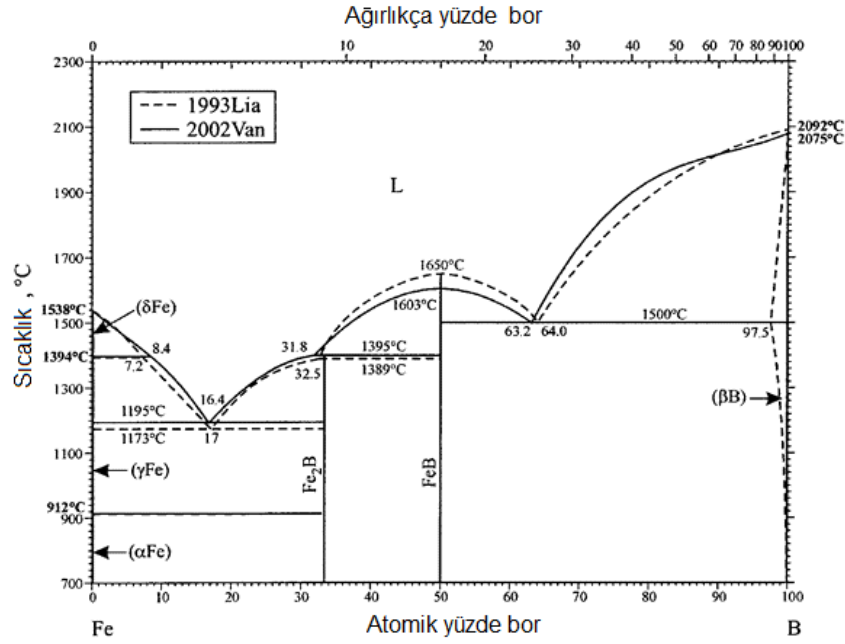
Bor kaynağı olarak amorf bor, B₄C (borkarbür), Na₂B₄O₇ (susuz boraks), H₂B₆, tabakanın düzenli büyümesini sağlayan aktivatör (KBF₄), işlem sıcaklığında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluşturan ve ortamdaki malzemelerin ana malzemeye yapışmasını önleyen dolgu malzemesi ve deoksidanlardan (SiC, vb.) oluşan karışımlar kullanılır (Özbek, 1999).

Borlama işleminde bor'un malzeme yüzeyine yayınması neticesinde malzemenin en üst (dış yüzeyinde) kısmında borür tabakası, onun altında geçiş (difüzyon) bölgesi, bunun altında da ana yapı (matris, çekirdek) meydana gelmektedir. Borür tabakasının kalınlığı malzemenin kimyasal bileşimine (cinsine), ergime sıcaklığına, östenitleme (dönüşüm) sıcaklığına, alaşım elementlerinin oranına ve dağılımına bağlı olarak değişir. Borür tabaka kalınlığı arttıkça, borlanmış tabakanın kırılabilirliği artar. Borür tabaka kalınlığı; borlama sıcaklığına, borlama yöntemine ve borlama işlem süresine bağlı olarak değişir. Borlama sıcaklığı ve süresinin artması borür tabaka kalınlığı da artırır. Malzemedeki beklenen

yüzey özellikleri bu şekilde elde edilir (Turhal, 2008). Borlama orta sıcaklık ve iyileştirme işlemidir (Özdemir vd., 2009).

Borür tabakasının oluşum noktaları tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi malzeme yüzeyinin daha reaktif olduğu yerlerdir. İşlemin birinci aşamasında borlayıcı ortam ile ana malzeme yüzeyindeki reaksiyon partnerleri arasında reaksiyon oluşur. Bu reaksiyon sonucunda tanelerin yüzeyinde çekirdek oluşumları başlar. Borlama süresi ile çekirdek oluşumu artar ve ince bir bor tabakası elde edilir. Bor, Fe_2B ve FeB yapısında çeliğin yüzeyine yayılır. Önce Fe_2B fazı oluşur, ortamda yeterince bor yoğunluğu varsa FeB fazı da süreye bağlı olarak oluşur. İlk önce oluşan Fe_2B fazı uzun bir sürede büyümektedir. Borür tabakaları çeliğin yüzeyinden içeriye doğru FeB , Fe_2B yapısında oluşur. Borlamanın son aşamasında sadece FeB fazı oluşur. FeB fazı, Fe_2B fazından daha kısa sürede büyür. Bu yüzden FeB fazının dokusu Fe_2B fazı kadar güçlü değildir (Bayça ve Şahin, 2004; Barış, 2007; Ersöz, 2008).

Bir alaşımda katı eriyik oluşum şartlarının en önemlisi atomik boyut faktörüdür (Özbek, 1999). Bor atomlarının küçük boyutları ve yüksek mobilitesi nedeniyle demir esaslı alaşımlara kolaylıkla difüze olarak Fe_2B ve FeB metaller arası bileşiklerini oluşturabilirler (Genel vd., 2002; Çelikyürek, 2006). Bor elementi $\alpha\text{-Fe}$ 'de atom çapına bağlı olarak hem arayer hem de yer alan konumunda bulunabilmektedir. Fe-B sisteminde borun atom yarıçapının demirin atom yarıçapından 2,69 kat daha küçük olması bu element ile kolaylıkla katı eriyik yapma imkânını sağlamaktadır (Özbek, 1999).



Şekil 1.1. Fe-B denge diyagramı (Okomoto, 2004).

Demirde bor erirliği sıcaklığa bağlı olarak ferrit fazında 20-80 ppm, östenit fazında ise 55-260 ppm kadardır. Demir-bor denge diyagramına bakıldığında (Şekil 1.1) ağırlıkça % 8,83 bor oranında Fe₂B, yine ağırlıkça % 16,23 bor oranında FeB ara bileşikleri meydana gelmektedir (Delikanlı vd, 2003). 1149°C’de, %3,8 bor bileşiminde bir ötektik nokta oluşmaktadır. Dolayısıyla borlanmış yüzey 1149°C sıcaklığına kadar ısıdan etkilenmemektedir. Fe-B sistemindeki alaşım elementleri, örneğin %1 C miktarı ötektik sıcaklığını 50°C aşağıya düşürmektedir (Özsoy, 1991; Çalık vd., 2005a; Şimşek, 2005) . Ötektik yapısı ve özellikleri, bileşimin yanında sıvı tabakanın soğuma hızına da bağlıdır. Çeşitli araştırmacılar tarafından, Fe₂B fazının ergime sıcaklığının 1389–1410 °C arasında ve FeB fazının ise 1550–1657 °C arasında olduğu belirtilmektedir (Özbek, 1999).

Fe₂B ve FeB borürlerinin oluşturduğu borür tabakaları termal ve elektrik iletkenliği gibi özelliklerinin yanı sıra daha çok yüksek yüzey sertliği, düşük sürütünme katsayısı, yüksek sıcaklık korozyon dayanımı, asit ve baz çözeltilerindeki korozif ortamlarda dirençli olması dolayısıyla diğer pek çok sertleştirme yönteminine göre üstünlük sağlamaktadır (Delikanlı vd., 2003; Ayter, 2005; Barış, 2007; Gürkan, 2007; Taştan, 2010). Borlama işleminin en önemli karakteristik özelliği, elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik (1450-5000 HV) değerlerine sahip olması ve yüksek sıcaklıklarda sertliğini korumasıdır (Özbek, 1999; Akbayır, 2005; Gürkan, 2007). Borlanmış çeliklerde

oluşan sertlik değerleri ile diğer yüzey sertleştirme işlemlerinde elde edilen sertlik değerlerinin karşılaştırılması Tablo 1.1’de verilmiştir. Oluşan borür tabakasının sertliği ile geleneksel sertleştirme yöntemlerinde elde edilen sertlik değerleri arasındaki fark açıkça görülmektedir. Borlama ile elde edilen değerler; sertleştirilmiş takım çeliğinden ve sert krom kaplamadan daha yüksek olup, volfram karbür ile eşdeğerdir (Şen, 1998; Yapar, 2002; Akbayır, 2005).

Yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısı kombinasyonu, başta adhezyon ve abrazyon aşınması olmak üzere korozyon ve yüksek sıcaklık oksidasyonu hasarına karşı önemli dayanıklılık sağlar. Az alaşımlı çeliklerin aside karşı dayanımlarını (sülfürik, hidroklorik ve fosforik asit) arttırabilir. Östenitik paslanmaz çeliklerin hidroklorik aside karşı dayanımını arttırır (Özbek vd., 2004).

Borlama tabakasına etki eden faktörler: Borlama işleminde kullanılan yöntem, borlama maddesinin bileşimi, borlanacak malzemenin kimyasal bileşimi, işlem süresi ve işlem sıcaklığıdır (Baştürk ve Erten, 2006).

Tablo 1.1. Farklı malzemelerde çeşitli yüzey işlemleri ile elde edilebilecek sertlik değerleri (Yapar vd, 2002; Uluköy ve Can, 2006).

MALZEME	MİKROSERTLİK (HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 kalıp Çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 kalıp Çeliği	630-700
Yüksek hız çeliği	900-910
Nitrürlenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000

Borlamanın avantajları özetlenir ise:

- Yüksek sıcaklıklarda borür tabakası sertliğini korur,
- Borlama, demir esaslı malzemelerin korozyon-erozyon dayanımını gerek alkali ortam gerekse seyreltik asit çözeltisi içerisinde korur ve bu özelliği sayesinde endüstride geniş bir uygulama alanı bulur,
- Borlanmış yüzeyin oksidasyon direnci 850 °C'ye kadar etkili olur,
- Oksitleyici ve korozyif ortamlarda çalışan parçaların yorulma dayanımlarını artırır ve servis ömrünü uzatır.

Borlamanın dezavantajları şöyle sıralanabilir:

- Borür tabakası darbeli yüklere karşı dayanıksızdır,
- Borlama işleminin, gaz sementasyon ve plazma nitrürasyon işlemlerine göre, işletme giderleri daha fazladır ve uygulanması daha zordur,

- Karbürlenmiş veya nitrülenmiş çeliklere göre, borlanmış alaşımlı çeliklerde temas yorulma dayanımı (pullanma dayanımı) düşüktür,
- İşlem sonucunda malzemenin boyutlarında, borlama tabakasında %5-25'i kadar hacim genişlemesi olduğu için değişimler olur (Çalık, 2005b).

1.3.1. Borlama Yöntemleri

Borlama işlemi, termokimyasal ve termokimyasal olmayan yöntemler olarak iki ana gruba ayrılmaktadır. Bu yöntemlerden termokimyasal yöntemler daha çok kullanılmaktadır (Yağcı, 2009). Termokimyasal borlama işlemi karbürleme ve nitrülemeye benzetmekle beraber, sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu olarak bor atomunun metale difüzyonu prensibine dayanmaktadır. Borlama teknik açıdan oldukça geliştirilmiştir. Borlama işlemi borlanacak malzemelerin özelliklerine göre östenitleştirme sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklıkta 1-12 saat süre ile katı (kutu), sıvı, gaz ve plazma gibi yöntemlerle yapılmaktadır (Çalık ve Özsoy, 2002; Baştürk ve Erten, 2006).

Geleneksel yöntemlerin dışında çok bileşenli borlama, akışkan yatakta borlama ile termokimyasal olmayan fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma spreyl borlama, plazma sinter borlama (PSP), süperplastik borlama ve iyon biriktirme gibi farklı yöntemler de son yıllarda borlama işlemi için kullanılmaktadır (Yağcı, 2009).

Borlama yöntemleri, bor verici kaynakların fiziksel durumlarına göre sınıflandırılırlar.

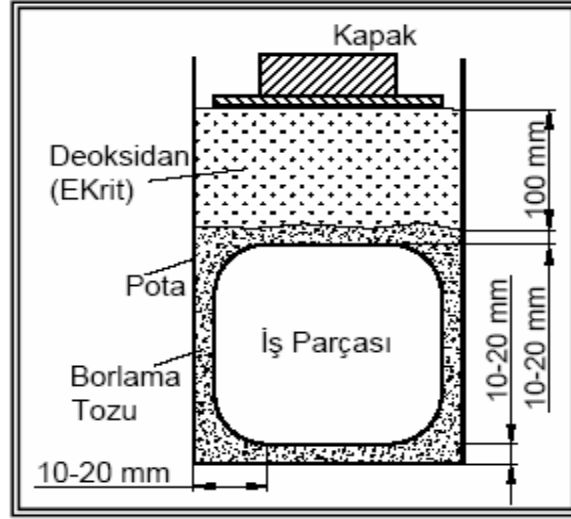
1.3.1.1. Katı Borlama Yöntemi

Borlama ortamı olarak katı maddelerin kullanıldığı yöntemdir. Uygulamanın kolay olması, basit donanım gerektirmesi, ekonomik, güvenli ve kullanılan toz karışımının kimyasal bileşimlerinde değişiklik yapılabilirliği nedenlerinden dolayı en yaygın borlama tekniğidir (Şimşek, 2005).

Katı ortamda borlama iki farklı şekilde yapılmaktadır. Birincisi toz ortamında, diğeri

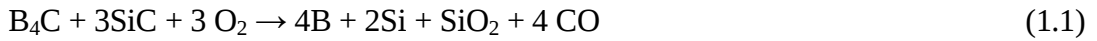
ise pasta (macun) yöntemidir. Bu iki yöntemde de kullanılan bor verici ortam aynıdır. Toz ortamda kullanılanlar en ince tanelerden oluşmaktadır. Macunlama da ise aynı maddeler macun haline getirilmiştir (Selçuk, 1994). Borlama işlemlerinde yaygın olarak kullanılan ve ticari olarak EKabor adı ile pazarlanan ürünler hem toz hem de macun şeklinde temin edilmektedir.

Toz ortamda borlamada yüzeyi borlanacak olan malzeme, toz halindeki bor verici ortam içerisinde 800–1050 °C sıcaklıklarda 1–12 saat bekletilerek borlama işlemi yapılır (Çalık ve Özsoy, 2002). Borlama tozu ısıya dayanıklı genellikle paslanmaz çelikten imal edilen bir kutuya borlanacak parçanın tüm yüzeylerinde minimum 10 mm kalınlığında olacak şekilde (Şekil 1.2) doldurulur (Uzun, 2002; Yıldızlı, 2002). Borlanacak yüzeylerin etrafında elde edilmek istenen borür tabakasının özelliklerine göre tozların tane büyüklükleri 5-10 µm olmalıdır (Barış, 2007). Üst kısma SiC gibi bir dolgu malzemesi doldurulur ve kapak hava girişini mümkün mertebe engelleyecek şekilde kapatılır. Kutu, önceden borlama sıcaklığına kadar ısıtılmış fırın içine konur ve gereken borlama süresi kadar bekletildikten sonra alınarak soğutulur. Pota veya kutunun yüksek iç gerilmeler, çatlaklar ve kalkmalara sebebiyet vermemesi ve yeniden toz ilavesiyle (% 20 – 50) borlamaya devam edilebilmesi açısından fırın hacminin %60'ını geçmemesi tavsiye edilmektedir. Homojen bir ısı dağılımı için borlanacak parçaların şekli fırına uygun olmalı ve yerleştirme bu durum göz önüne alınarak yapılmalıdır. Borlama işlemi normal atmosferde yapılabilir; ya da işlem, kutunun veya fırının içinin koruyucu gaz atmosferiyle korunduğu ortamlarda gerçekleştirilir (Özbek,1999; Uluköy, 2005).



Şekil 1.2. Katı borlama yönteminin şematik resmi (Sinha, 1991).

Toz ortamı borlamada çok farklı bor bileşenleri kullanılabilir. Bu bileşenler; katı bor kaynağı, akışkanlar ve aktivatörlerdir. Ticari uygulamalarda genellikle bu toz karışımları kullanılarak yapılan kutu borlama tercih edilmektedir. B_4C 'den bor'un yalnız bırakılması için ortamda redüksiyonu sağlayacak bir madde (redüktan) bulunmalıdır. Redüktan madde olan SiC ile B_4C bileşiminden bor (elementel bor) elde edilir. Serbest kalan B'un oksijene afinitesi çok yüksektir ve oksijenle B_2O_3 oluşturur. Bunu önlemek için ortamda yeterince SiC bulunmalı veya işlem Ar gazı ortamında yapılmalıdır. Redüksiyon sağlayıcı SiC aynı zamanda demiri de redükler, böylece serbest kalan bor, demire yayılır. Borun demire yayılmasını KBF_4 hızlandırır. Eşitlik 1.1 ve 1.2'de bu mekanizma gösterilmiştir (Bayça ve Şahin, 2004; Özmen, 2007).



Literatürde bulunan katı ortam borlama bileşiklerine ait bazı örnekler aşağıda verilmiştir (Özbek,1999; Uluköy, 2005).

1. Ferrobor + %10-15NBF
2. %95 BC + %5 NaF
3. %33 Amorf bor + %2 NHCl + %65AlO

4. %80 BC + %20 NaCO
5. %98 BC + %2 KBF
6. %50 Amorf bor + %1 NHF. HF + % 49 AlO
7. % (7,5–40) BC + % (2,5–10) KBF + % (50–90) SiC
8. %84 BC+ % 16NaBO₇
9. %95 Amorf bor + % 5KBF₄
10. %20 BC + %5 KBF + %75 Grafit
11. % (40–80) BC + % (20–60) FeO
12. %100 BC

Borlama işlemi sonucu oluşan FeB ve Fe₂B fazları arasındaki ısı genleşme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlamlar meydana gelmektedir. Bu durum bazı endüstriyel uygulamalar için borlamayı kabul edilemez kılar. Bu olumsuz etkiyi yok etmenin yolu, oluşan fazlardan birini azaltmak ya da ortadan kaldırmaktır. Bu faz FeB fazıdır. Fichtl (1981), düşük denebilecek sıcaklıklarda (~800 °C) ve kısa işlem sürelerinde (2-3 saat), FeB fazı içermeyen yaklaşık 40 µm kalınlığa kadar tek fazlı borür tabakası meydana getirilebildiğini, daha kalın tabakalarda ise tabakanın %50'den fazlasının FeB fazından meydana gelmesinin kaçınılmaz olduğunu ifade etmektedir. H. P. Kehler tarafından bor kaynağı olarak BC, aktivatör olarak KBF₄, deoksidant ve dolgu malzemesi olarak SiC kullanılmıştır. Bu sayede tek fazlı (Fe₂B) borür tabakalar ya da FeB oranının önemli ölçüde azaldığı tabakalar elde edilmiştir (Özsoy, 1996).

Pasta (Macun) borlama yöntemi ise kutu borlamanın zor ve pahalı olduğu veya fazla zaman kaybının olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Karmaşık şekilli parçaların tamamen veya kısmen seri bir şekilde borlanabilmesi büyük bir avantajdır. Hazırlanan borlayıcı karışım yani pasta, malzemenin üzerine sürülerek veya püskürtülerek 1–2 mm civarında kalınlıkta tabaka oluşturulmakta ve fırına konmadan kurutulmaktadır. Kurutma işleminden sonra macun ile kaplanmış parçalar önceden ısıtılmış fırına konur ve fırın ağzı kapatılarak borlama sıcaklığına ısıtılır. Belirli süre bu sıcaklıkta tutulan parçalar dışarı alınır ve soğumaya terk edilir. Parçalar soğuduktan sonra yüzeyinde yapışmış olan artıklar temizlenir ve böylece borlama tamamlanmış olur (Uzun, 2002; Şimşek, 2005).

İşlem, demir esaslı malzemelere geleneksel fırınlarda 800–1000 °C arasında 1- 5 saat süreyle uygulanmaktadır. Bu yöntemle borlama mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılmalıdır. Aksi takdirde kötü bir borür tabakası oluşur. Bu işlemde koruyucu atmosfer olarak Ar, NH₃ veya N₂ kullanılmaktadır (Selçuk, 1994; Şimşek, 2005). Büyük parçaların veya seçilmiş alanların borlanması için oldukça elverişlidir (Sinha,1991; Özbek, 1999).

Katı borlamanın avantajları:

- Borlama sonrası temiz bir yüzey çıkmaktadır.
- Özel teknik gerektirmez.
- Kolay elde edilebilir.
- Toz terkibi değiştirilebilir.
- Minimum donanım ve güvenli olması sıralanabilir.

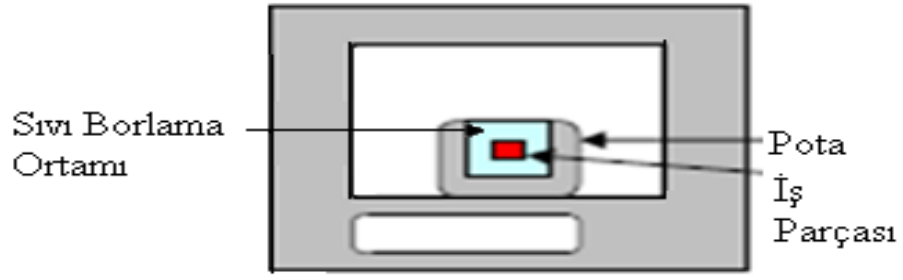
Dezavantajları:

- Yüzeyde bor bileşimi homojen değildir.

1.3.1.2. Sıvı Borlama Yöntemi

Bu yöntemde borlama banyosu sıvı haldedir. Borlama sırasında elektrik akımı uygulanıyorsa elektroliz yöntemi ile borlama (elektrolitik borlama), uygulanmıyorsa normal sıvı ortamda daldırma yöntemi ile borlama ismini alır (Barış, 2007). Bor bileşikleri, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan erimiş tuza, iş parçasının daldırılması ile uygulanan yöntemdir. Daldırma süresi borlama süresidir. Borlama işlemi 900–1100 °C sıcaklıkta ve 2 – 9 saat süre ile yapılır. Bu yöntemin dezavantajı sıcaklık ve borlama işlemi sonrası malzeme yüzeyinin temizlenmesi (Mathuschka, 1980; Roskill, 1999) gerekliliğidir. Sıcaklığın 850 °C'nin altına düşmesi durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalacağından borlama imkânsız hale gelecektir (Bayça ve Şahin, 2004; Şimşek, 2005).

İşlemde susuz boraks (Na₂B₄O₇), susuz borik asit (B₂O₃), metaborik asit (HBO₂), boraks (Na₂B₄O₇·10H₂O), borkarbür (B₄C) gibi bor bileşikleri ve silisyum karbür, ferrosilisyum, grafit, NaCl, Al gibi redükleyiciler kullanılır. Borlayıcı ortamın sıvı olması için bor bileşiklerinin veya NaCl gibi eriticilerin miktarı yüksek olmalıdır. Böylece eritici olan bu maddeler diğer maddeleri de eriterek sıvı eriyik oluşturur (Barış, 2007; Ersöz, 2008).



Şekil 1.3. Sıvı borlama ünitesi (Bayça ve Şahin, 2004).

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. Difüzyon reaksiyonu esnasında katot potansiyeli, yüzeyde oluşan fazın (FeB , Fe_2B) potansiyel değerini alır. Katı eriyik, oluşum esnasında yüzeyde yayılan elementin konsantrasyonundaki değişimle birlikte sürekli değişir (Mathuschka, 1980).

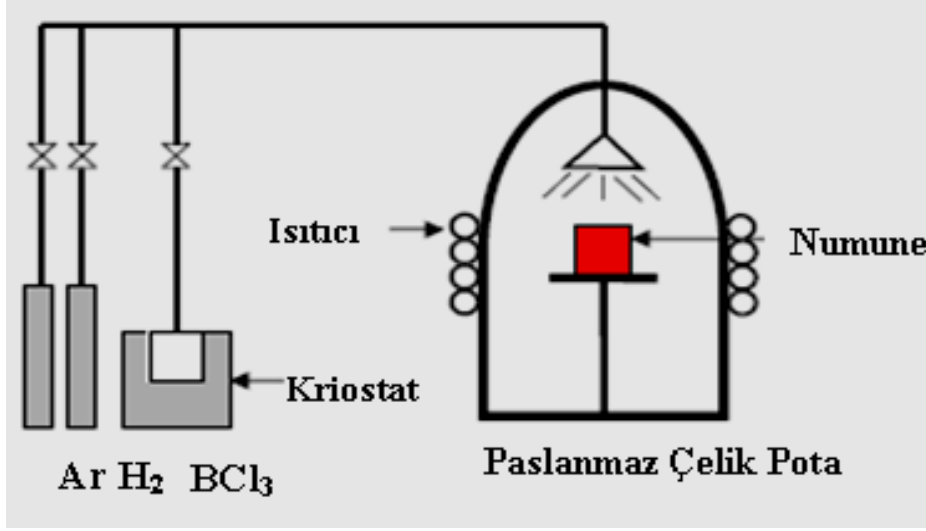
Sıvı borlama yöntemi ucuz ve kolay olması yanında aşağıdaki olumsuzluklara sahiptir:

- Borlama sonrasında parça yüzeyinde tuz kalıntıları ve reaksiyona girmeyen bor kalıntılarının giderilmesi zaman ve para kaybına yol açar (Özbek, 1999).
- İşlemin başarılı olabilmesi, borlama sırasında banyo viskozitesinin artmamasına bağlıdır. Bu sebeple banyoya tuz ilavesi yapılmalıdır ki bu da maliyeti yükseltir (Özbek, 1999).
- Korozyon ortamlara dayanıklı fırınlara ihtiyaç vardır (Özbek, 1999).
- Sıvı ortamdaki redükleyici maddeler zamanla banyonun dibine çökerek banyo viskozitesini olumsuz yönde etkiler (Barış, 2007).
- Büyük boyutlu kompleks parçalara uygulanamaz (Barış, 2007).

1.3.1.3. Gaz Borlama Yöntemi

Bor kaynağı olarak kullanılan bor halojenleri, diboran ve organik bor bileşiklerinin ısı etkileriyle parçalanması sonucu gaz haline getirilen bor kaynağının kapalı paslanmaz çelik potadaki numune üzerine püskürtülmesi ile yapılır. Yani borlama ortamının gaz fazında olduğu borlama işlemidir. Şekil 1.4’de gaz borlama yöntemi şematik olarak gösterilmiştir

(Bhushan and Gupta, 1991; Küper, 2000).



Şekil 1.4. Gaz borlama ünitesi (Bayça ve Şahin, 2004).

Gaz borlamada gazlaştırılabilen BCl_3 (bor halitler), BF_3 , B_2H_6 (diboran) ve TEB (trietil boran) gibi bor bileşikler ve redüktan olarak hidrojen gazı kullanılmaktadır. Gaz borlama işleminde genellikle bor halitler ve diboran kullanılmaktadır (Uluköy, 2005). Gaz borlamada gaz sirkülasyonu sonucu özellikle karmaşık şekilli parçaların daha uniform bir bor dağılımının sağlanması (Matuschka, 1980), bor potansiyelinin ayarlanabilmesinden dolayı tek fazdan oluşan borür tabakası elde edilebilmesi (Özsoy, 1991) ve sonradan temizleme işlemi gerektirmemesi avantajlarındandır (Yoon et. al., 1999; Bayça ve Şahin 2004). Dezavantajları ise: Gaz borlama için karmaşık cihazlar gerektirmekle beraber diboran ve bor halitleri gazları zehirli ve patlayıcıdır. Çevreyi kirletici etki yaptığından ticari kullanımı sınırlıdır (Özbek, 1999; Uluköy, 2005). Ayrıca bor halojenürleri korozyona yol açabilmektedir (Matuschka, 1980; Özsoy, 1991).

1.3.1.4. Plazma Borlama Yöntemi

Katı haldeki bir maddeyi enerji vererek sıvı, sıvı haldeki maddeyi enerji vererek gaz ve gaz durumdaki maddeyi enerji vererek plazma haline getirmek mümkündür (Barış, 2007). Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom veya molekül içeren karışımdır. Uygulamada plazma, ısı enerjisi verilerek, ışınlı veya

elektiriksel boşalma ile elde edilir. En yaygın kullanılan plazma yöntemi, elektiriksel boşalmadır (Uluköy, 2005; Barış, 2007).

Plazma borlama BCl_3 , BF_3 , B_2H_6 ve TEB gibi bor bileşikleri ve redüktan olarak argon veya hidrojen gaz kullanılarak, 800–1000 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10^{-2} Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır (Uluköy, 2005; Barış, 2007). Diğer borlama işlemlerinin çevreye kirletici etkisi nedeniyle son yıllarda plazma borlama işlemi daha yoğun olarak çalışılmaktadır (Bayça ve Şahin, 2004). Bu yöntem Almanya’da otomotiv sektöründe kullanılmaya başlanmasıyla üstün özellikleri nedeniyle endüstrinin dikkatini çekmiş ve artan ilgiyle araştırmalar yoğunlaşmıştır (Uluköy, 2005).

Plazma borlamanın avantajları: Yüksek enerji etkinliği, minimum çarpılma, düşük işlem sıcaklığıdır (Hunger, 1997). Bilinen borlama işlemlerinde (katı, sıvı, gaz) tabaka kalınlığı ve homojenliği kontrol edilemezken, plazma borlamada mümkündür (Barış, 2007). Kompleks parçalarda homojen difüzyon tabakası, sertlik ve yüzeyde tek fazlı Fe_2B tabakası elde edilebilmesidir (Barış, 2007). Plazma borlamanın dezavantajları ise: BCl_3 ve B_2H_6 gazları kullanılmasıdır. Bu gazlar, pahalı, zehirli, patlayıcıdır ve korozyona neden olmaktadır (Hunger, 1997; Bayça ve Şahin, 2004; Barış, 2007).

1.3.2. Borlanabilen Malzemeler

Endüstride geniş bir uygulama alanı bulan borlama işlemi demir esaslı alaşımların hemen hepsine ve bazı demirdışı alaşımlara (Ersöz, 2008) bu alaşımların toz metalurjisi yöntemiyle üretilen toz metal ürünlerine, bazı süper alaşımlara ve sermetlere (Ulutan, 2007) uygulanabilir. Yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, sade karbonlu çelikler, paslanmaz çelikler, sinterlenmiş takım çelikleri, temperlenmiş çelikler, takım çelikleri, korozyona dayanıklı çelikler, Armco demiri, gri dökme demir ve küresel grafitli dökme demir borlama işlemi için uygun malzemelerdir. Buna ilaveten borlama, nikel, kobalt, molibden ve titanyum esaslı alaşımlara da uygulanmaktadır (Bindal; 1991; Ersöz, 2008; Başman, 2010). Ayrıca, sinterlenmiş karbürlerin yüzeyleri borlanarak, aşınma dirençleri artırılabilir. Yumuşak kobalt ve nikel bağlayıcıların yüzeylerinde borür fazları oluşturmak mümkün olup, son yıllarda seramiklere de bor kaplamalar uygulanmaktadır (Ersöz, 2008).

Yeni geliştirilen metotlar ile Cu ve alaşımlarına da borlama işlemi uygulanabilmektedir (Özer, 2011). Fakat; alüminyum, silisyum ve azotlu yatak çeliklerinde, düşük ergime sıcaklığından dolayı lokal erimeler meydana gelmesi (Bozkurt, 1984) ve kırılğan borür fazları oluşturmaları sebebiyle, borlama için uygun malzemeler değildir. Aynı şekilde, içerdikleri kükürt ve kurşun gibi alaşım elementlerinin borür tabakasının kalkmasına ve çatlamasına sebep olması nedeniyle bu çeliklerin borlanması tavsiye edilmemektedir (Shina, 1991; Yapar, 2003; Ersöz, 2008).

1.3.3. Alaşım Elementlerinin Borlama İşlemine Etkisi

Alaşım elementleri borür tabakası ile matris ara yüzeyindeki kristallografik düzeni ve faz bileşenlerini etkilemektedir. Aynı şekilde alaşım elementleri altlık malzemedeki ana elementin bor'a karşı olan aktivitesine, yani borun difüzyonunu azaltarak ve reaktifliğine tesir ederek, genellikle tabaka kalınlığını azaltıcı yönde etki etmektedir. Nitekim saf demirde tabaka kalınlığı, alaşımlı çeliklerdekinden daha yüksektir. Ayrıca alaşım elementleri kaplamanın özelliklerini değiştirmektedir (Bozkurt, 1984; Sinha, 1991).

Paslanmaz çelik malzemeler üzerine yapılan borlamalarda, yüzey üzerinde nikelin düşük çözünürlüklü olduğu bor tabakası olduğu ve fazla nikelin bor tabakasının altında nikelce zengin tabaka oluşturmak üzere yapıya difüze olur. Cr elementinin birazı bor tabakasında çözünürken geri kalanı nikelce zengin tabaka ve bor tabakaları arasında kromca zengin bir tabaka oluşturmak üzere içeri difüze olur (Yoon, et al., 1999; Özdemir, 2009).

Borlanan malzemedeki alaşım elementleri, atom numaralarına ve çaplarına bağlı olarak reaktivite gösterirler (Şen, 1998). Atom numaraları demirin atom numarasından küçük olan krom ve mangan ana malzemenin içinde yüzeye doğru yayınırken. Nikel ve karbon yüzeyden içeriye doğru yayınır. Karbon çeliklerinde genellikle yüzeyde kolonsal yapıda büyüyen borür fazları oluşurken yüksek alaşımlı çeliklerde alaşım elementlerinin etkisinden dolayı arayüzey yapısının düz olduğu birçok araştırmacı tarafından belirtilmiştir. Alaşım elementlerinin etkileri şu şekildedir (Şen, 1998; Özbek, 1999).

Karbon: Karbon, hem borür tabakasına, hem de tabaka/matris arayüzey morfolojisine etki etmektedir. Borür tabakasında önemli bir çözünürlüğü olmayan karbon atomları, borür

tabakası boyunca difüzyona uğramaz, borlama süresince yüzeyden matrise doğru sürüklenir ve borür tabakasının hemen altındaki geçiş bölgesinde Fe_3C , Cr_{23}C_6 , Fe_6C_3 , gibi karbürlerin oluşumuna sebep olur. Çeliklerde borür tabakasında oluşan FeB ve Fe_2B fazlarının sertlikleri karbon yüzdesinin artışına bağlı olarak artmaktadır. Bu artış %0,4 C'a kadar devam eder, daha sonra sabit kalır. Az ve orta karbonlu çeliklerde borür tabakası kolonsal bir yapıya sahip olurken, yüksek karbonlu çeliklerde borür tabakası /matris arayüzeyinin düz bir yapıya sahip olduğu ve karbonun borun difüzyonunu zorlaştırdığı belirtilmiştir (Sinha, 1991; Şen, 1997; Özbek, 1999; Özer, 2011).

Krom: Krom, çeliklerde borür tabakasının hem morfolojisine hem de derinliğine etki etmektedir. Ana malzemedeki krom içeriğinin artması kromun bor'a olan affinitesinden dolayı zengin reaksiyon oluşumunu sağlar, borit derinliklerini düşürür, kaplama/yüzey arayüzeyini düzleştirir veya yumuşatır (Sinha, 1991). %4 Cr içeren çeliklerde kolonsal (asiküler) karakterde ve derinliği 65–95 μm kalınlıklı borür tabakaları elde edilirken, %12 krom içeren çeliklerde ise 65 μm kalınlığında ve düz karakterde borür tabakası elde edilmektedir. %26 Cr içeren çeliklerde ise borür tabakasının kalınlığı birkaç tanesi hariç 5 μm ' yi aşmamaktadır. Krom atom numarası demirden düşük bir element olduğundan borca en zengin olan (Fe, Cr)B'ye öncelikle ve sistematik olarak matrsten faza girerek yüzeye doğru yayınmaktadır. Kromlu alaşımların borür tabakalarının karakterleri kromsuz alaşımlar ile mukayese edildiğinde, kromlu alaşımların karbon yüzdelereine bağlı olarak borür tabakalarının çok daha ince oldukları ve oldukça düzgün bir borür tabakası/matris ara yüzeyine sahip oldukları görülmüştür. Çeliklerin borlanmış tabakalarında mevcut (Fe, Cr)B ve (Fe, Cr) $_2$ B fazlarının sertliği, krom miktarının artmasıyla sistematik olarak artar. Bu fazların sertliklerini ölçmek çok zordur. Ara yüzey bölgelerinde elde edilen sertlik ölçümleri kaplama tabakası sertliğinden daha düşük değerler vermektedir. Ayrıca kromun çok fazla olmasa bile kırılma tokluğunu düşürdüğü belirtilmiştir (Bindal, 1991).

Nikel: Yüksek nikel içerikli çeliklerde dişli yapıda ve borür tabakası kalınlığında bir azalma oluşabilmektedir. Borür tabakasındaki azalma, nikel demir borürler içerisinde çok düşük bir çözünme eğilimi gösterirken krom matrsten borürlerin içerisine girdiğinden, daha az olmaktadır (Bindal, 1991). Nikel yoğun bir şekilde bulunur, Fe_2B tabakasından girer ve bazı durumlarda FeB tabakasından Ni_3B çökmesini ilerletir. Ayrıca Fe_2B tabakasına karşılık gelen alttaki bölgeden yüzeyi güçlü bir derecede ayırır. Fe-14Ni ve östenitik

paslanmaz çeliklerin her ikisindeki bu bölge oldukça belirgindir. (Sinha, 1991)

Silisyum ve Alüminyum: Ana malzemedeki Al ve Si elementleri borür tabakasında çözünemez ve bor atomlarının difüzyonu sırasında yüzeyden içerilere doğru itilirler. Difüzyon bölgesinde Fe₂B fazının altında birikerek, ferritik yapıya sahip bir bölge oluştururlar. Bu ferritik bölge çok yumuşaktır ve sertleştirilemez. Oldukça sert borür tabakasının altında yer alacak taban malzemesinden daha yumuşak bir bölge, kaplanan malzeme yüksek gerilmelere maruz kaldığında sert borür tabakası kuvvetin etkisiyle yumuşak ferrit bölgesine itilecek ve borür tabakasının parçalanmasına sebep olacağından yüksek miktarda Si ve Al içeren çelikler borlamaya uygun değildirler (Shina, 1991; Ersöz, 2008).

Krom ve mangan atom numaraları demirden daha düşük olduğundan borlanan malzemenin içinden yüzeyine doğru yayınırlar. Oysa nikel ve karbon, krom ve manganın tersi yönünde yayınmaktadır (Bindal, 1991). Ayrıca manganın kırılma tokluğuna olumlu, kromun ise olumsuz etki ettiği düşünülmektedir (Selçuk vd., 2003).

Manganez, tungsten, molibden ve vanadyum da karbon çeliklerinde, bor tabakası kalınlığını azaltır ve dişli yapıyı düzleştirir (Sinha, 1991).

1.3.4. Borür Tabakası

Borlama işleminde, borun yzeje yayınması sonucu parçanın en st bölümünde bileşik tabaka adı verilen borlu bölge, onun altında yayınma (geçiş) bölgesi ve en iç kısımda ise matrisi oluşturan çekirdek bölgesi yer alır. Demir esaslı malzemelerde yüzeyde borca zengin FeB en üstte oluşurken, onun hemen altında daha homojen ve sünek olan Fe₂B olmak üzere iki demirborür fazı meydana gelir (Bhushan and Gupta, 1991). Borlama işlemi sonunda oluşan tabakanın özellikleri, borlanacak malzemenin bileşimine, borlama yöntemine, borlama ortamına, ilave ısıl işlemlere (Er ve Par, 2004), borlama sıcaklığı ve süresi gibi işlem şartlarına bağlı olarak, ya düz bir formda veya dişli/kolonsal formda olabilir.

1.3.4.1. Borür Tabakasının Gelişimi

Demir esaslı malzemelerin borlanması sonucu oluşan tabaka, genellikle demir borürlerin çekirdeklenmesi ve gelişmesi şeklinde meydana gelmektedir. Demir borürler termal ve elektrik iletkenliği gibi metal özelliklerinden başka, yüksek sertlik gibi tipik seramik özellikleri de gösteren bileşiklerdir. Demir borürler, kullanılan malzemeler ve işlem şartlarına bağlı olarak tek fazlı ya da birden fazla fazlardan oluşabilirler. Borür tabakasının oluşumunda başlangıç noktaları, tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukları gibi mikro hatalar ile yüzey pürüzlülükleri ve çizikler gibi yüzeyin daha reaktif olduğu yerlerdir. Bu noktalarda Fe_2B çekirdekleri oluşur ve gelişirler. Yüksek saflıktaki demirde olduğu gibi demir-bor reaktifliğinin düşük olduğu şartlarda da, bu noktalardan sadece birkaçı reaksiyona girer ve gelişigüzel çekirdekler meydana gelir. Ortamın bor potansiyelinin daha yüksek olduğu durumda, metal yüzeyindeki daha az reaktif noktalarda devreye girerek, sürekli bir tabaka elde edilir. Fe_2B fazının dış yüzeylerinde FeB ve FeB_{1+X} bileşiklerinin meydana geldiği tespit edilmiştir (Özsoy, 1996). Demir borür tabakalarının büyümesi, genelde difüzyon kontrollü bir prosestir (Bindal, 1991). Oluşacak borlu tabakaların kalınlığı, yayınma kanunlarına uygun olarak borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak parabolik ($x^2 = D.t$) bir artış göstermektedir (Uslu, 2004).

Yapılan araştırmalarda, borür tabakasının oluşumu konusunda genel olarak savunulan nokta, işlemin difüzyon kontrollü olmasıdır. Bu sebeple, bazen termokimyasal terimi yerine termodifüzyon kelimesi de kullanılmaktadır. Fakat borlama ile ilgili farklı büyüme mekanizmaları da öne sürülmektedir (Signal, 1977; Brakman, 1989; Shina, 1991).

Borür tabakasının gelişimini anlatan başka bir mekanizma ise uçtan büyüme mekanizmasıdır. Bu mekanizmaya göre başlangıçta oluşan Fe_2B çekirdeği iğnesel bir şekilde büyür ve bor gradyanı boyunca yönelir. Bu durumda Fe_2B çekirdeğinin uç kısımlarında oluşan bölgesel yüksek gerilim alanları ve kafes distorsiyonları tabakanın kolonsal olarak büyümesini sağlar (Soydan, 1996).

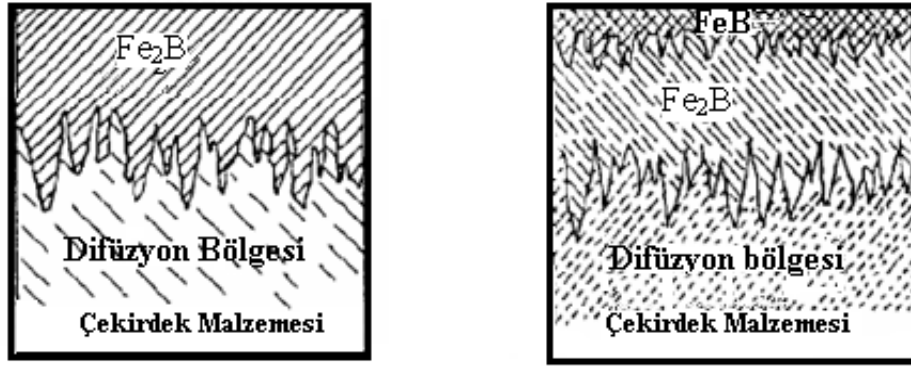
Çok fazlı borür tabakalarında Fe_2B üzerinde FeB 'nin büyüme mekanizması demir üzerinde Fe_2B 'nin büyümesi ile aynıdır. Ancak aynı tabaka için FeB/ Fe_2B ara

yüzeyindeki kolonsallık, Fe_2B / matris ara yüzeyine göre daha düşüktür. Fe_2B sünek bir matriste (geçiş bölgesi) büyürken, Fe_2B matrisi üzerinde büyüyen FeB daha sert bir yapıda büyür. Bu durum FeB'in Fe_2B 'den daha sert olabileceğini gösterir (Başman, 2010). Bu farklılıklar, ara yüzeylerde çok farklı bölgesel gerilmelere ve kafes distorsiyonlarına sebep olur (Özsoy, 1996). Borürlerin büyümesi sonucu meydana gelen farklı bölgesel gerimler ve kafes distorsiyonları 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 açıdan zayıf olabileceği düşünülmektedir (Soydan, 1996; Özsoy, 1996; Yapar, 2003).

1.3.4.2. Borür Tabakasının Yapısı

Borlama sırasında uygulanan yöntem, borlama kaynağı, borlanan malzemenin cinsi ve borlama sırasındaki işlem parametreleri borür tabakasının şekli ve özelliklerine etki eden faktörlerdir. Çeşitli borlama yöntemleri ile 14 farklı yapıda borür tabakası elde edilebilmektedir (Başman, 2010).

Alaşımsız çeliklerde borlama şartlarına bağlı olarak tek fazlı (Fe_2B) ya da çok fazlı ($\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$) borür tabakası oluşur. Borlama ortamındaki bor miktarı Fe_2B fazı oluşumu için gerekli olan miktardan fazla ise uygun sıcaklık ve zaman şartlarında borür tabakasında Fe_2B fazına ilaveten FeB fazı da oluşur. Alaşımlı çeliklerde ise bunlara ilaveten alaşım elementine bağlı olarak CrB, Cr_2B , TiB_2 , Ni_2B , NiB_2 , CoB gibi bileşiklerden biri ya da birkaçı oluşabilir (Selçuk, 1994; Özdemir, 2009). Şekil 1.5' de tek fazlı ve iki fazlı borür tabakaları görülmektedir. İki fazlı borür tabakalarında açık renkli olan faz Fe_2B koyu renkli olan da FeB' ten oluşur. FeB fazı birleşik tabakanın üst kısmını, Fe_2B ise alt kısmını oluşturur.



Şekil 1.5. Tek ve iki fazlı borür tabakalarının şematik görünüşü (Selçuk vd.1995).

Borür tabakasının karakteristik özelliği alaşımsız çeliklerde dış şeklinde bir yapıya sahip olmasıdır. Difüzyon mekanizmasının yüzeyden içeri doğru olmasından dolayı dış benzer bir yapı oluşur, özellikle saf demir veya alaşımsız düşük karbonlu çeliklerde bu yapı açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Fakat karbon ve/veya alaşım elementlerinin miktarlarındaki artışla bor difüzyonu yavaşlamaktadır. Azalan bor difüzyonu ile oluşan borür tabakasında hem kalınlık azalmakta, hem de borür tabakası ile ana malzeme ara yüzeyindeki dış şeklindeki yapı düzleşmektedir (Bozkurt, 1984; Özer, 2011).

1.3.4.3. Geçiş Bölgesi

Geçiş bölgesi, borlanmış metalde borür tabakası ile ana metal arasındaki ara bölgeyi tanımlar. Geçiş bölgesi ile alakalı farklı görüşler olmakla birlikte yaygın olan görüş, borlama sonucu oluşan borür tabakasında karbon çözünemediği için metalin yapısında bulunan karbon, bor difüzyonu sırasında yüzeyden iç kısımlara itilir. Bunun sonucu olarak karbonca zengin geçiş bölgesi oluşur (Matuschka, 1980).

Geçiş bölgesi, mikroyapı itibarı ile esas malzeme yapısından farklı bir görünüme sahiptir ve borür tabakasına göre daha kalındır (Bozkurt, 1984). Borür tabakası tarafından karbonun içeriye doğru itilmesi sonucunda, geçiş bölgesinde, esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunacağı, çeşitli araştırmacılar tarafından ileri sürülmektedir. Bu bölgedeki bor dağılımını otoradyografi yöntemi ile inceleyen (Berzina vd., 1984), geçiş bölgesi kalınlığının, normal metalografik yöntemle belirlenene göre daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Aynı yöntemi kullanan (Bozkurt, 1984), geçiş bölgesinin, borür

tabakasından 10-15 kat kadar fazla bir kalınlığa sahip olduğunu ve bu bölgedeki tane boyutunun ana malzemeye göre daha büyük olduğunu tespit etmiştir (Bozkurt, 1984).

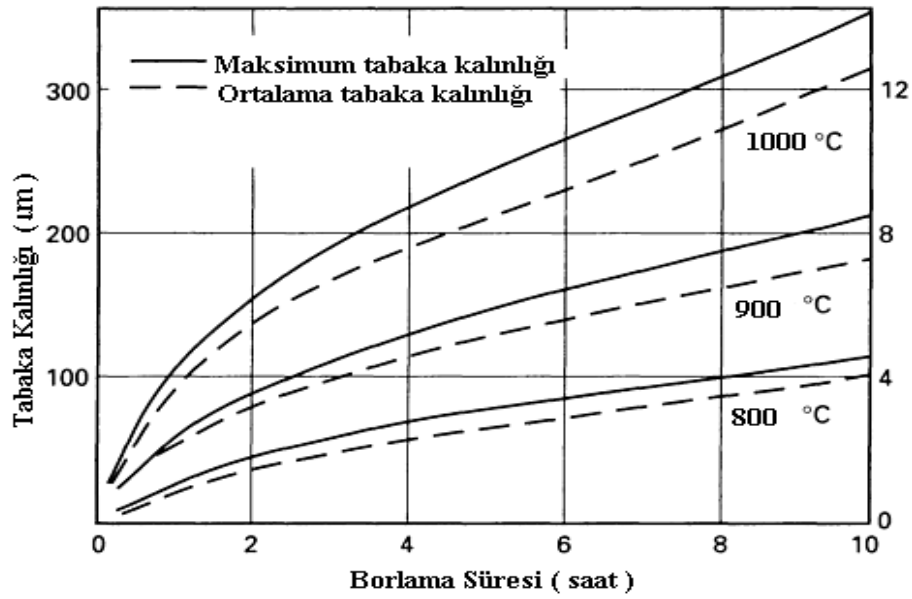
Geçiş bölgesi hakkında farklı bir yaklaşım ise; bu bölgedeki borun çeliklerde alaşım elementi olarak gösterdiği etkiyi göstermesinden kaynaklanan farklı özelliklere sahip olmasıdır. Bu bölgenin ısıtılma işlemi hassasiyeti, borun östenit dönüşümünü yavaşlatmasındandır. Ayrıca bu bölgede gözlenen östenit tane irileşmesi de, borun alaşım elementi olarak çeliklerde gösterdiği tipik özelliklerdendir (Bozkurt, 1984).

1.3.5. Borür Tabakasının Özellikleri

Borür tabakaları; kalınlıkları, sertlikleri, aşınma, korozyon dayanımları ve çok fazla yapılar da oluşan iç gerilmeler ile karakterize edilirler.

1.3.5.1. Tabaka Kalınlığı

Borlanan malzemenin kimyasal bileşimi, borlayıcı ortamın kaynağı, işlem şekli, sıcaklık ve süre borür tabakasının kalınlığına etki eden faktörlerdir. İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığın (1149 °C) altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda malzeme yüzeyinde bölgesel erimeler meydana gelir (Bozkurt, 1984). Zaman faktörünün ise ekonomik açıdan belli bir değeri geçmemesi gerekmektedir. Şekil 1.6’da Ck 45 çeliği ve Ekabor-I tozu kullanılarak yapılan çalışmada tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi gösterilmiştir. Artan sıcaklık ve süre ile oluşan borür tabakasının kalınlığı da artmaktadır.



Şekil 1.6. Ekabor-I ile borlanmış Ck 45 çeliğinin tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklıkla değişimi (Matuschka, 1980).

Tabaka kalınlığını sınırlayan bir diğer faktörde kırılgenliktir. Tabaka kalınlığı arttıkça kırılgenliği da artacağı için özellikle çift fazlı tabakalarda kalınlığın fazla olmaması gerekmektedir (Fichtl, 1981).

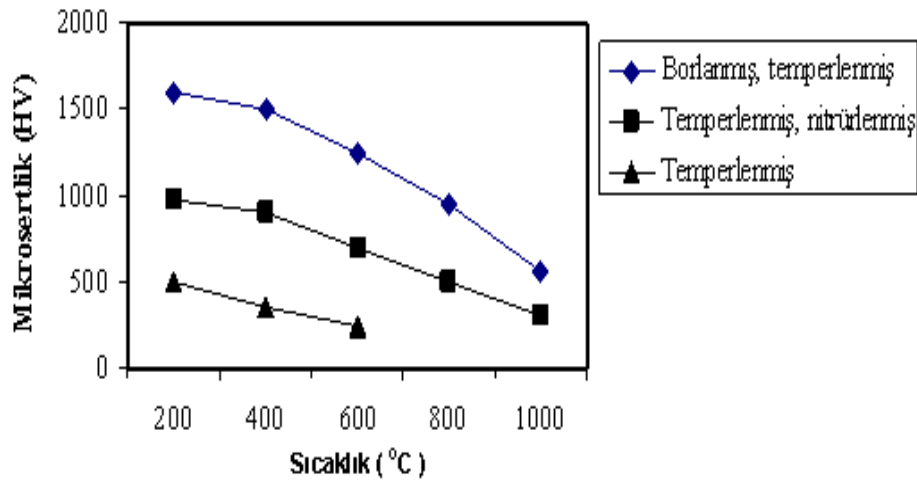
Çelik esaslı malzemeler için kullanım şartlarına göre 20–200 µm tabaka kalınlığı uygundur. Kırılgenlik yönünden alaşımlı çeliklerde 100 µm, alaşımsız çeliklerde 200 µm kalınlığa, hatta darbesiz aşınmaya maruz parçalarda su vermemek kaydıyla 400 µm kalınlığa çıkılabilmektedir. Borlama sıcaklığının artması tabaka kalınlığını arttırmasına ilaveten poroziteyi de arttırarak tabakanın gevrekliğine yol açar (Selçuk, 1994).

1.3.5.2. Tabaka Sertliği

Borlamanın en önemli karakteristiği sertlik üzerine olup, sertlik ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak borür fazlarına bağlıdır. Borlama ile çok yüksek ergime sıcaklıklı (1450-5000 HV) faz yapısından oluşan borür tabakaları elde edilebilmektedir. Borlama işlemi ile elde edilen FeB fazı Fe₂B'den daha sert fakat daha gevrek yapıdadır (Özbek, 1999; Akbayır, 2005; Gürkan, 2007).

Borlanmış malzemelerde mikrosertlik ölçümleri tabaka boyunca yapılır. Sertlik ölçümleri mikrosertlik yöntemi ile Vickers veya knoop uçları kullanılarak tabaka boyunca yapılır. Yüzeyden ana malzemeye doğru sertlikte düşme görülür. Bunun nedeni borun ancak difüzyon zonuna kadar gelebilmesi ve bu bölgelerde sert bileşikler oluşturmalarıdır (Matuschka, 1980; Melendez, 1997). Ölçümlerde büyük yüklerin kullanılması çatlama ve dökülme gibi nedenlerden dolayı hatalı sonuçlara sebep olur. Ayrıca büyük yükler tabakanın bozulmasına ve tabakanın altındaki bölgenin deformasyonuna sebep olabilir. Genel olarak 50–100 gr yüklerle ölçüm yapılır (Özsoy, 1996).

Borlama ile elde edilen yüksek sertlik değerleri, 800–1000 °C' ye kadar yüksek sıcaklıklara kendini koruyabilir (Geller, 1978). Şekil 1.7'de 42CrMo4 çeliğinde elde edilen farklı yüzey tabakalarının dinamik yüksek sıcaklık sertlik değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 1.7. 42CrMo4 çeliğinde farklı yüzey tabakalarının dinamik sıcaklık sertlikleri (Fichtl, 1987).

1.3.5.3. Borür Tabakasının Aşınma Dayanımı

Aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısı bir sistem özelliği olmakla beraber malzeme sertliği ile doğrudan ilgilidir. Genellikle yüksek aşınma direnci için malzemenin aşındırıcıdan daha sert ve sürtünme katsayısının düşük olması istenir. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma dirençleriyle karakterize edilirler. Bundan dolayı özellikle yüksek mertebede abrasiv ve adhesiv aşınmaya ve erozyona maruz

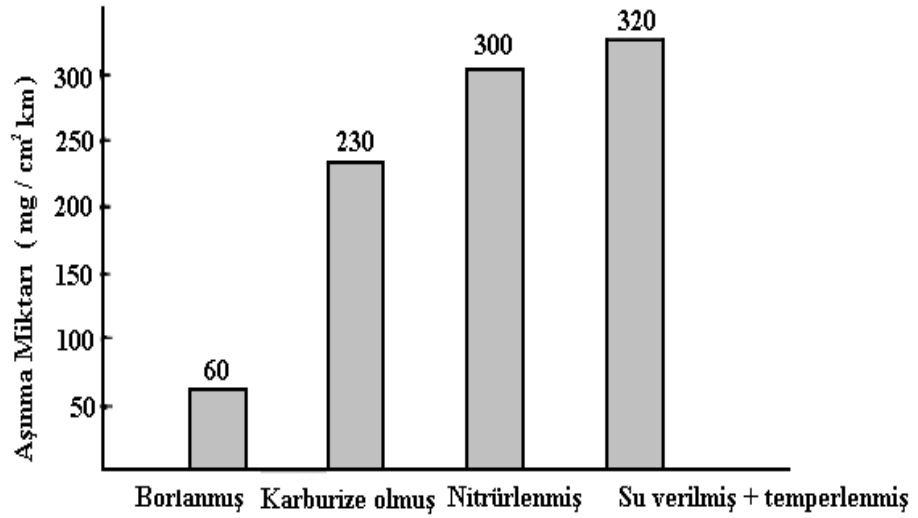
makine parçalarının ve sistem elemanlarının borlanması teknik ömrün uzatılmasında önemli katkılar sağlar.

Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu, ince bir oksit filmi oluşturmakta, bu oksit filmi yüzeyde yağlayıcı vazifesi görerek sürtünme katsayısını düşürerek yüzeylerin birbirine kaynamasını önlemektedir (Karamış vd., 1995). Borlama ile WC'ün sertliğine eşdeğer sertlik, teflonun (PTFE) sürtünme katsayısına yakın sürtünme katsayısı elde edilir (Linial and Lavella, 1974). Tablo 1.2' de bazı malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları verilmiştir.

Tablo 1.2. Bazı malzemelerin borlanmış ve borlanmamış durumdaki sürtünme katsayıları (Bozkurt, 1984).

Malzeme	Sürtünme Katsayısı	
	Borlanmış	Borlanmamış
Düşük Karbonlu Çelik	0,17-0,19	0,585-0,595
Takım Çeliği	0,07 - 0,04	0,16-0,18
WC + Co Sinter Malzeme	0,1939 - 0,2335	0,261-0,277

Borlanmış çeliklerin aşınma dirençleri sementasyon, nitrürasyon, sert krom kaplama ve su vererek sertleştirme ile elde edilen yüzeylere göre oldukça yüksektir. Şekil 1.8'de bu durum gösterilmiştir. Darbesiz aşınmanın söz konusu olduğu uygulamalarda, borlama ile yüzeyi sertleştirilmiş malzemeler başarı ile kullanılmaktadır. Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı, sementasyonda sertleştirilmiş tabakanın yumuşamasına sebep olurken borlu tabakaya etki etmez (Karamış vd., 1995).



Şekil 1.8. Düşük karbonlu çelikte farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin aşınma davranışları (Ayter, 2005).

Borlanmış yüzeylerin aşınma açısından üstünlüğü, gerek çalışma ortamından kaynaklanan, gerekse kayma sürtünmesi sonucu ortaya çıkan ısı, borlu tabakaların sertliklerinde ve aşınma dayanımlarında büyük bir düşüşe neden olmamasıdır (Eyre, 1975).

Borlamanın aşınma dayanımına etkilerini araştıran araştırmacıların hemen hepsi, borlamanın aşınma dayanımını artırdığı sonucuna varmışlardır. Bu çalışmalardan önemli görülenleri aşağıda verilmiştir.

Gürkan (2007), 900 °C’de 5 saat süre ile borlama işlemi uyguladığı AISI 304 östenitik ve AISI 420 martenzitik paslanmaz çelikleri oda sıcaklığı, 300 ve 600 °C’de aşınma deneylerine tabi tutmuştur. Tüm sıcaklık parametrelerinde borlanan numunelerin daha iyi aşınma davranışı gösterdiğini belirtmiştir. Oda sıcaklığındaki deneyler sonucu borlanmış numunelerde daha çok adhesiv aşınma mekanizmasının hâkim olduğu, sıcaklığın artmasıyla oksit tabakaları meydana geldiği, 600 °C’de hem bor kaplanmış hem de kaplanmamış numune yüzeylerinde adhesiv ve abrasiv aşınma davranışlarının her ikisinin de gözlendiğini belirtmiştir. Artan sıcaklık süresi ile aşınma hızının tüm numunelerde arttığı sürtünme katsayısının ise azaldığını belirtmiştir. Artan sıcaklığa bağlı olarak aşınma hızında, borlanmamış paslanmaz çelikte oda sıcaklığına göre 7-8 kat artış meydana gelirken. borlanmış malzemelerde bu artış 2-3 kat olmuştur.

Moore (1974), abrasiv aşınma direnci ile sertlik arasında doğrusal bir ilişki olduğunu, ancak malzeme mikroyapısının aşınma dayanımında sertlikten daha fazla bir etkiye sahip olduğunu belirtmiştir. Er ve arkadaşları (2004) yaptıkları çalışmada, borlanmış sade karbonlu AISI 1030 ve 1050 çeliklerinin işlemsiz hallerine göre yüzey sertlik ve abrasiv aşınma dayanımlarında oluşan değişimleri incelemişlerdir. Borlama sonucu malzemelerin yüzey sertlik değerlerinin işlemsiz durumlarına göre yaklaşık 8 – 10 kat arttığı, tabaka kalınlıklarının ise aynı malzeme için artan işlem süresinin tabaka kalınlığının düzenli olarak artmasına neden olduğu gözlenmiştir. AISI 1030 ve 1050 ile yapılan abrazif aşınma deney sonuçları incelendiğinde borlanmış çeliklerin alüminyum oksit aşındırıcısına karşı çok büyük oranlarda abrazif aşınma dayanımı kazanmış oldukları belirlenmiştir. Bu malzemelerin işlemsiz hallerinin aşınma davranışları incelendiğinde artan karbon miktarıyla artan yüzey sertliğinin abrazif aşınma dayanımını olumlu yönde etkilediğini gördüler. Aynı malzemede artan borlama işlem süresiyle, borlu tabaka kalınlığının artması aşınmanın azalmasına neden olurken; farklı karbon miktarına sahip iki malzeme karşılaştırıldığında elde edilen borür tabakalarının yaklaşık aynı aşınma davranımı elde etmişlerdir.

Eyre (1975), karbürleme ve borlama işlemi uygulanmış malzemelerin aşınma davranışlarını karşılaştırmıştır. Sementasyon işlemi uygulanmış çelikteki (800 HV) adhezif aşınma direncinin normalize edilmiş (220 HV) EN1A çeliğinden daha iyi olmadığını, dolayısıyla sertlikle adhesiv aşınma arasında doğrudan bir ilişki kurulamayacağını, adhesiv aşınmanın yüzeyler arasındaki kimyasal uyumsuzlukla ilgili olduğunu belirtmektedir. Eyre (1975), borlamanın karbürlemeye özellikle geçiş bölgesi üzerindeki yüklemelerde adhesiv aşınma dayanımı açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve bu özelliği yüksek sıcaklıklarda dahi muhafaza ettiğini belirtmektedir.

Subrahmanyam (1984), değişik fazlara sahip borür tabakasının aşınma davranışlarını incelemiş ve homojen olmayan mikro yapılarından iki fazlı tabakaların aşınma dayanımlarının, daha kötü olduğunu ve yine yüzey tabakalarına bağlı olarak aşınma mekanizmalarının farklılık gösterdiğini belirlemiştir. Takeuchi ve arkadaşları (1979) ise, FeB, Fe₂B tabakalarının benzer aşınma özellikleri gösterdiğini ve borlanmış çeliklerin aşınma davranışlarını etkileyen en önemli faktörün, yüzeyde oluşan koruyucu oksit filmleri olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Borlanmış X165CrMoV12 çeliğinin kavitasyon direncini belirlemek için yapılan deneylerde borlanmış 2000-2100 HV_{0,02} yüzey sertliğine sahip numuneler, borlanmamış numunelerle aynı şartlarda titreşimli kavitasyon deneyine tabi tutulmuşlardır. Yapılan deneyler neticesinde; tarif edilen kavitasyon sistemi için 1700 saatlik bir kavitasyon zorlamasına kadar borlanmış numunelerin borlanmamışlara kıyasla yaklaşık 4 kat daha fazla kavitasyon direncine sahip olduğu gözlenmiş olup bu artışın kısa süreli kavitasyon zorlamaları için geçerli olduğu ifade edilmektedir. Uzun süreli bir kavitasyon etkisinde ise yüzey bölgesinden sert borür parçacıklarının mikro jet ve yüksek frekanslı basınç dalgasının etkisi ile mikro bloklar halinde koparılmaya başlaması sonucu kavitasyon direncinin hızla düşmeye başladığı ifade edilmektedir (Demirci, 1996).

Sıcak iş takım çeliği H13 numuneler, 1050°C'de ısıtılarak havada soğutulmuş ve 590°C'e temperlendikten sonra 850°C'de 2 saat süreyle borlanmıştır. Bu numuneler 20, 200 ve 400°C'de 300 µm tane boyutunda SiC parçacıkları tarafından hava akımında eroziv aşınmaya tabi tutulmuştur. Deney sonucunda borlanmış numunelerin bütün sıcaklıklarda aynı şartlarda deneye tabi tutulan nitrürlenmiş ve Ni-P kaplanmış numunelere nazaran en yüksek eroziv aşınma direnci sergilediği görülmüştür (Tsipas, 1987). Eroziv aşınma üzerine yapılan bir diğer çalışma da Yıldızlı ve arkadaşları (2003), borlanmış AISI 1020 çeliğinin eroziv aşınma testlerini 30 m/s püskürtme hızı ve 90° çarpma açısında, 420µm grit partikül püskürtülerek gerçekleştirmişlerdir. Eşit sürelerde eroziv aşınmaya maruz bırakılan çeliklerde borlanmış numunelerin normalize edilmiş numunelere göre 5-9 kat aşınma direnci göstermiştir. AISI 1020 çeliğinin eroziv aşınma davranışına bor tabakasının sertliğinden ziyade tabaka kalınlığının etkiğini ileri sürmüşlerdir.

Borlama işlemi akademik çalışmalara paralel olarak, endüstride geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Çelikten yapılan kahve öğütme diskleri, borlandığında ömürleri beş kattan fazla artmaktadır. Dökme demirden yapılmış, tekstil makinesi parçalarının borlanması çok iyi sonuçlar vermektedir. Demiryolu yük vagonlarının sönümleme parçaları, genellikle 100000 km' den sonra aşınmaktadır. Bu parçalar borlandığında ömürleri, 200000 km'ye çıkmaktadır. Volkswagen Golf otomobillerinin dizel motorlarının yağ pompası dişlileri, borlanarak ömürleri arttırılmaktadır (Fichtl, 1981).

1.3.5.4. Borür Tabakasının Korozyon Dayanımı

Korozyon, metal ve alaşımlarının çevreleri ile kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonları sonucu bozulmasıdır. Korozyona karşı alınabilecek tedbirlerin başında da malzemeleri alaşımlandırma veya koruyucu kaplamalar ile kaplamak gelir.

Demir esaslı malzemelerin borlanması, bu malzemelerin bazı asit ve sıvı metallere karşı olan direncini büyük ölçüde artırmaktadır. Borlama işlemi ile metallere özellikle asidik sıvılar, deniz suyu ve yüksek sıcaklık ortamlarına karşı büyük dayanıklılık sağlanır. Özellikle H_2SO_4 , H_3PO_4 , HCl asitleri ile Al, Pb ve Zn metallerin sıvı banyolarında borlu malzemelerin korozyon dayanımları çok yüksektir. (Taşçı, 1993; Atik, 1997).

Bindal (1991), 1000 °C’de 3 saat süre ile borlanan 3 çeliğin (Tablo 1.3) 56 °C’de %10 H_2SO_4 çözeltisi içerisinde yüksek korozyon direncine sahip olduklarını saptamıştır. Benzer bir çalışmada 1000 °C’de 5 saat süre ile borlanmış Ç1040 çeliğini 56 °C’de %10 H_2SO_4 içerisindeki korozyon dayanımının esas malzemeye göre 8 kat daha fazla olduğu belirtilmiştir (Ayter, 2005) . Bindal (1991), yüksek Cr’lu çeliklerde borlama ile koruyucu krom oksit yerine daha az koruyucu olan CrB meydana geldiğinden dolayı yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmasıyla arzu edilen korozyon dirençlerinin elde edilmeyebileceğini belirtmiştir. 56 °C’de %10 H_2SO_4 içerisinde 1000 °C’de 3 saat borlama işlemine tabi tutulmuş 3 çeliğin korozyon direnci kıyaslamaları Tablo 1.3’de verilmiştir.

Tablo 1.3. Borlanmış çeliklerin H₂SO₄ çözeltisi içerisindeki korozyon dayanımları (Bindal, 1991).

Alaşım No*	Malzeme Durumu	Korozyon süresi (saat)	P ₀ ** (gr)	P ₁ ** (gr)	P ₀ -P ₁ ** (gr)	Ağırlık Kaybı (%)
1	Borlanmamış	1	6.2899	5.8262	0.4637	7.37
		2	5.8262	5.3866	0.9033	15.50
		3	5.3866	4.9898	1.3001	24.13
		4	4.9898	4.6001	1.6898	33.86
	Borlanmış	1	6.5143	6.4730	0.0413	0.63
		2	6.4730	6.3360	0.1783	2.75
		3	6.3360	6.0271	0.4872	7.68
		4	6.0271	5.6499	0.8644	14.34
2	Borlanmamış	1	4.2515	4.2141	0.3018	7.09
		2	3.9434	4.1438	0.5898	14.95
		3	3.6617	3.9660	0.8560	23.37
		4	3.3955	3.7308	1.1282	33.22
	Borlanmış	1	4.2343	4.2141	0.0202	0.47
		2	4.2141	4.1438	0.905	2.14
		3	4.1438	3.9660	0.2683	6.47
		4	3.9660	3.7308	0.5035	12.69
3	Borlanmamış	1	5.5441	5.2408	0.3033	5.47
		2	5.2408	4.9288	0.6153	11.74
		3	4.9288	4.6253	0.9188	18.64
		4	4.6253	4.2991	1.2450	26.91
	Borlanmış	1	5.5816	5.5635	0.0181	0.32
		2	5.5635	5.5266	0.0550	0.98
		3	5.5266	5.3551	0.2265	4.09
		4	5.3551	5.0526	0.5290	9.87
* Alaşım No		Bileşim (% Ağırlık)				
1		Fe-0.3 C-0.02 P				
2		Fe-0.3 C-0.02 P-0.5 Mn				
3		Fe-0.3 C-0.02 P-1 Mn				

** : P₀ - İlk Ağırlık P₁ - Son Ağırlık P₀-P₁ - Ağırlık Farkı

S. C. Singhal borlanmış çeliklerin korozyon dirençleri üzerine yaptığı çalışmalarda, borlamanın korozyon direncini artırdığı yönünde sonuçlar bulmuştur. 410 ve 203 tipi paslanmaz çelikler üzerinde yaptığı çalışmalarda, malzemelerini 95 °C sıcaklıkta, düşük asitliğe sahip suda bekletmiş, deney sırasında sisteme saf argon gazı göndermiştir. Belli aralıklarla, çözelti oda sıcaklığına soğutulmuş ve örnek çıkartılarak ağırlığı tartılmıştır. Korozyon testinden sonra yapılan metalografik incelemeler göstermiştir ki, kaplama yüzeyinde oluşan porozite ve çatlaklar suyun içeri penetre olmasına neden olmuştur. Bu da ana malzemenin hızlı korozyonuna neden olmuştur. Campos (2006) borür tabakasının korozyon direnci adlı çalışmasında: Borla kaplanmış çeliklerin korozyon direnci büyük oranda kaplamadaki gözeneklerin ve mikro çatlakların oranına bağlı olduğunu belirtmiştir. Gözenekli ya da çatlaklı borür tabakaları korozyon direnci zayıf olan esas

malzemeye korozyon ortamının (çözeltilinin) girişine izin verdiği, bunun sonucunda da büyük kütle kaybına neden olduğunu belirtmiştir.

410 ve 304 tipi paslanmaz çeliklerle yapılan korozyon deneylerinde ise korozyon hızının yavaşladığı ve daha düşük ağırlık kaybının meydana geldiği görülmüştür. 410 çeliğinin 20 saatlik korozyon deneyi sonrası, kaplamada deney sırasında mikro çatlaklar oluşmasından dolayı, ürün olarak kırmızı demir oluşmuştur. Borür tabakasında Cr miktarı arttıkça korozyon hızında düşme meydana gelmektedir. 304 çeliğinde ağırlık kaybı oldukça az olmuş ve 2500 saatlik deney sonrası malzemede herhangi bir korozyon ürününe rastlanmamıştır. Bunun nedeni 304 çeliğinin korozyona son derece dirençli %18 Cr içeren bir malzeme olmasına dayandırılmıştır (Signal, 1977; Matuschka, 1980).

Borlanmış malzemelerde oluşturulan borür tabakasının esas görevi oldukça sert yüzeyler ile malzemeyi korozyondan korumaktır. Toparlamak gerekirse; yüzeyi sertleştirilen düşük orta ve yüksek kromlu çeliklerin korozyon davranışları iyileşmekte, yalnız borür tabakasında çatlak olması durumunda, korozitif çözeltili borür tabakasının altına sızarak kaplama tabakasının dökülmesine neden olmaktadır. Bu durumda kütle kaybı daha fazla olmaktadır.

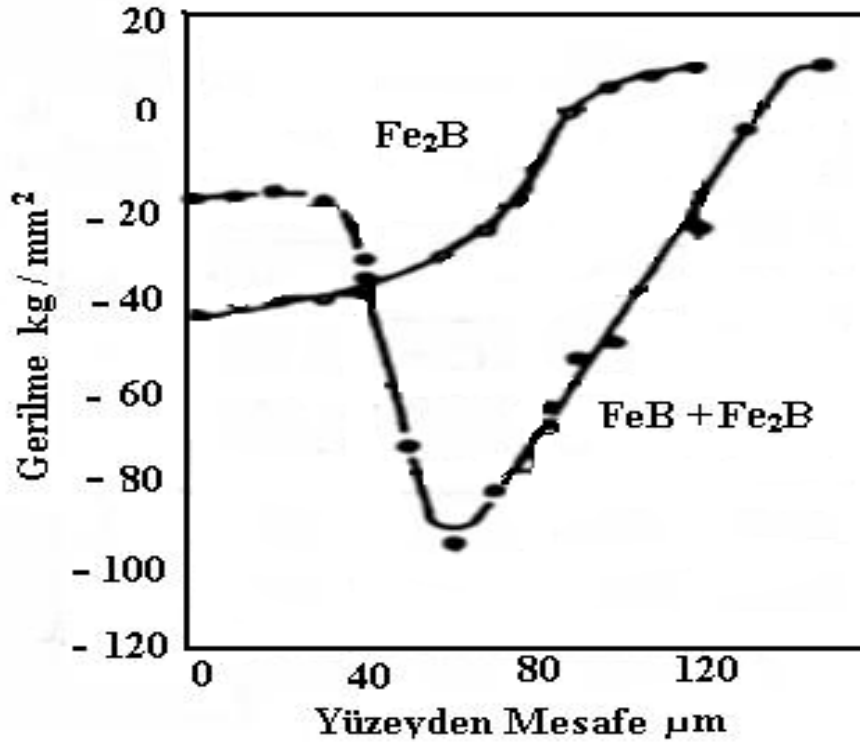
1.3.5.5. İç Gerilmeler

Metallerde borlama işlemi sonrası borür tabakasında ve borür tabakası–ana metal arasında Tablo 1.4’de verilen ısı genleşme katsayıları ve özgül hacim farklılıklarından dolayı iç gerilmeler oluşur. Bunların dağılımı ve şiddeti malzemenin kimyasal bileşimi, borlama şartları ve borlama sonrası uygulanan ısı işlemleri iç gerilmelere bağlı olarak değişiklik gösterir. Tabakanın faz yapısı (tek fazlı veya çift fazlı) ve geometrisi de (düz veya girintili çıkıntılı) iç gerilmelerin oluşumuna etki eder (Bozkurt, 1984). İdeal bir tabaka için tek fazlı ve tabaka geometrinin girintili çıkıntılı olması istenir. Bu tür gerilmeler tabakanın çatlayarak dökülmesine, aşınma dayanımı yanında diğer mekanik özelliklerin de kötü yönde etkilenmesine ve yüzeyin bozulmasına sebep olmaktadır (Signal, 1977). Tablo 1.4’de borür tabakasında meydana gelen yapılar, saf demire ve AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğe ait ısı genleşme katsayıları verilmiştir.

Tablo 1.4. Borür tabakası ve saf demir ve AISI 304 ait ısı genleşme katsayıları (Rile, 1974).

Malzeme	Isıl Genleşme Katsayısı
Saf Demir	$15,6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
AISI 304	$16,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
FeB	$23 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Fe ₂ B	$7,85 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Borlama sonucu soğuma esnasında çift fazlı (FeB+Fe₂B) borür tabakalarında, FeB ve Fe₂B fazlarının genleşme katsayıları farklı olması nedeniyle Fe₂B’de basma, FeB’de çekme kalıntı gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler dış etkenler (termal şok ve mekanik zorlamalar vb) etkisiyle, tabakanın çatlamasına ve FeB fazının pullanarak dökülmesine sebep olur (Soydan, 1996; Baştürk ve Erten, 2006). Tek fazlı ve çift fazlı tabakalardaki iç gerilme dağılımı Şekil 1.9 ’da gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Tek fazlı ve çift fazlı borür tabakalarındaki iç gerilme dağılımı (Baştürk ve Erten, 2006).

İç gerilmeler açısından en uygun dağılım, tek fazlı (Fe_2B) ve gerilmelerinin daha geniş bir alana yayılma imkânı bulduğu iğnemi geometriye sahip borür tabakaları ile elde edilir. Yapılan çalışmalar sonucunda, iç gerilmelerinin azaltılması için borlama sonrası ısıtma işlemleri yapılması, borlama sıcaklığının düşük tutulması ve soğutmanın hızlı yapılmasının olumlu sonuçlar verdiği belirtilmektedir (Baştürk ve Erten, 2006).

1.4. Bor'un Endüstriyel Uygulamaları

Bor'un sanayide çok çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır. Makine endüstrisinde özellikle aşınmanın büyük bir problem teşkil ettiği yerlerde kullanımı mevcuttur. Bor ürünlerinin kullanım sektörleri şöyledir (Anonim, 2003).

Tablo 1.5. Bor ürünlerinin kullanım sektörleri (Anonim, 2003).

KULLANIM ALANI	KULLANIM YERLERİ
Savunma Sanayi	Zırh Plakalar, Seramik Plakalar, Ateşli Silah Namluları, Fişek vb
Cam Sanayi	Borosilikat Camlar, Laboratuvar Camları, Uçak Camları, Borcam, Pyrex, İzole Cam Elyafı, Tekstil Cam Elyafı, Optik Lifler, Cam Seramikleri, Şişe, diğer Düz Camlar, Otomotiv Camları vb.
Elektronik ve Bilgisayar Sanayi	Mikrodalga tüpleri, Sensörler, Süper iletkenler, Yarı iletkenler, Magnetler, Elektron emitterleri, Mikro Chipler, LCD Ekranları, CD-Sürücüler, Akım Levhaları, Bilgisayar Ağlarında; Isıya-Aşınmaya Dayanıklı Fiber Optik Kablolar, Vakum Tüpler, Dielektrik Malzemeler, Elektrik Kondansatörleri, Kapasitörler, Gecikmeli Sigortalar, Bataryalar, Piller, Laser Printer tonerleri vb
Enerji Sektörü	Gaz türbinleri, Yüksek ısı transistörleri, Bor hidrür yakıtları(boranlar), Isı enerjisi depolayıcılar, Piller, Hidrojen depolayıcılar, Güneş Enerjisinin Depolanması, Güneş Pillerinde Koruyucu olarak, Hücre Yakıtları vb
Görüş Sistemleri	Kamera ve Mercek Camları, Fotoğraf Makinaları ve Dürbünler
İlaç ve Kozmetik Sanayi	Dezenfekte Ediciler, Antiseptikler, Diş Macunları, Lens Solüsyonları, Kolonya, Parfüm, Şampuan vb
İletişim Araçları	Cep Telefonları, Modemler, Televizyonlar vb.
İnşaat Sektöründe	Çimentoya Mukavemet Artırıcı ve İzolasyon Amaçlı olarak
Kağıt Sanayi	geri kazanılan kağıtların mürekkeplerinden arındırılması, Yüksek kaliteli kağıtların parlaklaştırılması, kağıt hamurunu beyazlatılması,
Kimya Sanayi	Bazı Kimyasalların İndirgenmesi, Elektrolitik İşlemler, Flotasyon İlaçları, Banyo Çözeltileri, Katalistler, Atık Temizleme Amaçlı olarak, Petrol Boyaları, Yanmayan ve Erimeyen Boyalar, Tekstil Boyaları, Yapıştırıcılar, Soğutucu Kimyasallar, Korozyon Önleyiciler, Mürekkep, Pasta ve Cilalar, Kibrit, Sabun, Toz Deterjanlar, Toz Beyazlatıcılar, Ağartıcılar, Parlaticılar, Ahşap empenye çözeltileri, Mumyalama vb
Koruyucu	Ahşap Malzemeler ve Ağaçlarda Koruyucu olarak, Boya ve vernik Kurutucularında, Küf ve mantar önleyiciler, vb.
Makine Sanayi	Manyetik Cihazlar, Zımpara ve Aşındırıcılar Kompozit Malzemeler, Titreşim söndürücü malzemeler, Sert malzemeler, Motorlar, Katı yağlayıcılar, Yüksek sıcaklık sızdırmazlık contaları, Yüksek performanslı motor yağları, vb.

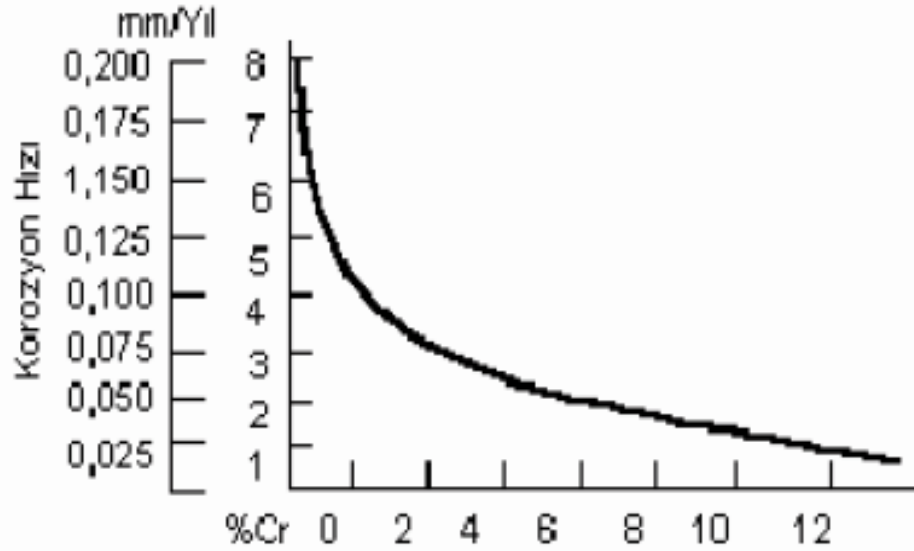
Metalürji	Kaplama elemanları, Yüksek sıcaklık refrakterleri, Kaplama Sanayiinde Elektrolit Olarak, Paslanmaz ve Alaşımli Çelik, Sürtünmeye-Aşınmaya Karşı Dayanıklı Malzemeler, Kaynak Elektrotları, Metalurjik Flaks, Briket Malzemeleri, Lehimleme, Döküm Malzemelerinde Katkı Maddesi olarak, Kesiciler, Kompozit Malzemeler, Zımpara ve Aşındırıcılar vb.
Nükleer Sanayi	Nükleer atık depolama (kolemanit cam bloklar), Reaktör Aksamaları, Nötron Emiciler, Reaktör Kontrol Çubukları, Nükleer Kazalarda Güvenlik Amaçlı ve Nükleer Atık Depolayıcı olarak, Nükleer teknolojiye emniyet malzemeleri, vb.
Otomobil Sanayi	Titreşim söndürücü malzemeler, Hava yastığı şişirme mekanizmaları, Bor hidrür yakıtları (boranlar), Isı enerjisi depolayıcılar, Hidrojen depolayıcılar, Hava Yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik Aksamda, Yağlarda ve Metal Aksamalarda, Isı ve Ses Yalıtımı Sağlamak Amacıyla, Antifrizler, vb
Seramik Sanayi	Emaye, Fayans, Porselen Boyaları, sırlar, vb
Spor Malzemeleri	Kayak Aksamaları, Tenis Raketleri, Ok-yay, Balık Oltaları, Golf Sopaları, Darbe söndürücüler, vb.
Tarım Sektörü	Sentetik gübreler, Biyolojik Gelişim ve Kontrol Kimyasalları, Küf ve mantar önleyiciler, Böcek-Bitki Öldürücüler, Yabani Otlar, vb.
Tekstil Sektörü	Isıya Dayanıklı Kumaşlar, Yanmayı Geciktirici ve Önleyici Selülozik Malzemeler, İzolasyon Malzemeleri, Tekstil Boyaları Deri Renklendiricileri, Dericilikte kireç çöktürücü, Suni İpek Parlatma Malzemeleri, vb.
Tıp	Yapay organlar, Antibiyotikler(boromicyn), Osteopoz Tedavilerinde, Alerjik Hastalıklarda, Psikiyatride, Kemik Gelişiminde ve Artiritte, Menopoz Tedavisinde, BNTC Terapi Yöntemiyle Beyin Kanserlerinin Tedavisinde tümör öldürücüler, Manyetik Rezonans Görüntüleme Cihazlarında, vb
Uzay ve Havacılık Sanayi	Sürtünmeye-Aşınmaya ve Isıya Dayanıklı Malzemeler, Roket Yakıtı, Uydular, Uçaklar, Helikopterler, Zeplinler, Balonlar, Radar dalgası soğurucular, vb

1.5. Paslanmaz Çelikler

Paslanmaz çelikler; içerisinde en az % 10,5 oranında (ağırlıkça) krom (Cr) içeren demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanırlar. Paslanmaz çeliğin yüzeyinde oluşan ince fakat yoğun krom oksit tabakası korozyona karşı yüksek dayanım sağlar ve oksidasyonun daha derine doğru ilerlemesini engeller (Odabaş, 2002; Baydoğan vd., 2003).

Paslanmaz çelikler, özellikle mükemmel korozyon dirençlerinden dolayı tercih edilirler. Mükemmel korozyon dirençlerinin sebebi yüksek krom içermeleridir. Demire yaklaşık % 5 krom eklenmesi bir miktar korozyon direnci sağlar, ancak genel olarak paslanmaz çelik elde etmek için demire en az % 12 Cr eklenmesi gereklidir. Krom

yüzeyde pasif bir oksit filmi oluşturarak demirin yüzeyini pasif hale getirir. Böylece metal alt katmanlarını korozyondan korumayı sağlar. Bu koruyucu filmi oluşturmak için paslanmaz çelik yüzeyin oksitleyici maddelerle temas etmesi şarttır. Şekil 1.10' da krom miktarının korozyon direncine etkisi gösterilmektedir (Erdoğan, 2001).



Şekil 1.10. Fe-Cr alaşımlarında Cr miktarının korozyon direncine etkisi (Erdoğan, 2001).

Paslanmaz çelik, adında anlaşılacağı üzere paslanmayan çeliklerin genel adıdır. Özellikle nikel ve molibdenli çeliğin paslanmazlık özelliğini iyileştirmek için alaşım yapımında kullanılsa da paslanmazlığı sağlayan temel element kromdur. Dünyada üretilen çeliğin büyük bir kısmı karbon ve alaşımlı çeliktir. Karbon ve alaşımlı çeliğe göre paslanmaz çeliğin, daha az, ama cazip ve büyüyen bir pazarı vardır.

Doğada yalnızca altın ve platin gibi metaller saf halde bulunur, normal metallerse diğer elementlerle birleşmiştir. Paslanma, bu yüzden tabii bir olaydır. Doğada demir cevheri şeklinde bulunan demir, bu nedenle dengesizdir ve paslanma eğilimindedir. Paslanma saf demirin suyun veya hava neminin varlığında oksijenle birleşmesidir. Herhangi bir koruyucu kaplamaya sahip olmayan karbon çeliği üzerinde bir pas tabakası oluşur ve çeliğin kalan bölümünü korur. Yüzeydeki pas tabakasının temizlenmesi durumunda yeni bir pas tabakası oluşur. Bu durum paslanma olarak isimlendirilir. Boyama, çinko kaplama (galvanizleme), epoksi reçinelerle yapılan değişik kaplamalar paslanma sürecini durdurur. Paslanmaz çelik farklı kullanım alanlarında koruyucu bir

kaplamaya sahip karbon çelikleri, alüminyum, pirinç ve tunçla rekabet etmektedir. Paslanmaz çeliğin rekabet gücü, benzersiz ve karizmatik özelliğinden kaynaklanır. Çelikteki kromun korozyona karşı koruyucu yeteneği, krom ile oksijen arasındaki büyük ilgiden dolayı meydana gelmektedir. Malzeme içerisindeki krom miktarı yeterli olduğunda çeliğin dış yüzeyinde ince bir oksit (Cr_2O_3) tabakası oluşur. Oluşan bu oksit tabakası yüzeyi pasif bir hale getirmekte ve çevrenin olumsuz tesirinden korumaktadır. Korozyona karşı dayanımın sağlanabilmesi için malzeme yüzeyinin oksijenle temas etmesi şarttır. Çünkü malzeme yüzeyini korozyona karşı koruyan krom oksit film tabakasıdır (Türkyılmazoğlu, 2006). Bu filmin kalınlığı Angstrom ($1 \text{ Angstrom} = 10^{-6} \text{ cm.}$)' dir. Bu durum, büyük bir binayı, fotokopi kâğıdı kalınlığındaki çatı sacıyla yağmurdan korumaya benzer (Kayır, 2006).

Krom oksit tabakası kuvvetli ve kendi kendini yenileme özelliğine sahiptir. Edilgindir, çünkü malzemelerle tepkimeye girmez. Kuvvetli demek çelik yüzeyine iyi yapışmış, yerinden kolayca sökülemez anlamındadır. Yenilenebilir demek krom oksit katmanı aşınması veya zorla yüzeyden sökülmesi durumunda çeliğin içindeki krom havayla reaksiyona girer ve yeni bir krom oksit tabakası meydana getirir (Arkun, 2006).

Paslanmaz çelikler kimyasal bileşimlerine göre Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (AISI) tarafından ayrılarak tasarlanır ve sınıflandırılır. Cr-Ni-Mn' li östenitik paslanmaz çelikler 2XX serileri, Cr-Ni östenitik paslanmaz çelikler 3XX serisi olup 304 paslanmaz çelik bu seride en çok bilinen ve kullanılan paslanmaz çelik olarak dikkat çekmektedir. Cr' li ferritik ve martenzitik paslanmaz çelikler 4XX serileri ile gösterilir. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler ise Cu ve Ni içerikleri temel alınarak sınıflandırılır (Arkun, 2006).

1.5.1. Paslanmaz Çeliklerin Metalurjik Özellikleri

Paslanmaz çeliklerin içerisinde, paslanmazlık özelliğini sağlayan elementlerin yanı sıra, diğer bazı ihtiyaçları karşılamak üzere isteyerek ilave edilen alaşım elementleri veya istenilmediği halde bulunan karbon ve katışıklar bulunmaktadır (Arkun, 2006).

Alüminyum: Güçlü bir ferrit yapıcıdır. %12 C içeren kaynak metaline eklenerek yapıyı ferritik, yani sertleşmez hale getirir. Yüksek sıcaklıklarda tufalleşme direncini artırır. Kuvvetli bir nitrür yapıcıdır. Titanyum ile birlikte yüksek dayanımlı alaşımlara eklenerek yaşlanma sertleşmesi tesirini azaltır (Yorulmazel, 2007).

Karbon: Kuvvetli östenit yapıcıdır. Yüksek mukavemetli alaşımlara sertleştirme ve dayanım artırıcı etki için katılır (Arkun, 2006).

Niobyum: Güçlü bir karbür yapıcıdır. Östenitik paslanmaz çelikleri krom karbür çökmesine karşı dengelemede kullanılır. Orta düzeyde ferrit yapıcıdır. Yüksek dayanımlı bazı alaşımlara sertliği ve dayanımı artırmak için katılmaktadır. Bazı martenzitik paslanmaz çelik türlerine çeliğin sertleşme eğilimini azaltmak amacı ile katılır (Arkun, 2006).

Kobalt: Birçok paslanmaz alaşımın yüksek sıcaklıklardaki sürünme ve dayanım özelliklerini iyileştirmek amacı ile katılır (Arkun, 2006).

Krom: Karbür ve ferrit yapıcıdır. Korozyon ve tufalleşme direncini sağlayan alaşım elementidir. Bu elementin paslanmaz çeliklerde yüksek sıcaklıkta dayanım ve sürünme dayanımına belirgin bir etkisi yoktur (Arkun, 2006).

Mangan: Östenit yapıcıdır. Tam östenitik alaşımlarda kaynak metalinin çatlama direncini artırır. Oda sıcaklığında ve oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda östenitin kararlı olmasını sağlar. Ancak yüksek sıcaklıklarda ferrit ve manganer sülfat oluşturur (Yorulmazel, 2007).

Azot: Güçlü bir östenit yapıcıdır. Yüksek kromlu ve az karbonlu çeliklere yüksek sıcaklıklardaki tane büyümesini engellemek için eklenir. Dayanımı artırır (Arkun, 2006).

Nikel: Güçlü bir östenit yapıcı ve dengeleyicidir. Yüksek sıcaklıktaki direnci, korozyona karşı dayanımı ve sünekliği artırır. Kaynak metali tokluğunu artırıcı bir etkisi vardır. Paslanmaz çeliklerde mekanik özellikleri iyileştirir (Yorulmazel, 2007).

Silisyum: Ferrit yapıcıdır. Östenitik çeliklerde korozyon direncini arttırmak için katılır. Yüksek sıcaklıkta tufalleşme direncini artırır. Yüksek sıcaklıkta kullanılacak çeliklerin karbürizasyon direncini yükseltmek için kullanılır (Arkun, 2006).

Titanyum: Kuvvetli bir karbür ve nitrür yapıcıdır. Östenitik paslanmaz çeliklerde krom karbür çökmesini engellemek için dengeleme elementi olarak kullanılır. Kuvvetli ferrit oluşturur. Bazı yüksek sıcaklığa dayanımlı alaşımlara sertlik dayanım artırıcı etkilerinden dolayı katılır, bazı yüksek dayanımlı ve ısıya dayanıklı alaşımlara yaşlanma sertleşmesini etkilemek için alüminyum ile birlikte eklenir (Arkun, 2006).

Tungsten (Wolfram): Güçlü bir ferrit yapıcıdır. Bazı yüksek sıcaklık alaşımlarının dayanım ve sürünme direncini arttırmak için eklenir. (Yorulmazel, 2007).

1.5.2. Paslanmaz Çeliklerin Sınıflandırılması

Paslanmaz çelik ailesi beş ana grupta tanımlanabilir. Bu gruplardan dördü, alaşımların kristalografik yapı/mikro yapı özelliklerine göre isimlendirilmiştir (martenzitik, ferritik, östenitik ya da çift fazlı). Beşinci grup ise mikro yapıdan ziyade uygulanan ısıl işlemin türüne göre isimlendirilmiştir (çökelme sertleşmesi). Ayrıca her bir grup, belirli korozyon şekillerine karşı hassasiyeti/direnç açısından farklılık gösterir. Paslanmaz çelikler (Arkun, 2006) :

1. Ferritik paslanmaz çelikler
2. Martenzitik paslanmaz çelikler
3. Östenitik paslanmaz çelikler
4. Çift fazlı (dubleks) paslanmaz çelikler
5. Çökelme sertleşmesi uygulanabilir paslanmaz çelikler olarak sınıflandırılabilir.

1.5.2.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Bu çelikler klorlu ortamlarda çukurcuk ve aralık korozyonuna iyi direnç gösterirler ve mükemmel gerilmeli korozyon çatlama direncine sahiptirler (Yorulmazel, 2007).

Bu tip çeliklerin en önemli özellikleri; katı halde faz dönüşmesi olmadığından, su

verme yolu ile sertleştirilememeleri ve yüksek sıcaklıklarda korozyon ve oksidasyon dirençlerinin iyi olmasıdır (Tülbentçi, 1985). Talaşlı şekillendirile bilme kabiliyetleri ve korozyon dayanımları martenzitik paslanmaz çeliklerden daha iyidir (Arkun, 2006).

Bünyelerinde %11-30 oranlarında krom içeren paslanmaz çeliklerdir. Karbon içerikleri %0,12'den azdır. Diğeri alaşım elementleri, korozyon dirençlerini veya işlenebilirlik gibi özellikleri iyileştirmek için az miktarda ilave edilirler. Ferritik paslanmaz çelikler, düşük karbon içeriklerinden dolayı normal olarak östenitten ferrite dönüşüme uğramazlar ve bu sebeple su verme yoluyla sertleştirilemezler. Buna karşın pek çok ferritik paslanmaz çeliklerde, küçük karbon oranları olan çelikler yüksek sıcaklıklardan hızla soğutulursa biraz sertleşme oluşur. Bu alaşımlarda kaynak edilebilirlik, iyileştirilmiş süneklik ve iyi korozyon direnci için, karbon ve azot düzeylerinin çok az olması gerekir (Erdoğın, 2001).

1.5.2.2. Martenzitik Paslanmaz elikler

Martenzitik paslanmaz çelikler mekanik özellikleri geliştiren niobyum (Nb), molibden (Mo) ve tungsten (W) gibi alaşım elementlerinin %3' e kadar ilavesi ile yaklaşık %10.5-18 Cr içerirler. En yaygın martenzitik alaşımlarda Si, Mn, N ve Ni oranları nispeten düşük düzeyde ve sabit tutulur. Buna karşılık karbon miktarı geniş sınırlar içinde değiişebilir; zira bu element bu çeliklerin mekanik karakteristiklerini geniş ölçüde değiiştirme imkânı verir. Bileşimlerinde karbon miktarı % 0,1-1,2 arasında değiişir; yüksek miktarda C içerenlerde Cr miktarı %18'e çıkabilir (Tülbentçi, 1985).

Kromun yüksek sertleşebilirlik özelliğinden dolayı, hava ve yağda soğutma ile kafes yapısı distorsiyona uğratarak martenzit oluşturulabilir. Temperlenmiş martenzitik paslanmaz çeliklerde, düşük krom ieriğii diğeri paslanmaz çeliklere göre daha az korozyon direncine sahip olmasına sebep olur (Gürkan, 2007).

1.5.2.3. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çeliklerin temel bileşimi %18 krom ve %8 nikel'dir. Östenitik paslanmaz çelikler, biçimlendirme, mekanik özellikler ve korozyon dayanımı bakımından çok uygun bir kombinasyon sunarlar. Süneklikleri, toklukları ve biçimlendirilme kabiliyetleri düşük sıcaklıklarda bile mükemmeldir. Manyetik olmayan bu çeliklere, östenitik içyapıları dönüşüm göstermediği için normalleştirme veya sertleştirme ısı işlemleri uygulanmaz, mekanik dayanımları ancak soğuk şekillendirme ile artırılabilir. Toplam paslanmaz çelik üretimi içinde östenitik çeliklerin payı % 70'tir ve aralarında en çok kullanılan 304 kalitedir. (URL-3; Odabaş, 2002).

Östenitik paslanmaz çeliklerde karbon miktarı %0,03'den az ise karbür oluşmadığından çelik oda sıcaklığında bile tamamen östenitik yapıda olur (Askeland, 2002). Östenitik paslanmaz çelikler geniş bir sıcaklık aralığında (oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar) tek fazlı yüzey merkezli kübik (YMK) bir kristal kafes yapısına sahiptir. Bu nedenle, yalnızca katı ergiyikli alaşımlama ve dövmeyle dayanımları yükseltilebilir. Östenitik paslanmaz çelikler, orta dereceli ve şiddetli korozif ortamlar için geliştirilmiştir. Bu çelikler, manyetik olmadıkları için manyetik malzemelerin kullanılmadığı uygulamalarda da tercih edilirler (Odabaş, 2002).

1.5.2.4. Östenitik-Ferritik (Dubleks) Paslanmaz Çelikler

Dubleks (östenitik-ferritik) paslanmaz çelikler, östenitik ve ferritik fazların korozyon direnci ve mekanik özelliklerini birleştirme amacı ile geliştirilmiştir. Östenit tokluk ve genel korozyon direnci sağlarken ferrit, dayanım ve gerilmeli korozyona direnç sağlar. Ayrıca; yapılarından dolayı korozif ortamlarda bile, çok iyi yorulma dayanımı gösterirler (URL-3).

1.5.2.5. Çökelti Sertleştirilmiş Paslanmaz Çelikler

Bu alaşımlar, ana içyapıları östenitik yarı östenitik veya martenzitik olabilir. % 10-30 Cr içermekle birlikte, değişen miktarlarda nikel ve molibdene vardır. Çökeltme oluşumu için Cu, Al, Ti ve Nb elementleri ile alaşımlandırma yapılır. Bu alaşımlar pek

çok uygulamalar için korozyon dirençlerinde azalma olmaksızın yüksek mekanik dayanımlara sahiptirler. Bu alaşımların çoğu yüksek sıcaklıklarda dahi dayanım özelliklerini muhafaza ederler (URL-3; Erdoğan, 2001).

1.5.3. Paslanmaz Çeliklerin Korozyon Dayanımları

Paslanmaz çeliklerin korozyon dayanımı kromun varlığına bağlıdır ve krom miktarı artırıldıkça bu dayanım artar. Ayrıca yüzeyde pasif bir filmin oluşum hızı da krom miktarına bağlıdır. Bu filmin bileşimi, alaşımdan alaşıma ve gördüğü işleme göre değişir. Bu tabakanın sürekli, gözeneksiz, çözünmeyen ve kendini onaran bir yapıda olduğu bilinir. Bu tabaka bozulduğu zaman havada veya oksijen bulunan ortamlarda kendiliğinden yeniden oluşur. Yapıda nikelin bulunması, oksijen bulunmayan belirli ortamlardaki korozyon dayanımını artırır.

Pasiflik, pasif bir oksit filminin varlığı halinde kazanılan korozyona karşı dayanıklılıktır. Bu sabit bir durum değildir, sadece belirli ortamlarda veya belirli koşullarda ortaya çıkar. Paslanmaz çeliklerin pasiflik durumunun var olduğu alan dar veya geniştir, koşullardaki küçük değişimler bu pasiflik durumunu bozabilir. Pasif durumdaki paslanmaz çelikler asil metaller gibi davranırken, aksi durumda basit çeliklerin özelliğindedir. Paslanmaz çelikler normal olarak pasiftirler, ancak oksitleyici özelliği düşük korozitif çözeltilerde, aktiftirler. Bu nedenle pasifliğin korunması için oksijen veren ortamların sürekli var olması gereklidir. Aksi halde yerel korozyon oluşur ve mesela deniz suyuunda aralık korozyonu görülür.

Paslanmaz çelikler metal oksit filmi olmadan iyi bir korozyon direncine sahip değildirler ve pasif filmlerini koruyamayacakları durumlarda hızla çözünürler. Pasif filmin yerel olarak bozulması durumunda da aynı şey olur. Bu durumda pitting, aralık korozyonu, taneler arası korozyon veya gerilmeli korozyon oluşabilir. Sonuç çok kötü olabilir, ancak malzemenin çok küçük bir kısmı korozyona uğradığı için, hasarın önceden fark edilmesi güçtür.

Paslanmaz çeliklerde yeterli bir kullanım ömrü elde edebilmek için yüzey durumuna çok dikkat etmek gerekir. Yüzey düzgünlüğü ve temizliği korozyon problemlerini azaltır.

Genellikle düz ve parlatılmış bir yüzey en iyisidir. Pürüzlü yüzeylere yerel korozyona neden olabilecek toz, tuz, nem gibi maddelerin tutunması daha kolay olur. Ayrıca östenitik paslanmaz çelikler 1040 °C-1150 °C sıcaklıklarına ısıtılıp hızla soğutulmaları ile yapılan ısıtıl işlem ile birçok korozif ortamda pasifliklerini koruyarak korozyon dayanımları artırılır. Bu sayede homojen bir östenitik içyapı elde edilir (URL-3).

Deniz suyu veya tuzlu sulu ortamlarda çalışacak paslanmaz çeliklerin seçimi, atmosferde kullanılanlara göre daha karmaşıktır. 304 ve özellikle 316 deniz suyuna en dayanıklı türlerdir. Yalnız akış hızı 1.5 m/s altındaki durgun sularda (mesala kirli liman sularında) 316 da dahil, hemen hemen bütün paslanmaz çelikler, çukurcuk korozyonuna uğrarlar. Oda sıcaklığında asetik asit için östenitik paslanmaz çelikler ideal bir seçimdir. 304 ve 347 türleri %99 derişimdeki saf asitte kaynama sıcaklığının %50'sine kadar varan sıcaklıklarda sadece düşük bir genel korozyona maruz kalıp rahatlıkla kullanılabilirler (URL-3).

1.6. Aşınma

Günümüz sanayisinde yaygın olarak kullanılan tribolojik sistemlerde korozyon ve yorulma sorunlarıyla birlikte görülen üçüncü büyük bir problem aşınma olayıdır. Aşınma genel anlamda, katı yüzeylerden mekanik yolla istenmeyen bir şekilde malzeme kaybının ortaya çıkması olayıdır. DIN 50320'ye göre aşınma; katı cisim yüzey bölgesinden tribolojik zorlanma sonucu sürekli ilerleyen malzeme kaybı şeklinde ifade edilmiştir. Moore'a göre (1976) aşınma; Kullanılan malzemelerin yüzeylerine gaz, sıvı ve katıların teması neticesinde çeşitli etkenlerle malzemenin yüzeyinden mikro tanelerin kopması sonucu meydana gelen yüzey bozulması olarak tanımlanmıştır (Gök, 2008). Temas halinde bulunan katı yüzeylerde, malzeme kaybı üç şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlar: Bölgesel erimeler, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel oluşan ayrılmalardır (Gürkan, 2007).

Malzemedeki yıpranma olayının aşınma sayılabilmesi için aşağıdaki şartların sağlanması gereklidir.

1. Mekanik bir etkinin olması,
2. Sürtünmenin olması (izafi hareket),
3. Yavaş fakat devamlı olması,

4. Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
5. İstenilmediği halde meydana gelmesidir.

Bu şartlardan birini sağlamayan yıpranma olayı aşınma olayı olarak düşünülmemelidir (Gök, 2008).

1.6.1. Aşınma Sisteminde Temel Unsurlar

Bir aşınma sisteminde temel elemanlar 6 parametreden oluşur:

- 1- Ana malzeme (aşınan): Fiziksel ve kimyasal özellikleri, yüzey yapısı, şekil durumu tamamen belli olan ve aşınma özelliği incelenen katı cisim şeklinde tanımlanabilir.
- 2- Karşı malzeme (aşındıran): Aşınmanın oluşumunda önemli etkene sahip olan, karşı sürünme elemanı, katı bir cisim, sıvı veya gaz olabilir. Sürünme elemanı katılarda genellikle aşınan malzemeden daha sert olur.
- 3- Ara malzeme: Esas sürtünme elemanı ile karşı sürtünme elemanı arasında katı, sıvı, gaz, buhar ya da bunların karışımı şeklinde bulunan maddedir. Örneğin; bu ara maddeyi, yüzeyler arasına herhangi bir nedenle girmiş oksit, kum taneleri gibi maddeler olabileceği gibi aşınma esnasında yüzeyden kopan parçacıklar da ara madde görevini üstlenebilir.
- 4-Yük: Etki eden kuvvetin büyüklüğü, türü (statik, dinamik, darbeli veya titreşimli olup olmadığı), doğrultusu ve zamana göre değişimi yüklemenin şiddetini belirleyen etmenleri oluşturur.
- 5- Hareket: Temel sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanına göre izafi hareketinin cinsi (kayma yuvarlanma veya çarpma etkilerinden hangisinin ağırlıkta olduğu), büyüklüğü ve doğrultusu ile belirlenir.
- 6- Çevre: Sistemi içine alan ve genellikle sıvı veya gaz halinde bulunan ortamdır. Su, hava ve gazlar teknikte en sık rastlanılan çevre ortamlarıdır.

Bütün bu elemanların oluşturduğu sistem, teknikte “Tribolojik Sistem” olarak adlandırılır (Ulutan, 2007; Gök, 2008).

1.6.2. Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınmayı etkileyen çeşitli faktörler farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler, aşağıda dört grupta halinde verilmiştir:

1- Ana malzemeye bağlı faktörler;

- a) Malzemenin kristal yapısı,
- b) Malzemenin sertliği,
- c) Elastisite modülü,
- d) Deformasyon davranışı,
- e) Yüzey pürüzlülüğü,
- f) Malzemenin boyutu,

2-Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcının etkisi;

3- Ortamın etkisi;

- a) Sıcaklık,
- b) Nem,
- c) Atmosfer,

4- Servis koşulları;

- a) Basınç
- b) Hız
- c) Kayma yolu (Ulutan, 2007).

1.6.2. Aşınma Mekanizmaları

Sürtünme yüzeyleri arasında değişik türde aşınma mekanizmaları meydana gelmektedir. Bu mekanizmaları birbirinden ayırmak zor olmakla beraber genel olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır (Soydan,1996; Ulutan, 2007; Gök, 2008).

1.6.2.1. Adhesiv Aşınma

Yapışma, ovalanma ve kavrama olarak da bilinen adhezyon aşınması, birbirine temas eden cisimlerin temas yüzeylerinin kaynaklaşma olayıdır. Temas halindeki yüzeylerdeki pürüzler çok küçük olduğundan pürüz tepelerine gelen basınç veya kuvvet çok büyük olmaktadır. Bu kuvveti taşıyamayan pürüzler plastik deformasyona uğrarlar. Deformasyona uğrayan malzemenin deforme olma kabiliyeti yüksek ise, mikro adhezyon alanları temas yüzeyinin tamamına yayılarak yüzeyde bulunan sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakalarının parçalanmasına neden olur (Gök, 2008; Develi, 2010).

Yukarıda bahsedilen parçalanma esnasında malzeme atomları birbirleriyle direkt olarak temasa geçer. Bu temas ile bölgesel soğuk kaynama şeklinde kaynak bağları oluşur, izafi hareket yardımıyla da yüzeydeki sıcaklık yükselir, böylece kaynama yerinden ve metal yüzeyinden bir miktar parça kopar. Aşınma çiftlerinin etkileşimleri devam ettiği sürece, aşınan partiküller ya yüzeyden koparak serbest kalırlar veya karşı yüzeye transfer olurlar (Gök, 2008).

Sürtünen malzemelerin yapıları farklı olması durumunda ise aşınma adhezyonla başlamaz. Bu durumda malzemelerde yüksek gerilme ve basıncın etkisi ile pürüzler birbirine geçerek plastik şekil değiştirir. İzafi hareket başladığında zayıf olan malzemenin pürüzleri kopar ve yüzeyde serbest tanecikler meydana gelir. Hareketin devamı ile sıcaklık yükselir ve ısı difüzyon fazlalaşırsa bölgesel kaynak bağları oluşur. Difüzyon az ise kaynama olmayacağından kırılan parçacıklar serbest hale geçer (Gök, 2008).

1.6.2.2. Abrasiv Aşınma

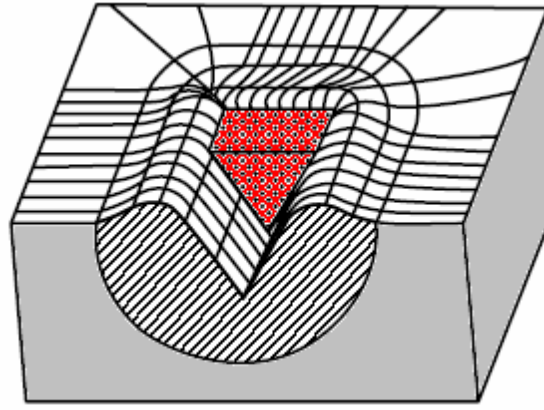
Abrazyon aşınması, abrazif aşınma, çizilme aşınması olarak da bilinmektedir. Abrasiv aşınma; sert partiküllerin veya sert şişliklerin, karşı malzemenin yüzeyinden parça kaldırarak aşınmaya sebep olmasıdır. Abrasiv aşınmada sert ve keskin partiküller, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu şekilde aşınan yüzeyde çizikler ve kesikler oluşur. Metal şekillendirmede yaygın olarak kullanılan talaşlı imalat yöntemleri esasen bu aşınmaya dayanmaktadır (Ulutan, 2007). Pulluk gibi aletlerde, kırıcılar ve iş makinelerinin kazıma bıçakları ve çalışma ağızları gibi parçalarda bu tür aşınma oldukça yaygındır (Develi, 2010).

Abrasiv aşınma miktarı aşındırıcı partiküllerin şekli ve boyutunun yanı sıra malzemeyi oluşturan çeşitli fazların abrasyon özelliklerine bağlıdır. Bunun yanında aşınmada direkt etkisi olan çevre şartları da (korozyon ve oksitlenme) unutulmamalıdır. Abrasiv aşınmada aşınan ve aşındıran malzemelerin özelliklerine bağlı olarak farklı tip aşınma mekanizmaları meydana gelir. Bu aşınma mekanizmaları aşağıda açıklanmıştır.

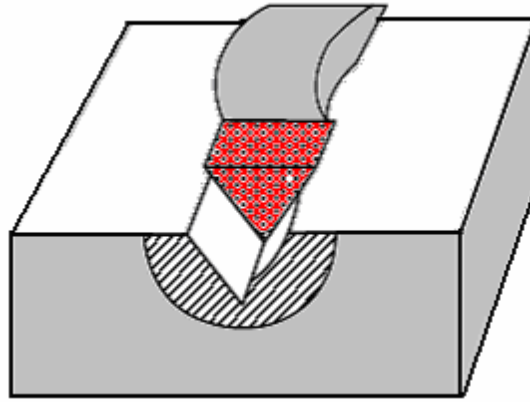
Sürülme aşınması: Bu tip aşınmada malzeme yüzeyinden direkt olarak malzeme koparılmaz, önce bitişik sırtlar şeklinde oluklar meydana gelir, sonra bu sırtlar ikinci bir abrasiv partikül tarafından malzeme yüzeyinden koparılır (Şekil 1.11a).

Kesilme aşınması: Bu tip aşınan malzemeler yüzeyden aşınma atıkları veya mikro yongalar şeklinde ayrılır. Bu aşınma tipi talaş kaldırma aşınması ile aynıdır.(Şekil 1.11b).

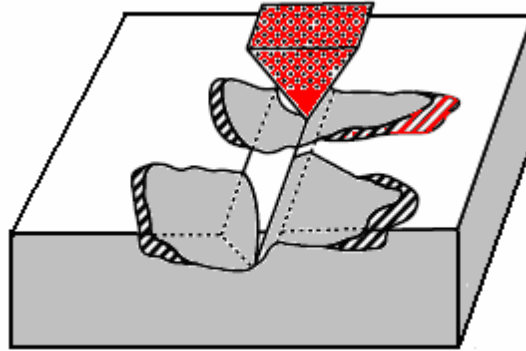
Parçalanma aşınması: Bu tip aşınmada malzeme yüzeyinde meydana gelen kesilme veya yüzeye saplanan abrasiv partiküllerinin bölgesel kırılmalara sebebiyet vermeleri ile açıklanır. Bu kırıklar aşınma oluklarında serbestçe bölgesel olarak yayılır ve malzeme kaybını arttırarak dökülmelere sebebiyet verir (Şekil 1.11c).



(a)



(b)



(c)

Şekil 1.11. Abrasiv a) sürülme b) kesilme c) çatlama aşınma mekanizmalarının gösterimi (Gök, 2008).

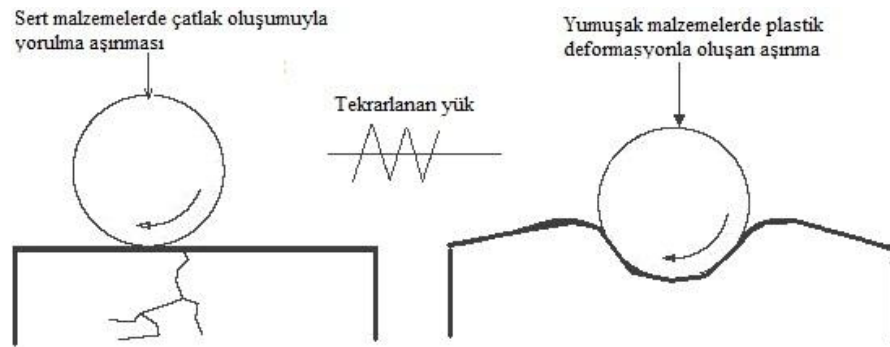
Yukarıda anlatılan aşınma mekanizmalarından biriyle aşınma meydana getirilirken abrasiv partikülün aşındırılan malzemeye batması etkilidir. Bu batma derinliği, uygulanan yük ile aşındırılacak malzemenin sertliğinin bir fonksiyonu olabileceği gibi, abrasiv partikülün şekli de olabilir. Açılı partiküller, yuvarlak partiküllere göre yüzeye daha fazla battıklarından daha derin aşınma çizikleri meydana getirirler.

Aşındırılacak yüzeyin sertliği abrazyon direncinin belirlenmesinde etkili rol oynayan parametrelerdendir. Yüzey sertliğinin artması ile birlikte abrasiv partikülün malzemeye batma derinliği düşer. Bu düşüş daha düşük aşınma direncine yol açar. Fakat malzeme sertliğinin artmasıyla süneklilik azalacağından abrazyon mekanizmalarında baskın olan sürülme ve kesme aşınmaları parçalanma aşınmasına dönüşecektir (Gök, 2008).

1.6.2.3. Delaminasyon veya Yorulma Aşınması

Yorulma (pitting), dişli çarklar, rulmanlı yataklar, kam mekanizmaları gibi birbirleriyle sürekli temas halindeki yüzeylerde sıkça görülen bir aşınma türüdür. Bu tür makine elemanlarında belli sayıda tekrarlanan titreşim zorlamalarıyla meydana gelir. Yüzeydeki temas alanları küçük olduğundan temas yüzeylerinde yüksek basınçlar meydana gelir. Bu basınçlar sonucu yüzeyin hemen altında kayma gerilmelerine sebebiyet verir. Değişken zorlanmalara maruz bu elemanlarda yorulma olayı başlamış olur (URL-6).

Tribolojik zorlanmalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden, yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Sonuçta, malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur; bu da, yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine neden olur. Şekil 1.12’de yumuşak ve sert malzemelerde yorulma aşınmasının gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.12. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi (Ulutan, 2007).

1.6.2.4. Korozi (Oksidasyon) Aşınma

Abrasiv aşınma ile kimyasal maddelerin birlikte meydana getirdiği aşınma şeklidir. Aşınan yüzeyler, aynı zamanda korozi etkilere de uğrarsa, buna korozi aşınma denir. Kimyasal korozyon kendi başına oluşabildiği gibi, diğer aşınma türleri ile birlikte de meydana gelebilir. Metallerin yüzeyinde ince bir oksit tabakası her zaman oluşabilmektedir. Bu tabaka aynı zamanda, sürtünme ve aşınmaya karşı koruyucu tabaka özelliğine sahip olabilir. Fakat film kırılgan ve yüzeye gevşek bağlı ise, aşınma büyük miktarda hızlanır. Çünkü sürtünme hareketi sırasında filmler çatlar ve malzemeye bağlı oldukları yerden koparlar (Ulutan, 2007).

1.6.2.5. Erozi Aşınma

Erozi aşınma, bir sıvı veya taşıyıcı içerisindeki sert partiküllerin malzeme yüzeyinden hızlı kayması veya yuvarlanması sırasında, yüzeye temas eden partiküllerin malzeme yüzeyinden parça koparması ile oluşan aşınma türüdür.

Erozyon aşınması abrasiv aşınmaya benzer olarak plastik deformasyon ve gevrek kırılmayı bir arada oluşturabilir. Erozyon aşınmasının yapısı aşınan malzemeye, aşındırıcılara, darbelerin durumuna, başlangıçtaki partikül kütlelerine, hıza ve geliş açısına bağlıdır. Malzemelerin erozyon davranışı aşındırıcının şekli, sertliği, tokluğu ve boyutundan büyük oranda etkilenmektedir. Erozyon özellikleri büyük oranda kullanılan test düzeneğine bağlı olduğundan çok hassas olarak ayarlanmalıdır. Genellikle hızlı gaz ya da sıvı akışıyla bir lüleden taşınan partiküller test malzemelerine gönderilir (Ulutan, 2007).

1.6.2.6. Öğütmeli Aşınma

Öğütmeli aşınma, yüksek basınçlar altındaki partiküllerin metal yüzeyleri ile düşük hızlarda karşılaşmaları sonucunda, metal yüzeyinden parçacıkların kesilerek veya çok sayıda ufak çizikler açılarak koparılması ile meydana gelir. Bu yüksek basınç ve düşük hız kombinasyonu, genellikle kepçe gibi ağır iş makinelerinin çalışma koşullarında sıklıkla meydana gelir (Gürkan, 2007).

1.6.2.7. Oymalı Aşınma

Oymalı aşınma, malzeme yüzeyinin çok yüksek gerilmelerdeki çarpma durumlarında, yüzeyden bir parçanın kesilerek veya kopmasıyla meydana gelir. Bu tip aşınmaya genellikle hafriyat, madencilik, petrol kuyularını delme işlemi ve benzeri koşullarda çalışan malzemelerin kesme ve delme görevi yapan kısımlarında görülür. Bu işlemler sırasında sert abrasiv parçacıkların çok yüksek gerilmeler altında malzeme yüzeyine çarpmaları ile yüzeylerde hızlı bir şekilde hasar oluşumu meydana gelir. Oymalı aşınma diğer aşınma türlerine göre çok daha hızlı olarak geliştiğinden, bu aşınmaya uğrayan parçaların yenileriyle değiştirilerek kullanılması daha ekonomik olmaktadır (Kayalı vd., 1997).

1.6.2.8. Kazımalı Aşınma

Kazımalı aşınma, karşılaştıran yüzeylerde mikro kaynaşmanın meydana geldiği adhesiv aşınmaya bir miktar benzemektedir. Aralarındaki fark ise adhesiv aşınma, birbirleri üzerinden kayan yüzeylerde meydana gelirken, kazımalı aşınma birbirlerine göre hareket etmeyen yüzeylerde meydana gelir. Bu da bu iki aşınma türü arasındaki farktır. Ancak kazımalı aşınma, çok düşük genlikteki titreşim hareketlerinin meydana geldiği sistemlerde, mikro kaynaşmanın oluşmasıyla meydana gelir (Gök, 2008).

1.6.3. Aşınma Deneyleri ve Ölçüm Metotları

Makine elemanlarında aranılan özelliklerden bir tanesi de kullanım ömürleridir. Makine parçalarının kısa sürede aşınması makinenin ömrünü kısaltarak maliyeti arttırdığı gibi, onarım için geçen sürede üretimin önemli ölçüde aksamasına dolayısıyla ekonomik kayıba neden olmaktadır. Bu nedenle, makine imalatında aşınmaya maruz kalabilecek yerlerde aşınma direnci yüksek malzemeler kullanılmalıdır. Bu malzemelerin aşınma direncinin tespiti için de mutlaka birçok laboratuvar deneylerinin yapılması gerekir. Laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde ana malzemenin bir modeli ile çalışılır. Bu model basit bir geometrik şekle sahip olup, fazla bir masrafa gerek kalmadan üretilebilir ve daha sonra bir deney cihazına takılarak her türlü aşınma ölçme işlemleri bunun üzerinde

yapılabilir. Aşınma deneylerinde aşınma ölçüm deney yöntemleri olarak bilinen ağırlık farkı, iz değişim, kalınlık farkı ve radyo izotop yöntemleri vardır (Korkut, 1997).

1.6.3.1. Ağırlık Farkı Metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün, alet duyarlılık kapasitesi dâhilinde bulunması sebebi ile en çok kullanılan yöntemdir. Dezavantajı ise, her ölçümde deney numunesinin yerinden çıkartılıp yeniden bağlanması ve aşınma işlemi sırasında aşındırıcıdan aşınan malzemeye kütle transferi olabilmesidir.

Ağırlık kaybının ölçümü 10^{-4} veya 10^{-5} gr hassasiyetine duyarlı bir terazi yardımıyla yapılır. Aşınma miktarı gram veya miligram sürtünme yolu da metre veya kilometre olarak tespit edilirse; birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (gr/km), (mg/m) ile ifade edilir (Ulutan, 2007; Gök, 2008) .

1.6.3.2. İz Değişimi Metodu

Sürtünme yüzeyinde plastik deformasyon metodu ile yüzeyde belirli bir iz oluşturulur. Deney boyunca bu izin derinlik ve genişlik değişimi profilometre yardımıyla ölçülür. Aşınma izinin kesiti bir elipsin yarısı olarak kabul edilerek aşınma izinin alanı hesaplanır. Daha sonra bu alan, kayma genliği miktarı ile çarpılır ve aşınma iz hacmi (mm^3) hesaplanmaktadır.

İz değişimi metodunda kullanılan bağıntılar aşağıda verilmiştir.

$$V = \frac{\pi}{4} K.W.D$$

V: Aşınma iz hacmi

K: Karşıt hareket genliği

W: Aşınma izinin genişliği

D: Aşınma izinin derinliği olarak tanımlanmıştır (Akay, 2007).

Aşınma iz hacmi, uygulanan deney yükü ve toplam kayma mesafesine bölünerek mm^3/Nm birimiyle aşınma hızı belirlenmektedir.

$$\text{Aşınma Hızı} = \frac{\text{Aşınma İz Hacmi}}{\text{Uygulanan Yük x Kayma Genliği}}$$

1.6.3.3. Kalınlık Farkı Metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin ölçülmesi, başlangıç değeriyle karşılaştırılması suretiyle elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek hacimsel kayıp değeri ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık, hassas ölçme aletleri yardımıyla -1 +1 µm duyarlılıkta ölçülmelidir. Bu metot kullanım zorluğundan tercih edilmez.

1.6.3.4. Radyoizotop Metodu

Sürtünme yüzey bölgesinin proton, nötron veya yüklü α-parçacıklarıyla bombardıman edilerek radyo aktif hale getirilmesi esasına dayanır (Kosel ve diğ., 1978). Aşınmanın büyük hassasiyetle ölçülebilmesi ve sistem içerisinde çalışma şartlarını değiştirmeden ölçü alınabilmesi avantajlı yönleridir. Fakat ekonomik olmaması nedeni ile ancak özel amaçlarla kullanılır. Özel problemlerin çözümü dışında yaygın olarak kullanılan bir metot değildir.

1.7. Korozyon

Çevrenin kimyasal ve elektrokimyasal etkilerinden dolayı metalik malzemelerin yüzeylerinde başlayan kimyasal ve elektrokimyasal tepkime sonucunda da içyapının hasar uğraması ve aşınması olayıdır. Aslında malzemelerin rutubetin veya başka kimyasal bileşenlerin bulunduğu bir ortamla reaksiyona girmeleri korozyon olayını ve kuru hava ile reaksiyona girmelerini oksidasyon olayını meydana getirir. Metaller, soy olanlar dışında, doğada saf halde bulunmazlar. Oksit, sülfat veya karbonat bileşikleri halindedirler. Çeşitli yöntemlerle enerji verilerek cevherlerden saf metaller elde edilirler. Bu yolla elde edilen her metal, başlangıç durumuna yani doğada bulunduğu daha kararlı oksit, sülfat gibi bileşiklere dönme eğilimindedir. Uygun koşullar oluştuğunda ilk durumlarına dönerler.

1.7.1. Korozyon Oluşum Mekanizması

Oluşumunu sağlayan tepkimeye göre iki tür korozyon mekanizması vardır (Ertek, 2006). Bunlar:

- 1- Kimyasal korozyon mekanizması: Kimyasal korozyon, metalik malzemelerin gazlarla reaksiyonu olarak tanımlanır. Korozyon ürünü olarak ortaya çıkan ve metal yüzeyini örten oksit tabakası iyonik ve elektriksel iletkenliğe sahip elektrolittir.
- 2- Elektrokimyasal korozyon mekanizması: Elektrokimyasal tepkime, elektrik yükü ayrımını akla getirir. Elektrolitle anot ve katot adı verilen iki elektrot sistemi oluşur. Elektrolit iyonik iletkenliğe sahiptir. Elektrokimyasal olarak daha soy olan metal katottur. Elektrik ayrımı ile oluşan anyon ve katyonların reaksiyonu elektrokimyasal korozyonu gerçekleştirir. Kimyasal korozyonun da elektrokimyasal mekanizma ile oluştuğu bilinmektedir.

1.7.2. Paslanmaz Çeliklerde Karşılaşılan Başlıca Korozyon Çeşitleri

Korozyonu, farklı şekillerde sınıflandırmak mümkündür, ancak; paslanmaz çeliklerde karşılaşılan başlıca korozyon çeşitleri aşağıda belirtilmiştir (Üneri,1998). Bunlar:

- 1- Genel (Homojen dağılımlı) korozyon: Yüzeydeki pasif filmin hasara uğraması veya soyulması ve yeniden pasifleşmeye engel olabilen bir ortamda meydana gelir. Bu korozyonda metal ve alaşımlarının yüzeyleri her yönde aynı şekilde etkilenir ve yaklaşık aynı kalınlıkta aşınmaya uğrarlar. Aşınmadaki eşit dağılımın asıl nedeni anodik ve katodik alanların sürekli yer değiştirmesidir. Çoğu kez dış görünüm bozukluklarına yol açar, fakat; ulaşılamayan iç boşluklar da tehlikeli olabilir. Diğer korozyon türlerine göre metal kaybı fazladır. En yaygın ancak, laboratuvar koşullarında saptanabildiği yani önceden kestirilebildiği için en az tehlikeli korozyon türüdür (Üneri,1998; Soncu, 2008).

- 2- Çukurcuk (Pitting) korozyonu: Korozyonun, genellikle çok dar bölgelerde yoğunlaşmasıyla meydana gelir. Çukurcuklar ya da ince kanallar oluşarak parça delinir. Metal yüzeyinde oluşan oyuk morfolojisi, metal ve alaşımlarının cinsine göre değişir. Çukurcukların çapı, derinliği ve sıklığı malzemeye ve korozif ortama bağlıdır. Toplam malzeme kaybının az ama korozyon hızının yüksek olduğu tehlikeli bir korozyon türüdür. Birçok metal ve alaşımlarında görülür ancak teknolojik açıdan paslanmaz çelikler ve alüminyumda önceliklidir. Çukurcuk korozyonu, Cl ve Br iyonları içeren NaCl, CaCl₂, MgCl₂, AlCl₃, NaBr gibi nötr ortamlarda ve bu çözeltileri içeren havalandırılmış ortamlarda görülür (Üneri,1998).
- 3- Gerilmeli korozyon çatlaması: Sünek bir metalin gevrek bir davranış göstererek hasara uğramasına yol açar. Paslanmaz çeliklerde taneler arası ya da tane içinde gerilmeli korozyon çatlağının oluşması yapı içerisinde kalıntı gerilmelerinin olması, korozitif bir ortam ve gerilmeli korozyon çatlamasına hasas bir mikro yapı yüzeyinde çatlak başlangıcının olmasına bağlıdır. Pirinç ve östenitik paslanmaz çelikler gerilmeli korozyon çatlağına hassas metallerdir (Metals Handbook, 1980).
- 4- Aralık korozyonu: Bu korozyonun temel nedeni, çatlak içi ile çevre elektrolit arasında oksijen değişimi veya metal iyonu değişiminin farklı oluşudur. Havalanması zayıf olan dar aralıklardaki sınırlı miktardaki oksijen pasif oksit filmini onaramaz ve bir değişim pili oluşur Bu tip korozyonlar, genel olarak dar bölgelerdeki durgun çözeltiler ile conta yüzeyleri, yüzeydeki birikintiler, cıvata ve perçin başlarının altındaki aralıklarda meydana gelir (Üneri, 1998; Metals Handbook, 1980).
- 5- Erozif korozyon: Bir metal ile korozif ortam arasındaki bağıl hareket nedeniyle metalin (pasif filmin) aşınma ya da parçalanma hızının artmasına erozif korozyon denir. Bu tip korozyonda, metal yüzeyinden metalik iyonlar halinde çözünen korozyon ürünleri yüzeyden uzaklaşırlar. Erozif korozyonun kendine özgü bir görünüşü vardır. Bu görüntü yönlenmiş haldeki yivler, hendekler, dalgalar, yuvarlak delikler ya da oluklar şeklinde oluşabilir. Bu korozyon türü birçok

durumda beklenilmeyen kısa bir süre içinde kendini gösterebilir. Bunun nedeni korozyon testlerinin durgun koşullar altında yapılması ya da testlerde erozyon etkisinin göz ardı edilmesine rağmen akan sıvı içinde katı parçacıklar olabilmesi ve bunların erozif korozyona neden olurlar (Üneri, 1998).

6- Tane sınırı korozyonu: paslanmaz çeliğin tane sınırlarına yakın bölgelerinde kromun krom karbürler oluşturarak azalması esasına dayanır. Amorf yapıya sahip tane sınırlarında korozyon sık görülür. Bunun nedeni tane sınırlarının potansiyel farkı tane içine oranla büyük olduğundan daha soy olan tane içi korunur ve tane sınırı korozyona uğrar. Tane sınırında alaşım elementlerinden birinin azalması ve diğerinin artmasıyla meydana gelir. Bu korozyonun en belirgin özelliği ağırlık kaybının az olmasına rağmen hızlı ilerlemesidir. Taneler arası bağ bozulduğunda mekanik dayanım yok olur. Östenitik paslanmaz çeliklerde sık görülen korozyon çeşididir (Üneri,1998).

7- Galvanik korozyon: Birbirleriyle temas halinde olan farklı potansiyel farktaki metal ve alaşımlarının aynı ortamda bulunması sonucunda ortaya çıkar. Farklı potansiyele sahip iki metal temas halinde aralarında bir galvanik pil oluştururlar. Aktif olan metal anot soy metal ise katot görevi görerek aktif metalde korozyona neden olur (Özkazanç, 2006).

1.8. Literatür Araştırması

1895 yılında ilk kez Moissan (URL-5) tarafından çeliklere uygulanan borlama alanında günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda yabancı firmaların patentli olarak ürettiği ticari bor tozların (Ekabor vb.) kullanıldığı çalışmaların sayısı oldukça fazladır. Fakat, nano teknolojinin yeni bir alan olması ve yüksek maliyetleri dolayısıyla, literatürde nano boyutlu bor tozları ile yüzey alaşımlandırma veya borlama üzerine yapılan bir çalışmaya rastlanamamıştır.

Bu bölümde borlama konularında yapılmış deneysel çalışmalardan, önemli görülenleri kronolojik sırayla verilmiştir. Yapılan çalışmalardan hareketle, borlama süresi ve sıcaklıkları, kaplama tabakası kalınlıkları, tabakayı oluşturan fazlar, tabaka yapısı,

tabakalardaki sertlik değerleri, kaplanan malzemelere ait çekme diyagramları, aşınma ve korozyon davranışları gibi çalışma sonuçları sunularak çalışmamızın önceki çalışmalar arasında nerede olduğu ifade edilmiştir.

Blazon ve arkadaşları (1975), çeliklerde alaşım elementlerinin borür tabakası oluşumunda etkileri adlı çalışmalarında, oluşan borürlere alaşım elementlerinin etkilerinin farklılık arz ettiğini, karbon miktarının artışı ile FeB tabakası oluşumunun azalması sonucunda borür tabakası kalınlığının azaldığını belirtmiştir. Ayrıca, yüksek kromlu çeliklerin borlanması ile yüzeyde krom borür tabakası oluşmaktadır. Alaşımsız veya az alaşımlı çeliklerde ise oluşan krom oksit tabakasının oluştuğu ve bu tabakanın aşınma dayanımının krom borür tabakasına göre daha iyi olduğunu belirtmişlerdir. Çünkü krom alaşımsız veya az alaşımlı çeliklerde oluşan oksit tabakasının yüzeyde yağlayıcı vazifesi görerek sürtünme katsayısını düşürdüğü ve yüzeylerin birbirine kaynamasını engellediğini ile sürmüşlerdir.

Lu (1983), Ck 15 çeliğinin borlama işlemi üzerine yaptığı çalışmada, borlama sonucunda çeliğin içerdii elementlerin borür tabakası içerisinde yeniden dağıldıklarını ve bu sırada oluşan FeB ve Fe₂B fazlarının karbon ve silisyumu çözündüremedikleri için bu elementlerin yüzeyde oluşan borür tabakası içerisinde malzeme içine göç ettiklerini bildirmiştir. Bunun sonucu olarak, borür tabakası ve borlama işlemine tabi tutulan metal arasında geçiş bölgesi olarak adlandırılan bir bölgenin meydana geldiğini, bu geçiş bölgesinin farklı borlama sıcaklık ve sürelerine göre farklılık gösterdiğini belirtmiştir. Bozkurt (1984) bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme çalışmasında geçiş bölgesini otoradyografi yöntemi ile incelemiştir ve bu bölgenin borür tabakasından 10-15 kat daha fazla bir kalınlığa sahip olduğunu belirlemiştir.

Subrahmanyam (1984), borlanmış yumuşak çelikte değişik fazlardan oluşan borür tabakasının aşınma davranışlarını incelemiştir. FeB+Fe₂B'den oluşan homojen olmayan mikroyapılı tabakaların aşınma dayanımlarının, tek fazlı tabakalara göre daha kötü olduğunu ve yüzey tabakalarına bağlı olarak aşınma mekanizmalarının farklılık gösterdiğini belirtmiştir. Uetz ve Wlassow (1980), borür tabakalarında oluşan aşınma mekanizmalarını incelemiştir ve Fe₂B tabakasındaki aşınmanın yorulma sonucunda oluştuğunu belirtmişlerdir. Ulutan (2007), FeB fazının aşınma sırasında numunenin iç

kısımlarında yeterince sünek yapıların bulunmaması nedeniyle, aşınma etkileri altındaki dış tabakanın yüzeyden daha kolay kırılıp koparak ayrılmasından ileri geldiğini belirtmiştir.

Özsoy (1991), çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve ana matrisin özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmasında termal çevrimli borlama işlemi ile tane boyutunun düştüğü ve geçiş bölgesinin borür tabakasına oranının azaldığı, bu azalmaya bağlı olarak aşınma gibi çalışma özelliklerinin iyi yönde etkilendiğini belirtmiştir. Çalık ve Özsoy (2004), SAE 1030 ve SAE 1050 çeliklerini 900 °C 200 dakika normal borlama işlemi ve yine aynı sıcaklıkta 60 dakika fırında bekleme daha sonra potayı dışarı alarak 5 dakika süre ile havada soğutma ve potalar tekrar 900 °C sıcaklıktaki fırına alınarak borlama işlemine devam edilmiştir. Bu ısı çevrim üç defa tekrarlanmıştır. Deney sonucunda ısı çevrimli borlama işlemlerinde normal borlama işlemine göre tabaka kalınlığı, borür tabakası ve geçiş bölgesi sertliklerinde azalma, tanelerde de incelme olduğunu belirtmişlerdir.

Selçuk (1994), borlanmış AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin sürtünme ve aşınma davranışları çalışmasında, bu çeliklerin yüzeylerine ayrı ayrı sementasyon ve borlama işlemleri uygulanmış ve kuru sürtünme şartlarında aşınma deneyi yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda: yüzey sertleştirme işlemlerinin her ikisinde de yüzey sertliği ve aşınma direncinin arttığını ve aşınma direncinin sertlik ile orantılı olduğunu tespit etmiştir. Sürtünme kuvvetinin yük ve hız artış ile orantılı arttığını bildirmiştir. Borlama işlemi ile daha sert yüzeyler elde edilmiştir. Alaşımli çeliklerde borür tabakası ile difüzyon bölgesi arasında iç gerilmelere bağlı olarak çatlakların meydana geldiği bunu gidermek için borlama sonrası sementasyon veya gerilim giderme tavlama gibi ısı işlemler uygulanabileceğini belirtmiştir. En yüksek aşınma direncinin borlanmış AISI 5115 çeliğinde meydana geldiği, en düşük aşınma direncinin ise işlemsiz AISI 1020 çeliğinde meydana geldiğini belirtmiştir.

Şen ve arkadaşları (2000), borlanmış soğuk iş düşük alaşımli takım çeliklerinin bazı mekanik özelliklerinin araştırılmasında Ekabor-I tozu 1000 °C sıcaklıkta ve 2, 4 ve 6 saatlik sürelerde katı borlama yapmışlardır. Çelik numune yüzeyi üzerindeki bor tabakaları FeB ve Fe₂B fazlarından oluşmuştur. Kaplama tabakası morfolojisinin dişli (testere ağzı

şeklidede) bir yapıya ve yüzeye iyi bağlı bir örtüye sahip olduğu, ayrıca yüzeyde borür tabakası, borür tabakasının altında geçiş bölgesi ve en altta da ana malzeme (matris) olmak üzere 3 farklı bölge meydana geldiğini belirlemişlerdir. Şen ve arkadaşları, uzun borlama süresi ile daha kalın bor tabakası sağlanacağı, borlanmamış malzemedeki sertlik değerinin (290 kg/mm^2) borlama işlemi ile 1854 kg/mm^2 'ye kadar ulaşılabilceğini tespit etmişlerdir. Fakat uzun borlama süresi ile sert FeB fazının oluşumuna bağlı olarak düşük sürtünme katsayısı değeri edilebileceğini belirtmişlerdir.

Özbek ve Bindal (2001) yaptıkları çalışmada, AISI W4 çeliğini katı ortamda $850-1050 \text{ }^\circ\text{C}$ ile 2-8 saat deney koşullarında EKabor 2 tozu ile borlamışlardır. Bu çalışmada, yüzey borür tabakası kalınlığının $8-386 \text{ }\mu\text{m}$ arasında olduğu ve sertliğin deney koşullarına bağlı olarak $1407-2093 \text{ HV}$ arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Yüzeyde FeB ve Fe_2B fazlarının oluşması ile bu iki faz arasındaki ısı genleşme katsayıları farkından dolayı Fe_2B 'nin çekme, FeB'nin ise basma gerilmeleriyle zorlandığını, bu durumun yüzeyde malzemeye paralel mikro çatlak oluşumuna neden olduğunu bildirmişlerdir.

Özbek ve arkadaşları (2002), yüksek alaşımlı AISI 316L çeliğini; boraks, borik asit ve ferro-silisyum sıvı banyosunda $850, 900, 950$ ve $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 2, 4 ve 6 saat sürelerde atmosferik şartlarda borlamış ve havada soğutmuşlardır. Borlanmış yüzeylerin alaşım elementlerine bağlı olarak Fe_2B , CrB ve Ni_3B fazlarından meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, düşük alaşımlı çeliklerde meydana gelen dişli yapının aksine alaşım elementlerinin bor difüzyonunu zorlaştırmaları sonucu, ana malzemeye doğru yer yer ilerleyen diş görünümlü bir difüzyon bölgesi yerine düzgün bir difüzyon bölgesi oluşmuştur. Cr ve Mn, Fe_2B ve FeB' deki demirin yerini almış, Ni' in ise borür tabakasının altında nikelce zengin bir bölge oluşturduğu sonucuna varmışlardır.

Uzun (2002), borlama ile yüzeyi sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımlarını incelediği çalışmasında, Ç1040 çeliğini %80 susuz boraks (tinkal) ile %20 ferrosilisyum tozu karışımı ile katı ortamda borlama işlemine tabi tutmuştur. Çalışma sonucunda; oluşan borür tabakasının dişli bir yapıya sahip olduğu, borlama süresinin artması ile tabaka kalınlığının arttığı, borür tabakasının en dışta FeB fazı iç kısımlarda ise Fe_2B fazlarından oluştuğunu tespit etmiştir. Borlanmış numunelerin %10'luk H_2SO_4

çözeltilerindeki korozyon dayanımının borlanmamış numunelere göre 8 kat, aşınma dayanımlarının ise 6 kat arttığını tespit etmiştir.

Selçuk ve arkadaşları (2003), sıvı ve gaz karbürleme, gaz karbonitrüleme ve katı borlama gibi çeşitli termokimyasal ısıt işlemleri kullanarak AISI 1020 ve 5115 çelik yüzeylerinin sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, borlamanın tüm demir alaşımları için en etkili termokimyasal işlem olduğunu fakat bor tabakalarının gevrekliğinden dolayı sadece hafif yükler altında çok iyi aşınma direnci gösterdiğini belirlemişlerdir. Bu işlemin özellikle düşük alaşımlı çelikler başta olmak üzere bütün çeliklere uygulanabildiğinin ve hafif yük sürtünmelerinde, karbürlenmiş veya karbonitrülenmiş düşük alaşımlı çeliklerin yerine borlanmış düşük karbonlu çeliklerin kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Martini ve arkadaşları (2003), % 99.9 saflıkta Armco demiri ve orta karbonlu UNI 38CrNiMo4 çeliklerini toz ortamda borladıkları çalışmada, borür tabakalarının aşınma dayanımı, kayma ve abrazif şartların her ikisinde de dıştaki düzensiz kristallerin zayıf ve gevrek tabaka oluşumundan dolayı oldukça düşük olduğunu belirtmişlerdir. Daha sonra aşınma oranı, önce FeB ve sonra Fe₂B kristallerinin oluşturduğu direnç sebebiyle yüksek oranda düzgün sıralanmış Fe₂B kristallerinin oldukça sıkı olduğu iç bölgede minimum değeri bulana kadar azaldığını belirtmişlerdir. Çok fazlı borür tabakaların tribolojik davranışları FeB-Fe₂B fazlarının arayüzeyindeki şiddetli gerilim bölgeleri sebebiyle daha kötü olabileceğini bunun sebebinin ise burada sert ve aşındırıcı parçaların oluşumuyla birlikte arayüzey üzerindeki çatlakların yayılması ve oluşumunun aşınma dayanımının düşmesine etki ettiğini belirtmiştir.

Yıldızlı ve arkadaşları (2003), borlanmış AISI 1020 çeliğinin erozyon aşınma davranışının incelenmesi çalışmalarında borlama işlemini sıvı ortamda 950 °C’de 1-3-5-7-9 saat süre ile gerçekleştirmişlerdir. Farklı sıcaklık ve sürelerde sıvı ortamda borlanan numunelerin aşınma testleri 30 m/s püskürtme hızı ve 90° çarpma açısında 420 µm gritpartikül püskürtülerek gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, 7 saat süre ile 950 °C’de borlanan numunenin en düşük aşınmayı sergilediği ve borlanan numunelerin işlem görmeyen numuneye göre yaklaşık 9 kat daha fazla direnç gösterdikleri, borlanan çeliğin

erozyon aşınmasına karşı gösterdiği direncin sertlikten ziyade oluşan bor tabakasının kalınlığının alakalı olduğunu belirtmişlerdir.

Özbek ve arkadaşları (2004), tarafından AISI 440 C paslanmaz çeliğinin 950 °C’de 2 ve 8 saatlik sürede Ekabor tozuyla katı ortamda borlanmasıyla yaptıkları çalışmada FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B, Mn₂B ve MnB fazlarının oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Ana malzemelerin yüzeylerindeki borürler, tamamen esas çeliğin sahip olduğu alaşım elementlerine ve borlama süresine bağlı olarak pürüzsüz ve koyu, sıkı bir yapı sergilemektedir.

Genel (2005), yılındaki çalışmasında AISI H13 sıcak iş takım çeliğini Ekabor I tozu kullanarak 800 °C, 900 °C ve 1000 °C’ lerde 1, 3 ve 5 saat sürelerde borlamıştır. Artan borlama sıcaklığı ve süresi ile oluşan borür tabakasının kalınlığı ve sertliği de artış göstermiştir. Borür tabaka kalınlığı 7–65 µm arasında değişmiş ve en yüksek değer (65µm) 1000 °C’de 5 süreyle borlanan numunede ölçmüştür. Mikrosertlik değerleri de 1650–2000 HVarasındadır. Borür tabakalarının morfolojisi düzgündür. FeB ve Fe₂B fazları arasında ısıl genleşme farklarından kaynaklanan iç gerilmelerden dolayı tabaka içerisinde çatlaklar meydana gelmiştir. Numunelerde geçiş bölgesinde sertlik düşüşleri gözlemlemiş ve bu düşüşler borür tabakası önündeki Si miktarının ferrit bölgeleri oluşturmaya atfedilmiştir.

Çalık ve Uçar (2005), borlama işleminin çeliklerin çekme uzama eğrileri üzerine etkisinin araştırılması üzerine yaptıkları çalışmalarında, borlama ısıl işleminin çekme-uzama eğrilerinin elastik ve plastik bölgelerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada ticari EKabor tozlarından, ferro silisyum tozu ve saf demir ve oksit tutucu (ekrit) malzemeler kullanılarak katı ortamda 900 °C sıcaklıkta borlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Farklı geometrik şekillere sahip numunelerin çekme deney sonuçları borlama işlemi ile mühendislik dayanımlarının yaklaşık % 10 oranında sünekliliğin ise % 25 oranında düşüş gösterdiğini ve malzemelerin gevrek kırılma ile koptuğunu belirtmişlerdir.

Akbayır (2005), AISI 1030 çeliğinin katı borlanması işleminde, işlem parametrelerinin yüzey ve aşınma özelliklerine etkisini incelediği çalışmasında, borlama deneylerini 900 °C, 950 °C, 1000 °C ve 1050 °C’de 2, 4 ve 6 saat sürelerde, EKabor®2 tozunda, aşınma deneylerini ise SiC ve Al₂O₃ aşındırıcılar ile yapmıştır. Borür tabakasının

FeB+Fe₂B'den oluştuğunu tespit etmiştir. Borlanmış numunelerin sertliği yüzeyden içeriye doğru ilerledikçe azalmaktadır. Borlama süresinin uzaması ile tabaka kalınlığının arttığı tespit edilmiştir. İşlem sıcaklığına ve borlama süresine bağlı olarak, borür tabakasının kalınlığı 80,6 µm ile 340,9 µm arasında değişmektedir. Yapılan kinetik çalışmaları sonucu; aktivasyon enerjisi (Q) 121,3 kJ mol⁻¹ olarak bulunmuştur. Aşınma deneylerinde ise Al₂O₃ aşındırıcıların SiC'lü aşındırıcılara göre borlanmış çelikleri daha az aşındırdığı tespit edilmiştir. Malzemelerin aşınma dayanımlarının, sertikleri ile arttığını ancak; borür tabaka sertliklerinin aşınma üzerindeki etkilerini Al₂O₃ aşındırıcı için net bir şekilde görülmediğini belirtmiştir. SiC aşındırıcı kullanılması halinde ise, daha yüksek sertlikte olmasına rağmen, 1000 ve 1050 °C'de 4 ve 6 saat sürelerle borlanan numunelerin 2 saat süreyle borlanan numuneye göre daha çok aşındığı görülmüştür. Buna, bu sıcaklık ve sürelerde oluşan FeB ve Fe₂B fazlarının arayüzeylerinde oluşan çatlakların yol açtığı sonucuna varmıştır.

Campos ve arkadaşları (2006), macun (bölgesel) borlama yaparak işlem boyunca AISI 1045 ve AISI M2 çeliklerinin malzeme yüzeyleri üzerindeki bor tabakalarının kinetik büyümesini incelemişlerdir. AISI M2 ve AISI 1045 çelikleri kıyaslandığında M2'deki testere dişli görüntünün daha az olduğunu buna sebep olarak da M2 çeliğindeki alaşım elementlerinin bor tabakalarının üst noktalarındaki yoğunluğu artırma eğiliminde olduğunu, bor akışını zayıflattığını ve düz yassı bir büyüme meydana getirdiğini vurgulamışlardır.

Taktak (2006), boraks, borik asit ve ferro-silisyumdan oluşan sıvı banyosunda 800 ve 950 °C'lerde 3, 5, ve 7 saat sürelerde yüksek krom içeren ve mühendislik uygulamalarında geniş ölçüde kullanılan AISI H13 sıcak iş çeliği ve AISI 304 paslanmaz çeliklerini borlama işlemine tabi tutmuştur. XRD analizinde çeliklerin yüzeylerinin üzerindeki bor tabakalarının çeşitli yerlerinde FeB, Fe₂B, CrB ve Ni₃B fazları tespit etmiştir. Çalışmada krom ve nikel gibi alaşım elementlerinin çeliklerdeki bor tabakalarının yüksek sertlik değerlerine ulaşmasında önemli bir rol oynadığını, FeB fazının gevrek olduğunu ve kalınlığının borlama süresi ve sıcaklığının artmasıyla arttığını; bunun da bor tabakasının sürtünme katsayısını ve adhezif aşınma dayanımını azalttığını vurgulamıştır.

Taktak ve arkadaşları (2006), AISI 440C ve 52100 çeliklerini 950 °C’de 2 saat süreyle kutu borlama işlemine tabi tutmuş ve borlanmış bu çeliklere oda sıcaklığı ve 600 °C’ lerde kuru kayma aşınma testleri uygulamışlardır. Çalışma sonucunda borlanmış 52100 ve 440C çelikleri için oda sıcaklığında sürtünme katsayısı 0,68 ve 0,58’iken 600 °C’ de bu değerlerin sırasıyla 0,48 ve 0,36’ya düşmüştür. Borlanmış çeliklerin aşınma dirençlerinin sıcaklığın artmasıyla az bir oranda düştüğü ve borlanmamış çeliklere kıyasla her iki çelikte de bütün sıcaklıklarda oldukça düşük sürtünme oranı tespit edildiğini belirtmişlerdir.

Özdemir ve arkadaşları (2006), ağırlık olarak %99,7 saflıktaki demir üzerindeki bor oluşumunun sertlik ve sürtünme dayanımı gibi bazı özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada, borlama işlemi katı ortamda 800 °C’de 2, 4 ve 6 saatlik süreler için, %5 B₄C Ekabor tozu bor verici olarak, %5 KBF₄ aktivatör ve %90 SiC içerikli bir karışım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Altlık malzeme üzerindeki baskın fazın parmakı bir yapıya sahip Fe₂B fazı, tabaka kalınlığının 22-43µm olduğunu ve işlemsiz halde 130 HV olan malzeme sertliğinin borlama işlemi sonucunda 1700 HV’e yükseldiğini belirtmişlerdir. Ayrıca borlama süresine bağlı olarak sürtünme dayanımının 3,59-3,83MPam^{1/2} olduğunu tespit etmişlerdir.

Uslu (2007), AISI 1040 ve AISI P20 çeliklerine Ekabor II tozu ile 800 °C, 875 °C ve 950 °C’lerde 2, 4, 6, ve 8 saat sürelerde atmosferik şartlarda borlama işlemi uygulamıştır. AISI 1040 çeliğinde Fe₂B-FeB fazlarının oluştuğunu, AISI P20 de ise bu fazlara ilave olarak alaşımlı çelik olmasından dolayı MnB ve CrB fazlarını oluştuğunu gözlemlemiştir. En yüksek mikrosertlik değerleri 8 saat borlama sonrasında elde edilmiş olup AISI P20’de ölçülen değerler aynı şartlardaki AISI 1040’dan daha yüksek olduğunu ve sertlik değerlerinin 1500–1650 HV arasında değiştiğini belirtmiştir. Uslu, kırılma tokluğu değerlerinin, malzeme bileşimi, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak değişiklik gösterdiği, alaşımsız AISI 1040 çeliğinin, alaşımlı AISI P20 çeliğinden daha yüksek kırılma tokluğuna sahip olduğunu tespit etmiştir. Borlama süresi ve sıcaklığındaki artış ile daha sert ve gevrek olan FeB fazının daha fazla oluştuğunu, bu nedenle kırılma tokluğunun düştüğünü belirtmiştir.

Ulutan (2007), AISI 4140 çeliğinin yüzey sertleştirme işlemleri ve kaplama yöntemleri sonrası mekanik davranışlarını araştırmıştır. Çalışmanın borlama ile yüzey

sertleştirme çalışmaları kısmında numunelere 900 °C, 950 °C, 1000 °C ve 1050 °C’lerde; 2, 4 ve 6 saat sürelerle yapılan borlama işlemleri sonucunda, işlem sıcaklığı ve süresinin artışıyla, beklenildiği gibi, bor tabaka kalınlıklarının arttığı, yüzeyde oluşan FeB ve Fe₂B fazlarından ibaret tabakaların etkisiyle bu tabakaların bulunduğu yerlerde, mikrosertlik değerlerinde çok yüksek artışların ortaya çıktığını tespit etmiştir. Yüzeyde oluşan sert borürlerin etkisiyle tüm numunelerde işlemsiz numuneye göre abrasiv aşınma direncinin önemli ölçüde arttığı, abrasiv aşınma deney verileri sonucunda uygulanan yük artışına bağlı olarak aşınma direncinin ise azaldığını belirtmiştir.

Turhal (2008), borlamanın paslanmaz çeliğin radyasyon zırlama özelliğine etkisinin araştırılması çalışmasında, AISI 304 paslanmaz çeliğin yüzeyi EKabor3 tozu ile 1200 °C sabit sıcaklıkta 3 saat süre ile katı ortamda borla kaplamıştır. Çalışma sonucunda: AISI 304 paslanmaz çeliğin akma dayanımının değişmediği sünekliliğin %25, çekme dayanımının ise %15 oranında düştüğünü saptamıştır. Borür tabakasının ile ana malzeme arasındaki ara kesit düz bir doğru şekline borür tabakası kalınlığında 10-15 µm gibi düşük bir seviyede olduğunu tespit etmiştir. Borlamanın radyasyon soğurma katsayısını olumlu yönde etkilediği ve borla kaplanmış paslanmaz çeliklerin radyasyon zırlamasında daha etkili sonuçlar vereceği belirlenmiştir. Çeliğin radyasyon soğurma katsayısı gamma enerjisine bağlı olarak değişmektedir. Nükleer santrallerde, normal paslanmaz çelik yerine borla kaplanmış paslanmaz çeliğin kullanılması halinde, borlamanın radyasyon geçirgenliğini azaltıcı etkisinden dolayı nükleer santrallerin güvenliğinin artırılmasına olumlu yönde etkisi olacağını belirtmiştir.

Yılmaz ve arkadaşları (2008), borlanmış ve bilyalı dövülmüş demir esaslı T/M malzemelerin aşınma ve mekanik özellikleri çalışmasında, borlanmamış, borlanmış ve borlandıktan sonra bilyalı dövme işlemi uygulanmış demir esaslı FeCu-grafit T/M kompozitini pin-on disk aşınma test cihazında aşındırarak ağırlık kayıpları ve mekanik deneylerle de mekanik özellikleri belirlemiştir. Mukavemet değerleri ve SEM kırık yüzey fotoğrafları incelendiğinde, işlemsiz FeCu-grafit kompozitinin % 7,5 uzama ile sünek kırılma, borlanmış FeCu-grafit kompozitinin % 4 uzama ile borlanmış ve bilyalı dövülmüş numunelerin ise %3’lük uzama ile gevrek tarzda kırıldığını belirtmişlerdir. İşlemsiz FeCu-grafit kompozitine göre; borlanmış, FeCu-grafit kompozitinde aşınma dayanımı yaklaşık

24 kat artmış, borlanmış ve bilyalı dövülmüş FeCu-grafit kompozitinde ise yüzeyler bozulduğu için aşınma dayanımının daha az, yaklaşık 7 kat, arttığını belirtmişlerdir.

Şahin (2008), borlanmış malzemelerin boyutsal değişimi ve yüzey pürüzlülüklerini araştırdığı çalışmasında AISI1020, AISI 1040 ve AISI 2714 malzemelerine Ekabor I tozu kullanarak 900°C’de 2 ve 4 saatlik sürelerde katı ortamda borlama işlemini uygulamıştır. Borlama işleminde düzgün yüzeyler için yüzey pürüzlülük değeri anlamına gelen “eşik pürüzlülük” (thresholdroughness) adını verdiği kendi tanımını yapmıştır. Çalışmasında yüzey pürüzlülüğünün, yüzeyi pürüzlü numunelerde borlama ile birlikte azalırken düzgün yüzeylerde arttığını tespit etmiştir. Aynı malzeme ve aynı borlama şartları için borlamadan sonraki eşik pürüzlülük değerine, borlamadan önceki malzemenin yüzey pürüzlülüğü eşik pürüzlülük değerinden aşağıda olduğu zaman ulaşılacağı bununla birlikte malzemenin yüzey pürüzlülüğü, eşik pürüzlülük değerinden yüksek olduğu zaman yüzey pürüzlülük değeri borlama işlemiyle birlikte azalacağını belirtmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğündeki değişimlerin bor tabakasının kalınlığına olduğu kadar bu tabaka içerisindeki oluşan fazların miktarlarına da bağlı olduğunu belirtmiştir.

Tabur ve arkadaşları (2009), AISI 8620 çeliğine 850, 900 ve 950 °C’lerde 2, 4 ve 6 saatlik süreler içerisinde katı borlama yaptığı çalışmasında farklı şartlar altında abrazif aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Borlama sıcaklığı ve sürenin artışına paralel olarak borür tabakasının artması sonucunda daha sert ve gevrek olan FeB fazının oluştuğunu belirtmişlerdir. SEM görüntüleri ve aşınma testi sonuçlarından, FeB tabakasının Fe₂B tabakasından daha sert ve daha kırılgan olduğunu ve numunelerin aşınma direnci, aynı borlama süresindeki borlama sıcaklığının artmasıyla birlikte azaldığını tespit etmişlerdir.

Develi (2010), AISI 8620 çeliğine plazma nitrürleme işlemi ve borlama işlemlerini ardı sıra uygulanarak çift yüzey işlem uygulamış ve bu çeliklerin 10 N yük altında tribolojik davranışlarını araştırmıştır. Çalışma sonucunda: Plazma nitrürleme işleminin ardından 800 °C’de 1 saat borlama sürelerinde beyaz nitrür tabakası kaldırılmış ve kaldırılmamış numunelerde borür tabakaları oluşmamıştır. Bunun haricinde bütün sıcaklık ve sürelerde borür tabakası oluşmuştur. Borür tabakasının kalınlığı sıcaklığın ve sürenin artmasıyla artış göstermiştir. XRD analizlerinde tabakası kaldırılmış ve borlanmış numunelerde ise borür fazlarına ait pikler görülmezken tabakası kaldırılmamış ve

borlanmış numunelerde ise FeB ve Fe₂B fazlarına ait piklerin varlığını tespit etmiştir. Elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri ile aşınma oranları arasında bir paralellik görülmediği, en düşük aşınma oranı tabakası kaldırılmamış ve 800 °C’de 1 saat borlanarak aşındırılmış numunede en yüksek aşınma oranı ise yine tabakası kaldırılmamış ve 900 °C’de 3 saat borlanarak aşındırılmış numunede meydana geldiğini belirtmiştir.

Taştan (2010), farklı bileşimlere sahip çeliklerin borlama işlemi ile yüzey özelliklerinin araştırılması çalışmasında, 860 °C ve 900 °C’de 2-4 saat süre ile borlanan AISI 1020-1040-4140 ve H13 çeliklerinin %10’luk H₂SO₄ çözeltisi ve deniz suyundaki kütle kayıpları takip edilerek korozyon davranışlarını araştırmıştır. Çalışma sonucunda borlamanın korozyon dayanımına olumlu katkıda bulunduğunu belirtmiştir. Deniz suyu çözeltisindeki kütle kayıplarının asit çözeltisi içerisindeki kütle kayıpları ile kıyaslanamayacak kadar az olduğunu belirtmiştir. Asit çözeltisi içerisindeki kütle kayıplarının borür tabakası yüzeyindeki çatlaklar ile ilgili olduğu, yüzeyde çatlak bulunan yapılarda asit çözeltisinin çatlaklardan borür tabakasının altına girerek korozyona yol açmakta ve kaplama tabakasının dökülmesine yol açtığından dolayı kütle kayıplarının daha fazla olduğunu belirtmiştir.

Nişli (2011), bor temperlenmiş AISI 1040 çeliğinin yüzey özelliklerinin ve aşınma davranışlarının incelediği çalışmasında, borlama işlemini, 900 °C’de 1, 3 ve 5 saat süre ile EKabor®2 tozu ile yapmış ve borlama işleminden sonra numuneler hızla 250 °C, 350 °C, 450 °C sıcaklıklardaki tuz banyosuna aktararak 1 saat temperlemiştir. Bor temperlemenin etkisini görebilmek için bazı numunelere sadece borlama işlemi uygulanmıştır. Sonraki aşamada borlanmış ve bor temperlenmiş numunelere 10 N ve 20 N yük altında ball-on disc aşınma deneyleri uygulanmıştır. Aşınma deneyleri sonucunda genel olarak artan yük ve azalan borlama süresi ile aşınma hızının arttığı belirlenmiştir. Borlama ve bor temperleme işlem şartlarının aşınma hızını etkilediği, artan borlama süresi aşınma direncine olumlu katkıda bulunurken, en uygun temperleme sıcaklığının üst beynit matris yapısının elde edildiği 350 °C olduğu belirtilmiştir.

Başman ve Şeşen (2011), 850 °C, 950 °C ve 1050 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerde kalsine borik asit, kalsine boraks ve silisyum karbür içeren tuz banyosunda termokimyasal borlama işlemine tabi tutulan AISI 316L tipi paslanmaz çeliğin yüzey

özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, borür tabaka kalınlıklarının artan sıcaklık ve artan süre ile parabolik olarak arttığını belirtmişlerdir. Yüzeydeki borür tabakasının kompakt ve düz bir tabakaya sahip ve sadece Fe_2B 'den oluştuğunu tespit etmişlerdir. Borlanmış numunede oluşan borür tabakasının oluşum aktivasyon enerjisini ise 231.886 kJ/mol olarak hesaplamışlardır. Borür tabakasının basma yönündeki kalıntı gerilme miktarları ve pürüzlülük değerlerinin, borlama sıcaklığının 850 °C'den 1050 °C'ye yükselmesiyle arttığı ancak, borlama süresinin pürüzlülüğe etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.

Özer (2011), üç farklı çeliğe katı borlama ve alevle sertleştirme işlemi uygulayarak, borlamanın içyapı ve sertlik üzerine etkisini incelemiştir. Çalışmada, AISI 1020, AISI 1060 ve AISI 4140 çeliklerine Ekabor 2 tozu ile 840 – 880 – 920 ve 960 °C'de 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde katı borlama işlemi ve alevle yüzey sertleştirme işlemi uygulamıştır. Çalışma sonucunda borlama işlemi ile AISI 1020' de % 423, AISI 1060' da % 336 ve AISI 4140'da % 411' lik bir sertlik artışı meydana geldiği ve alevle yüzey sertleştirmeye göre AISI 1020 çeliğinde 4 kat daha fazla sertleştirme sağlandığını belirtmiştir. Borlama işleminde AISI 1020 ve 1060 çeliklerinin her ikisinde alaşımsız çelik olmasına rağmen en yüksek difüzyon derinliğinin 1020 çeliğinde meydana gelmesi, 1060 çeliğinin 1020 çeliğine oranla neredeyse 3 kat (C) oranına sahip olması ile açıklamıştır. AISI 4140 alaşımlı bir çelik olduğundan, alaşım elementlerinin bor difüzyonunu zorlaştırdığı, dolayısıyla difüzyon derinliğinin alaşımsız çeliklere göre daha az olduğunu, yani alaşım elementleri ve C oranının bor difüzyonunu engellediğini belirtmiştir.

1.8.1. Literatür Değerlendirilmesi ve Çalışmanın Amacı

Toparlamak gerekirse; Bugüne kadar borlama üzerine yapılmış çalışmalar daha ziyade çeliklerin borlanması üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışmalarda, borür tabakasının karakterizasyonu yapılarak, bu tabakanın, malzemenin mekanik, aşınmaya ve korozyon davranışlarına etkileri incelenmiştir. Yukarıda özetlenen literatür çalışmalarının sonuçlarından aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

Borlama işlemi genellikle kutu borlama şeklinde yapılmış olmakla beraber, tuz banyosunda borlama, bor macun kullanarak borlama, gaz ile borlama çalışmaları da yapılmıştır. Kutu borlama çalışmalarında çelikler için borlama sıcaklığı, östenit fazında

olacak şekilde ve mümkün olduğunca yüksek seçilmiş, borlama süresi 2 ile 8 saat aralığında alınmıştır. Bu çalışmalar difüzyon esaslı bir mekanizmaya sahip olduklarından, sıcaklık ve sürenin artışı ile kaplama tabakasının kalınlığı da artmıştır.

Çeliklerin borlanması, çeliğin alaşımlı olup olmamasının da borür tabakasının özelliklerine etkisi olduğu belirlenmiştir. Alaşım elementleri borun daha derinlere ya da hızlı difüzyon yollarını kullanmasına engel olduklarından, kaplama tabakasının morfolojisi düz bir levha şeklinde oluşmuştur. Düşük alaşımlı çeliklerde ise, bor, çelik içerisine dislokasyonlar ve özellikle de tane sınırları, gibi hızlı difüzyon yolları ile daha rahat ilerlediğinden, tabakanın şekli ana malzeme tarafında testere dişi formu kazanmıştır.

Çeliklerin borlanması esnasında, alaşım elementleri, borür tabakalarının yüzeyde testere dişi şeklinde bir tabaka meydana getirmesine mani olmaktadır. Borlama ile oluşan ana fazlar FeB ve Fe₂B dur. FeB tabakası doğal olarak en dış tarafta, Fe₂B ise ana malzemeye yakın kısımda meydana gelmektedir.

Bu fazlardan FeB gevrek olup kaplama tabakasının darbe dayanımını azaltmaktadır. Ayrıca, FeB ve Fe₂B arasındaki ısıl genleşme farkı, soğuma esnasında kaplanmış tabakada çatlaklar oluşmasına yol açmaktadır. FeB, sürtünme katsayısı ve adhesif aşınma dayanımını da azaltmaktadır. Borlanmış malzemelerde, abrasif aşınma testlerinde, yük artışı ile aşınma davranışı kötüleşmektedir.

Borlanmış, düşük, orta ve yüksek C'lu çeliklerin korozyon davranışları iyileşmekte, yalnız, kaplamada çatlak olması durumunda, asit çözeltisi kaplama altına girerek korozyona yol açmakta ve kaplama tabakasının dökülmesine neden olmaktadır. Bu durumda kütle kaybı daha fazla olmaktadır.

Yapılan literatür araştırmasında, nano bor kullanılarak borlamanın yapıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bununla beraber, ana malzemenin borlanacak yüzeyinin bilyalı dövme ile nano hale getirildiği bir çalışma mevcuttur. Dolayısıyla, bu çalışma nano bor tozlar kullanılarak borlama yapılan ilk çalışmadır. Buradaki en büyük beklenti, nano bor partiküllerinin daha kolay difüze olmasıdır. Bununla birlikte, kutu borlama şeklinde yapılacak bu borlamada, çıkılacak sıcaklık ve bekleme süresinin nanobor partiküllerine

etkilerinin de dikkate alınması gerektiği göz önünde bulundurulmasını zorunlu kılmıştır. Ayrıca, oluşacak kaplama tabakasının hem mekanik, hem aşınma ve hem de korozyon davranışı açısından, geleneksel borlamadan daha farklı olacağı da düşünülmüştür.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

2.1. Giriş

Bu çalışmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin yüzeyi 10-50 nm boyutundaki Nanobor ve 1400 µm boyutundaki EKabor 3 tozları ile alaşımlandırılmıştır. Yüzeyi alaşımlandırılan bu çeliklerin mikroyapı, mekanik özellikler, aşınma davranışları ve korozyon dayanımları araştırılmıştır.

Çalışmada kullanılan, 10-50 nm tane boyutuna sahip Nanobor tozu Doğa Nano Biyotek adlı firmadan temin edilmiştir. Yüzey alaşımlandırma işlemi katı ortamda termokimyasal yöntemle paslanmaz çelik potalar içerisinde Argon gazı ortamında yapılmıştır. Nanobor tozu ile yüzey alaşımlandırma işlemi 1200 °C sıcaklık kapasiteli vakum ve gaz flanşlı boru tipi Protherm fırınında gerçekleştirilmiştir. Ekabor tozu ile yapılan borlamalar Vezneli A.Ş'de yapılmıştır. İşlemler belirli sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilmiştir.

Deneysel çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada hazırlanan numunelere Nanobor tozu ile 2 farklı sıcaklık ve 3 farklı zaman gruplarında 6 yüzey alaşımlandırma ve EKabor 3 tozu ile 2 farklı sıcaklık 2 farklı zaman gruplarında 4 adet borlama işlemi uygulanmıştır. İkinci aşamada yüzeyi alaşımlandırılmış numunelere her koşul için metalografik, mekanik, aşınma, korozyon ve XRD incelemeleri yapılmıştır.

Borlama işlemi sonrası numunelerin yapısında meydana gelen değişiklikler optik mikroskop ve SEM yardımıyla incelenmiştir. Sertlik dağılımları mikro sertlik cihazı ile incelenmiştir. Çekme ve üç nokta eğme dayanımları bilgisayar kontrollü eğme cihazı ile ölçülmüştür. Aşınma hızları karşıt hareketli aşınma cihazında yapılmıştır. Korozyon dayanımları asit çözeltisi ve hızlandırılmış korozyon testi olmak üzere iki farklı test ortamında uygulanmıştır.

Bu bölümde deneylerde kullanılan malzemeler, kullanılan cihazlar, deneylerin yapılışı, elde edilen metalografik, mekanik, aşınma ve korozyon dayanımları ölçümlerine değinilmiştir. Tüm koşullarda elde edilen sonuçlar ve XRD analizleri hazırlanan grafikler ile değerlendirilmiştir. Ölçümler önce ticari olarak temin edildiği şekliyle 304 östenitik paslanmaz çelik malzemeler ile yapılmış daha sonra ise yüzeyi Nanobor tozu ve EKabor 3 tozu ile alaşımlandırılmış malzemede gerçekleştirilmiştir.

2.2. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Çalışma sürecinde kullanılan malzemeler, yüzey alaşımlandırma işleminde kullanılan malzemeler ve yüzey alaşımlandırma sonrası incelemelerde kullanılan cihazlar olarak sınıflandırılmıştır.

Deneylerde kullanılan malzemeler; yüzeyi alaşımlandırılacak çelik ve borlama ortamı malzemelerinden oluşmaktadır. Borlama sonrası incelemelerde kullanılan laboratuvar malzemeleri numune hazırlama ve incelemelerini kapsamaktadır.

2.2.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Paslanmaz Çelik

Yüzey alaşımlandırma işleminde altlık malzemesi olarak 3 ve 4 mm kalınlıklara sahip AISI 304 tipi östenitik paslanmaz çelik kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin kimyasal içeriği Tablo 2.1’de verilmiştir. Numunenin kimyasal analizi Thermo Jarrell ASH-BAIRD Corp. DV-6S 3063A marka spektral analiz cihazında yapılmıştır.

Tablo 2. 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi

Malzeme	Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça)									
	C	Ni	Cr	Mn	P	S	Si	Cu	Mo	N
AISI 304	0.058	8.07	18.17	1.0	0.032	0.0005	0.41	0.24	0.1	0.043

2.2.2. Borlama Fırını

Borlama işlemi Şekil 2.1’de verilen 1200 °C sıcaklık kapasitesi ± 2 °C hassasiyetli mikro işlemci kontrollü elektrik rezistanslı, dijital göstergeli ve 38x500 mm boru çapına sahip Boru tipi Protherm fırınında gerçekleştirilmiştir.



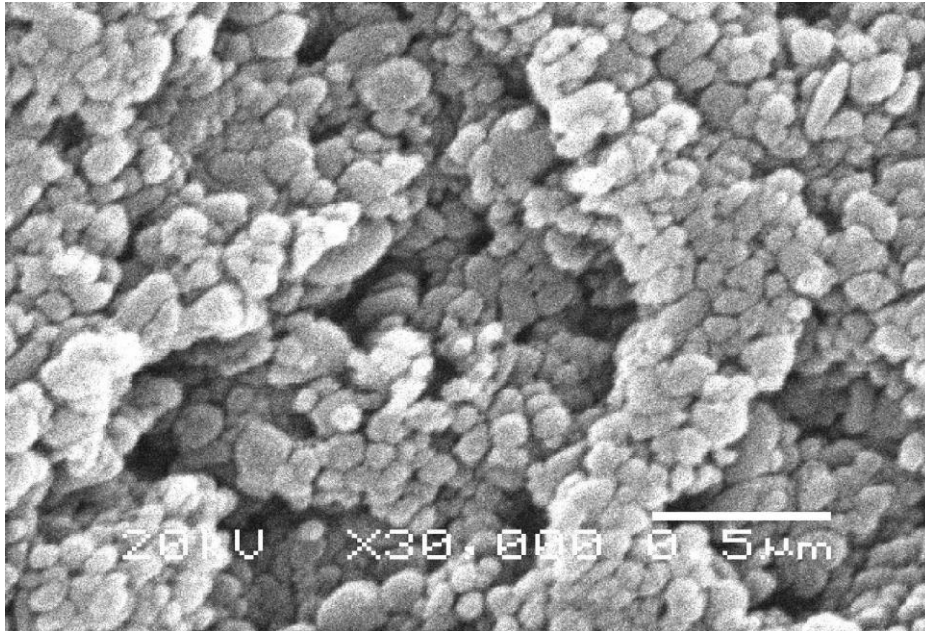
Şekil 2.1. Yüzey alaşımlandırma işleminde kullanılan Protherm PTF 12/38/450 boru tipi fırın

2.2.3. Borlama Ortamı Malzemeleri

Deneylerde borlama ortamı olarak, Tablo 2.2’ de kimyasal bileşimi ve Şekil 2.2’de SEM görüntüsü verilen 10–50 nm tane boyutuna sahip ticari olarak temin edilen Nanobor tozu ve içeriği; $B_4C - SiC - KBF_4$ şeklindeki bir bor sağlayıcı bileşik olup içeriğindeki bileşiğin oranları Vezneli A.Ş. tarafından açıklanmayan EKabor 3 tozları kullanılmıştır. Nanobor tozu ile yapılan deneylerde Aktivatör olarak KBF_4 tuzu, EKabor 3 ile yapılan deneylerde ise ekrit malzemesi kullanılmıştır.

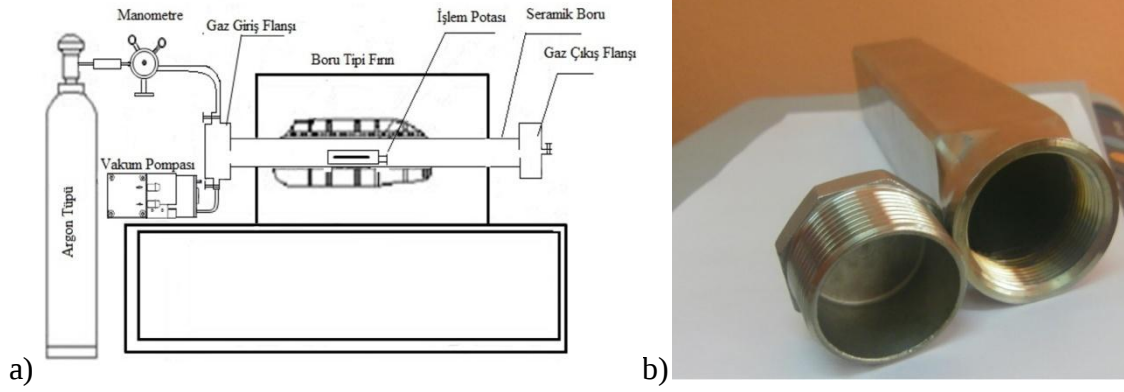
Tablo 2.2. Deneylerde kullanılan Nanobor tozunun kimyasal bileşimi (URL-4).

Ortalama Partikül Boyutu	10-50 nm
Şekil	Amorf
Saflık	% 99,7
Safsızlıklar (diğer alaşım elementleri)	
Mg	0.0005
Al	0,022
Ca	0,0013
Ti	0,0017
Cr	0,013
Fe	0,035
Ni	0,004
Cn	0.0009
Cu	0.18
Si	0.01



Şekil 2.2. Nanobor tozunun SEM görünümü (URL-4).

Katı borlama işleminde, Şekil 2.3’ de görülen borlama düzeneği ve AISI 304 paslanmaz çelikten imal edilen 120x25x25 mm boyutlarında potalar kullanılmıştır.



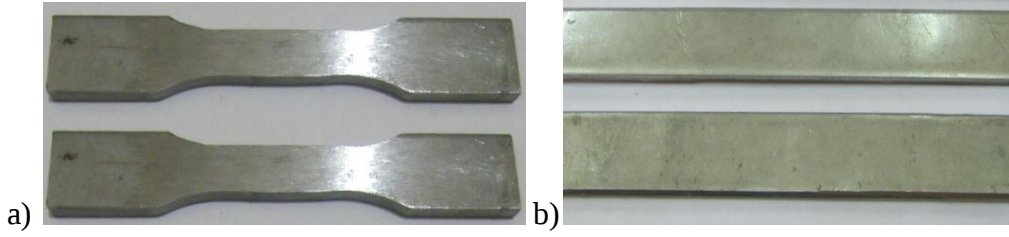
Şekil 2.3. Yüzey alaşımlandırma işlemi esnasında a) Kullanılan deney düzeneği b) Paslanmaz çelik borlama potası

2.3. Deneylerin Yapılması

Deneyisel çalışmanın planı; yüzeyi alaşımlandırılacak numunelerin hazırlanması, borlama ortamının hazırlanması, borlama işleminin yapılması, borlama sonrası mekanik, metalografik, XRD, aşınma ve korozyon özelliklerinin incelenmesi aşamalarından oluşturulmuştur.

2.3.1. Borlanacak Numunelerin Hazırlanması

Deneylerde kullanılan 100x20x3 ve 100x20x4 mm ölçülerinde ve TS EN ISO 6892 standartına göre hazırlanan çekme deney numuneleri şekil 2.4’ de gösterilmiştir. Numunelerin yüzeyleri satıl taşlama tezgâhında taşlanarak borlama işlemine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 2.4. Nanobor tozu ile yüzey alaşımlandırma işleminde kullanılan a) Mekanik test numuneleri
b) Metalografik test numuneleri

2.3.2. Borlama Ortamının Hazırlanması

Yüzeyi satıh taşlama tezgâhı ile taşlanmış numuneler, Nanobor tozunun oksijene karşı olan affinitesi göz önünde bulundurularak vakumlama işlemi sonrası argon gazı ortamda numunelerin tüm yüzeylerine önceden hazırlanan %95 Nanobor tozu ve %5 KBF_4 karışım tozu temas edecek şekilde potaya yerleştirilmiştir. Karışımın homojen olması için borlama malzemesi ve aktivatör malzeme hasas terazi ile tartılarak kapaklı plastik bir kutu içine yerleştirilmiş ve potaların dolumu sırasında bocalanarak tozların homojen karışımı sağlanmıştır. Deney sırasında potaların kapakları hava almayacak şekilde sıkıca kapatılmıştır.

2.3.3. Borlama İşlemi

Yüzey alaşımlandırma işlemi için hazır hale getirilmiş potalar 950 °C ve 1000 °C’de ve her bir sıcaklık parametresi için 2, 4 ve 6 saat süreyle borlama işlemine tabi tutulmuştur. Potalar, deney sıcaklığına önceden ulaşmış olan fırın içerisine yerleştirilmiş ve istenilen süre bekletilmiştir. Deney sonrası numuneler fırından dışına alınarak açık hava ortamında soğumaya bırakılmıştır. Deney sonunda numunelerinin üzerine herhangi bir kalıntı toz partikülünün bulunmadığı gözlenmiştir.

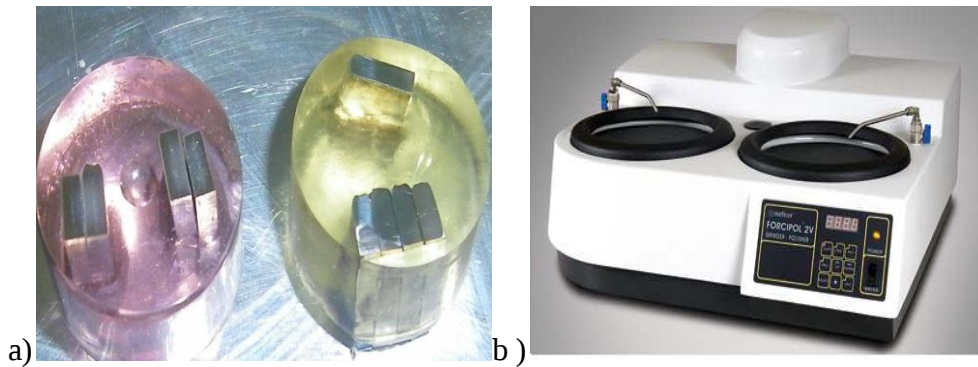
2.3.4. Mikroyapı İncelemeleri için Numune Hazırlanması ve Mikroyapı Çalışmaları

Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan 100x20x3 ve 100x20x4 boyutlarındaki numuneler, mikroyapı incelemeleri için uygun ölçülerde kesilmiştir. Kesme işlemleri Şekil 2.5’ de görülen Metkon metacut-M250 hassas kesme cihazında yapılmıştır. Kesme diski 1,5 mm kalınlığındaki SiC kesici diskidir.



Şekil 2.5. Metkon metacut-M250 marka hassas kesme cihazı

Yüzeyleri alaşımlandırılan numunelerden metalografik inceleme için uygun ölçülerde kesilen numuneler dikdörtgen kesit yüzeyleri görünecek şekilde soğuk bakalite alınmıştır (Şekil 2.6a). Bakalite alınan numunelerin kesit yüzeyleri şekil 2.6b’de gösterilen parlatma cihazı ile sırasıyla 240-320-400-600-800-1000-1200’lük zımparalama işleminden sonra önce alümina pasta sonra 1 μm elmas pasta ile parlatma işlemleri yapılmıştır. Parlatma işleminden sonra numuneler %50 HNO_3 ve %50 su çözeltisi ile dağlanarak mikroyapılar ortaya çıkarılmıştır.



Şekil 2.6. a) Bakalite alınan numuneler b) Metkon forcipol 2v parlatma cihazı görünüşü

2.3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numunelerin SEM ve EDX analizleri, İnönü Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Merkezi Laboratuvarında bulunan Şekil 2.7’ de görülen EVO LEQ Scanning Elektron Mikroskobu (SEM) cihazıyla yapılmıştır. Kaplama tabakası ve difüzyon bölgesinde oluşan fazlar, SEM cihazına adapte edilmiş olan EDX analiz sistemi kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 2.7. EVO LEQ Scanning elektron mikroskobu (SEM) ve EDX analiz cihazı

2.3.6. Optik Mikroskopi İncelemeleri ve Borür Tabakası Kalınlık Ölçümleri

Metalografik olarak hazırlanmış numunelerin kaplama yüzeylerinin karakteristiklerinin mikroskopi incelemeleri ve borür tabakası kalınlıklarının ölçülmesi için Nikon MA-100 mikroskop ve bu mikroskop üzerine monte edilmiş Clemex görüntü analiz sistemi kullanılmıştır. Borür tabaka kalınlığı, borlama için geliştirilmiş tabaka kalınlığı belirleme yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Tabaka kalınlığı olarak en dış yüzeyden uç kısmına kadar olan bölge seçilmiş ve tabaka kalınlıkları 10 ölçüm ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 2.8. Bilgisayar kontrollü Nikon MA100 optik mikroskop ve Clemex görüntü analiz sistemi

2.3.7. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği

Borür tabaka kalınlığının kinetik açıdan incelenmesi sırasında, borun borür yapısı içindeki difüzyon katsayısının hesaplanması için ilk olarak Brakman (1989) tarafından geliştirilen ve birçok araştırmacı tarafından kullanılan aşağıda verilen formüller vasıtasıyla Nanobor ve Ekabor tozları deney şartlarındaki difüzyon katsayıları ve aktivasyon enerjisi değerleri hesaplanmıştır.

$$d^2 = D.t \quad (2.1)$$

$$\ln \left(\frac{d_0^2}{d^2} \right) = \frac{Q}{R.T} \quad (2.2)$$

d: Borür tabakası kalınlığı (cm)

D: Borür tabakası büyüme hız sabiti

t: Süre (sn)

D_0 : Difüzyon katsayısı (cm^2/sn)

Q: Aktivasyon enerjisi (J/mol)

R:Gaz sabiti

T: Sıcaklık (K)

2.4. Borür Tabakasının Sertlik Ölçümlerinin Yapılması

Numunelerin mikrosertlik deneyleri, Şekil 2.9’da görülen Future Tech FM-700 mikrosertlik cihazı ile 10 sn süre ve 25 gf yük kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 2.9. Future Tech FM-700 Mikrosertlik ölçüm cihazının görüntüsü

Doğru bir sertlik değerinin elde edilebilmesi için, borür tabakası kesit yüzeyinden ana malzeye doğru, her bir numunenin yüzeye eşdeğer uzaklıktaki noktalarından 3’er adet sertlik ölçümünün aritmetik ortalaması alınmış ve elde edilen bu değer o noktanın değeri olarak verilmiştir. Ayrıca elde edilen veriler, yüzeyden mesafeye, borlama sıcaklıklarına ve borlama sürelerine göre hazırlanan grafikler ile de incelenmiştir.

2.5. EDX Analizleri

Yüzeyleri bor tozları ile alaşımlandırılmış numunelerin EDX analizleri, Şekil 2.7’ de görülen SEM mikroskop üzerinden veri aktarımı yapabilen EDX analiz ünitesi ile yapılmıştır. Farklı bölgelerden alınan EDX analizleri ile sıcaklık ve sürenin borür tabakası karakteristiği üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2.6. Tabaka Yapısı

Borür tabakası, difüzyon bölgesi ve matrisin incelenmesi için bu bölgelerin 10000X SEM fotoğrafları alınmıştır. Ayrıca oluşan fazlar hakkında bilgi sahibi olabilmek XRD analizleri yapılmıştır.

2.6.1. X ışınları Analizi

Borür tabakasında oluşan fazları belirlemek amacıyla Şekil 2.11’de gösterilen XRD cihazı ile numunelerin analizleri yapılmıştır. Borlama sıcaklığının etkilerini görebilmek amacıyla 950 °C ve 1000 °C sıcaklıkta 2 saat süre ile Nanobor tozu ile ve 950 °C ile 1000 950 °C’de 4 saat süre ile EKabor 3 tozu ile yüzey alaşımlandırma işlemine tabi tutulan numuneler incelenmiştir.

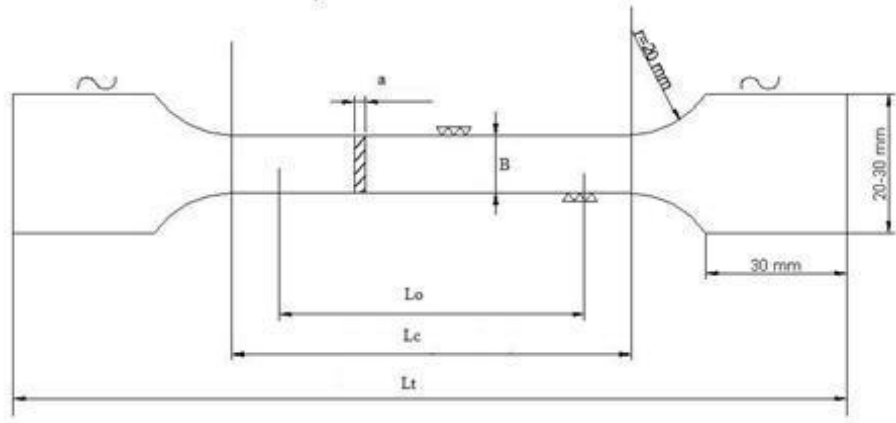


Şekil 2.10. Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü XRD analiz ünitesinin görünümü

2.7. Çekme Deneyi

Bu çalışmada, AISI 304 kalite 3 mm kalınlıktaki paslanmaz çelikten, TS EN ISO 6892 standartına göre çekme deney numuneleri hazırlanmıştır. Deney numunesinin ölçüleri Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Çalışmada ticari olarak temin edildiği şekliyle AISI 304, 950

°C sıcaklıkta 2 ve 4 saat süre ile 1000 ° C 2 ve 4 saat süre ile Nanobor tozu ve EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerden hazırlanmıştır.



Çekme Deneyi Numune Ölçüleri	Sac Kalınlığı	
	3 mm	4 mm
a	3	4
B	12	12
Lo	33.9	39.1
Lc	43.9	49.1
Lt	103.9	109.1

Şekil 2.11. TS EN ISO 6892 standarda göre çekme deney numunesi resmi ve ölçüleri

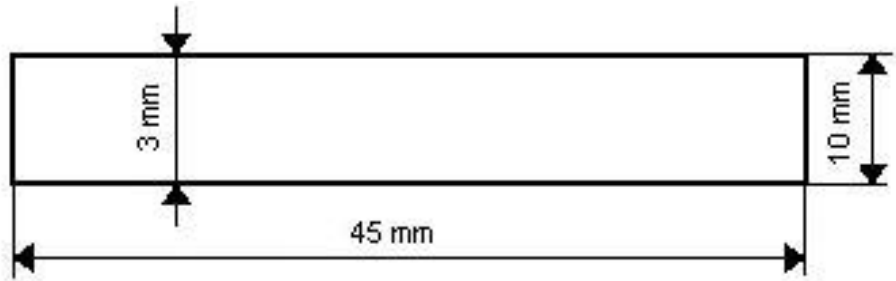
Çekme deneyi 50 KN kapasiteli Shimadzu marka çekme cihazı (Şekil 2.13) ile Trapeziumix yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda, gerilim % uzama eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca çekme deneyine tabi tutulan numunelerin kopma bölgelerinden kırık yüzey incelemeleri SEM görüntüleri ve EDX analizleri yapılmıştır.



Şekil 2.12. Shimadzu marka 50 KN kapasiteli bilgisayar kontrollü nümerik çekme deney cihazı

2.8. Üç Noktalı Eğme Deneyi

Üç nokta eğme deneyi ile malzemenin yüzeyindeki borür tabakasına uygulanan kuvvet ile borür tabakasının hangi noktalardan ve nasıl etkileneceğini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Ayrıca üç nokta eğme deneyi ile numunelerin basma kuvveti, eğilme dayanımı, maksimum % uzama gerinimi, borür tabakasının kırılma tokluğu değerleri sistematik olarak elde edilmiştir. Deney numunelerinin boyutları Şekil 2.14’de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. ASTM B528-83a standardına göre hazırlanmış eğme deney numunesi ölçüleri

Deney Şekil 2.15’de gösterilen ASTM B528-83a standardına göre hazırlanmış aparat yardımıyla Şekil 2.13’de görülen Shimadzu marka universal çekme test cihazında oda sıcaklığında 10 mm/dak basma hızında Trapeziumix yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada her şart için iki adet deney yapılarak ortalamaları alınmıştır. Eğilme momenti (2.3), mukavemet momenti (2.4) , eğme dayanımı (2.5) ile borür tabakası kırılma tokluğu ise (2.6) aşağıda verilen formüller ile hesaplanmıştır.

$$M_e = \frac{F \cdot L}{4} \quad (2.3)$$

Me: Eğilme Momenti (Nm)

F:Uygulanan maksimum basma kuvveti (N)

L: Numunenin uzunluğu (m)

$$W_e = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (2.4)$$

We= Mukavemet (dayanım) momenti (mm³)

b: Numunenin genişliği (mm)

h: Numunenin yüksekliği (mm)

Eğilme momentinin mukavemet momentine oranı ile eğme dayanımı elde edilir.

$$\sigma = \frac{M_e}{W_e} \quad (N/mm^2) \quad (2.5)$$

$$K_{Ic} = \frac{P \cdot L}{w \cdot t} \quad (2.6)$$

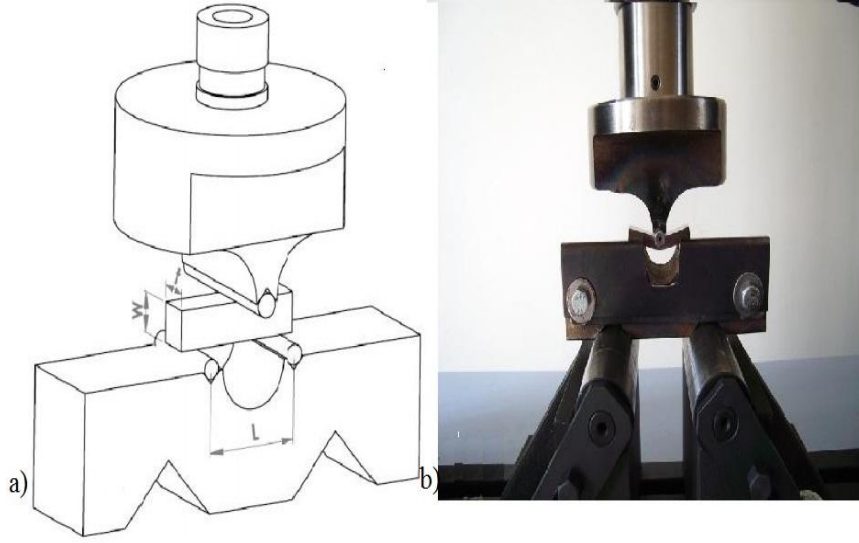
Bu denklemde:

P: Kırılmadan önceki yük (N)

L: Destek noktaları arasındaki mesafe (mm)

w: Numune yüksekliği (mm)

t: Numune kalınlığı (mm)



Şekil 2.14. a) ASTM B528-83a standardına göre eğme şematiği(ASTM B528 – 10, 2004). b) Eğme deneyi aparatı resmi (Balın, 2011).

2.9. Aşınma Deneyi

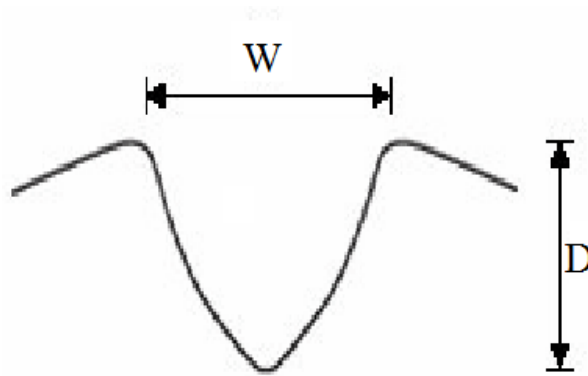
Aşınma deneyleri, Şekil 2.15’de görülen Oscilating TRIBOtester marka karşıt hareketli aşınma cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.15. Oscilating TRIBOtester marka karşıt hareketli aşınma cihazı

1 adet herhangi bir işleme tabi tutulmamış AISI 304 östenitik paslanmaz çelik, 4 adet farklı Nanobor tozu ile ve 4 adet EKabor 3 tozu ile farklı sıcaklık ve sürelerde yüzey alaşımlandırma işlemine tabi tutulan numunelerin tribolojik özelliklerini incelemek için yapılan aşınma deneyleri kuru ortamda yapılmıştır. Aşınma deneylerinde 1500 HV ve üstü sertliğe sahip numuneler için aşındırıcı olarak 10 mm çapında silisyum nitrür (Si_3N_4) bilya, 1500 HV sertlik değerinden düşük değere sahip EKabor 3 ile yüzeyleri alaşımlandırılan numuneler için ise (Al_2O_3) alüminyum oksit bilya kullanılmıştır. Deneyler 5 N yük altında ve 10 mm/s kayma hızında yapılmış, karşıt hareket genliği 5 mm, toplam kayma mesafesi 30 m olarak uygulanmıştır.

Aşınma izleri genişlik ve derinlikleri 3'er adet oluşturulup ortalamaları alınarak, Veeco Dektak 6M marka bir yüzey profilometresi ile ölçüldü. Aşınma izinin kesiti bir elipsin yarısı olarak kabul edildi ve aşınma izinin alanı hesaplandı. Daha sonra bu alan, kayma genliği olan 5 mm ile çarpıldı ve aşınma iz hacmi (mm^3) hesaplandı.



Şekil 2.16. Aşınma izinin derinliği ve genişliğinin şematik olarak gösterimi

$$V = \frac{\pi}{4} K.W.D \quad (2.7)$$

V: Aşınma iz hacmi

K: Karşıt hareket genliği (5 mm)

W: Aşınma izinin genişliği

D: Aşınma izinin derinliği olarak tanımlanmıştır.

Aşınma iz hacmi, uygulanan deney yükü ve toplam kayma mesafesine bölünerek mm³/Nm birimiyle aşınma hızı hesaplandı.

$$\text{Aşınma Hızı} = \frac{\text{Aşınma İz Hacmi}}{\text{Uygulanan Yük x Kayma Genliği}}$$

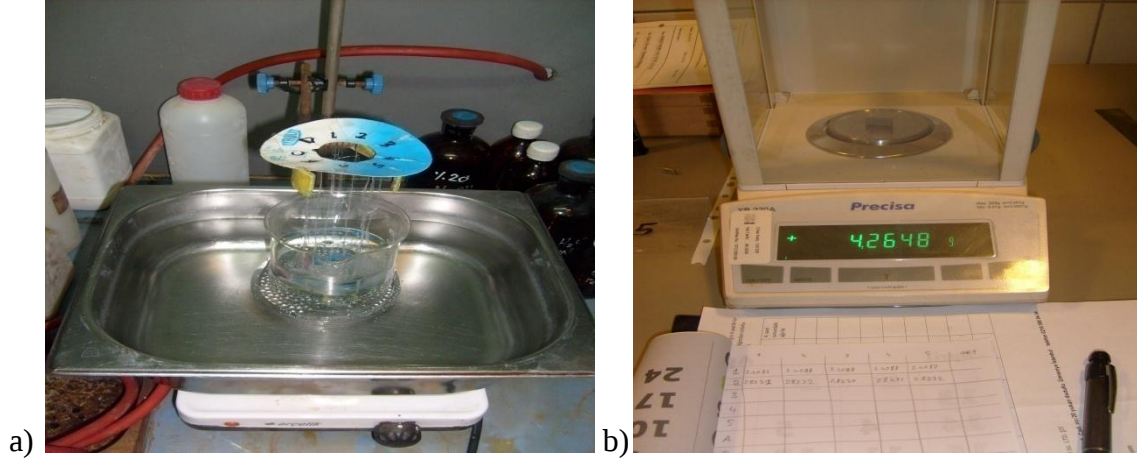
Numunelerin 30 m aşındırılmaları sonucu oluşan değerler alınarak aşınma hızı hesaplandı. Sürtünme katsayılarının kayma mesafesine bağlı olarak değişimi bilgisayar programı vasıtasıyla çizildi. Ayrıca aşındırılan numunelerin yüzeyleri SEM ile incelenerek EDX analizleri yapılmıştır.

2.10. Korozyon Deneyleri

Korozyon deneyleri,%10 H₂SO₄ ve %90 su kullanılarak asit çözeltisi deneyi ve hızlandırılmış korozyon olarak bilinen ASTM B117 standardına göre tuz püskürtme testi olmak üzere 2 farklı test ortamı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Asit çözeltisi deneyi Borşen Çelik Boru Laboratuvarında, tuz püskürtme deneyi ise SIEMENS San. ve Tic. A.Ş. Otomasyon ve Kontrol Sistemleri Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

2.10.1. Asit Çözeltisi Deneyleri

Asit çözeltisi deneyleri, Şekil 2.17a'da gösterilen deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. %10 sülfürik asit çözeltisi bir su banyosu içine yerleştirilerek deney sıcaklığı kontrol edilmiştir. Çözelti sıcaklığı 56 ± 2 °C arasında seçilmiştir. Ağırlık ölçümleri " Precisa " marka 1.10⁻⁴'lük hassasiyete sahip, terazi ile gerçekleştirilmiştir. Çözeltiden çıkarılan numuneler bol su ve daha sonra alkol ile yıkanıp kurutulduktan sonra, hassas terazi ile ardışık olarak 5 kez tartılmış ve ortalaması alınmıştır. Deneyin her saati için taze çözelti hazırlanmıştır. Asit çözeltisi deneyinde kullanılan sıvının bileşimi, Tablo 2.3' de verilmiştir. Deneylerde 950 °C ve 1000 °C de 2 ve 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılmış, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numuneler kullanılmıştır. Deney sonuçlarından kümülatif ağırlık kaybı (%) ve periyodik ağırlık kaybı (%) olmak üzere, tablo ve grafikler hazırlanmıştır. Ayrıca korozyon deneylerine tabi tutulan numunelerin daha sonra SEM ile yüzeyleri fotoğraflanmış ve korozyona uğrayan yüzeylerden EDX analizleri alınmıştır.



Şekil 2.17. a) Asit çözeltisi deneyi düzeneği b) Precisa hassas terazi

Tablo 2.3. Asit çözeltisi deneylerinde kullanılan sıvı çözeltinin bileşimi

Sıvı	Bileşim		Sıcaklık
Asit Çözeltisi (%10)	90 ml su	10 ml H ₂ SO ₄	56 °C

2.10.2. Tuz Püskürtme Testi Deneyi

2.10.2.1. Korozyif Ortamın Hazırlanması

Hızlandırılmış korozyon diğer bir adıyla tuz püskürtme testi şekil 2.19'da resmi gösterilen tuz püskürtme ünitesinde gerçekleştirilmiştir. Yüzeyi alaşımlandırılmış numunelerin tuz püskürtme korozyon testleri ASTM B117 standardında uygun bir şekilde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.18. Tuz püskürtme testi cihazı görünümü

Test ortamı, saf su ve %5’lik NaCl içeren bir tuz çözeltisinden (yapay deniz suyu) meydana gelmiştir. Test çözeltisinin; pH, microsiemens değeri ve sıcaklığını içeren deney parametreleri Tablo 2.4’de gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Hızlandırılmış korozyon deney şartları

Parametre / Değerler		Korozif çözeltinin pH	6.5-7.2
Sıcaklık	35 °C	Tuz çözeltisi buharının	25 °C

2.10.2.2. Numunelerin Yerleştirilmesi ve Test Süreci

Korozyon testlerinde, ASTM B117’de belirtildiği şekilde kontrol amacıyla bir adet ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numune ile 4 adet yüzeyi Nanobor tozu ve 4 adet EKabor 3 tozu ile yüzeyleri alaşımlandırılmış numune test ortamına yerleştirilmiştir. Bu standarda göre, numune yüzeyinde meydana gelen korozyonun, ağırlık kaybı olarak %20 seviyesinin altında olması gerekmektedir (ASTM B117).

Numuneler, Şekil 2.20’de görüldüğü gibi test ortamına yapılan özel bir aparatla 15–30°’lik açı ile yerleştirilmiştir. Numunelerin yüzeyinde korozyon ürünü olan kırmızı pas oluşumunun kontrol aralığı, test bilgilerinin (sıcaklık, pH) alınması ve kontrol edilmesi 12 saatlik periyotlarda yapılmıştır.



Şekil 2.19. Deney numunelerinin tuz püskürtme ünitesine yerleştirilme şekli

Hızlandırılmış korozyon testi olan tuz püskürtme testi ASTM’e B 117’ye göre yapılmıştır. Test standartlarda belirtilen şekilde, numune yüzeyinde kırmızı pas oluşuncaya kadar sürdürülmüştür. Ağırlık kayıplarının daha nesnel bir şekilde ölçülebilmesi için deneylere 5 gün boyunca devam edilmiştir. Test süresince numunelerin ağırlık kayıpları her 24 saatte bir ölçülmüştür. Ağırlık ölçümleri " Precisa " marka, maksimum tartım kapasitesi 220 gr ölçebilir ve 1.10^{-4} gr hassasiyete sahip terazi ile gerçekleştirilmiştir. Çözeltiden çıkarılan numuneler bol su ile yıkanarak yüzeydeki korozyon ürünleri giderilip hava ile kurutulduktan sonra, yukarıda belirtilen terazi ile ardışık olarak 5 kez tartılmış ve ortalaması alınmıştır. Elde edilen verilerden periyodik ağırlık ve kümülâtif ağırlık tablo ve grafikleri hazırlanmıştır.

3. BULGULAR

3.1. Giriş

Bu çalışmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin yüzeyi kutu borlama tekniği ile katı ortamda Nanobor ve EKabor 3 tozları kullanılarak farklı sıcaklık ve sürelerde yüzey alaşımlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Yüzeyleri alaşımlandırılan numuneler, optik mikroskop, SEM, X-ışını, mikrosertlik, çekme, eğme, aşınma ve korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Böylece, Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış numuneler hem EKabor 3 tozu kullanılarak borlanan numuneler ile hem de herhangi bir işleme tabi tutulmayan ticari AISI 304 paslanmaz çelik ile kıyaslanmıştır. Yüzey alaşımlandırma işlemine tabi tutulan numunelerin deney parametreleri Tablo 3.1’de görülmektedir.

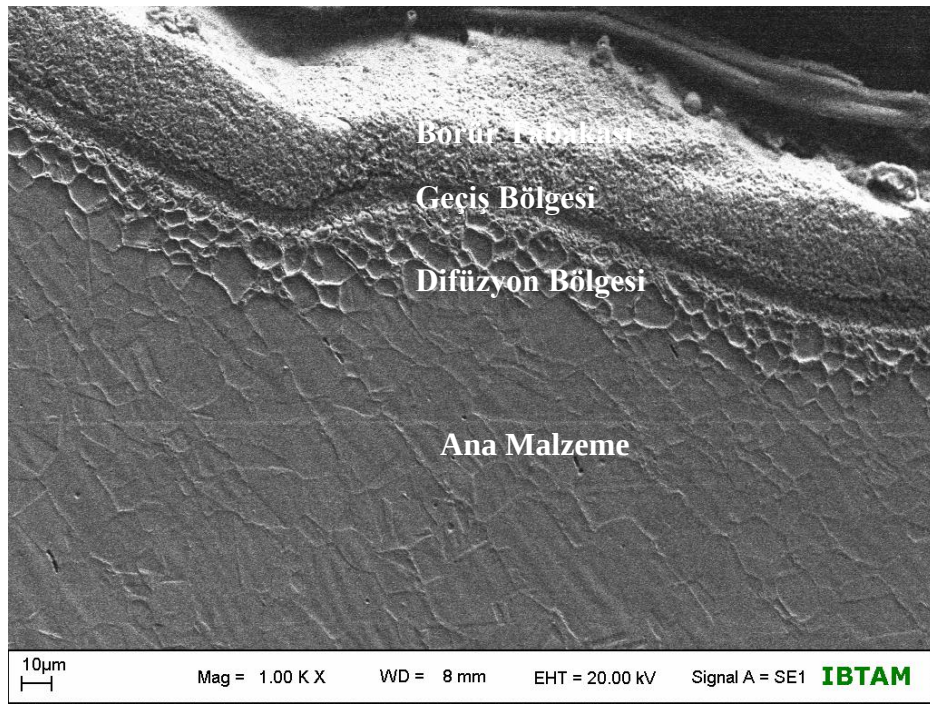
Tablo 3. 1. Yüzey alaşımlandırma işlemi deney parametreleri

Sıcaklık (°C)	Yüzey Alaşımlandırma Malzemesi	Tane Boyutu	Süre (saat)
950	Nanobor	10-50 nm	2
		10-50 nm	4
		10-50 nm	6
1000	Nanobor	10-50 nm	2
		10-50 nm	4
		10-50 nm	6
950	EKabor 3	1400 µm	2
		1400 µm	4
1000	EKabor 3	1400 µm	2
		1400 µm	4

3.2. Metalografik İncelemeler

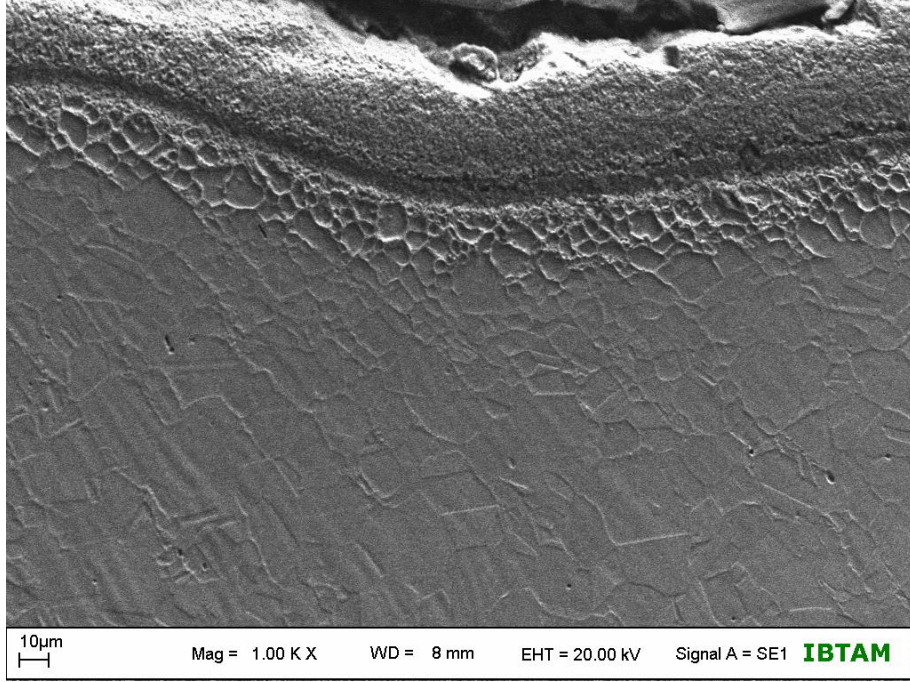
Şekil 3.1’de Nanobor tozu kullanılarak yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 950 °C’de 2, 4 ve 6 saat sürelerdeki SEM fotoğrafları görülmektedir. SEM fotoğraflarından 2 ve 4 saatlik parametrelerde borür tabakası, geçiş bölgesi,

difüzyon bölgesi ve ana malzeme mikroyapısı, 6 saatlik parametrede ise sadece difüzyon ve ana malzeme bölgeleri görülmektedir. 6 saat parametrelili numunede borür tabakasının döküldüğü yüzey alaşımlandırma işlemi sonrasında makro olarak da tespit edilmiş ve makro yüzey fotoğrafı Şekil 3.9'da verilmiştir. 6 saatlik parametrede borür tabakasının dökülmesini bu tabaka içerisinde iki farklı bor bileşiği olan FeB ve Fe₂B bileşiklerinin oluşması, soğuma esnasında bu iki bileşik ile ana malzeme arasındaki yüksek ısı genleşme farkından dolayı meydana gelen termal şoktan (Tablo1.3) kaynaklandığı düşünülmektedir (Saygın, 2006; Çelikyürek, 2006).

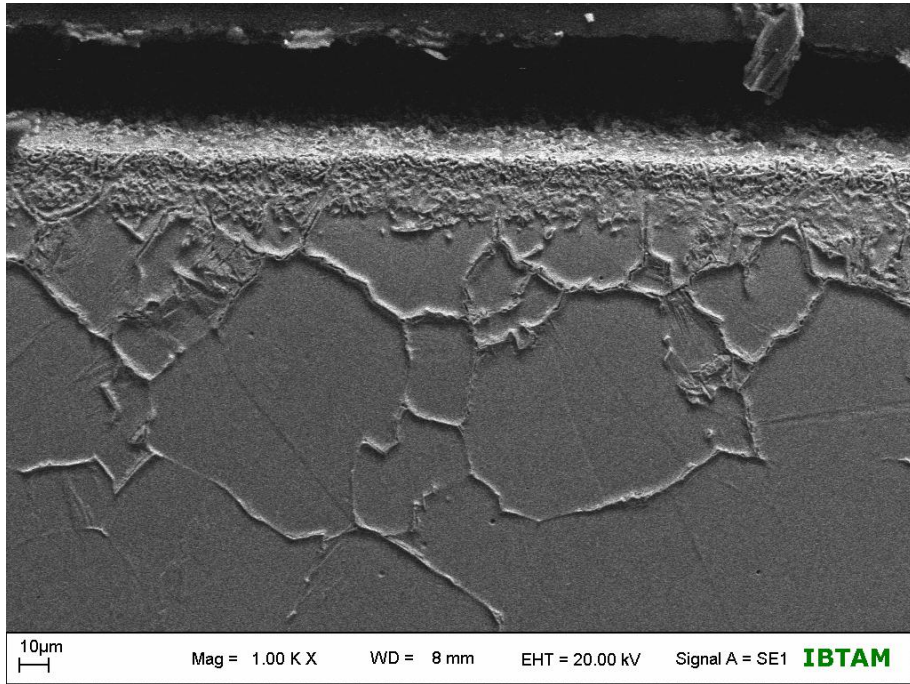


(a)

(“Şekil 3.1’in devamı”)



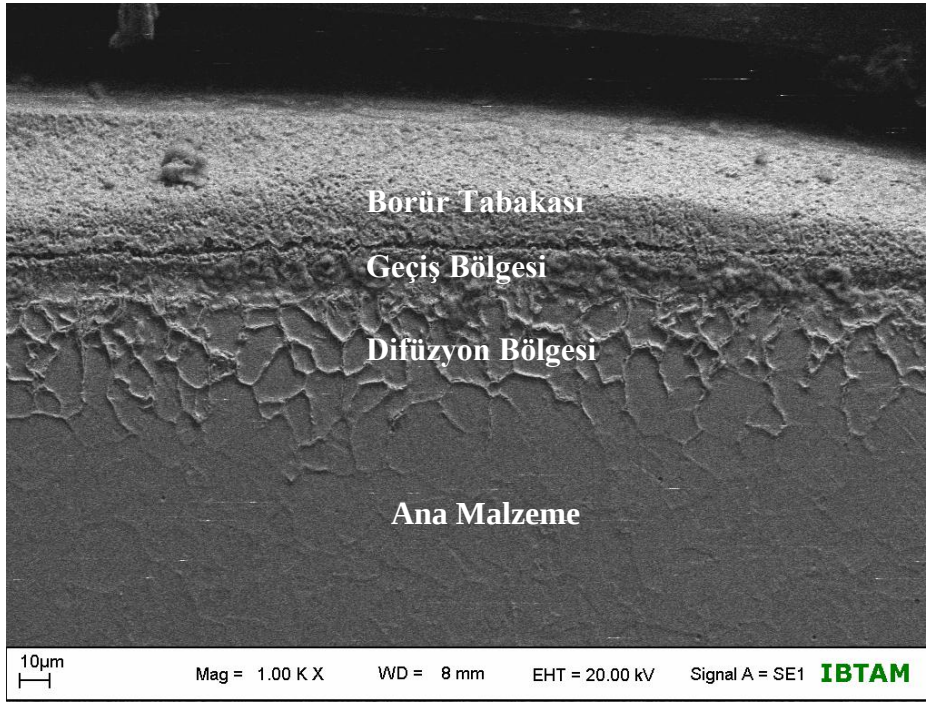
(b)



(c)

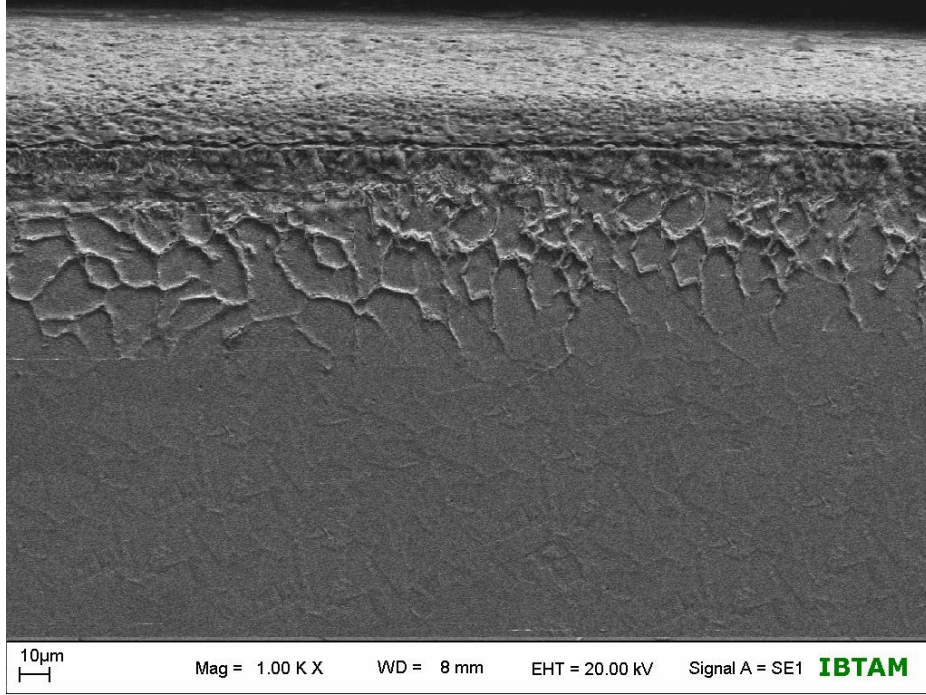
Şekil 3.1. AISI 304 paslanmaz çeliğin 950 °C’de a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat sürede Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 3.2’de Nanobor tozu kullanılarak yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saat sürelerdeki SEM fotoğrafları görülmektedir. SEM fotoğraflarından 950 °C’de de görüldüğü gibi 2 ve 4 saatlik parametrelerde borür tabakası, geçiş bölgesi, difüzyon bölgesi ve ana malzeme mikroyapısı, 6 saatlik parametrede ise sadece difüzyon ve ana malzeme bölgeleri görülmektedir. Hem 950 hem de 1000 °C’de 6 saat süre ile teste tabi tutulan numunelerin difüzyon bölgelerinde aşırı tane büyümesi tespit edilmiştir. Difüzyon bölgesinde ayrıca bor elementinin tane sınırı difüzyonuyla malzemenin içine doğru difüze olduğu ve artan sıcaklık ve süre ile difüzyon mesafesinin de arttığı açıkça görülmektedir.

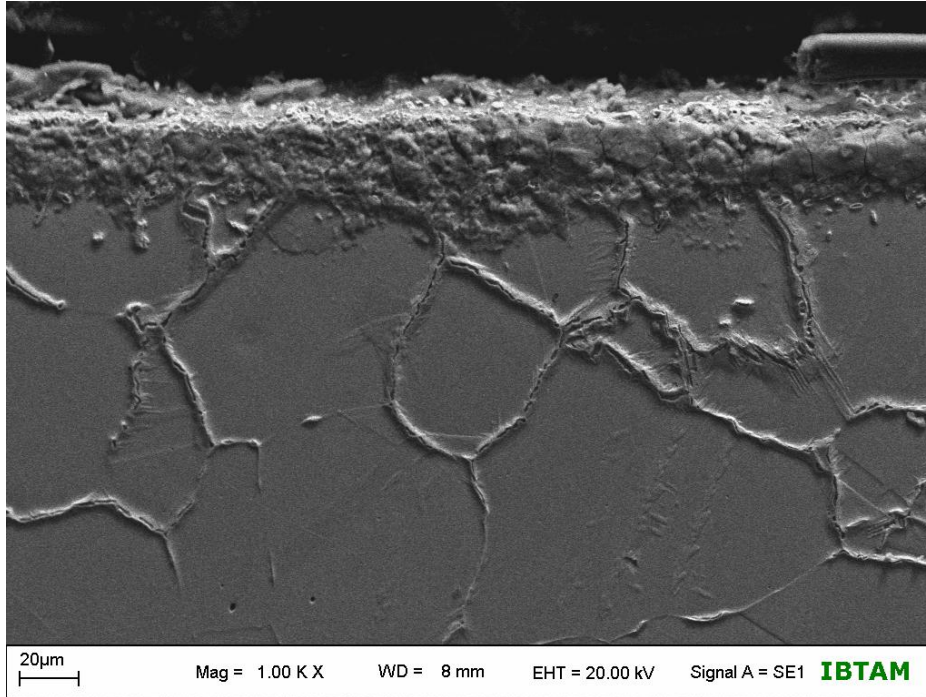


(a)

(“Şekil 3.2’nin devamı”)



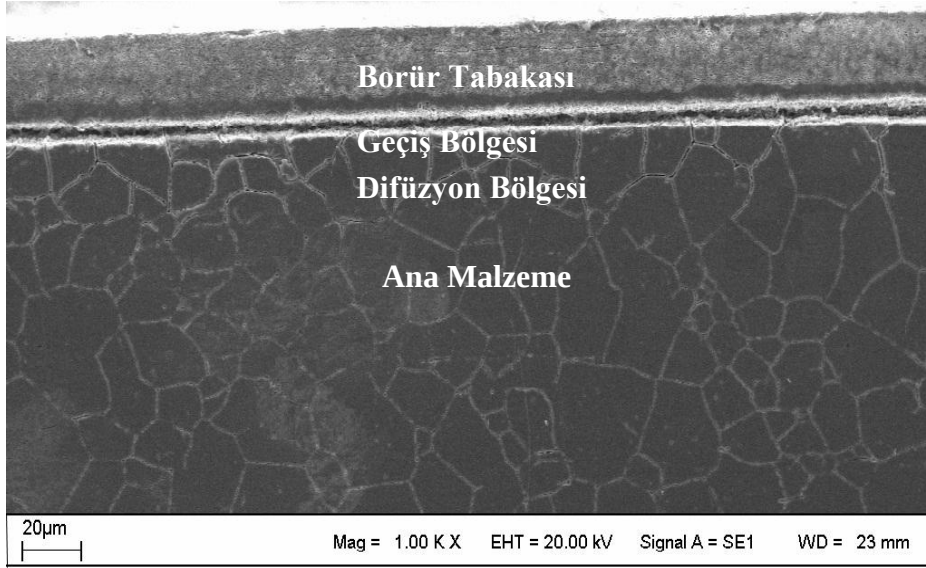
(b)



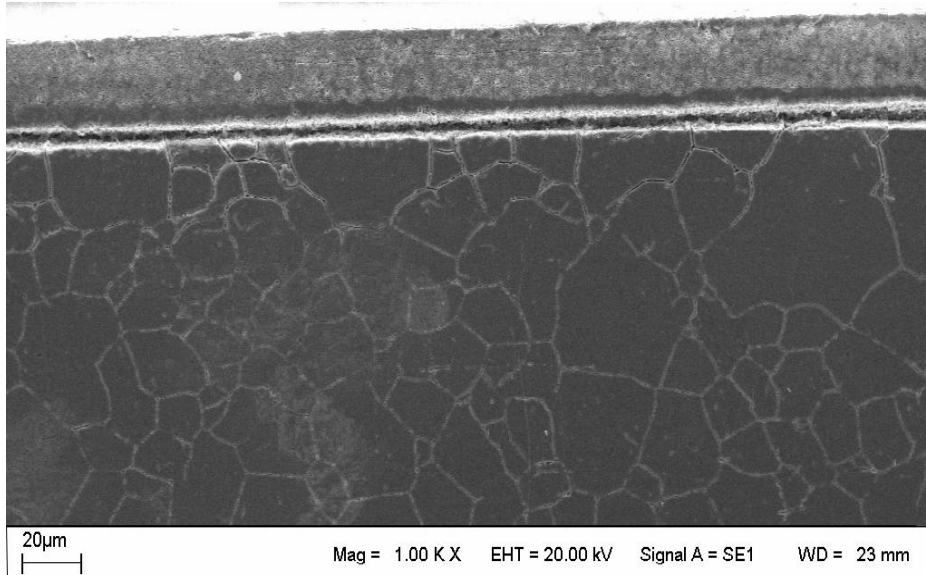
(c)

Şekil 3.2. AISI 304 paslanmaz çeliğin 1000 °C’de a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat sürede Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 3.3’de EKabor 3 tozu kullanılarak yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 950 °C’de 2 ve 4 saat sürelerdeki SEM fotoğrafları görülmektedir. SEM fotoğraflarından borür tabakası, difüzyon bölgesi ve ana malzeme bölgeleri görülmektedir. Borür tabakası kalınlığı ve difüzyon bölgesi açısından mikroyapılar arasında 4 saatlik parametrede bir miktar artış olsa da çok büyük bir farkın olmadığı görülmüştür.



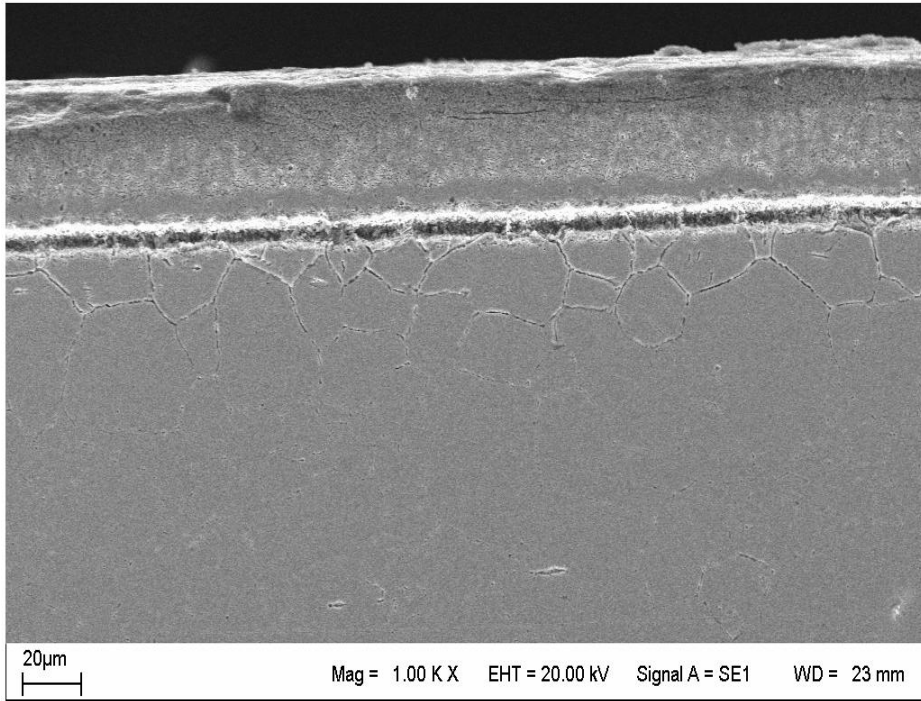
(a)



(b)

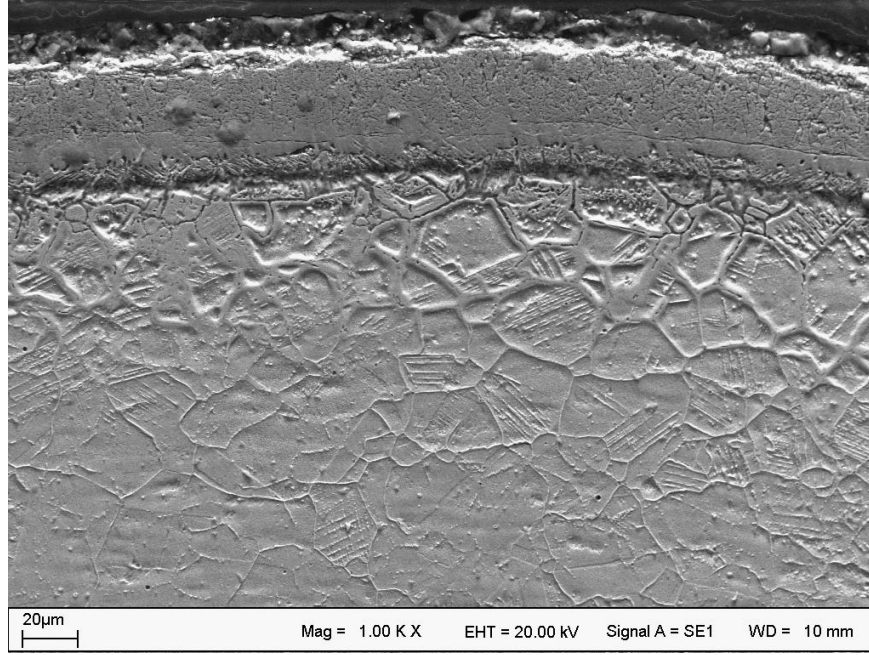
Şekil 3.3. AISI 304 paslanmaz çeliğin 950 °C’de a) 2 saat b) 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 3.4’de EKabor 3 tozu kullanılarak yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 1000 °C’de 2 ve 4 saat sürelerdeki SEM fotoğrafları görülmektedir. SEM fotoğraflarından borür tabakası, difüzyon bölgesi ve ana malzeme bölgeleri görülmektedir. Borür tabakası kalınlığı ve difüzyon bölgesi açısından 950 °C’ye kıyasla artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak artışın olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca bor elementinin tane sınırlarına difüzyonuyla gerçekleşen difüzyon bölge genişliğindeki artış da açıkça görülür.



(a)

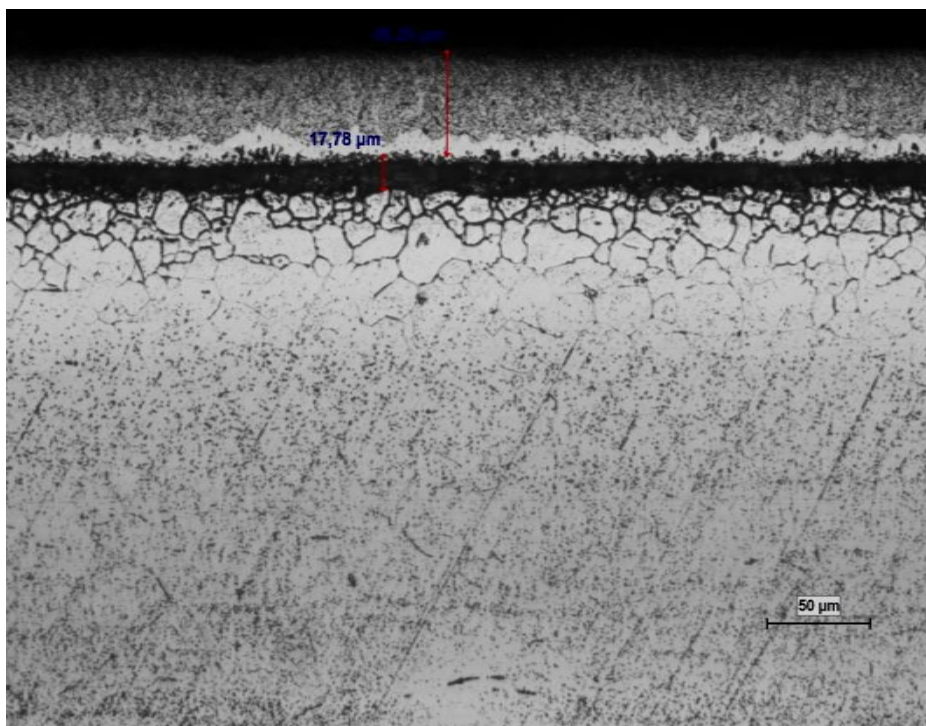
(‘‘Şekil 3.4’ün devamı’’)



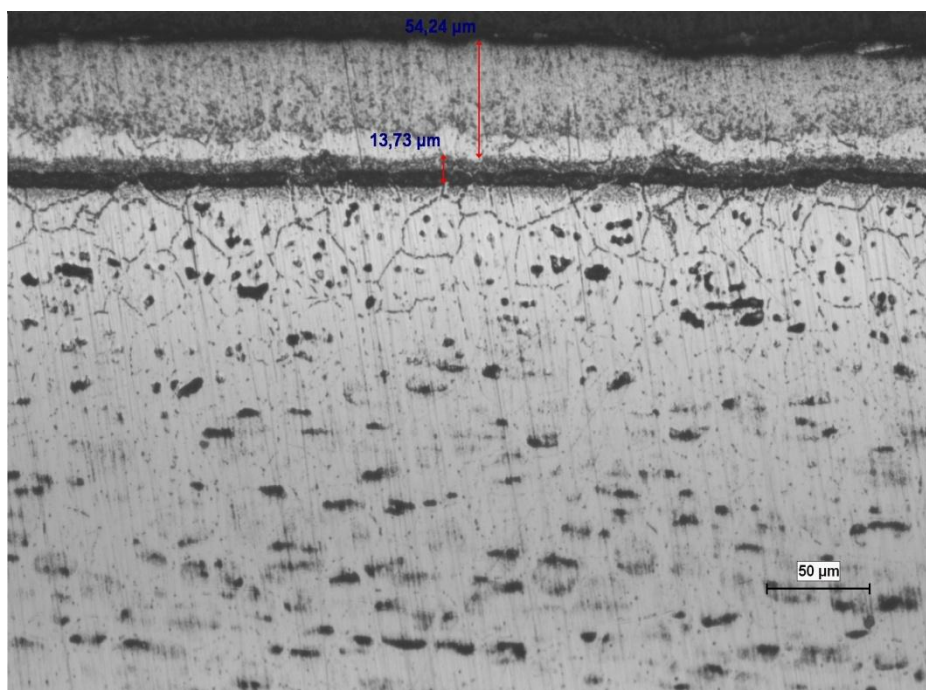
(b)

Şekil 3.4. AISI 304 paslanmaz çeliğin 950 °C’de a) 2 saat b) 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 3.5’de Nanobor tozu kullanılarak yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 950 °C’de 2, 4 ve 6 saat sürelerdeki optik mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Optik mikroyapı fotoğraflarından borür tabakası, geçiş bölgesi ve difüzyon bölgesi açıkça görülmektedir. Borür tabakası içerisinde kontrast farkına sahip iki farklı bölgenin meydana geldiği bu bölgelerden ise geçiş bölgesine yakın olan bölgenin Fe_2B bileşiği olduğu ve yüzeydeki tabakanın ise FeB bileşiği olduğu düşünülmüş ve bu durum EDX analizleriyle de desteklenmiştir.

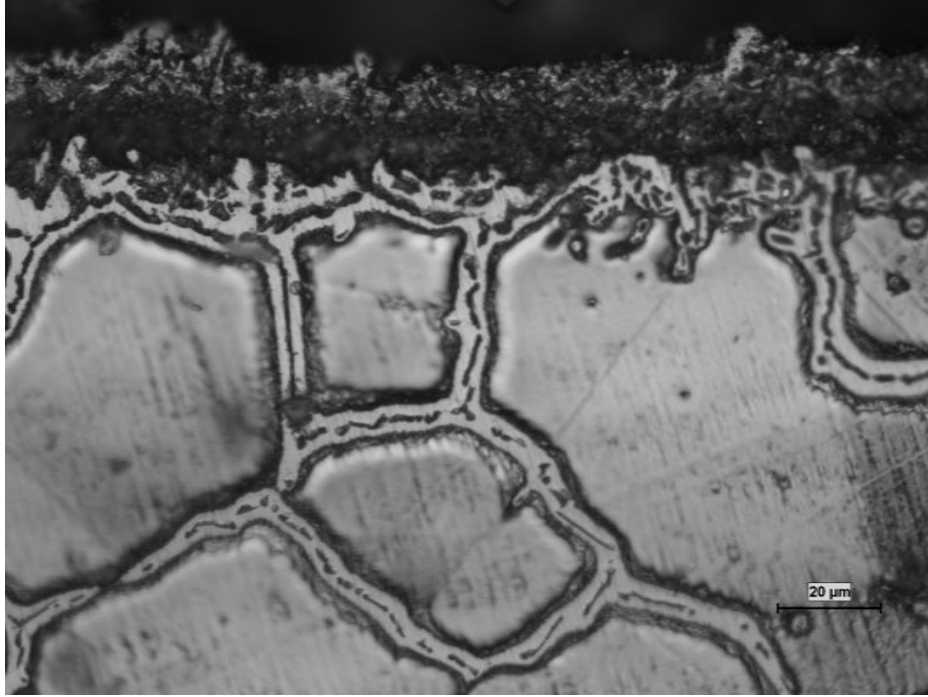


(a)



(b)

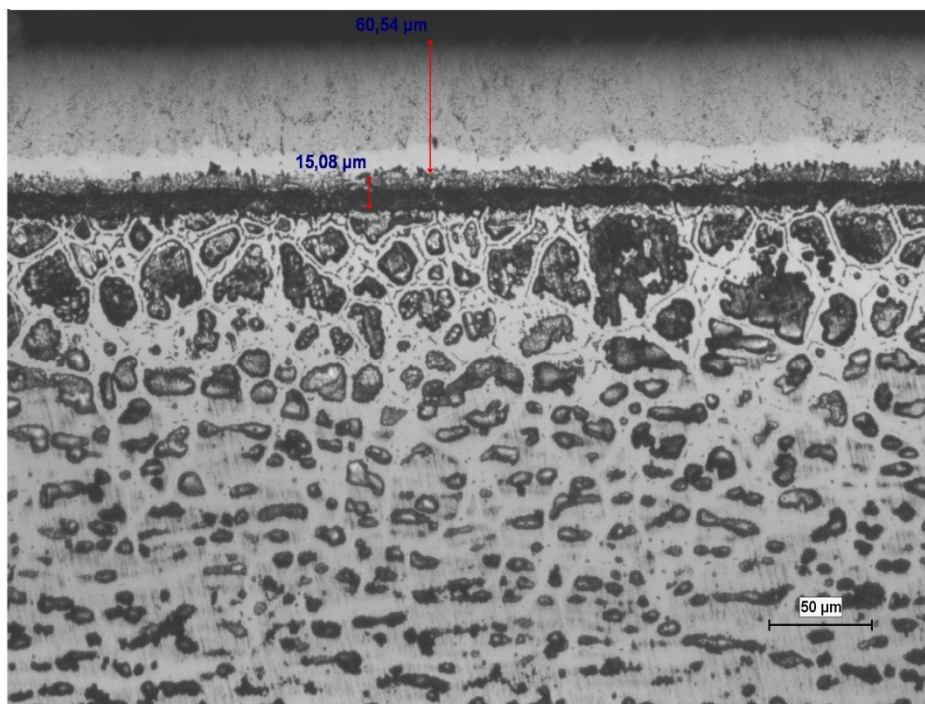
(“Şekil 3.5’in devamı”)



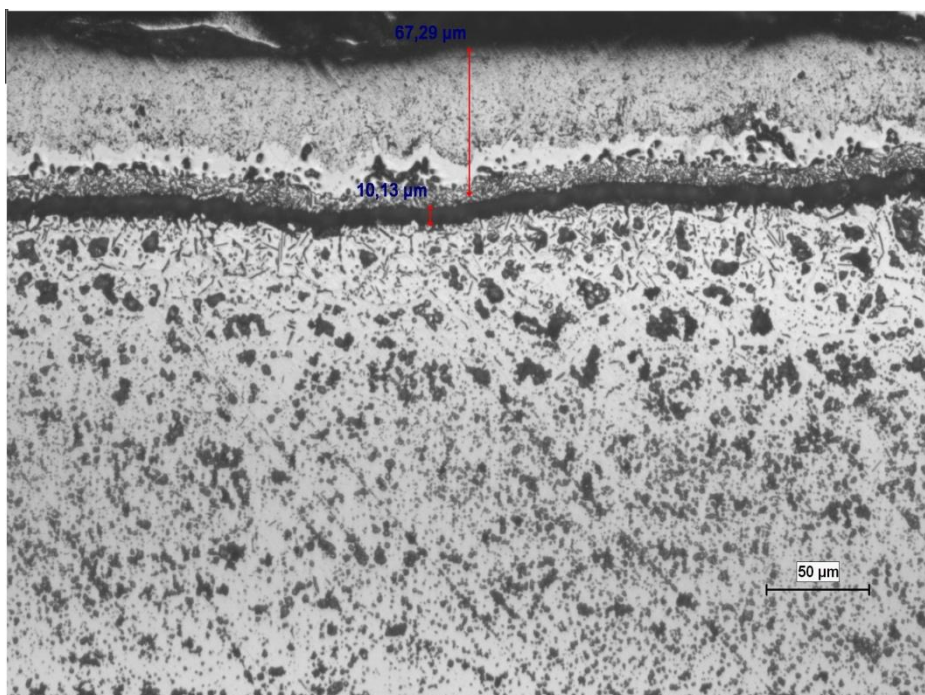
(c)

Şekil 3.5. AISI 304 paslanmaz çeliğin 950 °C’de a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat sürede Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin optik mikroyapı görüntüsü

Şekil 3.6’da Nanobor tozu kullanılarak yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saat sürelerdeki optik mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Optik mikroyapı fotoğraflarından borür tabakası, geçiş bölgesi ve difüzyon bölgesi 950 °C’de olduğu gibi açıkça görülmektedir. İşlem difüzyon kontrollü olduğundan artan sıcaklık ve süre parametrelerine bağlı olarak borür tabakası kalınlığı, geçiş bölgesi ve difüzyon bölgesinde artma meydana gelmiştir.



(a)



(b)

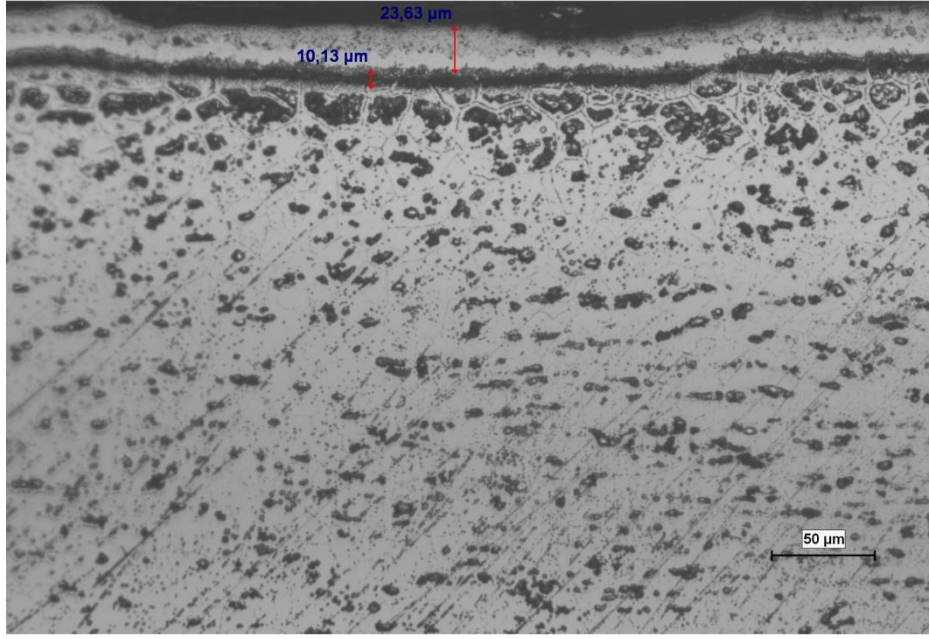
(“Şekil 3.6’nın devamı”)



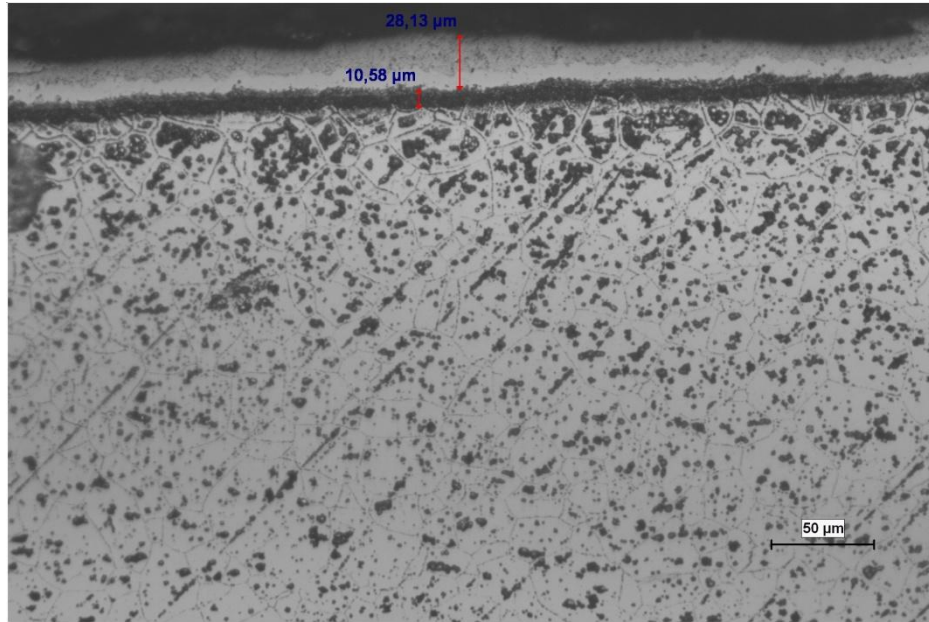
(c)

Şekil 3.6. AISI 304 paslanmaz çeliğin 1000 °C’de a) 2 saat b) 4 saat c) 6 saat sürede Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin optik mikroyapı görüntüsü

Şekil 3.7’de EKabor tozu kullanılarak yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 950 °C’de 2 ve 4 saat sürelerdeki optik mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Optik mikroyapı fotoğraflarından Nanobor tozu kullanılarak yapılan deneylerde olduğu gibi borür tabakası, geçiş bölgesi ve difüzyon bölgesi görülmektedir. Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde olduğu gibi 2 saat süre ile yapılan yüzey alaşımlama işleminde borür tabakasının daha ince olduğu ve bu tabaka içerisinde de yüzeyde meydana gelen FeB bileşiğinin 4 saatlik parametreye nazaran daha ince olduğu tespit edilmiştir.



(a)

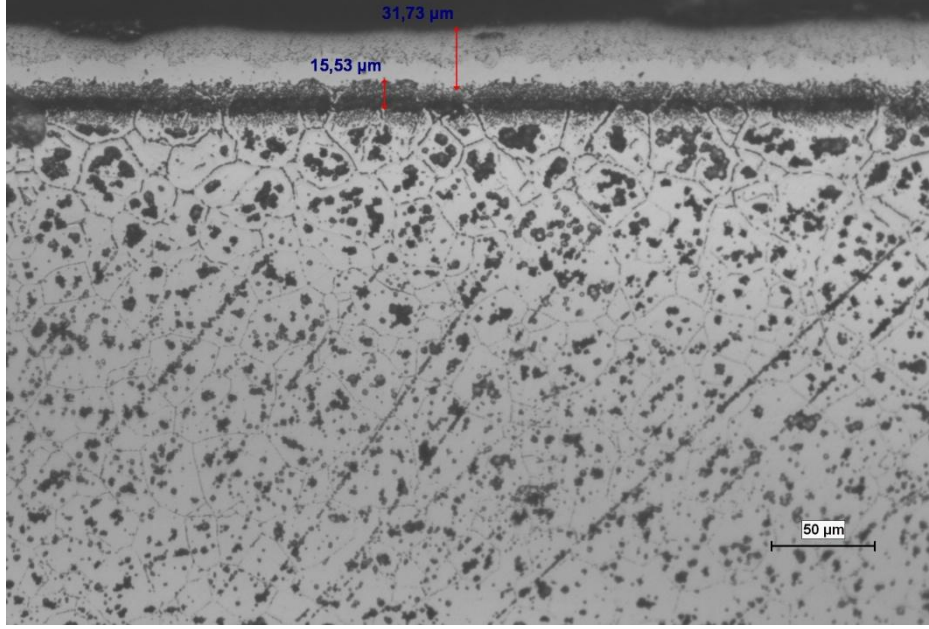


(b)

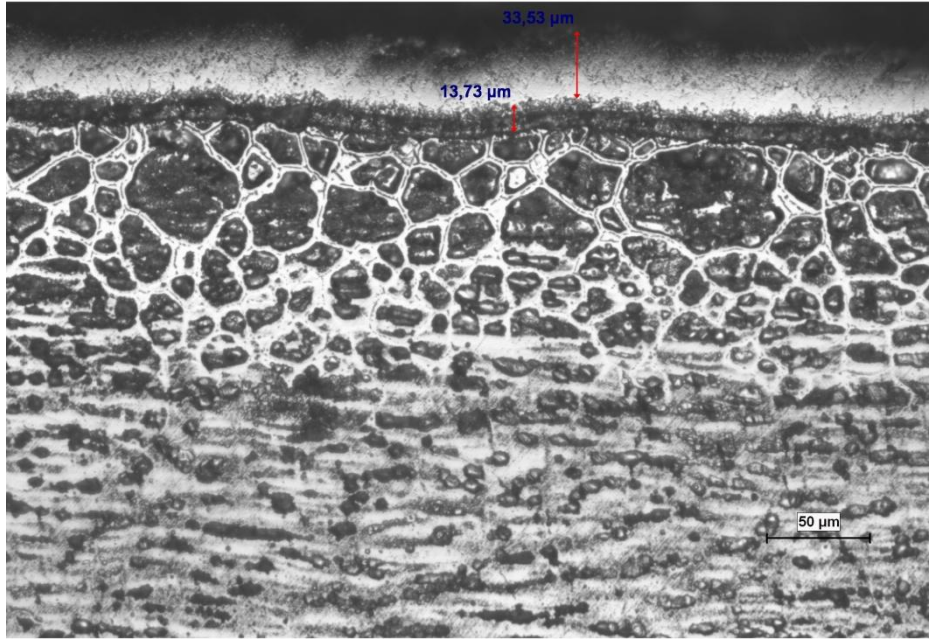
Şekil 3.7. AISI 304 paslanmaz çeliğin 950 °C’de a) 2 saat b) 4 saat EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin optik mikroyapı görüntüsü

Şekil 3.8’de EKabor 3 tozu kullanılarak yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 1000 °C’de 2 ve 4 saat sürelerdeki optik mikroyapı fotoğrafları

görülmektedir. Optik mikroyapı fotoğraflarından borür, geçiş ve difüzyon tabakalarının 950 °C’de yapılan deneylere nazaran daha kalın olduğu görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 3.8. AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 1000 °C’de a) 2 saat b) 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin optik mikroyapı görüntüsü



Şekil 3.9. AISI 304 paslanmaz çeliğin 1000 °C’de 6 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve kaplama tabakası dökülen numunenin makro görünümü

AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin Nanobor ve EKabor 3 tozları kullanılarak yapılan yüzey alaşımlandırma işlemi sonucu SEM ve optik mikroskopi çalışmaları sonucunda her iki toz kullanılarak yapılan kaplamalarda borür tabakası, geçiş bölgesi, difüzyon bölgesi ve matris olmak üzere dört farklı bölgenin meydana geldiği görülmüştür. Demir bor bileşimine sahip borür tabakası, tane sınırlarında ve yer yer tane içlerinde oluşan demir bor bileşimine sahip borür çekirdekçiklerinin var olduğu geçiş bölgesi, bunların altında yer alan karbon silisyum esaslı difüzyon bölgesi ve matris açık bir şekilde ortaya çıkmıştır.

Her iki toz ile yapılan yüzey alaşımlandırma işleminde de artan sıcaklık ve süre ile meydana gelen borür tabakası kalınlıkları artmıştır. İşlem difüzyon kontrollü olduğundan bu durum beklenen bir sonuçtur. Değişen işlem parametreleriyle bu tabakaların kalınlıkları Clemex analiz programı yardımıyla ölçülmüş olup; sonuçlar Şekil 3.8 ve Tablo 3.2’de verilmiştir.

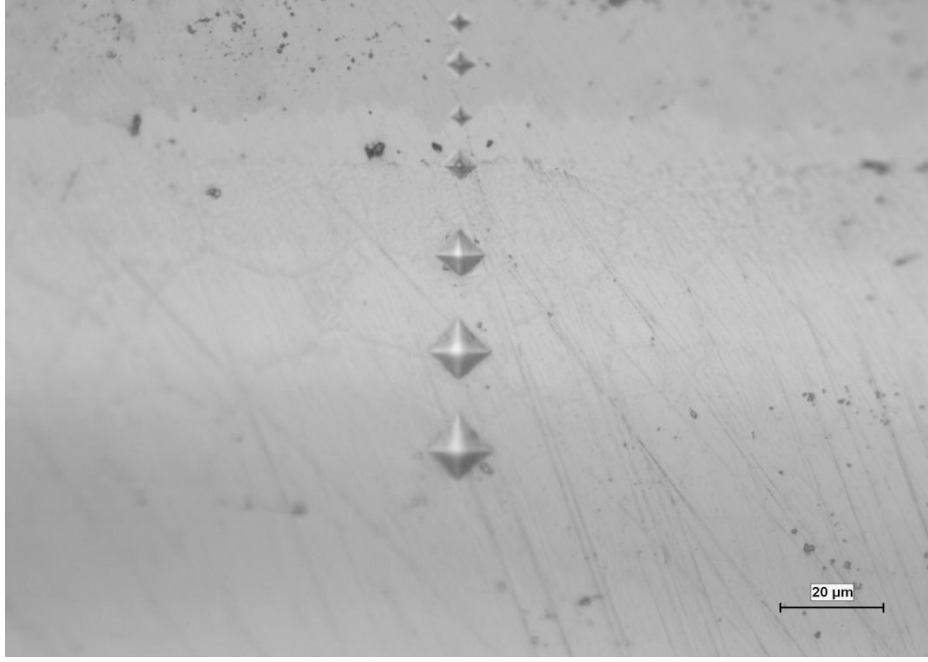
Tablo 3.2. Tüm deney koşullarında ölçülen ortalama borür tabakası kalınlıkları

Sıcaklık (°C)	Yüzey Alaşımlandırma Malzemesi	Süre (saat)	Kalınlık (µm)
950	Nanobor	2	49,29
		4	60,54
1000	Nanobor	2	54,24
		4	67,29
950	EKabor 3	2	23,63
		4	28,13
1000	EKabor 3	2	31,73
		4	33,53

Borür tabakası kalınlık ölçümleri yapılan numunelerden edilen sonuçlara göre işlem sonucunda artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak her iki yüzey alایشlandırma tozunda da borür tabakası kalınlıklarının arttığı belirlenmiştir. Yapılan işlem difüzyon kontrollü olduğundan işlem sıcaklığı ve sürenin artmasıyla tabaka kalınlığının artması beklenen bir sonuçtur. Bu durum bölüm 3.4’de verilen borür tabakasının büyüme kinetiği hesaplamaları ve literatürde yapılmış olan borlama çalışmaları ile uyum göstermektedir (Uslu, 2004; Ulutan, 2007; vd.,). Ayrıca Nanobor tozu ile yüzeyi alایشlandırılan numunelerin EKabor 3 tozu ile yüzeyi alایشlandırılan numunelere göre iki kat daha kalın bir borür tabakası elde edilmiştir. Bu durum Nanobor tozunun sahip olduğu tane boyutu ile ilgilidir. Çünkü borlama malzemesinin tane boyutu küçüldükçe temas yüzeyi artar, temas yüzeyinin artması yayılımı kolaylaştırır (Meriç ve Şahin, 2002). Ayrıca borür tabakasının büyüme kinetiği hesaplamalarında elde edilen difüzyon katsayısı bulguları bu sonucu desteklemektedir (Bölüm 3.4).

3.3. Mikrosertlik Sonuçları

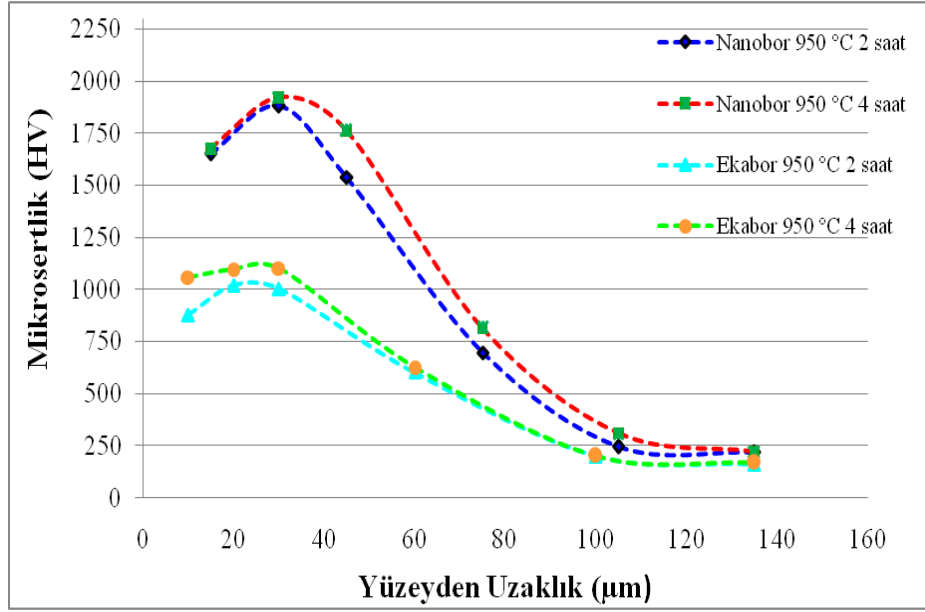
Yüzeyi alایشlandırma işlemine tabi tutulan tüm numunelerin Şekil 3.10’de görüldüğü üzere kesit alanından bir dizi halinde alınan mikrosertlik değerleri Tablo 3.3’de verilmiştir. Elde edilen verilere göre yüksek sertlik değeri borür tabakasında elde edilmiş ve geçiş bölgesi, difüzyon bölgesi ve ana malzemeye doğru düşüş göstermiştir.



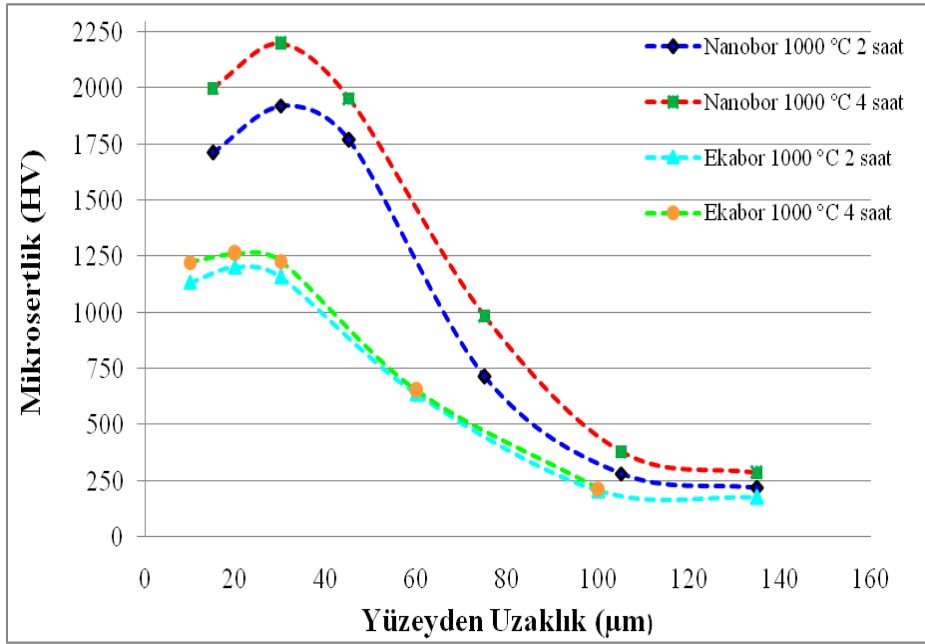
Şekil 3.10. 950 °C’de 2 saat süre ile yüzeyi Nanobor tozu ile alaşımlandırılmış numunenin mikrosertlik izleri

Şekil 3.10’da görüldüğü üzere en küçük sertlik izleri kaplama tabakasından 30-50 μm uzaklık aralığında 3. iz üzerinde elde edilmiştir. Bu durum yüzeyde oluşan gevrek olan FeB fazının sertlik ölçümleri sırasında dökülmesinden kaynaklanmaktadır.

Her sıcaklık grubu için borlama süreleri ve yüzeyden uzaklığa göre mikrosertlik değişim grafikleri hazırlanmıştır. Yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde 950 °C ve 1000 °C’de oluşan mikrosertlik dağılımları Şekil 3.11 ’de gösterilmiştir



.(a)



(b)

Şekil 3.11. Nanobor ve Ekabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 çeliğin a) 950 °C b) 1000 °C yüzeyden itibaren elde edilen sertlik değerleri değişimi

Tablo 3.3. Yüzeyden 20-50 µm arası uzaklıktaki bölgede ölçülen maksimum mikrosertlik değerleri

Yüzey Alaşımlandırma Malzemesi	Sıcaklık (°C)	Süre (saat)	Mikrosertlik(HV)
AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çelik			
Nanobor	950	2	1880
		4	1926
		6	526 (Kaplama tabakası dökülen)
	1000	2	1921
		4	2200
		6	554 (Kaplama tabakası dökülen)
EKabor 3	950	2	1020
		4	1100
	1000	2	1202
		4	1264

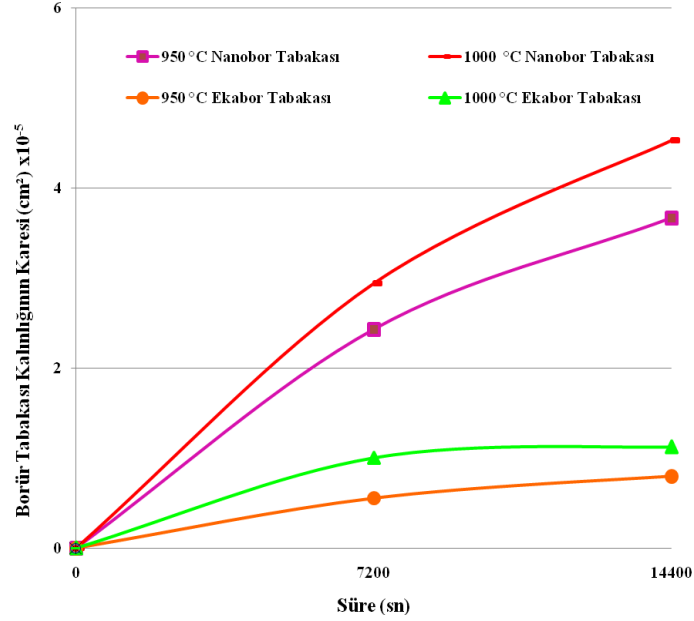
Yüzey alâşımlandırma işlemi sonucunda Nanobor tozu ile yüzeyi alâşımlandırılan numunelerde maksimum 2200 HV'lik sertlik değeri elde edilirken EKabor 3 tozu ile yapılan işlem sonucunda maksimum 1264 HV'lik sertlik değeri ulaşılmıştır. Nanobor tozu ile 6 saatlik parametrelerde yapılan deneylerde borür tabakası tamamen kalktığından dolayı sadece geçiş bölgesi sertlik değeri alınabilmektedir. Nanobor tozu ile elde edilen sertlik değerlerinin daha yüksek olması, Nanobor tozunun %99,7 saflıkta olması ve malzeme içerisine difüz olan bor'un miktarıyla ilgilidir. EDX analizlerinde eşdeğer mikroyapı bölgelerinden alınan noktalarda Nanobor tozu ile yüzeyi alâşımlandırılan numunede EKabor 3 ile alâşımlandırılan numuneye göre iki katı geçen miktarlarda bor'un yapı içerisine difuze olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.15).

3.4. Borür Tabakasının Büyüme Kinetiği

Yüzey alâşımlandırma süresi ve sıcaklığına bağlı olarak Nanobor ve EKabor 3 tozu ile yüzey alâşımlandırma tabakasının büyüme kinetiği materyal ve metot kısmında verilen (2.1) ve (2.2) matematiksel formüller ile hesaplanmıştır. Bu yöntemde borür tabakası kalınlığının süreyle değişimi temel alınmış ve formül (2.1) vasıtasıyla borür tabakası kalınlığının (Tablo

3.2) süreye bağlı değişimi grafiği (Şekil 3.12) çizilerek, bu grafiğin eğiminden de Tablo 3.4’de verilen difüzyon katsayıları bulunmuştur.

$$d^2=D.t \quad (2.1)$$



Şekil 3.12. Yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin d²-t diyagramı

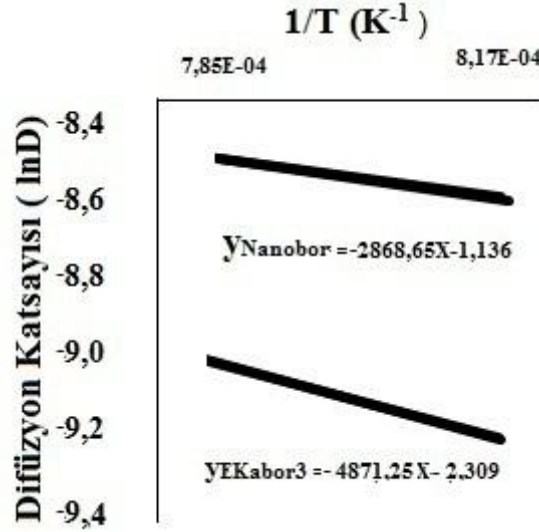
Tablo 3.4. Yüzey alaşımlandırma işlemindeki difüzyon katsayıları

Yüzey Alaşımlandırma Sıcaklığı (°C)	Difüzyon Katsayısı (cm²/sn)	
	Nanobor	EKabor 3
950	25,45x10 ⁻¹⁰	5,49 x10 ⁻¹⁰
1000	31,44 x10 ⁻¹⁰	7,80 x10 ⁻¹⁰

Borür tabakasının büyümesini etkileyen temel faktör tabaka içerisindeki borun difüzyonudur. Bu açıdan büyüme hız sabiti (D), aktivasyon enerjisi (Q) ve sıcaklık arasındaki ilişki Arrhenius bağıntısı ile ifade edilebilir.

$$D = D_0 \cdot \text{Exp}\left(\frac{-Q}{R.T}\right) \quad (2.2)$$

Bu eşitlikten faydalanarak $\ln D$ ve $1/T$ diyagramları (Şekil 3.13) sonucunda oluşan eğrilerin eğimleri alınarak Tablo 3.5’de verilen Aktivasyon enerjisi (Q) değeri elde edilmiştir.



Şekil 3.13. Yüzey alaşımlandırma farklı bor tozlarının Arrhenius denklemi

Tablo 3.5. Aktivasyon enerjisi değerleri

AISI 304	Bor Tozu	Aktivasyon Enerjisi (J/mol)
Östenitik	Nanobor	87290,83
Paslanmaz	EKabor 3	148228,43
Çelik		

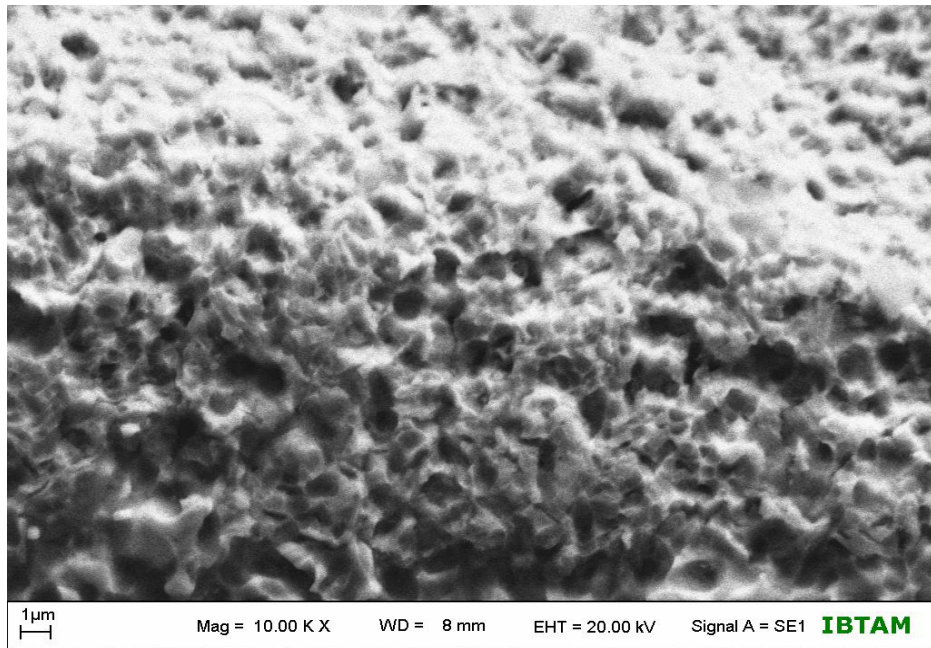
Nanobor tozu ile yüzey alaşımlandırma işleminde difüzyon katsayısının Ekabor 3 tozuna göre 5 kat’a yakın daha hızlı olduğu ve alaşımlandırma işleminin başlaması için gerekli olan aktivasyon enerjisinin %50 daha az olduğu belirlenmiştir. Bu durum yüzey alaşımlandırma malzemesinin tane boyutu ile ilgilidir. Ayrıca; elde edilen verilerden yararlanarak, sanayi uygulamalarında istenen belirli bir sıcaklık ve süre için tabaka kalınlıkları hesaplamaları önceden yapılabilme olanağı bulunmaktadır.

3.5. Tabaka Yapısı

Borür tabakaların yapısını ve oluşan fazlar hakkında bilgi sahibi olabilmek için mikroyapı ve SEM görüntüleri incelenmiş ayrıca, EDX ve XRD analizleri yapılmıştır.

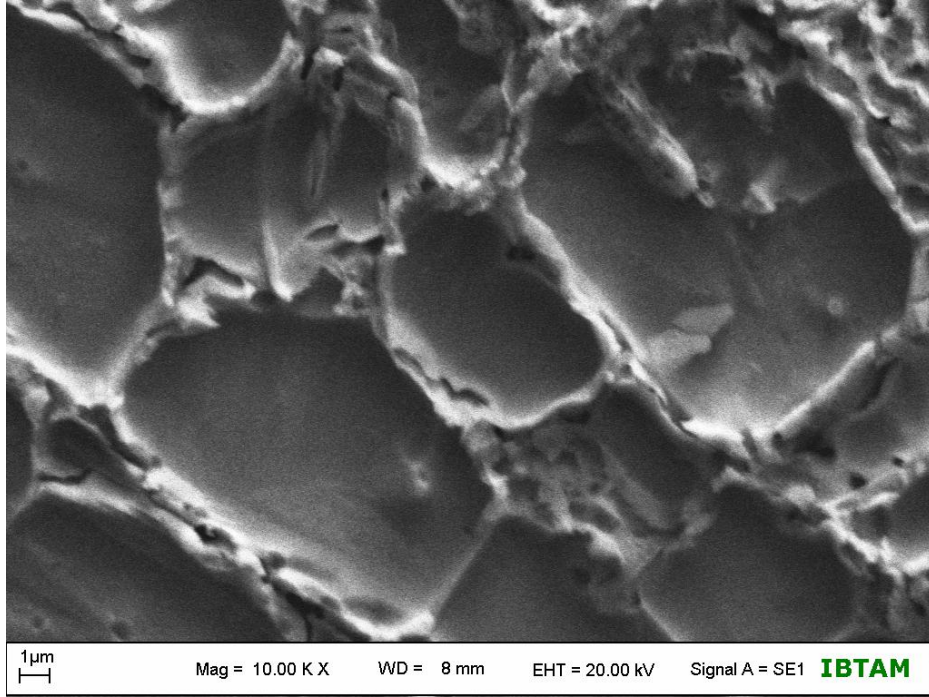
Şekil 3.14'de Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış olan numunenin borür tabakası, difüzyon bölgesi ve matris bölgelerinden alınan SEM 10000X görüntüleri verilmiştir.

Şekil 3.14.a'da borür tabakası içerisinde kontrast farkına sahip iki farklı bölgenin meydana geldiği bu bölgelerden ise geçiş bölgesine yakın olan koyu bölgenin Fe_2B bileşiği olduğu ve yüzeydeki açık bölgenin ise FeB bileşiği olduğu EDX analizleri ile belirlenmiştir. Şekil 3.14.b'de bor fazları oluşumunun (çekirdeklenme) tane sınırlarında başladığı açık bir şekilde görülmektedir. Difüzyon bölgesi tane sınırları üzerinden alınan EDX analizlerinde (Şekil 3.15a ve 3.15b) Nanobor ve EKabor 3 tozu ile alaşımlandırılan numunelerin 4 ve 5 olarak kodlanan noktalarında sırasıyla atomik %24 ,%8 ile %11, %4 oranında bor tespit edilmiştir. Bu durum Özbek (1999) tarafından bor fazlarının aktif bor konsantrasyonuna bağlı olarak tane sınırları ve dislokasyonlar gibi mikro hataların, yüzey pürüzlülükleri ve çizikleri gibi makro hataların bulunduğu daha reaktif noktalarda başladığı, bu noktalarda oluşan Fe_2B çekirdekleri oluşur ve gelişir ifadesi ile örtüşmektedir. Şekil 3.14c'de ise yüzey alaşımlandırma işlemi sırasında işlemden etkilenmeyen ana malzeme bölgesi gösterilmiştir. Şekil 3.15a, 3.15b'de 6 olarak kodlanan EDX analizleri ile bu noktanın işlemden etkilenmediği, kimyasal bileşiminin ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğe yakın olduğu belirlenmiştir.

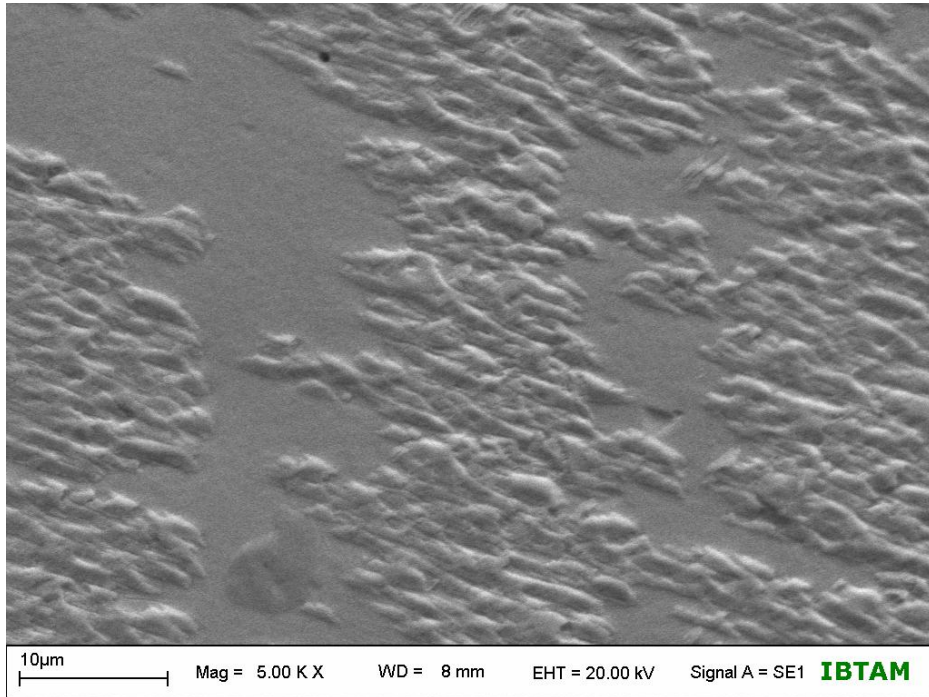


(a)

(‘‘Şekil 3.14’ün devamı’’)



(b)



(c)

Şekil 3.14. Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 paslanmaz çeliğin a) kaplama tabakası b) difüzyon bölgesi c) matris SEM görüntüsü

AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğinde oluşan borür tabakasının literatürde sade karbonlu alaşımsız çeliklerin aksine düz bir formda meydana geldiği SEM ve optik mikroyapı fotoğraflarında (Şekil 3.1, Şekil 3.5 ve Şekil 3.14) görülmektedir. Bu durum alaşımlı çeliklerdeki alaşım elementlerinin bor'un kristal yapıdaki difüzyonunu engellemesi ile açıklanabilir (Sinha, 1991; Şen, 1997; Özbek, 1999). Çünkü; Alaşım elementleri borun daha derinlere ya da hızlı difüzyon yollarını kullanmasına engel olduklarından, kaplama tabakasının morfolojisi düz bir levha şeklinde oluşur. Düşük alaşımlı çeliklerde ise, bor, çelik içerisine dislokasyonlar ve özellikle de tane sınırları, gibi hızlı difüzyon yolları ile daha rahat ilerlediğinden, tabakanın şekli ana malzeme tarafında testere dişi formu şeklinde oluşur (Özbek, 1999; Ayter, 2005; Yağcı, 2009).

3.5.1. EDX Sonuçları

Yüzey alaşımlandırma işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementler yeniden dağılırlar (Özbek, 1999). Bu arada FeB ve Fe₂B tabakalarının, karbon ve silisyum çözündürme kabiliyeti olmamasından dolayı, bor yayılımı esnasında C ve Si, borür tabakasından içeriye doğru itilirken (Şen, 1998), Cr ve Mn atom numaraları Fe'den küçük olduğundan yüzeye doğru hareket eder. Bu yeni dağılımı belirlemek için EDX analizleri yapılmıştır. Şekil 3.15'de EDX analizleri verilmiştir.

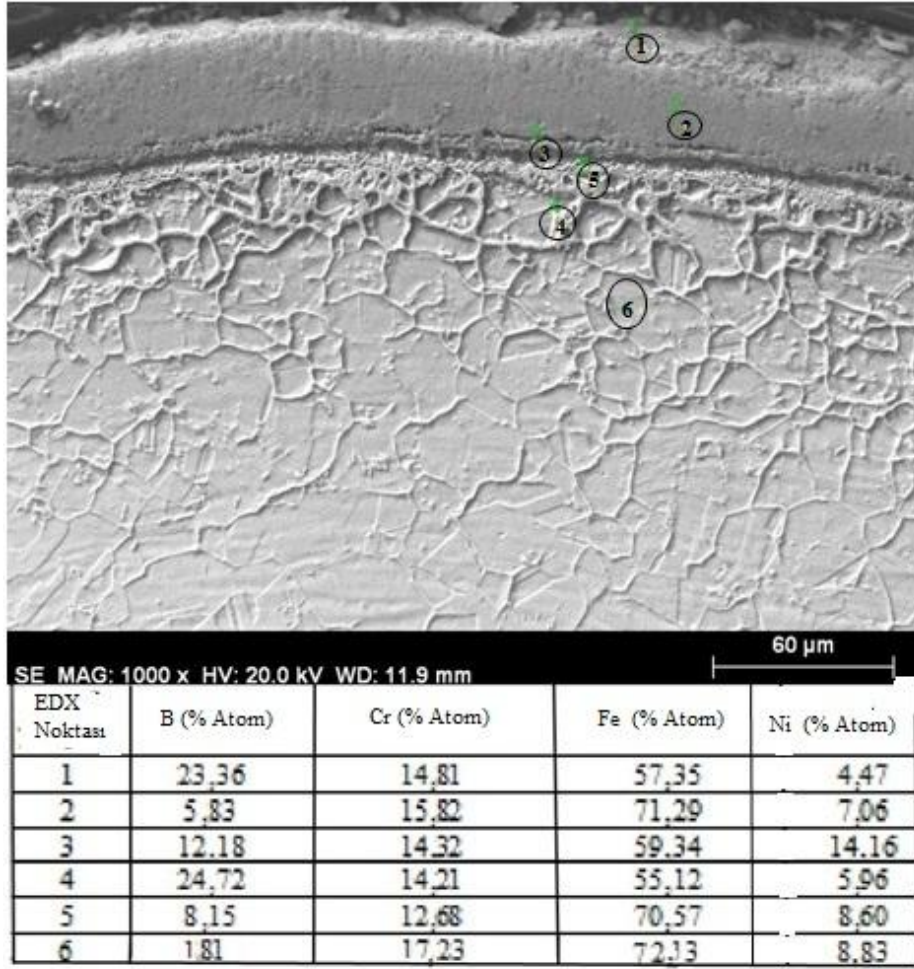
Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunenin belirlenen noktalardan elde edilen değerleri (Şekil 3.15a) 1. ve 3. Noktada FeB, 2. noktada Fe₂B olduğu tespit edilmiştir. 4. nokta tane sınırları üzerinde oluşan borür tabakası başlangıç bölgesinden aldığından % 24,72 bor tespit edilirken, 5. nokta yüzeye daha yakın olmasına rağmen %8,15 oranında bor tespit edilmiştir. Bu durum bor atomlarının arayer atomu şeklinde tane sınırlarında kolaylıkla hareket ettiği ve reaktif bölgelerde çekirdeklenmeleriyle borür tabakası oluşturduğunu göstermektedir. 6. nokta tane içerisinden alınmış olup kimyasal bileşiminin esas malzemeye yakın olduğu tespit edilmiştir.

EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunenin belirlenen noktalarındaki değerler 1 ve 3. noktada FeB, 2. noktada ise Fe₂B fazının oluştuğunu göstermektedir. 4. nokta tane sınırlarında FeB fazı oluşturabilecek kadar B tespit edilmiştir. 5. noktada tane sınırı üzerinden alınmış olup % 4,66 bor tespit edilmiştir. 6. nokta ana malzeme tane

içerisinden alınmış olup kimyasal bileşiminin esas malzemeye yakın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.15b).

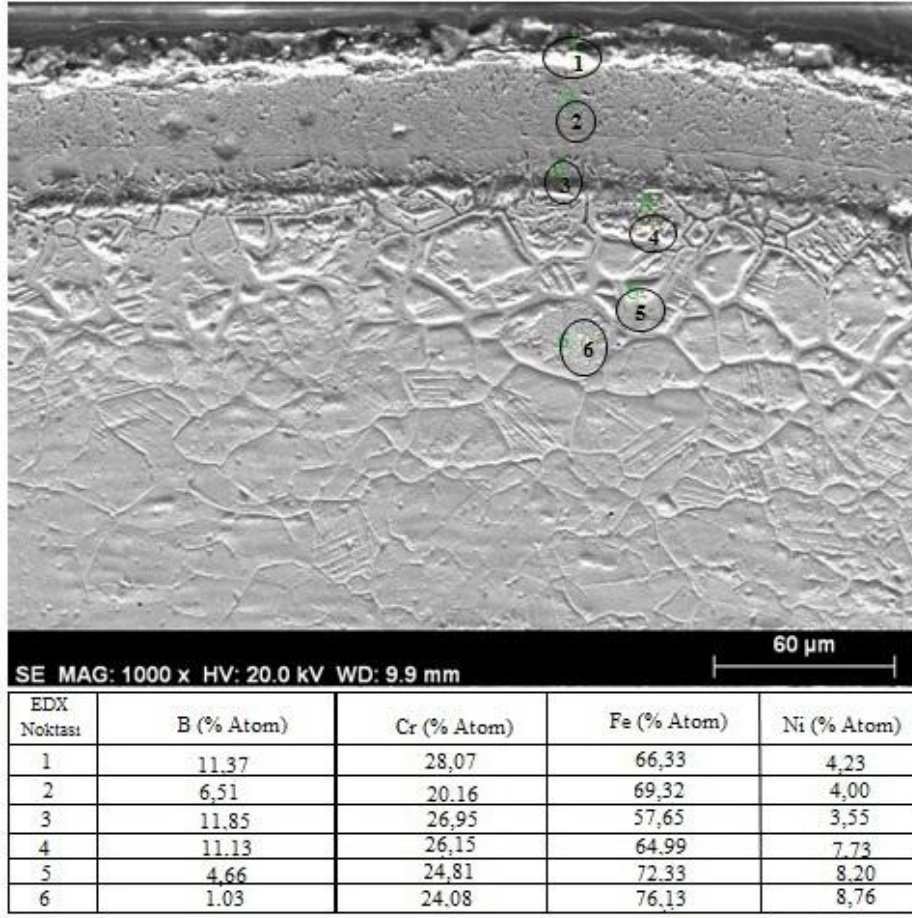
Nanobor tozu ile yüzeyi 6 saat süre ile alaşımlandırılan ve borür tabakası dökülen numunenin EDX analizi ile (Şekil 3.15c) difüzyon bölgesi ve ana matris üzerindeki 3 noktada da az miktarlarda bor tespit edilmiştir. EDX analizleri sonucunda en fazla bor miktarının Nanobor tozu ile alaşımlandırılan numunlerde tespit edilmesi borlama maddesinin daha küçük olmasından dolayı daha kolay ve fazla difuze olması beklenen bir sonuçtur.

Bugüne kadar birçok borlama alanında yapılan çalışmada difüzyon bölgesindeki ölçülen sertlik değerlerinin borlama işlemi sırasında demir içerisinde çözünemeyen C ve Si elementlerinin difüzyon bölgesine doğru hareket etmeleri sonucunda meydana geldiği düşünülmekte idi (Matuschca, 1980; Sinha, 1991; Şen, 1997; Özbek, 1999 vd.,). Fakat bu çalışmada; şekil 3.14b SEM mikroyapı resmindeki tane sınırlarındaki çekirdeklenme ve şekil 3.15 difüzyon bölgesi tane sınırlarından (Şekil 3.15a ve 3.15b; 4 ve 5 noktaları) elde edilen EDX verileri bu bölgelerde FeB ve Fe₂B oluşturabilecek kadar bor tespit edildiği dolayısıyla tane sınırlarında oluşan borür çekirdeklenmelerinin de difüzyon bölgesi sertliği üzerinde etkisi olduğunu göstermektedir.



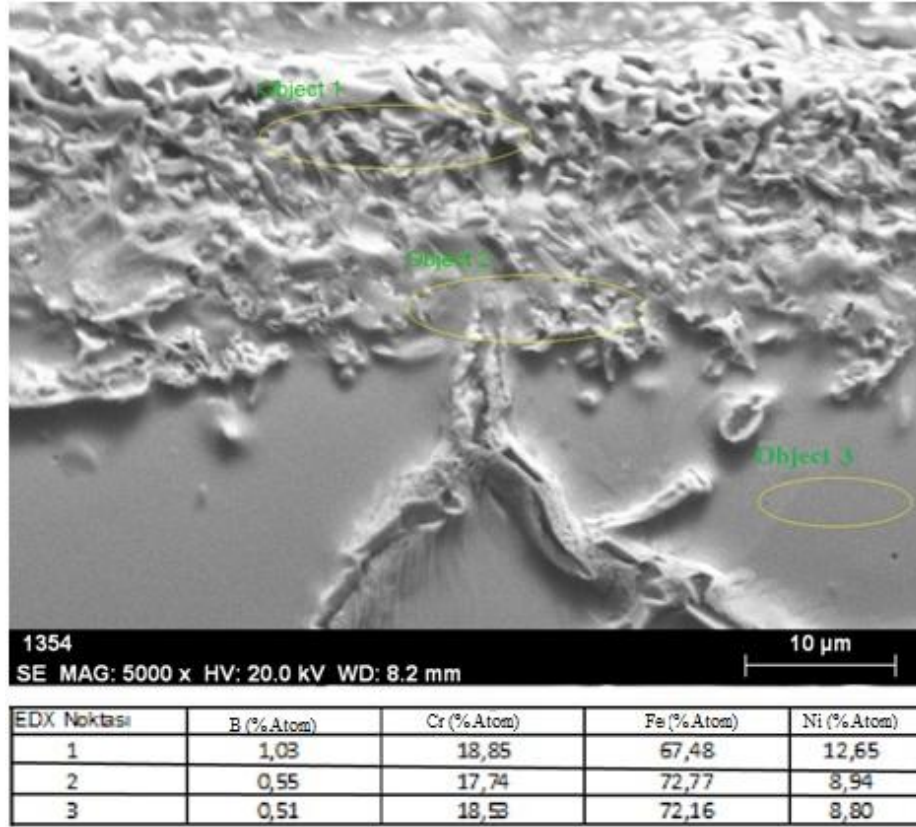
(a)

(“Şekil 3.15’in devamı”)



(b)

(“Şekil 3.15’in devamı”)

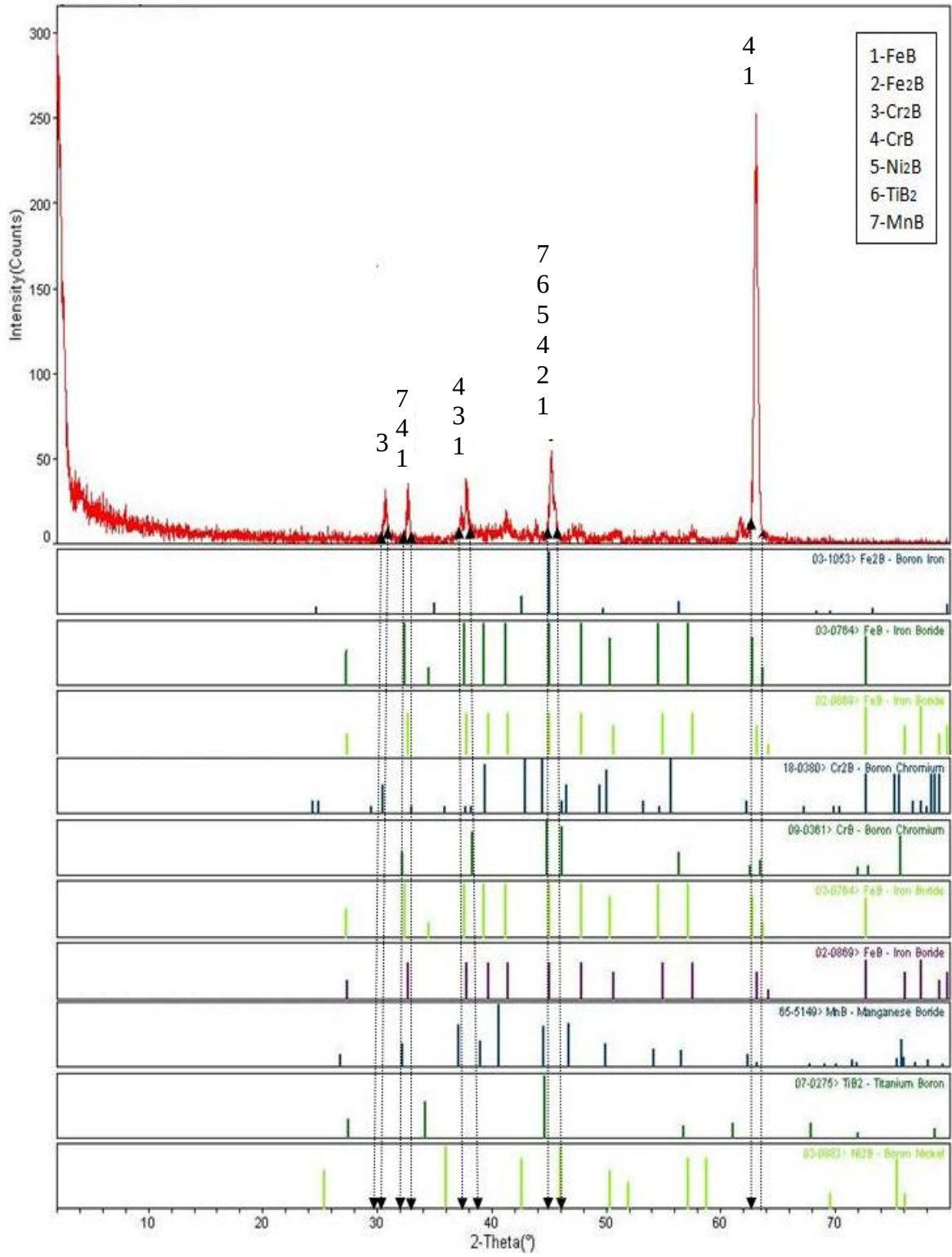


Şekil 3.15. a) 1000 °C’de 4 saat Nanobor tozu b) 1000 °C’de 4 saat EKabor3 tozu c) 1000 °C’de 6 saat Nanobor tozu yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin EDX görünümü ve % ağırlık oranları

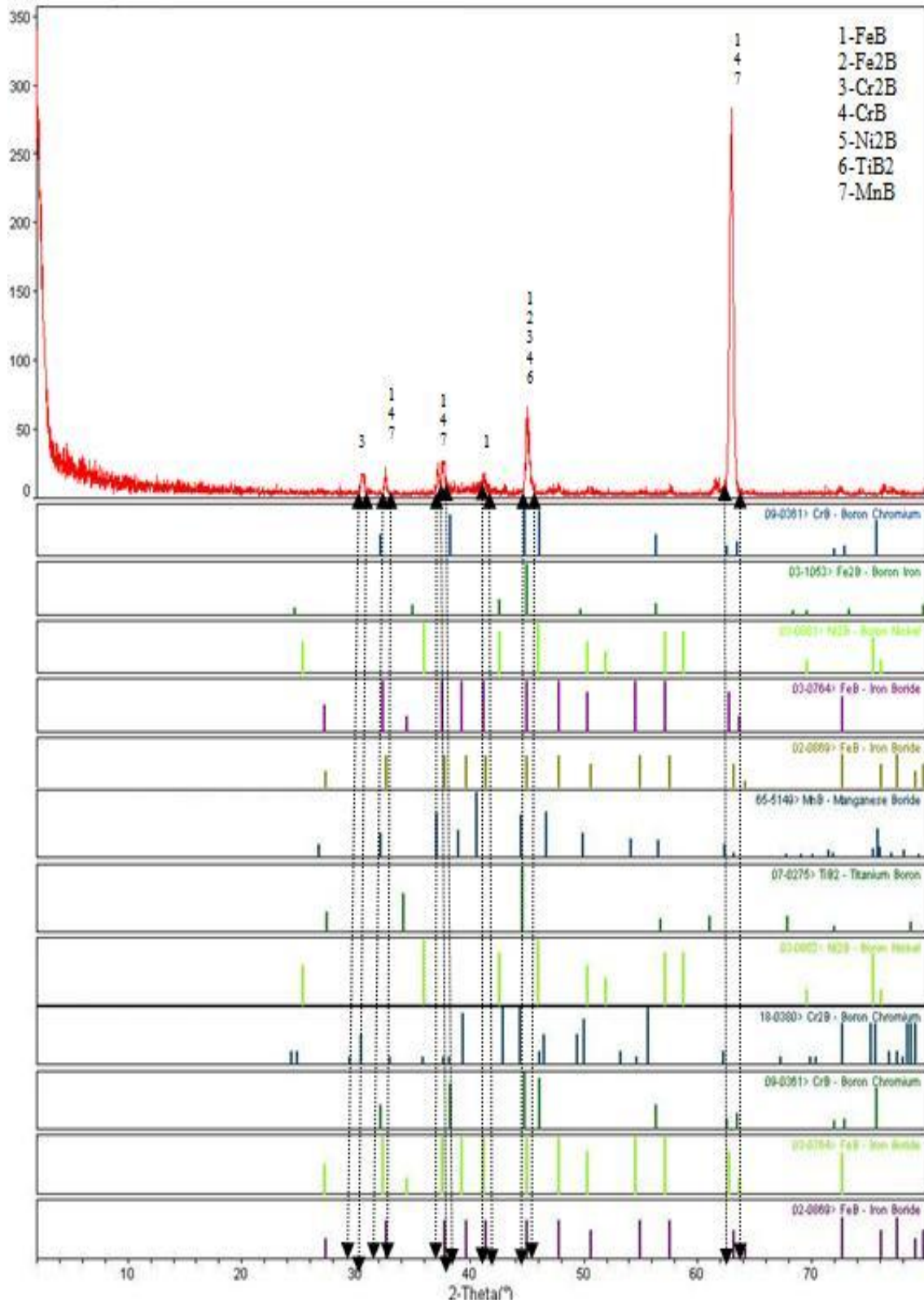
EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış numunenin belirlenen noktalarından elde edilen % B değerlerinin Nanobor tozu ile elde edilen değerlerden düşük olduğu görülmektedir (Şekil 3.15b). Bu durum nanobor tozlarının sahip olduğu tane boyutu dolayısıyla östenitik paslanmaz çelik tane sınırlarında hem arayer hemde yeralan atomu olarak çok daha kolay bir biçimde difüz alabilirken EKabor tozlarının sadece yeralan atomu olarak hareket edebilmeleri ile açıklanabilir. Çünkü bor tozlarının tane boyutu küçüldükçe temas yüzeyi artar, temas yüzeyinin artması ise yayılımı kolaylaştırır. Ayrıca EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde Nanobor ile alaşımlandırılanlara göre daha az oranda bor tespit edilmiş olması, XRD analizlerinde de Fe_2B fazının daha fazla oluşmuş olması ile örtüşmektedir.

3.5.2. XRD Analiz Sonuçları

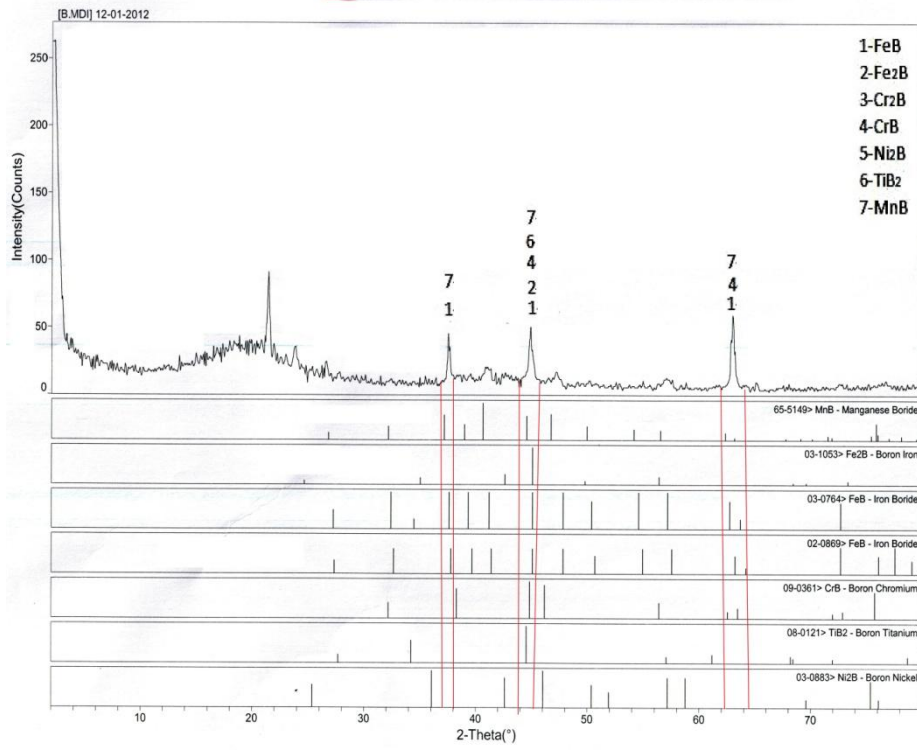
Borür tabakasında oluşan fazları belirlemek için XRD analizleri yapılmıştır. Sıcaklık aralıkları birbirine yakın olduğundan borlama süresinin etkilerini görebilmek amacıyla Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan 950 °C’de 2 ve 4 saat EKabor 3 tozu ile borlanmış 950 °C ve 1000 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılmış numuneler incelenmiştir. Şekil 3.16-3.17’de 950 °C’de 2 ve 4 saat Nanobor tozu Şekil 3.18-3.19’da ise EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 çeliğin işlem sonrası borür tabakasında oluşan fazların X-ışın difraksiyon paterni verilmiştir.



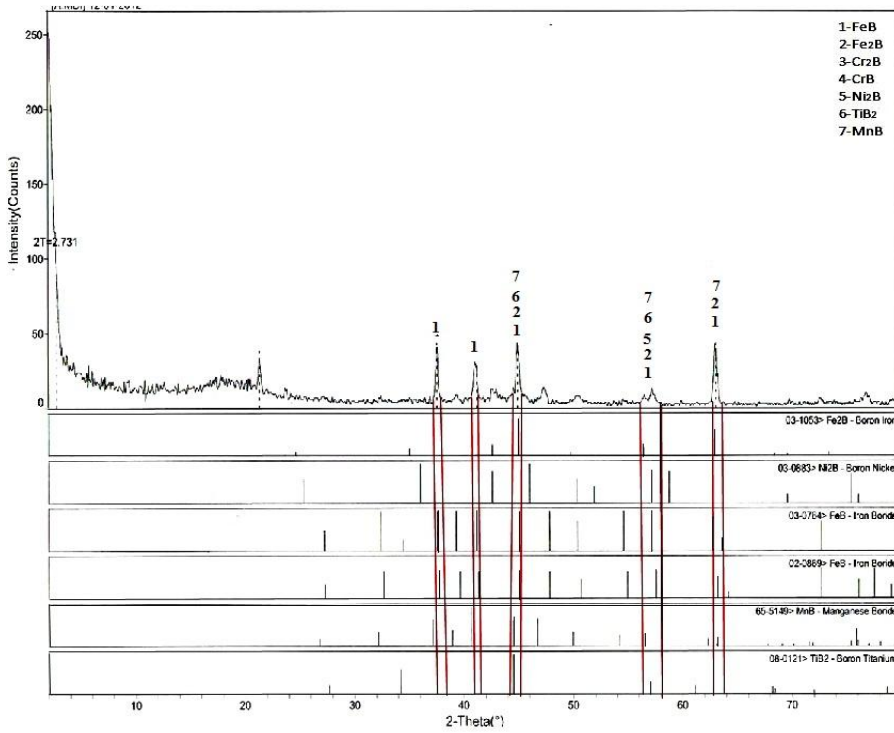
Şekil 3.16. 950 °C’de 2 saat süre ile yüzeyi Nanobor tozu ile alaşımlandırılan numunenin XRD diyagramı



Şekil 3.17. 950 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi Nanobor tozu ile alaşımlandırılan numunenin XRD diyagramı



Şekil 3.18. 950 °C'de 4 saat süre ile yüzeyi EKabor 3 tozu ile alaşımlandırılan numunenin XRD diyagramı



Şekil 3.19. 1000 °C'de 4 saat süre ile yüzeyi EKabor 3 tozu ile alaşımlandırılan numunenin XRD diyagramı

XRD analiz sonuçlarına göre Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde mikroyapı fotoğrafları ve EDX analizleriyle de desteklendiği gibi yüzeyde FeB fazının baskın faz olduğu; Fe₂B, CrB, Cr₂B, TiB₂, MnB, Ni₂B fazlarının ise düşük oranlarda var oldukları belirlendi. EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde ise FeB ve Fe₂B fazlarının baskın faz olduğu CrB, TiB₂, MnB, Ni₂B fazlarının ise düşük oranlarda meydana geldikleri belirlendi. Gürkan (2007), 304 östenitik paslanmaz çeliğin 900 °C’de 5 saat EKabor II tozu borlaması ile yapı içerisinde FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B ve Ni₃B fazlarını tespit etmiştir. Ekabor tozu ile elde edilen sonuçlar birbirleriyle bezerlik göstermektedir. Fakat Nanobor tozunun kullanıldığı uygulamalarda 2 saatlik sürede dahi FeB fazının baskın faz olması, Nanobor tozu ile yapılacak uygulamalarda istenmeyen FeB fazı oluşumun azaltılması veya ortadan kaldırılması için EKabor tozlarına göre daha düşük sıcaklık ve daha kısa işlem sürelerinde çalışılmalıdır. Bu durum zaman ve maliyet açısından da avantaj sağlayacaktır.

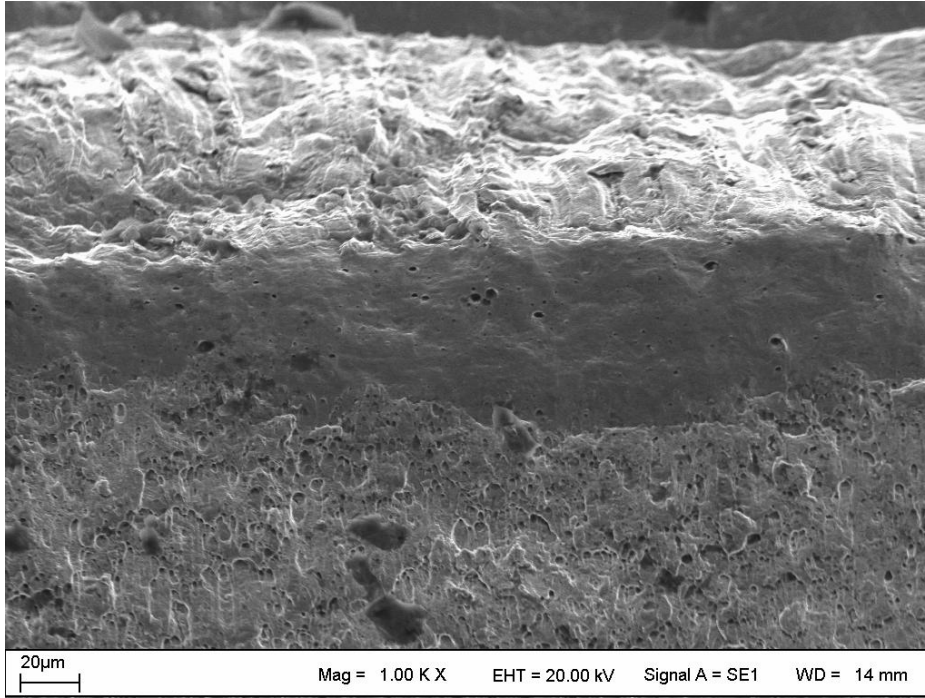
3.6. Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme deneyi sırasında yüzeyleri alaşımlandırılmış numunelerin test cihazının çenelerine tutunamadıklarından dolayı kavrama uçlarındaki borür tabakası eğe yardımıyla aşındırılmıştır. Herhangi bir işlem görmeyen numune ile yüzeyi alaşımlandırılan numunenin makro fotoğraflarından da görüldüğü üzere borlanmış numunedeki kopma formu yaklaşık 45 °’lik bir açı şeklinde meydana gelirken orijinal numunede ise daha belirgin bir boyun bölgesi sergileyerek gerçekleşmiştir (Şekil 3.20). Çekme işlemi sırasında uygulanan gerilme ile yüzeydeki borür tabakasında akma noktasından başlayarak maksimum çekme noktasına kadar pul pul döküldüğü görülmüştür.



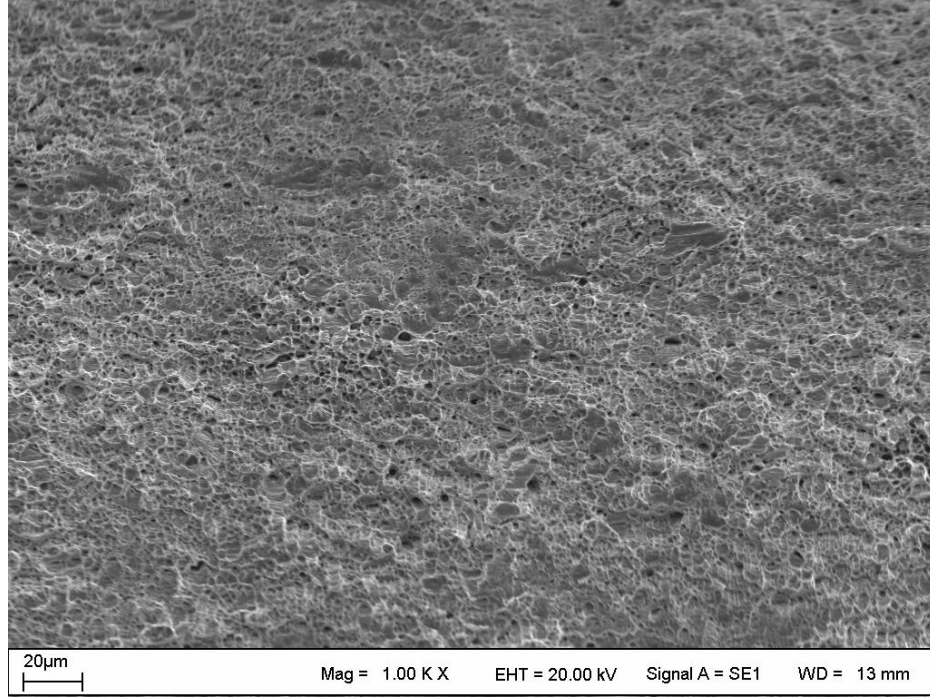
Şekil 3.20. Çekme deneyi sonrası numunelerin görünümü

Çekme deneyine tabi tutulan numunelerin kopma bölgesinden alınan kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 3.21-3.25’de verilmiştir. Çekme deney numunelerinin kopma bölgesi kırık yüzeylerinden alınan SEM fotoğraflarından görüldüğü üzere ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kopma işlemi sünek bir yapıda gerçekleşmiştir (Şekil 3.21).



(a)

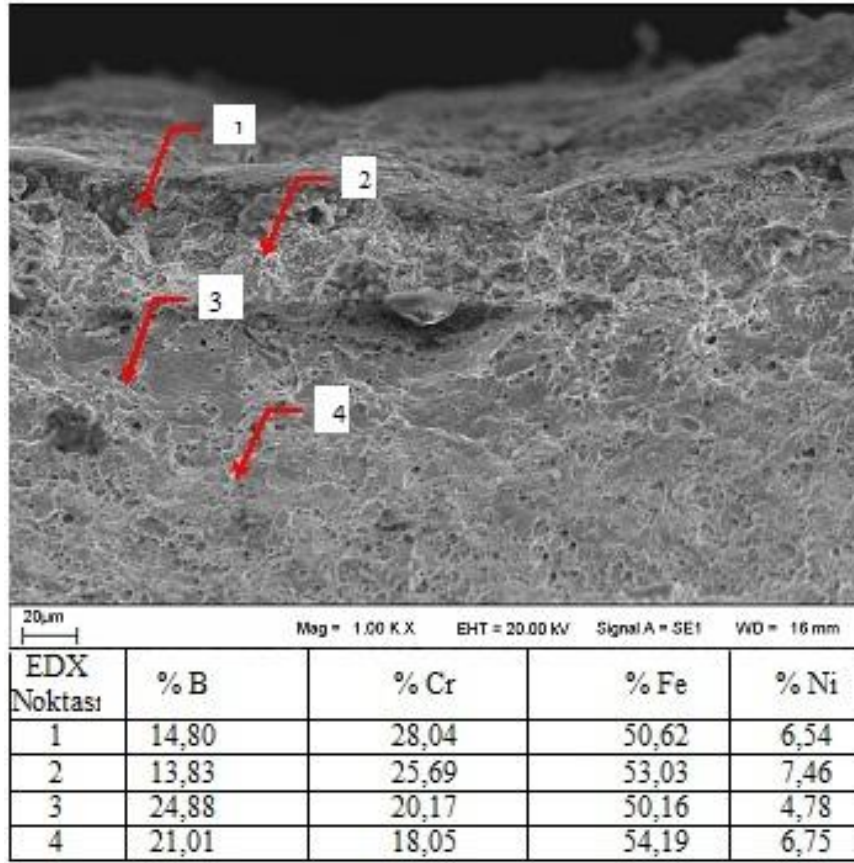
(“Şekil 3.21’in devamı”)



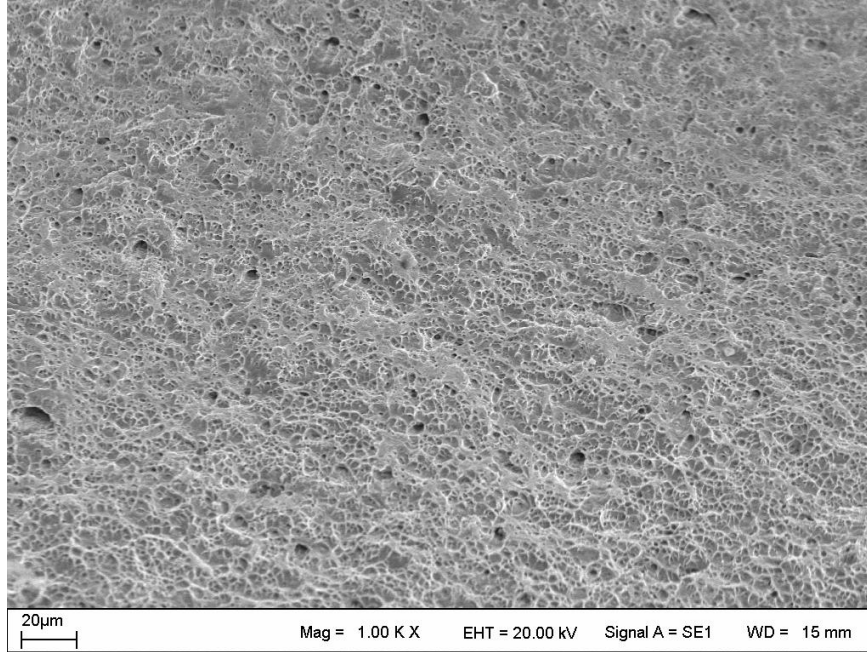
(b)

Şekil 3.21. Çekme deneyine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kırık yüzey a) uç kısım b) orta kısım SEM görünümü

Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerden 950 °C’de 2 saat süre ile alaşımlandırma işlemine tabi tutulan numunenin yüzeye yakın kısım olan borür tabakasında (Şekil 3.22a) gevrek fakat ana malzemeye doğru ise ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çelikte meydana gelen (Şekil 3.21b) sünek bir yapıya yakın bir biçimde gerçekleştiği açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.22b). Bu durum matrisin yüzey alaşımlandırma işleminden etkilenmediğini göstermektedir. Kopma bölgesi kırık yüzeyinden alınan EDX analizleriyle kopma noktası uç kısımlarındaki noktalarda iç kısımlara göre daha az bor oranı tespit edilmiştir (Şekil 3.22a). Bu durum sert ve gevrek olan FeB fazının mikro yapının üst kısmında olduğundan dolayı çekme deneyi esnasında gözle görülür biçimde akma noktasından itibaren çekme yönünde pul pul döküldüğü, FeB fazının altında ve daha sünek bir yapıya sahip olan Fe₂B fazının çekme işlemi esnasında yapı içerisinde kalarak dökülmenin daha az meydana gelmiş olabileceği düşünülmektedir.



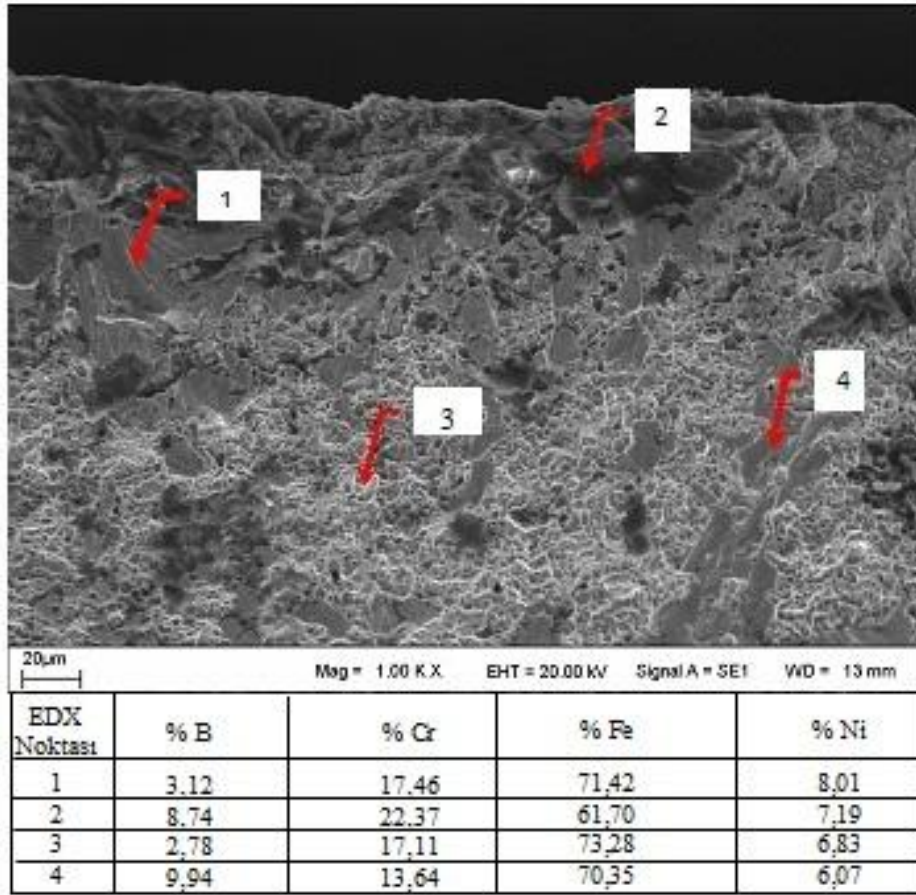
(a)



(b)

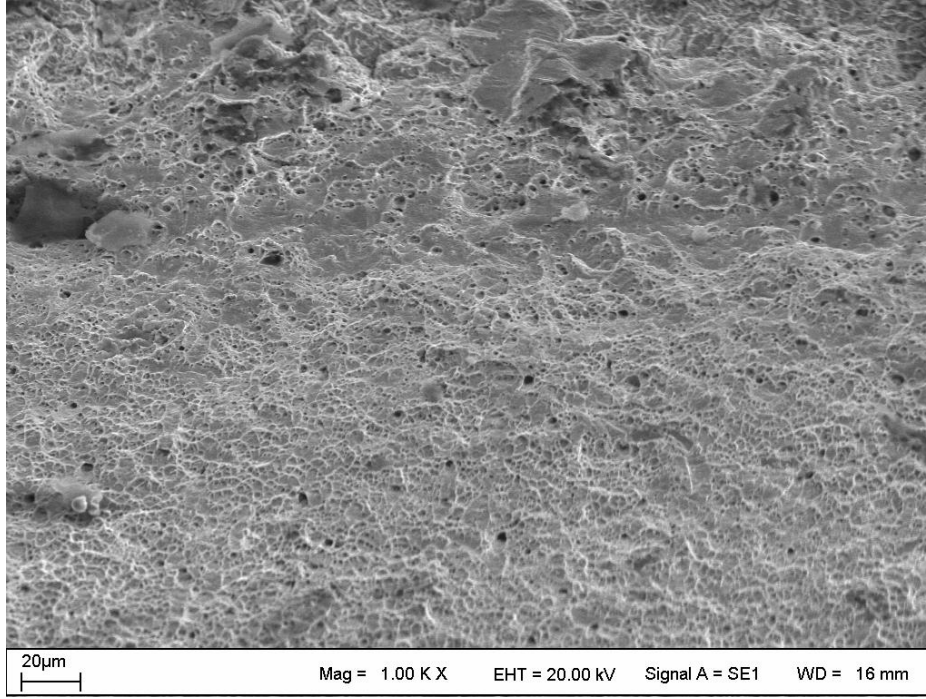
Şekil 3.22. Nanobor tozu ile 950 °C'de 2 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve çekme deneyine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kırık yüzey a) uç kısım b) orta kısım SEM görüntüsü

Nanobor tozu ile 1000 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılan numunenin 950 °C’de 2 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılan numuneden daha gevrek bir yapıda kırıldığı açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.23). Bu durum numunenin sahip olduğu daha yüksek sertlik ve borür tabakası kalınlığına atfedilebilir. Çünkü borür tabakasının gevrekliği tabakanın kalınlığı ve sertliği ile paralellik gösterir (Bayça ve Şahin 2004). Şekil 3.23a’da belirlenen EDX noktaları verilerinden ve mikro yapı görüntüsünden 1. noktada gevrek kırılma meydana geldiği, bu kırılma sonucunda yüzeyde bulunan ve daha gevrek olan FeB borür tabakasının döküldüğü düşünülmektedir. 2. noktada gevrek kırılma meydana gelmiş olup 1 noktaya göre daha fazla bor miktarı tespit edilmiştir. 3 nokta ise difüzyon bölgesi olduğundan diğer bölgelere oranla daha sünek bir biçimde kırılmıştır. 4 noktada borür tabakasının kopma bölgesinde kısmen var olduğu bölgeden alınmış olup Fe₂B borür tabakalarında elde edilen kimyasal içeriğe sahip bir bileşim tespit edilmiştir.



(a)

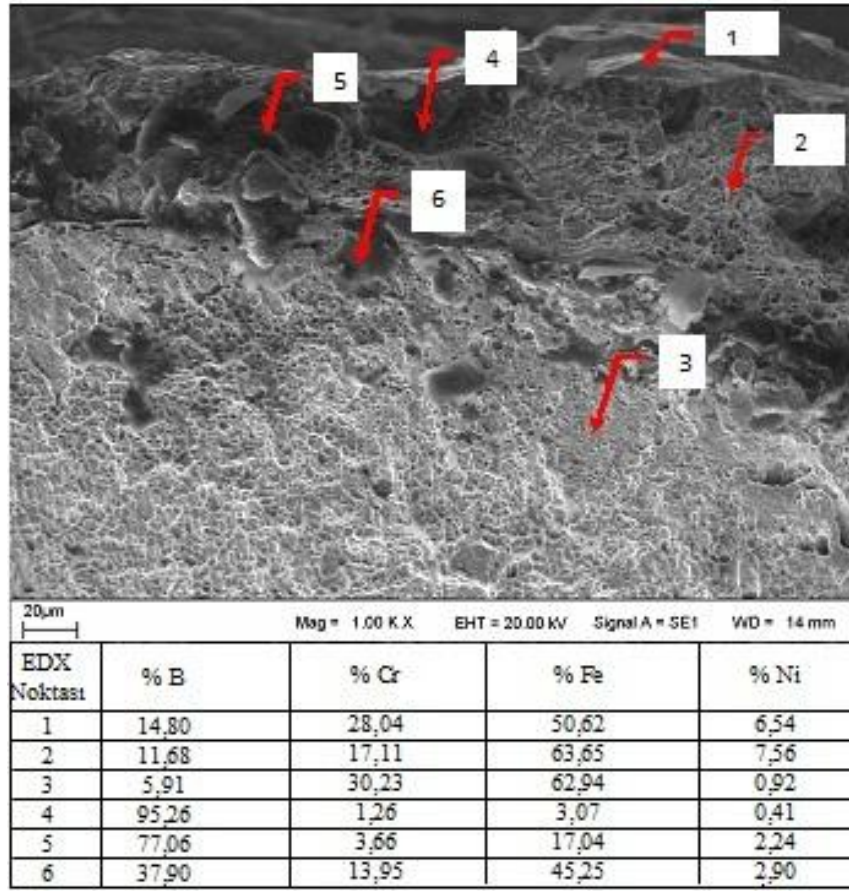
(‘‘Şekil 3.23’ün devamı’’)



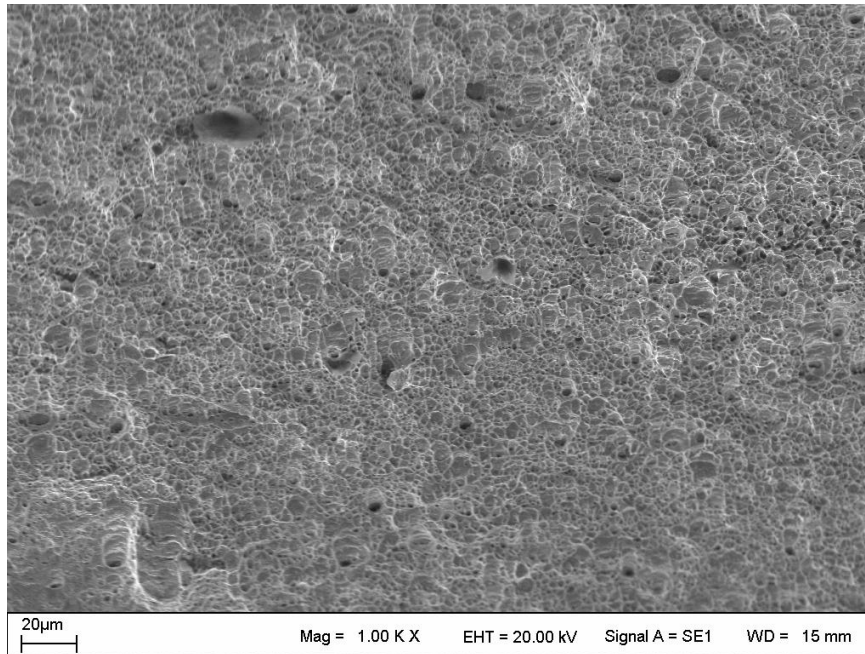
(b)

Şekil 3.23. Nanobor tozu ile 1000 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve çekme deneyine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kırık yüzey a) uç kısım b) orta kısım SEM görüntüsü

EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerden 950 °C’de 2 saat süre ile alaşımlandırma işlemine tabi tutulan numunenin yüzeye yakın kısım olan borür tabakası şekil 3.7a’da görüldüğü üzere tabaka kalınlığı üniform olmadığından borür tabakasındaki kırılma mekanizması farklılık göstermiştir. Borür tabakası kalınlığı daha fazla olan yerlerde daha derin gevrek kırılma bölgeleri oluşmuştur (Şekil 3.24a). Bu durum FeB fazının bu bölgelerde daha fazla oluşmuş olması ile ilgilidir. Borür tabakasının altındaki ana malzeme bölgesindeki kırılma mekanizması ise ticari 304 numunede olduğu gibi sünek bir yapıda gerçekleşmiştir (Şekil 3.21b ve Şekil 3.24b). Kopma bölgesinden alınan EDX analizi verilerinden 1. ve 2. bölgenin FeB borür tabakası bölgesi olduğu 3. bölgenin ise geçiş bölgesi olduğu ise düşünülmektedir. 4, 5 ve 6 bölgelerde tespit edilen yüksek bor miktarının kopma işlemi esnasında borür tabakasından kopan bor elementinin yüzeyde birikmesiyle açıklanabilir.



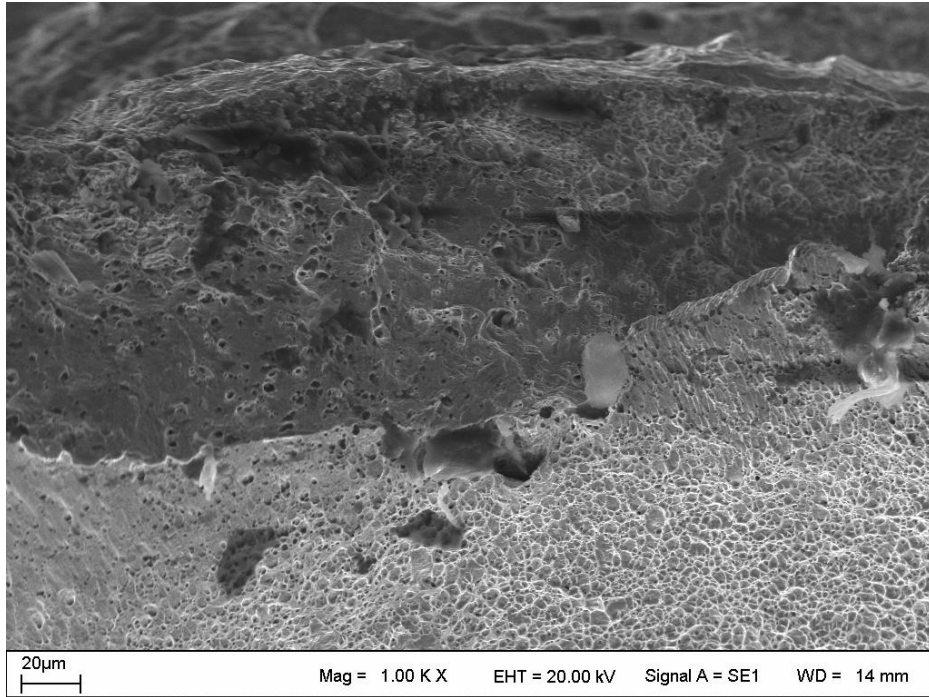
(a)



(b)

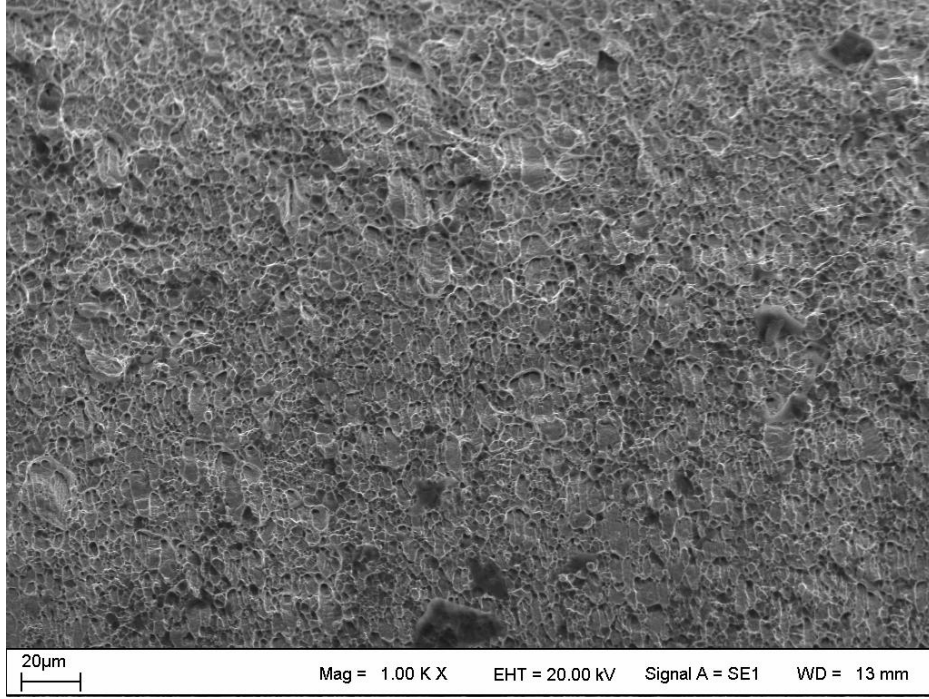
Şekil 3.24. EKabor3 tozu ile 950 °C'de 2 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve çekme deneyine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kırık yüzey a) uç kısım b) orta kısım SEM görüntüsü

EKabor 3 tozu ile 1000 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılan numunenin 950 °C’de 2 saat süre ile EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numuneye göre daha kalın borür tabakasına sahip olduğundan gevrek kırılma bölgesi daha derin olarak meydana gelmiştir (Şekil 3.25a). Ana malzeme bölgesinden alınan SEM fotoğrafına (Şekil 3.25b) dikkatli bakıldığında AISI 304 numunedeki gibi sünek bir yapıya yakın fakat şekil 3.24b’ye göre daha büyük taneli bir yapı görülmektedir. Bu durum yüzey alaşımlandırma işlemi ile tane büyümesi meydana geldiğini göstermektedir.



(a)

(“Şekil 3.25’in devamı”)



(b)

Şekil 3.25. EKabor3 tozu ile 1000 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve çekme deneyine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kırık yüzey a) uç kısım b) orta kısım SEM görünümü

Çekme deneyleri sonucu çekme deney numunesine bağlı bulunan bilgisayardaki Trapeziumix yazılımı ile Tablo 3.6’da verilen malzemenin çekme kuvveti, kopma kuvveti, akma noktası, çekme dayanımı, kopma dayanımı ve yüzde kopma uzaması değerleri sistematik olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.6. Çekme deneyi verileri

Yüzey Alaşımlandırma Koşulları	Yüzey Alaşımlandırma Malzemesi	Maksimum Çekme Kuvveti	Kopma Kuvveti	Akma Noktası	Kopma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Kopma Uzaması
		N	N	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%
AISI 304	İşlemsiz	25984,3	21295,4	366	633,79	773,342	80,444
950 °C 2 saat	Nanobor	23376,4	20613,9	363	572,609	649,344	80,479
950 °C 4 saat	Nanobor	22332,1	20883,7	337	580,102	620,336	80,69
1000 °C 2 saat	Nanobor	22813,4	20296,1	362	563,781	633,705	78,626
1000 °C 4 saat	Nanobor	21432,3	19011,2	334	528,109	595,342	76,20
950 °C 2 saat	EKabor 3	21095,9	17254,9	363	479,302	585,997	69,387
950 °C 4 saat	EKabor 3	20316,2	18016,7	333	500,465	564,339	78,3
1000 °C 2 saat	EKabor 3	20768,6	15640,1	362	434,446	576,904	72,37
1000 °C 4 saat	EKabor 3	18412,3	15618,9	354	456,693	538,372	75,286

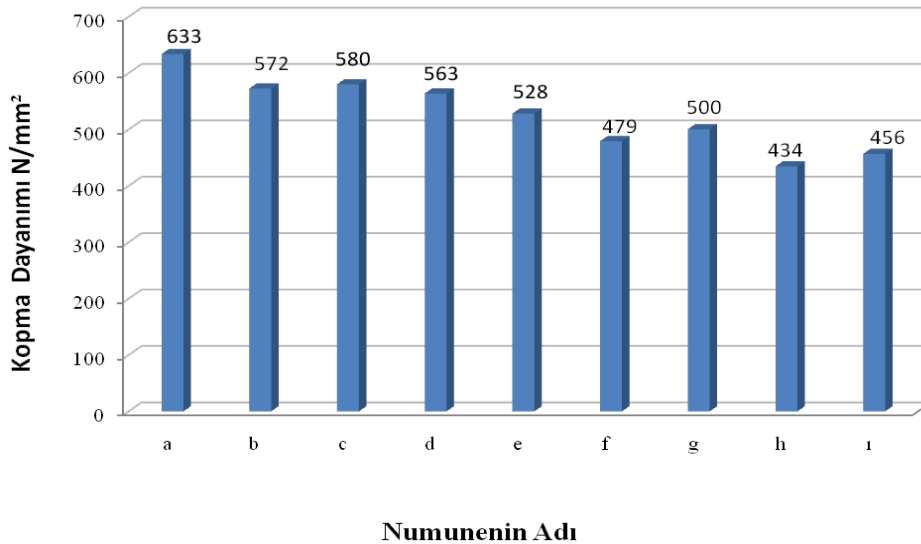
Nanobor tozu ile 950 °C’de yüzeyi alâşımlandırılan numunlerin, AISI 304 paslanmaz çeliğe göre akma noktası % 1 oranında, 1000 °C de yüzeyi alâşımlandırılan numunelerin ise % 9 oranında düştüğü tespit edildi. EKabor 3 tozu ile yüzeyi alâşımlandırılan numunelerde ise bu değer 950 °C için %1 , 1000 °C’de ise % 6 olarak belirlenmiştir. EKabor 3 tozu ile yüzeyi alâşımlandırılan numunelerin akma noktasının daha az düşüş göstermesi, yüzde kopma uzamaları sonuçlarındanda görüldüğü üzere (Tablo 3.6) daha düşük olması bu numunelerin daha gevrek bir biçimde kırılmış olduklarını gösterir. Yüzeyi alâşımlandırılan numunelerin yüzeyindeki borür tabakasının akma noktasından sonra dökülmeye başlaması ve akma noktası değerlerinin %5 gibi bir düşüş göstermesi bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir.

Çekme dayanımları Nanobor tozu ile 950 °C’de yüzeyi alâşımlandırılan numunelerde % 18 oranında, 1000 °C de yüzeyi alâşımlandırılan numunelerde ise % 20 oranında düştüğü; EKabor 3 tozu ile 950 °C’de yüzeyi alâşımlandırılan numunelerde Çekme dayanımı %26 oranında, 1000 °C de yüzeyi alâşımlandırılan numunelerde ise % 28 oranında düştüğü tespit edildi. 950 °C’de Nanobor tozu ile yüzeyi alâşımlandırılan numunelerde esas malzemeye göre kopma dayanımı % 9 oranında, 1000 °C’de yüzeyi alâşımlandırılanlarda ise bu oran % 14’lük bir düşüş meydana gelirken EKabor 3 tozu ile yüzeyi alâşımlandırılan numunelerde ise bu değerler 950 °C’de alâşımlandırılan numuneler için % 23, 1000 °C’de

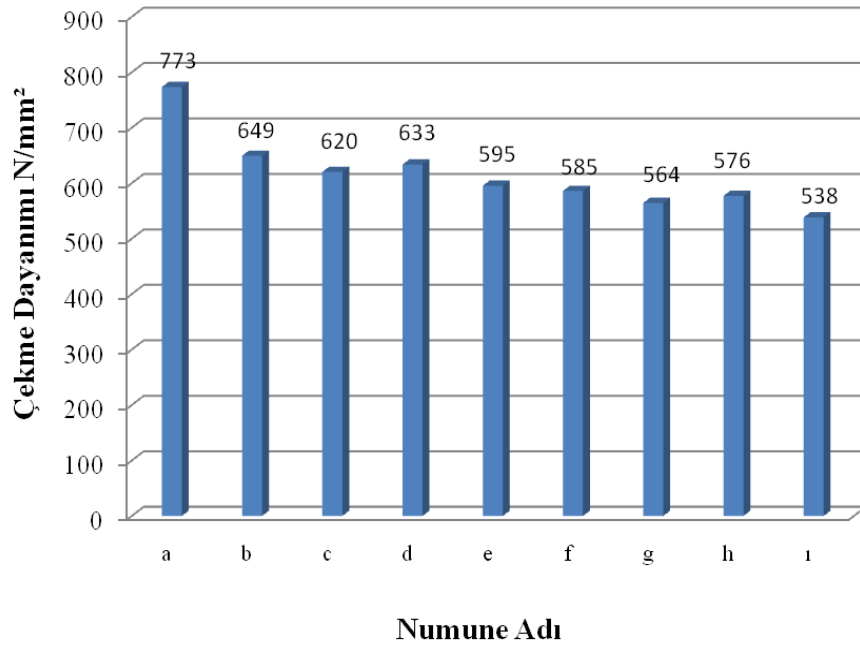
alaşımlandırılan numuneler % 30 oranında bir düşüş tespit edilmiştir.

Daha sert malzemelerin daha yüksek çekme ve kopma dayanımlarına sahip olması beklenen bir sonuçtur (URL-7). Fakat yüzey alaşımlandırma işleminde yüzeysel (kabuk) bir sertlik oluşturulur ve borür tabakası, geçiş bölgesi ile ana malzeme arasında farklı alaşım elementlerinden dolayı bölgesel faz farklılıkları meydana gelir. Yapı içerisindeki bu bölgesel farklılıklar malzemelerde çatlak başlangıcı oluşma olasılığını artırır. Bu artış yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin çekme ve kopma dayanımlarının işlemsiz malzemelere göre daha düşük olmasına neden olmuştur. Deney verileri, çekme ve kopma dayanımlarındaki düşüş, işlem süresi ve sıcaklık ile bağlantılı olsa da alaşımlandırma maddesi ile daha fazla ilgili olduğunu göstermektedir. Yani Nanobor tozları ile yüzey alaşımlandırma işleminde daha iyi sonuçlar elde edilmesi; Nano boyut sayesinde daha ince taneli, daha homojen ve daha az çentik içeren bir yapı elde edilmesine bağlanabilir.

Yüzey alaşımlandırma işleminde işlem süresi ve sıcaklık süresi etkilerini daha kolay yorumlanması amacıyla Tablo 3.6'den yararlanarak Şekil 3.26-3.27'de görülen grafikler hazırlanmıştır.



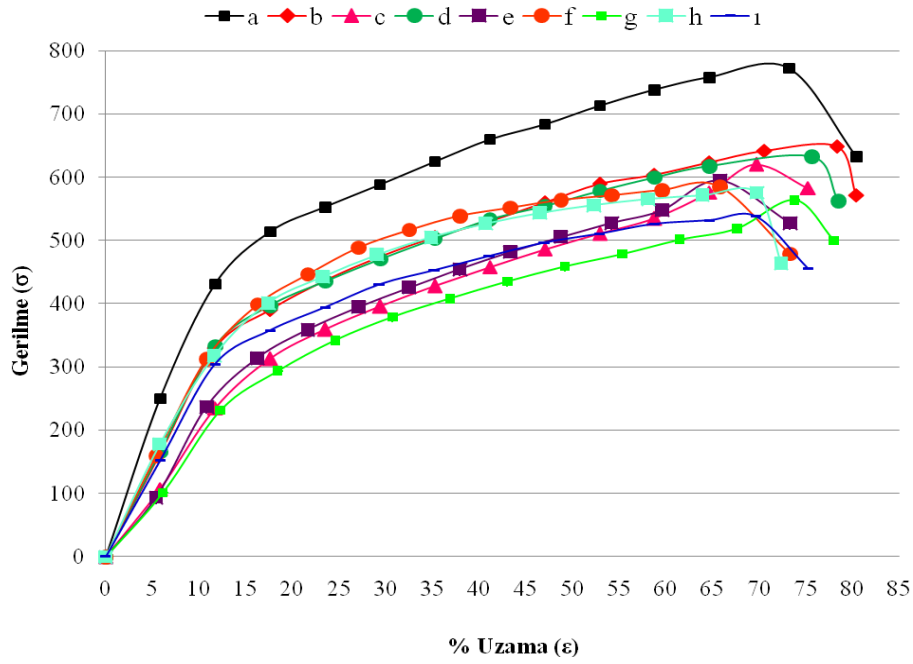
Şekil 3.26. Çekme deneyi sonucu a) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik b) 950 °C 2 saat c) 950 °C 4 saat d) 1000 °C 2 saat e) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu f) 950 °C 2 saat g) 950 °C 4 saat h) 1000 °C 2 saat i) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin kopma dayanımlarının karşılaştırılması



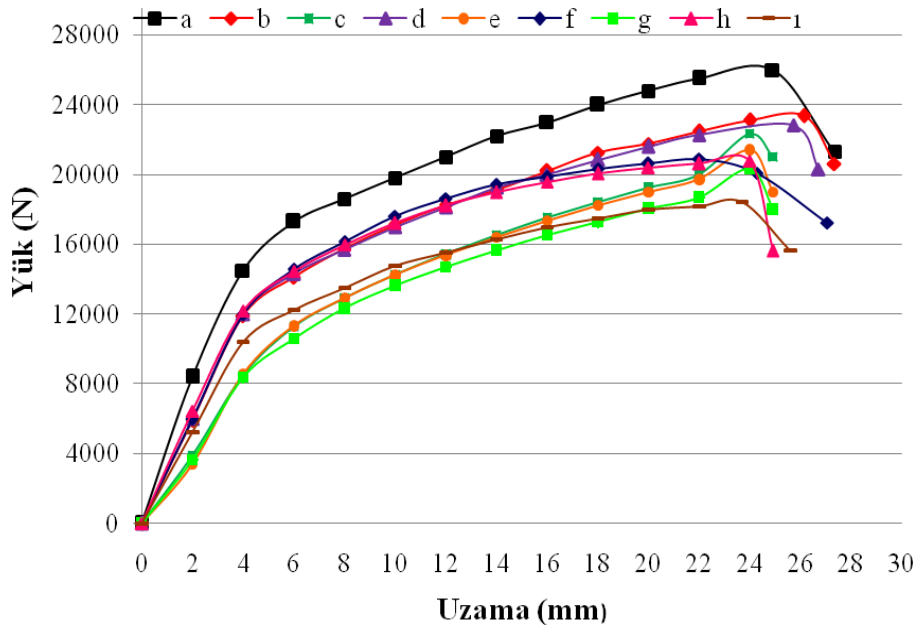
Şekil 3.27. Çekme deneyi sonucu a) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik b) 950 °C 2 saat c) 950 °C 4 saat d) 1000 °C 2 saat e) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu f) 950 °C 2 saat g) 950 °C 4 saat h) 1000 °C 2 saat i) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin maksimum gerilme oranları

Şekil 3.26-3.27'den görüldüğü üzere yüzey alaşımlandırma süresi ve sıcaklığın artması malzemelerin çekme dayanımını düşürmektedir. Bu durum borlama işleminde süre ve sıcaklığın artışına paralel olarak artan tabaka kalınlığı ve sertlik değerinin sonucunda malzemenin az da olsa gevrekleşmesi ve işlem sırasında tane sınırlarında daha fazla çentik etkisi meydana getirmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ticari AISI 304 çeliği ve 8 adet farklı sıcaklık ve sürelerde yüzeyi alaşımlandırılmış çekme deney numunelerinin gerilme - % uzama ve kuvvet uzama eğrileri Şekil 3.28 -3.29'da verilmiştir.



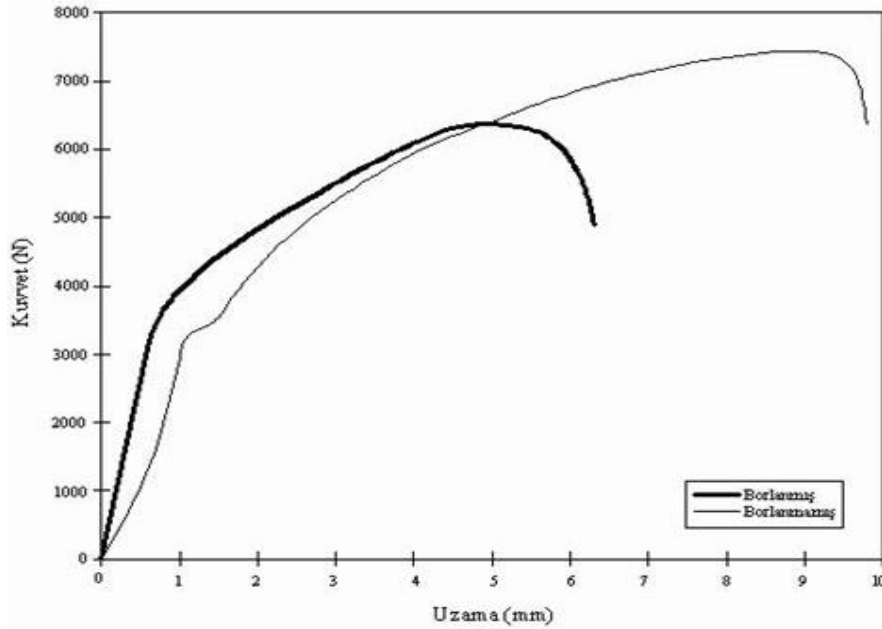
Şekil 3.28. Çekme deneyine tabi tutulan a) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik b) 950 °C 2 saat c) 950 °C 4 saat d) 1000 °C 2 saat e) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu f) 950 °C 2 saat g) 950 °C 4 saat h) 1000 °C 2 saat ı) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin gerilim % uzama diyagramları



Şekil 3.29. Çekme deneyi sonucu a) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik b) 950 °C 2 saat c) 950 °C 4 saat d) 1000 °C 2 saat e) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu f) 950 °C 2 saat g) 950 °C 4 saat h) 1000 °C 2 saat ı) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin kuvvet uzama eğrileri

Şekil 3.28 ve 3.29'dan görüldüğü üzere yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin tamamında ticari AISI 304 çeliğine yakın uzama değerleri elde edilmesi, alaşımlandırma işleminin süneklilik üzerine çok az olumsuz etki ettiği ve numunelerin borür tabakası haricindeki bölgelerde sünek bir biçimde kırıldığını göstermektedir. Bu durum kopma noktası kırık yüzey SEM görüntüleri ile de desteklenmiştir.

A. Çalık ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise (2005) EKabor 3 tozu ile borlama işleminde AISI 304 paslanmaz çeliğin Akma noktasını düşürmediği, çekme dayanımı % 15 , süneklilikte ise % 25 oranında düşürdüğü ve borlanan malzemenin gevrek malzeme şeklinde kırıldığı belirtilmiştir (Şekil 3.30).



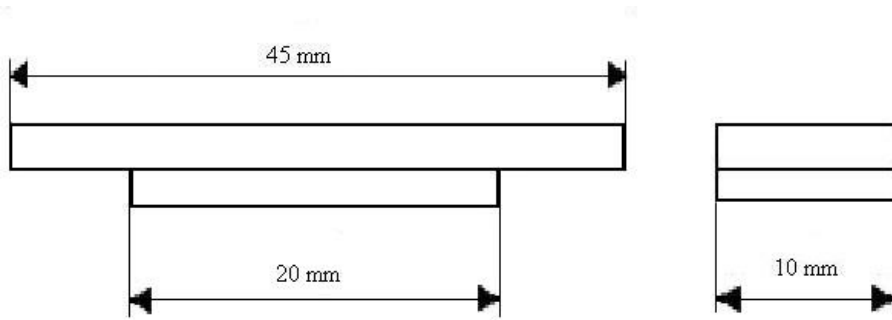
Şekil 3.30. Ekabor tozu ile borlanmış ve borlanmamış AISI 304 paslanmaz çeliğin çekme diyagramı (Çalık, 2005).

Nanobor tozu ve EKabor 3 tozu ile yüzey alaşımlandırma işlemi grafiklerinden (Şekil 3.26-3.27) görüldüğü üzere her iki bor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin mühendislik dayanımlarının ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğe göre düşürdüğü görülmektedir. Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde bu düşüşün daha az olması Nanobor atomlarının sahip olduğu tane boyutunun EKabor 3 tozlarına göre çok daha küçük olduğundan işlem sırasında yapıda oluşan çentik etkisi ve segregasyonun daha az meydana gelmesi ile açıklanabilir.

Bor tozları ile yüzey alaşımlandırma işlemine tabi tutulan malzemelerin mühendislik dayanımlarında küçük bir düşüş olsa da; borür tabakasının akma noktasına kadar uygulanan gerilmelerden etkilenmemesi, alaşımlandırma işlemi ile 10 katı bulan sertlik, aşınma ve korozyon dayanımları kazanması göz önünde bulundurulduğunda bu malzemelerin statik ve dinamik dayanımların meydana geldiği yerlerde gerekli dayanım hesapları gözönünde bulundurulduğu takdirde kullanılabileceğini göstermektedir.

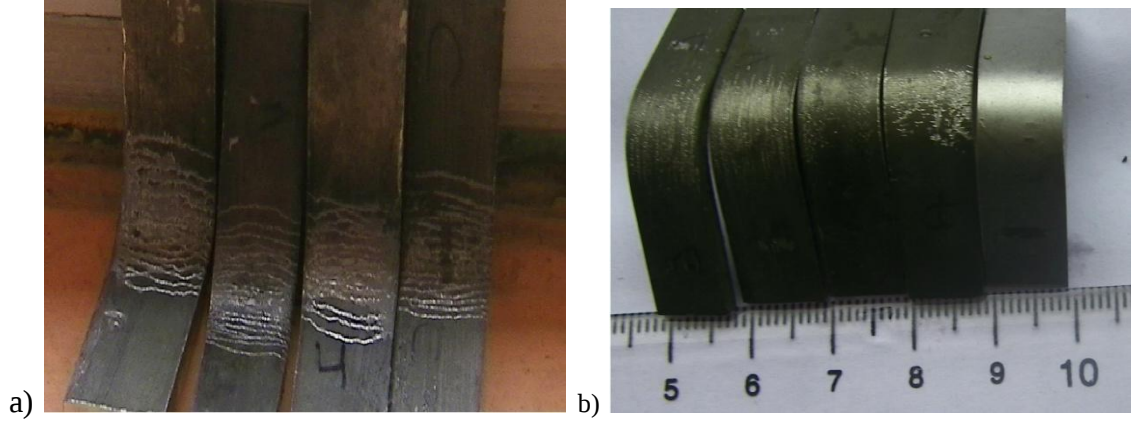
3.7. Üç Nokta Eğme Deneyi Sonuçları

Deney numunelerine üç nokta eğme deneyi uygulanarak, eğilme dayanımı ölçülmüştür. Numunelerin destekler arasına gelmesi sağlanarak destek noktalarında kaplama tabakasının ezilmesi ve kırılması önlenmiştir. Deney işlemi 120° katlama işlemine kadar devam ettirilmiştir. Şekil 3.31’de eğme deney düzeneği gösterilmiştir.



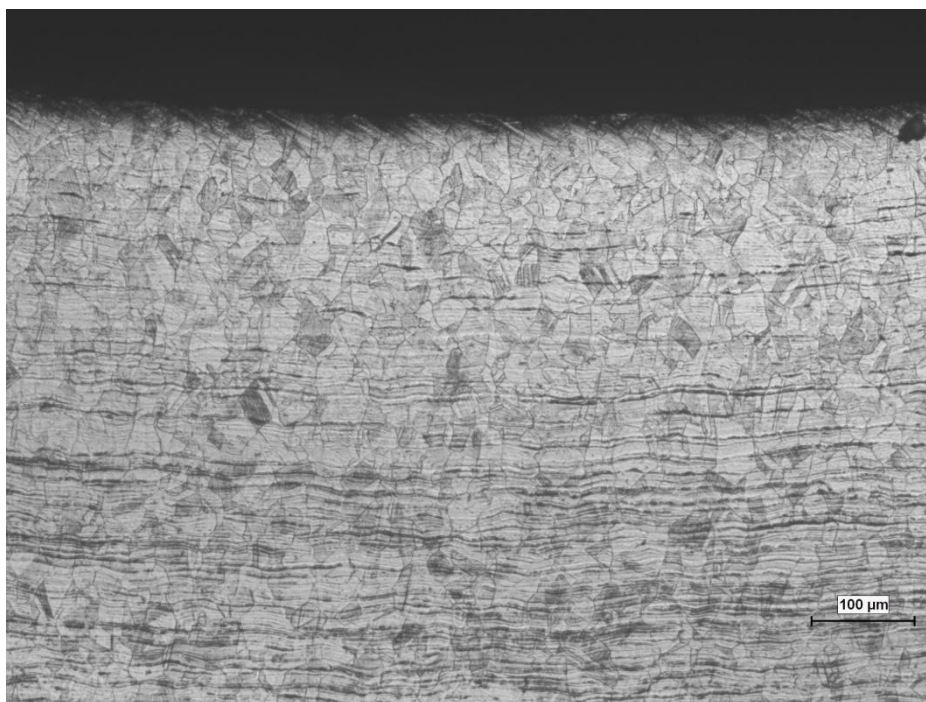
Şekil 3.29. Eğme deney düzeneği

Eğme deneyi sonrasında numunelerin kuvvete maruz kalan bölgelerinde Şekil 3.32’de görüldüğü üzere yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin kaplama tabakası katlama iç bölgesinde basınç gerilmelerinden dolayı kılcal çatlaklar şeklinde borür tabakasında kalkmalar görülmektedir. Dış yüzeyinde yani çekme gerilmelerinin meydana geldiği kısımda ise herhangi bir çatlak veya kaplama tabakasında dökülme görülmemiştir.

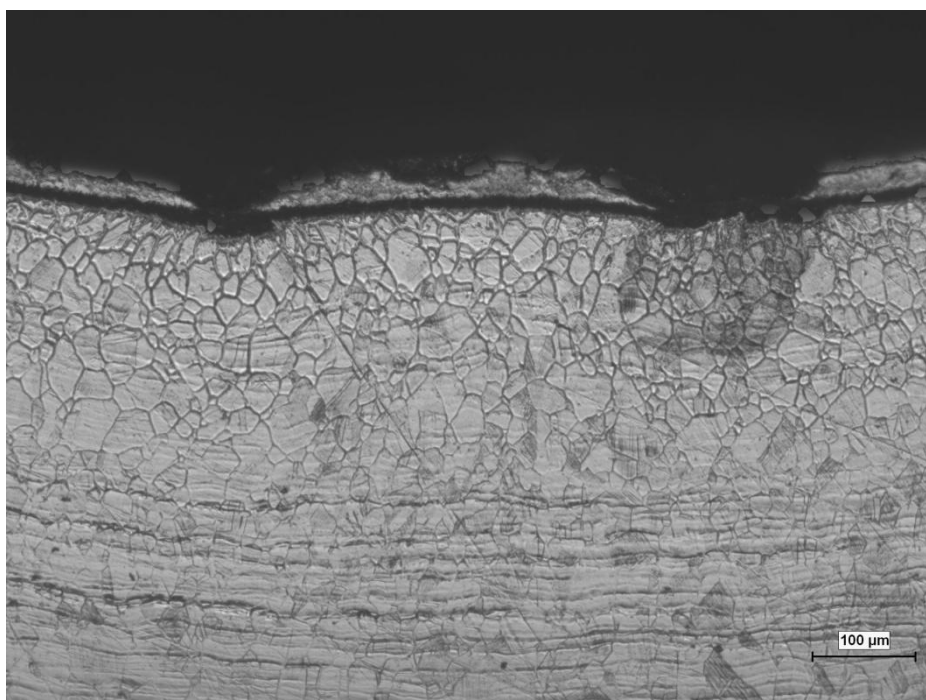


Şekil 3.30. Üç nokta eğme deneyi sonrası numunelerin a) iç katlama b) dış katlama bölgesi görünümü

Şekil 3.33’de herhangi bir işleme tabi tutulmayan AISI 304 östenitik paslanmaz çelik, 950 °C’de 2 saat süre ile Nanobor ve EKabor 3 tozu kullanılarak yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin üç nokta eğme deneyi sonrası iç katlama bölgesi optik mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Optik mikroyapı fotoğraflarından eğme işlemi sonucu borür tabakasında meydana gelen kılcal çatlaklar açıkça görülmektedir. Ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çelikte herhangi bir çatlak meydana gelmemiş olup deformasyon izleri görülmektedir (Şekil 3.33a). Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunenin kaplama tabakası 100X optik resminde iki adet çatlak (Şekil 3.33b) tespit edilmiş iken EKabor 3 tozu ile alaşımlandırılan numunede ise dört adet çatlak (Şekil3.33c) görülmektedir. Nanobor tabakasında meydana gelen çatlakların daha büyük ve az oldukları belirlenmiştir. Bu durum Nanobor tozu ile alaşımlandırma işlemi sonucu elde edilen borür tabakasının EKabor 3 tozuna göre daha kalın ve sert olduğundan (Tablo 3.2 ve Tablo 3.3) bu tabakada plastik deformasyon meydana getirmek için daha fazla kuvvete (Tablo 3.7) ihtiyaç olduğunu göstermektedir. Yüzeydeki çatlakların daha büyük olması daha yüksek sertliğe sahip numuneye daha büyük bir kuvvetin uygulanması ile ilgilidir.

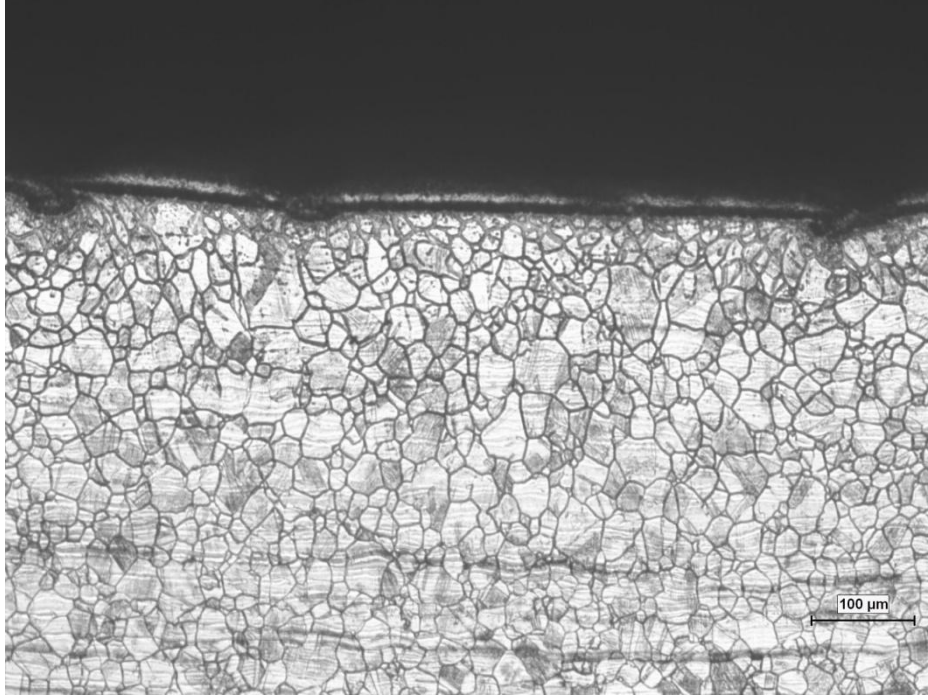


(a)



(b)

(‘‘Şekil 3.33’ün devamı’’)



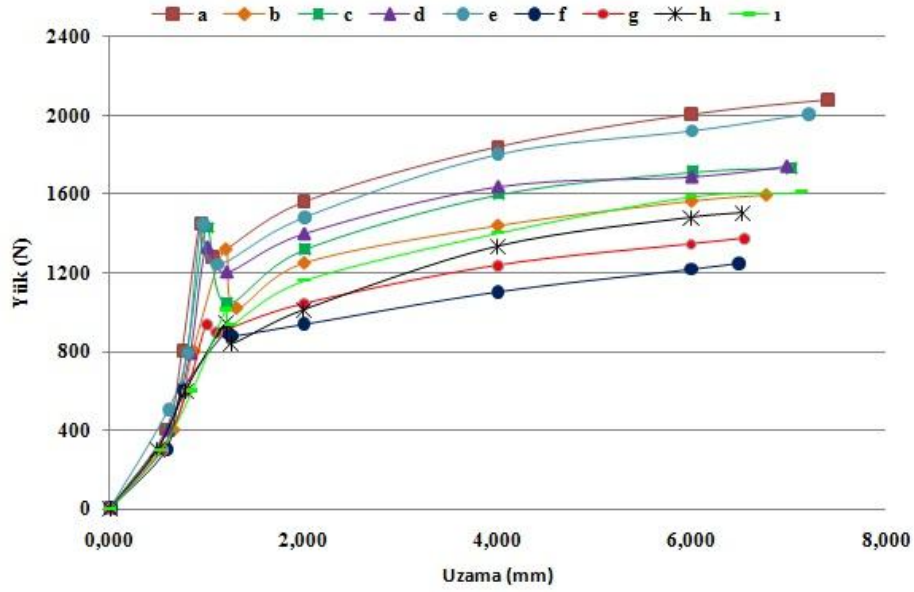
(c)

Şekil 3.31. a) Ticari AISI 304 b) Nanobor tozu ile 1000 ° C’de 4 saat c) EKabor 3 tozu ile 1000 ° C’de 4 saat süre ile alaşımlandırılmış numunelerin eğilme deneyi sonrası optik resimleri

Eğme deneyleri sırasında elde edilen bilgisayar ham verileri; Trapeziumix yazılımı kullanılarak malzemenin basma kuvveti ve eğilme dayanımları ile kuvvet uzama grafikleri sistematik olarak elde edilmiştir. Şekil 3.34’de Trapeziumix yazılımı ile elde edilen kuvvet uzama grafikleri verilmiştir. Eğilme momenti (2.3), dayanım momenti (2.4), eğilme dayanımı (2.5) ve borür tabakasının kırılma tokluğu değerleri (2.6) Bölüm 2.8’de verilen formüller ile hesaplanmıştır. Artan sıcaklık ve süre ile birlikte malzemenin mekanik davranışlarında meydana gelen değişim Şekil 3.35 ve Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7. Üç nokta eğme deneyi sonuçları

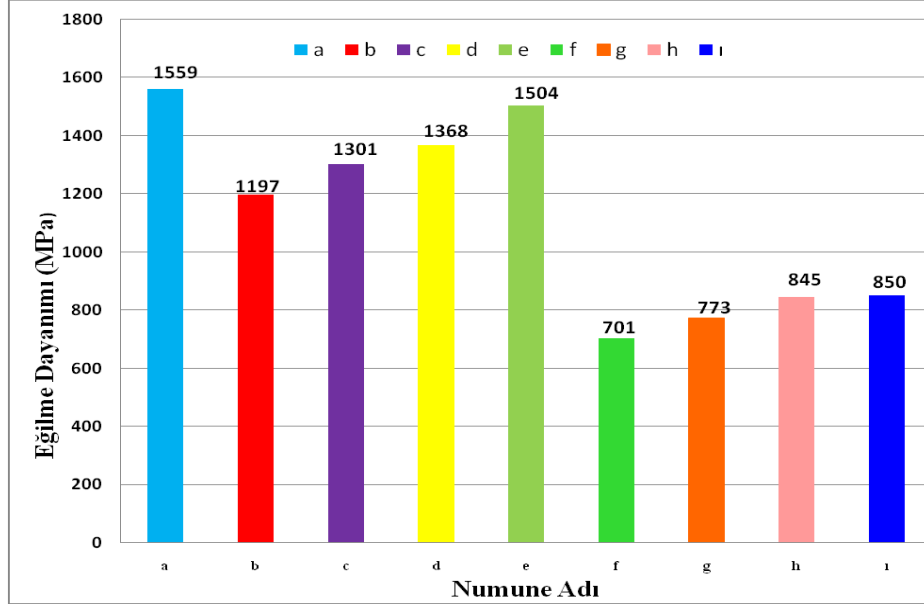
Yüzey Alaşımlandırma Koşulları	Yüzey Alaşımlandırma Malzemesi	Maksimum Basma Kuvveti	Eğilme Momenti	Dayanım Momenti	Eğilme Dayanımı	Maksimum Uzama Gerinimi	Borür Tabakasının Kırılma Tokluğu
		N	Nm	mm3	N/mm ²	%	Mpa
AISI 304	İşlemsiz	2079,54	23,39	15	1559,66	16,46	1039,77
950 °C 2 saat	Nanobor	1596,13	17,96	15	1197,09	15,04	798,07
950 °C 4 saat	Nanobor	1735,62	19,53	15	1301,71	15,6	867,81
1000 °C 2 saat	Nanobor	1744,75	19,63	15	1368,03	15,51	872,38
1000 °C 4 saat	Nanobor	2005,71	22,56	15	1504,28	16,02	1002,86
950 °C 2 saat	EKabor 3	1247,87	14,03	15	701,93	14,42	467,95
950 °C 4 saat	EKabor 3	1374,33	15,46	15	773,06	14,55	515,37
1000 °C 2 saat	EKabor 3	1503,96	16,92	15	845,98	15,51	563,99
1000 °C 4 saat	EKabor 3	1512,00	17,01	15	850,50	15,86	567,00



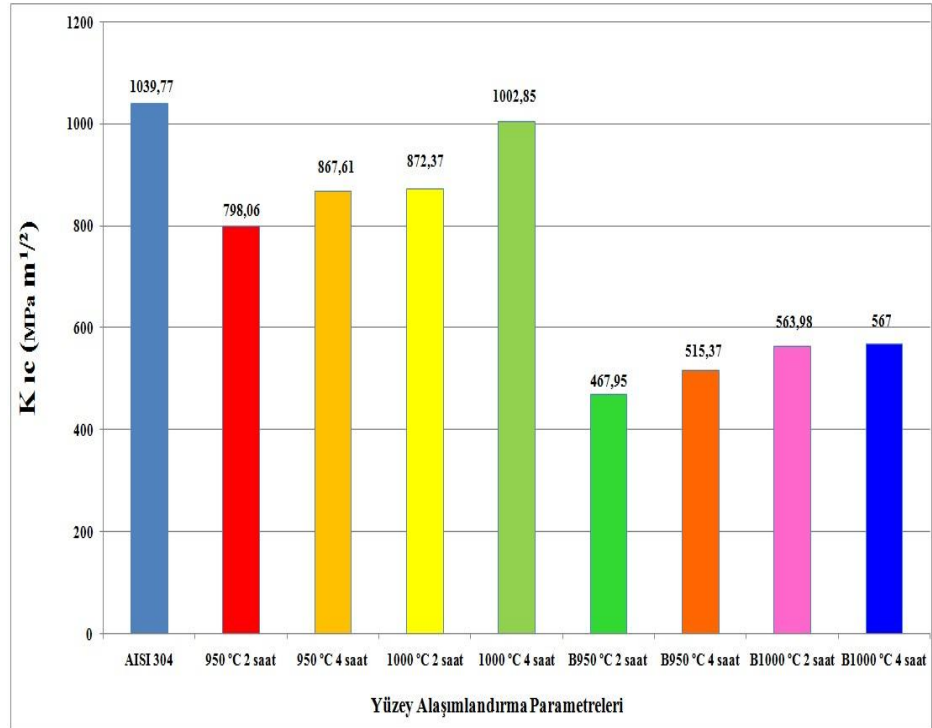
Şekil 3.32. Üç nokta eğme deneyi sonucu a) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik b) 950 °C 2 saat c) 950 °C 4 saat d) 1000 °C 2 saat e) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu f) 950 °C 2 saat g) 950 °C 4 saat h) 1000 °C 2 saat ı) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin kuvvet uzama eğrileri

Eğme deneyi sonucu elde edilen veriler ve kuvvet uzama grafiklerine bakıldığında yüzey alaşımlandırma işlemi ile numunelerin sertliklerinin artması sonucu süneklilik ve tokluklarının düştüğü gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak eğilme dayanımının bir miktar azaldığı saptanmıştır.

Tablo 3.7'deki veriler yardımıyla numunelerin eğilme dayanımı (σ) Şekil 3.35'de, kırılma tokluğu (K_{Ic}) değerleri ise Şekil 3.36'de grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.33. Üç nokta eğme deneyine tabi tutulan a) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik b) 950 °C 2 saat c) 950 °C 4 saat d) 1000 °C 2 saat e) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu f) 950 °C 2 saat g) 950 °C 4 saat h) 1000 °C 2 saat i) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin eğilme dayanımı (σ) değerleri



Şekil 3.34. Borür tabakalarının kırılma tokluğu (K_{Ic}) değerleri

Ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunenin maksimum eğme kuvveti 2079 N ile deney numuneleri arasında en yüksek değerin elde edildiği numune olmuştur. 1000 °C’de 4 saat süre ile Nanobor tozu ile alaşımlandırma işlemine tabi tutulmuş numunenin maksimum eğme kuvveti 2005 N ve borür tabakası 7,21 mm’lik bir gerilme uzaması göstermiş olup basma dayanımı ve kırılma tokluğu dayanımında esas numuneye göre sadece %4’lük bir düşüş göstererek yüzeyi alaşımlandırılan numuneler arasında en iyi sonuç elde edilen deney numunesi olmuştur. 1000 °C’de 2 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırma işlemine tabi tutulan numunenin maksimum eğme kuvveti 1744 N ve 6,98 mm’ lik bir gerilme uzaması göstermiştir. 950 °C’de 4 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzey alaşımlandırma işlemine tabi tutulan numunenin maksimum eğme kuvveti 1735 N ve 7,02 mm’ lik bir gerilme uzaması göstermiştir. 950 °C’de 2 saat süre ile nano borlama işlemine tabi tutulan numunenin maksimum eğme kuvveti 1596 N ve 6,77 mm’ lik bir gerilme uzaması göstermiş olup basma dayanımı ve kırılma tokluğu dayanımında esas numuneye göre %23 lük bir azalma ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan deney numuneleri arasında en düşük sonucun elde edildiği numune olmuştur. Aynı şartlar altında EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde ise maksimum eğme kuvveti 1000 °C’de 4 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan numunede 1612 N olarak ölçülmüş olup AISI 304 Östenitik paslanmaz çeliğe göre %28 bir düşüş göstermiştir. 950 °C’de 2 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan numunenin maksimum eğme kuvveti 1247 N ve 6,49 mm’ lik bir gerilme uzaması göstermiştir. Basma dayanımı ve borür tabakası kırılma tokluğu dayanımında esas numuneye göre %55 lik bir azalma ile Nanobor ve EKabor3 tozları ile yüzeyi alaşımlandırılan numuneler arasında en düşük sonucun elde edildiği numune olmuştur.

Tablo 3.7’ den görüldüğü üzere AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğe göre Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan malzemelerde eğme dayanımı değerlerinde ortalama % 14 düşüş meydana gelirken; Ekabor 3 tozu ile borlama işlemine tabi tutulan numunelerde ortalama % 50 lik bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Ticari AISI 304 çeliğindeki eğilme dayanımının yüzeyi alaşımlandırılan numunelerden yüksek olması sünek malzemelerin daha fazla enerji absorbe edebildiklerini göstermektedir. Bor tozları ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerdeki eğilme dayanımı düşüşleri yüzey alaşımlandırma işlemi sonucunda numunelerde işleme bağlı sertlikten kaynaklanan gevreklik ve yapıda homojen olmayan bölgelerin oluşması ile açıklanabilir.

Bor tozları ile yüzey alâşımlandırma işlemlerindeki sıcaklık ve süre artışı ile eğilme dayanımı değerlerindeki düşüşte iyileşme yönünde etkili olduğu belirlenmiştir. Bu durum artan sıcaklık ve sürenin malzemenin sertlik değeri ve tabaka kalınlığını artırması ile açıklanabilir. Çünkü daha sert malzemelerde plastik deformasyon meydana getirmek için daha fazla kuvvete ihtiyaç vardır.

3.8. Aşınma Deneyi Sonuçları

Aşınma deneyi kuru ortamda aşağıda verilen koşullar altında yapılmıştır.

Deney Yüğü: 5 N

Kayma mesafesi: 30 m

Kayma hızı: 10 mm/s

Karşıt hareket genliği: 5 mm

Aşındırıcı: Sertlik değerleri 1500 HV üzerindeki Nanobor tozu ile alâşımlandırılan numuneler için 10 mm çapında Si₃N₄ bilya, sertlik değeri 1500 HV altındaki EKabor 3 tozu ile alâşımlandırılanlar numuneler için 10 mm çapında Al₂O₃ bilya kullanılmıştır.

Aşınma deneyi sonucunda sistematik olarak elde edilen veriler Tablo 3.8’de verilmiştir.

Tablo 3.8. Yüzeyi alâşımlandırılan numunelerin aşınma deneyi sonucu elde edilen veriler

Yüzey Alâşımlandırma Malzemesi	Nanobor				EKabor 3				İşlemsiz
Sıcaklık	950 °C	950 °C	1000 °C	1000 °C	950 °C	950 °C	1000 °C	1000 °C	AISI 304
Süre	2 saat	4 saat	2 saat	4 saat	2 saat	4 saat	2 saat	4 saat	-
Adlandırma	a	b	C	d	e	f	g	h	ı
Minimum sürtünme katsayısı	0,098	0,076	0,085	0,082	0,068	0,075	0,046	0,161	0,077
Maksimum sürtünme katsayısı	0,53	0,176	0,42	0,66	0,609	0,565	0,605	0,557	0,679
Sürtünme katsayısı başlangıcı	0,105	0,076	0,085	0,082	0,112	0,220	0,112	0,161	0,077
Ortalama sürtünme katsayısı	0,333	0,117	0,226	0,507	0,344	0,255	0,368	0,277	0,578
Toplam kayma miktarı: mm	30007,7	30002,7	30000,6	30000,51	30000,7	300001,2	300000,5	30000,3	30007,4

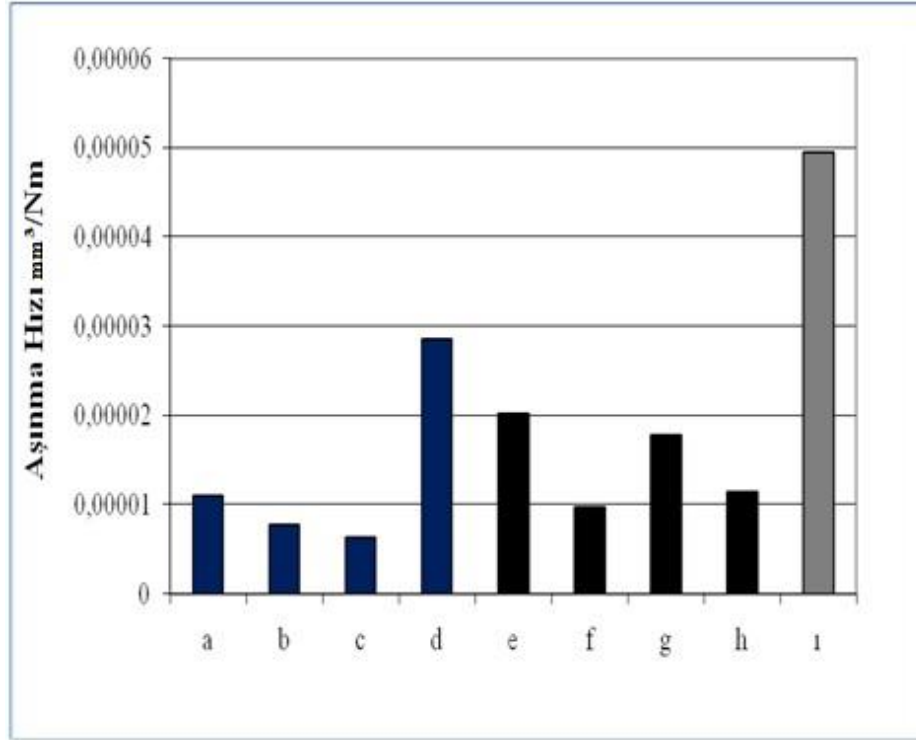
Aşınma deneyleri sonucunda yüzeyi alaşımlandırılan tüm numunelerin ortalama sürtünme katsayısı değerleri ticari AISI 304 çeliğine göre daha düşük olarak ölçülmüştür. En düşük ortalama sürtünme katsayısı 0.117 ile 950 °C’de 4 saat süre ile Nanobor tozu ile borlanmış numunede elde edilmiştir. Maksimum sürtünme katsayısı 0,578 ile ticari AISI 304 çeliğinde meydana gelmiştir. Sürtünme katsayısı en yüksek olan numune en fazla aşınmıştır; fakat sürtünme katsayısı en düşük olan numune en az aşınan ikinci numune olmuştur (Şekil 3.37). Bu durum; Sürtünme katsayısı ile aşınma hızı arasında teorik olarak paralel bir ilişki olduğu belirtilmesine rağmen aşınma esnasındaki, ortam ve aşınma partikülleri gibi dış etkenler bu ilişkiyi değiştirebilir (Gürkan, 2007) ifadesi örtüşmektedir.

Metallerin tribolojik özelliklerinde diğer bir önemli husus ise numunelerin aşınma sonrası yüzeylerinde oluşan izlerin karakterize edilmesidir. Değişik koşullardaki aşınmalardan sonra yüzeylerdeki izlerin yorumlanması, metal parçaların aşınma davranışları hakkında değişik fikirler edinilmesine yol açabilmektedir. Tablo 3.9’da karşıt hareketli aşınma cihazı ile aşındırılan malzemelerden elde edilen verilerden aşınma iz alanı, aşınma iz hacmi ve aşınma hızı değerleri Bölüm 2.9’ da verilen formüllerin kullanılmasıyla bulundu. Aşınma iz alanı, aşınma iz hacmi ve aşınma hızı verilerinden en düşük değerlerin 1000 °C’de 2 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılan numunede meydana geldiği, en yüksek aşınma değerinin ise ticari AISI 304 paslanmaz çelik numunede meydana geldiği görülmektedir (Tablo 3.9). EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde işlem süresinin artması aşınma iz hacmi ve aşınma hızı değerlerini düşürürken Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numuneler arasında sıcaklığın artışı ile aşınma hızı arasında bir bağ kurulamamıştır. Bu durum diğer numunelere göre daha gevrek olduğu düşünülen, 1000 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılan ve 2200 HV sertliğe sahip, numunede mikro çatlama aşınması (Şekil 3.46) meydana geldiğinden daha derin izler ölçülmesi sonucu aşınma hızı değerini artırmıştır.

Tablo 3.9. Karşıt hareketli aşınma cihazı ile aşındırılan malzemelerin aşınma iz alanı, aşınma iz hacmi ve aşınma hızı değerleri

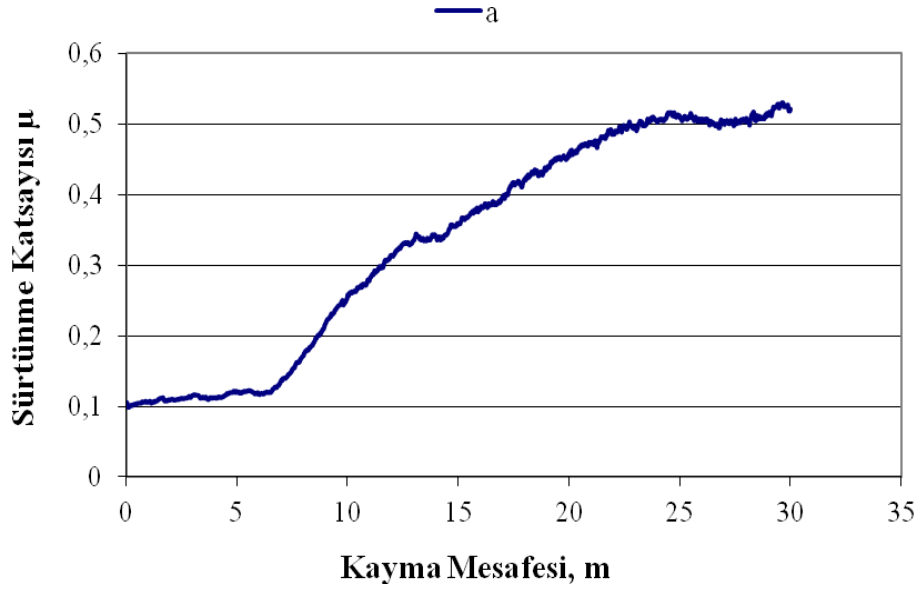
İşlem Koşulları	Yüzey Aşınım Malzemesi	Numune Adı	Genişlik Ortalama (μm)	Derinlik Ortalama (μm)	Aşınma İz Alanı, (mm^2)	Aşınma İz Hacmi, (mm^3)	Aşınma Hızı (mm^3/Nm)
950 °C 2saat	Nanobor	a	269	1,57	$333,22 \cdot 10^{-6}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$11,10 \cdot 10^{-6}$
950 °C 4saat		b	175	1,68	$232,70 \cdot 10^{-6}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$7,75 \cdot 10^{-6}$
1000 °C 2saat		c	188	1,30	$192,29 \cdot 10^{-6}$	$0,96 \cdot 10^{-3}$	$6,40 \cdot 10^{-6}$
1000 °C 4 saat		d	383	2,85	$859,05 \cdot 10^{-6}$	$4,29 \cdot 10^{-3}$	$28,63 \cdot 10^{-6}$
950 °C 2saat	EKabor 3	e	390	1,98	$607,00 \cdot 10^{-6}$	$3,03 \cdot 10^{-3}$	$20,23 \cdot 10^{-6}$
950 °C 4saat		f	270	1,37	$291,94 \cdot 10^{-6}$	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$9,73 \cdot 10^{-6}$
1000 °C 2saat		g	365	1,86	$533,20 \cdot 10^{-6}$	$2,66 \cdot 10^{-3}$	$17,77 \cdot 10^{-6}$
1000 °C 4 saat		h	294	1,49	$344,82 \cdot 10^{-6}$	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$11,49 \cdot 10^{-6}$
AISI 304	İşlemsiz	ı	609	3,10	$1484,3 \cdot 10^{-6}$	$7,42 \cdot 10^{-6}$	$49,47 \cdot 10^{-6}$

Şekil 3.37’de ve Tablo 3.8’ den yararlanarak 950 °C ve 1000 °C’de 2 ve 4 saat sürelerde Nanobor tozu ve EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış numuneler ve ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzemelerin 5 N yük altındaki aşınma oranları verilmiştir. En düşük aşınma oranı 1000 °C’de 2 saat süre ile yüzeyi Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunede gözlemlenmiştir. Aşınma deneyleri sonunda en yüksek aşınma oranı ise en düşük aşınmanın meydana geldiği numuneye göre 7,73 kat daha fazla aşınan herhangi bir işlem görmeyen AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunede meydana gelmiştir. Bu durum yüzey sertleştirme işleminin aşınma dayanımı üzerinde olumlu etkisi olduğunu göstermektedir.

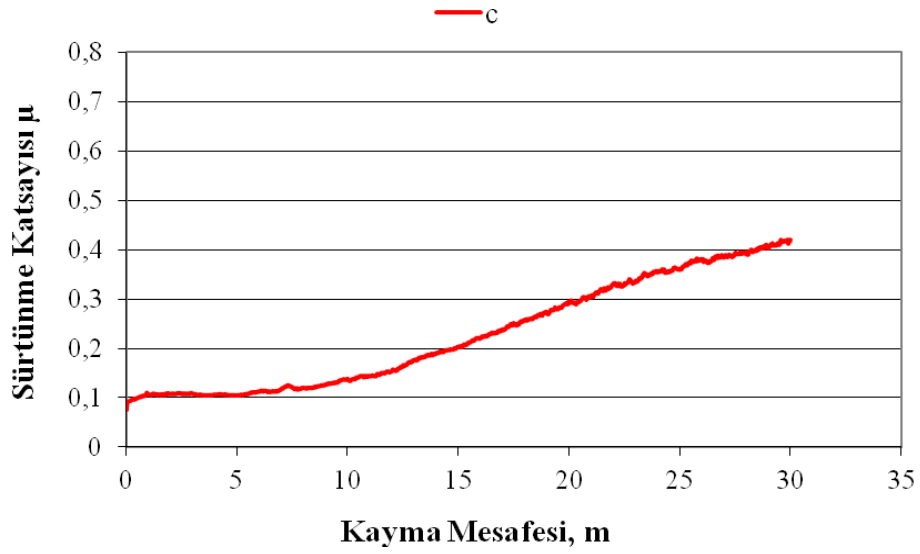


Şekil 3.35. a) 950 °C ‘de 2 saat b) 950 °C ‘de 4 saat c) 1000 °C ‘de 2 saat d) 1000 °C ‘de 4 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan e) 950 °C ‘de 2 saat f) 950 °C ‘de 4 saat g) 1000 °C ‘de 2 saat h) 1000 °C ‘de 4 saat EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ı) İşlemsiz AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin 5 N yük altındaki aşınma oranı değişimleri

Şekil 3.38’de 2 saat süre ile 950 °C ve 1000 °C de Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış numunelerin aşınma deneyi sonucu elde edilen sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimleri görülmektedir. 950 °C’de 2 saat süre Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve aşınma deneyine tabi tutulan numunenin sürtünme katsayısı 7 m kayma mesafesine kadar 0,1 civarında 7. metreden sonra ise artan bir grafik ile 30 m sonunda 0,5 civarına ulaştığı görülmektedir. 950 °C’de 2 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve aşınma deneyine tabi tutulan numunenin ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,333 olarak hesaplanmıştır. 1000 °C’de 2 saat süre Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve aşınma deneyine tabi tutulan numunenin sürtünme katsayısı 10 m kayma mesafesine kadar 0,1 civarında 10. metreden sonra ise artan bir grafik ile 30 m sonunda 0,4 civarına ulaştığı görülmektedir. 1000 °C’de 2 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve aşınma deneyine tabi tutulan numunenin ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,226 olarak hesaplanmıştır.



(a)

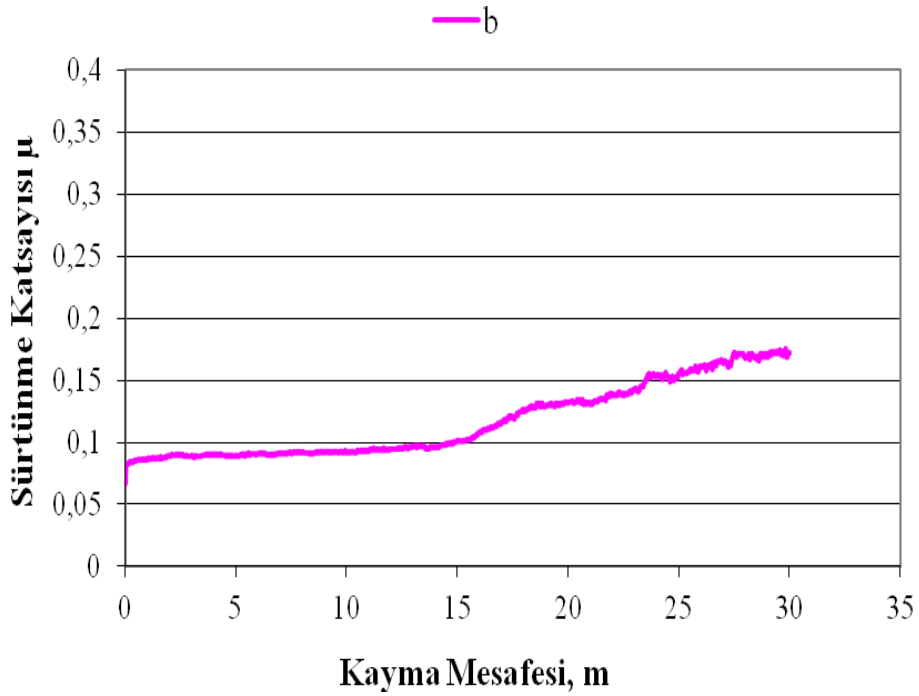


(b)

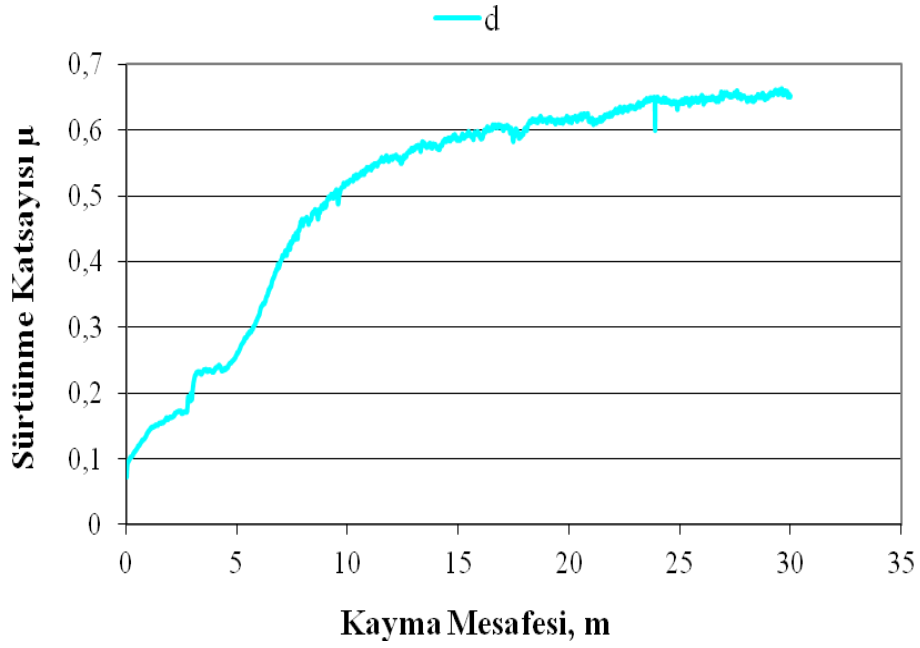
Şekil 3.36. Nanobor tozu ile a) 950 °C’de 2 saat b) 1000 °C’de 2 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 5 N yük altında sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi

Şekil 3.39’de 4 saat süre ile 950 °C ve 1000 °C de Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış numunelerin aşınma deneyi sonucu elde edilen sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimleri görülmektedir. 950 °C’de 4 saat süre Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve aşınma deneyine tabi tutulan numunenin sürtünme katsayısı 15 m kayma mesafesine kadar 0,1 değerinin altında, 15. metreden sonra ise düşük artış eğilimli bir grafik ile 30 m sonunda 0,16 civarına ulaştığı görülmektedir. 950 °C’de 4 saat

süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve aşınma deneyine tabi tutulan numunenin ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,117 olarak hesaplanmış ve bu değer tüm deney numuneleri arasında en düşük ortalama sürtünme değeri olarak belirlenmiştir. 1000 °C’de 4 saat süre Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve aşınma deneyine tabi tutulan numunenin sürtünme katsayısı grafiği başlangıç noktasından itibaren artan bir grafik göstererek sürtünme katsayısı 0,65 civarında sonlanmıştır. Başlangıç anından itibaren bu numunede sürtünme katsayısının yüksek olması artan sıcaklık ve tabaka kalınlığının artmasıyla prozitenin ve gevrekliğin artması sonucunda (Bayça ve Şahin, 2004; Çelikyürek, 2006) aşınma işlemi başlangıcında sert ve gevrek tabakada kırılmalar (Şekil 3.46b) meydana gelmiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 1000 °C’de 4 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve aşınma deneyine tabi tutulan numunenin ortalama sürtünme katsayısı değeri 0,507 olarak hesaplanmış ve bu değer yüzeyi alaşımlandırma işlemine tabi tutulan bütün numuneler arasında en yüksek değer olarak belirlenmiştir.



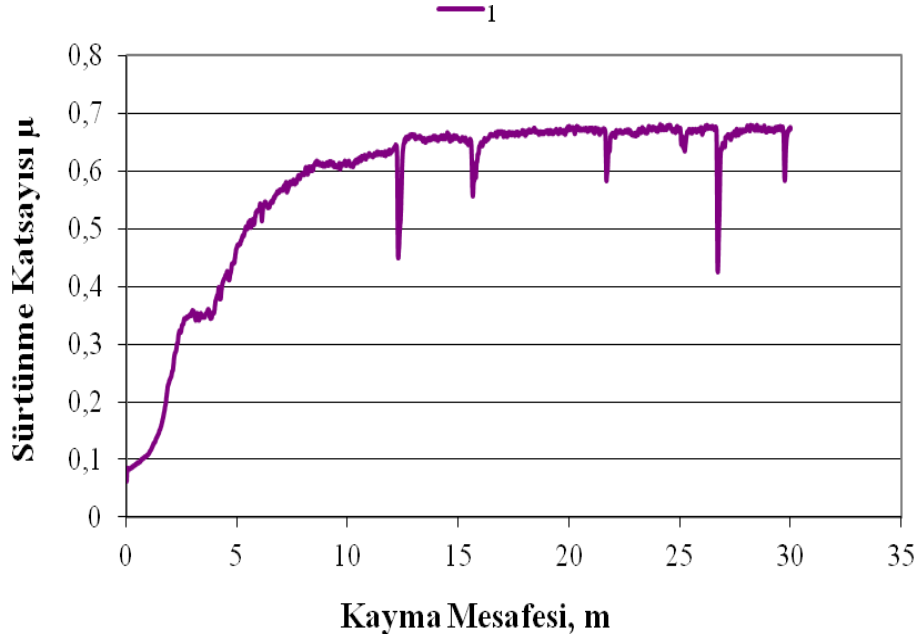
(a)



(b)

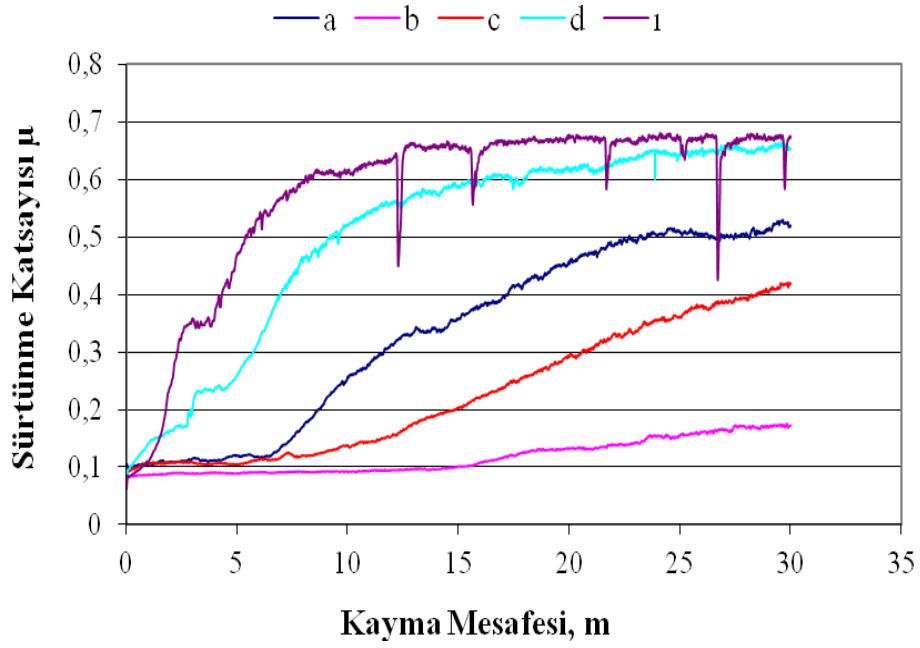
Şekil 3.37. Nanobor tozu ile a) 950 °C’de 4 saat b) 1000 °C’de 4 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 5 N yük altında sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi

Şekil 3.40.’de aşınma deneyine tabi tutulan ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunenin sürtünme katsayısı grafiği görülmektedir. Sürtünme katsayısı başlangıçta çok kısa bir sürede yükselmiş olup daha sonrası ise aşındırma işlemi sonucu meydana gelen deformasyon sertleşmesinden dolayı çok azda olsa sürtünme katsayısı grafiğinde bölgesel düşüşler olduğu görülmektedir. AISI 304 östenitik paslanmaz çelik aşınma deneyi sonucunda 0,578 sürtünme katsayısı ile tüm numuneler arasında en yüksek sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değerinin elde edildiği numune olmuştur.



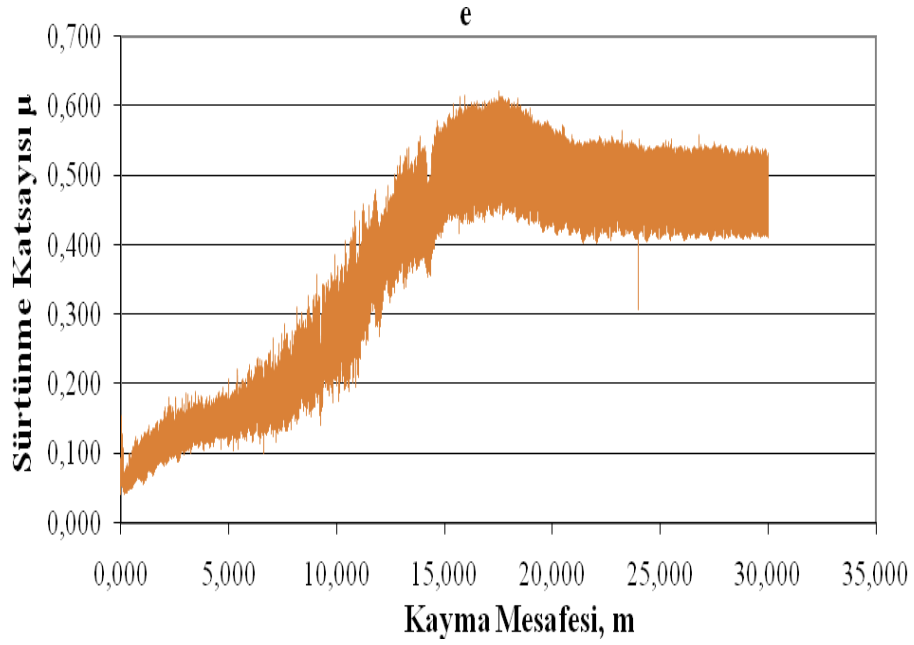
Şekil 3.38. Aşınma deneyine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunenin 5 N yük altında sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi

Şekil 3.41’de verilen grafikte 1000 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılan numune haricindeki yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 10 m’ye kadar olan kayma mesafelerinde sürtünme katsayısı 0.1 civarında 1000 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılan numunede sürtünme katsayısının başlangıç noktasından itibaren artması ve esas malzemeye benzer sürtünme katsayısı grafiği göstermesi yüzeydeki borür tabakasının XRD analizinde belirlenen aşırı sert ve gevrek olan FeB fazının aşınma deneyi başında kırıldığı hatta kırılan borür tabakasının altındaki esas malzemenin aşınmış olduğu SEM fotoğraflarıyla da tespit edilmiştir (Şekil.3.46b).

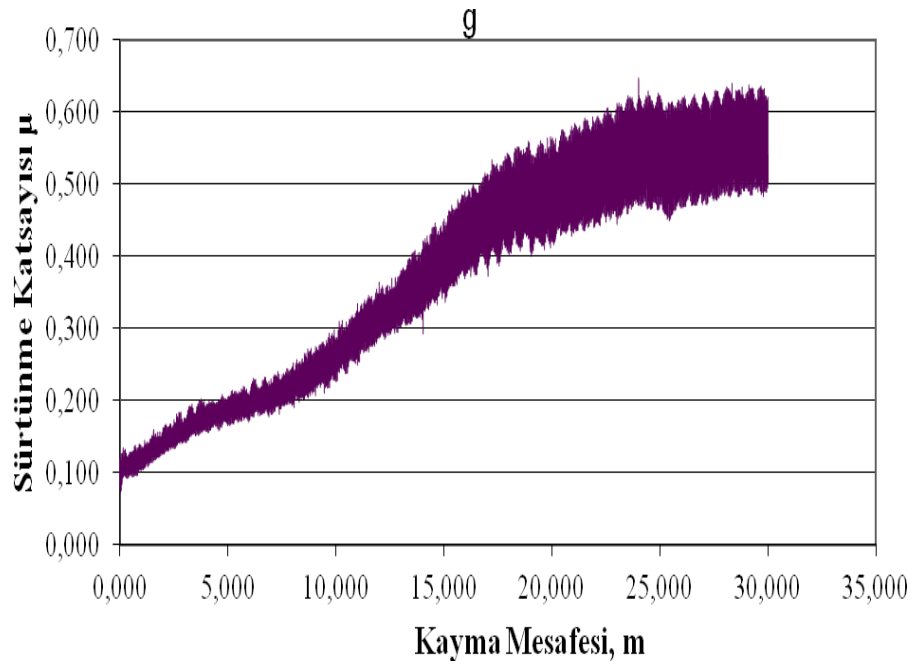


Şekil 3.39. 5 N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimleri

Şekil 3.42’de 2 saat süre ile 950 °C ve 1000 °C de EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış numunelerin aşınma deneyi sonucu elde edilen sürtünme katsayılarının kayma mesafesine göre değişimleri gösterilmiştir. 950 °C’de 2 saat süre ile EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve aşınma deneyine tabi tutulan numunenin sürtünme katsayısı artan bir grafik ile 15 m kayma mesafesinde 0,6 sürtünme katsayısı değerine ulaşmıştır. 15-30 m kayma mesafesi aralığında düşüş eğilimi göstererek 0,5 civarında devam etmiş ve ortalama sürtünme katsayısı 0,368 olarak hesaplanmıştır. 1000 °C’de 2 saat süre ile EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve aşınma deneyine tabi tutulan numunenin sürtünme katsayısı kayma mesafesine göre artan bir grafik sergilemiştir. Bu numune için ortalama sürtünme katsayısı 0,344 olarak hesaplanmıştır.



(a)

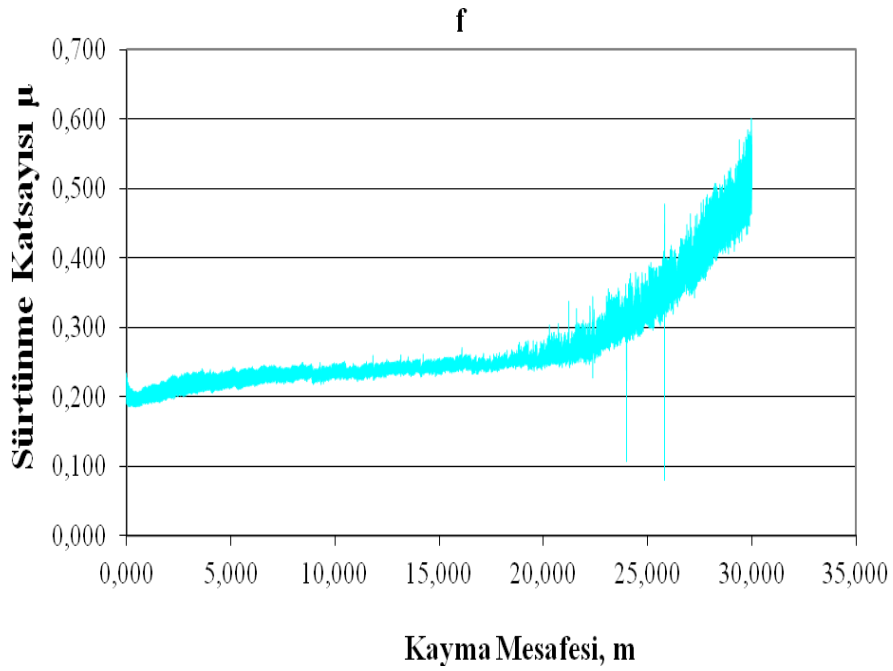


(b)

Şekil 3.40. EKabor 3 tozu ile a) 950 °C’de 2 saat b) 1000 °C’de 2 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 5 N yük altında sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi

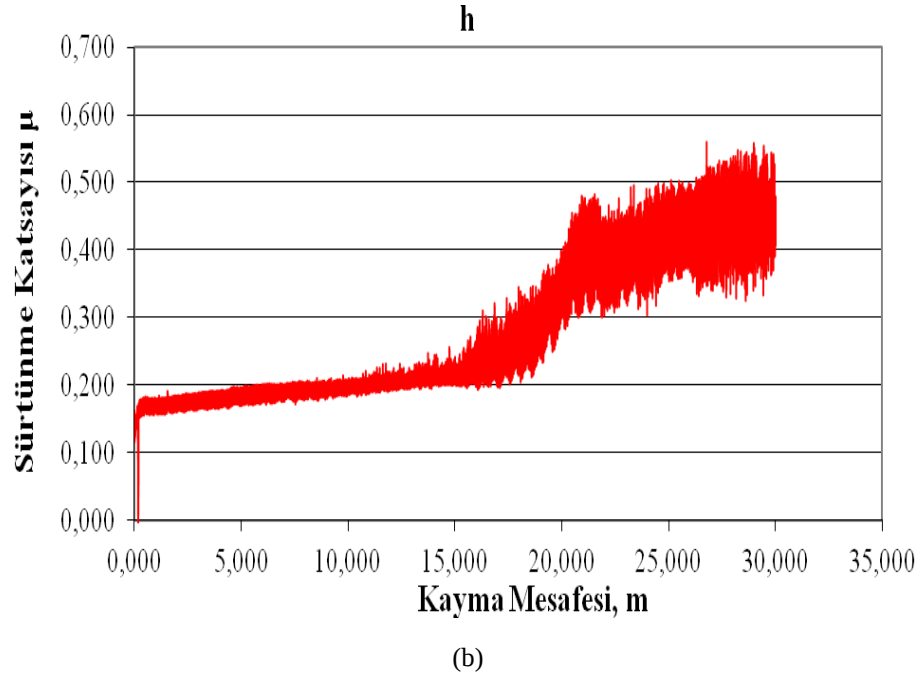
Şekil 3.43’de 4 saat süre ile 950 °C ve 1000 °C’de EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış numunelerin aşınma deneyi sonucu sürtünme katsayılarının kayma mesafesi göre değişimleri görülmektedir. 950 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılan

aşındırılmış numunenin sürtünme katsayısı başlangıçta sabit bir şekilde 0,2-0,3 aralığında aşınmaya maruz kalmış iken 20 m’lik kayma mesafesinden sonra sürtünme katsayısı artış eğilimli bir grafik sergileyerek 30 m sonunda sürtünme katsayısı 0,6 değerine ulaşmış ve ortalama sürtünme katsayısı 0,255 olarak hesaplanmıştır. 1000 °C’de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılan aşındırılmış numunenin sürtünme katsayısı ise başlangıçta 0,1-0,2 aralığında meydana gelmiş olup 15 m’den sonra artış eğilimli bir grafik sergileyerek sürtünme katsayısı 0,5 civarında ulaşmış ve ortalama sürtünme katsayısı 0,277 olarak hesaplanmıştır.

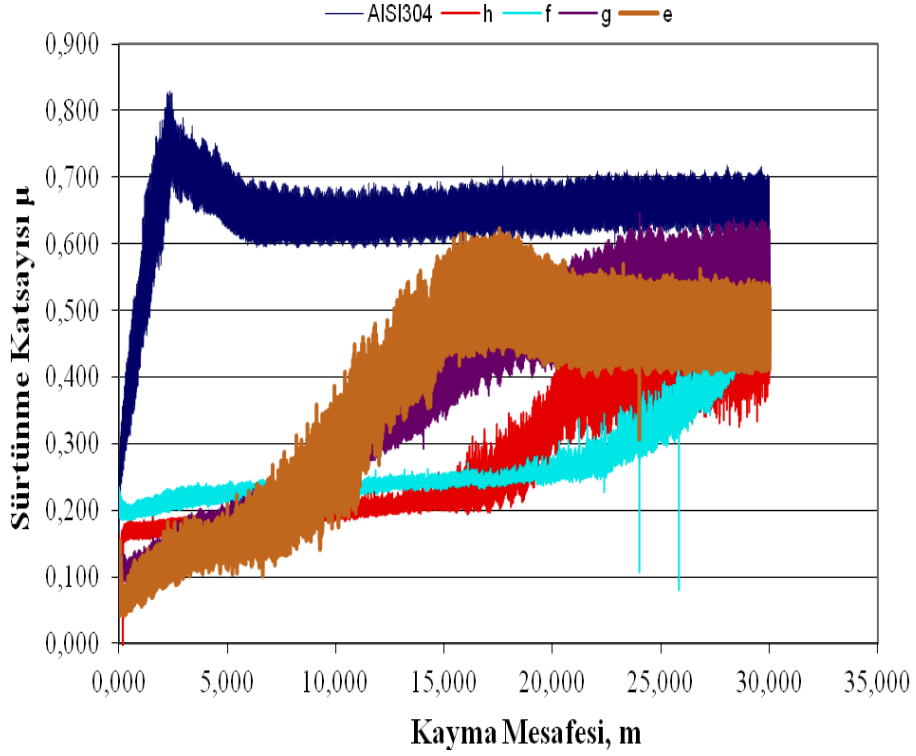


(a)

(‘‘Şekil 3.43’ün devamı’’)



Şekil 3.41. EKabor 3 tozu ile a) 950 °C’de 4 saat b) 1000 °C’de 4 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin 5 N yük altında sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimi

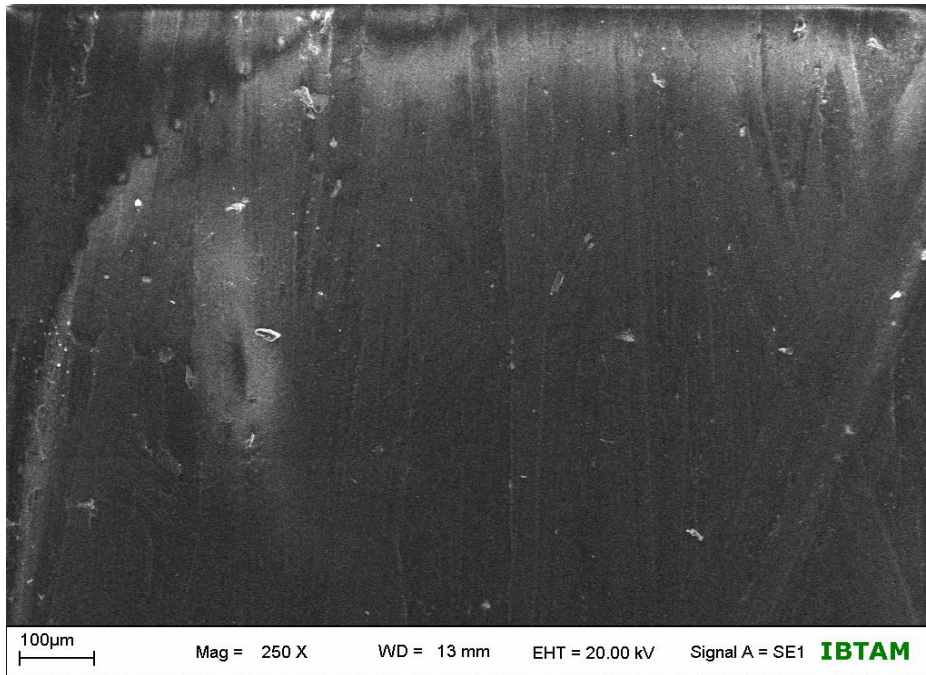


Şekil 3.42. EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve 5 N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin sürtünme katsayısının kayma mesafesine göre değişimleri

Şekil 3.38-3.44'deki grafiklerden görüldüğü üzere sürtünme katsayısı kayma mesafesine göre genellikle artış eğilimindedir. Bu durum yüzeydeki borür tabakasının sertlik değerinin en dıştan içe doğru düşüş göstermesi ile ilgilidir.

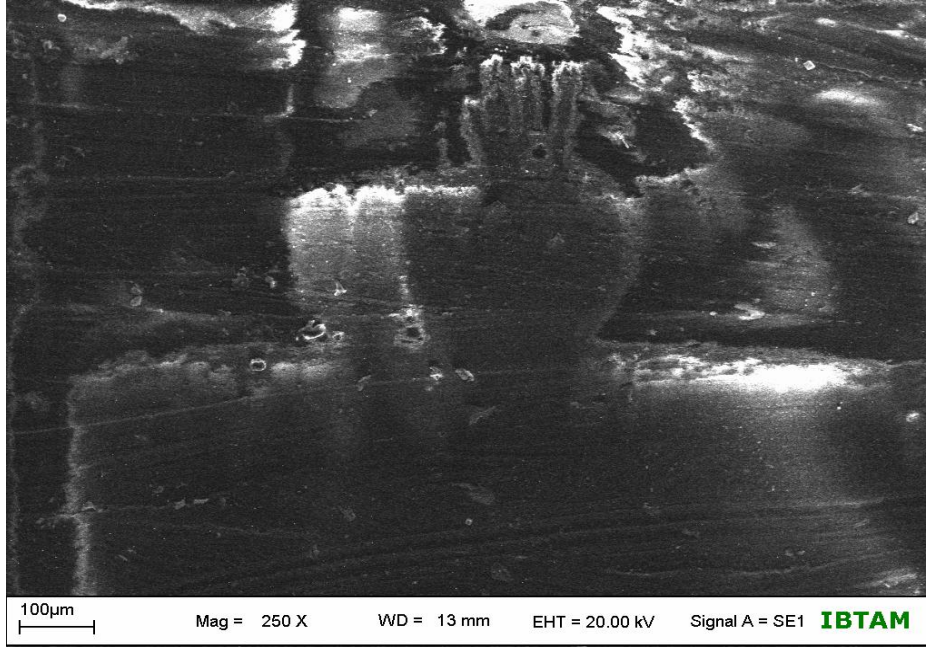
Aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin aşınma bölgeleri taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. Şekil 3.45- 3.49'da 5 N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan malzemelerin yüzey morfolojileri verilmiştir.

950 °C'de 2 saat süre Nanobor tozu ile alaşımlandırılan numunenin aşınma bölgesinden 250X büyütme ile alınan SEM fotoğraflarında (Şekil 3.45a) aşınma sonrasında herhangi bir çatlak veya gözenek gözlemlenmemiş olup mikron boyutunda dikey aşınma izleri ve iki yüzeyin birbirine sürtünmesinden kaynaklanan parçacıklar görülmektedir. Bu aşınma izleri mikro çizilme aşınmanın kısmen meydana geldiğini göstermektedir. 1000 °C'de 2 saat süre Nanobor tozu ile alaşımlandırılan numunenin aşınma bölgesinden alınan SEM fotoğrafında (şekil 3.45b) aşınma sonrasında yüzeyde sıvama şeklinde küçük bölgeler gözlemlenmiş olup ekstrüzyon tipi aşınmadan bahsetmek mümkündür. Ekstrüzyon ile birlikte yapıda çok küçük ölçekte ekstrüde bölgelerde noktasal şekilde plastik deformasyon olsa da bu plastik deformasyon çukurcuk oluşumları için yeterli düzeyde olmadığı görülmektedir.



(a)

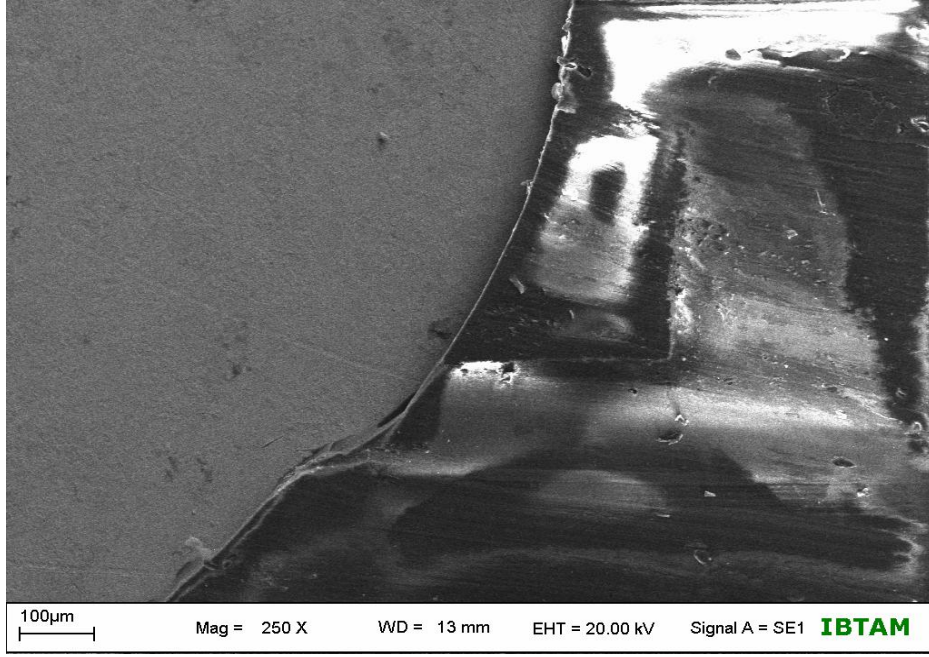
(“Şekil 3.45’in devamı”)



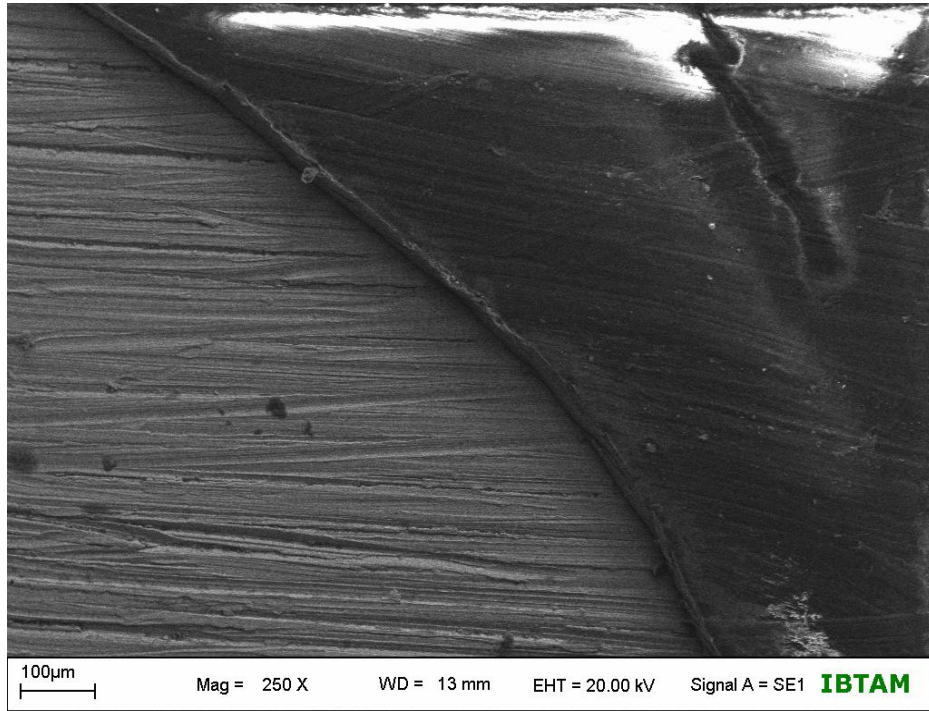
(b)

Şekil 3.43. Nanobor tozu ile a) 950 °C’de 2 saat b) 1000 °C’de 2 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan ve 5 N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin 250X SEM yüzey morfolojisi

950 °C’de 4 saat süre Nanobor tozu ile alaşımlandırılan ve aşınma deneyine tabi tutulan numunenin aşınma bölgesinden alınan 250X SEM fotoğrafında (şekil 3.46a) aşınma işlemi sırasında temas noktalarında meydana gelen yüksek basınçlar sonucunda yüzeyde kayma gerilmelerinin maksimum olduğu noktalarda plastik deformasyon meydana gelmiştir. Numunede meydana gelen plastik deformasyon devamında yüzeyde çukurcuk şeklinde yapılar oluşturmuştur. Bu durum numunede çukurcuk (pitting) aşınmasının meydana geldiğini göstermektedir. 1000°C’de 4 saat süre Nanobor tozu ile alaşımlandırılan ve aşınma deneyine tabi tutulan numunenin aşınma bölgesinden alınan 250X SEM fotoğrafında (Şekil 3.46b) aşınma bölgesinde tabakaların bir kısmının numunede derin çatlaklar ile kırılma ve kopmalar meydana geldiği açık bir şekilde görülmektedir. Bu numunenin; borür tabakasının 2200 HV sertlik değerinde ölçülmesi, aşınma deneyi sonrası yapılan EDX analizlerinde diğer numunelere göre daha fazla C miktarı içermesi gevrekliğini gösterir. Bu tabakada yüksek gevrekliğin ve düşük süneklikten dolayı ileri gelen kırılma ve kopma etkileri ile abrasiv aşınma mekanizmalarından çatlama (parçalanma) aşınması meydana gelmiştir (Ulutun, 2007; Gök, 2008).



(a)

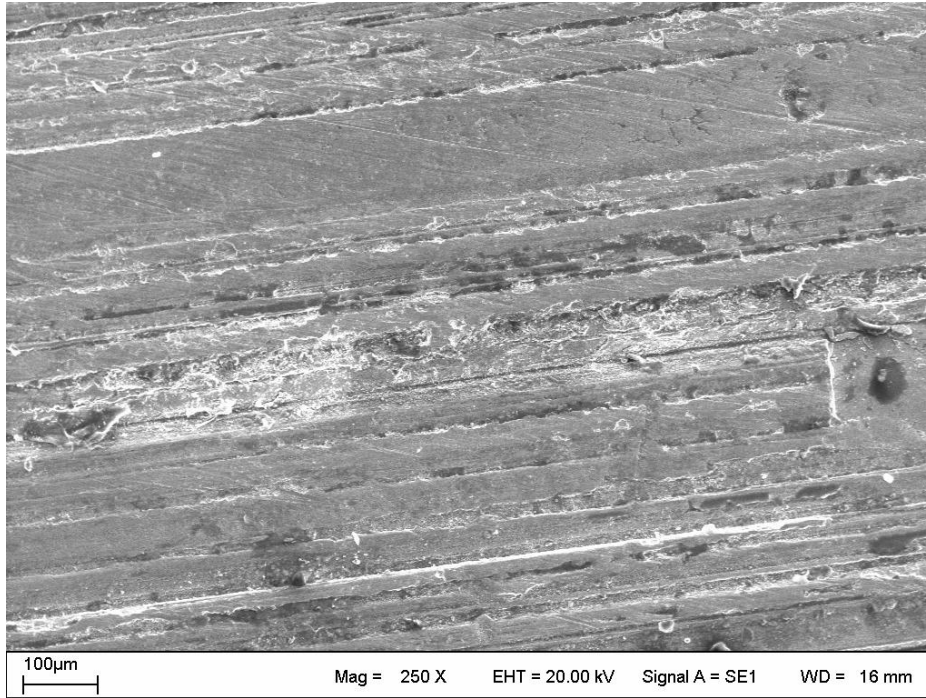


(b)

Şekil 3.44. Nanobor tozu ile a) 950 °C’de 4 saat b) 1000 °C’de 4 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan ve 5 N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin 250X SEM yüzey morfolojisi

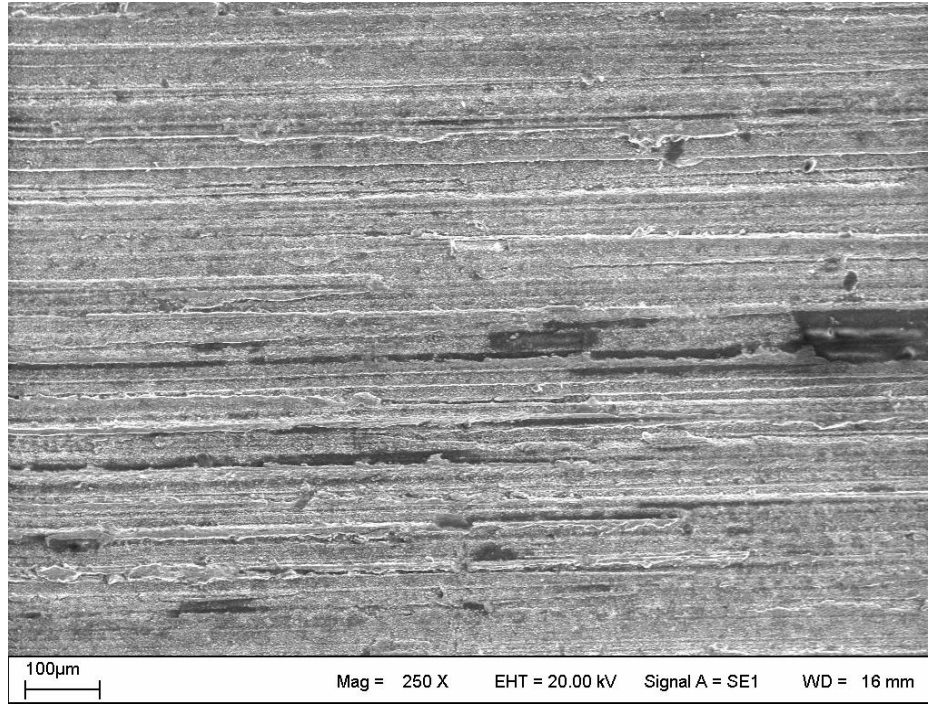
950 °C’de 2 saat süre EKabor 3 tozu ile alaşımlandırılan numunenin aşınma bölgesinden 250X büyütme ile alınan SEM fotoğrafında (Şekil 3.47a) aşınma sonrasında

borür tabakasının yüzeyden tamamen döküldüğü ve ana malzeme üzerinde derin çiziklerin oluştuğu görülmektedir. 1000 °C'de 2 saat süre EKabor 3 tozu ile alaşımlandırılan numunenin aşınma bölgesinden alınan SEM fotoğrafında (Şekil 3.47b) ise borür tabakasının büyük bir kısmının döküldüğü ve 950 °C'ye göre daha yüzeysel izlerin oluştuğu görülmektedir. 1000 °C'deki numunede dökülme ve aşınma hızının daha az olması (Şekil 3.37) tabaka kalınlığı ve sertliğinin diğer numuneye göre daha fazla olmasına bağlanabilir. Her iki numunede de tabaka kalınlığı ve sertliğinin az olmasından dolayı kütleli bir şekilde yüzey deformasyonu meydana gelmiş olup oymalı sürtünme aşınması ve çizik aşınması meydana gelmiştir (Kayalı, 2003; Develi, 2010).



(a)

(“Şekil 3.47’nin devamı”)

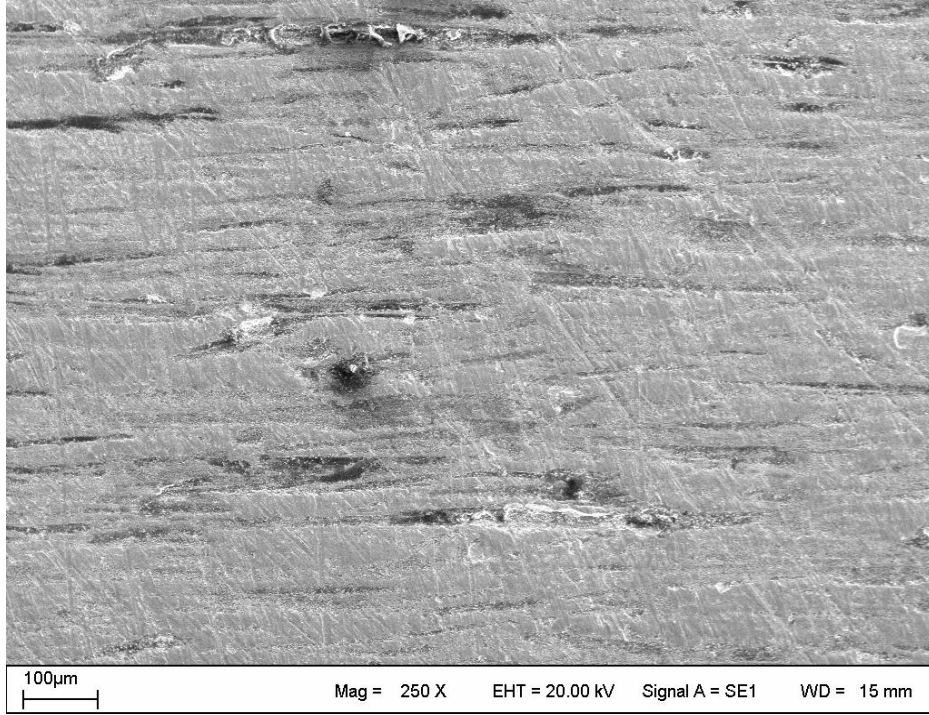


(b)

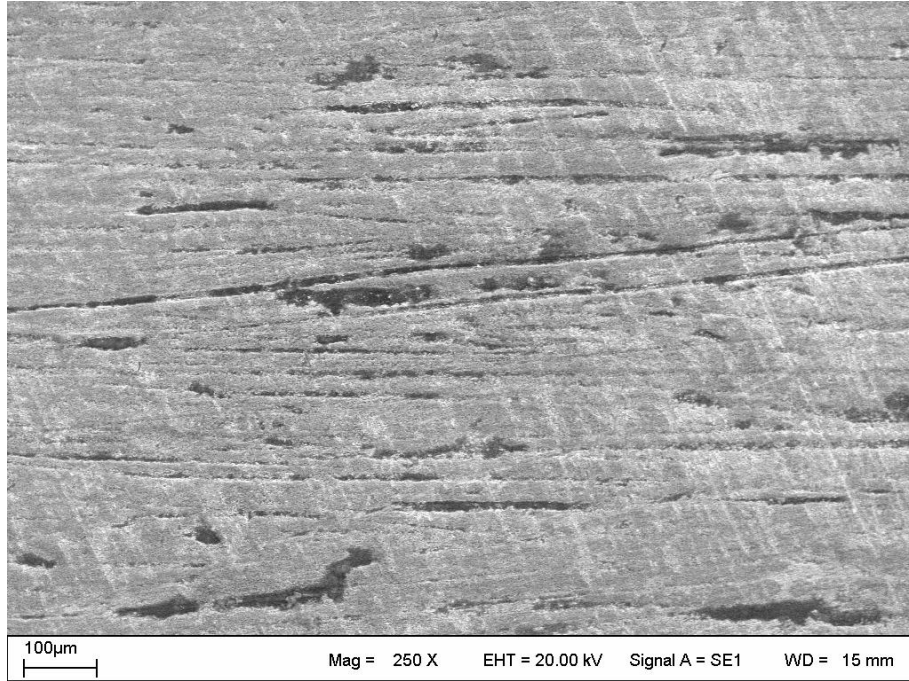
Şekil 3.45. EKabor 3 tozu ile a) 950 °C’de 2 saat b) 1000 °C’de 2 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan ve 5 N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin 250X SEM yüzey morfolojisi

950 °C’de 4 saat süre EKabor 3 tozu ile alaşımlandırılan numunenin aşınma bölgesinden 250X büyütme ile alınan SEM fotoğrafında (Şekil 3.48a) aşınma sonrasında borür tabakasının yüzeyden tamamen döküldüğü ve ana malzeme üzerinde bölgesel çukurların oluştuğu görülmektedir. 1000°C’de 4 saat süre EKabor 3 tozu ile alaşımlandırılan numunenin aşınma bölgesinden alınan SEM fotoğrafında (Şekil 3.48b) ise borür tabakasının tamamen döküldüğü ve 950⁰ C’de oluşmayan boyuna çiziklerin oluştuğu görülmektedir. Her iki numunede de oymalı sürtünme aşınması oluşmuş olup (Kayalı, 2003) ayrıca 1000 °C’ li numunede lokal bölgelerde çizik aşınması meydana gelmiştir (Develi, 2010).

EKabor 3 tozu ile 4 saat süre ile alaşımlandırılan ve aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin 2 saate göre daha az aşındıkları (Şekil 3.37) SEM yüzey fotoğraflarından açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum borür tabakası kalınlık ve sertliği ile ilgilidir.



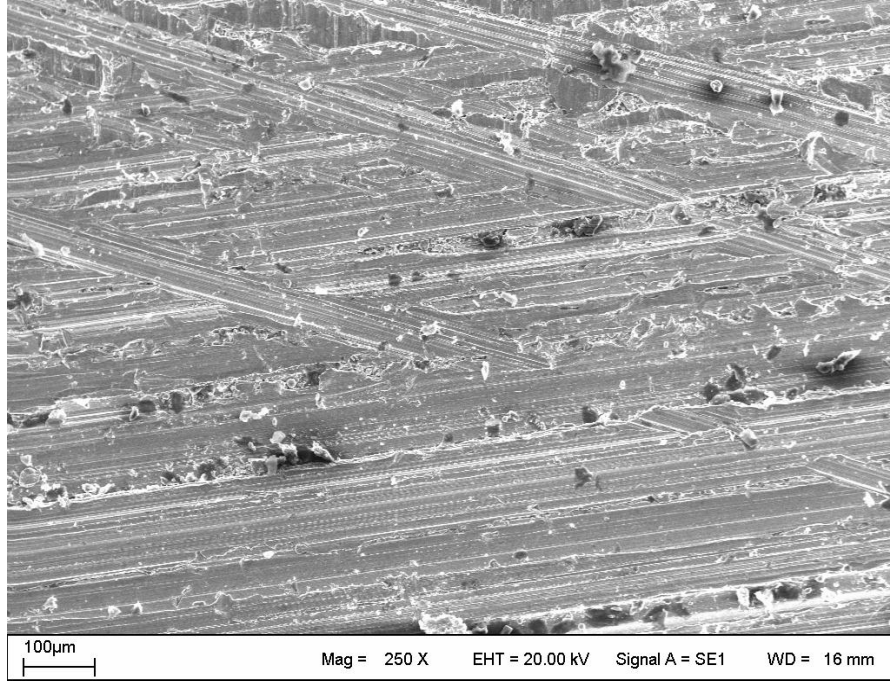
(a)



(b)

Şekil 3.46. EKabor3 tozu ile a) 950 °C’de 4 saat b) 1000 °C’de 4 saat süreyle yüzeyi alaşımlandırılan ve 5 N yük altında aşınma deneyine tabi tutulan numunelerin 250X SEM yüzey morfolojisi

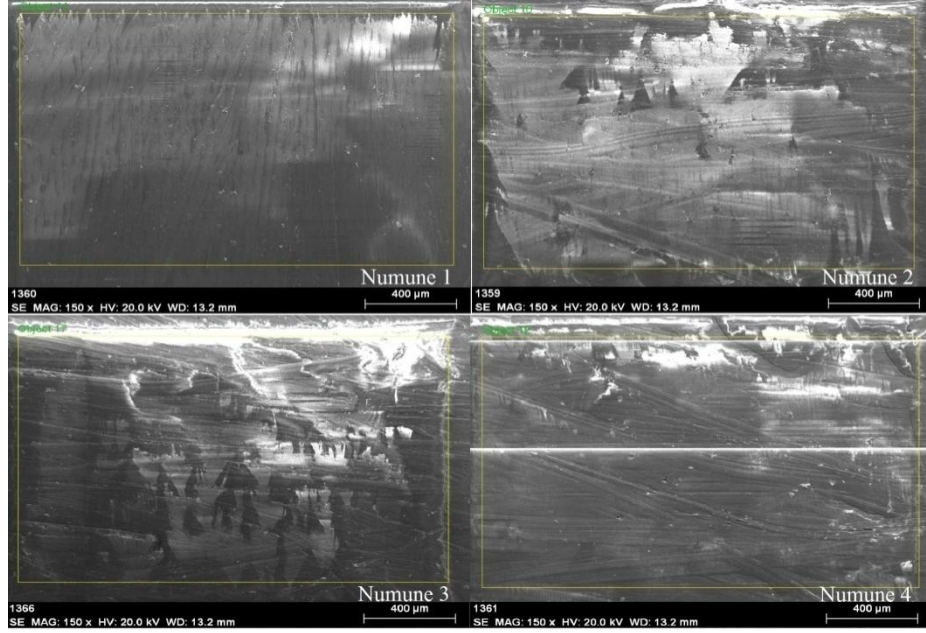
Herhangi bir işleme tabi tutulmayan AISI 304 Östenitik paslanmaz çeliğin aşınma deneyi sonrası alınan 250X SEM yüzey görünümünde (Şekil 3.49) numune üzerinde çok yönlü derin aşınma çizikleri (Tablo 3.9. ortalama derinlik değerleri) ve kalıntı partikülleri açık bir şekilde görülmektedir. AISI 304 östenitik paslanmaz çelik en az aşınan numuneye göre 7,73 kat daha fazla aşınmıştır (Tablo 3.9).



Şekil 3.47. 5 N yük altında aşınma deneylerine tabi tutulan AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunenin 250X SEM yüzey morfolojisi

Şekil 3.45-3.48’de verilen SEM yüzey fotoğraflarından da görüldüğü üzere Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numuneler daha sert bir aşındırıcı ile aynı koşullar altında aşınma deneyine tabi tutulmalarına rağmen yüzeydeki borür tabakasında lokal dökülmeler meydana gelmiş iken EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde borür tabakası tamamen dökülmüştür. Bu durum Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin sahip olduğu borür tabakası kalınlığı ve sertliği ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Çünkü yüzey sertliği ve tabaka kalınlığının artması ile birlikte abrasiv partiküllerin malzemeye batma derinliği düşer (Gök, 2008). Bu durum numunelerin daha az aşınmasını sağlar. Dolayısıyla Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numune yüzeylerindeki borür tabakasının, Ekaborlu numunelere göre daha kalın ve sert olması bu numunelerin daha az aşınmasını sağlamıştır.

Aşınma işlemine tabi tutulan ve yüzeyinde borür tabakası bulunan Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin yüzeylerinden EDX analizleri alınmıştır. Şekil 3.50’de EDX alınan numunelerin 150X SEM yüzey görünümü Tablo 3.10’da ise EDX analizleri sonucu yüzey morfolojisindeki elementlerin ağırlıkça % miktarları verilmiştir.



Şekil 3.48. Nanobor tozu ile 950 °C 2 saat (Numune1), 950 °C 4 saat (Numune 2), 1000 °C 2 saat (Numune 3), 1000 °C 4 saat (Numune 4), süre ile yüzeyleri alaşımlandırılmış numunelerin aşınma deneyleri sonrası EDX analizi yapılan bölgelerin yüzeyel görünümü

Tablo 3.10. Aşınma deneyi sonrası numunelerin EDX analizleri % oranları

Yüzey Alaşımlandırma İşlemi	950 °C’de 2 saat	950 °C’de 4 saat	1000 °C’de 2 saat	1000 °C’de 4 saat
Numune	1	2	3	4
B	0.36	0.36	2.45	0,3
C	49.29	49.96	49.91	52.04
O	49.58	48.75	45.19	46.9
Na	0.18	0.18	1.5	0.17
Al	0.21	0.31	0.48	0.3
Cl	0.27	0.29	0.3	0.18
Ti	0.12	0.14	0.18	0.11

Aşınma deneyleri sonucunda farklı aşınma hızlarına sahip numunelerin aşınan yüzeylerinden alınan EDX analizlerindeki kimyasal içeriğin 1000 °C’de 2 saat süre ile işlem görmüş numune dışında birbirlerine yakın oldukları görülmektedir. Bu numune yüzeyinde diğerlerine göre daha fazla bor tespit edilmesi Şekil 3.45b’de görüldüğü üzere bu bölgede yüzeyde sıvama şeklinde bölgeler gözlemlenmiş olup bu sıvama bölgelerinin aşınma sırasında yağlayıcı vazifesi görmesi ile tüm deney numuneleri arasında en iyi aşınma direncine sahip olmasında katkı sağladığı düşünülmektedir. 1000 °C’de 4 saat süreli numuneden elde edilen EDX analiz verileri C miktarının diğer numunelere oranla daha fazla olması (Tablo 3.10), 2200 HV sertliğe sahip olan borür tabakasında meydana gelen mikro çatlama aşınmanın gevreklikten dolayı meydana geldiğini destekler niteliktedir.

5 N yük altındaki deney sonuçları verilerine göre aşınma oranı en az 1000 °C 2 saat Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunede meydana gelmiştir. En az aşınmanın meydana geldiği numunedeki aşınma oranı $6,4 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ olarak hesaplanmıştır. Aşınma iz alanı ise $192,29 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$ ile en düşük değer aynı numunede elde edilmiştir. Aşınma deneyleri sonunda en yüksek aşınma oranı ise en düşük aşınmanın meydana geldiği numuneye göre 7,73 kat daha fazla aşınan herhangi bir işlem görmeyen AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunede meydana gelmiştir. Bu numunedeki aşınma oranı $49,47 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$, aşınma iz alanı ise $1484,3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır.

Borlanmış tabakaların tüm aşınma deneyleri dikkate alındığında; farklı sıcaklık ve sürelerde borlanan numunelerde farklı aşınma davranışları elde edildiği literatürde de belirtilmektedir (Akbayır, 2005; Ulutan, 2007; Gürkan, 2007). Yapılan bu çalışmada ise Şekil 3.38 ve 3.44 incelendiğinde borür tabakalarının sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi kayma mesafesinin artmasıyla genellikle azalmaktadır. EKabor 3 tozu ile borlanan numunelerde aynı sıcaklıkta artan süre ile aşınma direncinin arttığı görülmektedir. Fakat, 1000 ° C’de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılan numunede abrasiv aşınma mekanizmalarından parçalanma aşınması meydana geldiğinden aşınma miktarı fazla olmuştur . Bu durum Nanobor ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde yüzey alaşımlandırma süresi ile aşınma direnci arasında bir bağlantı kurulmasına neden olmuştur.

Şekil 3.45-3.48’de görüldüğü üzere Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin yüzeyindeki borür tabakasında kısmen kopmalar meydana gelmiştir. EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde ise bu tabaka tamamen ortadan kalkmıştır. Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde aşınma dayanımının daha iyi olması her iki bor tozu ile yapılan deneylerde kaplama tabakasının kalınlığı belli bir sertliğe (1926 HV) kadar aşınma direnci üzerinde olumlu etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca Nanobor ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde aşınma dayanımının daha iyi olması, Nanobor’un sahip olduğu tane boyutunun EKabor 3 tozuna göre çok daha küçük olması sonucunda alaşımlandırılmış yüzeyde bulunan daha küçük tanelerin aşınma ve çatlak dayanımını artırıcı (Ramnarayan, 2004) rol oynamalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

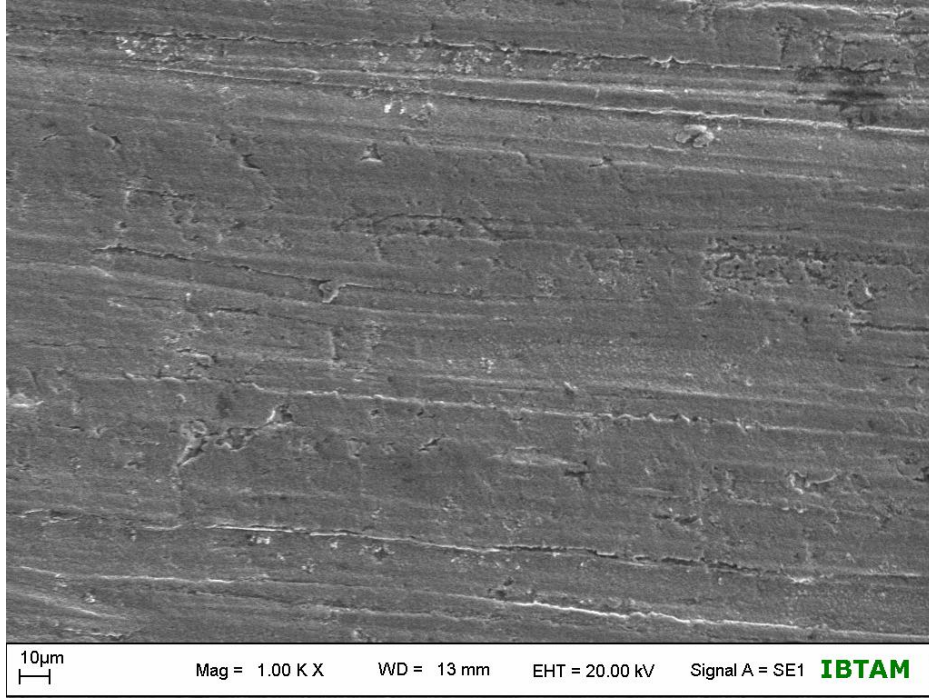
3.9. Korozyon Deneyleri Sonuçları

Nanobor ve EKabor 3 tozları ile yüzeyi alaşımlandırılmış numuneler asit çözeltisi ve tuz püskürtme testine tabi tutulmuştur.

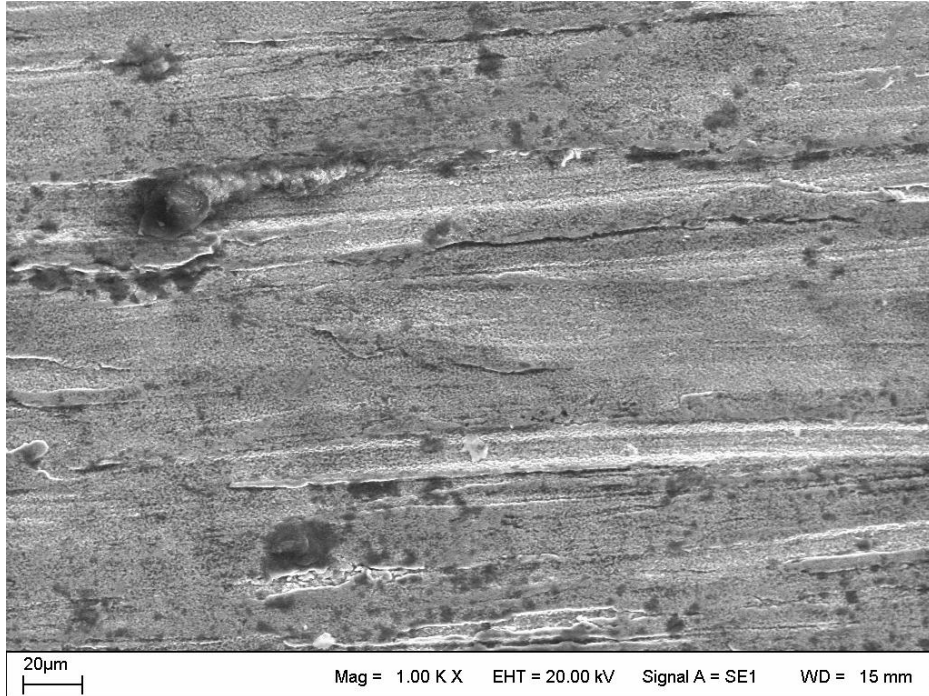
3.9.1. Asit Çözeltisi Sonuçları

56 °C’de % 10’luk H₂SO₄ asit çözeltisi içerisinde borür tabakalarının korozyon dirençlerini belirme amacıyla yapılan deneylerden asit çözeltisi deneyine tabi tutulan numunelerin 1000X SEM fotoğrafları Şekil 3.51 – 3.54 ’de gösterilmiştir.

Şekil 3.51-3.52’de 950 °C 2 saat süre ile Nanobor ve EKabor 3 tozu ile yüzey alaşımlandırma işlemine tabi tutulan ve 4 saat boyunca 56 °C’ lik asit çözeltisi ortamında bekletilen numunelerin 1000X büyütme SEM görüntüleri gösterilmiştir. Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunede çukurcuk oluşumları numunenin bazı bölgelerinde meydana gelmiş iken EKabor 3 tozu ile borlanan numunede ise yüzeyin tamamına yakın kısmında oluşmuştur.

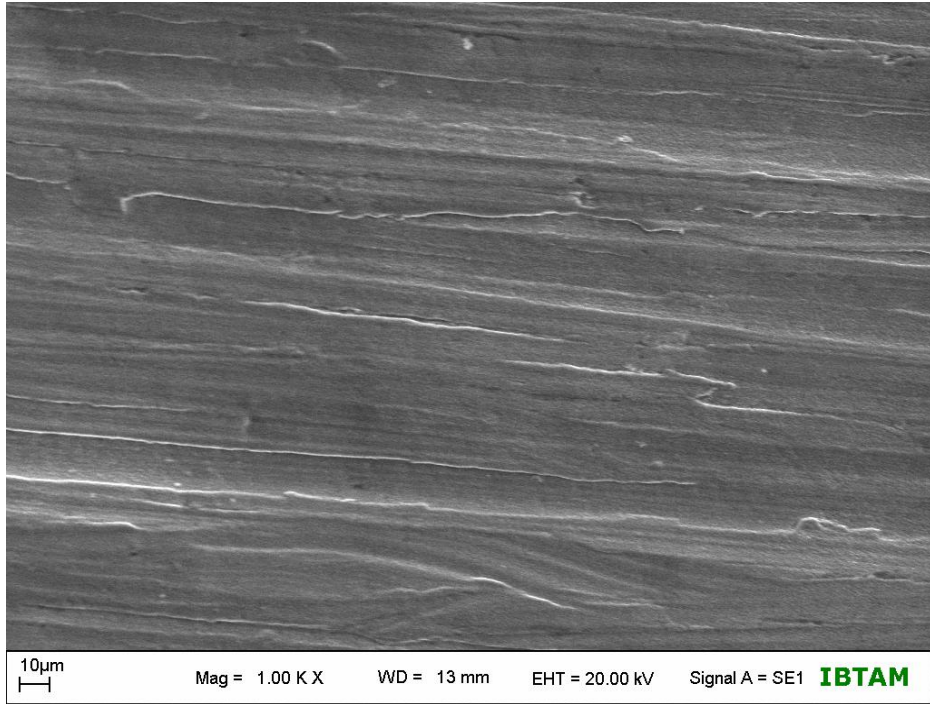


Şekil 3.49. 950 °C’de 2 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H₂SO₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü

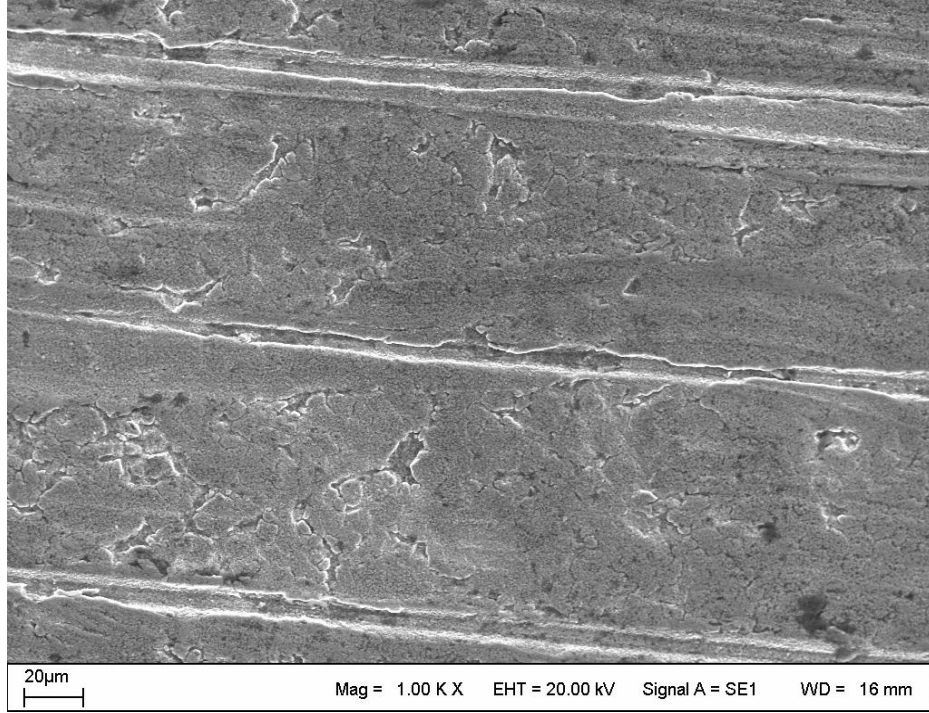


Şekil 3.50. 950 °C’de 2 saat süre ile EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H₂SO₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü

Şekil 3.53-3.54’de 950°C’de 4 saat süre ile Nanobor ve EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırma işlemine tabi tutulan ve 4 saat boyunca 56 °C’lik asit çözeltisi ortamında bekletilen numunelerin 1000X büyütme SEM görüntüleri verilmiştir. Nanobor ile alaşımlandırılan numunenin SEM fotoğraflarında herhangi bir çatlak, gözenek veya çukurcuk oluşumu gözlemlenmemişken EKabor 3 tozu ile borlanan numunelerde ise yüzeyde kopmalar meydana geldiği görülmektedir. Bu durum borür tabakası kalınlığının daha ince olmasından dolayı kaynaklandığı düşünülmektedir.

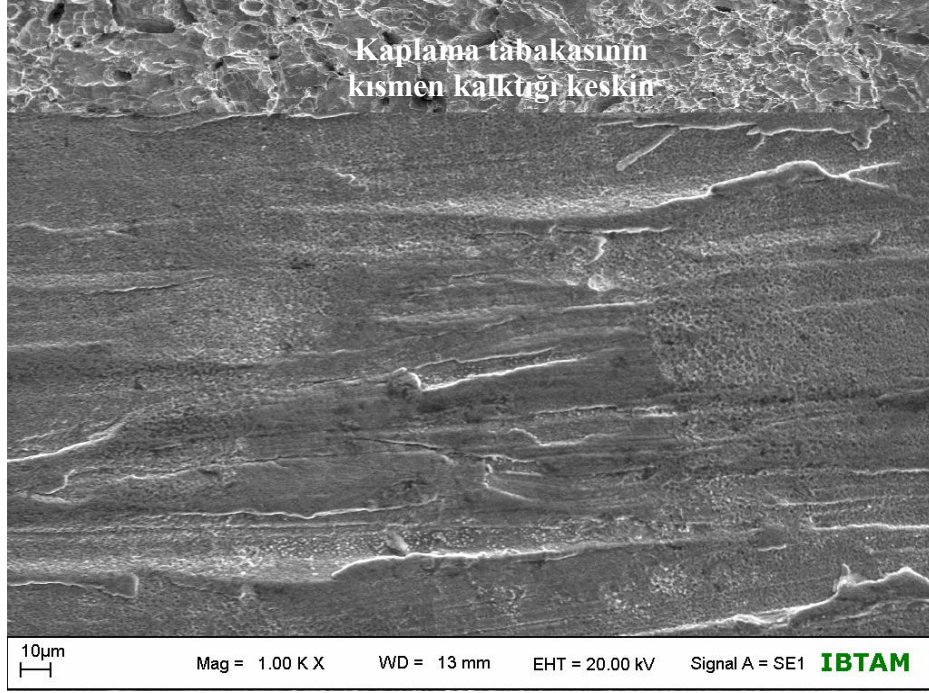


Şekil 3.51. 950 °C ’de 4 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H₂SO₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görüntüsü

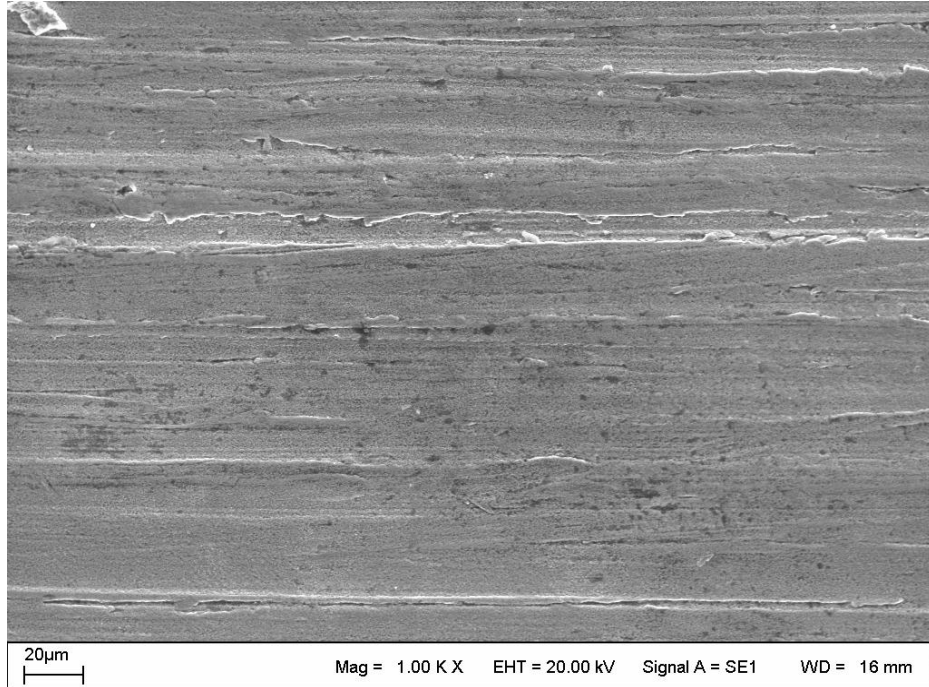


Şekil 3.52. 950 °C’de 4 saat süre ile EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H₂SO₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görüntüsü

Şekil 3.55-3.56’da 1000°C ve 2 saat süre ile Nanobor ve EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırma işlemine tabi tutulan ve 4 saat boyunca 56 °C’ lik asit çözeltisi ortamında bekletilen numunenin 1000X büyütme SEM görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 3.55’de 1000X büyütmede kaplama tabakasının keskin kenar tarafından kısmen düz bir biçimde kalktığı açıkça görülmektedir. Keskin kenardaki borür tabakasının kalkması, keskin köşelerde borür tabakasının zayıf olabileceği veya hassas kesme işlemi sırasında oluşabilecek kılcal çatlakların altına giren asit çözeltisinin bağları zayıflatarak tabakayı alt kısımdan aşındırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca malzeme yüzeyinin büyük bir kısmında çukurcuk (pitting) korozyonu görülmektedir. EKabor 3 tozu numunesinde ise boyuna çatlak ve bazı bölgelerde küçük çukurcuk oluşumları görülmektedir.

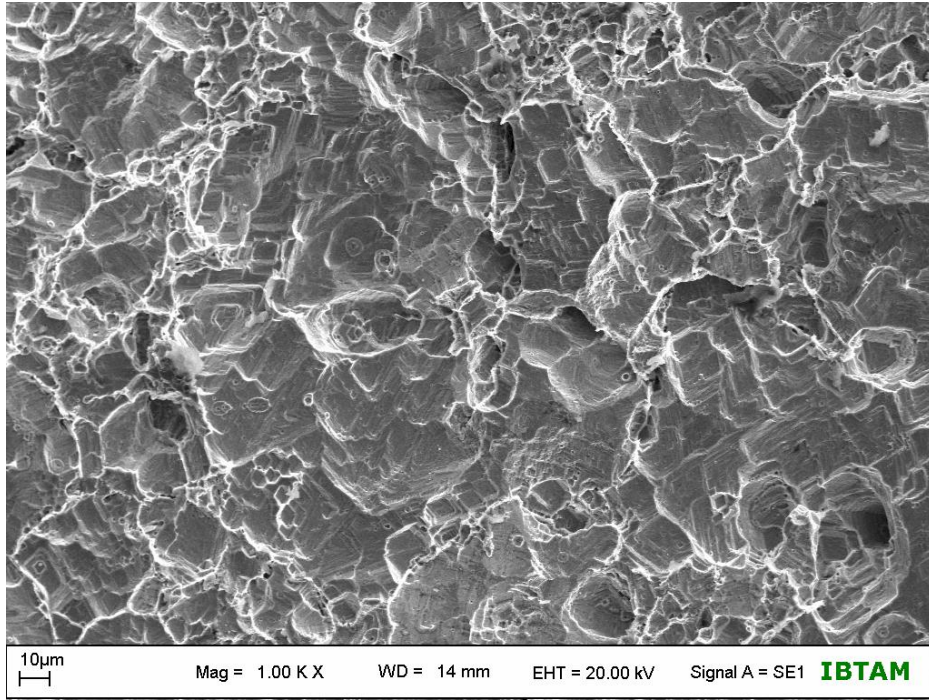


Şekil 3.53. 1000 °C’de 2 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H₂SO₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü

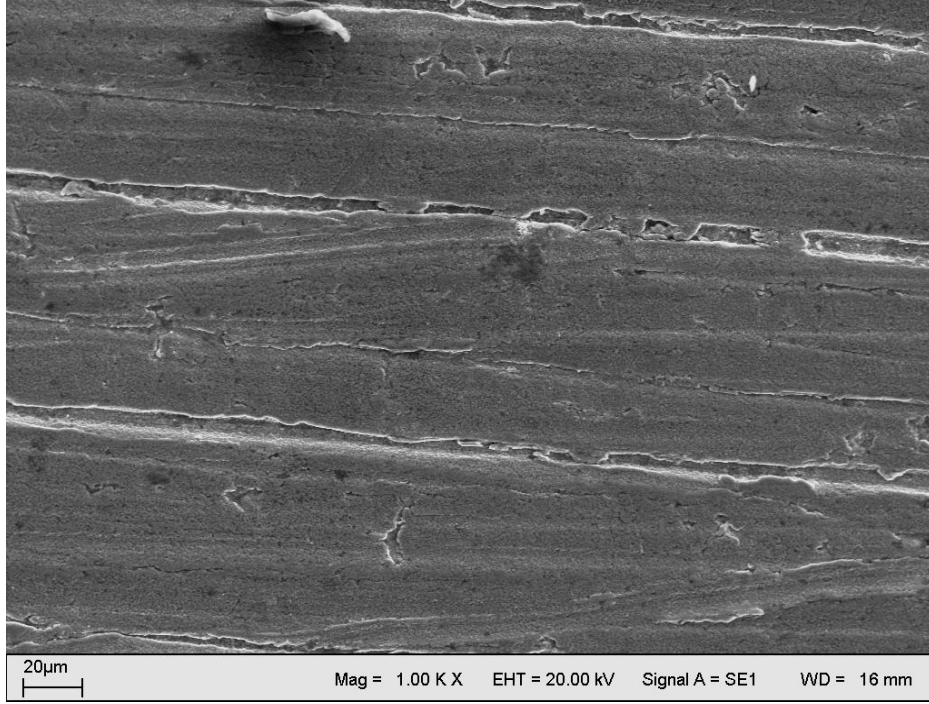


Şekil 3.54. 1000 °C’de 2 saat süre ile EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H₂SO₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü

Şekil 3.57-3.58’de 1000°C ve 4 saat süre ile Nanobor ve EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırma işlemine tabi tutulan ve 4 saat boyunca asit çözeltisi ortamında bekletilen numunenin 1000X büyütme SEM görüntüleri verilmiştir. 1000°C’de 4 saat süre ile Nano bor tozu ile yüzey alaşımlandırma işlemine tabi tutulan ve 4 saat boyunca asit çözeltisi ortamında bekletilen numunenin kenar kısımlarındaki borür tabakaları ikinci saatin sonunda tamamı ise üçüncü saatin sonunda asit tarafından aşındırılarak soyulmuştur. Burada numunenin yüzeyindeki kalıntı gerilmelerinden kaynaklanan çatlaklardan tabaka altına geçen asit çözeltisi o bölgede çeşitli çukurcukların oluşturulması suretiyle zayıflayan bağların kopması sonucu tabakanın tamamen ortadan kalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Tabakanın tamamen kopması sonucunda büyük kütle kaybı olmakla beraber kaplama tabakası soyulan numunenin de korozyon direncinin düştüğü Şekil 3.61’de kütle kaybı grafiğinden açıkça görülmektedir. EKabor 3 tozu ile borlanan numune yüzeyinde ise sadece bölgesel çatlak ve çukurcuklar meydana geldiği görülmektedir.

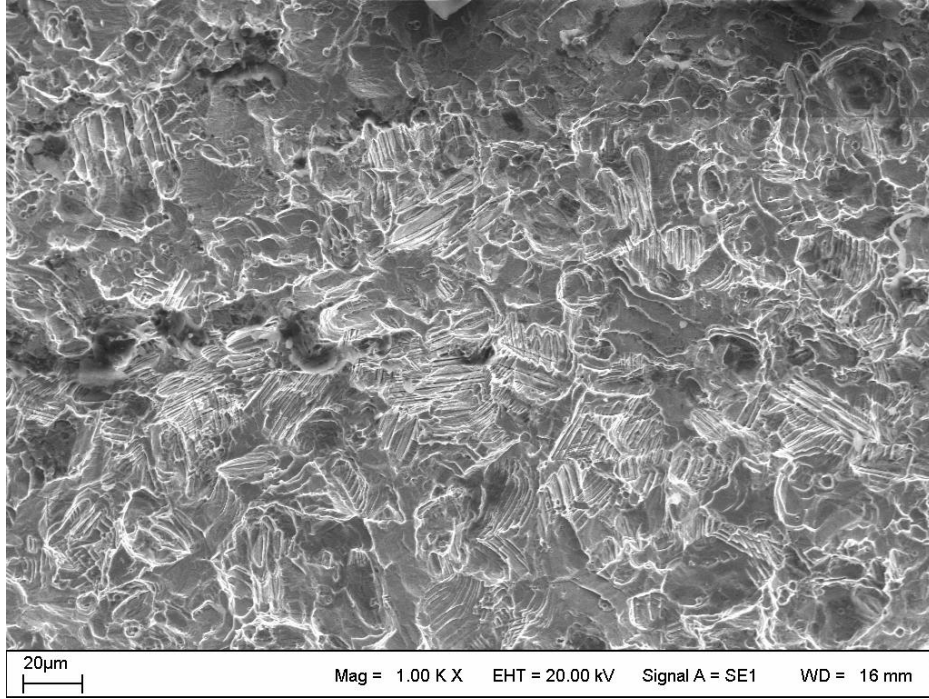


Şekil 3.55. 1000 °C’de 4 saat süre ile Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılmış ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H₂SO₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü



Şekil 3.56. 1000 °C'de 4 saat süre ile EKabor 3 tozu ile borlanan ve 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H₂SO₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü

Herhangi bir işleme tabi tutulmayan AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunenin asit korozyonu deneyi sonrası 1000X SEM fotoğrafında dentritik korozyon hücrelerinin meydana geldiği ve en fazla korozyona uğrayan numune ile benzer bir görüntü elde edilmiştir.



Şekil 3.57. AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin 4 saat boyunca 56 °C sıcaklıkta % 10 H₂SO₄ asit ortamında bekletilen numunenin 1000X SEM yüzey görünümü

Asit korozyonu deneyine tabi tutulan 1000 °C'de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılan numune haricindeki numunelerin tamamında oyuklaşma (pitting) korozyonu meydana geldiği SEM mikroyapı fotoğraflarından açıkça görülmektedir. Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde daha iyi bir yüzey görünümünün elde edilmesi borür tabakasının kalınlığı ile ilgili olduğu düşünülmektedir. 1000 °C'de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılan numunenin borür tabakasının deney sırasında gözle görülür bir biçimde tamamen dökülmesi ve SEM mikroyapı fotoğrafı, bu numunede gerilmeli korozyon çatlaması meydana geldiğini göstermektedir. Söz konusu numunede gerilmeli korozyon çatlamasının meydana gelmiştir. Bu durum, numunenin sertliği ve tabaka kalınlığının diğer numunelerden yüksek olmasından dolayı yapı içerisinde daha fazla oluşmuş olan FeB fazının çekme yönünde kalıntı gerilmelerine neden olması veya hassas mikroyapı üzerindeki çoklu fazların soğuması esnasında ısıl genleşme katsayılarının farklılığı sebebiyle numune yüzeyinde çatlak meydana gelmiş olması ile açıklanabilir (Soydan, 1996; Campos, 2006).

Asit korozyonu deneyine tabi tutulan Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan malzemelerin kaplama bölgesinden asit deneyi öncesi ve sonrasında EDX analizleri yapılmıştır. Tablo 3.11’ de asit çözeltisi deneyi öncesi ve sonrası numunelerin EDX analiz sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.11. Asit deneyi öncesi ve sonrası borür tabakası EDX analizi

Numunelerdeki Alaşım Elementleri (%)	Asit Çözeltisi Deney Öncesi	Asit Çözeltisi Deney Sonrası			
		950 ⁰ C 2 saat	950 ⁰ C 4 saat	1000 ⁰ C 2 saat	1000 ⁰ C 4 saat
Cr	13,79	10,30	8,97	10,63	11,72
B	1,08	3,37	3,94	4,05	2,01
C	2,23	2,50	4,0	3,71	2,70
Mn	4,17	1,89	2,16	2,25	3,41
Fe	72,72	69,79	70,31	67,91	68,01
Ni	6	12,15	10,63	11,45	11,88

EDX analiz sonuçları, krom ve manganın asit çözeltisi deneyi sonrasında azalma karbon ve nikel miktarında ise artış meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum krom ve mangan atom numaraları demirden daha düşük olduğundan, yüzey alaşımlandırma işlemi sırasında, borlanan malzemenin içinden yüzeyine doğru yayınırken nikel ve karbon, krom ve manganın tersi yönünde yayılmaları ile açıklanabilir (Bindal, 1991). Yüzeyde bulunan elementler asit çözeltisine daha fazla maruz kaldıklarından kayıp daha fazla olmuştur. Bu durum beklenen bir sonuç olmakla beraber M. Soncu’nun (2008) yapmış olduğu 18-10 östenitik paslanmaz çeliğin asidik çözeltilerdeki korozyon özelliklerinin incelenmesi yüksek lisans tezinde belirttiği çukur (pitting) korozyonunun tercihli olarak tane sınırlarında meydana gelmesi ile de uygunluk göstermektedir.

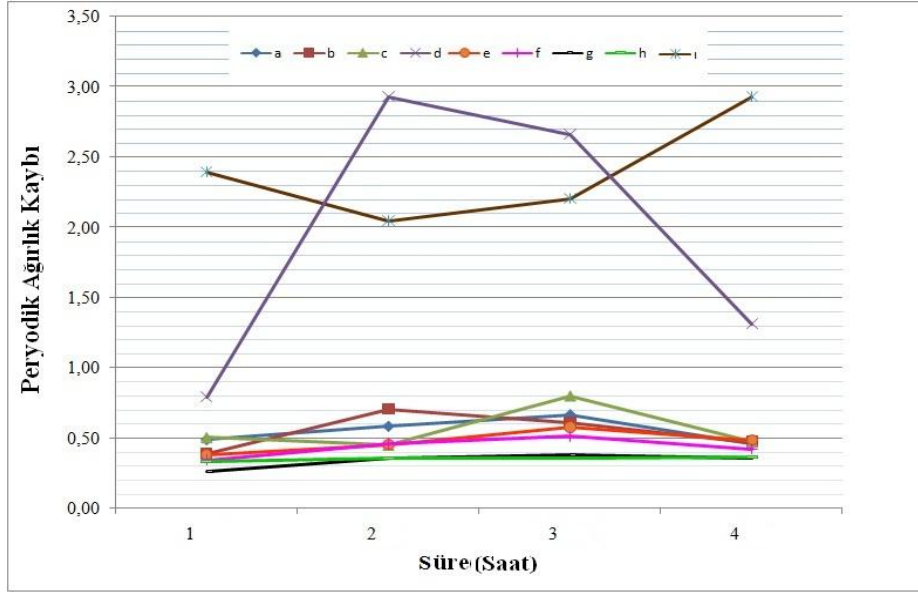
Asit çözeltisi deneyleri sırasında malzemelerin kütle kayıpları her saatin sonunda ölçülmüştür. Elde edilen veriler Tablo 3.12 ve 3.13 ile Şekil 3.60. ve 3.61.’de grafik şeklinde verilmiştir.

Tablo 3.12. Asit çözeltisi içerisindeki numunelerin kümülâtif ağırlık kaybı

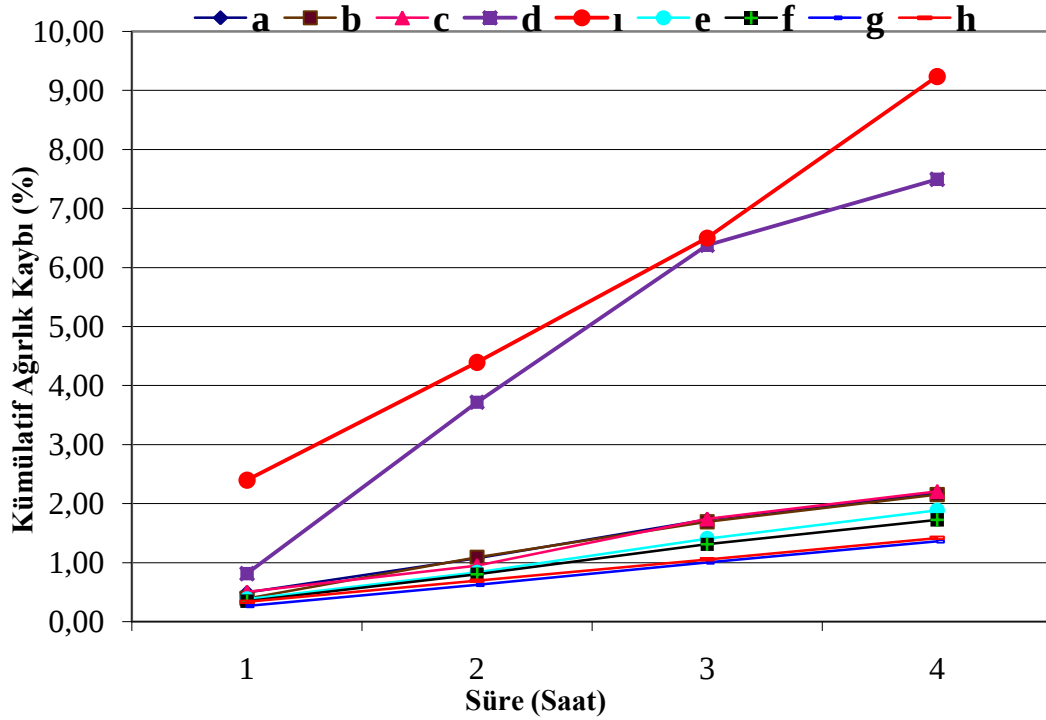
Yüzey alaşımlandırma		Kümülatif ağırlık kaybı (%)			
Süre		1 saat	2 saat	3 saat	4 saat
Nanobor	950 °C 2 saat	0,49	1,07	1,73	2,18
	950 °C 4 saat	0,39	1,09	1,69	2,15
	1000 °C 2 saat	0,50	0,95	1,74	2,21
	1000 °C 4 saat	0,79	3,72	6,38	7,50
EKabor 3	950 °C 2 saat	0,38	0,83	1,41	1,89
	950 °C 4 saat	0,34	0,80	1,31	1,72
	1000 °C 2 saat	0,26	0,62	1,00	1,36
	1000 °C 4 saat	0,33	0,69	1,05	1,42
İşlemsiz	AISI 304	2,39	4,39	6,50	9,24

Tablo 3.13. Asit çözeltisi içerisindeki numunelerin periyodik ağırlık kayıpları

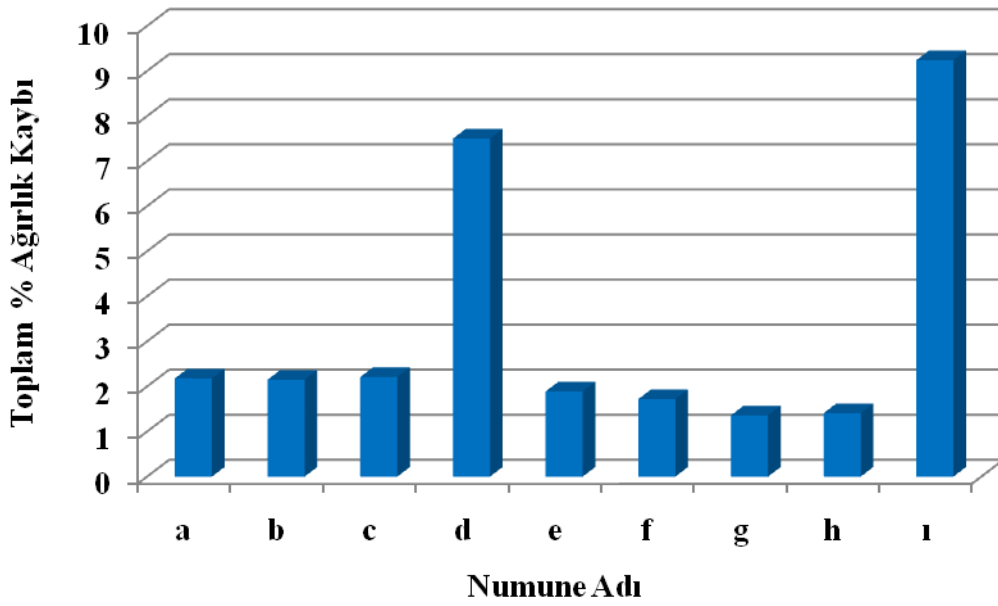
Yüzey alaşımlandırma		Periyodik ağırlık kaybı (%)			
Süre		1 saat	2 saat	3 saat	4 saat
Nanobor	950 °C 2 saat	0,49	0,58	0,66	0,46
	950 °C 4 saat	0,39	0,70	0,61	0,47
	1000 °C 2 saat	0,50	0,45	0,80	0,47
	1000 °C 4 saat	0,79	2,93	2,66	1,12
EKabor 3	950 °C 2 saat	0,38	0,45	0,58	0,49
	950 °C 4 saat	0,34	0,46	0,51	0,42
	1000 °C 2 saat	0,26	0,36	0,38	0,36
	1000 °C 4 saat	0,33	0,36	0,36	0,37
İşlemsiz	AISI 304	2,39	2,0	2,11	2,74



Şekil 3.58. %10 H₂SO₄ asit çözeltisi deneyine tabi tutulan a) 950 °C 2 saat b) 950 °C 4 saat c) 1000 °C 2 saat d) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu e) 950 °C 2 saat f) 950 °C 4 saat g) 1000 °C 2 saat h) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan i) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin % periyodik ağırlık kayıpları



Şekil 3.59. %10 H₂SO₄ asit çözeltisi deneyine tabi tutulan a) 950 °C 2 saat b) 950 °C 4 saat c) 1000 °C 2 saat d) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu e) 950 °C 2 saat f) 950 °C 4 saat g) 1000 °C 2 saat h) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan i) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin % kümülatif ağırlık kaybı



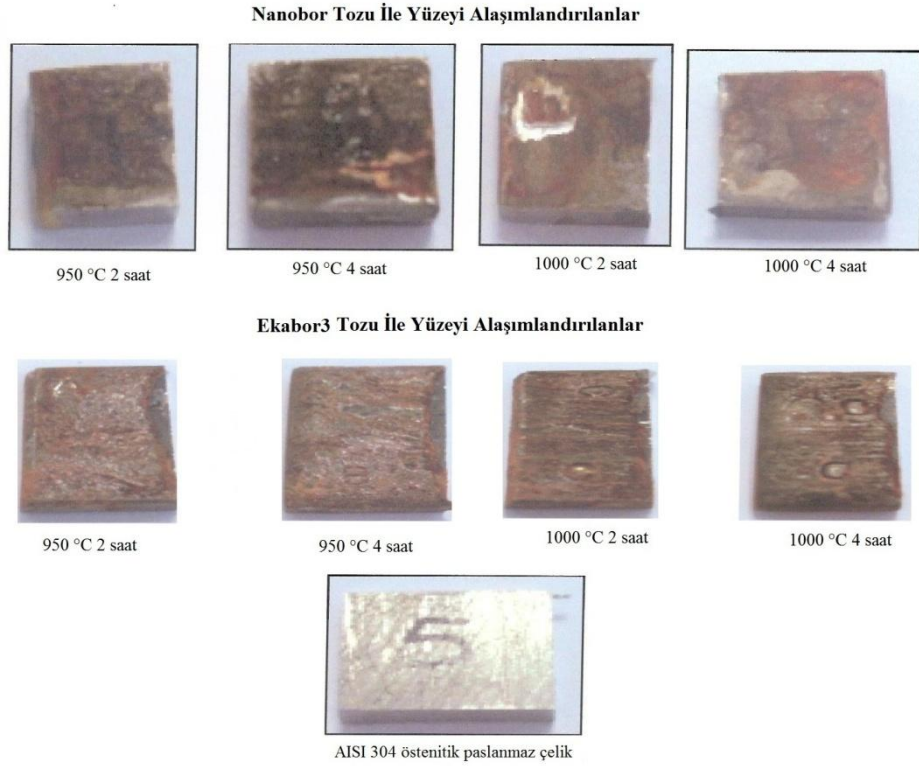
Şekil 3.60. %10 H₂SO₄ asit çözeltisi deneyine tabi tutulan a) 950 °C 2 saat b) 950 °C 4 saat c) 1000 °C 2 saat d) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu e) 950 °C 2 saat f) 950 °C 4 saat g) 1000 °C 2 saat h) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan i) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin 4 saat sonundaki % ağırlık kaybı

Numunelerin asit ortamında 4 saat sonunda meydana gelen % kütle kaybını gösteren grafikte (Şekil 3.62) görüldüğü üzere ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çelik asit deneyi ortamında %9,24 ile en fazla aşınan deney numunesi olduğu görülmektedir. Kütle kayıpları karşılaştırıldığında Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan malzemenin herhangi bir işlem yapılmayan malzemeye göre 56 °C'deki %10'luk H₂SO₄ asit çözeltisi ortamında 4,3 kat'a kadar daha fazla dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Yüzey alaşımlandırma tabakası doğrudan yüzeyden kalkmayan numunelerin aşınma oranlarının birbirine çok yakın oldukları gözlemlenmiştir. 1000 °C'de 4 saat süre ile yüzeyi alaşımlandırılan numunenin kaplama tabakasının kenar kısmı deneyin 2. saatinin sonunda tamamının ise 3. saatin sonunda asit tarafından aşındırılarak kaldırılması ile korozyon oranı diğer yüzeyi alaşımlandırılan malzemelere göre daha fazla olmasına neden olmuştur. Borür tabakası tamamen soyulan numunenin 2 ve 3 saatin sonundaki kütle kaybı oranı esas numunenin söz konusu periyotlardaki kütle kaybından daha fazla olmuştur (Şekil 3.60 ve Tablo 3.11). Bu durum kalkan borür tabakasının dökülmesi sonucunda meydana gelen ağırlık kaybından kaynaklandığı düşünülmektedir. 1000 °C'de 4 saat süre ile yüzeyi Nanobor tozu alaşımlandırılan numune asit çözeltisi içerisinde toplamda esas numuneye yakın bir değerde kütle kaybına uğramıştır. Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerden 4 saatin sonundaki deneyde en az kütle kaybının 950 °C 4 saat süre ile Nanobor tozu ile

yüzeyi alaşımlandırılan numunede meydana geldiği şekil 3.60 ve tablo 3.11'den açıkça görülmektedir. EKabor 3 tozu ile borlanan numunelerin korozyon dayanımları ise AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğe göre ortalama 6,7 kat daha az kütle kaybı olmuştur. EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin asit ortamındaki korozyon dayanımları Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelere göre daha iyi olmuştur. Bu durum XRD analizlerinde belirlenen Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde daha fazla sayıda faz oluşumunun soğuma esnasında meydana getirdiği kalıntı gerilmeleri ve oluşan fazlar arasındaki ısı genleşme katsayılarından dolayı mikroyapı yüzeyinde oluşan pitting çukurcuklarının daha derin oluşmuş olması ile açıklanabilir. Farklı fazların oluşumu soğuma esnasında çekme ve basma gerilmelerine neden olduğundan yüzeyde daha sert ve pürüzlü bir tabakanın oluşumuna neden olmuştur. Pürüzlü yapı içerisine giren asitlerin borür tabakasının altına girerek borür tabakasında daha fazla kütleli hasara neden olduğu düşünülmektedir.

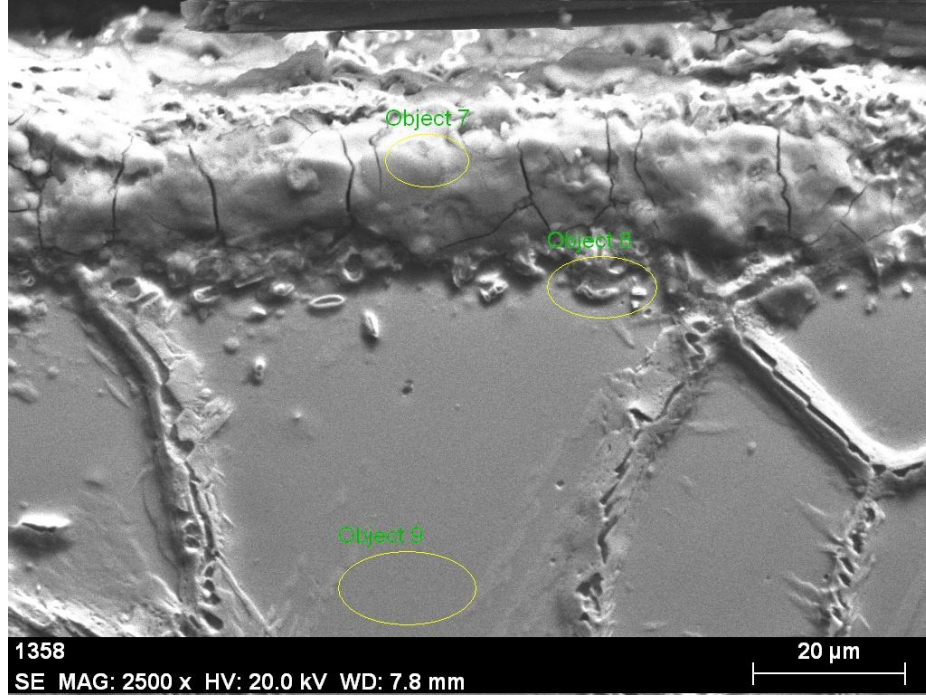
3.9.2. Hızlandırılmış Korozyon Deneyi Sonuçları

Nanobor ve EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin hızlandırılmış korozyon testinde 14. saatin sonunda yüzeylerinde kırmızı pas oluşumu gözlemlenmiştir. Ticari AISI 304 östenitik paslanmaz çelikte ise kırmızı pas başlangıcı 24. saatin sonunda gözlemlenmiştir.



Şekil 3.61. Hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan numunelerin 24 saat sonunda yüzey fotoğrafları

Kırmızı pas oluşumunun bor tozları ile alaşımlandırılan malzemelerde daha kısa bir süre oluşması paslanmaz çeliklerde paslanmayı önleyen Cr ve Ni elementlerinin alaşımlandırma işlemi sırasında, yüzeyde kromborür ve nikelborür fazlarının oluşumuyla yüzeyde mevcut Cr ve Ni miktarının paslanmaz çeliklerde paslanmamayı sağlayan %10,5 oranındaki Cr miktarının bazı bölgelerde eşik değerin altına düşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü 0,7 atm basınç ile püskürtülen tuzlu su çözeltisi içerisindeki tuz yüzeyi alaşımlandırılmış numunelerde eroziv korozyona neden olurken yüzeyleri tahrip ettiği ve edilgen olan Cr_2O_3 tabakası Cr miktarı eşik değerin altına inmiş olduğundan kendini yenileyemediğinden numune yüzeyinin bir yerinde başlayan oksitlenme metalin daha hızlı korozyona uğramasını sağlamıştır. Şekil 3.64 ve Tablo 3.14’de Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ve hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulmuş numunenin kaplama tabakası (object 7) difüzyon bölgesi (object 8) ve esas malzemedan (object 9) olarak adlandırılarak alınan EDX analizleri kaplama tabakası yüzeyinde Cr ve Ni miktarının % 2’ler civarında iken bu oran difüzyon bölgesinde Cr %14, Ni %8 olarak ölçülmüş esas malzeme bölgesinde ise Cr % 16, Ni %8 civarında olduğu görülmektedir.



Şekil 3.62. EDX analizi yapılan bölgelerin kaplama tabakası (object 7), difüzyon (object 8) matris bölgesinden (object 9) SEM görüntüsü

Tablo 3.14. 1000 °C’de 4 saat süre ile nano bor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan malzemenin kaplama tabakası (object 7) , difüzyon (object 8) matris bölgesinden (object 9) alınan EDX analiz sonuçları

Bölge	Yapı içerisindeki elementlerin ağırlıkça % oranları					
	B	C	Si	Cr	Fe	Ni
Kaplama tabakası	1,19	4,5	0,71	2,98	87,49	3,13
Difüzyon bölgesi	0,8	2,45	0,42	15,84	71,83	8,66
Ana metal (matris)	0,64	1,07	0,39	17,72	71,83	8,34

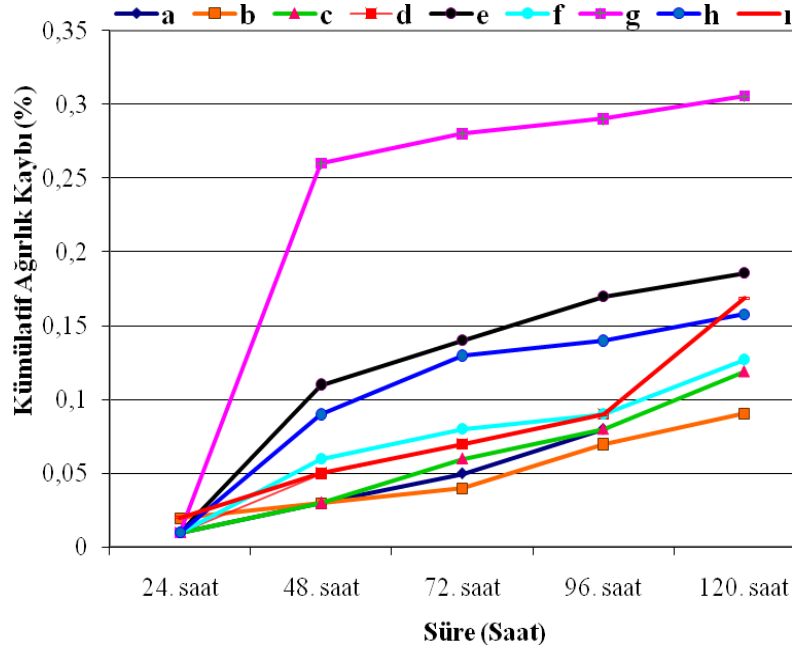
Numunelerde kırmızı pas miktarının toplam yüzey alanının % 50’sini 24 saatte geçmesine rağmen ağırlık kayıplarının daha nesnel olarak ölçülebilmesi için deneye 120 saat boyunca devam edilmiştir. Ağırlık kayıpları 24 saatlik periyotlar ile ölçülmüştür. Ağırlık kayıpları asit çözeltisine göre çok daha düşük oranlarda gerçekleşmiştir. Tablo 3.15–3.16’ da hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan numunelerin kümülatif ve periyodik ağırlık kayıpları verilmiştir. Tablo 3.15–3.16 ’daki tablolardan alınan veriler ile şekil 3.65.-3.66. arasındaki grafikler hazırlanmıştır.

Tablo 3.15. Hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan numunelerin kümülâtif ağırlık kaybı

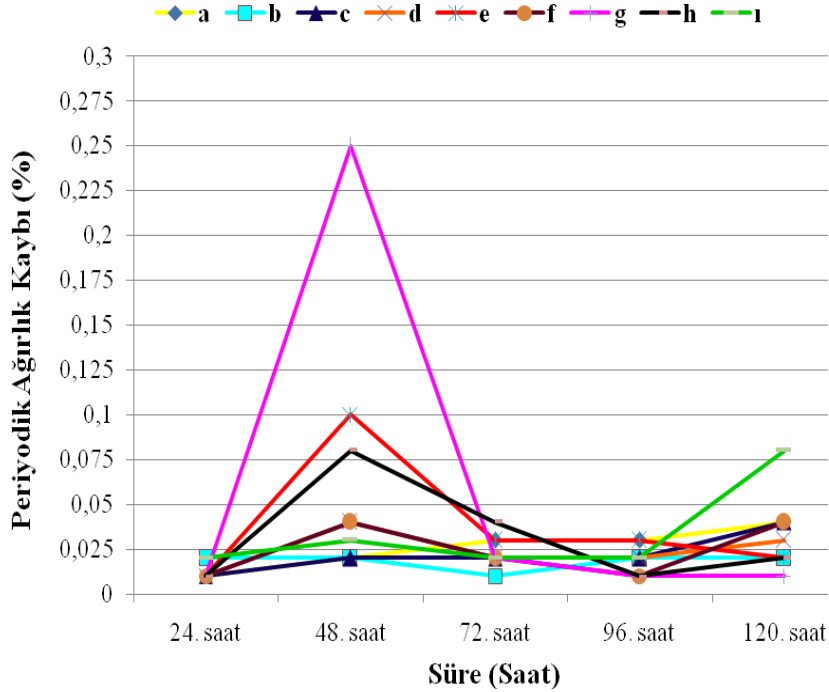
Yüzey Alaşımlandırma Malzemesi	Yüzey Alaşımlandırma Parametreleri	Adlandırma	Kümülatif Ağırlık kaybı (%)				
			24 saat	48 saat	72 saat	96 saat	120 saat
Nanobor	950 °C 2 saat	a	0,01	0,03	0,05	0,08	0,12
	950 °C 4 saat	b	0,02	0,03	0,04	0,07	0,09
	1000 °C 2 saat	c	0,01	0,03	0,06	0,08	0,11
	1000 °C 4 saat	d	0,01	0,05	0,07	0,09	0,11
EKabor 3	950 °C 2 saat	e	0,01	0,11	0,14	0,17	0,18
	950 °C 4 saat	f	0,01	0,06	0,08	0,09	0,13
	1000 °C 2 saat	g	0,01	0,26	0,28	0,29	0,30
	1000 °C 4 saat	h	0,01	0,09	0,13	0,14	0,16
-----	AISI 304	ı	0,02	0,05	0,07	0,09	0,17

Tablo 3.16. Hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan numunelerin periyodik ağırlık kaybı

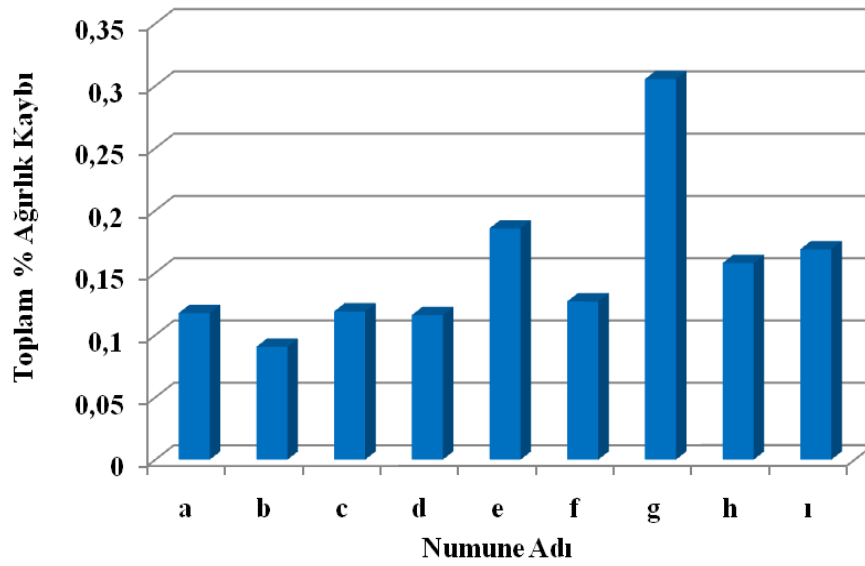
Yüzey Alaşımlandırma Malzemesi	Yüzey Alaşımlandırma Parametreleri	Adlandırma	Periyodik Ağırlık kaybı (%)				
			24 saat	48 saat	72 saat	96 saat	120 saat
Nanobor	950 °C 2 saat	a	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04
	950 °C 4 saat	b	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
	1000 °C 2 saat	c	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
	1000 °C 4 saat	d	0,01	0,04	0,02	0,02	0,03
EKabor 3	950 °C 2 saat	e	0,01	0,10	0,03	0,03	0,02
	950 °C 4 saat	f	0,01	0,04	0,02	0,01	0,04
	1000 °C 2 saat	g	0,01	0,25	0,02	0,01	0,01
	1000 °C 4 saat	h	0,01	0,08	0,04	0,01	0,02
-----	AISI 304	ı	0,02	0,03	0,02	0,02	0,08



Şekil 3.63. Hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan a) 950 °C 2 saat b) 950 °C 4 saat c) 1000 °C 2 saat d) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu e) 950 °C 2 saat f) 950 °C 4 saat g) 1000 °C 2 saat h) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan i) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin kümülâtif ağırlık kaybı



Şekil 3.64. Hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan a) 950 °C 2 saat b) 950 °C 4 saat c) 1000 °C 2 saat d) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu e) 950 °C 2 saat f) 950 °C 4 saat g) 1000 °C 2 saat h) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan i) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin periyodik ağırlık kaybı



Şekil 3.65. Hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan a) 950 °C 2 saat b) 950 °C 4 saat c) 1000 °C 2 saat d) 1000 °C 4 saat sürede Nanobor tozu e) 950 °C 2 saat f) 950 °C 4 saat g) 1000 °C 2 saat h) 1000 °C 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan ı) AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunelerin % ağırlık kaybı oranı

Hızlandırılmış korozyon testine tabi tutulan numunelerin kümülatif ve periyodik ağırlık kayıpları tablo ve grafiklerinden Nanobor tozu ile alaşımlandırılan numunelerden en az kütle kaybı % 0,9 ile 950 °C’de 4 saat süre ile alaşımlandırılan numunede olmuştur. Nanobor tozu ile alaşımlandırılan diğer 3 numunede ise ağırlık kayıpları birbirlerine çok yakın olup % 0,11 olarak gerçekleşmiştir. AISI 304 östenitik paslanmaz çelik numunede ise kütle kaybı % 0,16 olmuştur. EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde ise kütle kayıpları Nanobor ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelere ve işlemsiz AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğe göre daha fazla olmuştur. Tüm deney numuneleri arasında % 0,3’lük bir kütle kaybı ile 1000 °C’de 2 saat süre ile EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numune tüm deney numuneleri arasında en fazla kütle kaybının meydana geldiği numune olarak ölçülmüştür. Hızlandırılmış korozyon ile yüzey alaşımlandırma işlemi arasında ağırlık kayıpları bakımından bir bağlantı kurulamamıştır.

Hızlandırılmış korozyon testindeki kütle kayıpları asit çözeltisi deneyleri ile kıyaslanamayacak kadar az olmuştur. Bu yüzden asit çözeltisi içerisindeki malzemelerin yapay deniz suyu çözeltisine göre korozyon dayanımlarının çok daha az olduğu söylenebilir.

Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan paslanmaz çeliklerde kırmızı pas oluşumunun ticari AISI 304 paslanmaz çeliğe göre daha kısa sürede meydana gelmesi 0,7 atm basınç ile püskürtülen tuzlu su çözeltisi içerisindeki tuz'un darbe dayanımı düşük olan borür tabakalarında erozif korozyona neden olması ve paslanmaz çelikte paslanmamayı sağlayan Cr_2O_3 tabakası yerine alaşımlandırma işlemi sonucunda daha az koruyucu olan çok fazlı borür tabakasının yüzeyde oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

4.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, AISI 304 östenitik paslanmaz çelik 950 ve 1000 °C sıcaklıklarda 2 , 4 ve 6 saat sürelerde Nanobor ve aynı sıcaklık parametreleri ile 2 ve 4 saat sürede EKabor 3 tozu ile yüzey alaşımlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Yüzey alaşımlandırma işlemi termokimyasal metotla ve katı toz ortamda gerçekleştirilmiştir. Metalografik incelemeler sonucunda kaplama/matris ara yüzeyinin belirgin olarak birbirinden ayrıldığı ve borür tabakasının homojen bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Oluşan bu homojen yapının esas itibariyle Fe-B içerikli olduğu tespit edilmiştir.

Yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlıklarının işlem süresi ve sıcaklığı arttıkça arttığı gözlemlenmiştir. 1000 °C'de 6 saat süre ile Nanobor tozu kullanılarak yapılan deneylerde borür tabakasının döküldüğü belirlenmiştir. 2 ve 4 saat süre ile yapılan işlemlerde istenilen borür tabakası elde edilmiştir. Özellikle 2 saat süre ile yapılan yüzey alaşımlandırma işlemlerinde yüzeyde oluşan tabakanın, alaşımlanan tüm yüzey boyunca daha düzenli bir homojenliğe sahip olduğu görülmüştür. 1000 °C'de 4 saat süre ile yapılan işlem süresinde geçiş bölgelerindeki borür çekirdekçiklerin içerisinde yer yer kılcal çatlaklar meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, bor difüzyonuyla yüzeyde oluşan FeB ve Fe₂B bileşikleri ile AISI 304 çeliğin ısı genleşme katsayılarının farklı olmasından dolayı kaynaklanmıştır (Tablo1.4).

Nanobor tozlarının EKabor tozlarına göre daha küçük tane yapısı ile kolay difüze olmalarından dolayı borür tabakasının çok daha kısa sürelerde oluşması ve büyümesine neden olmaktadır. Elde edilen sonuçlar, Nanobor tozunun kullanılacağı yüzey alaşımlandırma işlemlerinde uzun sürelerden kaçınılması gerektiğini ortaya koymuştur.

X-ışınları difraksiyon analizi ve EDX analizi neticesinde, Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin yüzeyinde, borlama sıcaklığı ve süresine bağlı olarak baskın faz olarak FeB, az miktarda Fe₂B ve çok az oranda da CrB, Cr₂B, MnB, Mn₃B₂, Ni₂B ve TiB₂ ortaya çıkmıştır. Sonuçlar literatürle kıyaslandığında Nanobor tozu kullanılarak yapılan bir çalışmaya rastlanmamış olup Ekabor ile yapılan çalışmalarda literatürde baskın fazın Fe₂B olduğu deney şartlarına bağlı olarak da FeB, CrB, Cr₂B ve Ni₃B fazlarını oluştuğu belirtilmiştir. (Özdemir, 2004; Gürkan, 2007; Turhal, 2008). Bu durum borlama maddesinin boyutu düştükçe daha kolay difüze olduğu ve daha kısa işlem sürelerinde FeB tabakalarının elde edilebileceği göstermektedir. Nanobor tozu ile yapılacak uygulamalarda istenmeyen FeB fazı oluşumun azaltılması veya ortadan kaldırılması için EKabor tozlarına göre daha düşük sıcaklık ve daha kısa işlem sürelerinde çalışılmalıdır. Bu durum zaman ve maliyet açısından da avantaj sağlayacaktır.

Ölçülen sertlik değerleri, borür fazlarından oluşan kaplama tabakasında en yüksek değere ulaştığı ve ana malzemeye doğru düştüğü görülmüştür. AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin sertlik değerleri 218 HV dir. Nanobor tozu ile 950 °C’de 2 saat, 950 °C’de 4 saat, 1000 °C’de 2 saat ve 1000 °C’de 4 saat yapılan yüzey alaşımlandırma işlemi neticesinde AISI 304 östenitik paslanmaz çelik yüzeyinde oluşan borür tabakasının sertlik değerleri sırası ile 1880-1926-1921-2200 HV olarak ölçülmüştür. EKabor 3 tozu ile yapılan çalışmalarda bu değer 1020-1100-1202-1264 HV olarak ölçülmüştür. Yapılan literatür taramalarında AISI 316 malzeme kullanılarak 950 °C 8 saat süre ile ekabor tozu ile yapılan borlama işleminde 1700 HV sertlik değeri elde edildiği görülmüştür (Özdemir, 2004). Nanobor tozu ile malzemelerin sertliği daha kısa sürelerde ve ekabor tozlarına göre 2 kata yakın sertlik değerleri elde edilebileceği belirlenmiştir.

Çekme dayanımı, üç nokta eğme dayanımı ve kırılma tokluğu değerleri, borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Nanobor tozu ile yüzey alaşımlandırma işlemi sonucunda, malzemelerin çekme dayanımı sıcaklık ve sürenin uzamasına paralel olarak ortalama % 13 civarında düşüş göstermiştir. Üç nokta eğilme ve borür tabakası kırılma tokluğu dayanımı ise ticari AISI 304’ göre düşük sıcaklık ve işlem sürelerinde daha fazla düşüş meydana gelmiş olup eğilme dayanımlarında ortalama %14 civarında düşme göstermiştir. Borlama süresi ve sıcaklığındaki artış çekme dayanımı değerlerini olumsuz yönde; eğilme dayanımına ise olumlu yönde etki etmiştir. Bunun

sebebinin, borlama süresi ile daha sert ve gevrek olan FeB fazının artmasına atfedilebilir. Çünkü daha sert ve gevrek olan FeB fazı çekme işlemi esnasında süneklilik gösterememesi, numunenin iç kısımlarında yeterince sünek yapıların bulunmaması nedenleriyle borür tabakaları kırılarak kopma için uygun alanlar oluşturduğu düşünülmektedir. Eğilme dayanımının sıcaklık ve sürenin artışı ile artması sert yüzeylerde deformasyon meydana getirmek için daha fazla kuvvet uygulanması gerektiğini göstermektedir.

5 N yük altında 30 m kayma mesafesinde aşınma deneyine tabi tutulan yüzeyi EKabor 3 tozu ile alaşımlandırılan numunelerin işlem süresinin artması ile aşınma dayanımları artarak işlemsiz malzemeye göre 5 kat daha fazla aşınma direnci göstermiştir. Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin aşınma dayanımı ise işlemsiz malzemeye göre 7,73 kat daha dayanıklı olabildikleri belirlenmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda borür tabakası daha düşük sertliğe sahip bilyalarla (Al_2O_3) aşındırılan EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde tamamen ortadan kalktığı görülmüştür. Başlangıçta bu numunelerde borür tabakasının kırılarak yüzeyden kalkması ve bilya ile ana malzeme arasında aşındırıcı vazifesi görmesi abrasiv aşınmaya neden olurken matrise ulaşan bilyanın kayma etkisi ile de adhesiv aşınma meydana gelmiştir (Şekil 3.47-3.48). Nanobor tozu ile alaşımlandırılan ve daha sert Si_3N_4 bilyalarla aşındırılan numunelerde ise borür tabakasının bölgesel aşınmaya maruz kaldığı, tamamen ortadan kalkmadığı SEM fotoğrafları ile belirlenmiştir (Şekil 3.45-3.46). Bu durum Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelere göre daha yüksek tabaka kalınlığı ve sertliğe sahip olmaları dolayısıyla abrasiv partiküllerin bu sert tabakaya batma derinliğinin düşmesi ile açıklanabilir.

Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin %10 H_2SO_4 asit çözeltisi içerisinde ölçülen korozyon dayanımı değerleri ticari AISI 304 paslanmaz çelik malzemeye göre 4,3 kata kadar daha dayanıklı olduğu belirlenmiştir. Alaşımlandırılan numunelerde 1000 °C’de 4 saat sürede alaşımlandırılan numune hariç birbirine yakın oranlarda kütle kayıpları meydana gelmiştir. 1000 °C’de 4 saat süre ile alaşımlandırılan numune deneyin 3 saatin sonunda kaplama tabakasının tamamen kalmasından dolayı korozyon dayanımı diğer numunelere göre daha düşük olmuştur. Bu durum yüzey alaşımlandırma işlemi sırasında yüksek işlem sıcaklığı ve uzun süre etkisine bağlı olarak mikroyapıda oluşan

çoklu fazların basma ve çekme gerilmeleri sonucunda yüzeyde oluşan kılcal çatlakların altına asit çözeltisinin girerek kaplama tabakasını çözündürmesi sonucunda borür tabakasının dökülmesi olarak yorumlanabilir. Dolayısıyla uzun işlem sıcaklıklarından ve çoklu faz oluşumlarından kaçınılmalıdır. EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin asit ortamındaki korozyon dayanımları Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelere göre daha iyi olmuştur. Bu durum XRD analizlerinde belirlenen EKabor 3 tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan numunelerde FeB fazının ve daha az sayıda faz oluşumu ile açıklanabilir.

Hızlandırılmış korozyon testleri sonucunda yüzey alaşımlandırma işlemine tabi tutulan tüm numunelerin % 40 daha kısa bir sürede paslanmaları, tuzlu su çözeltisi içerisindeki %5'lik tuz'un malzeme yüzeyine 0,7 atm basınç ile püskürtülmesinden dolayı darbe dayanımları düşük olan borür tabakalarında erozif korozyona neden olması ve östenitik paslanmaz çelik yüzeyinde çok ince bir pas tabaka olan, yüzeyi korozitif etkilere karşı pasifleştiren Cr_2O_3 tabakasının, yüzey alaşımlandırma işlemi sonrasında yüzeyde meydana gelen borür tabakalarından dolayı oluşmaması, yüzeyde oluşan borür tabakalarının ise Cr_2O_3 tabakasına göre daha az koruyucu olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

5. ÖNERİLER

Nanobor tozu ile yüzeyi alaşımlandırılan AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerinin borür tabakası mikroyapısı, tabaka kalınlıkları, sertlik, çekme dayanımı, üç nokta eğme dayanımı, kırılma tokluğu, aşınma davranışları ve korozyon dayanımları gibi özellikleri araştırılmış ve Ekabor tozu ile yapılan borlama işlemi ile kıyaslanmıştır. Malzemeler nano boyutlarda farklı özellikler gösterebildiklerinden dolayı çeliklerin nano borür tabakalarının elektrik iletkenliği ve manyetik özellikleri de araştırılabilir. Nanobor tozu ile alaşımlandırılan numunelerin kısa sürelerde elde edilebilen yüksek sertlik değerlerinden, yüksek aşınma dirençlerinden dolayı savunma sanayisi, kesme işlemleri sanayisi ve asit ortamındaki dayanımlarından dolayı da biyomedikal uygulamaları araştırılabilir.

Ekabor tozu ile yapılan uzun süreli borlama işlemlerinde malzemelerde çarpılmalar meydana gelmektedir. Ayrıca süre bakımından Ekabor tozu ile yapılan borlamalar zaman ve enerji kaybına neden olmaktadır. Nanobor tozu kullanılarak yapılacak olan yüzey sertleştirme işlemleri ile daha kısa sürelerde istenilen sertlik değerlerine ulaşılabileceğinden dolayı malzeme, zaman ve enerjiden tasarruf sağlanabilir.

Türkiye’de önemli bor rezervlerinin olması, nano boyutundaki bor tozlarının temininin güç ve maliyetinin yüksek olmasından dolayı bor uç ürünleri elde etme çalışmaları yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Addemir, O.,** 2007. Bor ürünlerinin teknolojileri ve Türkiye'nin durumu. www.maden.org.tr/resimler/ekler/55e31fa43e652cb_ek.pdf, 15 Mart 2008.
- Akbayır, Ö.,** 2005. Borlanmış AISI 1030 çeliğinin bazı özellikleri, Yüksek lisans tezi, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Akay, İ.S.,** 2007. Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan yüzeyişlemlerinin aşınma direncine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Anonim,** Bor Raporu.(2003). TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası.
- Arkun, E.,** 2006. Paslanmaz çelik saclarda şekillendirme karakteristikleri, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Askeland, D.R.,** 2002. Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri cilt 1 Çeviri:Dr. Mehmet ERDOĞAN.
- ASTM B528 – 10.** 2004. Standard test method for transverse rupture strength of metal powder specimens.
- Atik, E.,** 1997. Çeliklerin borlanarak aşınma dayanımlarının artırılması, Mühendis ve makine dergisi, Cilt 38, Sayı 445, 17-20.
- Ayter, T.,** 2005. Borlama işleminin çeliklerin yüzey kalitesi ve aşınma davranışına etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Balın, A.,** 2011. Sıcak presleme tekniğiyle üretilen cocrmo toz alaşımının sinterleme sıcaklığının mikroyapı üzerine etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Baranowska, J., Szczecinski, K. and Wysiecki, M.,** 2001. Cathode sputtering as a pretreatment for gas nitriding, Vacuum, 63, 517-522.

- Bariş, M.,** 2007. Farklı borlama sürelerinin transmisyon çeliğinde abrasiv aşınma davranışlarına etkisinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara.
- Başman, G.,** 1998. GGG 40 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin yorulma davranışına TiN kaplamanın etkisi, Y. Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Başman, G.,** 2010. AISI 316L tipi paslanmaz çeliğin termokimyasal difüzyon yöntemi ile borlanması, borlama banyosu bileşenlerinin borür tabakası özelliklerine etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Baştürk, S., Erten, M.,** 2006. Borlama ile yüzey sertleştirme çalışmaları, Mühendis ve Makine, 47 (563), 57-74.
- Bayça, S.U. ve Şahin, S.,** 2004. Borlama, Mühendis ve Makine, 532, 51-59.
- Baydoğan, M., Başman, G., Mindivan, H., Arısoy, F., Çimenoglu, H., Şeşen, M.K.,** 2003. Çeliklerin Sınıflandırılması, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, İsdemir, İskenderun.
- Bejar, M.A., Moreno, E.,** 2004. Abrasive wear resistance of boronized carbon and low-alloy steels, Journal of Materials Processing Technology, 173, 352–358
- Berzina, I. G., Gusev, E. B., Fedina, G. N., Fedin, V. M.,** 1984. Investigation of boron diffusion during boronizing of engineering steel 45, phys, Met. Metall, 57 (5), 81-84
- Bhushan, B. and Gupta, B.K.,** 1991. Handbook of Tribology, McGraw-Hill, Inc., USA. 1168 p.
- Bindal, C.,** 1991. Az alaşımlı ve karbon çeliklerinde borlama ile yüzeye kaplanan borürlerin bazı özelliklerinin tespiti, Doktora Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Blazon M., Stanojevic B., Veljkovic V.,** 1975. Effect of alloying elements on the formation of boride layer on steel. Scripta Met. 19 (11), 1153-1156.
- Brakman, C.M., Gommers, A.W. J. and Mittemeijer, E.J.,** 1989. Boriding of iron and Fe-C, Fe-Cr, Fe-Ni Alloys: Boride layer kinetics, *J. Materials Research.*, 23, 3061-3066.

- Boylu, K.S., Varol, R., Pek, M.A.,** 2003. Tam yoğun ve T/M çeliklerde karbon miktarının borür tabakası kalınlığına etkisi, TMMOB Makina mühendisleri odası, 2. Makina, tasarım ve imalat teknolojileri kongresi, Bildiriler kitabı, Yayın no: E/2003/327, Konya, 59-67.
- Bozkurt, N.,** 1984. Bor yayınımlı ile çeliklerde yüzey sertleştirme, Doktora Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Campos, I., Ramirez, G., Figueroa, U., Martinez, J., Morales, O.,** 2006. Evaluation of boron Mobility on the phases FeB, Fe₂B and diffusion zone in AISI 1045 and M2 steels, Applied Surface Science, Volume 253, 3469-3475.
- Can, H.,** 2009. Borlanmış AISI L6 Çeliğinde Metalografik ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Carbucicchio, M., and Sambogna, S.,** 1985. Growth of boride coatings on iron, Journal material science. Letter 6, pp. 415-416.
- Chong, Ken P.,** 2004. Nanoscience and engineering in mechanics and materials , Journal of Physics and Chemistry of Solids, 65, 1501-1506.
- Culha, O., Toparli, M., Sahin, S., Aksoy, T.,** 2007. Characterization and determination of Fe_xB layers' mechanical properties, Journal of Materials Processing Technology, 206, 231-240
- Çalık, A.,** 2005a. Termokimyasal borlama yöntemleri ve önemi. 4th International advanced technologies symposium, 839-844, Konya.
- Çalık, A.,** 2005b. Östenitik paslanmaz çeliğin katı ortamda borlama özelliğinin araştırılması. 4th International advanced technologies symposium, 849-852, Konya.
- Çelikyürek, İ.,** 2006. Demir alüminatların borlanması ve aşınma özelliklerinin belirlenmesi, Doktora tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Delikanlı, K., Ulusoy, N., Uzun, H.A.,** 2003. Yüzeyleri borlama ile yüzeyleri sertleştirilen Ç1040 çeliğinin abrasiv aşınma ve korozyona karşı dayanımı, TMMOB Makina mühendisleri odası, 2. Ulusal demir-çelik sempozyumu ve sergisi, Bildiriler kitabı, Yayın no: E/2003/336, Ankara, 59-66.
- Demirci, H.,** 1996. Fe esaslı malzemelerin borlanması ile kavitasyon Dayanımının değişimi, 7. Uluslar arası makine tasarım ve imalat kongresi, 261-269, Ankara.

- Demirel, Ö.R.**, 2007. Askeri malzemelerde nanoteknoloji kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Develi, F.**, 2010. Plazma nitrüleme ve borlama ile çift yüzey işlem uygulanmış AISI 8620 çeliğinin aşınma davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Er, Ü. ve Par, B.**, 2004. Bor yayınımla yüzeyi sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 çeliklerinin abrazif aşınma dayanımlarının incelenmesi, Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 17, 12 s.
- Erdoğan, M.**, 2001. (Çeviri). Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Nobel Yayınları No:1, 234s. Ankara.
- Ersöz, A.**, 2008. Elektrokimyasal borlama ile çeliklerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Ertek, C.**, 2006. Plazma ortamında iyon aşılanmış 304 ve 316 paslanmaz çeliğin korozyon davranışlarının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Eyre, T. S.**, 1975. Effect of boronising on friction and wear of ferrous metals, Wear, 33, 383-397
- Fichtl, W.**, 1974. Über neue erkenntnisse auf dem gebiet oberflächen borierens, HTM, 29 (2), 113-119.
- Fichtl, W.**, 1981. Boronizing and its practical applications, Materials In Engineering , 2, 276-286.
- Fichtl, W., Trausner, N. and Matuschka, A.G.**, 1987. Borieren Mit Ekabor, ESK GmbH.
- Geller, Y.**, 1978. Tool Steels, Mir Publishers, pp. 666 Moscow.
- Genel, K., Özbek, İ. and Bindal, C.**, 2002. Kinetics of boriding of AISI W1 steel, Materials Science Engineering, A 347, 311-314
- Guozhong, C.**, 2004. Nanostructures and nanomaterial, February 13, 2006, World scientific publishing company inc., Singapore, <http://site.ebrary.com/lib/deulibrary/Doc?id=10088361&ppg=7>

- Gök, M.S.,** 2008. Düşük ve orta karbonlu çeliklerin yüzeyine tıg kaynak metoduyla kaplanan östenitik paslanmaz çelik tozunun aşınma direncine karbür içeriğinin etkisinin araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Gürkan, M.,** 2007. Östenitik ve martensitik paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklık aşınma davranışları, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Hunger, H. J., Lobig, G.,** 1997. Generation of boride layers on steel and nickel alloys by plasma activation of boron trifluoride, Thin Solid Films, 310, 244 - 250.
- Hutchings, I.M.,** 1992, Surface engineering in tribology, chapter 8, In: Tribology: Friction and wear of engineering materials, Edward Arnold Pub., London, 273 p.
- Irmak, P.,** 2006. Türkiye’ de bor madeni ve ekonomik incelemesi. Eskişehir-Kırka işletmesi örneği. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir.
- Karagöz, Ş., Ünal, H.İ., Kahrıman. F., ve Demircan F.G.,** 2009. Çeliklerde segregasyon ve etkileri, 5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs 2009, Karabük.
- Karakan, M., A. Alsaran ve A. Çelik,** 2002. Plazma borlama, Mühendis ve Makine, 43,512, 51-54.
- Karamış, M.B, Nair, F, Selçuk, B.** 1995. Borlanmış malzemelerin tribolojik özellikleri, 6. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiri Kitabı S:446-454.
- Kayalı, E.S., Eruslu, N., Ürgen, M., Taptık, Y., Çimenoglu, H.,** 1997. Hasar Analizi Seminer Notları, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 07-11 Nisan, İstanbul.
- Kayalı, Y.,** 2006. Bor temperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri ve aşınma davranışlarının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Kayır, Z.,** 2006. Türkiye paslanmaz çelik üretebilir mi? KOSGEB Ankara. www.metalurji.org.tr/dergidergi136d136_3038.pdf, 12 Nisan 2011.
- Korkut, M. H.,** 1997. Ferritik paslanmaz çeliklerin mikroyapısı ve aşınması üzerine karbür yapıcı elementlerin etkilerinin araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- Kosel, T.H., Fiore, N.F., Coype, J. P.,** 1978. Corrosion-Erosion behavior of materials, Metalurgical Society of ASM 1990, Missori, U.S.A.
- Köhler, M. Fritzsche, W.,** 2004. Nanotechnology: An introduction to nanostructuring techniques, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Küper, A., Qiao, X., Stock, H. R.,** 2000. A novel approach to gas boronizing, Surface and Coatings Technology, 130 ,87-94.
- Linial, A., Lavella, V.,** 1974. New proseses for obtaining increased metal hardness and reduce friction properties by boronizing-I, Industrial Heating.
- Lu, M.J.,** 1983. Die bildungs-und wachstums kinetik mono phasiger boridhschichten. HTM 1983;38(4):156-168.
- Martini, C.,Palombarini, G., Poli, G., Prandstraller, D.,** 2003. Sliding and abrasive wear behaviour of boride coatings, Wear, 256, 608-613.
- Matuschka, A.G.,** 1980. Boronizing, Carl Hanser Verlag, München.
- Melendez, E., Campos, I. Rocha, E. Baron, M.A.,** 1997. Materials Science & Engineering, A234-236, 900-903.
- Meriç, C., ve Şahin, S.,** 2002. Investigation of Effect on Boride Layer of Powder Particle Size in Boronizing with Solid -Yielding Sunbtances, Materials Research Bulletin, 35, 2165 - 2172.
- Moore, M. A.,** 1974. A rewiev of two-body abrasiv wear?, Wear, 27, 1-7.
- Odabaş, C.,** 2002. Paslanmaz çelikler,temel özellikleri, kullanım alanları, kaynak yöntemleri, 1. Baskı Askaynak, Eczacıbaşı.
- Okamoto H,** 2004. Supplemental literature review, Section 3; Journal of phase equilibria and diffusion vol. 25, 3.
- Özbek, İ.,** 1999. Borlama yöntemi ile (AISI M50, AISI M2) yüksek hız çeliklerinin ve AISI W1 çeliğinin yüzey performanslarının geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya.
- Özbek, İ. and Bindal, C.,** 2001. Mechanicalproperties of boronized AISI W4 steel, SurfaceandCoatingsTechnology, 172, 14-20.

- Özbek, İ., Konduk, B. A., Bindal, C. A., Üçışık, A.H.,** 2002. Characterization of borided AISI 316L stainless steel implant, Vacuum 65, 521-523.
- Özbek, İ., Şen, S., İpek, M., Bindal, C., Zeytin, S. Ve Üçışık, A.H.,** 2004. A mechanical aspect of borides formed on the AISI 440C stainless-steel, Vacuum, 73C: 643–648.
- Özdemir, Ö., Usta, M., Bindal, C., Üçışık, A.H.,** 2006. Hard iron boride (Fe_2B) on 99.97 wt. % pure iron, Applied Surface Science, 255, 2596–2602.
- Özdemir, O. Omar, M.A. Usta, M. Zeytin, S. Bindal, C. ve Ucisik, A.H.,** 2009. An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel, Vacuum, 83, 175-179.
- Özer , M.,** 2011. Üç farklı çeliğe katı borlama işlemi yapılmasının içyapı ve sertlik üzerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- Özkazanç, H.,** 2006. Metallerin korozyonu ve korozyondan korunma yöntemleri, Yüksek Lisans Semineri, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmit.
- Özmen, T.,** 2007. Katı ortamda borlanmış dökme demirin borür tabakası büyüme kinetiği ve aşınma özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Özsoy, A.,** 1996. Çeliğin borlanması borür tabakası, geçiş zonu ve ana matriks özelliklerinin iyileştirilmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bil. Enstitüsü, Eskişehir.
- Ramnarayan, C.,** 2004. Advanced thermally assisted surface engineering processes, Kluwer academic publishers, Hingham, USA.
- Rile, M.,** 1974. Reasons for the formation of cracks in boride coatings on steel, Met. Sci. Heat Treat., 16:836-839.
- Roskill,** 1999. The Economics of Boron, Roskill Information Services Ltd, London England.
- Selçuk, B., İpek, R., Karamis, M.B.,** 2003. A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels, Journal of materials processing technology, C:141, pp. 189–196.

- Selçuk, B., İpek, R. And Karamış, M. B.,** 2003. A study on friction and wear behaviour of carburized, carbonitrided and borided AISI 1020 and 5115 steels, Journal of Materials Processing Technology, Volume 141, Issue 2, 189-196.
- Sighnal, S.C.,** 1977. A hard diffusion boride coating for ferrous materials, Thin Solid Films, 45, 321-329.
- Sinha, A.K.,** 1991. Boriding (Boronizing), ASM Handbook, J. Heat Treating, Ohio, USA., 4, 437-447.
- Soncu, M.,** 2008. G-X10CrNiMoNb 18-10 östenitik paslanmaz çeliğin asidik çözeiltilerdeki korozyon özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Soydan, Y.,** 1996. Katı ortamda bor yayınımları ile sertleştirilen çelik yüzeylerinin kuru kayma halinde sürtünme ve aşınma davranışları, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Subrahmanyam J.,Gopinath K.,** 1984. Wear Studies on Boronized Mild Steel, Wear, 95 , 287-292.
- Suryanarayana, C., and Koch C.C.,** 1999. Non-equilibrium processing of materials, January 20, 2006, Elsevier science, New york, USA, <http://site.ebrary.com/lib/deulibrary/Doc?id=10041463&page=313-343>.
- Sümer, G.,** 2004. Bor bileşikleri uluslararası bor sempozyumu, Eskişehir. 16-18 Eylül, s 153-164.
- Şahin, S.,** 2008. Effects of boronizing process on the surface roughness and dimensions of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 2714, Journal of Materials Processing Technology, 209,1736-1741
- Şen, U.,** 1997. Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri, İ.T.Ü, FBE, İstanbul.
- Şen, Ş., Bindal, C.,** 1997. AISI 8620 sementasyon çeliğinin bor kaplanması , 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı, İstanbul, 11-15 Haziran 1997.
- Şen, Ş.,** 1998. Termokimyasal borlama işlemiyle AISI 5140, AISI 4140 ve AISI 4340 çeliklerinin yüzey performansının geliştirilmesi, Doktora Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- Şen, Ş.,Özbek, İ., Şen, U., Bindal, C.,** 2000. Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel, *Surface and Coatings Technology*, 135, 173-177.
- Şen, Ş. Özbek, İ. Sen, U. ve Bindal, C.,** 2001. Mechanical behavior of borides formed on borided cold work tool steel, , *Surface and Coat. Technol.* Vol. 135, 173-177.
- Şen, Ş., Şen, U. ve Bindal, C.,** 2004. An Approach to Kinetic Study of Borided Steels, *Surface & Coatings Technology*.
- Şimşek, M.,** 2005. İçten yanmalı motorlarda borlama ile mukavemet özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Tabur, M., İzciler, M., Gül, F., Karacan, İ.,** 2009. Abrasive wear behavior of boronized AISI 8620 steel, *Wear*.
- Taktak, Ş.,** 2006. Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels, *Materials and Design*, 28, 1836–1843.
- Taktak, Ş.,** 2006. Tribological behaviour of borided bearing steels at elevated temperatures, *Surface and Coatings Technology*, 201, 2230-2239.
- Takeuchi, E., Fujii, K., Katagiri, T.,** 1979. Sliding wear characteristics of gas boronized steel, *Wear*, 55, 121-130.
- Taşçı, A.,** 1993. Borlanmış çeliklerin aşınma ve korozyon dayanımları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Tjong, S.C., and Chen H.,** 2004. Nanocrystalline materials and coatings, *Materials science and engineering R* 45, 1-88, April 4, 2006, Elsevier Science, New york, USA, from Elsevier science database.
- Tsipas, D. N., Rus, j.,** 1987. Boronizing of alloy steels, *J. Materials Science Letters*, 6, 118-120.
- Turhal, A.,** 2008. Borlamanın paslanmaz çeliğin radyasyon zırhlama özelliğine etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- TÜBİTAK.,** 1994. Vizyon 2023 Projesi, Nanoteknoloji Strateji Grubu. “Nanobilim ve Nanoteknoloji Stratejileri”, 3 Mart 2006, Tübitak, Ankara.
- Tülbentçi, K.,** 1985. Paslanmaz çeliklerin kaynağı, *Kaynak Dünyası*, Sayı: 11, 17-18.

- Türkyılmazoğlu, A.**, 2006. Dupleks, martenzitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Uluköy, A.**, 2005. 21NiCrMo2 (AISI 8620) çeliğinden yapılmış dişli çarklara karbürleme ile beraber borlama işleminin uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Uluköy, A., Can, A.Ç.**, 2006. Çeliklerin borlanması, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12 (2), 189-198.
- Ulutan, M.**, 2007. AISI 4140 çeliğinin yüzey sertleştirme işlemleri ve kaplama yöntemleri sonrası mekanik davranışlarının araştırılması, Doktora tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Uslu, İ.**, 2004. AISI 1040 ve AISI P20 kalıp çeliklerinin borlama kinetiği, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Celebi, F.G., Özdemir, O., Bindal, C.**, 2006. A comparison of borides formed on AISI 1040 and AISI P20 steels, Materials and Design, Volume 28, 1819-1826.
- Uzun, H.A.**, 2002. Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Üneri, S.**, 1998. Korozyon ve Önlenmesi, Korozyon Derneği-ANKARA, 1-32, 129-164.
- Wang, X.Y., and Li, D.Y.**, 2003. Mechanical, electrochemical and tribological properties of Nano-crystalline surface of 304 Stainless Steel, Wear 255, 836-845, February 10, 2006, from Elsevier database.
- Yağcı, M. A.**, 2009. Borlanmış AISI M2 çeliğinin metalografik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Yapar, U., Başman, G., Arısoy, C.F., Şeşen, M.K.**, 2002. Çeliklerde borlama yoluyla yüzey sertleştirme, Metal Dünyası, 115, 69-74.
- Yapar, U.**, 2003. Düşük ve orta karbonlu çeliklerin termokimyasal borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, Y. Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yıldızlı, K., Odabaş, D., Nair, F., 2002. Borlanmış AISI 1020 çeliğinin eroziv aşınma davranışının incelenmesi, BAÜ Fen Bil. Enst. Derg. 5.1, syf 130-140, Balıkesir.

Yıldızlı, K., 2002. Borlamanın çeliklerde eroziv aşınma davranışına olan etkilerinin deneysel olarak incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Yoon, J. H., Jee, Y. K., Lee, S. Y., 1999. Plasma Paste Boronizing Treatment of the Stainless Steel AISI 304, Surface and Coatings Technology, 112, 71 - 75.

Yorulmazel, C.S., 2007. Paslanmaz çelik konstrüksiyonlarda oluşan distorsyonların etüdü, Yüksek Lisans Tezi, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

İnternet Kaynakları

URL-1, www.fp7.org.tr/sis/. 15 Mart 2011.

URL-2 , www.boren.gov.tr/icerik.php?id=53. 11 Mart 2011.

URL-3, www.saritas.com.tr/ktlg/pdf/Paslanmaz%20Celik%20Saritas%2002.pdf. 10 Mart 2011.

URL-4, www.nabond.com/Metal_Alloy_nanoparticles.htm. 10 Şubat 2011.

URL-5, www.gordonengland.co.uk/hardness/vickers.htm. 10 Nisan 2011.

URL-6, <http://tr.wikipedia.org/wiki/Triboloji> 10 Nisan 2011.

URL-7, www.hun.pamukkale.edu.tr/ders_notlari/malzeme_bilgisi/Malzeme_ders5_sertlik, 8 Mart 2011.

URL-8, www.nsne.itu.edu.tr/g_yatirim.htm 10 Nisan 2011

URL-9, www.atillafiliz.com/makale.php?id=35 10 Nisan 2011.

URL-10, www://sites.ieee.org/sb-baskent/files/2011/12/edergi.pdf 29 Mart 2012.

URL-11, www://tr.wikipedia.org/wiki/Nanoteknoloji 29 Mart 2012.

ÖZGEÇMİŞ

24.08.1981 Antakya doğumlu ve Avsuyu beldesi nüfusuna kayıtlıdır. İlk ve Orta öğrenimini Antakya’da tamamladı. 2000 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Metal Öğretmenliği Bölümü’ne kayıt yaptırdı ve Haziran 2004 yılında lisans eğitimini tamamladı. Eylül 2004 yılında Rize-Çayeli Barbaros Teknik ve E.M.L’ye Metal Teknolojileri öğretmeni, 2008 yılında aynı okula müdür yardımcısı olarak atandı. 2005 yılında Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı’nda doğrudan doktora öğrenimine başladı ve halen devam etmektedir. Kendisi evli ve iki çocuk babasıdır.