

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ST52 ÇELİĞİNİN TUZ BANYOSU BORLAMA YÖNTEMİ
İLE BORLANABİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Tezi Hazırlayan
Gamze GÜLER**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Bülent KURT**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Aralık 2021
NEVŞEHİR**

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ST52 ÇELİĞİNİN TUZ BANYOSU BORLAMA YÖNTEMİ
İLE BORLANABİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Tezi Hazırlayan
Gamze GÜLER**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Bülent KURT**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Aralık 2021
NEVŞEHİR**

Prof. Dr. Bülent KURT danışmanlığında **Gamze GÜLER** tarafından hazırlanan "**St52 Çeliğinin Tuz Banyosu Borlama Yöntemi İle Borlanabilirliğinin Araştırılması**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, **Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında, Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

...../...../2021

JÜRİ

Başkan : Doç. Dr. Ali GÜNEN

Üye (Danışman) : Prof. Dr. Bülent KURT

Üye : Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun.....tarih ve.....sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.... /.../2021

Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Şahlan ÖZTÜRK

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Gamze GÜLER



TEŞEKKÜR

Lisans eğitimimden itibaren, yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince tüm bilgilerimi benimle paylaşmaktan kaçınmayan, her türlü konuda desteğini benden esirgemeyen, değerli zamanını bana esirgemedен айран ve tezimde büyük emeği olan, aynı zamanda kişilik olarak da bana çok şey katan benden desteğini hiç esirgemeyen Sayın Hocam Prof. Dr. Bülent KURT'a

Eğitim hayatım boyunca benden maddi manevi desteğini esirgemeyen her zaman yanımda olan AİLEME ve değerli arkadaşlarım Çevre Mühendisi, Selen LALE, Aylin TAŐ, Rabia YIRTICI'ya

Yine lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca benden desteğini ve bilgilerimi esirgemeyen değerli hocalarım Doç. Dr. Cemal ÇARBOĞA, Doç. Dr. Zahide Bayer ÖZTÜRК, Dr. Öğr. Üyesi Nilüfer KÜÇÜKDEVECİ ve Arş. Gör. Serkan DAL'a teşekkür ederim.

ST52 ÇELİĞİNİN TUZ BANYOSU BORLAMA YÖNTEMİ İLE BORLANABİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Gamze GÜLER

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Kasım 2021

ÖZET

Bu çalışmada, St52 çeliğinin tuz banyosu borlama yöntemi kullanılarak borlanabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, farklı sıcaklık zaman parametrelerinde boraks ve Al tozundan oluşan tuz banyosu oluşturulmuş ve numuneler farklı sıcaklık ve sürelerde tuz banyosu içerisinde borlanmıştır. Borlama işlemi sonucu elde edilen borür tabakaların mikroyapısal ve karakteristik özelliklerinin (tabaka kalınlığı, borür tabakasında elementlerin dağılımı borür tabakasının mikrodertlik değerleri vb.) belirlenmesi amacıyla borlanmış numunelerin kesit yüzeyleri optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektrometresi (EDS nokta ve haritalama) ile incelenmiş ve mikrosertlik testine tabi tutulmuştur. Böylece St52 çeliğinin tuz banyosu borlama işlemine farklı sıcaklık ve süre parametrelerinin etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak, St52 çeliğinin tuz banyosu yöntemi ile yapılan borlama işleminde sıcaklığın ve bekleme süresinin artması ile birlikte kaplama kalınlığı da artmıştır. Mikroyapı analizlerinden kaplama tabakasının yüzeyde homojen olarak meydana geldiği, kaplama tabakası üzerinden alınan noktasal EDS analizleri ve kaplama tabakası yüzeyinden alınan XRD analiziyle yüzeyde meydana gelen tabakanın Fe₂B tabakası olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Aynı zamanda kaplama tabakası kesitinden alınan mapping analiziyle kaplama tabakası ve ana malzeme elementer dağılımı tespit edilmiştir.

***Anahtar Kelimeler:* Borlama, TRD, St52 çeliği**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent KURT

Sayfa Adedi: 68

INVESTIGATION OF THE BORONABILITY OF ST52 STEEL BY SALT BATH BORONING METHOD

(Master Thesis)

Gamze GULER

NEVSEHIR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCES

November 2021

ABSTRACT

In this study, the boronability of St52 steel was investigated using the salt bath boriding method. For this purpose, a salt bath consisting of borax and Al powder was formed at different temperature and time parameters, and the samples were boronized in a salt bath at different temperatures and times. Microstructure and microelectrity analyses were performed after the boronization process. In order to determine the microstructural and characteristic properties (layer thickness, distribution of elements in the boride layer, micro-hardness values of the boride layer, etc.) of the boride layers obtained as a result of the boronizing process, the cross-sectional surfaces of the boronized samples were examined using optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), energy distribution spectroscopy (EDS point and mapping) and subjected to microhardness testing. Thus, the effects of different temperature and time parameters on the salt bath boriding process of St52 steel have been investigated. As a result, the coating thickness increased along with the increase in temperature and waiting time during the boriding process of St52 steel by the salt bath method. From the microstructure analysis, it was concluded that the coating layer on the surface is Fe₂B layer by point EDS analysis taken from the coating layer and XRD analysis taken from the coating layer surface that the coating layer occurs homogeneously on the surface. At the same time, the elemental distribution of the coating layer and the main material was determined by the mapping analysis taken from the coating layer cross section.

Keywords: *Boring, TRD, St52 steel*

Thesis Advisor: Prof. Dr. Bulent KURT

Number of Pages:68

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
RESİMLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	6
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	6
2.1 Borlama.....	6
2.1.1 Borür Tabakanın Yapısı	7
2.1.2Borlama İşleminin Avantajları.....	8
2.1.3Borlama İşleminin Dezavantajları.....	8
2.2 Borlama Yöntemleri.....	8
2.2.1Katı ortamda borlama işlemi.....	8
2.2.2Sıvı Ortamda Borlama İşlemi.....	9
2.2.3Gaz ortamda borlama işlemi	10
2.2.4Pasta borlama işlemi	10
2.2.5Plazma ortamda borlama işlemi	10
2.3 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları.....	10

2.4 Tuz Banyosu TRD Yöntemi.....	11
2.4.1Termoreaktif Difüzyon Elementi; Titanyum	14
2.4.2Termoreaktif Difüzyon Elementi; Bor	17
2.5 Genel Yapı Çelikleri	19
2.5.1 St52 Genel Yapı Çeliği	22
BÖLÜM 3	23
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	23
3.1 Giriş.....	23
3.2 Tuz Banyosu Borlama Yöntemi İle Borlanacak Ana Malzemenin Hazırlanması	23
3.3 Tuz Banyosunun Oluşturulması.....	23
3.4 Kullanılan Ekipmanlar	23
3.5 Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	24
3.6 Tuz Banyosunun Hazırlanması ve Kaplama İşlemi	26
3.7 Tuz Banyosunda Borlanan Numunelerin Mikroyapı İçin Hazırlanması.....	27
3.8.2 Tuz Banyosunda Borlanan Numunelerin Mikro Sertlik Analizi.....	28
3.8.3 Tuz Banyosunda Borlanan Numunelerin SEM, EDS ve Mapping Analizlerin İncelenmesi	29
BÖLÜM 4	31
DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA	31
4.1. Giriş.....	31
4.2 Optik Mikro Yapı Analiz Sonuçları.....	31
4.2 Borlanan Numunelerin SEM, EDS ve Mapping Analiz Sonuçları	36
4.2.1 Borlanan Numunelerin SEM Analiz Sonuçları.....	36
4.2.2 Borlanan Numunelerin EDS Analiz Sonuçları	41
4.2.3 Borlanan Numunelerin Mapping Analiz Sonuçları.....	51
4.3. Borlanan Numunelerin XRD Analiz Sonuçları.....	60
4.4 Borlanan Numunelerin Sertlik Analiz Sonuçları	60

BÖLÜM 5	62
GENEL DEĞERLENDİRME ve SONUÇLAR	62
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ	68



TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Titanyum Karbürün Özellikleri	15
Tablo 2.2 Bor Özellikleri	17
Tablo 3.1 St52 Çeliği Kimyasal Bileşeni	23
Tablo 4.1. Borür Tabaka Kalınlığı	36



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Katı ortamda borlama işleminin şematik görünümü	9
Şekil 2.2 TRD prosesinin akım şemasının şematik gösterimi.	13
Şekil 2.3 TRD Prosesinde İşlem Sırası	16
Şekil 4.1. 1000°C’de 2 Saat Süreyle Borlanan Numunenin XRD Analiz Sonucu.....	60
Şekil 4.2. Sertlik Analizi Sonucu	61



RESİMLER LİSTESİ

Resim 2.1 .Borür tabakası çeşitleri	7
Resim 2.2. St52 Yapı Çeliği.....	22
Resim 3.1. Tuz Banyosunda TRD Yönteminde Kullanılacak Paslanmaz Çelik Pota	24
Resim 3.2. Isıl İşlem Fırını.....	24
Resim 3.3. Hassas Manuel Numune Kesme Cihazı.....	25
Resim 3.4. Manuel Zımpara ve Parlatma Cihazı	25
Resim 3.5. Kaplama için Hazırlanan Numuneler.....	26
Resim3.6. Ergimiş Tuz Banyosu.....	26
Resim 3.7. Bakalite Alma Cihazı.....	27
Resim 3.8. Mikrotest Marka Yarı Otomatik Zımpara ve Parlatma Cihazı	28
Resim 3.9.Nikon Marka Optik Mikroskop	28
Resim 3.10. Future Tech FM-700 Marka Sertlik Cihazı	29
Resim 3.11. SEM, EDS ve Mapping Cihazı.....	30
Resim 4.1. 1000 0C'lik sıcaklıkta 2 (a), 4 (b) ve 6 (c) saat sürelerde borlanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.....	32
Resim 4.2. 1050 0C'lik sıcaklıkta 2 (d), 4 (e) ve 6 (f) saat sürelerde borlanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.....	34
Resim 4.3. 1100 ⁰ C'lik sıcaklıkta 2 (g), 4 (h) ve 6 (ı) saat sürelerde borlanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları.....	35
Resim 4.4. 1000 °C de 2 saat borlama Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S1).....	37
Resim 4.5. 1000°Cde 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S2) .	37
Resim 4.6. 1000 °C de 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S3)	38
Resim 4.7. 1050°Cde 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S4) .	38

Resim 4.8. 1050 °C de 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S5)	39
Resim 4.9. 1050 °Cde 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S6)	39
Resim 4.10. 1100°Cde 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S7)	40
Resim 4.11.1100 °C de 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S8)	40
Resim 4.12. 1100 °C de 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S9)	41
Resim 4.13.1000 °C de 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S1)	42
Resim 4.14. 1000 °Cde 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S2)	43
Resim 4.15. 1000 °Cde 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S3)	44
Resim 4.16. 1050°C de 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S4)	45
Resim 4.17. 1050°C de 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S5)	46
Resim 4.18. 1050°C'lik sıcaklık 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S6)	47
Resim 4.19. 1100°C'lik sıcaklık 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S7)	48
Resim 4.20. 1100°C'lik sıcaklık 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S8)	49
Resim 4.21. 1100°C'lik sıcaklık 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S9)	50
Resim 4.22. 1000 °C de 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S1)	51

Resim 4.23. 1000 °C de 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S2).....	52
Resim 4.24. 1000 °C de 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S3).....	53
Resim 4.25. 1050 °C de 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S4).....	54
Resim 4.26. 1050 °C de 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S5).....	55
Resim 4.27. 1050 °C de 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S6).....	56
Resim 4.28. 1100 °C de 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S7).....	57
Resim 4.29. 1100 °C de 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S8).....	58
Resim 4.30. 1100 °C de 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S9).....	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

TRD : termoreaktif difüzyon prosesi

SEM :taramalı elektron mikroskobu

% :santigrat derece

HV :Vickers sertliği

B :bor

Fe :demir

O :oksijen

mm :milimetre

SiC :silisyum karbür

Na₂B₄O₇ :ergimiş boraks

µm :mikron

B :bor

TiN :titanyum nitrür

TiC :titanyum karbür

TiB :titanyum borür

TiB₂ :Titanyum diborür

YMK :yüzey merkezli kübik

g/mol :gram/mol

g/cm³ :gram/santimetre küp

P :fosfor

N :azot

Mn :mangan

Si :silisyum

C :bakır

S: kükürt

BF₃ :bortriflorid

BCl₃ :bortriklordi

BBr₃ :bortribromid

(CH₃)₃B :trimetilborür

$(C_2H_5)_3B$:trietylborür

(B_2H_6) :diboran



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Çoğunlukla mühendislik alanında kullanılan malzemelerin beklenen dayanıklılığa sahip olması ve uygulanan yükleri taşıması gerekir. Bu özellikler malzemenin kendisi ile ilgilidir. Ayrıca, malzemeleri verimli olarak kullanabilmek için gerekli bazı yüzey özelliklerini de taşımalarıdır [1].

Gelişen teknolojiyle beraber gerek kullanım yerinden dolayı istenen özellikler ve gerekse düşük maliyet gibi nedenlerden dolayı artan isteklere cevap vermek için malzemeni tamamen değiştirmek yerine malzemenin kısmen ve yalnızca gerekli olan yerlerinde değişiklik yaparak hem istenen mukavemet özellikleri hem de daha düşük maliyetli malzeme elde etme yöntemleri olan kaplama ve yüzey işlemleri gelmektedir [2].

Yüzey kaplama yöntemleri genelde iki grup halinde düşünülmelidir: Bunlardan birincisi, yüzey modifikasyon işlemleridir. Bir malzeme yüzeyine başka bir malzemenin difüzyonu ile yüzeyde bileşik bir tabaka oluşturma esasıdır. Nitürleme, sementasyon, borlama, karbürleme bu işleme örnek verilebilir. İkinci teknik ise, yüzey kaplamadır. Bir malzeme yüzeyine başka bir malzemenin katılması ya da çöktürülmesidir [3].

Yüzey kaplama tekniklerinden en bilineni ve en çok kullanılanı borlama işlemidir (Er ve Par, 2004). Bu işlem, bor atomlarının malzemenin yüzeyine yayılımı ile malzeme yüzeyinin güçlendirildiği bir termokimyasal yüzey sertleştirme işlemi olarak bilinir. Borlama işlemi, özellikle sertlik, aşınma direnci ve korozyon direncini artırmak için kullanılan bir yöntemdir. Demir esaslı alaşımlara ve her tür çelik malzemelere uygulanabilmektedir. İşlem, genellikle 700-1000°C sıcaklık aralığında ve 1-12 saat süre ile borlama ortamlarında gerçekleştirilmektedir (Alpaslan, 2011). Borlama işlemi katı, sıvı, gaz, plazma ve iyon implantasyonu gibi yöntemlerle yapılmaktadır [3].

Çelik malzemeler genellikle sertleştirildikten sonra kullanılmaktadırlar. Ancak ağır bir şekilde aşınmaya maruz kalan parçalar için bu sertlik değeri yeterli değildir. Makinelerde çıkan arızaların ve yapı elemanlarının kullanım dışı kalmasının en önemli sebeplerinde birisi aşınmadır aşınma tekrar geriye kazanılamayan bir madde kaybı sebebidir. Aşınmaya karşı dayanımın, istendiği durumlarda sertliğin de yüksek olması gerekmektedir. Bunun için termoreaktif difüzyon prosesi (TRD) olarak adlandırılan

difüzyonel işlem ile çelik yüzeylerinde ince film şeklinde aşınmaya, oksidasyona, korozyona karşı dayanıklı, çok düşük sürtünme katsayısı ile yüksek sertlik değerine sahip seramik esaslı kaplama tabakaları oluşturulmaktadır [4-5].

TRD kaplama yöntemi aslında bir termokimyasal işlemdir. Ancak alışılmış termokimyasal işlemlerden biraz farklıdır. Kaplama yönteminde çelik altlıktaki karbon ve azot yüksek sıcaklıkta (800 - 1250 °C) yüzeye difüze olarak titanyum, vanadyum, niobyum, tantalyum, krom, molibden ya da tungsten gibi kuvvetli karbür ve nitrür yapıcı refrakter geçiş metalleri ile birleşerek çelik yüzeyinde yoğun, gözeneksiz ve ana metale sıkı bir şekilde bağlanmış kaplama tabakası oluşturur. Geleneksel yöntemlerin aksine oluşan kaplama tabakası altlık yüzeyinde gelişir. Altlık malzeme ile kaplama tabakası arasında belirgin bir sınır vardır. Ancak, işlem yüksek sıcaklıkta gerçekleştirildiği için karbür yapıcı elementlerin ana metal içine yayılımı söz konusudur. Bu da metalurjik olarak bağlı bir yapı oluşturmaktadır [6].

D. Fernandez -Valdes ve arkadaşları AISI 316L borlanmış çelikler döngüsel temas yüklemesi altında değerlendirmişlerdir. Borlama, iki toz paketleme işlemiyle gerçekleştirilmiştir. Bunlar; sürekli ve kesintili işlemler. Borlama işlemleri 900 °C'de 1 saat (sürekli işlem) ve 4 saat (kesintili işlem) için geliştirilmiştir. 6.09 µm kalınlığında ve 22.3 GPa yüzey sertliğinde kesintili borlama ile esas olarak Fe₂B'den oluşan bir tek tabaka elde etmişlerdir. Buna karşılık, bir FeB-Fe₂B çift tabakası toplam kalınlığı 13.08 µm ve yüzey sertliği 26.3 GPa olan sürekli borlama ile oluşturulmuştur [7].

SA Rosas-Melendez ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada karbon nanomalzemeler (CN'ler), borlanmış AISI O1 çeliği üzerine kimyasal buhar biriktirme yoluyla biriktirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu ve X-ışını kırınımı ile karakterize edilen tortu, karbon nanotüpler gibi CN'lerin yanı sıra sementit ve amorf karbon sunar. Kuru koşullar altında sürtünme ve aşınmanın tribolojik etkileri, bir tungsten karbür (CW) bilyeli ve pürüzlülük ölçerli bir disk üzerinde bilye ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, CN'li numune için sürtünme katsayısının önemli ölçüde azaldığını ve ~ 0.24'e sabitlendiğini göstermektedir. Ayrıca, CN'lerin borlanmış çeliğin yüzeyinin aşınmasını önleyen koruyucu bir kaplama görevi gördüğü sonucuna varılmıştır [8].

D. Fernandez-Valdes ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, bir AISI 316L çeliğinin yüzeyinde oluşan demir borür tabakalarının kayma aşınma direncinin sayısal-deneysel

bir değerlendirmesi geliştirmişlerdir. Borlama işlemi, 2 saat ve 6 saat maruz kalma sũresi boyunca 900 °C sıcaklıkta geręekleřtirilmiřtir. Pim-on-disk testleri borlu olmayan ve borlanmış AISI 316L ęelikler ũzerinde geręekleřtirilmiřtir. Deneysel sonuçlar, borlamanın, borlamasız malzemeye kıyasla AISI 316L ęelięinin aşınma direncine ˆnemli ˆlęũde katkıda bulunduğunu gˆstermiřtir. Ayrıca ince borũr tabakası kalınlığı daha şiddetli aşınma mekanizmaları geliştirmiştir. Son olarak, sonlu elemanlar yˆntemi (FEM) kullanılarak aşınma testi sırasında tabaka/alt tabaka sistemlerinde ũretilen asal gerilmeler ve maksimum kayma gerilmesi değerlendirilmiştir [9].

LA Arteaga-Hernandez ve arkadaşları yaptıkları ęalıřmada bir AISI 316L ũzerinde sentezlenen borũr tabakalarının tribolojik performansını incelemişlerdir. Her bir sıcaklık için 2, 4 ve 6 saat boyunca 850, 950 ve 1050 °C'de difũzyonel borlama işlemleri geręekleřtirilmiřtir. Yũzeyler, taramalı elektron mikroskobu, X-ışını kırınımı, mikro ve nano-sertlik testi ve pũrũzlũlũk ˆlęũmleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Tribolojik tepki, 10 km'lik bir mesafe ile kuru kayma koşulları altında bir bilye ũzerinde disk tribometresi aracılığıyla , sũrtũnme katsayısı , kũtle kaybı, aşınma oranı ve yũzey hasarı izlenerek incelenmiştir. Tũm borlanmış koşullar, işlem gˆrmemiř numunelere kıyasla aşınma oranını azaltmıştır. Borlanmış yũzeyler arasındaki aşınma performansındaki farklılıklar bu yazıda ayrıntılı olarak tartışılmıştır [10].

EJ Hernandez-Ramerez ve arkadaşları yaptıkları ęalıřmada farklı kayma altında top-dũz lineer ileri geri aşınma testleri ile değerlendirilen toz paket borlama işlemine (PPBP) ve difũzyon tavlama işlemine (DAP) maruz kalan AISI 1018 ęelięinin aşınma davranışı ũzerine yeni sonuçlar elde etmişlerdir. Vickers mikrosertlik karakterizasyonu da yapmışlardır. DAP'den sonra, malzemenin yũzeyindeki ęekmeden basmalı artık gerilmelere bir değişiklik ve ayrıca aşınma ve kırılma direncinde iki kat artış bulunmuştur [11].

A. Ruiz-Rios ve arkadaşları ęalıřmada havacılık endũstrisinde kullanılan X12CrNiMoV12-3 paslanmaz ęelik, borlanmış ve partikũl erozyonuna karşı direnci ile karakterize etmişlerdir. 6 saat maruz kalma ile 950 °C'de geliştirilen borũr tabakasının performansı, SiO₂ partikũlleri kullanılarak iki sıcaklık ve ũç ęarpma ağısında değerlendirilmiştir. Sonuçlar, tũm deney koşulları için, 30° ęarpma ağısı için 400°C'de kũtle kaybının sıfır olduğu yũzeyde borũr tabakasının varlığı için erozyon direncinin arttığını gˆstermiřtir. Işlem gˆrmemiř paslanmaz ęelikte kesme ve ęukurlařma ile

karşılaştırıldığında, borlanmış yüzeyde erozyon çatlama mekanizması ortaya çıkmıştır [12].

J. Escobar-Hernández ve arkadaşları çalışmalarında, H13 çeliği üzerinde oluşan borür ve nitrür tabakaları, döngüsel küresel kontaklarla değerlendirmişlerdir. Borlama 800 °C'de 1 ve 5 saat ve nitrüleme 580 °C'de 1 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Döngüsel testlerde, daha kalın borür tabakası, mekanik özelliklerine atfedilen daha büyük çatlama ve orta derecede parçalanma göstermiş, daha ince tabaka daha iyi bir SCF direnci sergilemiştir. Nitrüleme ile ilgili olarak, parçalanma olmaksızın iyi tanımlanmış çevresel çatlaklar gözlenmiştir [13].

N. López Perrusquia ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, API X60 mikroalaşımli çelikler üzerinde borlama ve karbonlama ile yeni bir dubleks yüzey işlemi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, mikroalaşımli çelikler üzerinde susuz macun paketi borlama (DPPB) 1273 K sıcaklıkta 8 saatlik maruz kalma süresi boyunca gerçekleştirilmiştir. Daha sonra borlanmış çelikler üzerinde 1173 K sıcaklıkta dört farklı maruz kalma süresi için paket karbonlama (PC) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, DPBP+PC'nin borür tabakası üzerinde bir dizi derinlikte (15.30–45.34 µm) en dıştaki sementit tabakasının kaplama oluşumunu desteklediğini göstermektedir [14].

S. Sashank ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmanın temel amacı, düşük alaşımli çelik yüzeyinde sert lazer borlanmış tabaka oluşturmak ve proses parametrelerinin borlanmış tabaka sertliği, derinliği ve genişliği üzerindeki etkisini analiz etmektir. Farklı lazer proses parametreleri (güç ve hız) ile lazer borlama işleminden sonra özellikleri ve mikroyapısı (mikro sertlik, borür tabakası genişliği ve derinliği) analiz edilir. Borid tabakasının mikro-sertliği, vickers mikro-sertlik test cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Lazerle işlenmiş tabakada oluşan boridlerin varlığı X-ışını kırınım tekniği ile doğrulanmıştır [15].

EA dos S. de Almeida ve arkadaşları çalışmada, borlanmış AISI M2 yüksek hız çeliği üzerine AlTiN/CrN film kaplama üzerine çalışmışlardır. AISI M2 çeliğinde borlama işlemi FeB ve Fe₂ oluşumunu desteklemiştir. Borlanmış tabakanın ortalama sertliği (2162 HV 0.025), su verilmiş ve temperlenmiş AISI M2 çeliğinin (945 HV 0.025) sertliğinden yaklaşık 2 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Çok katmanlı kaplama filminin ortalama sertliği 3912 ± 504.76 HV 0.025 elde edilmiştir. Borlama işleminin,

hem Borlu (B) hem de Borlu + Film (BF) koşullarında plastik deformasyona karşı direnci arttırdığı sonucu ortaya çıkmıştır [16].

Bu çalışmada, St52 çeliğine tuz banyosunda farklı sıcaklık ve bekleme sürelerinde borlama işlemi yapılmıştır. Borlanan yüzeylerin geniş bir spektrumda yüzey özellikleri araştırılmış, optimum tabaka kalınlığı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, tuz banyosunda borlama yapılan numunelerde borür tabaka kalınlıkları ve faz dağılımları optik mikroskop kullanılarak, fazların mikro yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Yine, mikrosertlik analizleri ile sertlik değerleri tespit edilmiştir.



BÖLÜM 2

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Borlama

Borlama, termokimyasal bir yüzey sertleştirme ve geliştirme işlemi olup, esas itibariyle metal yüzeyine bor atomlarının difüzyonu olarak adlandırılabilir. Bor atomları ısı enerjisi etkisiyle metal yüzeyine yayınırlar ve esas metal atomlarıyla birlikte uygun borür tabakaları oluştururlar. Borlama işlemi, günümüze kadar yaygın olarak sert ve aşınma direnci yüksek tabakalar oluşturmak amacıyla da kullanılmıştır [17].

Borlama, ilk olarak 1859 yılında Moissan tarafından demir esaslı malzemelerin yüzeylerini sertleştirmek amacıyla kullanılmıştır [18].

Borlama işlemi aynı zamanda, aşınma ve korozyon dirençlerini artırırken, malzemeyi yüksek sıcaklıklara karşı korumak ve erozyona karşı dayanıklılığını arttırabilmek için kullanılmaktadır [19].

Borlama işleminde borun malzeme yüzeyine difüzyonu sonucunda malzemenin en üst kısmında borür tabakası, onun altında geçiş (difüzyon) bölgesi, bunun altında da ana yapı (matris) meydana gelmektedir. Yüzeyde meydana gelen borür tabakasının kalınlığı malzemenin kimyasal bileşimine, ergime sıcaklığına, dönüşüm sıcaklığına, alaşım elementlerinin oranına ve dağılımına bağlı olarak değişir [20].

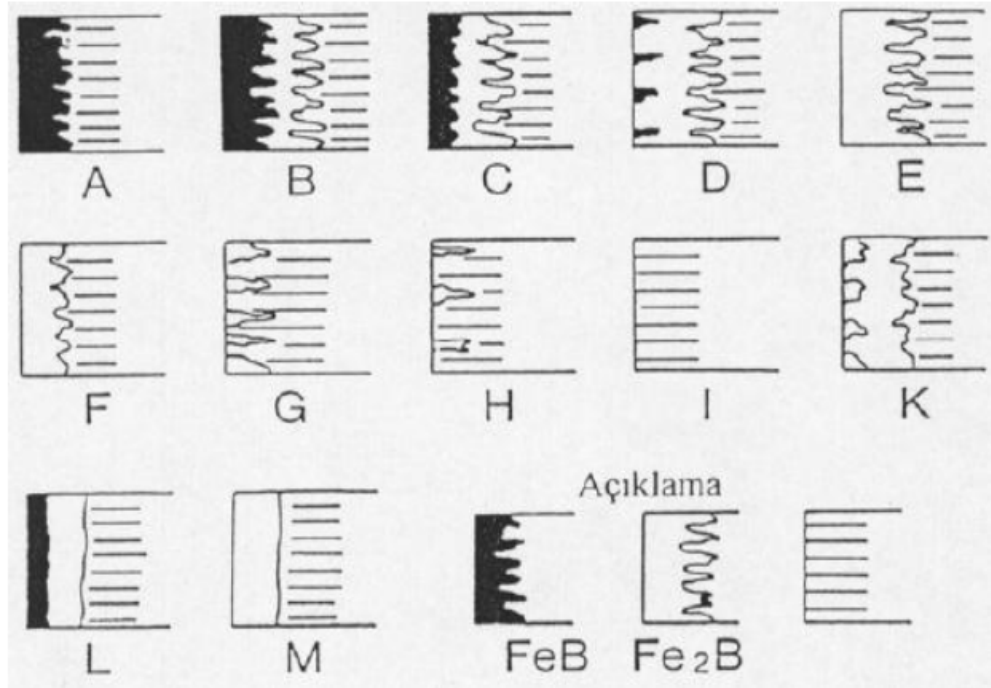
Borlama işlemi ile çeliklerin çekme deneyleri sonucunda akma ve kopma dayanımları % 10-20, yorulma dayanımları % 25 ve korozyon dayanımlarının % 200 oranında arttığı belirtilmiştir. Borlama işlemi, borlanacak malzemelerin özelliklerine bağlı 700-1000°C sıcaklık aralığında, yaklaşık 1-12 saat süre ile katı, sıvı, gaz veya plazma (iyon) fazındaki bor verici ortamlarda bekletmek suretiyle yapılan ısıl işlemdir. Borlama işleminin en önemli karakteristik özelliği, elde edilen borür tabakasının çok yüksek sertlik değerine (1450-5000 HV) ve son derece iyi aşınma direncine sahip olmasıdır [20].

Borlanmış çeliklerin işlem uygulanmamış çeliklere kıyasla asitlere karşı dayanımı ve oksitleyici ve korozif ortamlardaki servis ömürleri daha yüksektir. Borlama işlemi ile birlikte sürtünme katsayısının düştüğü ve yağlayıcı kullanımının minimum seviyeye indiği tespit edilmiştir [20].

2.1.1 Borür Tabakanın Yapısı

Borlanan tabakanın özellikleri, borlanan malzemenin kimyasal bileşimine, borlama ortamına, işlem sıcaklığı ve süresine bağlıdır. Çeliklerde borlama işlemi sonucunda borür tabakası ve difüzyon geçiş bölgesi oluşmaktadır [20].

Çeliklerde genellikle FeB ve Fe₂B olmak üzere genellikle iki borür tabakası meydana gelir. Borür tabaka kalınlığı malzemenin kimyasal bileşimine, işlem sıcaklığına, borlama yöntemine ve işlem süresine bağlıdır. Genellikle, bor tabakasında testere dişi şeklinde tek bir Fe₂B fazının oluşması istenir. Bununla birlikte farklı borlama yöntemleri ile 14 farklı yapıda borür tabakası elde edilebilmektedir. Kunst ve Schaaber tarafından geliştirilerek düzenlenen sistematik sınıflandırma Resim 2.1’de gösterilmiştir [20].



Resim 2.1 .Borür tabakası çeşitleri [20]

A: FeB; B: Fe₂B ve FeB; C: İki fazlı (ince FeB); D: iki fazlı tabaka (FeB dişleri izole edilmiş); E: Tek fazlı tabaka (Fe₂B); F: tek fazlı tabaka (Fe₂B daha az diş); G: Fe₂B dişli özel tabaka; H: Fe₂B (dişler çok izole edilmiş); I: geçiş bölgesi; K: bozulmuş tabaka; L: iki fazlı tabaka (düz); M: tek fazlı tabaka.

2.1.2 Borlama İşleminin Avantajları

Borlama işlemi, nitrürleme ve karbürleme gibi diğer yüzey işlemleriyle karşılaştırıldığında daha yüksek sertlik değerine (1450-5000 HV) sahiptir. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertliği ve düşük sürtünme katsayısı ile birlikte çok iyi tribolojik özellik sergilerler. Borlanmış çelikler alkali veya seyreltik asit gibi ortamlarda yüksek korozyon ve erozyon direncine sahiptirler. Borlanmış yüzeyler, 850 °C'- 1277 °C sıcaklıkları arasında oksitlenmeye karşı dirençlidirler. Borlanmış çeliklerin oksidasyon ve korozyon ortamlarında yorulma ve servis ömürleri daha yüksektir [18].

2.1.3 Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlama işlemi diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine kıyasla nispeten daha pahalı bir yüzey sertleştirme ve kaplama yöntemidir. Borlama sonrasında borür tabakasının özelliklerinin korunması için vakum veya inert ortama gerek duyulmaktadır [18].

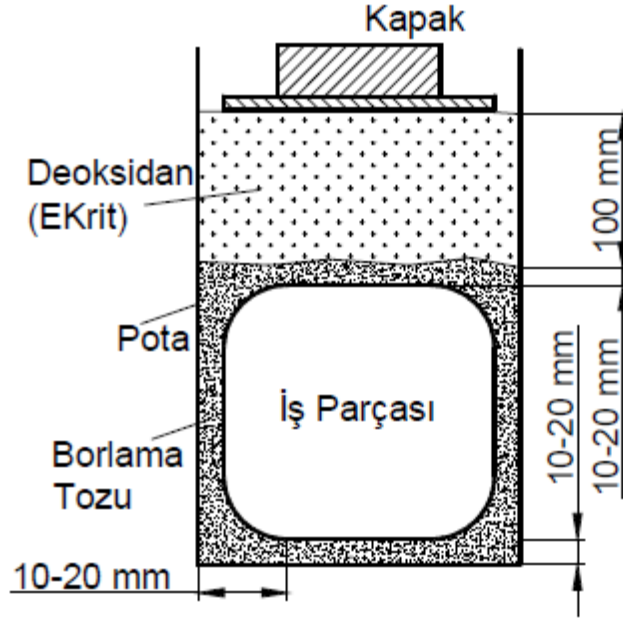
2.2 Borlama Yöntemleri

Termokimyasal borlama yöntemleri, bor elementinin geçiş kaynağı açısından kutu borlama, sıvı ortam borlama, pasta ortamında borlama, gaz ortamında borlama ve plazma borlama yöntemleri olmak üzere beş kısımda incelenebilir.

2.2.1 Katı ortamda borlama işlemi

Katı ortamda borlama işlemi, borlanacak malzemenin elementer bor içeriği açısından yüksek B içerikli toz karışımı ile birlikte ısıya dayanıklı bir kutu pota içerisinde (Şekil 2.2) farklı sıcaklık ve sürelerde numunenin ısıtılma maruz kalmasıyla gerçekleştirilen işlemdir. Kutu borlama sıcaklığı 900-1050 °C olup, borlama işlem süresi 2-10 saat arasında değişmektedir. Yöntemin diğer borlama yöntemlerine göre avantajı, ekonomiklik ve kolay uygulanabilirliğidir. Kutu borlama işleminde kullanılan toz bileşenleri 3 farklı kategoriye ayrılmıştır;

- Bor kaynakları olarak; bor karbür (B₄C), ferrobor ve amorf bor
- Seyreltici olarak; Silisyum karbür (SiC) ve alümina (Al₂O₃)
- Aktivatör olarak; NaBF₄, KBF₄, (NH₄)₃BF₄, NH₄Cl, Na₂CO₃, BaF₂ ve Na₂B₄O₇ [18].



Şekil 2.2 Katı ortamda borlama işleminin şematik görünümü [18].

2.2.2 Sıvı Ortamda Borlama İşlemi

Sıvı ortam borlama işlemi, elektrokimyasal ve termokimyasal olmak üzere ikiye ayrılır. Ergimiş tuz banyosunda elektroliz yöntemi kullanılarak yapılan borlama işlemi elektrokimyasal, akımsız tuz banyosu borlama işlemine ise termokimyasal borlama adı verilir. Bu yöntemde akıcılığı yüksek sıvı tuz banyosu içerisine numunenin daldırılması yoluyla borlama işlemi gerçekleştirilir.

Çeliklerin elektrokimyasal borlama işlemini etkileyen parametreler elektrolit tipi borlama sıcaklığı ve akım yoğunluğudur. Bu borlama işleminde katot borlanacak malzemeyi anot ise grafiti ifade eder. Elektrolit olarak ise erimiş boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) kullanılmaktadır. Borlama işlemi, 900- 950 °C'lik sıcaklık aralığında ve yaklaşık 4 saatlik işlem süresinde, 0,15 A/cm^2 'lik akım yoğunluğu değeri kullanılarak gerçekleştirilir. Yüksek alaşımli çelik esaslı malzemelerin borlanması için genellikle düşük akım yoğunluğu ile daha uzun borlama süresi uygundur. Böylece daha kalın borür tabakası elde edilir [18]. Termokimyasal (akımsız) sıvı borlama işleminin elektrokimyasal borlama işleminden farkı akımsız olması ve aktivatör farkıdır.

2.2.3 Gaz ortamda borlama işlemi

Bu yöntemde kullanılan ajanlar bor içerikli gazlar bor triflorid (BF₃), bor triklorid (BCl₃), bor tribromid (BBr₃), trimetilborür (CH₃)₃B, trietilborür (C₂H₅)₃B, diboran (B₂H₆) olup borlama ortamı gaz fazında yapılmaktadır. Gaz borlama yöntemlerinin diğer borlama yöntemleriyle kıyaslandığında belirli dezavantajları vardır.

- Zehirleyici ve patlayıcı gaz karışımları (B₂H₆)-H₂ kullanılması son derece tehlikeli olup oldukça pahalıdır.
- Ticari saflıktaki bor elementinin ergime sıcaklığının yüksek olmasından dolayı borun buharlaşması zordur.

2.2.4 Pasta borlama işlemi

Kutu borlama işleminde kullanılan toz karışımının macun şeklinde hazırlandığı ve kullanıldığı yöntemdir. Kutu borlamanın daha pahalı ve zaman aldığı durumlarda genel olarak pasta borlama işlemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde tane boyutu 200 ile 240 µm arasında değişen %45 oranında B₄C (bor karbür), %55 oranında kriyolit (Na₃AlF₆) veya geleneksel bor toz karışımı (B₄C+SiC+KBF₄) iyi bir bağlama ajanı ile birlikte kullanılmaktadırlar [18].

2.2.5 Plazma Borlama İşlemi

Plazma borlama Ar (argon) ve H₂ (hidrojen) gazlarıyla beraber bor kaynaklarının BCl₃, BF₃, B₂H₆ yanında bu kaynaklardan daha ucuz ve daha az korozif olan boraks, borik asit, bor karbür gibi bor ürünlerini kullanarak 800-1000 °C sıcaklıkta yaklaşık 10-2 Pa basınçta plazma içerisinde yapılan borlama işlemidir. Diğer borlama yöntemlerine nazaran plazma borlama yönteminin ekonomik verimlilik, işlemin çok yoğun enerjide gerçekleşmesi, düşük işlem sıcaklığı, borlanan tabakanın bileşim ve derinlik kontrolünün yapılabilmesi ve deneysel parametrelerinin kontrol edilebilir olması sebebiyle birçok avantaja sahiptir [18].

2.3 Borlama İşleminin Endüstriyel Uygulama Alanları

Borlanmış malzemeler, sahip oldukları özellikler nedeniyle çok geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir. Bunlar;

- DIN St 37 çeliğinden üretilen tel çekme aletleri, ringleri ve kovanlarında,
- Tekstil makinalarında kullanılan dökme demir dramlarda
 - Su ayar vanalarının dörtlü kavrama besleyicilerinde (AISI 316 Ti çeliğinden),
 - Ateşleme nozülleri, girdaplı dönme elemanları ve kimya endüstrisinde petrolyakıtlı makinalarda enjektör başlarında,
- Çeşitli yüksek performanslı tekerlekler ve önemli motorlarda sürme, sonsuz vida ve helesel dişlilerde
- Doldurma elemanlarının nozülleri,
 - Plastik endüstrisinde, dövme kalıpları (arabalar için aksesuar parçaların performanslı olarak üretilmeleri için), basma ve sürme matrisleri, kavrama halkaları (takım çelikleri),
- Pres kalıpları, kesme şablonları, döverek kesme plaka muhafazaları (DIN St 37 çeliği),
- Vida ve silindirik dişliler, konik dişliler (AISI 4317 çeliği),
- Seramik tuğla ve kapların kalıplanmasında kullanılan kalıplar, ekstrüzyon kovanları, iticileri ve ringleri (AISI 4140 çeliği),
- Linyit kömür briketlerin taşıma levhaları [21].

Borlanan parçalar, basınçlı döküm kalıpları, blok bükücüler, blok sürücüler, boru klipsleri, presleme şekillendirme sürücüler, çeşitli tipte basınçlı soğuk şekillendirme kafaları, bükme, ekstrüksiyon, damgalama, presleme, dövme, çekme ve germe kafalarında kullanılmaktadır. Çok bileşenli borlamaların kullanım alanlarına örnek olarak, bor-kromlama işleminin ostenitik paslanmaz çeliklerin, bor-kromtitanyumlama ise plastik makinalarının parçalarında aşınma direncini arttırması söylenebilir[21].

2.4 Tuz Banyosu TRD Yöntemi

Tuz banyosu yönteminde başlarda parçalar çarpılmayı azaltmak ve işlem süresini kısaltmak için 500-700°C sıcaklıkları arasında ısıtılır. Akabinde elektrikli tuz banyosunda veya gaz ısıtmalı fırında ergimiş boraks ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ veya $\text{Na}_2\text{O}_2 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$), uygun karbür veya nitrür yapıcı element ve bor karbür, alüminyum gibi indirgeyici katkıları ilave edilerek 850-1050°C arasında 0,5-10 saat süreyle işlem

gerçekleştirilir. Banyo sıcaklığı seçilirken tercih edilen altlık malzemenin sertleşme sıcaklığına uygunluğuna dikkat edilir. Tutma süresinin belirlenmesinde yüzeyde arzu edilen kaplama kalınlığı ve altlık malzemenin türü önemlidir[22].

Karbür veya nitrür yapıcı element ilavesinde ferro-alaşım tozları veya bu elementlerin oksitleri kullanılabilir. Örneğin, vanadyum için ferro-vanadyum veya V_2O_5 kullanılabilir. Karbür veya nitrürlerin oluşumunda; titanyum, vanadyum, krom, molibden, niyobyum, volfram gibi elementler ergimiş boraks banyosunda çözünür, altlık malzemedeki karbon veya azot da altlık malzemedeki kaplama tabakasına yayılarak 2 ile 20 μm kalınlığında kaplama sağlanmış olur.

Kaplama işleminden sonra malzemelerde boyutsal kararlılık sağlanması ve çarpımalara engel olmak için hava, su veya yağda soğutma ve 150 ila 200°C veya 500 ila 600°C sıcaklıkları arasında tek veya iki kademeli menevişleme yapılır. TRD işleminden sonra malzemelerin tam sertlik değerlerinin sağlanması için ısıl işlemleri, koruyucu atmosfer, vakum, koruyucu tuz ve benzeri ortamlarda uygulanabilir [22].

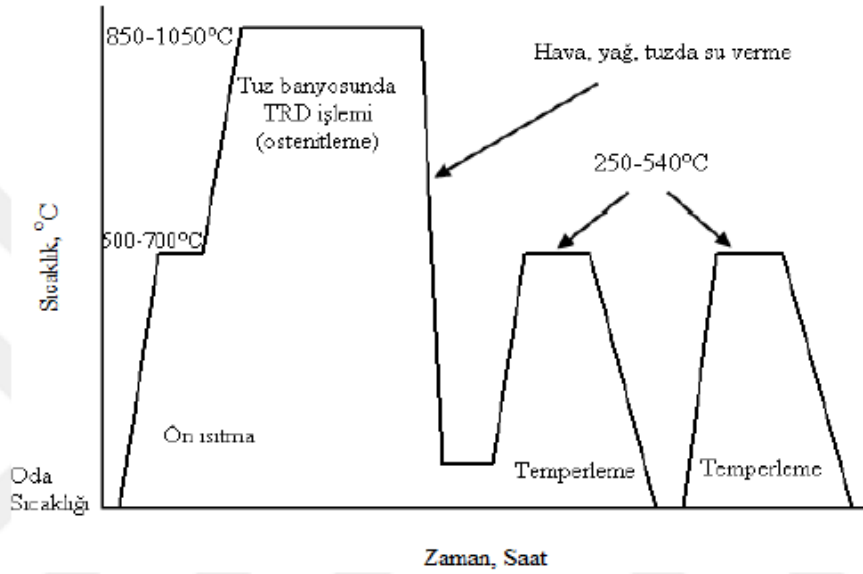
1970'li yıllarda Japonya'da geliştirilen ve kısaca TRD (ThermoReactiveDiffusion) veya TD (Toyota DiffusionProcess) diye adlandırılan bir yöntemle takım çeliklerin ömürleri 2 ila 20 kat artırılmıştır. Bu sisteme göre boraks tuz banyosu içine ilave edilen Vanadyum, Niyobyum, Titanyum, Tantal ve krom gibi güçlü karbür ve nitrür yapıcı elementler, çelik yüzeyindeki karbon ve azotla birleşerek yüzeylerde metalik karbür, nitrür ve karbo-nitrür tabakalar oluşturmaktadır. Proses bilimsel çevrelerde TRD, endüstride ise TD (Toyota Difüzyon) prosesi olarak bilinmektedir [23].

TRD yöntemi geleneksel yüzey sertleştirme metotlarına benzemez. Diğer bazı konvansiyonel yüzey işleme yöntemleriyle elde edilmeyecek kadar yüksek aşınma türlerine karşı dirençli, korozyon direnci ve oksidasyon direncinin sağlanabildiği nitrür kaplamaların üretilmesi sebebiyle, TRD yöntemi takımlar için kullanışlı olmaktadır. Çünkü geleneksel yüzey sertleştirme metotlarında karbon ve azot, altlık malzemenin yüzeyini sertleştirmek amacıyla dışarıdan difüze edilmektedir.

TRD yöntemi konvansiyonel difüzyon metotlarına benzememesine rağmen, TRD yönteminde de altlık malzemenin yüzeyinde kaplama tabakasının oluşumu gerçekleşmektedir. TRD yönteminde elde edilen kaplama tabaka kalınlıklarına CVD veya PVD teknikleri kullanılarak ulaşılabilmektedir. Kıyaslanacak olursa, CVD

kaplamaların kalınlıkları (2,5 μm), TRD yönteminde elde edilen kaplamaların kalınlıklarına yakındır [23].

TRD kaplama tekniği aslında bir termokimyasal işlemdir. Ancak geleneksel termokimyasal işlemlerden biraz farklıdır. Kaplama yönteminde çelik altlıktaki karbon ve azot yüksek sıcaklıkta (800 - 1250 $^{\circ}\text{C}$) yüzeye difüze olarak titanyum, vanadyum, niobyum, tantalyum, krom, molibden ya da tungsten gibi kuvvetli karbür ve nitrür yapıcı refrakter geçiş metalleri ile birleşerek çelik yüzeyinde yoğun, gözeneksiz ve ana metale iyi bir şekilde bağlanmış kaplama tabakası oluşturur. Alışılmış yöntemlerin aksine oluşan kaplama tabakası altlık yüzeyinde gelişir. Altlık malzeme ile kaplama tabakası arasında belirgin bir sınır vardır. Ancak, işlem yüksek sıcaklıkta yapıldığı için karbür yapıcı elementlerin ana metal içine yayılımı söz konusudur. Bu da metalurjik olarak bağlı bir yapı oluşturmaktadır [5].



Şekil 2.2 TRD prosesinin akım şemasının şematik gösterimi[5].

Neticede çelik yüzeyinde 5 μm -12 μm kalınlığında tabakaya ve 3000 HV gibi yüksek bir sertliği olan kaplama tabakaları oluşur. Malzeme yüzeyinde sağlanan sertlik değeri diğer sertleştirme yöntemlerine göre çok yüksektir [24].

Avantajları;

- Önceden hazırlanmış bir fırına gerek olmadığı için her türlü fırında yapılabilir,
- Basit bir donanıma sahiptir ve uygulaması kolaydır,

- Atık, zehirli gaz yoktur ve çevreye zararlı değildir,
- Girinti çıkıntı olan bölgelerde uniform kaplama gerçekleştirilebilir,
- Az sayıda ve büyük parçalar için ekonomiktir,
- Yağlayıcıya gerek yoktur ya da yağlayıcıdan tasarruf edilir,
- Malzemeye yapışan toz kolay temizlenebilir,
- Karbürlemeden sonra sement edilen malzemelere sertleştirme işlemi gerçekleştirilebilir [24,25].

Dezavantajları;

- İnce karbonlama derinliklerinde toleranslar hassas değildir,
- Yüzey karbon miktarı kontrol edilemez,
- Karbonlama bileşiğinin ve kutu hacminin parçaların ısınma ve soğuma hızının azalması sebebiyle işlem süresi uzar [25].

2.4.1 Termoreaktif Difüzyon Elementi; Titanyum

Çelik kadar dayanıklı olan titanyum çelikten %45 daha hafiftir. Alüminyumdan ise %60 daha ağırdır fakat 2 kat daha dayanıklıdır. Dayanıklılığı ve asitlere karşı dirençli olduğundan çeşitli alaşımların yapısına ilave edilir [26].

Titanyum, karbonla çok kararlı bir karbür oluşturacak şekilde birleşmeye çok yatkın olduğundan, sıradan karbon indirgeme işlemleriyle elde edilemez. Titanyum, oksijen, azot ve hidrojenle de kolayca birleşir. Bu maddelerin tamamı, titanyumun mekanik özelliklerine ters yönde etki eder. Bu nedenle, titanyumla çalışma yaparken, çevrede bu maddelerin bulunmamasına dikkat edilmelidir.

Titanyum, normal sıcaklıklarda tepkimeye pek kolay girmemesine rağmen, artan sıcaklıklarda hidrojen, oksijen, azot, halojenler, bor, karbon, silisyum ve kükürt gibi birçok ametalle doğrudan birleşir. Metalin titanyum nitrür (TiN), titanyum karbür (TiC) ve titanyum borür (TiB ve TiB₂) gibi bileşikleri, oldukça kararlı, oldukça sert ve güç eriyen maddelerdir. Bu bileşikler, metal halindeki titanyumun üstünde bir yüzey tabakası oluşturduklarından dolayı, mekanik özelliklerinde değişmeye yol açmaksızın metali aşınmaya karşı korur. Hidrojenin varlığında, titanyum yumuşar ve tüm mekanik özelliklerini yitirir [26].

Titanyum, yüksek korozyon dayanımına sahip ve biyolojik uyumluluğu olan bir metaldir; ancak sürtünme katsayısı yüksek ve aşınma direnci düşük olduğundan mekanik mühendislik uygulamalarında kullanılamamaktadır. Titanyumun bu özelliklerini yükseltmek için sertliği yüksek olan borür, karbür veya nitrürlü bileşikler tercih edilir. TiB₂ ve TiC bileşikler yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığının nezdinde metaller gibi elektriksel ve ısı iletkenlikleri de oldukça yüksektir. Bir diğ er ifadeyle metalik ve seramik malzeme özelliklerini bir arada sergilemektedirler [27].

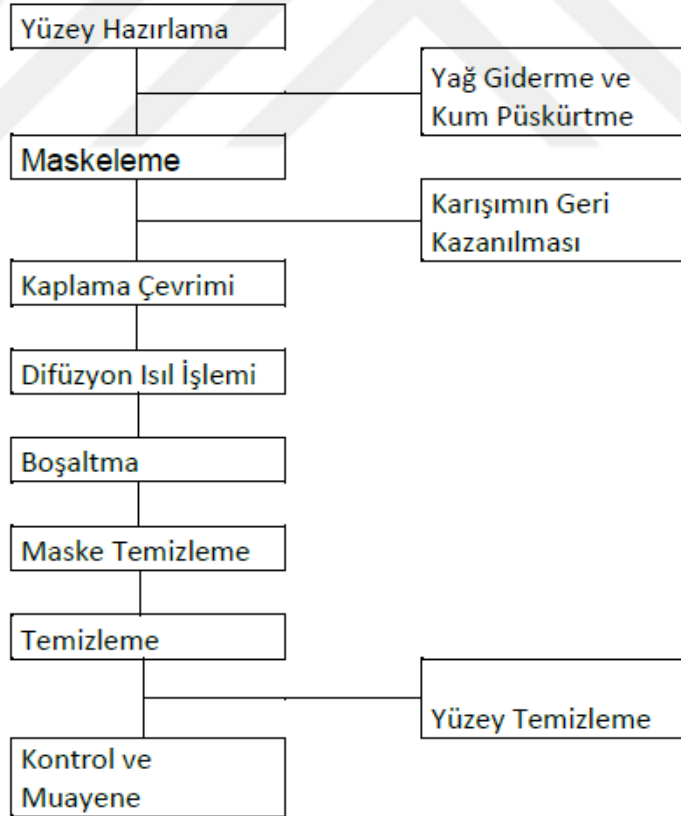
Titanyum diborür (TiB₂) oldukça önemli kimyasal, elektriksel, termal ve mekanik özelliklere sahip bir geçiş metali borürüdür. Çeşitli titanyum-bor bileşikler i içerisinde en kararlıdır. Yüksek sertliğ e ve yüksek elektriksel iletkenliğ e, termal kararlılığ a ve yüksek aşınma direncine sahiptir. Ayrıca titanyum diborür, yüksek elastik modül ve yüksek ergime sıcaklığı olan, ergimiş metallere karşı kimyasal olarak inert bir malzemedir. Bütün bu elverişli özellikler i ile titanyum diborür, kesici takım uçlarında, aşındırıcı ve aşınmaya karşı dayanıklı uygulamalarda ve zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bunlara ilaveten ergimiş alüminyuma karşı kimyasal kararlılığ a sahip olduğ u için elektrolitik alüminyum üretiminde katot malzemesi olarak kullanılmaktadır [28].

Titanyum karbür (TiC), IV. Grup elementi olan titanyuma ara yer atomu olarak karbon yerleşmesiyle meydana gelmektedir. TiC; yüksek ergime noktası, düşük yoğunluğu, sert ve rijit olması, iyi termal ve elektrik iletkenliğ i gibi fiziksel özelliklerinin mükemmel kombinasyonundan dolayı son yıllarda üzerinde çok çalışılan bir malzeme olmuştur [29,30].

Tablo 2.1 Titanyum Karbürün Özellikleri[30].

Ç Kompozisyon / %C oranı	TiC _{0.47} - TiC ₁ / 20.05
Kristal Yapısı	YMK
Molekül Ağırlığı	59,91 g/mol
Yoğunluk	4,91 g/cm ³
Ergime Noktası	3067°C
Özgül Isı	33,8 J/mol.K (289K)

Oluşum Isısı (-ΔH)	184,6 kJ/g-atom metal (298K)
Termal İletkenlik	21 W/m.°C (20°C)
Termal Genleşme	7,4 x 10-6 / °C (20°C)
Elastisite Modülü	410 - 510 Gpa
Kayma Modülü	186 Gpa
Poisson Oranı	0,191
Elektriksel Direnç	68 μΩ.cm (20°C)
Oksidasyon Direnci	Havada yavaş yavaş oksitlenir (800°C)
Kimyasal Direnç	Çoğu aside karşı dirençlidir.Halojenler, HNO3 ve HF'e karşı dirençsizdir



Şekil 2.3 TRD Prosesinde İşlem Sırası[41]

Parçalara TRD işlemine tabi tutulmadan önce distorsiyonu en aza indirmek ve TRD süresini azaltmak amacıyla ön ısıtma işlemi uygulanmaktadır[24]. Kaplanmış malzemeler soğutulduktan sonra, sertleştirmek için tekrar ısıtılabilir veya banyo sıcaklığı östenitleme sıcaklığında TRD işlemine tabi tutulabilir[31]. TRD işleminden sonra, parçalara havada, tuz veya yağda sert altlık malzeme elde etmek için su verilir.Su verme işleminden sonra temperleme işlemi gerçekleştirilir [24].

2.4.2Termoreaktif Difüzyon Elementi; Bor

Bor, yerkabuğunun 51. elementidir ve doğada serbest halde bulunmayıp bileşik halinde bulunur. Kimyasal sembolü “B” dir ve periyodik cetvelin IIIA grubunda yer alır. Bor,karbon ve silisyum elementlerine benzerliği en fazla ve oksijene karşı afinitesi en yüksek olan elementtir. Bor, çok sayıdaki minerale bileşik halinde bulunur. Bor mineralleri genellikle bor oksitleri içerirler [32].

Bor yüksek sıcaklıkta su ile reaksiyona girerek borik asit ve diğer ürünleri oluşturur. Bor elementinin kimyasal özellikleri yapısına ve tane büyüklüğüne bağlıdır. Mikron ebadındaki amorf bor kolaylıkla ve bazen şiddetli olarak reaksiyona girerken kristalin bor kolay reaksiyona girmez [33].

Tablo 2.2 Bor Özellikleri

Özellik	Değeri
Atom Ağırlığı	10.811
Ergime Noktası	2190 °C
Kaynama Noktası	3660 °C
Vickers Sertliği	5000 HV

Bor, Türkiye'nin sahip olduğu çok önemli, endüstriyel hammaddelerinden biridir. Gerek bor minerallerinin sahip olduğu rezerv potansiyeli, gerekse işletme maliyeti ve tenör avantajları ile dünyada en önemli potansiyele sahiptir [33].

Teknolojik ilerlemelerle beraber endüstrinin yanında askeri ve uçak-uzak sanayindeki gereksinimlerin çoğalması, bulundurduğu özelliklerinden dolayı yüksek sıcaklık seramikleri olarak adlandırılan borürler, karbürler ve nitrürlerden oluşan refrakter bileşiklerine yönelik yeni uygulama alanlarının oluşması kaçınılmazdır [34].

Diğer refrakterin termetalik bileşiklerle karşılaştırıldığında, refrakte rborürler, özellikle geçiş metalleri borürlerinin, çok sayıda faydalı kimyasal ve fiziksel nitelikleri bulundurmaları yapılan çalışmaları artırmaktadır. Kuvvetli kovalent bağ yapısı; yüksek sıcaklıktaki termal ve kimyasal kararlılığa, korozyon ve oksidasyon direncine, yüksek mukavemet, yüksek sertlik ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olmalarını sağlarken; ayrıca buna benzer malzemelerde bulunan bor bağlarının elektronik yapıda olması yüksek termal ve elektrik iletkenlik özelliklerini de beraberinde getirmektedir [34].

Bor karbür, yüksek ergime sıcaklığına (2450°C), çok yüksek sertliğe (3770 kg/mm²) ve düşük yoğunluğa sahip (teorik yoğunluk: 2,52 g/cm³) oksit olmayan bir seramik malzemedir. Elmas ve kübik bor nitrürden sonra bilinen en sert malzemedir. (Kübik bornitrür, elmas sertliğinde mükemmel bir malzemedir. Suni elmas olarak da anılmaktadır. Bütün aşındırıcılarda elmasın yerini almaktadır [35].

Hafifliği nedeniyle personel zırhlarında çok kullanılır. Üstün aşınma dayanımıyla çeşitli kum püskürtme uygulamalarında nozül olarak ve borun yüksek nötron absorpsiyon kesiti sayesinde nükleer uygulamalarda kalkan ve reaktör kontrol çubukları olarak kullanılmaktadır [28].

Genellikle, bor tabakasında testere dişi gibi olan Fe₂B fazının oluşması arzu edilir. FeB ve Fe₂B çift fazlı tabakalarının eldesinden daha fazla istenir, çünkü FeB fazı borca zengindir (yaklaşık % 16.23 oranında). FeB fazı diğer demir bor fazlarından daha gevrek olduğu için bu faz istenmez. Fe₂B fazı ağırlıkça %8.93 bor içerir [32].

2.5 Genel Yapı Çelikleri

Çelik, temel olarak karbon içeriği ağırlıkça %2'ye kadar olan demir ve karbon alaşımı olarak tanımlanabilmektedir. Çelik, mukavemeti, şekil verilebilirliği, bol miktarda bulunması ve düşük maliyeti nedeniyle yapısal uygulamalar için kullanılan esas malzemelerden bir tanesidir [36].

İlerleyen teknoloji ile bir çok yeni malzeme üretildi ancak; çelik halen Dünya’da en çok kullanılan mühendislik malzemesidir. Bunun başlıca nedeni, yüksek dayanım ve tokluğunun yanında, aynı zamanda darbe direncinin olmasından dolayıdır. Ayrıca, insanlık tarihi bu malzemenin imalatında oldukça tecrübelidir. Hala en çok kullanılan kullanılan mühendislik malzemesi olmasının temel nedenlerinden bir diğeri de geri dönüşümü olmasıdır. Şu anda dünyada en çok geri dönüşüm yapılan malzeme çeliktir.

Nerdeyse bütün inşaatların yapı malzemesi olarak kullanılması tercih edilen çelik yapı malzemesi oldukça kullanışlı ve dayanıklı yapısı ile çoğunlukla tercih edilir. Çelik malzeme kullanmak, her geçen gün çeliğin kullanım alanlarını arttırmıştır. Çelik malzemeye verilen önemle artan çelik malzeme kullanımı, çeliğin farklı alanlara yayılıp uzun süre kullanılmasını kolaylaştırmıştır [37].

Çelik yapısı ve özellikleri şu şekilde sıralayabiliriz;

- Çeliğin kimyasal bileşimi kaynak işlemleri için uygundur
- Demirden daha sert ve hafiftir
- Isıl işlemlerle elektriksel, mekanik ve fiziksel özellikler kazandırılabilir
- Çeşitli işlemlerle yüksek sıcaklıklara dayanımı ve sertliği artırılabilir
- Belli bir ısıda dövme, presleme ve haddeleme yöntemleri ile istenen şekle sokulabilir
- Bazı özellikteki çelikler soğuk olarak da şekillendirilebilir
- Plastikler ve metallerle kaplama yapılabilir
- Kızgın çeliğe aniden su verildiğinde kristal özelliği değişerek sertleşir. Bu işleme “çeliğe su verme” adı verilir [38].

Metaller ve alaşımları, plastikler ve seramikler de dâhil olmak üzere tüm malzemeler korozyona veya bir tür çevresel bozunmaya karşı hassastırlar. Bazı uygulamalar için çoğu zaman birçok malzeme seçimi yapılabilir de, genellikle belirli bir ortama özel ve tatmin edici bir performans gösterebilecek çeşitli malzemeler bulunmaktadır. Uygun malzeme demek, sadece korozyona en yüksek direnç gösteren malzeme anlamına

gelmemektedir. Örneğin karbon çelikleri iyi mekanik özellikleri, kaynaklanabilirliği, düşük maliyetleri ve makul derecede korozyona dayanımları nedeniyle en yaygın yapı malzemeleridir [39].

Çelikler, koroziv ortamlarda kullanıldıklarında genellikle koruyucu kaplamalarla veya diğer korozyon önleme yöntemleri ile korozyona karşı korunması gerekmektedir. Çünkü korozyon hızı genellikle atmosfere maruz kalmanın ilk yıllarında, sonraki yıllara oranla daha yüksek seviyelerde olacak ve havadaki kirlilik ve nem derecesi ile birlikte önemli ölçüde artacaktır. Nispeten sınırlı korozyon direncine sahip olmalarına rağmen, denizcilik uygulamalarında, nükleer ve fosil yakıtlı enerji santrallerinde, ulaştırma, kimyasal işleme, madencilik, inşaat ve metal işleme ekipmanlarında çok fazla miktarda kullanılmaktadır [39].

Bu alanların tümünde korozyon olayının meydana gelmesi muhtemeldir. Çeliklerin korozyonunu en aza indirmenin iki temel yöntemi mevcuttur. Bunlardan birincisi, reaksiyon fazlarını ayırmak, ikincisi ise reaksiyon fazlarının reaktivitesini azaltmaktır. Reaksiyon fazlarının ayrılması metalik, organik veya inorganik kaplamalar ve yüzeyde film oluşturucu inhibitörler kullanılarak mümkün olmaktadır. Reaktivitenin azaltılması ise anodik veya katodik koruma sistemleri ile gerçekleştirilmektedir [39].

Düşük karbonlu çeliklerin korozyon direncini ve diğer özelliklerini iyileştirmek adına birçok uygulama mevcuttur. Bunlar yüzey mühendisliği adı altında bileşenlerin yüzey özelliklerini tasarlamayı ve değiştirmeyi amaçlayan işlemlerdir. Yüzey özelliklerini optimize etmek için kullanılabilir iki ana yüzey mühendisliği yöntemi vardır. Bunlar yüzey kaplamaları ve yüzey modifikasyonlarıdır [40].

Yüzey kaplama işlemleri, taban malzemenin bileşiminin değiştirilmesi yerine, yüzey üzerinde bir kaplama tabakası oluşturma esasına dayanmaktadır. Yüzey modifikasyonları ise malzemelerin temel özelliklerinin değiştirilmeden, yüzeylerinde fiziksel ve/veya kimyasal değişimler oluşturulmasıdır [41].

Düşük karbonlu çelikler %0,20'in altında karbon içeren ve ilk geliştirilen, en ucuz ve en geniş kullanım alanına sahip olan demir-karbon alaşımlarıdır. Demir çelik isteği ülke ekonomilerinin genel durumuna, alt yapı yatırımlarına, konut yatırımlarına ve genel olarak inşaat sektörünün ilerleme düzeyine doğrudan bağlıdır. Bu bağlamda belki de tüm dünya genelinde üretilen çelikler içerisinde en ciddi paya sahip yapı çelikleri en

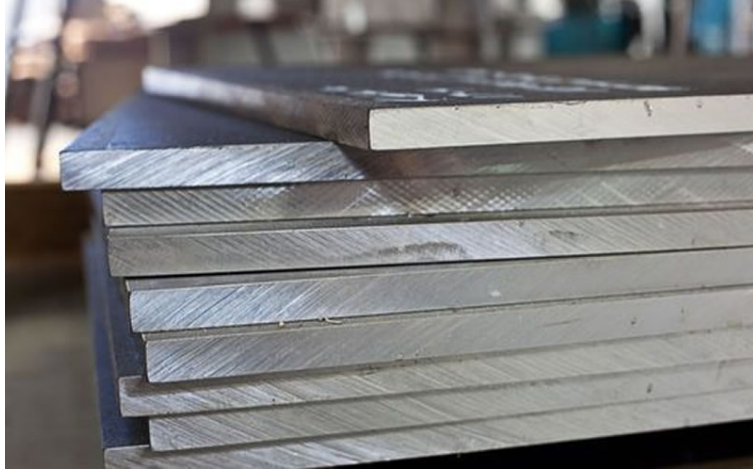
önemli yeri tutar. Diğer çeliklerle karşılaştırıldığında fiyat ve elde edilebilirlik bakımından avantajlı olan yapı çelikleri piyasada kullanılan çeliklerin %75-80'ini oluşturmaktadır. Düşük karbon miktarına sahip alaşım elementi içermeyen başta fosfor (P) ve azot(N) olmak üzere, üretim hammaddelerinden ve üretim yönteminden kaynaklanan mangan (Mn), silisyum (Si), bakır (Cu) ve kükürt (S) elementleri içeren ve sıcak şekillendirilmiş, normalize edilmiş bazen de soğuk çekilmiş olan özellikle çekme dayanımları ve akma sınırları dikkate alınarak endüstriyel ve yapısal uygulamalarda kullanılan çeliklere “Yapı Çelikleri” ismi verilmektedir [42].

Yapı çelikleri, sıcak şekillendirilmiş (termomekanik işlem görmüş), soğuk çekilmiş, normalize edilmiş, ince taneli, kaynak edilebilir, korozyon dayanımları geliştirilmiş, su verilmiş ve temlerleymiş durumda yüksek akma dayanımlı çelikler olarak değişik alt gruplara ayrılabilirler [42].

Yapı çelikleri, düşük karbon içerikli, alaşımsız haddele ve normalizasyon haddele plakalar olarak imalat ve yapı sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Mikro alaşımlama ve/veya tane boyutunun kontrolü ve yönlendirmesi ile değişen akma/çekme mukavemetleri ve düşük sıcaklık tokluk özellikleriyle üretilir ve kullanıma sunulurlar. Bu çeliklere uygulanan en önemli imalat teknikleri, kesim, talaşlı imalat, soğuk ve sıcak deformasyon ve kaynaktır. Bu yöntemlerden belki de en önemlisi kaynaktır, düşük karbon içerikleriyle bu çeliklerin kaynaklanabilirliği iyi olarak tanımlanır. Bu grup çeliklerde gösterilişlerinde belirtilen dayanım değerleri, yerine getirilmesi gereken esas özelliktir [42].

2.5.1 St52 Genel Yapı Çeliği

Dünya ve Türkiye üzerinde pek çok sanayi kuruluşu yer almaktadır. Gün geçtikçe sayıları artan sanayi kuruluşları, üretim alanında pek çok malzemeye gereksinim duymaktadır. Dünyadaki ve Türkiye'deki özellikle sanayi kuruluşlarının en çok kullandığı malzemelerden birisi st52'dir. St52 sanayilerde en çok kullanılan malzemelerden birisini teşkil eder [43].



Resim 2.2. St52 Yapı Çeliği[43].

“St”, %2 kadar karbon içeren genel yapısal karbon çeliğini ifade eder. “52” en az 52 kg/mm çekme dayanımına sahip olan çelik anlamına gelir. Değişken ve sabit gerilmelere maruz kalan kaynaklı çelik konstrüksiyonlarda kullanılması uygundur [43].

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Giriş

Bu tez çalışmasında, St52 çeliğinin tuz banyosu borlama yöntemi ile borlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sıcaklık ve sürenin borür tabakası üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Deneyler, 1000, 1050, 1100 °C sıcaklık ve 2, 4 ve 6 saat süre parametrelerinde yapılmıştır.

Tuz banyosunda borlanan St52 çeliğinin borür tabakası kesit yüzeyi optik mikroyapı, SEM, EDS, XRD ve mikrosertlik analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir.

3.2 Tuz Banyosu Borlama Yöntemi İle Borlanacak Ana Malzemenin Hazırlanması

Bu çalışmada St52 çeliği kimyasal bileşimi % ağırlıkça Tablo 3.1’de verilmiştir. Deney numuneleri plaka halinde temin edilen çelikten 10x20x25 mm ölçülerinde hassas numune kesme cihazı kullanılarak hazırlanmıştır.

Tablo 3.1 St52 Çeliği Kimyasal Bileşeni [44].

C	Si	Mn	P	S	N	Cu	Fe
0.22	0.55	1.6	0.035	0.035	0.012	0.55	Kalan

3.3 Tuz Banyosunun Oluşturulması

Bu deneysel çalışmada tuz banyosu için Eti Maden Bor işletmesinden satın alınan boraks kullanılmıştır. İndirgeyici element olarak ise Al kullanılmıştır.

3.4 Kullanılan Ekipmanlar

Tuz banyosu borlama deneylerinin yapılması amacıyla paslanmaz çelik pota imal edilmiştir (Resim 3.1). Deneyler Kül fırın (Resim 3.2) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Resim 3.1. Tuz Banyosunda TRD Yönteminde Kullanılacak Paslanmaz Çelik Pota



Resim 3.2. Isıl İşlem Fırını

3.5 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deneysel çalışmada kullanılacak ST52 çeliğinin Metkon Metacut 250 markalı hassas manuel kesme cihazı ile 2 cm çapa 2.5cm yüksekliğe sahip numunelerin kesme işlemi yapılmıştır. Hassas manuel kesme cihazı Resim 3.3'te gösterilmiştir.

Kesilen numuneler kaplama işleminden önce yüzeyleri 240, 800 ve 1200 zımparalarla Metkon Forcipol 2V markalı manuel zımpara cihazında zımparalanmıştır. Zımparalama parlatma cihazı Resim 3.4'te yer almaktadır. Zımparalama işleminden sonra yüzeyinin

oksitlenmemesi için alkol ile temizlenerek kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir. Resim 3.5’de borlama öncesi hazırlanan numuneler görülmektedir.



Resim 3.3. Hassas Manuel Numune Kesme Cihazı



Resim 3.4. Manuel Zımpara ve Parlatma Cihazı



Resim 3.5. Kaplama için Hazırlanan Numuneler

3.6 Tuz Banyosunun Hazırlanması ve Kaplama İşlemi

Bu tez çalışmasında tuz banyosunun hazırlanması için boraks tuz banyosu paslanmaz pota içerisinde oluşturulmuştur. Boraks, 850 °C de 30 dk bekletilmiş ve eriyik oluşturulmuştur. Al eklendikten sonra banyonun homojen olması için paslanmaz çelik pota dışarıda 3 dk karıştırılarak tuz banyosu eriği hazırlanmıştır. Resim 2.6'da ergimiş tuz banyosu gözükmektedir. Tuz banyosunda borlama işlemi 1000, 1050 ve 1100 derecede 2, 4 ve 6 saatlik bekleme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Borlama işlemi sonrasında numuneler suya daldırılarak soğutulmuştur. Soğuma işlemi sonrasında yüzeyde oluşan su ve tuz kalıntıları 180'likzımpara ile temizlenerek numuneler kesit analizi için hassas numune kesme cihazıyla kesilmiştir.



Resim3.6. Ergimiş Tuz Banyosu

3.7 Tuz Banyosunda Borlanan Numunelerin Mikroyapı İçin Hazırlanması

Tuz banyosunda borlama yöntemi kullanılarak borlanan St52 yapı eliğine Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde metalografi laboratuvarında bulunan, hassas kesme cihazı ile kesme işlemi yapıldıktan sonra Resim 3.7’de görölen Metkon Ecompress 50 marka bakalit cihazı ile bakalit işlemi yapılmıştır. Bakalit işleminden sonra Resim 3.8’de gösterilen Mikro Test markalı yarı otomatik zımpara makinesi kullanarak zımpara ve parlatma işlemi yapılmıştır. Zımpara işlemin de 240, 320, 600, 800, 1200 ve 2500 zımpara işleminden geçirdikten sonra çuhaile birlikte parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Zımpara işleminde 1,5 bar basınç da, 300 devir/dk hızla, 15 dk zımpara işlemi gerçekleştirilip, parlatma işlemi için 0,8 bar basınç da, 150 devir/dk hızla, 2 mikron alümina süspansiyonla 3 dk yüzey aşındırılarak parlatılıp 2 dk yağlayıcı işleminden sonra kaplama yüzeyini metalografik inceleme için dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesit alanı yüzeyindeki kaplama ve mikro yapı için görüntülenmesi için %3’lük nital dağlama yapılmıştır. Dağlama işleminden sonra borür tabaka kalınlığı ve mikro yapı görüntüleri için Resim 3.9’da görölen dijital kamera monte edilmiş Nikon Eclipse MA 100 modeli ışık mikroskobu ile borür tabaka kalınlığı ve mikro yapı görüntüleri analiz edilmiştir.



Resim 3.7. Bakalite Alma Cihazı



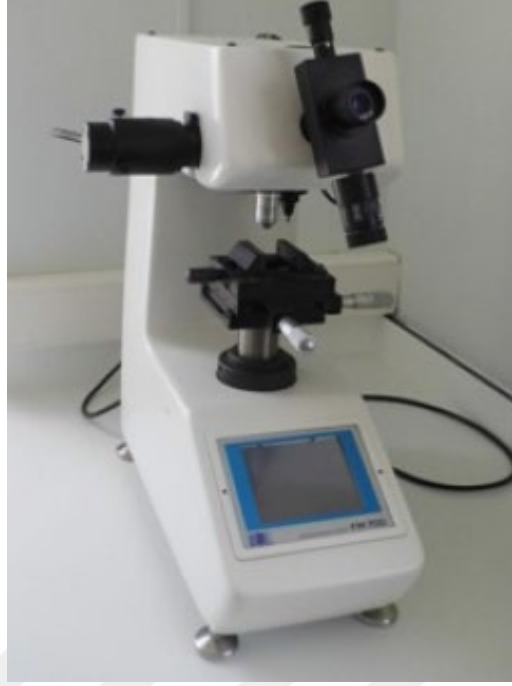
Resim 3.8. Mikrotest Marka Yarı Otomatik Zımpara ve Parlatma Cihazı



Resim 3.9. Nikon Marka Optik Mikroskop

3.8.2 Tuz Banyosunda Borlanan Numunelerin Mikro Sertlik Analizi

Tuz banyosunda borlanan St52 yapı çeliği numunelerin yüzeylerinden mikro sertlik ölçümleri için Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde metalografi laboratuvarında bulunan Resim 2.10'da görülen FutureTech FM-700 modeli mikro sertlik cihazı kullanılarak Vickers iz hesaplama yöntemi kullanılmıştır. 3 ayrı bölgeden Vickers izler alınarak yüzey kaplama sertlikleri tespit edilmiştir. Vickers sertlik için 10 gr'lık yük altında sert elmas uç ölçüm yapılacak yüzeye 10 sn süre ile iz bırakıp ölçümler yapılmıştır.



Resim 3.10. Future Tech FM-700 Marka Sertlik Cihazı

3.8.3 Tuz Banyosunda Borlanan Numunelerin SEM, EDS ve Mapping Analizlerin İncelenmesi

Tuz banyosunda borlanan numuneler, borlama tabakası ile ana malzemenin içyapı görüntüleri tespiti için, Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarında bulunan Tescan firması tarafından imalat edilen MAIA3 analitik taramalı elektron mikroskopunda (SEM) ultra yüksek görüntü kalitesinde görüntüler incelenmiştir.

SEM cihazı içerisinde bulunan EDS detektörü sayesinde borlanan numune yüzeyinde kimyasal elementer analizi ve mapping analizi ile elementlerin tayini gerçekleştirilmiştir. Resim 3.11’de SEM ve EDS cihazı yer almaktadır.



Resim 3.11. SEM, EDS ve Mapping Cihazı

BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

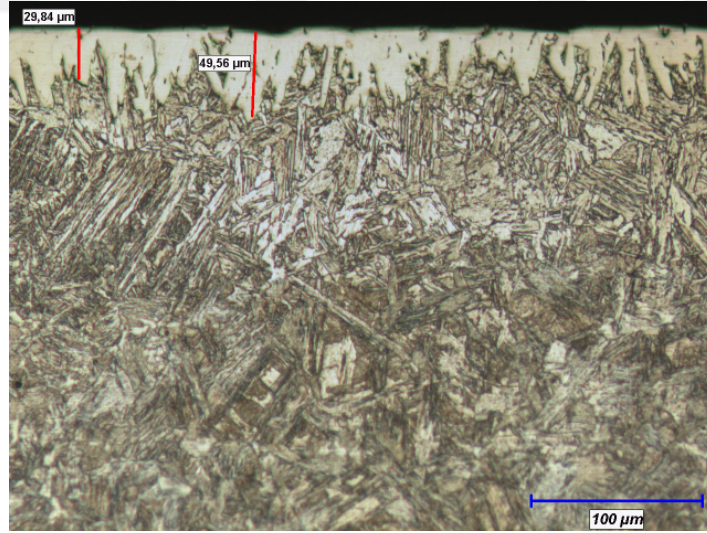
4.1. Giriş

Bu çalışmada, St52 yapı çeliği tuz banyosu borlama tekniği kullanılarak borlanmıştır. Kaplama işlemi 1000, 1050 ve 1100°C'lik sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerde gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemi sonrasında numuneler üzerinde optik mikroyapı, SEM, EDS, Mapping, XRD ve mikrosertlik analiz çalışmaları yapılmış ve sonuçlar tartışılmıştır.

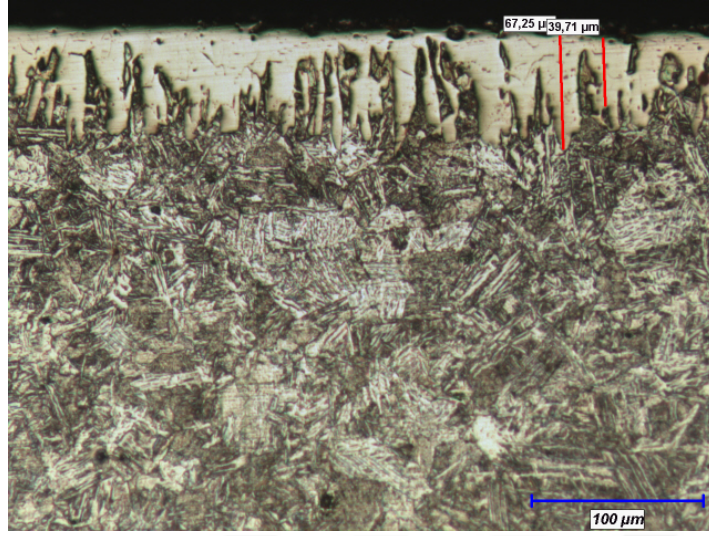
4.2 Optik Mikro Yapı Analiz Sonuçları

St52 yapı çeliğinin 1000, 1050 ve 1100°C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerde yapılan tuz banyosu borlama deneyleri sonucunda kaplama tabakası kesitinden alınan optik mikroyapı fotoğrafları aşağıda verilmiştir.

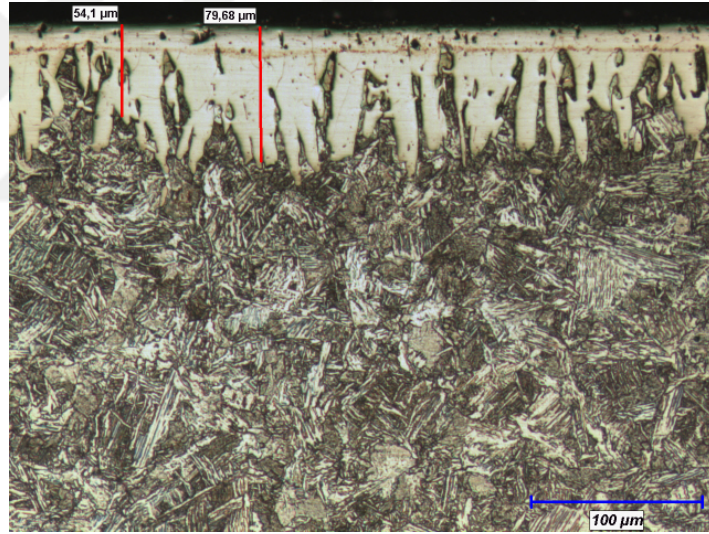
1000°C'lik sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat süre parametrelerinde borlanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları Resim 4.1'de görülmektedir.



(a)



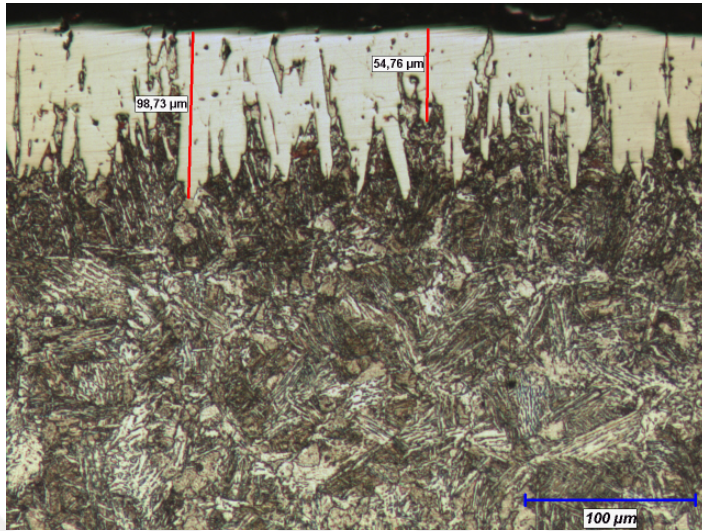
(b)



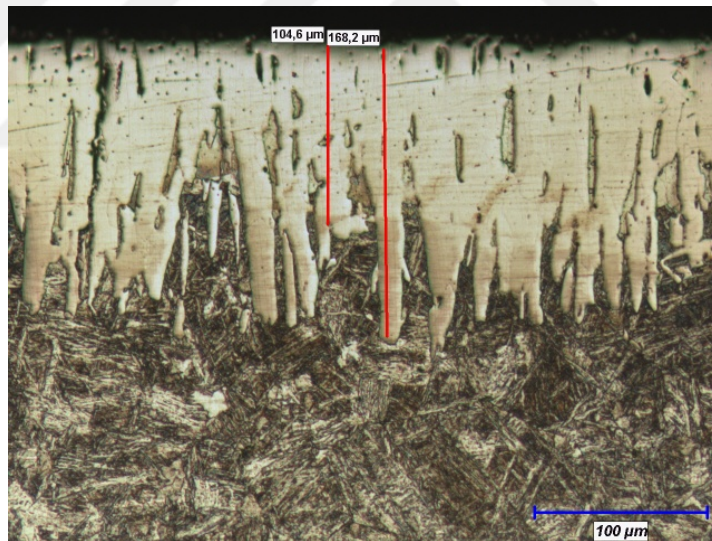
(c)

Resim 4.1. 1000 0C'lik sıcaklıkta 2 (a), 4 (b) ve 6 (c) saat sürelerde borlanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları

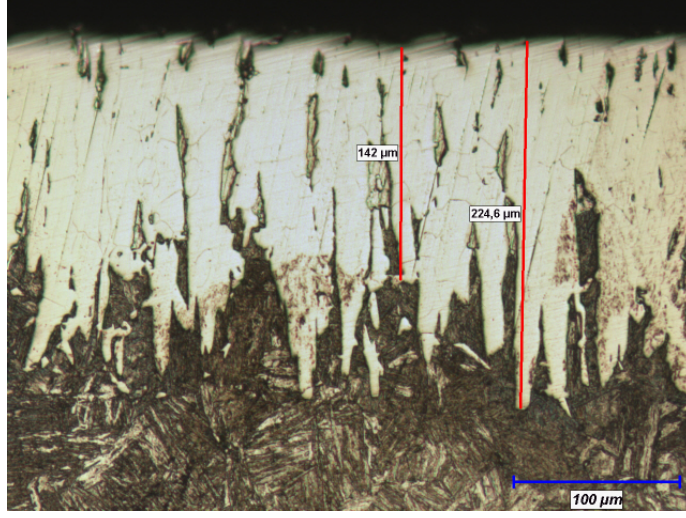
1000⁰C'de 2,4 ve 6 saat sürelerde borlanan numunelerde 2 saatlik bekleme süresinde 29,84 - 49,56 μm 4 saatlik bekleme süresinde 39,71 – 67,25 μm 6 saatlik bekleme süresinde 54,1 – 79,68 μm borür tabaka kalınlığı tespit edilmiştir. Tabaka kalınlığının yüzey boyunca homojen ve artan kaplama süresiyle birlikte arttığı tespit edilmiştir. Ana malzeme mikro yapısının ise soğuma hızına bağlı olarak beynit ve martenzitten meydana geldiği görülmektedir.



(d)



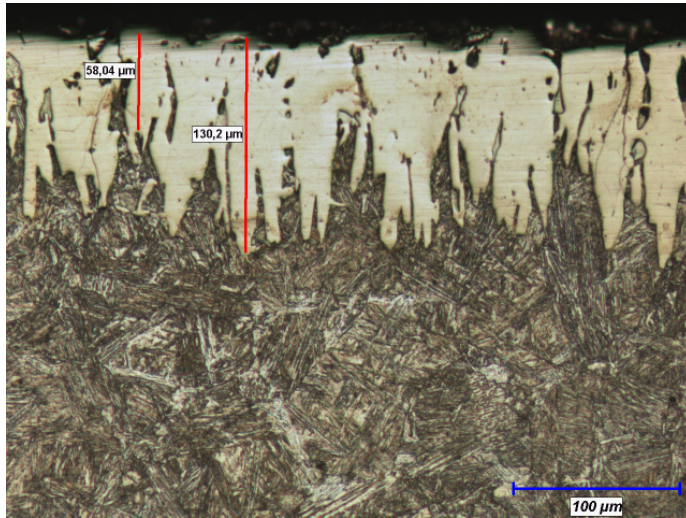
(e)



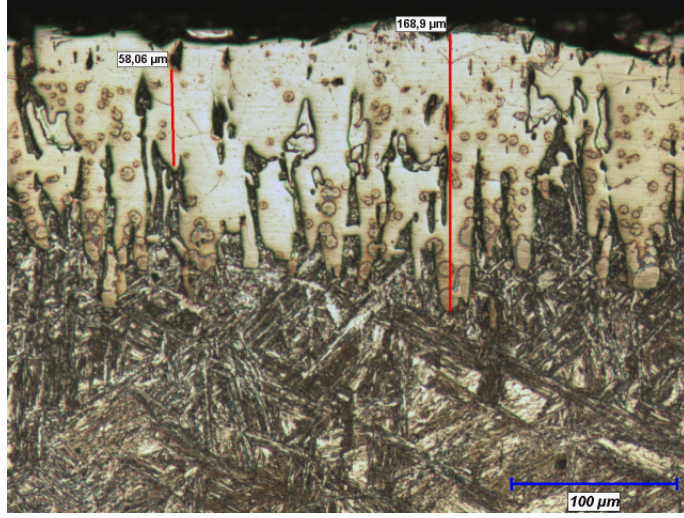
(f)

Resim 4.2. 1050 0C'lik sıcaklıkta 2 (d), 4 (e) ve 6 (f) saat sürelerde borlanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları

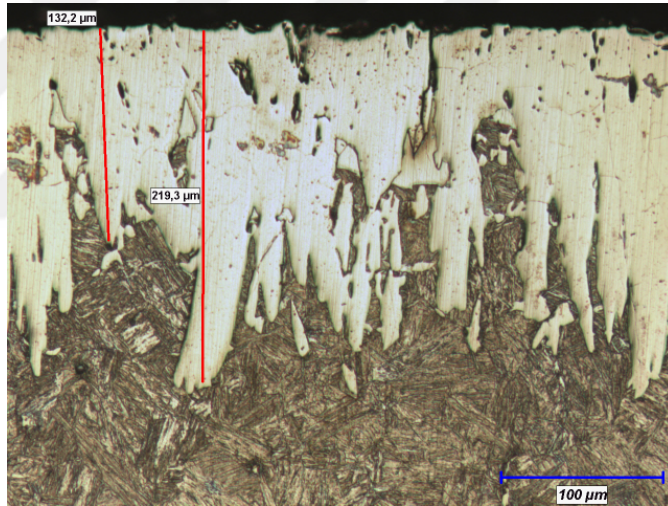
1050⁰C'de 2,4 ve 6 saat sürelerde borlanan numunelerde 2 saatlik bekleme süresinde 54,76–98,731μm 4 saatlik bekleme süresinde 104,6 – 168,2μm 6 saatlik bekleme süresinde 142 – 224,6μm kaplama kalınlığı tespit edilmiştir Tabaka kalınlığının yüzey boyunca homojen ve artan kaplama süresiyle birlikte arttığı tespit edilmiştir. Ana malzeme mikro yapısının ise soğuma hızına bağlı olarak beynit ve martenzitten meydana geldiği görülmektedir.



(g)



(h)



(i)

Resim 4.3. 1100⁰C'lik sıcaklıkta 2 (g), 4 (h) ve 6 (i) saat sürelerde borlanan numunelerin optik mikroyapı fotoğrafları

1100⁰C'de 2,4 ve 6 saat sürelerde TiBC kaplanan numunelerde 2 saatlik bekleme süresinde 58,04 – 130,2μm 4 saatlik bekleme süresinde 58,06 – 168,9μm 6 saatlik bekleme süresinde 132,2 – 219,3 μm kaplama kalınlığı tespit edilmiştir. Tabaka kalınlığının yüzey boyunca homojen ve artan kaplama süresiyle birlikte arttığı tespit edilmiştir. Ana malzeme mikro yapısının ise soğuma hızına bağlı olarak beynit ve martenzitten meydana geldiği görülmektedir.

Tablo 4.1. Borür Tabaka Kalınlığı

Borür Tabaka Kalınlığı(μm)			
Sıcaklık	2t	4t	6t
1000 $^{\circ}\text{C}$	29,84 - 49,56 μm	39,71 – 67,25 μm	54,1 – 79,68 μm
1050 $^{\circ}\text{C}$	54,76 – 98,731 μm	104,6 – 168,2 μm	142 – 224,6 μm
1100 $^{\circ}\text{C}$	58,04 – 130,2 μm	58,06 – 168,9 μm	132,2 – 219,3 μm

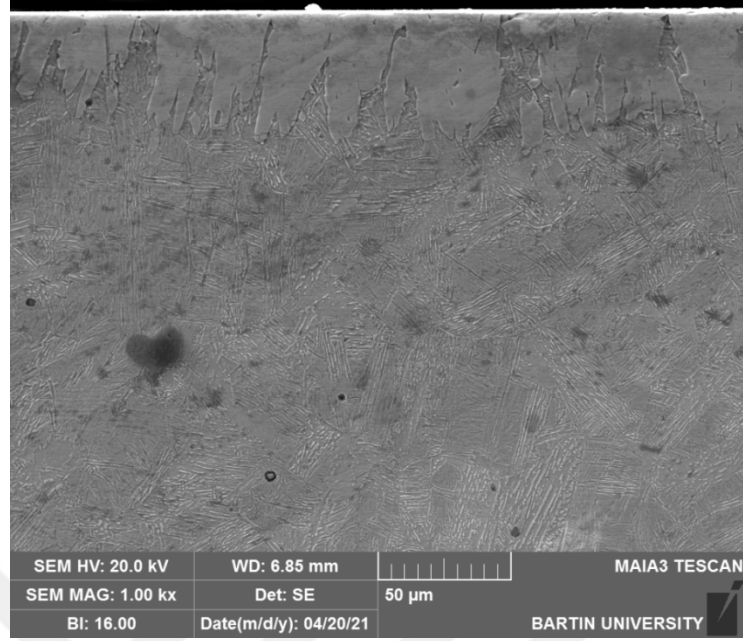
Tabloda da görüldüğü üzere borür tabaka kalınlıkları artan sıcaklık ve süreyle birlikte düzenli bir artış sergilemiş ve maksimum kaplama kalınlığı 224,6 μm olarak elde edilmiştir.

4.2 Borlanan Numunelerin SEM, EDS ve Mapping Analiz Sonuçları

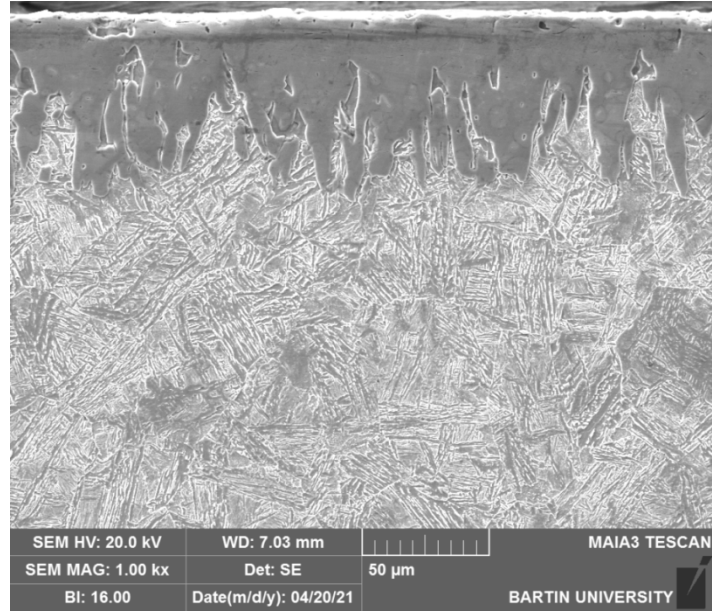
Tez çalışmasında tuz banyosunda TRD yöntemi ile borlama yapılan numunelerin SEM fotoğrafları incelenmiştir. Borlama yapılan numunelerin kesitlerinden alınan SEM fotoğraflarıyla birlikte noktasal EDS analizleriyle borür tabakası element oranları ve yine mapping analizi ile de borür ve ana malzeme element dağılımı belirlenmiştir

4.2.1 Borlanan Numunelerin SEM Analiz Sonuçları

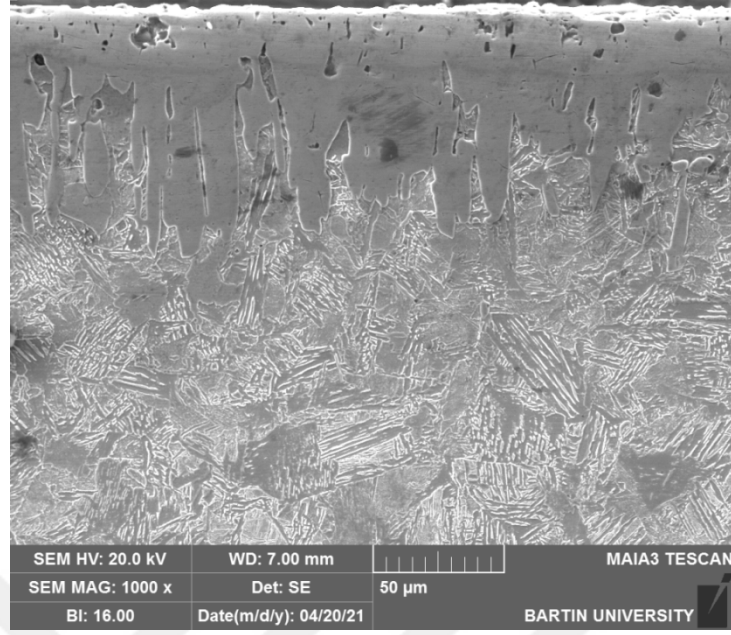
1000 $^{\circ}\text{C}$ de 2, 4, 6 saat borlanmış St52 çeliğinin mikro yapısının SEM görüntüleri verilmiştir. Borür tabakaların oluşumu ilk olarak borun yüzeye adsorpsiyonu (tutunması) ile ilişkilidir. Sıcaklığın artışıyla birlikte borun ana malzemeye doğru belirli yönlerde difüzyonu artmaktadır. Borürlerin oluşumu ilk olarak ana yapıdaki bor içeriğinin ara yüzeyde kritik bir değeri aşmasıyla başlamaktadır.



Resim 4.4. 1000 °C de 2 saat borlama Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S1)

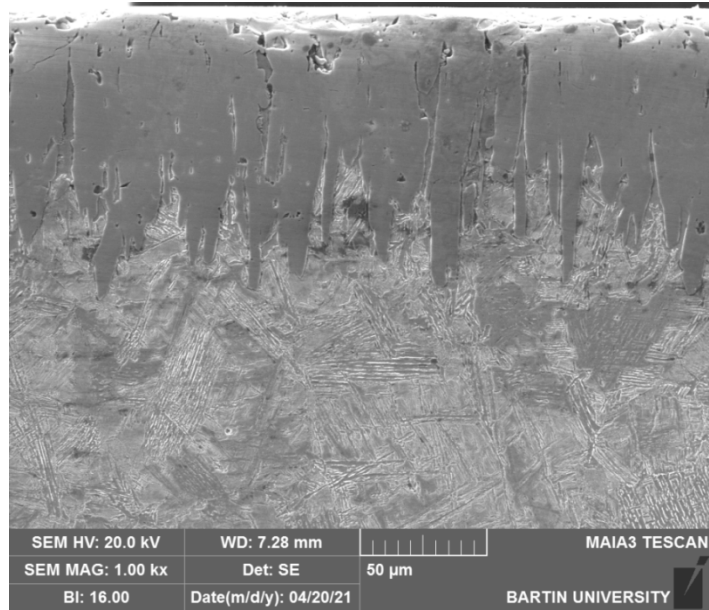


Resim 4.5. 1000°Cde 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S2)

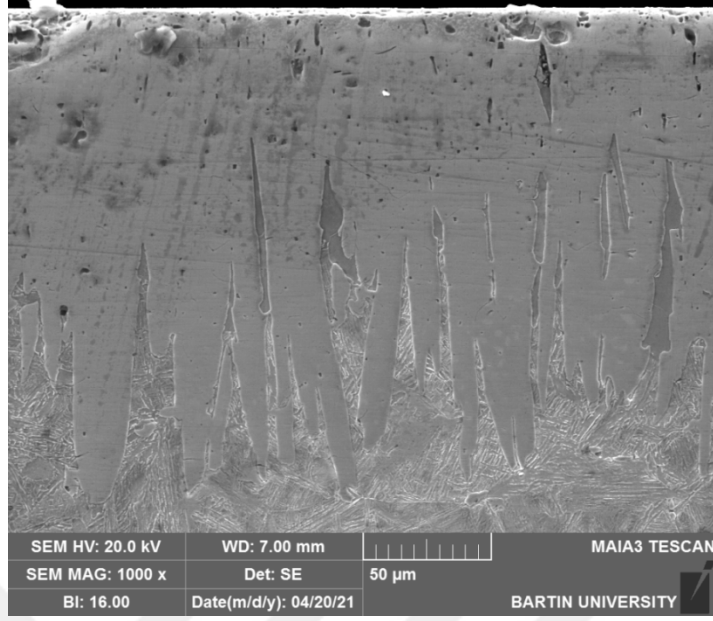


Resim 4.6. 1000 °C de 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S3)

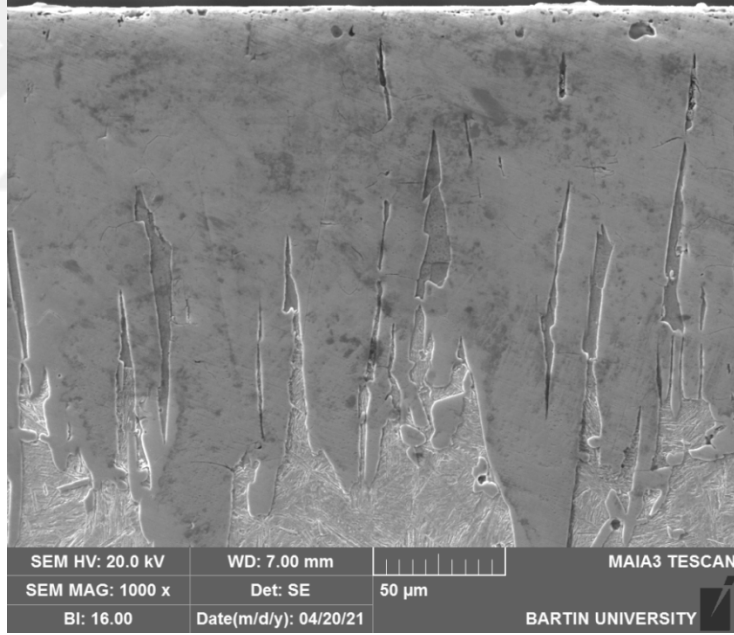
1050 °C'lik sıcaklık ve 2, 4 ve 6 saatlik sürelerde borlanan St52 çeliğinin kaplama kesiti SEM fotoğraflarından her üç sürede de tüm yüzey boyunca elde edilmiştir. Aynı zamanda artan süreyle birlikte borür tabaka kalınlığı artmıştır.



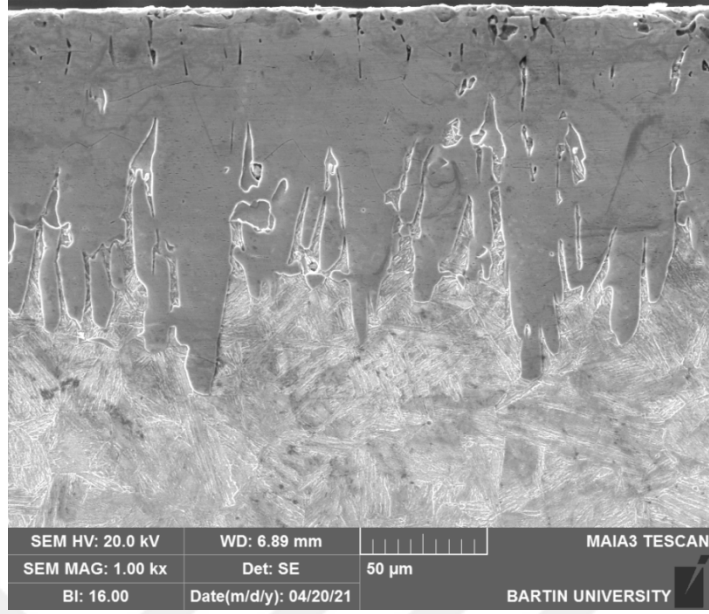
Resim 4.7. 1050°Cde 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S4)



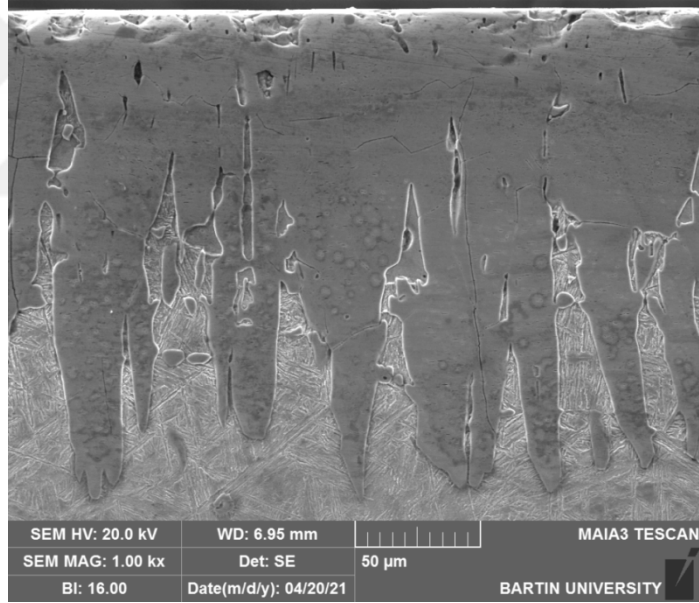
Resim 4.8. 1050 °C de 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S5)



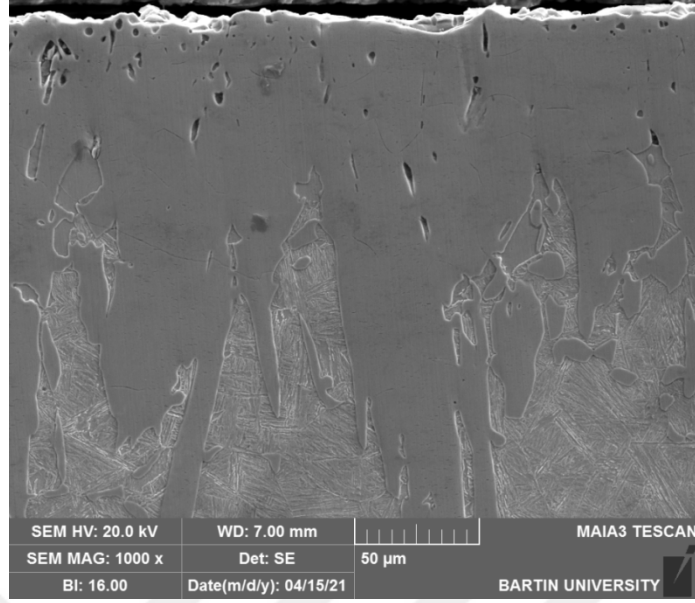
Resim 4.9. 1050 °Cde 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S6)
1100°C’de gerçekleştirilen borür kaplama neticesinde elde edilen SEM fotoğraflarından kaplama kalınlıklarının optik mikro yapı çalışmasıyla tespit edilen kaplama kalınlıklarını desteklemektedir.



Resim 4.10. 1100°Cde 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S7)



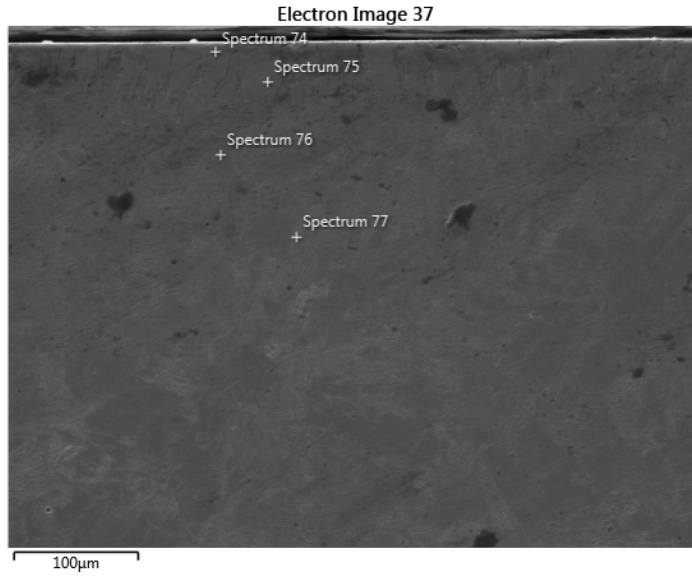
Resim 4.11.1100 °C de 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S8)

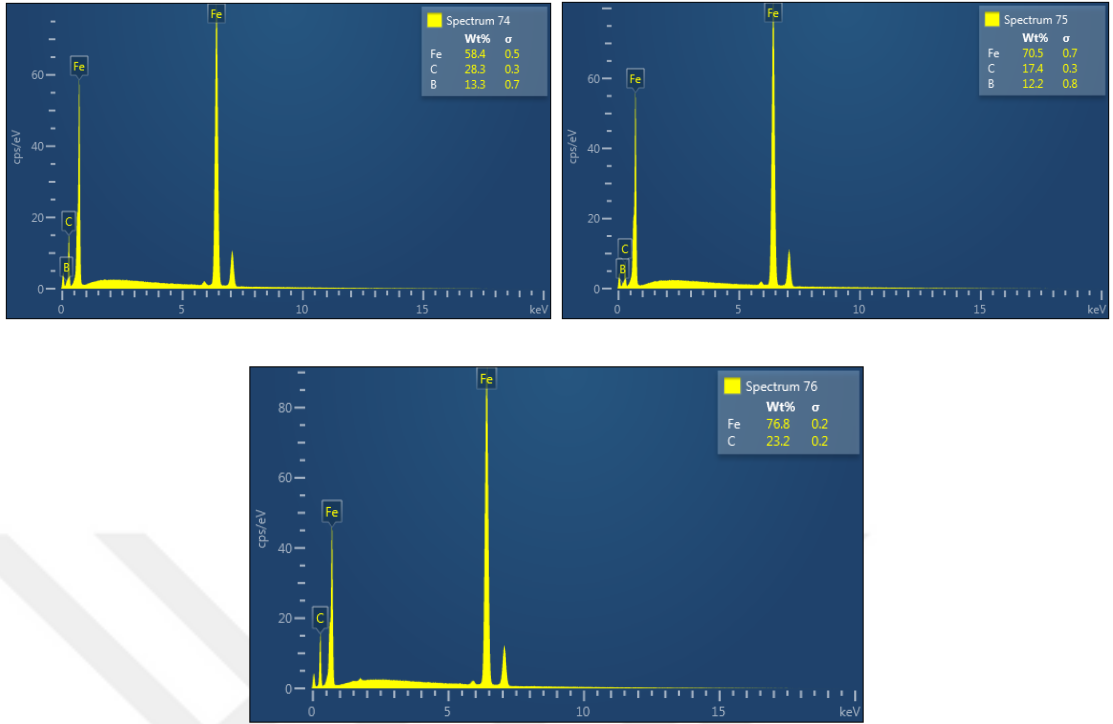


Resim 4.12. 1100 °C de 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin SEM Analizi Sonucu (S9)

4.2.2 Borlanan Numunelerin EDS Analiz Sonuçları

1000°C'lik sıcaklık 2 saat süre parametresi kullanılarak borlanan St52 yapı çeliğinin kaplama kesitinden alınan EDS analiz sonuçları Resim 4.13'de görülmektedir.

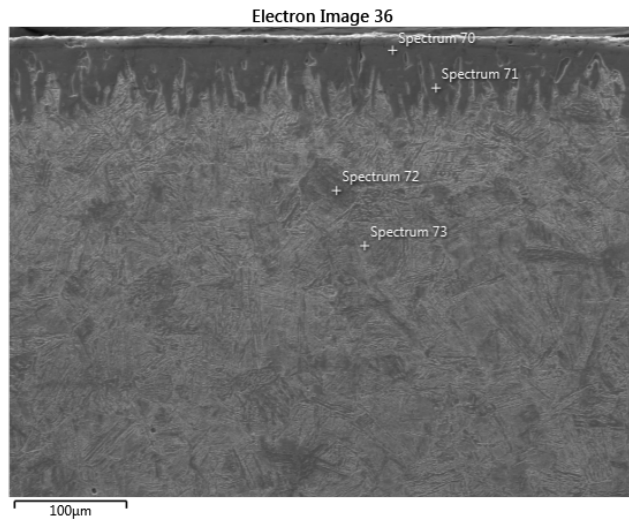


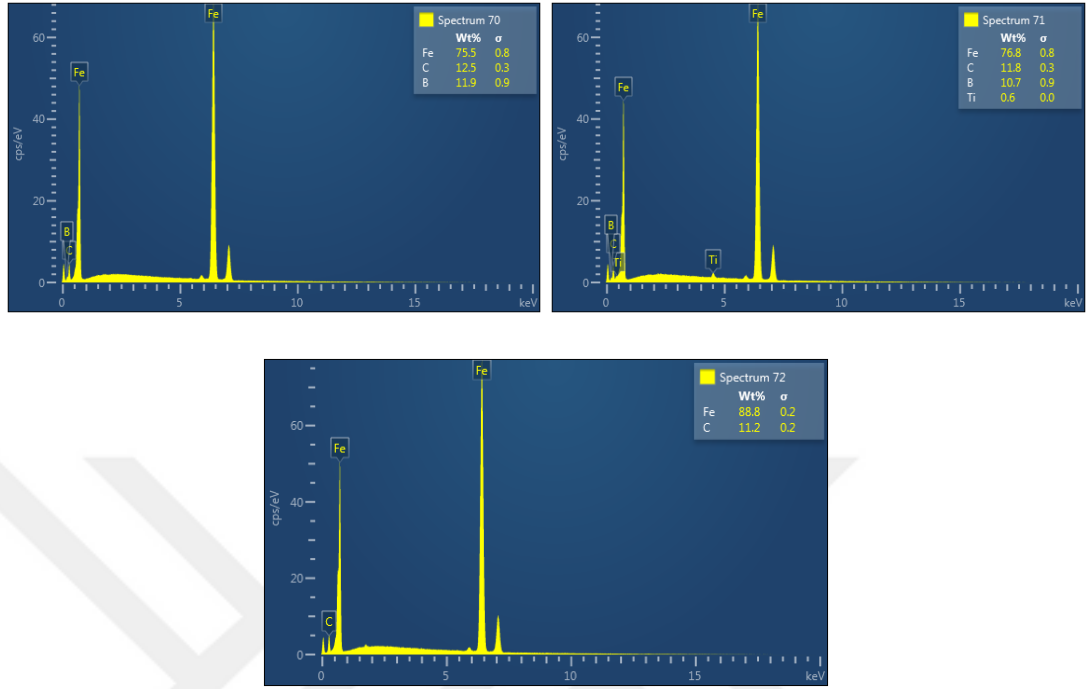


Resim 4.13.1000 °C de 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S1)

1000 °C’de 2 saat süreyle yapılan borlamanın kaplama tabakasından alınan noktasal EDS analiz sonucunda ağırlıkça % 13.3 B, % 28.3 C ve % 58.4 Fe tespit edilmiştir. Elde edilen sonuç Fe_2B fazına işaret etmektedir. Kapsama tabakasının ana malzemeye yakın olan kısmından alına EDS analiz sonucunda ise % Fe oranının arttığı görülmektedir.

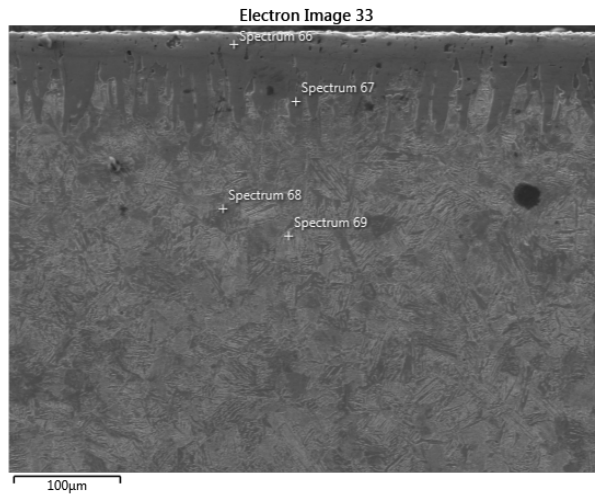
1000 °C’lik sıcaklık 4 saat süre parametresi kullanılarak borlanan St52 yapı çeliğinin kaplama kesitinden alınan EDS analiz sonuçları Resim 4.14’de görülmektedir.

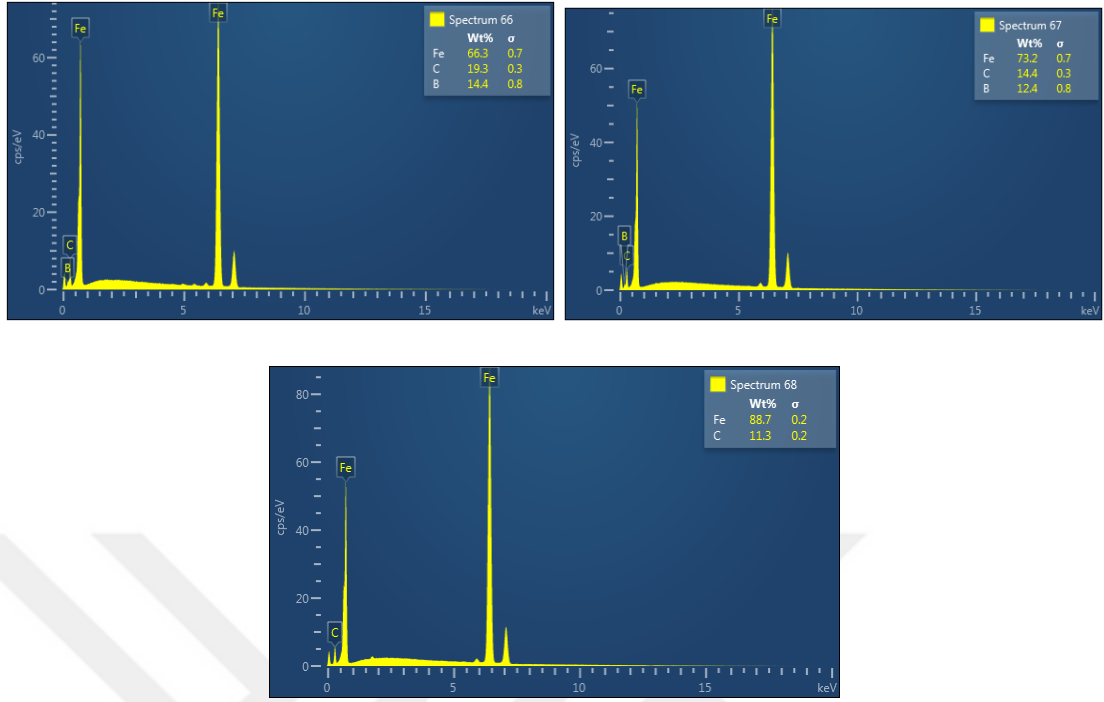




Resim 4.14. 1000 °C'de 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S2) 1000 °C'de 4 saat süreyle yapılan borlamanın kaplama tabakasından alınan noktasal EDS analiz sonucunda ağırlıkça % 11.9 B, % 12.5 C ve % 75.5 Fe tespit edilmiştir. Elde edilen sonuç Fe_2B fazına işaret etmektedir. Kaplama tabakasının ana malzemeye yakın olan kısmından alına EDS analiz sonucunda ise % Fe oranının arttığı görülmektedir.

1000°C'lik sıcaklık 6 saat süre parametresi kullanılarak borlanan St52 yapı çeliğinin kaplama kesitinden alınan EDS analiz sonuçları Resim 4.15'de görülmektedir.

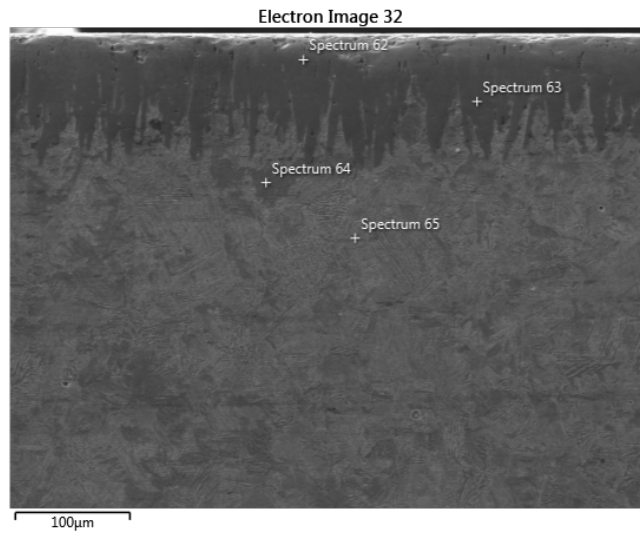


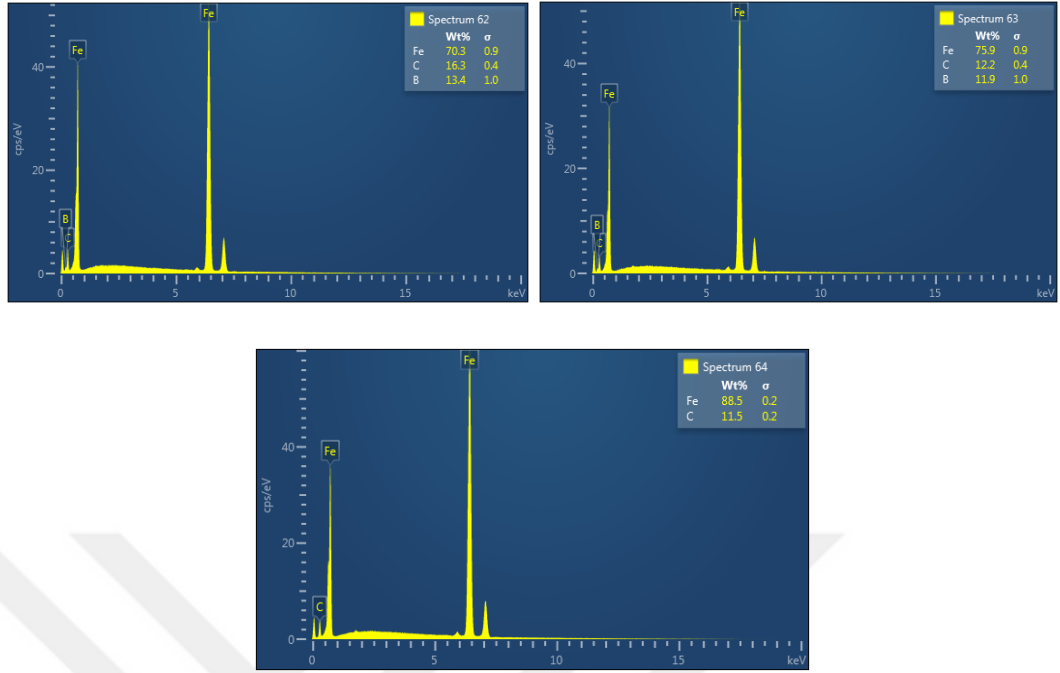


Resim 4.15. 1000 °C'de 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S3)

1000 °C'de 6 saat süreyle yapılan borlamanın kaplama tabakasından alınan noktasal EDS analiz sonucunda ağırlıkça % 14.4 B, % 19.3 C ve % 66.3 Fe tespit edilmiştir. Elde edilen sonuç Fe_2B fazına işaret etmektedir. Kaplama tabakasının ana malzemeye yakın olan kısmından alınan EDS analiz sonucunda ise % Fe oranının arttığı görülmektedir.

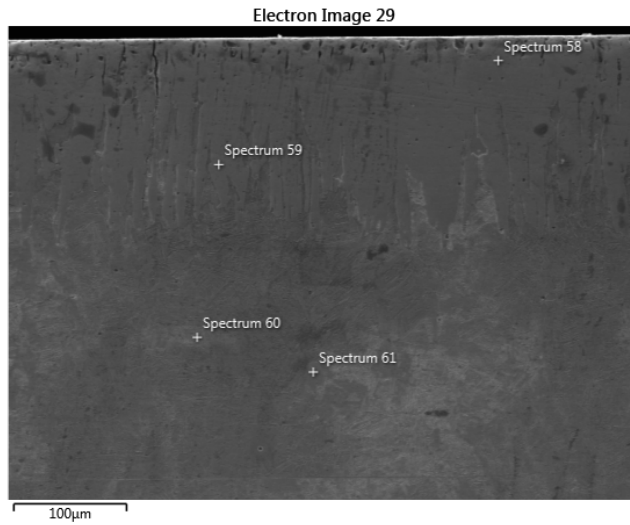
1050°C'lik sıcaklık 2 saat süre parametresi kullanılarak borlanan St52 yapı çeliğinin kaplama kesitinden alınan EDS analiz sonuçları Resim 4.16'da görülmektedir

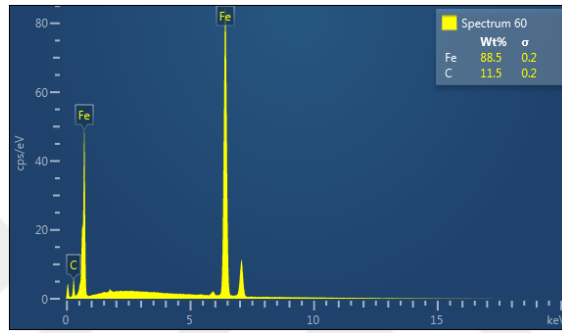
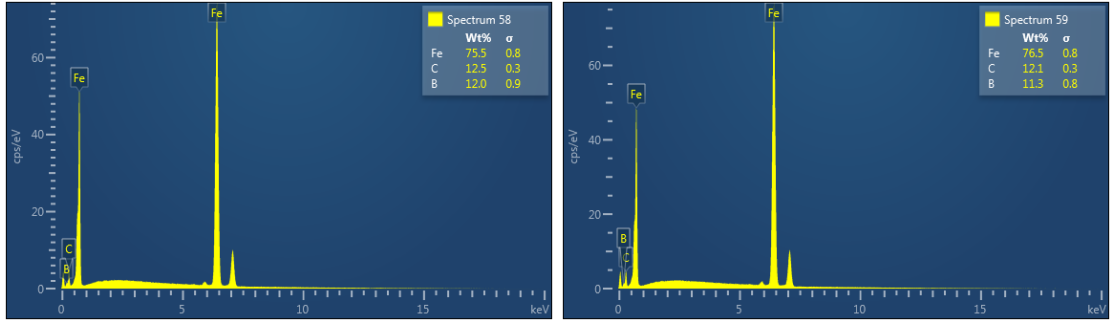




Resim 4.16. 1050°C de 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S4) 1050 °C’de 2 saat süreyle yapılan borlamanın kaplama tabakasından alınan noktasal EDS analiz sonucunda ağırlıkça % 13.4 B, % 16.3 C ve % 70.3 Fe tespit edilmiştir. Elde edilen sonuç Fe₂B fazına işaret etmektedir. Kaplama tabakasının ana malzemeye yakın olan kısmından alına EDS analiz sonucunda ise % Fe oranının arttığı görülmektedir.

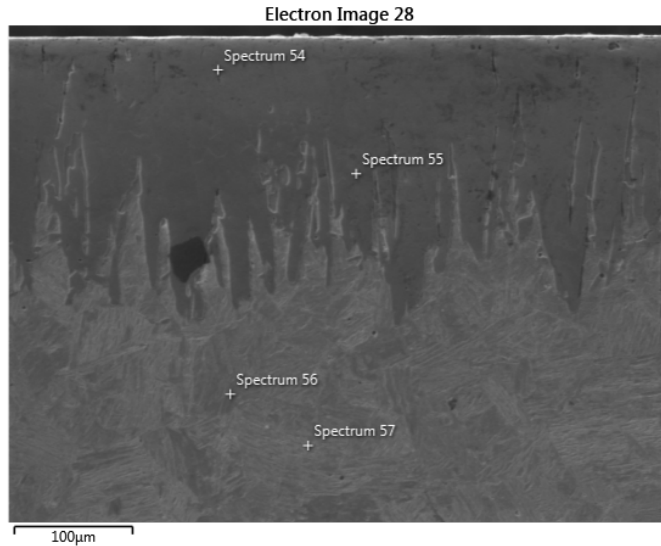
1050°C’lik sıcaklık 4 saat süre parametresi kullanılarak borlanan St52 yapı çeliğinin kaplama kesitinden alınan EDS analiz sonuçları Resim 4.17’de görülmektedir.

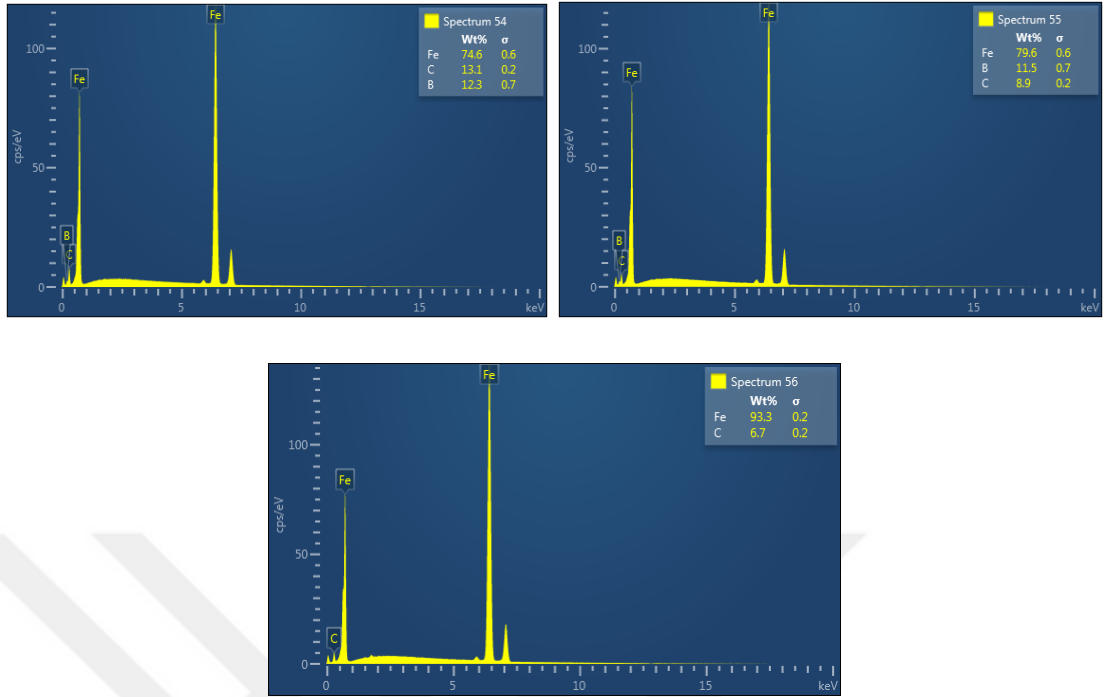




Resim 4.17. 1050°C de 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S5) 1050 °C’de 4 saat süreyle yapılan borlamanın kaplama tabakasından alınan noktasal EDS analiz sonucunda ağırlıkça % 12 B, % 12.5 C ve % 75.5 Fe tespit edilmiştir. Elde edilen sonuç Fe₂B fazına işaret etmektedir. Kaplama tabakasının ana malzemeye yakın olan kısmından alına EDS analiz sonucunda ise % Fe oranının arttığı görülmektedir.

1050 , °C’lik sıcaklık 6 saat süre parametresi kullanılarak borlanan St52 yapı çeliğinin kaplama kesitinden alınan EDS analiz sonuçları Resim 4.18’de görülmektedir.

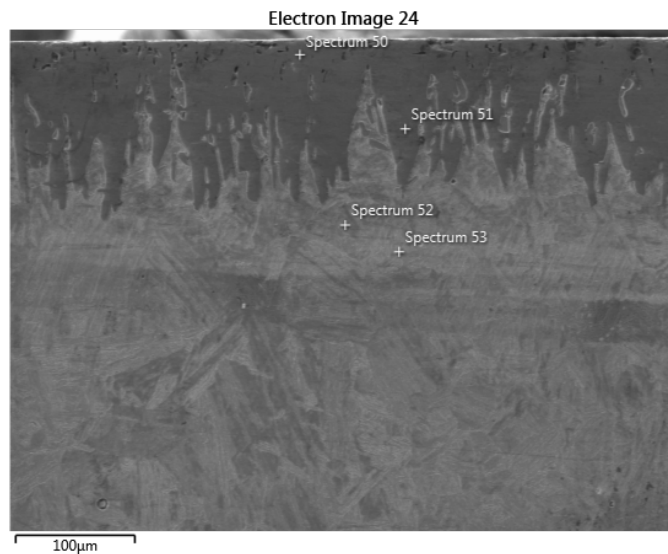


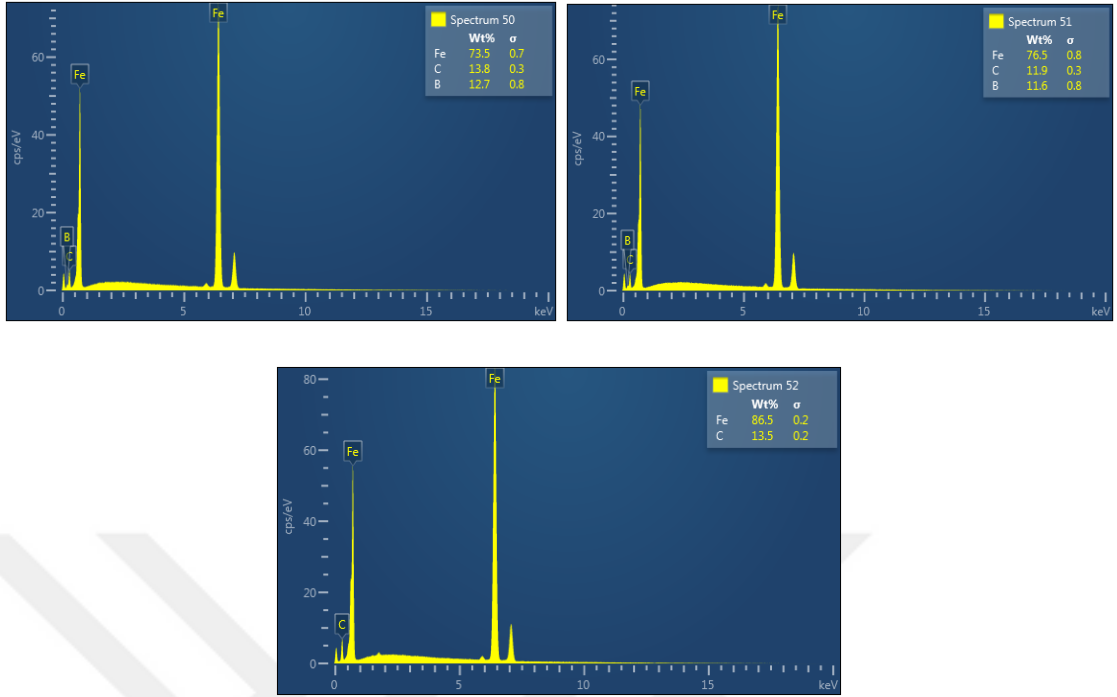


Resim 4.18. 1050°C'lik sıcaklık 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S6)

1050 °C'de 6 saat süreyle yapılan borlamanın kaplama tabakasından alınan noktasal EDS analiz sonucunda ağırlıkça % 12.3 B, % 13.1 C ve % 74.6 Fe tespit edilmiştir. Elde edilen sonuç Fe_2B fazına işaret etmektedir. Kapsama tabakasının ana malzemeye yakın olan kısmından alına EDS analiz sonucunda ise % Fe oranının arttığı görülmektedir.

1100°C'lik sıcaklık 2 saat süre parametresi kullanılarak borlanan St52 yapı çeliğinin kaplama kesitinden alınan EDS analiz sonuçları Resim 4.19'da görülmektedir.

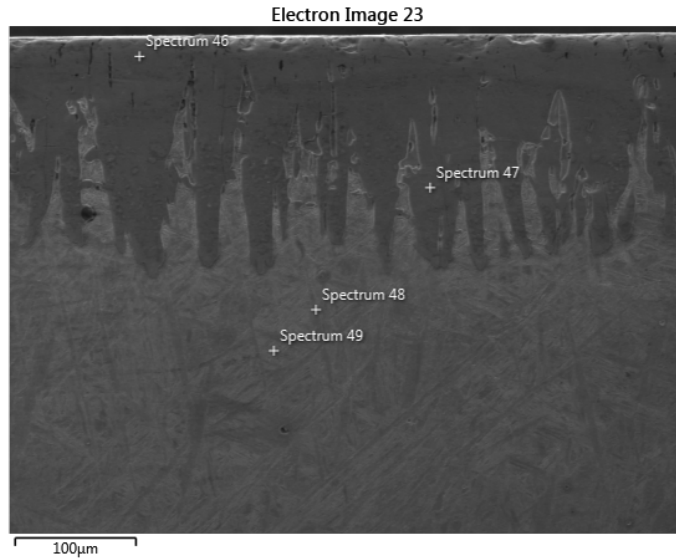


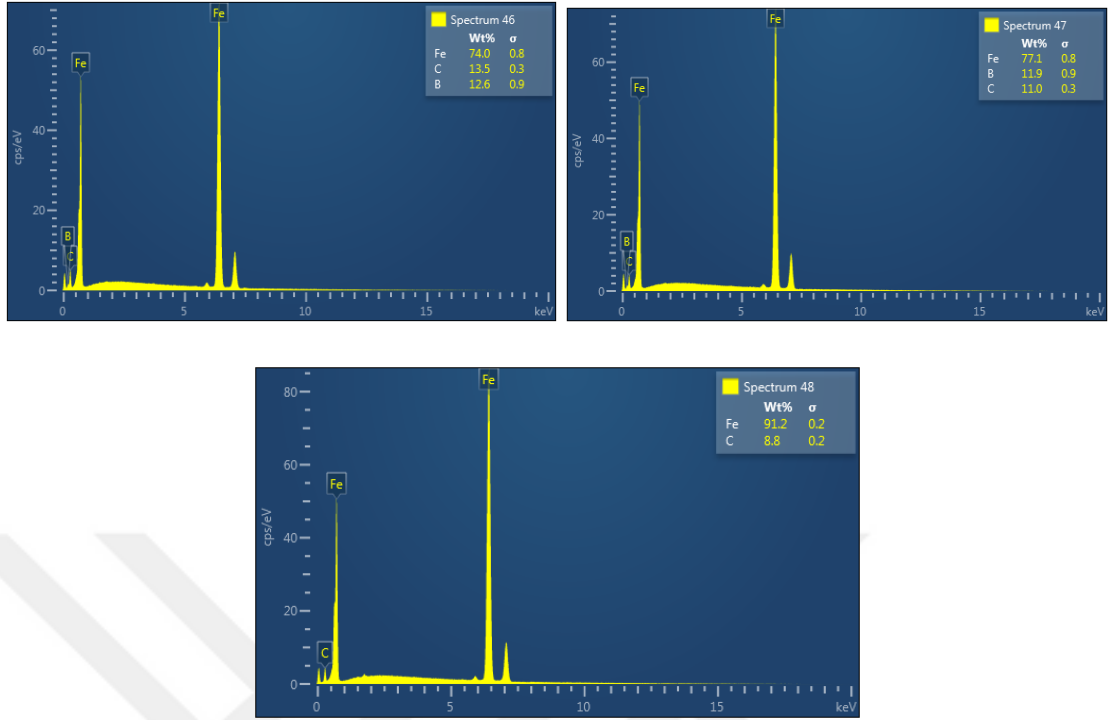


Resim 4.19. 1100°C'lik sıcaklık 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S7)

1100 °C'de 2 saat süreyle yapılan borlamanın kaplama tabakasından alınan noktasal EDS analiz sonucunda ağırlıkça % 12.7 B, % 13.8 C ve % 73.5 Fe tespit edilmiştir. Elde edilen sonuç Fe_2B fazına işaret etmektedir. Kaplama tabakasının ana malzemeye yakın olan kısmından alına EDS analiz sonucunda ise % Fe oranının arttığı görülmektedir.

1100°C'lik sıcaklık 4 saat süre parametresi kullanılarak borlanan St52 yapı çeliğinin kaplama kesitinden alınan EDS analiz sonuçları Resim 4.20'de görülmektedir.

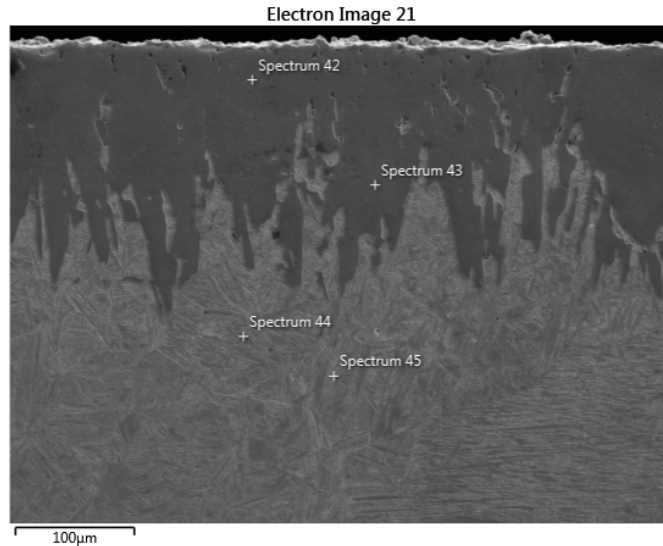


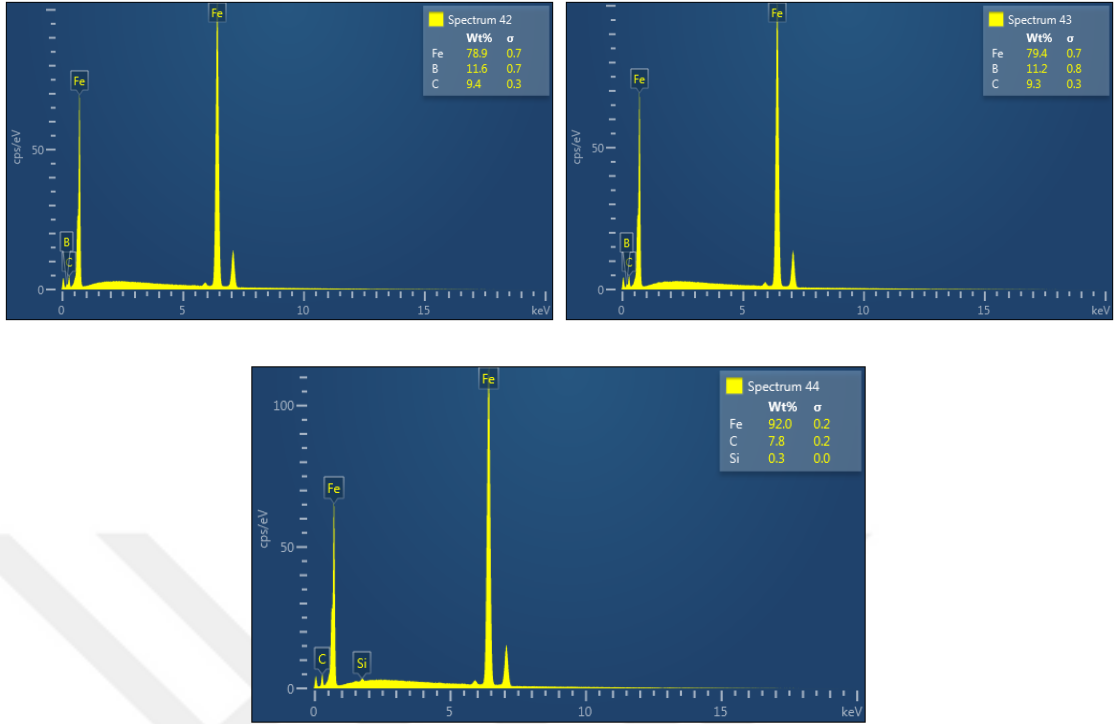


Resim 4.20. 1100°C'lik sıcaklık 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S8)

1100 °C'de 4 saat süreyle yapılan borlamanın kaplama tabakasından alınan noktasal EDS analiz sonucunda ağırlıkça % 12.6 B, % 13.5 C ve % 74 Fe tespit edilmiştir. Elde edilen sonuç Fe_2B fazına işaret etmektedir. Kaplama tabakasının ana malzemeye yakın olan kısmından alınan EDS analiz sonucunda ise % Fe oranının arttığı görülmektedir.

1100°C'lik sıcaklık 6 saat süre parametresi kullanılarak borlanan St52 yapı çeliğinin kaplama kesitinden alınan EDS analiz sonuçları Resim 4.21'de görülmektedir.

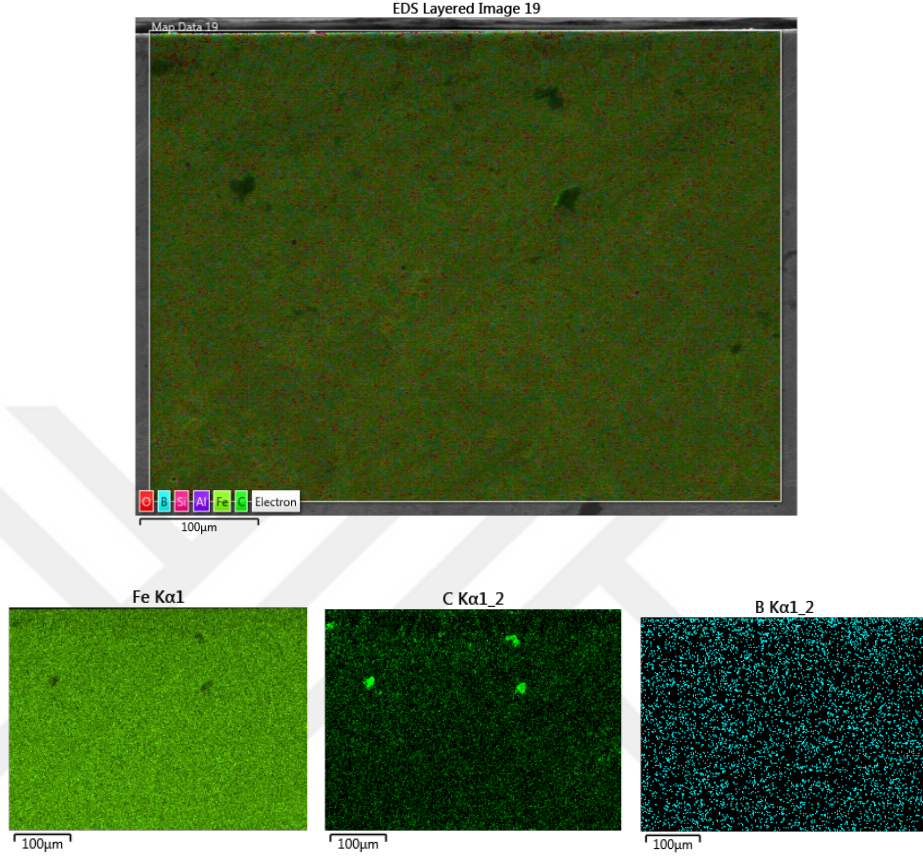




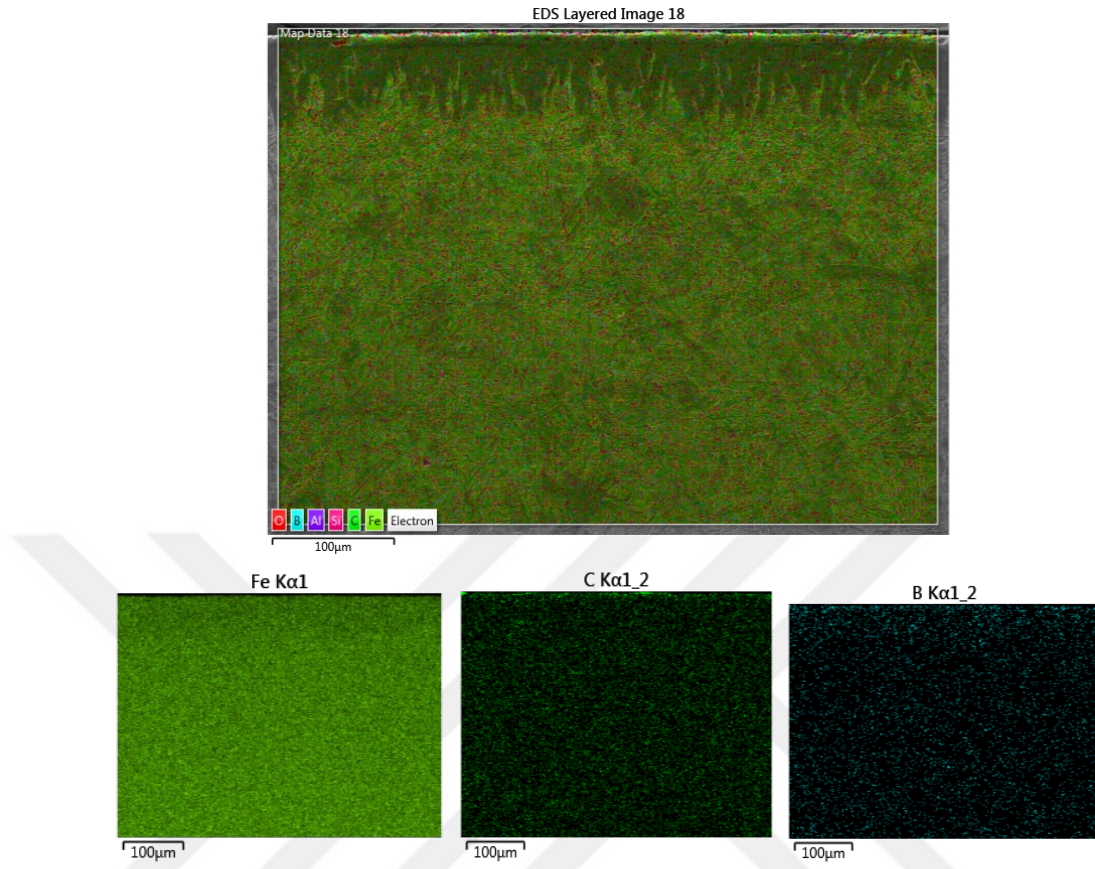
Resim 4.21. 1100⁰C'lik sıcaklık 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin EDS Analizi Sonucu (S9)

1100 °C'de 6 saat süreyle yapılan borlamanın kaplama tabakasından alınan noktasal EDS analiz sonucunda ağırlıkça % 11.6 B, % 9.4 C ve % 78.9 Fe tespit edilmiştir. Elde edilen sonuç Fe₂B fazına işaret etmektedir. Kapsama tabakasının ana malzemeye yakın olan kısmından alına EDS analiz sonucunda ise % Fe oranının arttığı görülmektedir. Artan sıcaklıkla birlikte kaplama tabakası üst noktasında Fe oranının düştüğü sonucuna ulaşılmıştır.

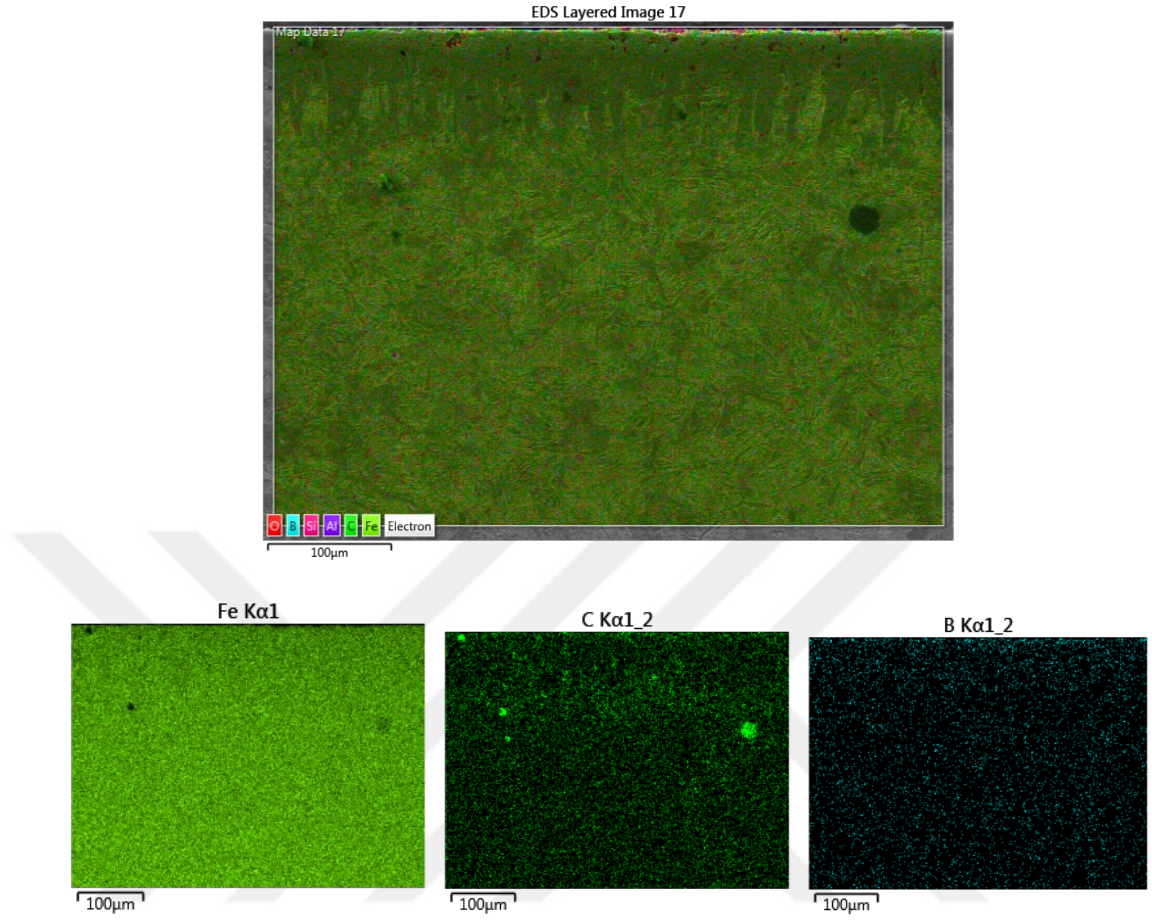
4.2.3 Borlanan Numunelerin Mapping Analiz Sonuçları



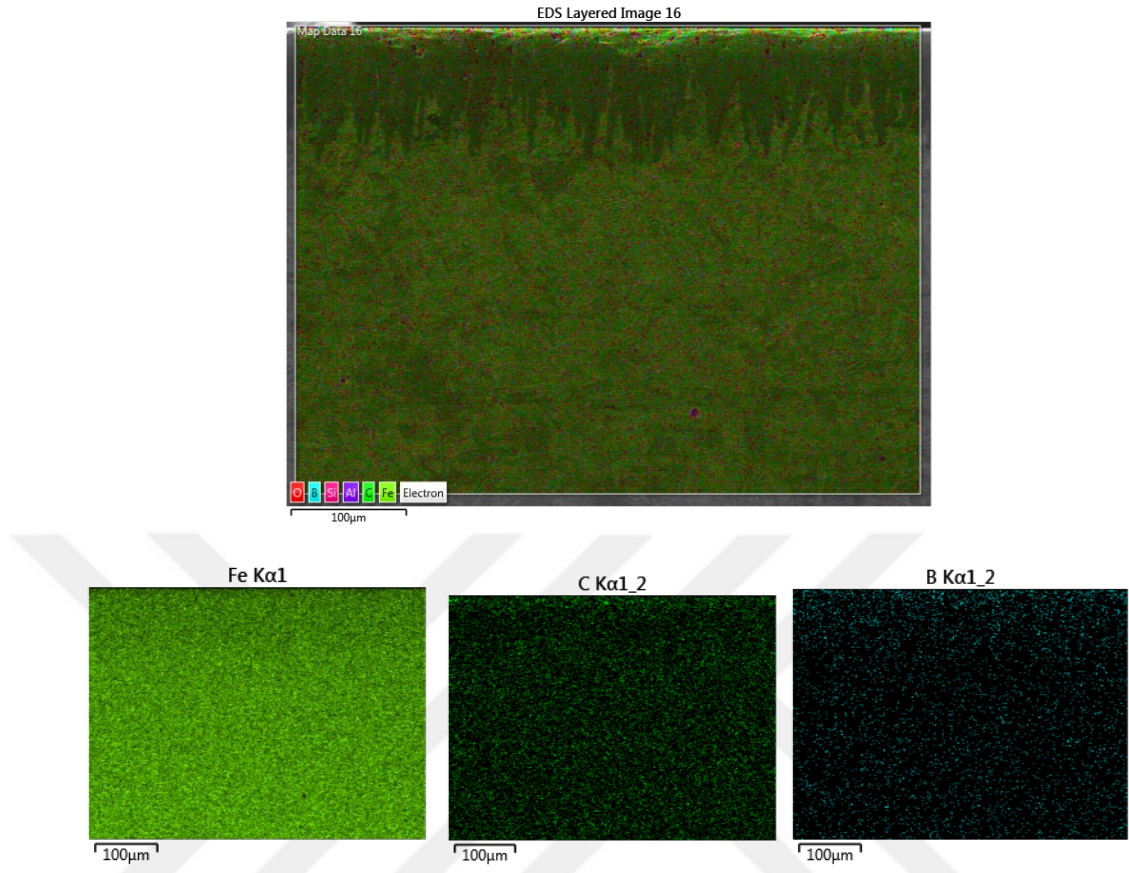
Resim 4.22. 1000 °C de 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S1)



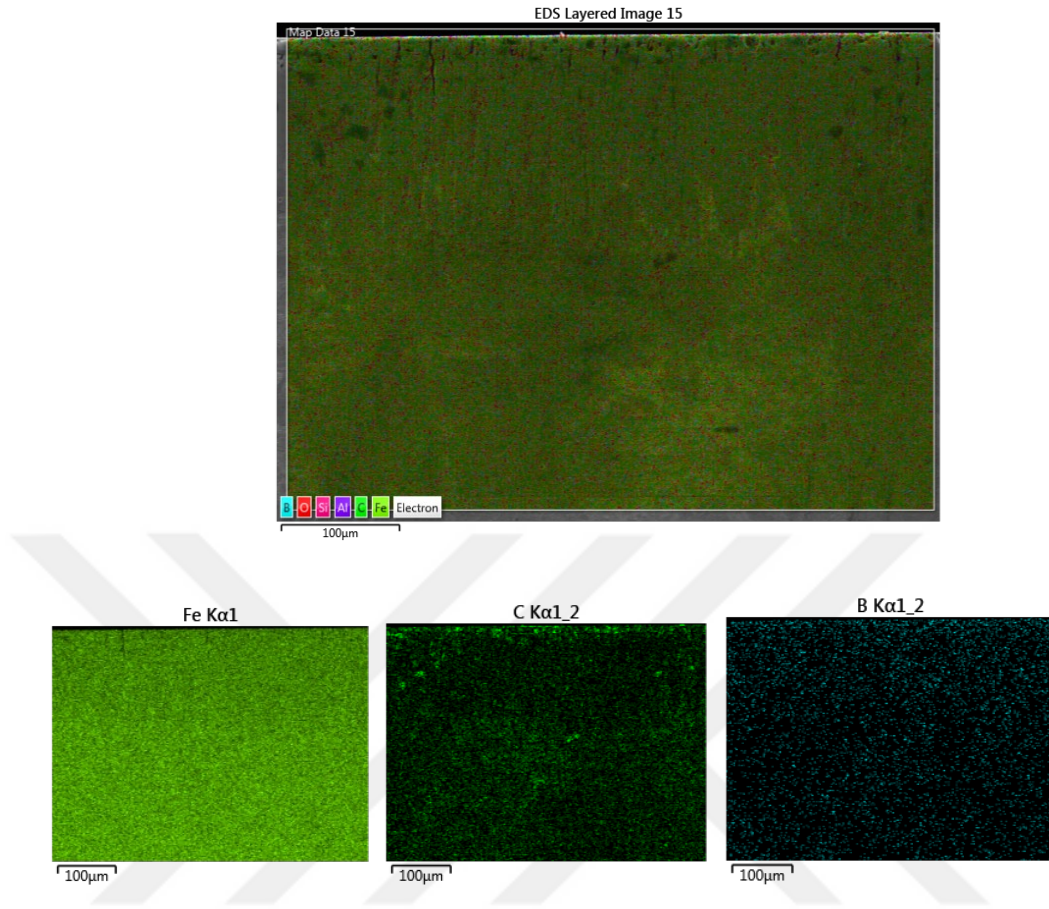
Resim 4.23. 1000 °C de 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S2)



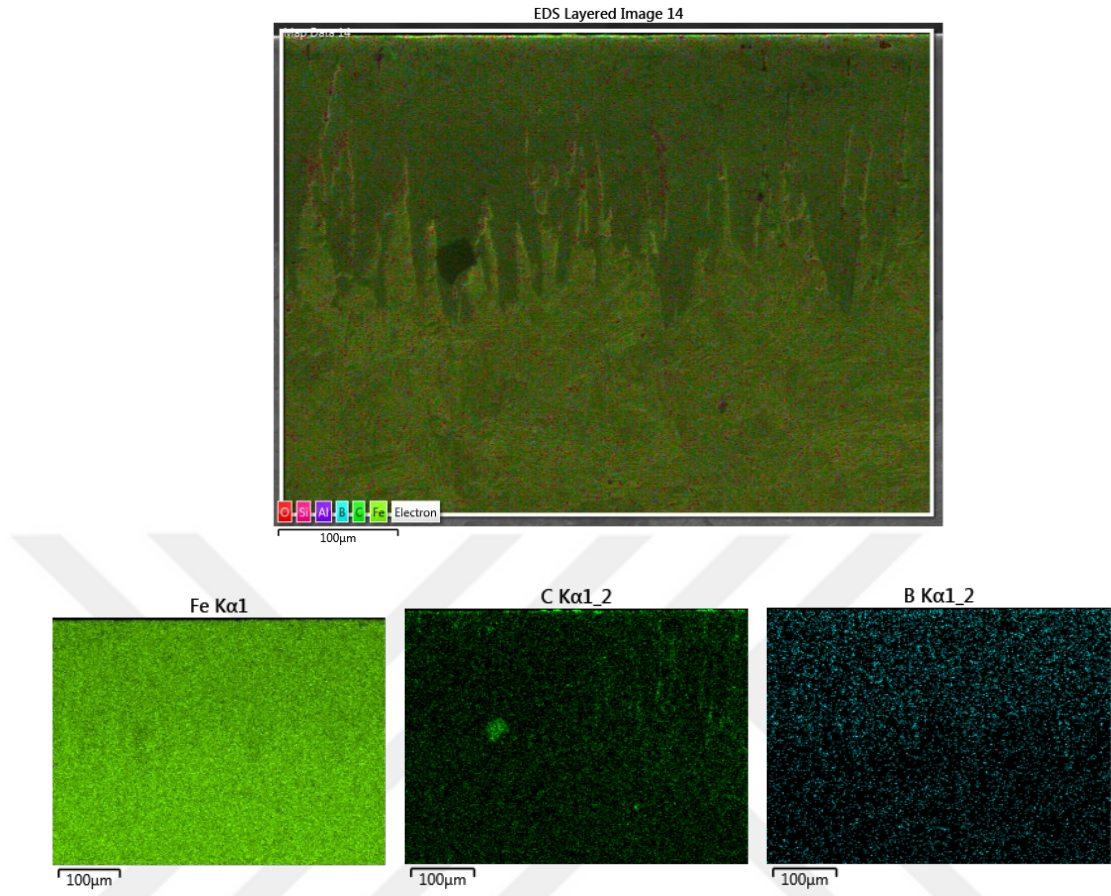
Resim 4.24. 1000 °C de 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S3)



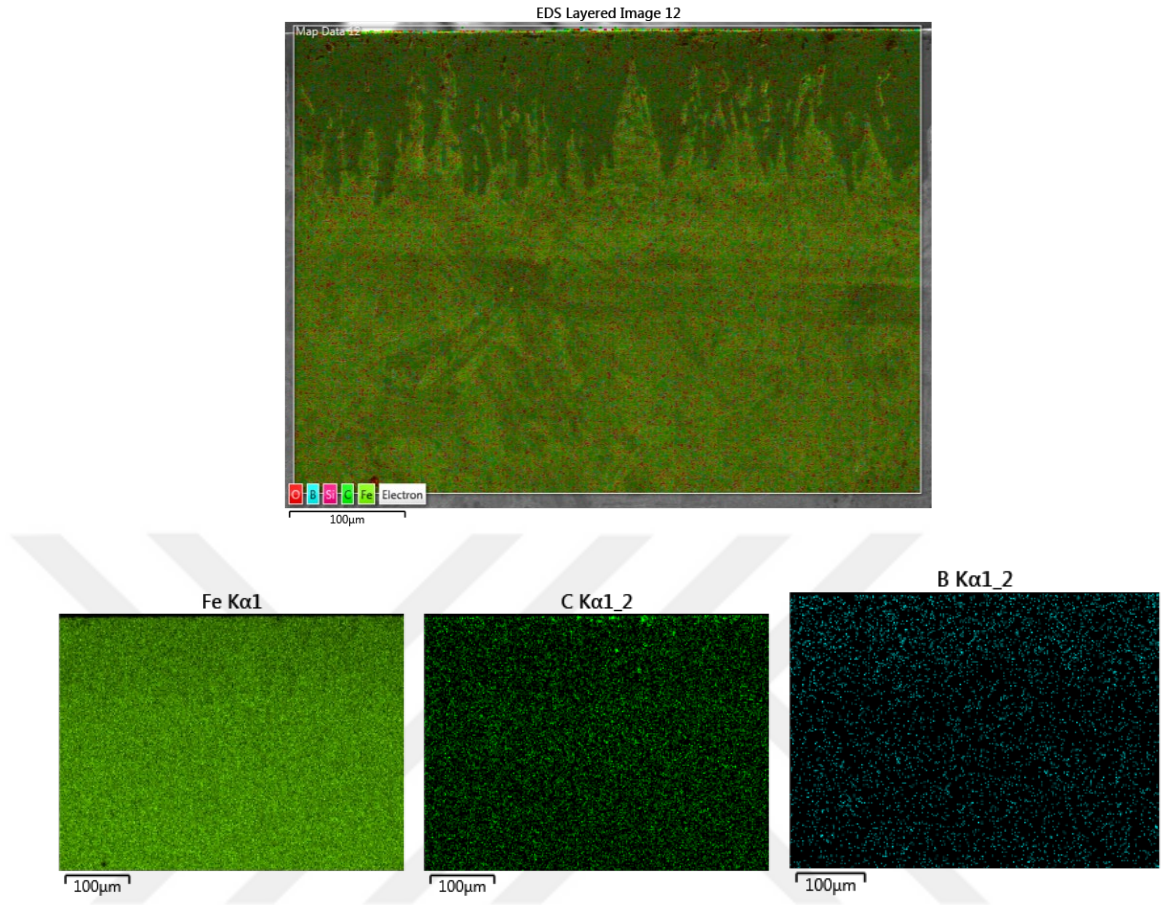
Resim 4.25. 1050 °C de 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S4)



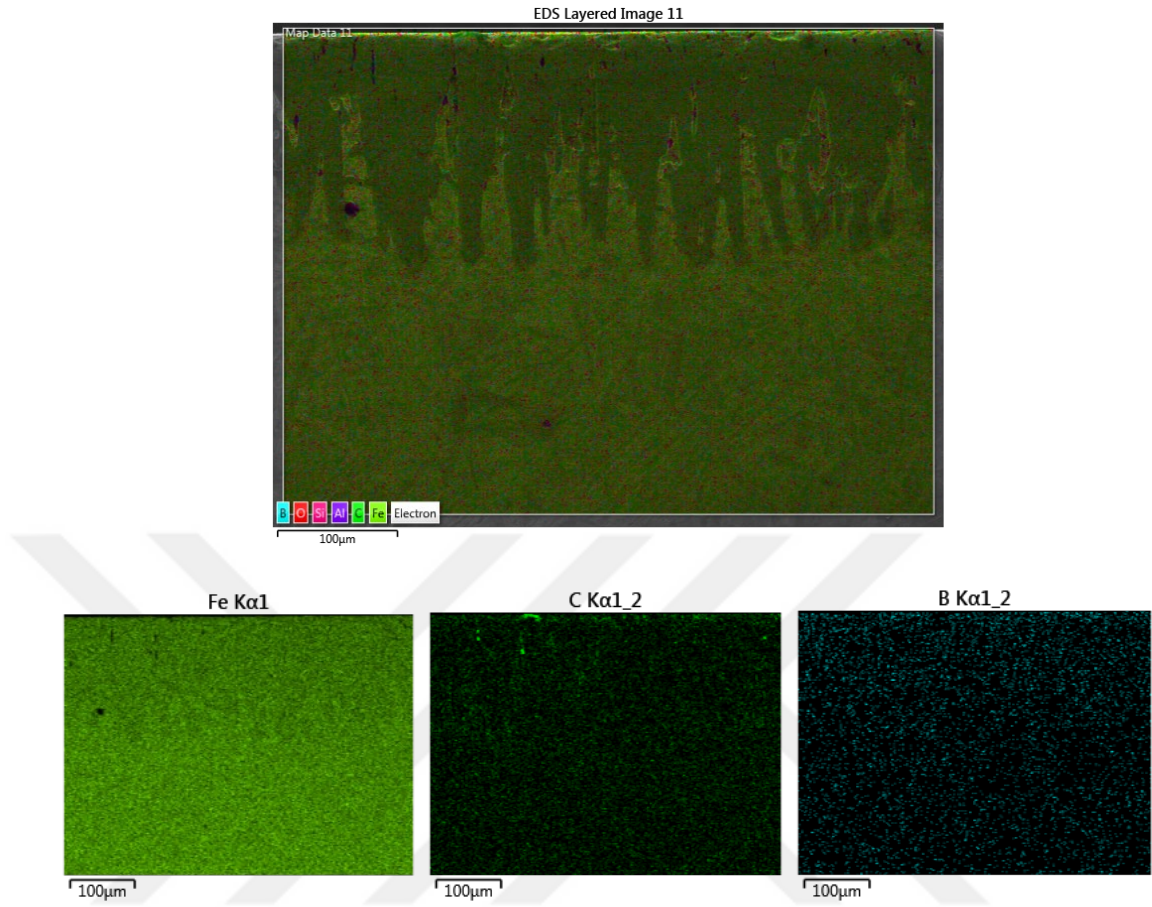
Resim 4.26. 1050 °C de 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S5)



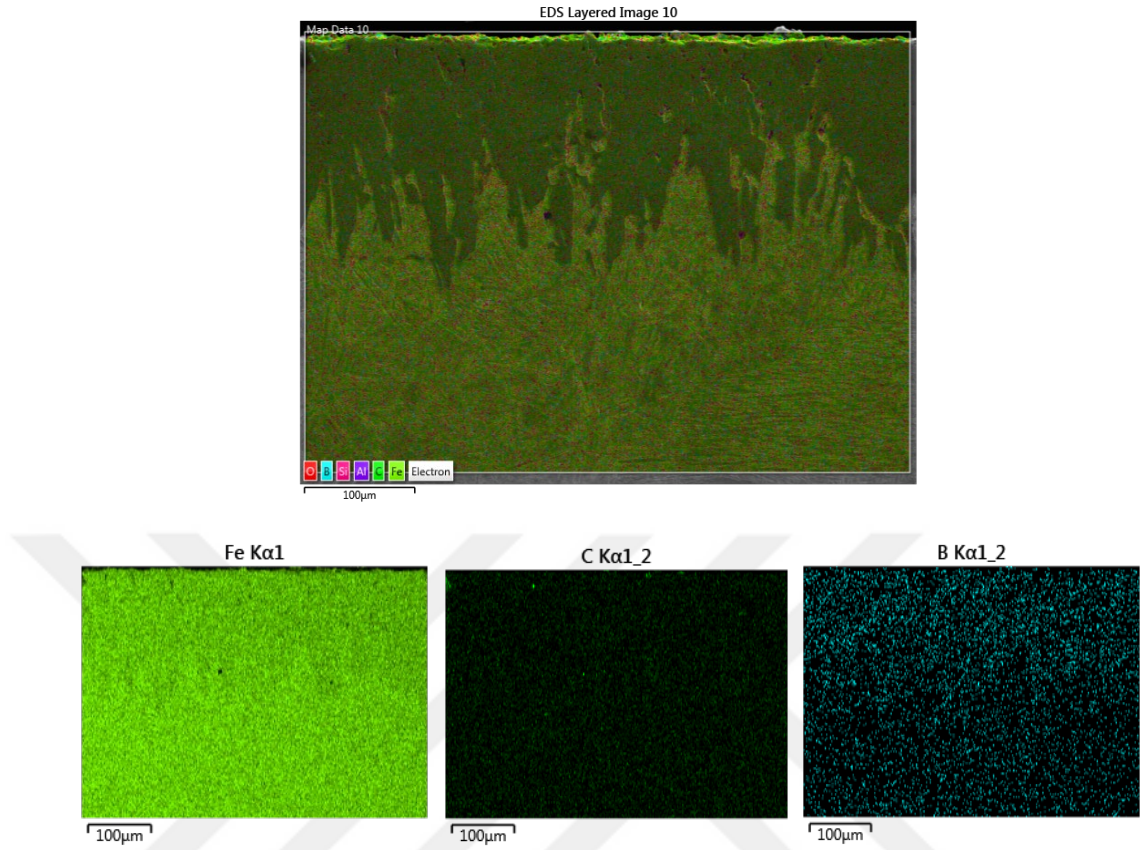
Resim 4.27. 1050 °C de 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S6)



Resim 4.28. 1100 °C de 2 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S7)



Resim 4.29. 1100 °C de 4 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S8)

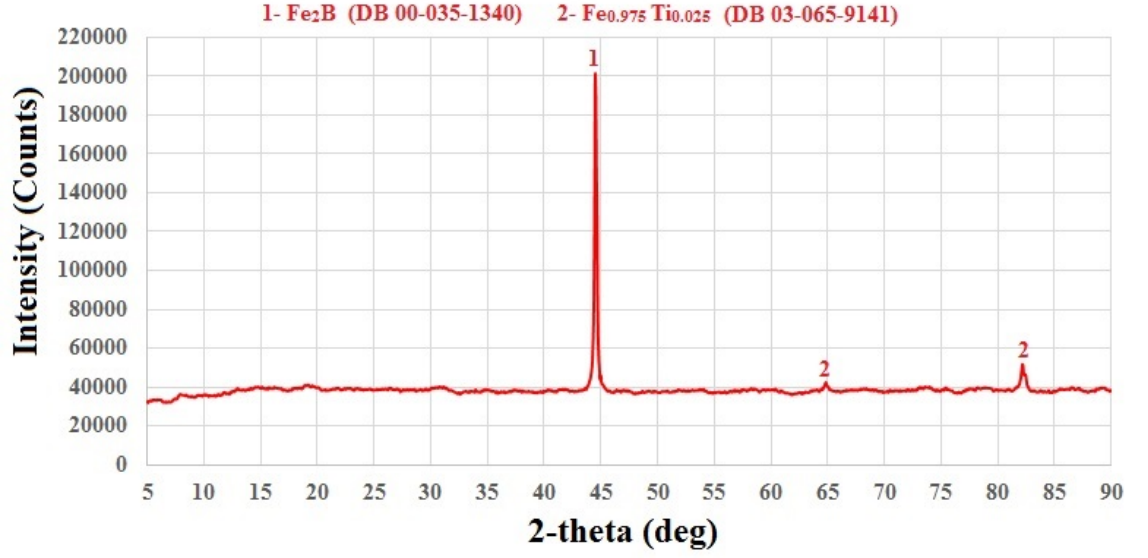


Resim 4.30. 1100 °C de 6 saat Süreyle Borlanan Numunenin Mapping Analizi Sonucu (S9)

Borlama yapılan tüm numunelerin kesitinden alınan elementel mappig analizi sonucundan borür tabakasında EDS analizi ile de tespit edildiği gibi Fe ve B elementlerinin yoğunluğu görülmektedir.

4.3. Borlanan Numunelerin XRD Analiz Sonuçları

1000°C'lik sıcaklık ve 2 saat süre parametresi kullanılarak borlanan St52 çeliğinin kaplama yüzeyinden alınan XRD analiz sonucu Şekil 4.31'de görülmektedir.

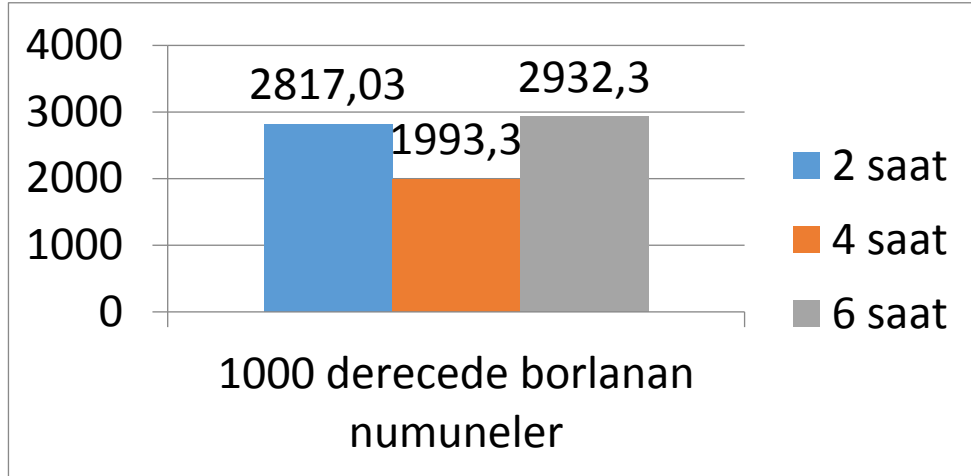


Şekil 4.1. 1000°C'de 2 Saat Süreyle Borlanan Numunenin XRD Analiz Sonucu

XRD analizi sonucunda ortaya çıkan piklerin yorumlanması neticesinde kaplama tabakasının Fe₂B fazından oluştuğu tespit edilmiştir.

4.4 Borlanan Numunelerin Sertlik Analiz Sonuçları

1000 derecede borlanan numunenin yüzeyinden alınan Vickers mikro sertlik sonuçlarının ortalamaları grafikte görülmektedir. Mikro sertlik sonuçlarından maksimum sertlik değerinin 6 saat süre parametresinde 2932,3 HV olarak elde edildiği görülmektedir. Yine en düşük sertlik değeri 4saat süre parametresinde 1993,3 HV olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.2.Sertlik Analizi Sonucu

BÖLÜM 5

GENEL DEĞERLENDİRME ve SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında St52 çeliğinin tuz banyosu borlama yöntemi ile borlama işlemi gerçekleştirilmiş ve artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak kaplama tabakası incelenmiştir. Bu amaçla optik mikro yapı, SEM, EDS, mapping ve mikro sertlik analiz sonuçları sıcaklık ve süre parametrelerine bağlı olarak değerlendirilmiştir

Optik mikro yapı analiz sonuçlarından sıcaklık ve süreye bağlı olarak 29.84 – 224.6 µm arası kaplama kalınlığı tespit edilmiştir. Artan sıcaklık ve süreyle birlikte kaplama kalınlığı da artmıştır.

St52 çeliğinin kaplama kesiti SEM fotoğraflarından üç sıcaklık değerinde ve her üç sürede de tüm yüzey boyunca elde edilmiştir. Aynı zamanda artan süre ve sıcaklıkla birlikte borür tabaka kalınlığı artmıştır.

Kaplama tabakasından alınan EDS analizleri neticesinde 1000⁰C’de ağırlıkça % 14.4 B, % 19.3 C ve % 66.3 Fe, 1050⁰C’de % 12.3 B, % 13.1 C ve % 74.6 Fe ve 1100⁰C’de % 11.6 B, % 9.4 C ve % 78.9 Fe oranları tespit edilmiştir. Artan sıcaklıkla birlikte kaplama tabakası üst noktasında Fe oranının düştüğü sonucuna ulaşılmıştır.

Borlanan numunenin yüzeyinden alınan XRD analizi sonucunda meydana gelen tabakanın Fe₂B fazından oluştuğu tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

- 1.Özenbaş, M., “Yeni Kuşak Sert Kaplamalar ve Elmas İnce Filmler”, *8.Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, s 355-359, 1995.
- 2.Karakan, M., “Gaz karışımlarının iyon nitrürasyon işlemi üzerine etkisinin incelenmesi”, *Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s 23-25-41-42, 1998.
- 3.Yiğit, M., “Borlama İşleminin 34CrNiMo6 Çeliğinin Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi*, 2021.
4. İpek, M., “Kutu sementasyon yöntemiyle çelik yüzeylerine TiC kaplaması”, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 1996.
- 5.Matijevic ,B., ve Stupnisek, M., “Novelty in Diffusion Coating Technology”, Novelty in Diffusion Coating Technology, *Materials and Manufacturing Processes*, 24, 887- 893, 2009
- 6.Arai, T., “Thermoreactive Deposition/Diffusion Process For Surface Hardening Of Steels”, *ASM Metals Handbook , Heat Treating, ASM International Vol4:* 1000-1004, 1991.
7. Fernández-Valdés D, Vasquez-De la Rosa O, Rodríguez-Castro G.A., Meneses-Amador A , López-Liévano A, Ocampo-Ramírez A, “ A numerical-experimental study of AISI 316L borided steels under cyclic contact loading” *Surface and Coatings Technology Volume 423*, 15 October 2021,
8. Rosas-Melendez S.A, Elías-Espinosa M, Reyes-Retana J.A. , Cervantes-Sodi F. “Friction and wear of borided AISI O1 steel with carbon nanomaterial deposit” *Materials Letters Volume 282*, 1 January 2021, 128798
9. Fernandez-Valdés D, Meneses-Amador A. , López-Liévano A, Ocampo-Ramírez A, “Sliding wear analysis in borided AISI 316L steels” *Materials Letters Volume 285*, 15 February 2021, 129138
10. Arteaga-Hernandez LA , Cuao-Moreu C.A. , Gonzalez-Rivera C.E. , Alvarez-Vera M., Ortega-Saenz J.A. , Hernandez-Rodriguez M.AL, “Study of boriding surface

treatment in the tribological behavior of an AISI 316L stainless steel” *Wear Volume* 477, 18 July 2021, 203825

11. EJ Hernández-Ramírez A. Guevara-Morales U. Figueroa-López I. Campos-Silva “Wear resistance of diffusion annealed borided AISI 1018 steel “ *Materials Letters Volume* 277, 15 October 2020, 128297

12. Ruiz Rios A., Lopez Garsia C., Campos Silva I. “The solid particle erosion on borided X12CrNiMoV12-3 stainless steel” *Materials Letters Volume* 277, 15 October 2020, 128381

13. J. Escobar-Hernández G.A. ,Rodriguez-Castro I. ,Arzate-Vázquez A. ,Meneses Amador R.C. Moron “Fatigue damage assessment from cyclic spherical contact of borided and nitrided H13 steel” *Materials Letters Volume* 285, 15 February 2021, 129118

14. N. López Perrusquia ,M.A. Doñu Ruiz ,E.D. García Bustos, M. Iores Martínez, G.M. Urriolagoitia Calderón, C.R. Torres San Miguel “Duplex surface treatment on microalloy steels by dehydrated paste pack boriding and pack carburizing” *Materials Letters Volume* 280, 1 December 2020, 128573

15. S. Sashank P. Dinesh Babu P. Marimuthu “Experimental studies of laser borided low alloy steel and optimization of parameters using response surface methodology” *Surface and Coatings Technology Volume* 363, 15 April 2019, Pages 255-264

16. EA dos S. Almeida, J.CG Milan ,H.L. Costa ,A.P. Krelling , C.E. da Costa “Sliding wear of borided sintered AISI M2 steel coated with AlTiN/CrN multilayer” *Wear Volumes* 410–411, 15 September 2018, Pages 11-24

17. Koçaslan, A.,”16MnCr5 Çeliğinin Borlama Ve Termal Çevrimli Borlama Özelliklerinin Araştırılması”,*Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, 2016.

18. Akca, B., “Saf Molibdenin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi”,*Süleyman Demirel Üniversitesi ,Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği, Anabilim Dalı ,Yüksek Lisans Tezi*,2015.

19. Arslan, D., “Kutu Borlama İşlemi Uygulanmış Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Yorulma Dayanımlarının İncelenmesi”, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Ve İmalat Bilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, 2017.
20. Ünüvar, F., “Saf Kobaltın Borlama Özelliklerinin İncelenmesi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, 2013.
21. Yapar, U., “Düşük Ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama İle Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, 2003.
22. Abakay E., “Termo-Reaktif Difüzyon (Trd) Yöntemi İle Çeliklerin Nb-Al-N Kaplanması” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya 2013.
23. Yılmaz, E., “Termoreaktif Difüzyon Yöntemiyle Çeliklerin Demir Alüminid Kaplanması”, *SA.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya, 129 s., 2008,
24. Çeçil Ö., “Termoreaktif Difüzyon Yöntemiyle Çeliklerin Yüzeyinde Ti-Al-N Esaslı Kaplamaların Oluşturulması ve Özelliklerinin İncelenmesi” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 2012
25. Önder E., “Termoreaktif Difüzyon (Trd) Yöntemiyle Krom Karbür ve Vanadyum Karbür Kaplanan AISI D3 Seri Soğuk İş Takım Çeliğinin Mikroyapı ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi” *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Bartın 2012.
26. Nazlıcan Z., “Titanyum-Bor Bileşiklerinin Yoğunluk Fonksiyonu Teorisi ile İncelenmesi” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Ankara 2009.
27. Yelkarası Ç., “Orta Karbonlu Çelikler Üzerinde Çift İşlem (KAFBB, KRTD-BOR) İle TiB₂-Ti-TiC Çok Katmanlı Kaplamaların Elde Edilmesi” *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul 2014.

28. Akarsu A.C., “Titanyum Diborür Katkılı Sıcak Preslenmiş Bor Karbür-Silisyum Karbür Kompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi” *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul 2009.
29. Karaduman B., “Titanyum Matrisli Titanyum Karbür Takviyeli Kompozit Üretimi Ve Karakterizasyonu” *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul 2010.
30. Duman D., “Titanyum Talaşından Titanyum Karbür Üretimi Ve Sert Metal Üretiminde Kullanımı” *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul 2010.
31. Sinoplu Ö., “Termo - Reaktif Difüzyon (Trd) Yöntemiyle Titanyum Karbür Kaplanan AISI D3 Seri Soğuk İş Takım Çeliğinin Mikroyapı ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi” *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Bartın 2012.
32. Kon Ö., “Termo-Reaktif Difüzyon (Trd) Yöntemiyle TiBCN Kaplanmış Wc-Co Kesici Takımların ve Çeliklerin Aşınma Özellikleri” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya 2006.
33. Özmen T., “Katı Ortamda Borlanmış DDK 60 Dökme Demirin Borür Tabakası Büyüme Kinetiği Ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi” *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir 2007.
34. Aypar A., “Elektrokimyasal Yöntemle Titanyum Ve Titanyum Alaşımlarının Borlanması ve Karakterizasyonu” *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul 2010.
35. Kahraman S., “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin (GGG40, GGG50, GGG60, GGG70) Üretim Sürecinin ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Edirne 2011.
36. Schweitzer, P. A., 2003. *Metallic materials: physical, mechanical, and corrosion properties*. CRC press, USA.
37. İnternet: “Çeliğin Kullanım Alanları Nelerdir?”, <https://www.roofcelik.com/blog/celigin-kullanim-alanlari-nelerdir>

38. İnternet: “Çelik Nedir, Özellikleri Nelerdir, Nerelerde Kullanılır?”
<https://www.makaleler.com/celik-nedir-ozellikleri-nelerdir-nerelerde-kullanilir>
39. Davis, J. R., “Corrosion: Understandingthebasics”, *ASM International*, USA, 2000.
40. Tracton, A. A., “Coatingsmaterialsandsurfacecoatings”, *CRC Press*, USA, 2006.
41. Kennedy, D., Xue, Y. andMihaylova, E., “Currentandfutureapplications of surfaceengineering”, *School of Mechanicaland Design Engineering*, 59 287-292, 2005.
42. İnternet: “Yapı Çelikleri” <https://www.omurcelik.com/urunlerimiz/yapi-celikleri/83>
43. İnternet: “ St52 Çeliği” <https://www.dtel.com.tr/st52-nedir/>
44. İnternet: “Çelik Özellikleri” <https://www.uslularhadde.com/st-52-3-celik-ozellikleri?>