



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**SÜPER ALAŞIM MALZEMENİN YÜZEY İŞLEMLERİYLE**  
**ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**HAZIRLAYAN**  
**HÜSEYİN DURAN**

**DANIŞMAN**  
**DR. ÖĞR. ÜYESİ DERVİŞ ÖZKAN**

**BARTIN-2019**



**T.C.**

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SÜPER ALAŞIM MALZEMENİN YÜZEY İŞLEMLERİYLE ÖZELLİKLERİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HAZIRLAYAN**

**Hüseyin DURAN**

**JÜRİ ÜYELERİ**

- Danışman : Dr. Öğr.Üyesi Derviş ÖZKAN - Bartın Üniversitesi  
Üye : Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK - Bartın Üniversitesi  
Üye : Doç. Dr. Okan ÜNAL - Karabük Üniversitesi

**BARTIN-2019**

## KABUL VE ONAY

Hüseyin DURAN tarafından hazırlanan “SÜPER ALAŞIM MALZEMENİN YÜZEY İŞLEMLERİYLE ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı bu çalışma, 11.09.2019 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr.Üyesi Derviş ÖZKAN (Danışman) .....

Üye : Prof. Dr. Mustafa Sabri GÖK .....

Üye : Doç. Dr. Okan ÜNAL .....

Bu tezin kabulü Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. H. Selma ÇELİKAY  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **BEYANNAME**

Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Dr. Öğr. Üyesi Derviş ÖZKAN danışmanlığında hazırlamış olduğum “SÜPER ALAŞIM MALZEMENİN YÜZEY İŞLEMLERİYLE ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

11.09.2019

Hüseyin DURAN

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında öncelikle, her türlü zorluğa karşı tez danışmanlığımı üstlenerek araştırma konusunun seçimi ve yürütülmesi sırasında değerli bilimsel uyarı ve önerilerinden yararlandığım, gecesini gündüzüne katarak tez çalışmasının neticelenebilmesi, hataların düzeltilmesi adına mücadele veren saygıdeğer Hocam Dr. Öğr. Üyesi Derviş ÖZKAN'a içtenlikle ve minnetle teşekkür ederim.

Bu tezde şüphesiz ki bilgi birikimi ve sektörel bazda yıllarca almış olduğu yolların ışığında bizleri yönlendiren her durumda ve her koşulda hedefe giden yolu bize gösteren, deneysel çalışmalarımızın ilerleyişinde ve çalışmalarımızın sonuçlanmasında bizim yanımızda bulunma nezaketini gösteren, tezin incelenerek hataların düzeltilmesinde değerli vakitlerini harcayan sayın Hocam Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI'ya, analizlerin yapılması ,yorumların hazırlanması için her zaman yanımda desteğini ve mücadelesini eksik etmeyen saygıdeğer Arş. Gör. Yasin AKGÜL' e şükranlarımı sunarım.

Üzerimde emeği olan ve her zaman desteğini hissettiğim Makine Mühendisi Bölüm Başkanımız Prof. Dr. M. Sabri GÖK' e ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda ki bilimsel çalışmaların karşılaştırılıp, tartışılması konusunda yanımda bulunup bana yardımcı olan saygı değer makine mühendisi Ayşe Demir ve Metalurji ve Malzeme Mühendisi Salih Bektaş'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın geçen bütün bölümünde olduğu gibi tez çalışmalarımın her safhasında manevi desteklerini asla esirgemeyen, varlığına her daim dua ettiğim babam Yusuf DURAN ve annem Hanife DURAN ile tez çalışmam süresince de verdikleri moral ve destek ile beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan kıymetli büyüklerim Bilgin ve Suna SAÇU ailesi ile aile büyüklerime ve dostlarıma sonsuz sevgi,saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Hüseyin DURAN

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## SÜPER ALAŞIM MALZEMENİN YÜZEY İŞLEMLERİYLE ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Hüseyin DURAN

Bartın Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Derviş ÖZKAN

İkinci Danışman: Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI

Bartın-2019, sayfa: 75

Inconel 718, içerisinde önemli miktarda Ni, Fe ve Nb içeren demir nikel bazlı süper alaşımdır. İçerdiği yüksek niyobyum sayesinde çökelti sertleşmesi ile yüksek mukavemet değerlerine sahip olmakta ve dayanımını 650 °C'ye kadar korumaktadır. Inconel 718 malzemesi uçak motorları, nükleer tesisler gibi yüksek sıcaklık dayanımı ve mukavemeti istenen uygulamalarda aranan malzeme grubu haline gelmiştir. Yüzey kaplama işlemleri, malzemeyi hem görünüş hem de fiziksel ve kimyasal bakımdan daha dayanıklı hale getirmek için bir metalin yüzeyini metal, ametal veya organik madde ile kaplama işlemleridir. Borlama ısıl işlemi ise bor atomlarının metal yüzeyine difüzyonu ile malzeme yüzeyini güçlendiren bir termokimyasal yüzey sertleştirme işlemidir.

Bu çalışmanın amacı, Inconel 718 süper alaşımının, termokimyasal yöntemle borlanması sonucu oluşan fazları tespit etmek ve borlama sonucu oluşan borür tabakasının malzemenin mekanik özelliklerine etkisini incelemektir. Inconel 718 süper alaşımına ait numuneler, 950 °C sıcaklığında 4, 8 ve 16 saat süre ile bor ve kömür tozu kullanılarak kutu borlama yöntemiyle borlanmıştır. Borlama işleminin ardından numunelerin; taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile kesit incelemeleri, X-ışınlar difraksiyonu (XRD) analizi, optik

mikroskop analizi, mikro-sertlik ölçümleri ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucu, aşınma dayanımı en iyi olan numunenin 4 saatlik borlama süresine tabi tutulan numune olduğu ve bunu destekleyecek şekilde en sert ve en iyi nüfuziyet gösteren tabakanın da 4 saatlik numuneye ait olduğu tespit edilmiştir. XRD analizleri ile oluşan fazlar tespiti yapılmıştır. SEM ve optik analizlerle tabakaların kesitleri incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Inconel 718; Borlama; Aşınma; Mekanik özellikler.

**Bilim Alanı Kodu:** 91438

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **IMPROVEMENT OF SUPER ALLAY MATERIAL WITH SURFACE TREATMENT AND ITS CHARACTERIZATION**

**Hüseyin DURAN**

**Bartın University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor: Assist. Prof. Derviş ÖZKAN**

**Second Adviser: Assoc. Prof. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI**

**Bartın-2019, pp: 75**

Inconel 718; iron is a nickel-based superalloy group and contains a significant amount of nickel, iron and niobium. Thanks to the high niobium it contains, it has high strength values with precipitation hardening and maintains its strength up to 650 ° C. Thus, Inconel 718; Aircraft engines, nuclear facilities, such as high temperature resistance and resistance to the desired material has become the group of applications. Surface coating processes are carried out in order to make the material more durable both in appearance and physically and chemically by covering the surface of a metal with metal, nonmetallic or organic material. Boron heat treatment is a diffusion controlled surface hardening process, where the boron phases are formed as a result of diffusion of boron atoms to the material surface at high temperatures.

The aim of this study is to determine the phases formed by thermochemical boronization of Inconel 718 superalloy and to investigate the effect of boron layer formed by boronizing on the mechanical properties of the material. For this purpose, samples of Inconel 718 superalloy were boronized by box boring using boron and coal dust at 950 °C for 4, 8 and 16 hours. After boronizing the samples; scanning electron microscopy (SEM), cross-sectional investigations, X-ray diffraction (XRD) analysis, optical microscope analysis,



micro hardness measurements and wear tests were performed. As a result of the investigations, it was found that the best abrasion resistant specimen was subjected to a boronizing time of 4 hours and the hardest and best penetrating layer to support it belonged to the 4 hour specimen. The phases were determined by XRD analysis. Sections of the layers were examined by SEM and Optical analyzes.

**Key Words:** Inconel 718; Boronizing; Wear; Mechanical Properties.

**Scientific Field Code:** 91438

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL VE ONAY .....	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 SÜPER ALAŞIMLAR.....	3
2.1 Süper Alaşımların Metalürjisi.....	3
2.2 Süper Alaşımların Sınıflandırılması .....	5
2.2.1 Nikel Bazlı Süper Alaşımlar .....	5
2.2.2 Demir-Nikel Bazlı Süper Alaşımlar.....	8
2.2.2.1 Inconel 718 Demir-Nikel Bazlı Süper Alaşımı.....	9
2.2.2.2 Inconel 718 Süper Alaşımındaki Fazlar.....	10
2.2.2.3 Inconel 718 Süper Alaşımının Mekanik Özellikleri .....	11
2.2.3 Kobalt Bazlı Süper Alaşımlar .....	12
BÖLÜM 3 TERMOKİMYASAL BORLAMA İŞLEMİ .....	14
3.1 Giriş .....	14
3.2 Borlamanın Tanımı.....	15
3.3 Alaşım Elementlerinin Borür Tabakasına Etkisi .....	16
3.4 Borlama Yöntemleri .....	16
3.4.1 Kutu Borlama .....	17
3.4.2 Pasta Borlama.....	19
3.4.3 Sıvı Borlama .....	19

3.4.3.1 Akımsız Tuz Banyo Borlama.....	20
3.4.3.2 Elektrolitik Tuz Banyo Borlama .....	21
3.4.4 Gaz Borlama.....	21
3.4.5 Plazma Borlama .....	22
3.5 Borlama İşleminin Avantajları .....	23
3.6 Borlama İşleminin Dezavantajları .....	23
<b>BÖLÜM 4 NİKEL BAZLI ALAŞIMLARIN BORLANMASI .....</b>	<b>25</b>
4.1 Nikel Bazlı Alaşımın Borlanmasında Oluşan Fazlar.....	26
4.2 Borlanmış Nikel Bazlı Alaşımın Karakterizasyonu ve Mekanik Özellikleri .....	27
<b>BÖLÜM 5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....</b>	<b>31</b>
5.1 Altlık Malzemesi Olarak Inconel 718.....	31
5.2 Numune Hazırlama İşlemleri.....	31
5.3 Borlama İşlemi.....	32
5.4 Karakterizasyon Çalışmaları.....	34
5.5 Sertlik Ölçümleri .....	35
5.6 Aşınma Testleri.....	36
5.7 XRD Analizi .....	37
<b>BÖLÜM 6 DENEYSEL SONUÇLAR .....</b>	<b>38</b>
6.1 Optik Mikroskop Mikroyapı Analizleri.....	38
6.2 Borlanmış Numunelerin SEM ve EDX Analizleri .....	41
6.3 Borlanmış Tabakaların XRD Analizleri .....	50
6.4 Borlanmış Numunelerin Sertlik Ölçümlerinin Sonuçları .....	52
6.5 Aşınma Testi Sonuçları.....	56
6.6 Borlanmış Tabakanın Sertlik ve Aşınma Yüzey Özelliklerinin İrdelenmesi .....	64
<b>BÖLÜM 7 SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>66</b>

KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	68

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
2.1: 60 yıllık bir süreçte süper alaşımların yüksek sıcaklık kapasitesinde meydana gelen artış.....	4
2.2: Çökelti sertleştirilmesi ile mukavemetlendirilmiş nikel bazlı süper alaşımın mikro yapısı. ....	6
2.3: Nikel bazlı süper alaşımlarda krom içeriğinin mikro yapıya etkileri.....	8
3.1: Kutu borlama işleminin şematik görünümü. ....	18
3.2: Bor karbürleme ile elde edilen çok bileşenli tabakalar. ....	22
4.1: Nikelin 800 °C’de 7 saat borlanması sonucu oluşan tabaka. ....	27
4.2: İşlem görmemiş ve borlanmış numunelerin aşınma testi sonucu yüzey profilleri. ....	28
4.3: Saf nikelin 800 °C’de 7 saat borlanması sonucu yüzeyden itibaren elde edilen sertlik değerleri.....	29
4.4: Inconel 722 alaşımının borlanması sonucu oluşan tabakalar. ....	29
5.1: Metalografik cihazlar; a) Discotom 100 kesme cihazı, b) CitoPress 10, c) Tegramin 30 .....	30 32
5.2: Borlanacak numunelerin bor tozuna gömülmesi (1. Aşama).....	33
5.3: Borlanacak numunelerin bor tozu ile üzerinin kapatılması (2. Aşama).....	33
5.4: Borlanacak numunelerin üzerinin kömür tozu ile kapatılması (3. Aşama).....	34
5.5: Borlanacak numunelerin fırında belirlenen sıcaklıkta bekletilmesi (4. Aşama) .....	34
5.6: Eclipse MA200 Optik Mikroskobu .....	35
5.7: CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI SEM Cihazı .....	35
5.8: Q10 A+ QNESS Mikro Sertlik Cihazı .....	36
5.9: UTS TRIBOMETER T10/20 Cihazı.....	37
5.10: RİGAKU - Ultima IV XRD Analiz Cihazı .....	37
6.1: Deneysel çalışmada izlenen yöntemim akış şeması. ....	38
6.2: 950 °C’de 4 saat boyunca borlamaya tabi tutulan numunelerin, a) 50X büyütme, b) 100X büyütme ve c) 200X büyütmelemlerden alınmış görüntüleri.....	39
6.3: 950°C’de 8 saat boyunca borlamaya tabi tutulan numunelerin, a) 50X büyütme, b) 100X büyütme ve c) 200X büyütmelemlerden alınmış görüntüleri.....	40
6.4: 950°C’de 16 saat boyunca borlamaya tabi tutulan numunelerin, a) 50X büyütme, b) 100X büyütme ve c) 200X büyütmelemlerden alınmış görüntüleri.....	40

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil No	Sayfa No
<b>6.5:</b> 950 °C'de 4 saat borlama sonrası a) 1000X SEM görüntüsü, b) 3000X SEM görüntüsü, c) 5000X SEM görüntüsü.....	42
<b>6.6:</b> 950 °C'de 4 saat borlama sonrası 5000X SEM görüntüsünden alınan line-EDX analizi. ....	43
<b>6.7:</b> a) 950 °C'de 4 saat borlama sonrası 5000X SEM görüntüsünden alınan haritalama EDX analizi, b) Haritalamada B dağılımı, c) Haritalamada Ni dağılımı. ....	43
<b>6.8:</b> 950 °C'de 8 saat borlama sonrası a) 1000X SEM görüntüsü, b) 3000X SEM görüntüsü, c) 5000X SEM görüntüsü.....	45
<b>6.9:</b> 950 °C'de 8 saat borlama sonrası 5000X SEM görüntüsünden alınan line-EDX analizi. ....	46
<b>6.10:</b> a) 950 °C'de 8 saat borlama sonrası 5000X SEM görüntüsünden alınan haritalama EDX analizi, b) Haritalamada B dağılımı, c) Haritalamada Ni dağılımı. ....	46
<b>6.11:</b> 950 °C'de 16 saat borlama sonrası a) 1000X SEM görüntüsü, b) 3000X SEM görüntüsü, c) 5000X SEM görüntüsü.....	48
<b>6.12:</b> 950 °C'de 16 saat borlama sonrası 5000X SEM görüntüsünden alınan line-EDX analizi. ....	49
<b>6.13:</b> a) 950 °C'de 16 saat borlama sonrası 5000X SEM görüntüsünden alınan haritalama EDX analizi, b) Haritalamada B dağılımı, c) Haritalamada Ni dağılımı. ....	49
<b>6.14:</b> Inconel 718 süper alaşımının 950 °C'de 4 saat borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri. ....	51
<b>6.15:</b> Inconel 718 süper alaşımının 950 °C'de 8 saat borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri. ....	51
<b>6.16:</b> Inconel 718 süper alaşımının 950 °C'de 16 saat borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri. ....	52
<b>6.17:</b> Inconel 718 süper alaşımının 950 °C'de 4 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik değerleri.....	53
<b>6.18:</b> Inconel 718 süper alaşımının 950 °C'de 8 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik değerleri.....	53
<b>6.19:</b> Inconel 718 süper alaşımının 950 °C'de 16 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik değerleri.....	54

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

Şekil No	Sayfa No
6.20: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C’de 4 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik/mesafe grafiği.....	55
6.21: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C’de 8 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik/mesafe grafiği.....	55
6.22: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C’de 16 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik/mesafe grafiği.....	56
6.23: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C’de 4, 8 ve 16 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik/mesafe grafiği.....	56
6.24: 950 °C’de 4 saat borlanan numunenin aşınma hacmi/uygulanan yük grafiği.....	57
6.25: 950 °C’de 8 saat borlanan numunenin aşınma hızı/uygulanan yük grafiği. ....	58
6.26: 950 °C’de 16 saat borlanan numunenin aşınma hacmi/uygulanan yük grafiği.....	59
6.27: 950 °C’de 4, 8 ve 16 saat borlanan numunelerin aşınma testi sonucu aşınma hacmi/uygulanan yük grafiği.....	60
6.28: 950 °C’de 4 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulan, a) 50X, b) 100X optik görüntüleri.....	61
6.29: 950 °C’de 8 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulan, a) 50X, b) 100X optik görüntüleri.....	62
6.30: 950 °C’de 16 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulan, a) 50X, b) 100X optik görüntüleri.....	63

## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo No</b>	<b>Sayfa No</b>
<b>2.1:</b> Alaşım elementinin mikro yapıya etkileri.....	5
<b>2.2:</b> Nikel bazlı süper alaşımların bileşimi.....	7
<b>2.3:</b> Demir-nikel esaslı süper alaşımların kimyasal kompozisyonu.....	9
<b>2.4:</b> Niyobyum içeren süper alaşımlarda görülen fazlar. ....	11
<b>2.5:</b> Inconel 718 süper alaşımı mekanik özellikleri.....	11
<b>2.6:</b> Inconel 718 için yüksek sıcaklıktaki kopma gerilmesi. ....	12
<b>3.1:</b> Bor elementinin kimyasal özellikleri. ....	14
<b>3.2:</b> Pasta borlamada kullanılan koruyucu gazlar ve özellikleri.....	19
<b>3.3:</b> Sıvı borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri.....	20
<b>3.4:</b> Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri. ....	22
<b>4.1:</b> Ekabor-1 tozu ile 850 °C'de 6 saat borlanmış bazı alaşımlarda görülen tabakalar. ...	27
<b>5.1:</b> Inconel 718 süper alaşımının kimyasal bileşimi, % ağı. ....	31
<b>6.1:</b> Farklı borlama sürelerine göre aşınma ve sertlik sonuçları. ....	65



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al	: Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyum Oksit
Ar	: Argon
B	: Bor
B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	: Diboran
B <sub>4</sub> C	: Bor Karbür
BCl <sub>3</sub>	: Bortriklorit
BCl <sub>3</sub>	: Bor Tri Klorid
BF <sub>3</sub>	: Bor Tri Florid
(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>3</sub> B	: Bor Tri Etil
(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> B	: Bor Tri Metil
Ce	: Seryum
Co	: Kobalt
Cr	: Krom
Fe	: Demir
FeB	: Demir Borür
Hf	: Hafniyum
KBF <sub>4</sub>	: Potasyum Terafloraborat
La	: Lantan
MC	: Metal Karbür
Mo	: Molibden
N	: Azot
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	: Susuz Boraks
Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O	: Boraks Dekahidrat
Na <sub>3</sub> AlF <sub>6</sub>	: Kriyolit

NaBF <sub>4</sub>	: Sodyum Borflorür
Nb	: Niobyum
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
P	: Fosfat
Re	: Renyum
Ru	: Rutenyum
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
Ta	: Tantal
Ti	: Titanyum
W	: Tungsten
Y	: İtiryum
Zr	: Zirkon
$\gamma$	: Gama
$\gamma'$	: Gama Prime
$\gamma''$	: Gama Double Prime

## **KISALTMALAR**

CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
HSP	: Hekzagonal Sıkı Paket
HV	: Vickers Sertlik
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
THM	: Hacim Merkezli
XRD	: X-ışını Difraksiyonu
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik

# BÖLÜM 1

## GİRİŞ

Yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiş, yüksek alaşımlı malzeme grubu olan süper alaşımlar, darbe veya dayanıklılık kaybı olmadan 540 °C ile 1000 °C arasında yüksek çalışma sıcaklıklarında çalışabilirler. Bu kapasiteleri sayesinde uçak motoru üretiminde kullanılmak üzere en büyük malzeme grubu haline gelmişlerdir. Bu ve benzeri alanlarda mukavemetlerini korumalı ve yüksek sıcaklık koşullarında mikro yapılarını dengeli tutmalıdırlar. Son on yılda, ergitme teknolojisindeki gelişmeler, alaşımlamanın etkileri, termomekanik çalışmalar sayesinde yeni alaşımların ortaya çıkmasına olanak sağlamışlardır. VIII-A grubu elementlerinden oluşan ve süper alaşım olarak tanımlanan bu yeni yüksek sıcaklık uygulamalarında yüksek mekanik ve korozyon dayanımı gösteriler. Süper alaşımların yapılarında mevcut olan Fe, Cr ve Ni malzemelerin oransal farklılıkları malzeme yapısında farklı karakterizasyonların oluşmasını sağlamaktadır.

Krom, oksidasyon direnci ve yüksek sıcaklık korozyonu açısından alaşımlar için önemli bir yere sahiptir. Bu nedenle korozyon dirençli çelikler, paslanmaz çelikler ve süper alaşım gibi malzemeler önemli oranda krom içerir. Yüksek sıcaklık uygulamalarında da yüksek miktarda krom elementi kullanılmaktadır (Betteridge, 1974).

İçerisinde başta Ni olmak üzere Al, Cr gibi birçok element bulduran süper alaşımlar, ergime noktasına yakın yüksek sıcaklıklarda kimyasal ve mekanik bozunmaya dayanımlı alaşımlardır (Reed, 2006). Günümüzde yaygın olarak kullanılan süper alaşımlar; Fe, Cr ve Ni ihtiva eden süper alaşımlar, Fe-Ni-Cr-Co kompleks birleşimleri, karbürlerle güçlendirilmiş kobalt bazlı alaşımlar, katı çözelti olarak dayanımı arttırılmış nikel bazlı alaşımlar ve çökelme sertleştirilmesi uygulanmış nikel bazlı alaşımlardır (Bahadır, 2010).

Inconel 718, süper alaşım ailesinin demir-nikel bazlı grubundandır. Çökeltili sertleşmesi ile yüksek mukavemet değerlerine sahip ve 650 °C' ye kadar dayanımını korumaktadır. Inconel 718 malzemelerin endüstriyel sanayide kullanım alanları irdelendiğinde uçak motorları, nükleer tesisler gibi yüksek sıcaklık dayanımı ve mukavemeti istenen uygulamada rastlandığı tespit edilmiştir.

Süper alaşım sistemlerinde en çok kullanım alanı olan alaşımlar nikel bazlı sınıfındaki süper alaşımlardır. Bileşim, yapısal ve mekanik özellik açısından büyüleyici olan süper alaşımlar, korozyona karşı güçlü dayanım göstermelerinin yanında, ergime sıcaklıklarının %80 ile %90 sıcaklıklarında sürünme ve yorulma dayanımı devam ettirmek gibi eşsiz özelliğe sahiptirler. Nikel esaslı süper alaşımların, yüksek sıcaklık mukavemet değeri yüksek olsa da aşınma dayanımlarının artırılması gereklidir. Aşınma ve korozyon, kullanım esnasında önemli maddi ve can kayıplarına neden olmaktadır. Malzeme üzerine uygulanan yüzey işlemleri sayesinde aşınma ve korozyonun olumsuz etkileri azaltılabilmektedir (Taşçı, 1993).

Yüzey kaplama işlemleri, malzemeyi görünüş, fiziksel ve kimyasal olarak daha dayanımlı hale getirmek amacıyla, metal yüzeyine metal, ametal veya organik madde kaplanmasından ibarettir (Uysal, 2006). Özellikle son yıllarda metalik malzemelere termokimyasal kaplama yöntemi uygulamaları giderek önem kazanmıştır. Borlama işlemi de termokimyasal bir difüzyon işlemi olup borun yüksek sıcaklıkta çeliğe yayınıdır (Özbek vd., 2004). Borlama diğer difüzyon bazlı yüzey işlemlerine (nitürleme, karbürleme vs.) kıyasla daha üstün özelliklere sahiptir (Bozkurt, 1984). Demir bazlı malzeme yüzeyinde ferro-bor fazları oluşarak malzemenin sürtünme katsayısı azalır, aşınma dayanımı artar. Ayrıca, malzeme yüzeyinde çok sert bir tabaka oluşturarak malzemenin özellikle tribolojik özelliklerini iyileştirir (Üçkardeşler, 2013).

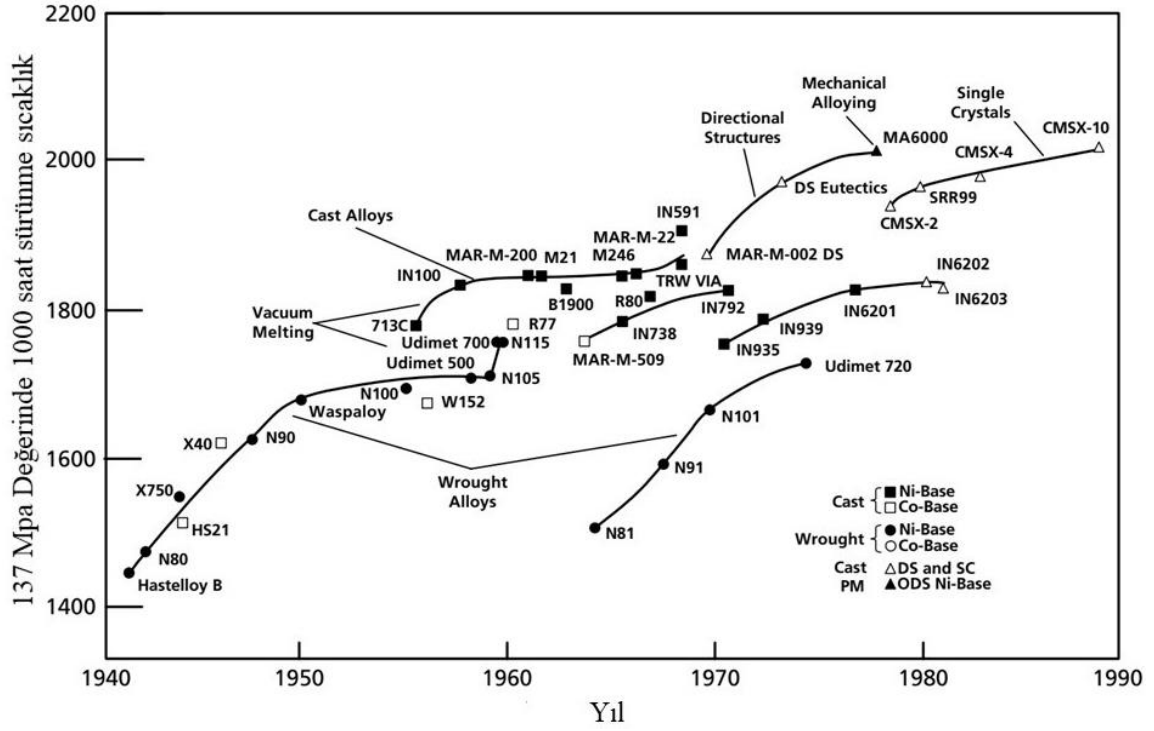
Bu çalışmada; ısıtılma işlem görmüş Inconel 718 süper alaşımı, 950 °C sıcaklığında 4, 8 ve 16 saat süre ile kutu borlama yöntemiyle borlanmıştır. Borlanan yüzeylerin, geniş bir spektrumda yüzey özellikleri detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Inconel 718 süper alaşımının borlanabilirliği incelenmiştir. Borlama işleminin ardından numunelerin; X-ışınlar difraksiyonu (XRD) analizi kullanılarak kaplama tabakasını oluşturan fazların dağılımları, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile fazların mikro yapıları ve EDX analiziyle elementlerin kaplama tabakası boyunca dağılımları belirlenmiştir.

## BÖLÜM 2

### SÜPER ALAŞIMLAR

#### 2.1 Süper Alaşımların Metalürjisi

Yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan malzemelerin, kullanıldığı atmosferin aşındırıcı etkilerine karşı dayanıklı olması, mukavemetini kaybetmemesi ve metalürjik kararlılığını muhafaza etmesi gerekmektedir. Çok yüksek sıcaklık uygulamalarında; seramikler kadar V-A grubu (V, Nb, Ta) ve VI-A grubu (Cr, Mo, W) metallere de ihtiyaç duyulmaktadır (Hagel ve Wiley, 1972). Refrakter malzemesi olarak kullanılan metallerin oksidasyon direnci çok düşük olduğundan bu malzemeler daha çok oksidasyona uğramayan alanlarda kullanılmaktadır. Seramik malzemeler ise, birçok yapısal uygulama için yeterli tokluğa sahip değildir (Hagel ve Wiley, 1972). Uygulamalarda yetersiz kalan malzeme teknolojisi ve mevcut teknolojideki sınırlamalar, süper alaşım malzemelerinin kullanımını kaçınılmaz hale getirmiştir. Yüksek sıcaklık altında çalışma şartlarında yüksek performans gerektiren alanlarda kullanılan bu alaşımlar ilk kez 20. yüzyılın ilk yarısının sonlarında kullanılmıştır. Daha sonraki yıllarda süper alaşımların kullanım alanları giderek artmış ve gaz türbinleri, havacılık, roket motorları, kimyasal ve petrol tesisleri gibi endüstrilerde çok talep gören malzemeler haline gelmiştir (Roger, 2006).



Şekil 2.1: 60 yıllık bir süreçte süper alaşımların yüksek sıcaklık kapasitesinde meydana gelen artış.

Şekil 2.1’de süper alaşımların türbin bıçaklarındaki kullanımında yorulma performansı açısından önemli oranlarda gelişme sağlandığı görülmektedir (Roger, 2006). Türbin bıçaklarının performanslarını iyileştirilmesiyle başlayan bu gelişmeler, 1950 yıllarında vakum indüksiyon döküm teknolojilerinin geliştirilmesiyle kalite ve alaşım temizliği açısından sağlanan avantajlarla devam etmiştir (Roger, 2006).

Nikel, demir ve kobalt bazlı süper alaşımların sınıflandırılması alaşımının temelini oluşturan üstün element oranına göre yapılmaktadır. Süper alaşımlar sınıflandırılmalarını sağlayan bu üç elementin yanında molibden, alüminyum, krom, tungsten ve tantalyum gibi mikro yapıyı etkileyen elementleri de ihtiva eder.

Süper alaşımlar genel olarak ostenitik ana matris ile geniş bir ikincil faz yapısına sahiptir.  $\gamma'$  (gama prime) intermetalik fazı ve MC,  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$  metal karbürleri ikincil fazlar olarak bulunurlar (Davis, 1997). Niyobyum veya Ni-Ta ihtiva eden alaşımlarda ise hacim merkezli  $\gamma''$  (gama double prime) fazı görülmektedir. Bu bahsedilen fazların yanında istenmeyen fazlar da görülebilmektedir.

Tablo 2.1: Alaşım elementinin mikro yapıya etkileri.

Alaşım Elementi	Mikro yapıdaki Etkisi
Cr	$M_7C_3$
Cr-Mo-W	$M_{23}C_6$
Cr-Mo-W-Re	TCP oluşumuna neden olur
Co	$\gamma'$ Solvus sıcaklığını düşürür
Co -Cr-W-Mo-Ru-Re-Ta-Fe	Katı eriyik sertleşmesi
Mo-W-Hf-Nb-Ta-Ti	MC
Al-Ti	$\gamma'$ Ni <sub>3</sub> (Al-Ti)
Al- Nb-Ti	Çökeltme sertleşmesi
Al-Y-Cr-Ce-La	Oksidasyon direnci
B	Kopma gerilmesini artırır
B-Ta	Sürünme özelliklerini geliştirir
Mo-W-Nb	$M_6C$
Re-Ru	$\gamma'$ Tane irileşmesini geciktirir

Tablo 2.1’de süper alaşım elementlerinin mikro yapıya etkileri görülmektedir (Zietara, 2011). Gerçekte çok karmaşık alaşım bileşimlerine sahip olan süper alaşımlar bünyesinde bulundurdukları ana elementlere göre üç grupta incelenirler:

- Nikel esaslı
- Demir-Nikel esaslı
- Kobalt esaslı

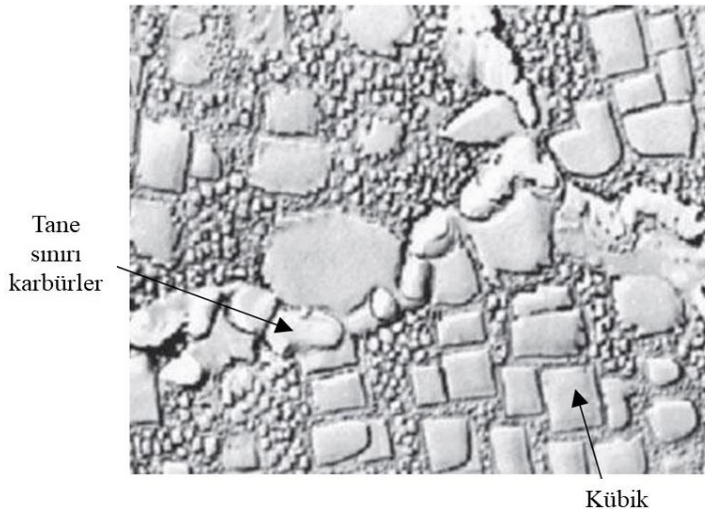
## 2.2 Süper Alaşımların Sınıflandırılması

### 2.2.1 Nikel Bazlı Süper Alaşımlar

Süper alaşım sistemlerinde en çok kullanım alanı olan alaşımlar nikel esaslı sınıfındaki süper alaşımlardır. Nikel bazlı süper alaşımlar son derece iyi oksidasyon ve korozyon direnciyle yüksek sıcaklık şartlarında sürünme ve kırılma direnci sağladığından uçak motoru parçalarında sıklıkla kullanılmaktadır (Kahraman, 2008). Kapasiteleri sayesinde nikel bazlı süper alaşımlar, türbin ateşleme sıcaklığını sınırlayan dolayısıyla türbin verimini etkileyen



en önemli türbin uygulamalarından türbin rotor kanadı gibi parçaların malzemesi olarak tercih edilirler. Bunlar kübik merkezli ostenit ( $\gamma$ ) ve  $Ni_3(Al, Ti, Ta)$  temel bileşimindeki gama prime ( $\gamma'$ ) fazıdır. Gama prime ( $\gamma'$ ) fazı, nikel esaslı alaşımların temel mukavemet özelliklerini sağlamaktadır. Küresel ve kübik yapıda ortaya çıkan bu parçacıklar ana matris yapısının tümüyle uyum içerisindeydir. Küçük uyumsuzluklar (%0,05) küresel çökelti oluştururken; yüksek orandaki uyumsuzluklar kübik çökelti oluşturur (Şekil 2.2) (Campbell, 2006). Ni bazlı süper alaşımlarda matris ve gama ( $\gamma$ ) yapısını meydana getiren nikel, yüzey merkezli kübik (YMK) yapıdadır ve içerisinde kobalt, demir, krom, molibden ve tungsten gibi katı eriyik elementler bulundurmaktadır. Alaşım grubunun ana elementi olmak üzere Ni, katı çözelti ve çökelti sertleşme yöntemleri sayesinde mukavemet sağlama özelliği bakımından tercih edilen bir elementtir. W, Mo ve Ta gibi refrakter elementler de oksidasyon direnci ve yüksek mukavemet kazandırdığından bileşimde dengeli oranlarda bulunabilmektedir. Alaşım içerisinde halihazırda bulunan silisyum, fosfor, kükürt, oksijen ve azot gibi elementlerinin miktarı ise üretim aşamalarında sürekli kontrol altında tutulmaktadır (Çelik, 2006).



Şekil 2.2: Çökelti sertleşirmesi ile mukavemetlendirilmiş nikel bazlı süper alaşımın mikro yapısı.

- Inconel (587, 597, 600, 601, 617, 625, 706, 718, X750, 901)
- Nimonic (75, 80A, 90, 105, 115, 942, PE 11, PK33, C-263)
- Udimet (400, 500, 520, 630, 700, 710, 720)
- Pyromet 860

Yukarıda ticari olarak kullanılan nikel esaslı süper alaşımlar verilmiştir. Inconel 718 alaşımı bu alaşımların en çok kullanılanıdır. Nikel esaslı süper alaşımlar günümüzde 1000 °C sıcaklık değerine kadar uçak motorlarının dönen bağlantılarında kullanılabilir (Ezugwu, 2003).

Yapıda önemli oranda niyobyum mevcut ise, THM (hacim merkezli) yapıda  $\gamma''$  çökeltileri ( $Ni_3Nb$ ) oluşabilir. Bu çökelti Inconel 718 gibi alaşımların mukavemetlendirilmesinde önemli rolü üstlenir. Fakat  $\gamma''$  çökeltisi meta stabil olduğundan; yaklaşık 650 °C ve üstü sıcaklıklarda uzun süreden sonra  $\delta'$ 'ya dönüşerek mukavemet kaybına neden olmaktadır (Patel ve Smith, 2004).

Nikel bazlı süper alaşımlar, süper alaşımlar içinde en kompleks, en çok kullanılan ve birçok metalürji uzmanına göre en ilgi çekici olanıdır. Jet motorlarının ağırlığının yarısını bu alaşım grubu oluşturmaktadır (Çelik, 2006). En önemli karakteristikleri, yüksek faz kararlılığı ve YMK nikel matrisin birçok mekanizma ile mukavemetlendirilebilmesidir. Tablo 2.2' de nikel bazlı süper alaşımların bileşimi görülmektedir (Bradley, 1988).

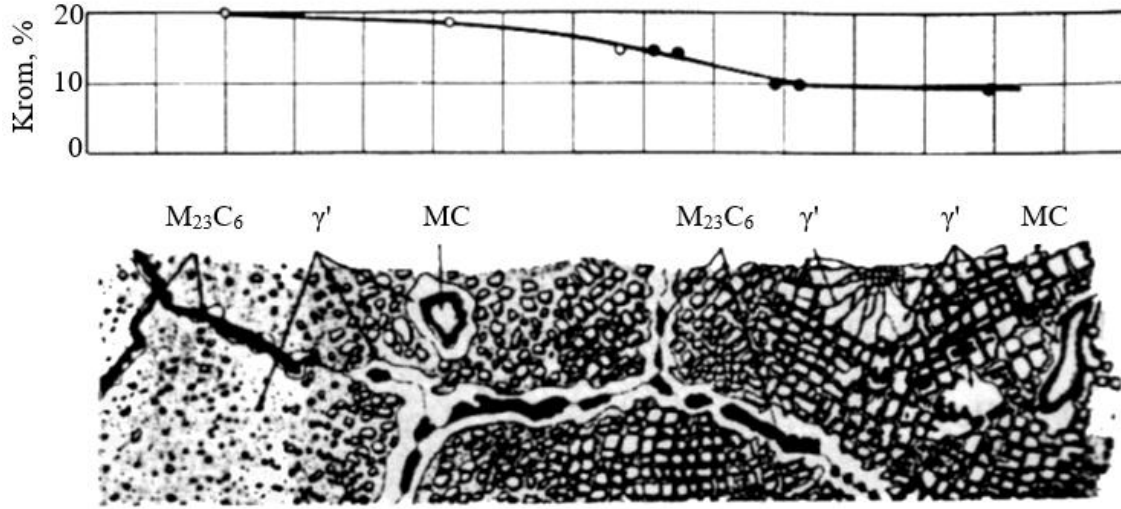
Tablo 2.2: Nikel bazlı süper alaşımların bileşimi.

Alaşım / Element	C	Ni	Cr	Co	Mo	Fe	Al	Ti	W
<b>CMSX-2</b>	-	66,2	8	4,6	0,6	-	5,6	1	8
<b>Inconel 713 C</b>	0,12	74	12,5	-	4,2	-	6	0,8	-
<b>Inconel 738</b>	0,17	61,5	16	8,5	1,7	-	3,4	3,4	-
<b>MAR-M 247</b>	0,15	59	8,25	10	0,7	0,5	5,5	1	10
<b>PWA 1480</b>	-	Den.	10	5	-	-	5	1,5	4
<b>Rene 41</b>	0,09	55	19	11	10	-	1,5	3,1	-

Süper alaşım üretiminin geliştirilmesiyle, yönlendirilmiş katılaşma veya tek kristalli döküm sayesinde tane sınırları azaltılıp hatta ortadan kaldırılarak az miktarda ilave edilen alaşım elementlerine gereksinim ortadan kalkmıştır. Günümüzde az miktarda alaşım elementlerinin ilavesiyle dökümde tanelerin oluşumunda hata toleransı sağlanmaktadır.

Nikel bazlı çökeltme sertleşmeli süper alaşımlar, önemli bir süper alaşım grubudur. Yüksek sıcaklıklarda, süper alaşımlar içerisinde mukavemet değeri en az olanlar, demir bazlı ve katı

eriyik ile mukavemetlenen alaşımlardır. Bu yüzden, Inconel 718 alaşımı dışında, demir bazlı süper alaşımların uygulamalarda kullanımları daha azdır. Inconel 718 alaşımı, katı-eriyik alaşımları ve yüksek dayanımın istenmediği durumlar olmak üzere birçok alanda kullanılmaktadır. Şekil 2.3’de nikel bazlı süper alaşımlarda krom içeriğinin mikro yapıya etkileri görülmektedir (Bradley, 1988).



Şekil 2.3: Nikel bazlı süper alaşımlarda krom içeriğinin mikro yapıya etkileri.

## 2.2.2 Demir-Nikel Bazlı Süper Alaşımlar

Demir bazlı alaşımlar, esas element olarak demir içerir, buna ek olarak önemli oranlarda Cr, Ni ve çok az oranda da Mo veya W ihtiva etmektedir. Demir bazlı süper alaşımlara; % 15-60 Fe, %25-45 Ni, katı çözümleri mukavemetini elde etmek için %1-6 Mo, yüksek sıcaklık şartlarında oksidasyon direnci sağlayabilmek için ise % 15-28 Cr ilave edilir. Bazı türlerinde Ti ve Al eklenmesi ile Ni intermetalik bileşik meydana getirmek koşuluyla çökelti sertleşmesi de oluşturulabilmektedir. Incolloy 801, A-286 ve ASTM A297 alaşımları, ticari olarak kullanılan demir bazlı süper alaşım grubundandır (Kahraman, 2008).

Yüksek oranlarda demir ihtiva eden birçok süper alaşım olmasına karşın, bunların hepsi demir bazlı süper alaşım değildir. Çünkü bu süper alaşımlar Fe, Ni, Cr, Co, az miktarda Mo, W ve Nb gibi elementlerin kompleks birleşimleridir. Demir-nikel bazlı süper alaşımlar, ostenitik paslanmaz çelikten geliştirilmiştir. Bu grubun birçok üyesi %25-50 Ni ve % 15-60 Fe içerir. Katı eriyik dayanımlı %16 Fe ve %49 Ni bulduran Hastelloy X ile γ'' dayanımı

arttırılan %18,5 Fe ve %52,5 Ni bulunduran Inconel 718 alaşımları bu duruma örnek olarak sayılabilir. Bu alaşımlar, demir içeren nikel bazlı süper alaşımlardır.  $\gamma'$  dayanımı arttırılmış Inconel 901 süper alaşımı %42,5 Ni ve %36 Fe içeren nikel bazlı veya karmaşık demir-nikel-krom bazlı süper alaşımdır. Bu süper alaşım yüksek dayanım özelliğinin yanında, kalıcı düşük termal genişleme katsayısına sahiptir (Bahadır, 2010). Demir-nikel bazlı alaşımlarda krom oranı %15-28 arası değişir ve oksidasyon direncini arttırmak için kullanılır. Molibden oranı ise %1-6 arasındadır ve katı çözelti sertleştirmesinde rol oynar. Titanyum, alüminyum Demir-nikel bazlı süper alaşım grubundan olan Inconel 718, önemli oranda Ni, Fe ve Nb içermektedir. İçerisindeki yüksek Nb nedeniyle çökelti sertleştirmesi ile mukavemetlendirilebilmektedir. Çok yüksek sıcaklık değerlerinde bile kopma, yorulma, sürünme gibi mekanik özelliklerini korumaktadır. Tablo 2.3'de demir-nikel esaslı süper alaşımların bileşimi verilmiştir (Bradley, 1988).

Tablo 2.3: Demir-nikel esaslı süper alaşımların kimyasal kompozisyonu.

<b>Alaşım/Element</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Co</b>	<b>Mo</b>	<b>W</b>	<b>Nb</b>	<b>Ti</b>	<b>Al</b>	<b>Fe</b>
<b>19-9 DL</b>	19	9	-	1,25	1,25	0,4	0,3	-	66,8
<b>HAYNES 556</b>	22	21	20	3	2,5	0,1	0,1	0,3	29
<b>Inconel 802</b>	21	32,5	-	-	-	-	-	0,58	44,8
<b>Inconel 718</b>	19	52,5	-	3	-	5,1	0,91	0,5	18,5
<b>Inconel 903</b>	<0,1	38	15	0,1	-	3	1,4	0,7	41
<b>A 286</b>	15	26	-	1,25	-	-	2	0,2	55,2

### 2.2.2.1 Inconel 718 Demir-Nikel Bazlı Süper Alaşımı

Inconel 718, uluslararası Nikel tarafından 1959'da, Suffern'deki araştırma laboratuvarlarında ve bir fabrikada geliştirilmiştir (Bircan, 2014). Alaşım korozyon dayanımı ve yüksek mukavemet yanında, iyi kaynak edilebilirliğe sahiptir. 700 °C'ye kadar yüksek sürünme dayanımı vardır.

Inconel alaşımları çok düşük sıcaklıklarda iyi dayanım gösterirler ve orta sıcaklıklarda yorulma mukavemeti, mekanik mukavemet ve nispi olarak daha iyi sürünme davranışı gösterirler (Davis, 1997). Yüksek sıcaklıklardaki alaşımların dayanımını arttırmak için kullanılacak farklı elementler var olmasına karşın, parça üretimi anında çatlaktan

kaçınmaya karşı olan üstün özelliği açısından niyobyum benzersiz görülmüştür. Aynı zamanda Nb daha yavaş yıprandığı için parçalarda çatlamadan önce sıcaklık ile gerilim düşürülebilir. Inconel 718 gibi niyobyum içeren alaşımlarda  $\gamma''$  çökeltisi,  $Ni_3Nb$  ana çökeltidir.  $\gamma'$  ile karşılaştırıldığında  $\gamma''$  çökeltisi, daha düşük sıcaklıklarda kararlı olduğundan Inconel 718' in kullanılabilirdiği maksimum sıcaklık 650 °C civarındadır. Buna rağmen Inconel 718 hala en çok kullanılan süper alaşımdır. Düşük sıcaklıklarda en güçlü süper alaşımdır fakat 650-800 °C arasında mukavemetini hızla kaybeder (Choi ve Choi, 1972).

Çok özel yerlerde kullanılmak üzere üretilmiş ve çok özel spesifikasyonlara sahip olan Inconel 718 malzeme, havacılıkta ve uzay sanayinde sıklıkla kullanılmaktadır (Kuo vd., 2008). Kimyasallarla temas halinde olan parçalarda, denizcilik araçlarında ve parçalarında, roket motor parçalarında, nükleer reaktör parçalarında, çok özel amaçlar için üretilen depo tanklarında, bağlantı elemanlarında, vanalarda ve türbin pervane bıçaklarında sıkça kullanılmaktadır (Kuo vd., 2008).

### **2.2.2.2 Inconel 718 Süper Alaşımındaki Fazlar**

Inconel 718 süper alaşımı çökelti sertleştirilmesiyle sertleştirilebilen alaşımdır. Niyobyum, birçok süper alaşımda alüminyum ve titanyum ile  $\gamma'$  (gama prime) fazını oluşturur.  $\gamma'$  bir intermetalik bileşik olup  $A_3B$  ( $Ni_3Al$ ) şeklindedir ve küresel biçimde gama matris içinde çökelmektedir. YMK yapıya sahip olmasıyla ana matris ile koherant durumda olan bu faz alaşımın mukavemet özelliğini belirleyen ana bileşendir. Çoğunlukla ana matris içerisinde çökeltme hızları çok yüksektir (Zhao ve Henry, 2002). Inconel 718 ve 706'da THM yapıda  $\gamma''$  ( $Ni_3Nb$ ) fazını oluşturarak mukavemetlendirme sağlar. Bu uyumlu faz; iki  $\gamma'$  fazının sıkı paketlenmesiyle oluşmaktadır.  $\gamma''$  (gama double prime), gama matris faz ile koherant içerisindedir ve  $\gamma'$  fazına göre daha karardır. Uygun ısıl işlem metotları Inconel 718 için mühim olup, arzu edilen faz dönüşümünün sağlanması için sıcaklık-zaman-dönüşüm (TTT) diyagramı incelenerek yapılacak olan ısıl işlem şartları belirlenebilir (Betteridge, 1974). Bu faz tane yapısını kontrol eder, dolayısıyla mukavemete katkısı pek yoktur.  $\delta$  fazı yarı kararlı  $\gamma''$  fazının termodinamik olarak kararlı şeklidir. Diğer bir faz ise direkt  $\gamma'$  fazından oluşan  $\eta$  ( $Ni_3Ti$ ) fazıdır. Bu faz da tane sınırlarında oluşmakta ve sünekliğe önemli ölçüde düşürmektedir. Inconel 718'de oluşan tüm fazlar Tablo 2.4'te verilmiştir (Patel ve Smith, 2004).

Tablo 2.4: Niyobyum içeren süper alaşımlarda görülen fazlar.

İsim	Sembol	Yapı	Kimyasal Formül
Gama	$\gamma$	YMK	Katı Çözelti
Gama Prime	$\gamma$	HMK	$Ni_3(Al, Ti, Nb)$
Gama Double Prime	$\gamma$	THM	$Ni_3(Al, Ti, Nb)$
Delta	$\delta$	Ortorombik	$Ni_3(Nb_8Ti_2)$
Eta	$\eta$	HSP	$Ni_3(Ti, Nb)$
MC Karbür	MC	Kübik	NbC
M <sub>6</sub> C Karbür	M <sub>6</sub> C	Komp. Kübik	$(Nb, Mo, Ni)_6C$
Laves	-	Hegz. MgZn <sub>2</sub>	$(Fe, Cr)_2(Ti, Nb)$

Tablo 2.4'ten görüldüğü üzere diğer önemli bir faz karbürlerdir. Karbürler; ağırlıkça %0.02-%0,2 miktarda C eklenmesiyle, Ti, Hf ve Nb gibi reaktif elementlerle karbonun kombinasyonu sonucu oluşturulur.

Niyobyum MC türü karbürleri stabilize eder ve yüksek sıcaklıklarda bile M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> ve M<sub>6</sub>C tipi karbürlerle dönüşebilirler. Karbürler katı çözelti alaşımlarında uzun süre servis şartlarının etkisiyle kendiliğinden oluşabilirler.

### 2.2.2.3 Inconel 718 Süper Alaşımının Mekanik Özellikleri

Tablo 2.5: Inconel 718 süper alaşımı mekanik özellikleri.

Mekanik Özellikler	Oda Sıcaklığı	650°C
Çekme Dayanımı	1240 MPa	965 MPa
Akma Dayanımı	1034 MPa	861 MPa
% Uzama	12	12
Elastik Modülü	210 GPa	163 GPa
Sertlik	35,5 HRc-350 HV	-

Tablo 2.5’de (Matthew ve Stephen, 2002) görüldüğü gibi Inconel 718 süper alaşımı farklı sıcaklıklarda, farklı mekanik özellikler göstermektedir. Alaşıma uygulanan ısıl işlem şartlarında kullanılan sıcaklık, süre ve soğutma hızı gibi değişkenler uygulama alanına ve gerekli görülen mekanik özelliklere göre değişiklik gösterir (İnanır, 2012). Isıl işlem ortam

şartlarına bağlı olarak Inconel 718 alaşımlarının mekanik özellikleri Tablo 2.6’da verilmiştir (Matthew ve Stephen, 2002).

Tablo 2.6: Inconel 718 için yüksek sıcaklıktaki kopma gerilmesi.

Test Sıcaklığı (°C)	Kopma Gerilmesi (MPa)			
	100 saat		1000 saat	
	Düz	Çentikli	Düz	Çentikli
593	1172	1517	896	1416
649	758	1344	586	1172
704	517	896	379	552
760	303	434	172	241

### 2.2.3 Kobalt Bazlı Süper Alaşımlar

Kobalt bazlı süper alaşımlar, ana element olarak kobalt içerir ve içerisinde %50-60 kobalt, mukavemet ve yüksek sıcaklık şartlarında yüksek oksidasyon direnci sağlamak için %20-30 krom, tokluk için %20 ye kadar Ni, katı eriyik mukavemetlenmesi için ise %5-10 arasında tungsten ve düşük miktarlarda molibden bulunmaktadır.

Kobalt; 1495 °C ergime sıcaklığı ve 8.90 g/cm<sup>3</sup> değerindeki yoğunluğu gibi birçok fiziksel özelliği bakımından nikel benzemektedir. Alaşımsız kobalt 415 °C'nin altındaki sıcaklıklarda HSP yapıya sahipken, yüksek sıcaklıklarda YMK yapıya dönüşür. Fakat nikel ile alaşım yaparsa oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar YMK yapı kararlı hale gelir. MP-35N ve MP-159 alaşımları, işleme sonucu sertleşen yüzey merkezli kübik matriste sıkı paket hegzagonal yapının küçük plakalar haline gelmesiyle yüksek dayanım ve sünekliğe sahip olurlar. Haynes 188 birçok özelliği ile tutuşturucularda, geçiş kanalları ve gaz türbinlerinin iç tasarımında kullanılır (Bahadır, 2010).

Kobalt alaşımlarında uygulanan katı eriyik sertleştirilmesi, tungsten, molibden, tantal ve krom gibi refrakter elementlerin çözünürlük sınırına kadar eklenmesi ile yapılır. Karbonitrür çökmesi krom, hafniyum, tantal, tungsten, niyobyum ve titanyum eklenmesi ile oluşturulur. Bu elementler çoğunlukla koherant olmayan mono karbürler (MC) ya da değişik şekillerde krom karbür (M<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> veya M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>) yaparlar (Özdoğru, 2002).

Dövme kobalt alaşımların yapısına bakıldığında en az %10 nikel ihtiva eden yüzey merkezli kübik yapıda matris ve YMK yapısını kararlı kılan Fe, Mn ve C elementlerinden oluştuğu görölmektedir. L-605 alaşımında olduğu gibi, katı eriyik sertleştiricisi olarak tungsten, oksidasyon ve sıcak korozyon direnci elde etmek için ise krom katılır (Betteridge, 1974). Co bazlı süper alaşımlarda mukavemet arttırıcı parçacıklar bulunmaz. Bu alaşım grubu katı çözeltili ve karbür kombinasyonu ile mukavemet kazanır. Bu durum Co bazlı alaşımların kullanım alanını sınırlandırmaktadır.



## BÖLÜM 3

### TERMOKİMYASAL BORLAMA İŞLEMİ

#### 3.1 Giriş

Son yıllarda, endüstriyel uygulamaların yanı sıra akademik çalışmalarda da yüzey işlemleri hususunda büyük ilerlemeler yaşanmıştır. PVD, CVD, termokimyasal uygulamalar, iyon implantasyon malzeme yüzeylerine uygulanan kaplama yöntemlerindedir. En önemli yüzey sertleştirme uygulamalarından olan termokimyasal borlama işlemi; geniş bir uygulama alanına sahip ve teknik olarak geliştirilmiş bir prosestir (Başman, 2010).

Kimyasal olarak ametal bir element olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve hidroklorik/hidroflorik asitler ile soy davranış göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile reaksiyona girerek bor oksit ( $B_2O_3$ ), aynı koşullarda nitrojen ile bor nitrit (BN) oluştururlar. Farklı metal veya ametal elementlerle oluşturduğu bileşiklerin sunduğu farklı özellikler sayesinde endüstride birçok bor bileşiğinin kullanımı sağlanmıştır. Bor bileşiklerinin elektrik iletkenliği fazla değildir, fakat saf bor, karbon iletkenliği iyidir (TMMOB, 2003). Tablo 3.1’de bor elementinin kimyasal özellikleri verilmiştir (Bektaş, 2010).

Tablo 3.1: Bor elementinin kimyasal özellikleri.

Özellik	Değerler	Ölçü Birimi
Yoğunluk	2460	kg/m <sup>3</sup>
Atom ağırlığı	10.811	amu
Erime noktası	2349	K
Kaynama noktası	4200	K
Füzyon ısısı	50.2	kJ/mol
Buharlaşma ısısı	489.7	kJ/mol
Buhar basıncı	0.348	Pa (2573 K)
Elektronegativite	2.04	Pauling

Bor amorf ve kristal olmak üzere iki şekilde bulunmaktadır; kristal bor ortorombik ( $FeB$ ) ve hacim merkezli tetragonal ( $Fe_2B$ ) sistemlerde kristalleşir (Sinha, 1991). Metal borürler

yüksek mukavemete, yüksek sertliğe, yüksek aşınma dayanımına, yüksek ergime noktasına ve kimyasallara karşı yüksek dirence sahiptirler (Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası, 2003).

### 3.2 Borlamanın Tanımı

Borlama, metal (genellikle demir bazlı malzemelerin) yüzeylerinin mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmek için uygulanan ve bor atomunun metalik malzemeye yayılması sonucu yüzeyde intermetalik borür bileşiği/bileşikleri oluşumuna dayanan yüzey işlemidir. Borlama ilk kez Moissan tarafından 1895 yılında ortaya çıkarılmıştır (Bora, 2017; Matuschka, 1980). Borlama işlemi yüzeyi çok iyi temizlenmiş malzemelere 700-1000 °C sıcaklık aralığında ve 1-10 saat sürede katı, sıvı, gaz veya pasta gibi farklı yöntemlerle uygulanabilmektedir (Genel, 2006; Uslu vd., 2007). Günümüzde borlama, teknolojik olarak gelişmiş ve son çalışmalar, akışkan yataкта borlama ve plazma borlama gibi yeni tekniklerin geliştirildiğini göstermektedir.

Özellikle demir borür (FeB) fazı endüstriyel alanlar için kullanılmaktadır (Baştürk ve Erten, 2012). Borlama işlemi sonunda oluşturulan borür fazlarının en önemli özellikleri yüksek ergime sıcaklığına (1400-1550 °C) ve yüksek sertliğe (1420-5000 HV) sahip olmasıdır (Sinha, 1991; Maragoudakis vd., 2002; Topuz, 2009). Demir bazlı malzemelerin borlanması, bu malzemelerin korozyona karşı dayanımını artırılmaktadır. Borlama işlemi ile malzemelerin özellikle asidik ortamlara (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> vb.), deniz suyu ve yüksek sıcaklıklara karşı direnci artırılmaktadır (Sinha, 1991; Wang vd., 2013). Demir esaslı alaşımlarda borlama işlemi sonucu oluşan borür fazı FeB ve Fe<sub>2</sub>B'den birini veya her ikisini ihtiva etmektedir. Çoğunlukla en üst tabakada ortorombik kristal yapıda sert FeB fazı, orta tabakada Fe<sub>2</sub>B fazı ve bunun devamında ise difüzyon bölgesi yer almaktadır (Dilektaşlı, 2014; Uluköy vd., 2006).

Borlamada borun malzeme yüzeyine yayılması sonucunda malzemenin dış katmanında borür tabakası, bunun sonrasında geçiş (difüzyon) bölgesi, onun altında ise matris meydana gelmektedir. Borür tabaka kalınlığı; borlama işlem sıcaklığına, yöntemine ve işlem süresine bağlı olarak değişir (Çarkçı, 2012). Tane sınırları, atom içi boşluklar, dislokasyonlar gibi mikro hatalarla çizikler, çatlaklar ve yüzey pürüzlülükleri gibi malzeme yüzeyinin daha reaktif olduğu yerler genellikle borür tabakasının başlangıç oluşum noktalarıdır (Bayça ve

Şahin, 2004; Ersöz, 2008). Borlama ile diğer difüzyon esaslı yüzey geliştirme yöntemleri karşılaştırıldığında; elde edilen tabaka kalınlığı değeri sementasyon, alüminyumlama veya silisleme yöntemleriyle elde edilen tabaka kalınlıklarına göre daha düşük olmasına rağmen diğer metotlarla oluşan tabakalara nazaran daha sert tabakalar elde edilebilmektedir (Sinha, 1991; Kartal, 2011). Borlama işlemi, elverişli malzemeye uygulandığında, sinterlenmiş karbürlerle kıyaslanabilecek kadar iyi aşınma direnci sağlar (Anık vd., 2009).

Borlama işleminde amorf bor,  $B_4C$ ,  $Na_2B_4O_7$ ,  $B_2H_6$  gibi bileşikler bor kaynağı olarak kullanılır.  $KBF_4$ ,  $NH_4F$  gibi aktivatörler borür tabakasının düzenli gelişimini sağlarken  $SiC$ ,  $Al_2O_3$  gibi deoksidanlardan oluşan katkıları da işlem esnasında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam sağlar (Uslu vd., 2007).

### **3.3 Alaşım Elementlerinin Borür Tabakasına Etkisi**

Saf demirde borür tabakası kolonsal yapıdadır ve kalınlığı, alaşımlı çeliktekenden daha yüksektir (Palombatini ve Carbuicchio, 1984). Alaşım elementleri, bor difüzyonunu düşürmektedir. Borür tabakasının kolonsal yapısı matrisde bulunan alaşım elementlerinin oranlarına bağlıdır.

Cr, çeliklerde borür tabakasının hem yapısını hem de kalınlığına etkilemektedir. %12 krom ihtiva eden çeliklerde 65 µm kalınlıkta borür tabakaları meydana gelirken, %26 krom içeren çeliklerde ise borür tabaka kalınlığı 5 µm dolaylarındadır.

Nikelin borür katmanına etkisi yüksek derişim değerlerinde ortaya çıktığı görülmektedir. %4 nikel ihtiva eden çeliklerde 90 µm borür tabaka kalınlığı meydana gelirken, %14 nikel ihtiva eden çeliklerde 60 µm civarındadır (Yapar, 2003). Çok yüksek nikel içeren alaşımlarda borür tabakasının kolonsal yapıda oluşma ihtimali azalmakta ve oluşumu gözlemlenen borür fazının yüksek derecede gözenekli olduğu tespi edilmektedir.

Manganez, krom gibi borür tabakasına girerek, yüzeye doğru yayılmaktadır. Tsipas ve Rus 1985 çözünmenin genellikle iç kısımdaki  $Fe_2B$  fazında olduğunu iddia etmektedirler.

### **3.4 Borlama Yöntemleri**

Tüm borlama yöntemlerinin birbirlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları vardır. Günümüz endüstrisinde en çok uygulama alanı olan yöntem ise, pratik ve ekonomik oluşu nedenleriyle, katı ortamda borlama yöntemi olmuştur. Borlama işleminde beş farklı teknik mevcuttur; katı, sıvı, gaz, plazma ve pasta borlama teknikleridir. Bu yöntemler iki temel gruba ayrılabilir:

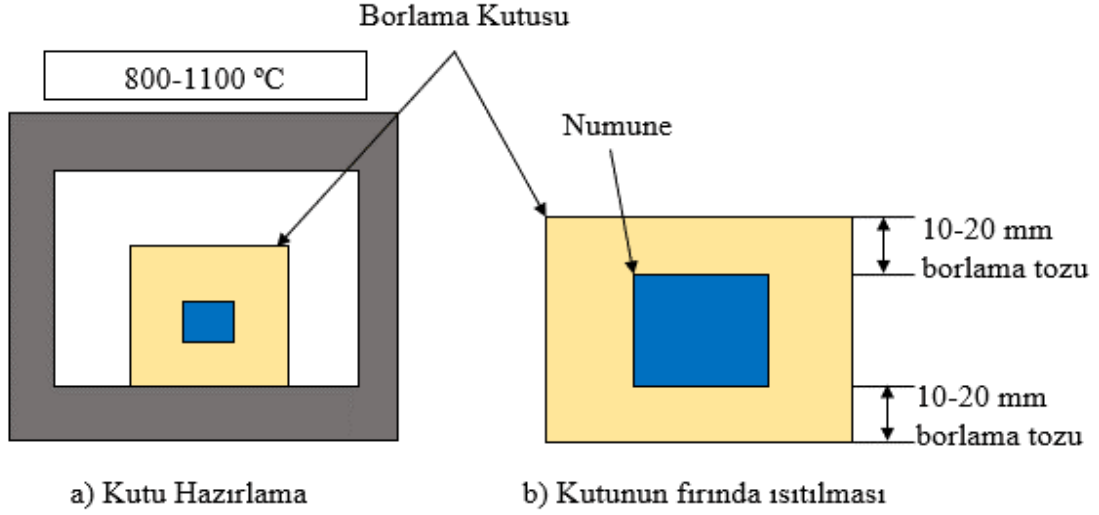
- Termokimyasal yöntemler (kutu, pasta, sıvı ve gaz borlama)
- Termokimyasal olmayan yöntemler (PVD, CVD, plazma sprey kaplama ve iyon biriktirme)

Termokimyasal yöntemler bu tekniklerden en fazla kullanılanıdır. Termokimyasal yöntemler de dört grup altında toplanmaktadır (Dilektaşlı, 2014; Başman, 2010).

### **3.4.1 Kutu Borlama**

Kutu borlama işlemi, borlanan malzemeye ve elde edilmek istenen borür tabakasının kalınlığına bağlı olarak genellikle 800-1050 °C sıcaklık aralığında, bir saat ve daha uzun sürelerde gerçekleştirilir (Hunger ve Trute, 1994).

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi bu yöntemde borlanacak parçalar, ısıya dayanıklı kutu (genellikle paslanmaz çelik) içine borlama tozuyla (ticari ekabor) kaplanmak üzere 10-20 mm kadar gömülür. Bu işlemden sonra üst tabakaya dolgu malzemesi (SiC, Ekrit vs.) eklenerek hava geçişine engel olacak şekilde kapak kapatılır (Şekil 3.1) (Yurtseven, 2008). İşlem esnasında, fırın borlama sıcaklığına ısıtılır ve yüksek sıcaklıkta borlama işlemi ile metal yüzeyine bor yayılması gerçekleşir. Bu sıcaklıkta yeterli süre beklendikten sonra kutu fırından alınır ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılır (Yurtseven, 2008).



Şekil 3.1: Kutu borlama işleminin şematik görünümü.

Bor yayılma işlemi ile tek fazlı  $Fe_2B$  veya iki fazlı  $Fe_2B+FeB$ 'den oluşan ferrobor tabakası elde edilir. İki fazlı  $Fe_2B+ FeB$ 'nin oluşumundan daha çok tek fazlı  $Fe_2B$  istenir.  $FeB$  fazı borca zengindir ve yüksek kırılma katsayısına sahiptir. Bu nedenle bu fazın oluşması istenmez.

Kutu borlamada kullanılan toz karışımlarını meydana getiren bileşenler; katı bor kaynağı, akışkanlar ve aktivatörlerdir. Yaygın olarak kullanılan bor kaynakları; bor karbür ( $B_4C$ ), ferrobor ve amorf bordur. Amorf borun oldukça pahalı, ferro borun ise yeterli safiyette üretilmemesinden dolayı endüstriyel uygulamalarda bor karbür kullanılmaktadır ( Choi ve Choi ., 1972; Uslu vd., 2007; Dilektaşlı, 2014). Bor karbür, amorf bor ve ferrobor gibi bor verici bileşikler, alkali metaller,  $KBF_4$ ,  $AlF$ ,  $NaCl$ ,  $NH_4Cl$  gibi aktivatörler ve  $SiC$  ve  $Al_2O_3$  gibi dolgu maddeleri veya reaktif olmayan bileşikler belirli oranda karıştırılarak yapılır (Demirel, 2013).

Tipik borlama işleminde kullanılan ticari bor tozlarının bileşimleri aşağıda verilmektedir (Uluköy vd., 2006; Yurtseven, 2008):

- %5  $B_4C$ , %90  $SiC$ , %5  $KBF_4$
- %50  $B_4C$ , %45  $SiC$ , %5  $KBF_4$
- %85  $B_4C$ , %15  $Na_2CO_3$
- %95  $B_4C$ , %5  $Na_2B_4O_7$
- %84  $B_4C$ , %16  $Na_2B_4O_7$
- Amorf bor (%95-97)

- %95 Amorf bor, %5 KBF<sub>4</sub>
- %79 B<sub>4</sub>C, %16 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>, %5 KBF<sub>4</sub>

### 3.4.2 Pasta Borlama

Pasta borlama, kutu borlamanın karmaşık şekilli ve kitlesel parçalar için güçlük çıkarıcı ve daha pahalı olduğu veya zaman kaybının meydana geldiği uygulamalarda işlem gören bir metoddur. Bu yöntemde borlayıcı ortam olarak %45 B<sub>4</sub>C ve %55 kriyolit (N<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) ya da bütül asetat içinde çözülmüş nitro selüloz bağlayıcı ve geleneksel borlama tozu karışımı (B<sub>4</sub>C-SiC-KBF<sub>4</sub>) kullanılabilir. Bu toz malzemeler, macun haline getirilip parça üzerine sürülerek ya da püskürtülerek yaklaşık 2 mm kalınlığında tabaka elde edilir. Parça fırınlanmadan önce kurumaya bırakılır. Daha sonra ise borlanacak malzeme 800-1000 °C sıcaklıkta 2 ile 10 saat arasında muhafazalı atmosfer altında borlama işlemine tabii tutulmaktadır. Ar ya da N<sub>2</sub> gazı koruyucu atmosfer olarak kullanılabilir (Campos, 2005).

Fırından çıkarılan parça soğutulduktan sonra yüzeyinde yapışmış olan artıklar temizlenir ve böylece borlama yapılmış olur. Yöntemin önemli bir dezavantajı olan işlem sonunda numune yüzeyine macunun yapışması durumunu en aza indirmek için sulu sodyum silikat çözeltisi, organik karakterli çözeltiler ve %3 polivinil alkol ya da %0,5 metil selüloz içeren sulu çözeltiler kullanılabilir (Tablo 3.2) (Çalık, 2005).

Tablo 3.2: Pasta borlamada kullanılan koruyucu gazlar ve özellikleri.

Koruyucu gaz türü	Kimyasal bileşimi (%)
Argon	99 N <sub>2</sub> , 1 H <sub>2</sub>
Amonyak	75 H <sub>2</sub> , 25 N <sub>2</sub>
Saf Azot	99 N <sub>2</sub> , 1 H <sub>2</sub>

### 3.4.3 Sıvı Borlama

Sıvı borlama yönteminde borlama banyosu sıvı haldedir. Sıvı ortamda borlama, metalik malzemelerin bor içeriğine sahip erimiş tuz banyosuna daldırılmalarıyla yapılmaktadır. Sıcaklık değerinin 850 °C'nin altında olması durumunda erimiş boraksın akıcılığı azalmaya

başlar ve borlama işlemini olumsuz yönde etkiler (Bayça ve Şahin, 2004; Ayter, 2005). Bu metodun; kontrollü ortam ve gaz koruması gerektirmemesi, uygulanabilirlik bakımından basit olması, sarf malzemelerin ucuz ve temininin kolay olması gibi avantajları bulunmaktadır. Bu avantajların yanında ciddi dezavantajları da mevcuttur (Çalık, 2005; Ünüvar, 2013; Güneş, 2010). Bu dezavantajları şu şekildedir:

- İşlemden sonra yüzeyde kalan tuzun ve reaksiyona girmemiş borun kaldırılması gereklidir. Bu işlem ekstra maliyet ve zaman kaybına yol açmaktadır.
- Başarılı bir borlama prosesi için banyo viskozitesi yüksek olmamalıdır. Bu sürekli tuz ilavesiyle gerçekleştirilmektedir. Bu da yüksek maliyetlidir.
- İşlem için iş parçasını korozyondan koruyacak fırınlara ihtiyaç vardır.

Yöntem akımsız ve elektrolitik tuz banyo borlama olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır (Simonenko vd., 1982). Tablo 3.3'te işlemden kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri verilmiştir (Karlı, 2005).

Tablo 3.3: Sıvı borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri.

Malzeme	Bor karbür	Borik asit	Sodyum bor florür	Susuz Boraks
Formül	B <sub>4</sub> C	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NaBF <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub>
Molekül Ağırlığı (gr)	55,29	69,64	109,81	201,46
Teorik Bor Miktarı	78,28	31,07	9,85	21,5
Ergime sıcaklığı (°C)	2450	450	-	741

### 3.4.3.1 Akımsız Tuz Banyo Borlama

Borlama işlemi %20 B<sub>4</sub>C ile birlikte daha etkili bir indirgen olan ferroalüminyum içeren eriyikte daha verimli hale getirilebilir. Fakat en iyi sonuçlar %55 boraks, %40 civarı ferrobor ve %4 civarı ferroalüminyum içeren banyo karışımında alınmaktadır. Nikel alaşımlarının

borlanması,  $KBF_4/KF$  tuz banyosu,  $670\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altındaki uygulamalarda 75/25 oranında kullanılarak düşünölen kalınlıkta bor tabakası elde edilebilmektedir (Kayalı, 2011).

### 3.4.3.2 Elektrolitik Tuz Banyo Borlama

Bu yöntemde katot olarak demir bazlı parça, anot olarak da grafit çubuk kullanılır. Tuz banyosu ise ergitilmiş boraktır. Parçalar  $940\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta  $0,15\text{ A/cm}^2$  akım yoğunluğunda 4 saat süre ile elektrolitik boraks banyosuna daldırılır. Genel olarak, uniform bir tabaka elde etmek için parçalar banyo içinde sürekli döndürölür. İşlem sonunda parça soğumaya bırakılır.

Bu yöntemde iş parçası bir tuz tabakasıyla kaplanır ki bunu temizlemek oldukça masraflıdır. Elektrolizle borlama da anodun bir tarafında ince borür tabakası oluşur. Bu da gölge etkisi yaparak değışik ve düzensiz kalınlıklara sebep olur (Karalı, 2005).

Banyo bileşimlerinde  $0.2\text{ A/cm}^2$  akım yoğunluğu,  $600\text{-}700\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklık ve 2-6 süre şartlarını kullanarak sade karbonlu çelikte  $15\text{-}70\text{ }\mu\text{m}$  kalınlıkta borlu tabaka elde edilmiştir (Selçuk, 1994).

### 3.4.4 Gaz Borlama

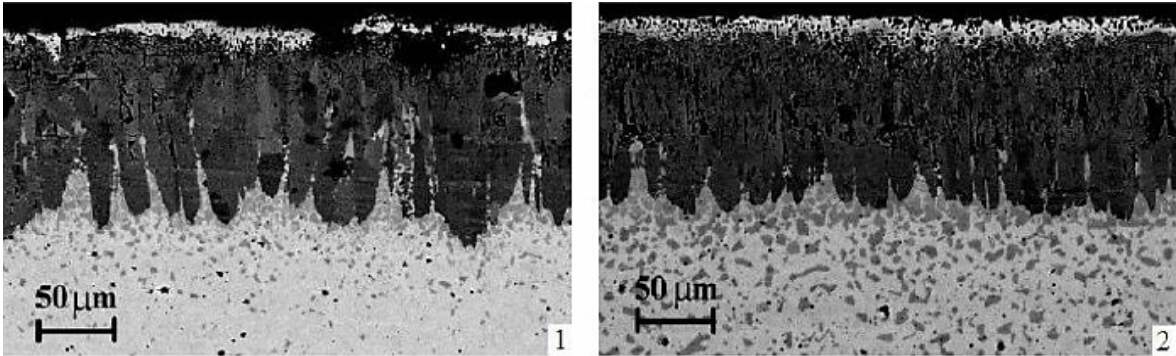
Proses  $B_2H_6\text{-}H_2$  bor halide- $H_2$  veya  $N_2$   $(CH_3)_3B$  ve  $(C_2H_5)_3B$  gibi organik bor bileşikleri içeren gaz karışımlarında yüksek sıcaklıkta dış platforma mühbep paslanmaz çelik bir odadaki numune üzerine sıçratılması ile gerçekleştirilir. Metotta sarf edilen  $BF_3$ ,  $BCl_3$ ,  $B_2H_6$ , gibi bor halid/diboran gibi bileşiklerin sakıcalı olmaları sebebiyle bu yöntem ticari olarak uygun değıldir. Bu gazlara alternatif olarak  $C_3H_9BO_3$ ,  $B(OCH_3)_3$ ,  $C_6H_{15}B$  ve  $B(C_2H_5)_3$  gibi zehirsiz organik bor kaynakları da kullanılabilir (Güneş, 2010; Küper vd., 2000). Tablo 3.4'te borlama uygulamasında sarf edilen türlü gazların özellikleri verilmiştir (Başman, 2010; Şen, 1997).



Tablo 3.4: Borlama işleminde kullanılan çeşitli gazların bazı özellikleri.

Gazlar	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı (gr.)	Teorik Bor Miktarı (%)	Donma Noktası (°C)
Bor Tri Florid	BF <sub>3</sub>	67,82	15,95	-128,8
Bor Tri Klorid	BCl <sub>3</sub>	117,9	9,23	-107,3
Bor Tri Blorid	BBr <sub>3</sub>	250,57	4,32	-46,0
Di-Boran	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,69	39,08	-165,5
Bor Tri Metil	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> B	55,92	19,35	-161,5
Bor Tri Etil	(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>3</sub> B	98,01	11,04	-94,0

Gaz fazından bor ve bor karbür oluşturmaya yönelik bir yöntem geliştirmiştir. Bu yöntemde bor karbür, triklorür ile karıştırılan hidrojenin 1300-1500°C’de sıcak grafit çubuktan geçirilmek suretiyle oluşturulmuştur. Geliştirilen bu yöntem ile demir bazlı malzemeler, silika, titanyum, nikel, kobalt ve tungsten başarılı bir şekilde borlanabilmiş ve genel olarak yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemeler ile uzay teknolojisi gibi çok pahalı ve özel alanlarda uygulanmıştır (Matuschka, 1980). Şekil 3.2’de ise bor karbürleme ile elde edilen çok bileşenli tabakalar gösterilmektedir (Pertek ve Kulka, 2002).



Şekil 3.2: Bor karbürleme ile elde edilen çok bileşenli tabakalar.

### 3.4.5 Plazma Borlama

Kutu, sıvı ve gaz borlama gibi geleneksel borlama yöntemleri, uygulandıkları malzeme yüzeyinde oluşan borür tabakalarının kontrolünün sağlanamaması ve gözenek oluşumu gibi birçok dezavantajlara sahiptir (Ülker, 2012). Plazma borlama işlemi diğer yöntemlere göre ekonomik oluşu, işlem parametrelerinin kontrolünün kolay olması ve düşük işlem

sıcaklıklarında borlama işleminin gerçekleştirilebilmesi gibi birçok avantaja sahiptir (Ülker, 2012; Çelebi, 2005). Plazma borlama  $BCl_3$ ,  $BF_3$ ,  $B_2H_6$  ve TEB (trietil boran) gibi bor bileşikleri ve redüktan olarak hidrojen gaz kullanılarak, 800- 1100 °C sıcaklıkta, yaklaşık 2-10 Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş bir plazma içerisinde yapılan borlamadır (Özaydın, 2015; Barış, 2007). Plazma borlamanın mekanizması yüksek sıcaklıktaki malzemelerin taşıyıcı metal yüzeyine püskürtülmesini kapsar (Panus, 2006). Katı ve sıvı borlama uygulamalarında 600 °C gibi düşük sıcaklıklarda borlama işleminin mümkün olmadığı durumlarda,  $B_2H_6-H_2$  gaz karışımı ile çeşitli çelikler üzerinde bor tabakaları oluşturulmaktadır (Tezcan, 1996). Ancak bu uygulamada gaz borlamada meydana geldiği gibi en büyük dezavantajı sarf edilen bor halid gazlarının zehirleyici olması ve ilk yatırım giderinin fazla olmasıdır. (Baştürk ve Erten, 2012; Uluköy, vd., 2006; Bayça ve Şahin, 2004).

### 3.5 Borlama İşleminin Avantajları

Borlama uygulamasının bazı avantajları aşağıda belirtilmiştir (Genel, 2006).

- Borür tabakasının sertliği yüksek sıcaklıklarda da kararlıdır.
- Diğer yüzey sertleştirme uygulamalarının tersine pek çok çelik, borlama için uygundur.
- Borlanmış yüzeyler yüksek sıcaklıklarda (850 °C) orta seviyede oksidasyona karşı dayanıklıdır.
- Borür tabakasının ergimiş metal eriyiklerine dayama direnci son derece yüksektir.
- Borlanmış yapının yorulma ömrü ve servis süresi oksitleyici ve korozif ortamlarda yüksektir.
- Borlama prosesi, sürtünme katsayısını düşürmekte ve yağlayıcı kullanımını minimize etmektedir (Genel, 2006).

### 3.6 Borlama İşleminin Dezavantajları

- Bu proses çok hassas bir işlem ve işçilik gerektirmektedir. Bu nedenle borlama, gaz karbürleme ve plazma nitrüleme gibi termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine oranla daha pahalıdır.

- Borlama sonucunda, taban malzemesinin kompozisyonuna bağlı olarak borlanmış tabaka kalınlığının %5-25 oranında boyutsal artış gerçekleşir.
- Yüzeyin geleneksel yollarla işlenmesi kaplama tabakasında kırılmalara neden olmaktadır.
- Takımlar malzemeleri borlandıktan sonra sertleştirme ve temperlemeye tabi tutulacaksa bu işlemler borür tabakasının özelliğinin korunması açısından inert ortamda veya vakum altında yapılmalıdır (Vangavati, 2006).

## BÖLÜM 4

### NİKEL BAZLI ALAŞIMLARIN BORLANMASI

Nikel bazlı alaşımlar muhteşem korozyon dayanımları mevcuttur. Bu yüzden bu süper alaşımlar yüksek sıcaklık ve korozif ortam şartlarında sıklıkla tercih edilirler.

Petrol endüstrisi ve enerji endüstrileri nikel bazlı süper alaşımların uygulama sahalarının önde gelenlerinden sayılabilmektedir. Yalnız, Ni bazlı süper alaşımların yüzey sertlikleri tatmin edici değildir. Dolayısıyla bu malzemeler abrasif veya adhezif aşınma şartlarında kullanılacak ise elverişli bir aşınma önleyici gerektirmektedirler (Makuch ve Kulka, 2014). Geçen senelerde uygulanan borür kaplamalar, aşınma ve abrazyona karşı sinterlenmiş karbürlerle mukayase edilebilecek bir aşınma direnci gösterdiğinden önemli bir yere sahiptir. Borlama, metal ve alaşımlarının mekanik zorlama, korozyon gibi servis ömrüne tesir eden dış faktörlere karşı gereçlerin dayanımı ve servis ömrünü yükselten termokimyasal bir yüzey değişkenlik prosesidir (Sinha, 1991). Borlama işlemi triboloji dayanımı bakımından başka termokimyasal işlemlere göre çok daha iyi aşınma dayanımı sunduğu hatta borür tabakalarının nitrülenmiş, karbürlenmiş, karbo-nitrülenmiş veya krom kaplı numunelere göre 2 katı aşan aşınma dayanımları gösterdikleri birçok çalışmada ifade edilmiştir (Venkataraman ve Sundararajan, 1995; Özdemir vd., 2009).

Borlama metodu olarak farklı türde metodlar uygulansa da genel olarak katı (kutu borlama), sıvı (borür tuzları içerisinde) ve gaz ortamı şekillerinde tatbik edilebilir. Kutu borlama yöntemi en kullanışlı yöntem olup kutu sementasyona benzemektedir. Borlama, çeliklere uygulanmasının yanında nikel, kobalt, molibden, titanyum gibi demir dışı metaller ve sermetlere uygulanmaktadır. Ancak, nikel bazlı süper alaşımlar üzerine yapılan çalışmalar sınırlı sayıda (Deng vd., 2015; Muhammad vd., 1999).

Nikel bazlı alaşımlarda başlıca  $Ni_xBy$ ,  $Cr_xBy$ ,  $Fe_xBy$  fazları oluşmaktadır.  $Ni_xSi_y$  fazı ise özellikle aşınma uygulamaları için istenmeyen bir fazdır. Çünkü silisyum içerikli tabaka 100-500 HV gibi düşük sertlik değerleri ile yüzeyde gözenekli şekilde olduğundan tribolojik uygulamalarında yüzeyden basit bir şekilde kalkar ve aşındırıcı olarak vazife yaparak malzemenin aşınma dayanımını azaltır.

#### 4.1 Nikel Bazlı Alaşımların Borlanması Oluşan Fazlar

Nikel bazlı alaşımların borlanması son yıllarda ilgi çeken konuların başındadır. Yapılan çalışmalar nikel bazlı alaşımların, akışkan yatakta, elektrokimyasal ve kutu borlama yöntemleriyle borlanabileceğini göstermektedir (Makuch ve Kulka, 2014).

Nikel bazlı alaşımların borlanması için silisyum içermeyen ticari Ekabor-Ni tozu geliştirilmiştir. Termodinamik çalışmalar silisyum içeren bir toz kullanıldığında borlanma ve silisyumlama adı verilen iki reaksiyonun olacağını göstermiştir. İşlemin gerçekleştiği sıcaklık ve alaşımın nikel içeriği, bu reaksiyonlardan hangisinin baskın olacağını belirlemektedir.

Demir bazlı malzemelerin borlanmasında oluşan reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (Hunger ve Trute, 1994):



Nikel bazlı alaşımların borlanmasında ise aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelmektedir:



Silisyum içeren borlama tozu kullanıldığında borür tabakası üstünde silisid tabakası oluşmaktadır. Borür tabakasının ve silisid tabakalarının oluşması termodinamik koşullara bağlıdır. Tablo 4.1'de Ekabor-1 tozu ile 850 °C'de 6 saat borlanmış bazı alaşımlarda hangi tabakaların oluştuğu görülmektedir (Koichiro vd., 1983).

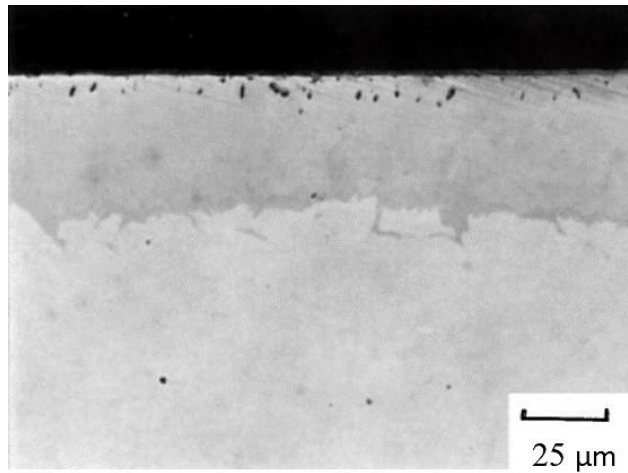
Tablo 4.1: Ekabor-1 tozu ile 850 °C'de 6 saat borlanmış bazı alaşımlarda görülen tabakalar.

MALZEME	% Ni	SİLİSYUMLANMA
Nikel	100	Var, Saf silisid
Hastelloy B	65	Var, Silisid-borür karışık tabaka
Incoloy 825	44	Var, Silisid-borür karışık tabaka
Alloy 20	32	Var, Silisid-borür karışık tabaka
X NiCr 26 15	26	Var, Silisid-borür çift tabaka
X 15 CrNiSi 25 20	20	Yok, Saf borür
X 5 CrNiMo 18 10	10	Yok, Saf borür

Tablo 4.1'de görüldüğü gibi normal borlama şartlarında demir bazlı alaşımlarda silisyumlanma görülmemektedir. Nikel oranı arttıkça silisyumlama ihtimali artmaktadır.

#### 4.2 Borlanmış Nikel Bazlı Alaşımların Karakterizasyonu ve Mekanik Özellikleri

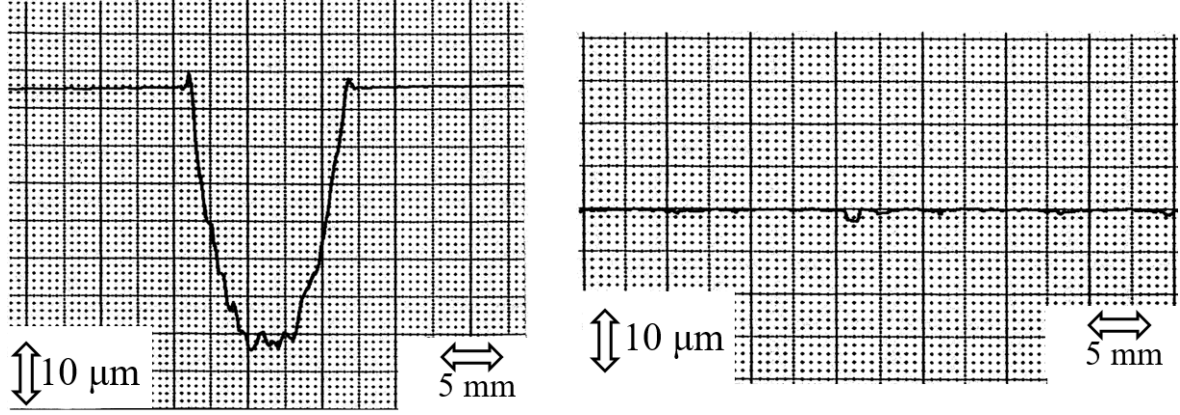
Borlama işleminde kullanılan borlama tozuna bağlı olarak nikel bazlı alaşımların borlanmasında farklı mikro yapılar oluşmaktadır. Ueda ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada borlama ajanı olarak silisyum içermeyen toz kullanılmıştır. Şekil 4.1'de borlama işlemi sonucu oluşan tabaka görülmektedir (Ueda vd., 2000).



Şekil 4.1: Nikelin 800 °C'de 7 saat borlanması sonucu oluşan tabaka.

Yapılan bu çalışmada nikelin borlanması sonucu yapıda sadece borür tabakası görülmektedir (Şekil 4.1). Borlanmış parçaya aşınma testleri uygulanmıştır ve sonucunda sürtünme

katsayısının yarıya düştüğü görülmüştür. İşlemsiz ve borlanmış numuneler Şekil 4.2’de görülmektedir (Ueda vd., 2000).



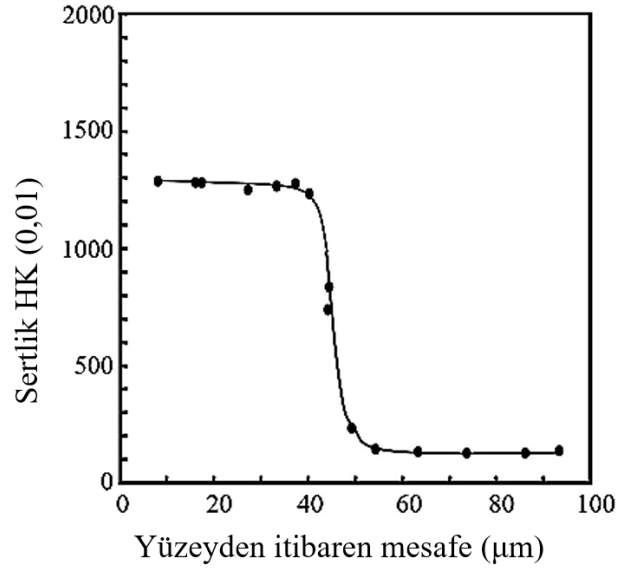
a) İşlem görmemiş numune

b) Borlanmış numune

Şekil 4.2: İşlem görmemiş ve borlanmış numunelerin aşınma testi sonucu yüzey profilleri.

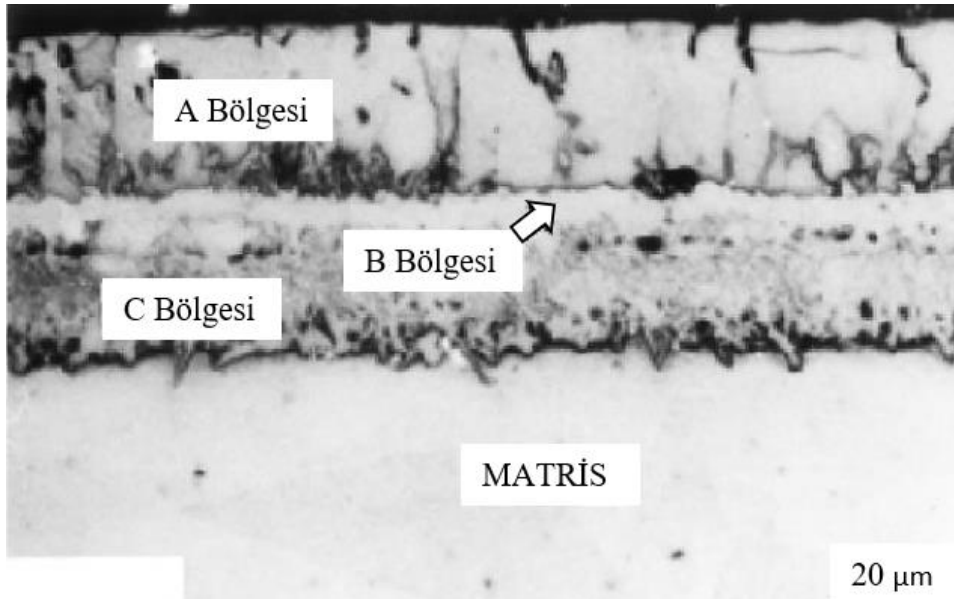
İşlemsiz nikelin aşınma sonucu iz derinliği ve büyüklüğü sırasıyla yaklaşık 8 µm ve 34 µm iken borlanmış nikelde bu değerler 1 µm ve 2 µm civarında olduğu Şekil 4.2’de görülmektedir (Özdemir vd., 2009).

Parçaya yapılan sertlik çalışmaları neticesinde ise sertlik değeri yüzeyde 1300 HV’ye kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Şekil 4.3’te yüzeyden itibaren elde edilen sertlik değerlerinin grafiği verilmiştir (Ueda vd., 2000).



Şekil 4.3: Saf nikelin 800 °C’de 7 saat borlanması sonucu yüzeyden itibaren elde edilen sertlik değerleri.

Literatür çalışmaları incelendiğinde, Inconel alaşımlarının borlanması ile ilgili çalışmalar az sayıdadır. Bu çalışmalardan biri W. Muhammad ve arkadaşlarının Inconel 722'yi borladıkları çalışmadır (Palombarini ve Carbucicchio, 1987). Çalışma kapsamında Inconel 722 alaşımı 900 °C’de 10 saat süre ile borlanmıştır. Elde edilen mikro yapı görüntüleri Şekil 4.4’de görülmektedir (Muhammad vd., 1999).



Şekil 4.4: Inconel 722 alaşımının borlanması sonucu oluşan tabakalar.



Şekil 4.4'den de görüleceği üzere borlama sonucu oluşan tabakalar üç bölgeye ayrılmıştır. A bölgesi yüzeye yakındır ve kolonsal yapıdadır. B ve C bölgeleri dağılayıcıdan fazla etkilenmemiştir. Numune yüzeyinden tabakalar kaldırılarak sırasıyla A, B ve C bölgelerinin XRD ve EDS analizleri yapılmıştır.

Silisyum oranı matris bölgesinde yok denilecek kadar az iken, yüzeye yakın olan A bölgesinde %20 civarındadır. Analizler sonucu A bölgesinin  $Ni_2Si$ 'den meydana geldiği tespit edilmiştir. B ve C bölgelerinde ise  $Ni_4B_3$  ve  $Ni_2B$  fazlarına rastlanmıştır. Nikel ve nikel bazlı alaşımların kutu borlanması sonucu oluşan tabakalar borlama ajanının silisyum içeriğine göre farklılık gösterir (Muhammad vd., 1999).

## BÖLÜM 5

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 5.1 Altlık Malzemesi Olarak Inconel 718

Süper alaşımlar bünyesinde yüksek miktarlarda krom olmak üzere en az on farklı elementi bulundurlar. Süper alaşımlar yüksek sıcaklıklarda korozyon ve oksidasyon direnci, üstün sürtünme ve kopma dayanımı gibi birçok özelliğe sahiptir. Süper alaşımın içerisinde bulunan Niobiyum (Nb) elementinin yapısının yüksek sıcaklıklardaki oksidasyon direncinin zayıf olması kullanılan alanları büyük ölçüde sınırlamıştır (Qiao vd., 2019). Bundan dolayı ya diğer alaşım elementlerinin oranı artırılmakta ya da malzeme üzerine kaplama yapılmaktadır. Kimyasal bileşimi Tablo 5.1'de verilen (Bradley, 1988), ısı işlemlere maruz kalmış Inconel 718 süper alaşımı, kutu borlama yöntemi ile borlanmış ve karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.1: Inconel 718 süper alaşımının kimyasal bileşimi, % ağırlık.

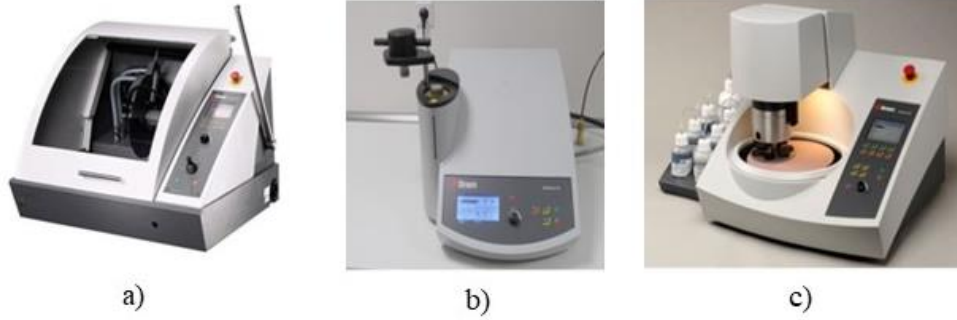
Ni	Fe	Cr	Nb	Mo	Ti	Al	C
52,5	18,5	19	5,1	3	0,91	0,5	0,08

Süper alaşım grubundan olan Inconel 718 alaşımı, yüksek sıcaklık uygulamalarında, ısı dayanım, korozyon ve oksidasyon durumlarında yüksek dayanıma sahiptir. Bu özellikleri ile günümüzde gaz türbin motor parçaları, havacılık ve uzay sanayi, nükleer reaktör parçaları ve denizcilik gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Kuo vd., 2008).

#### 5.2 Numune Hazırlama İşlemleri

Dökümü yapılan alaşımlar ve ısı işleme maruz kalan malzemeler büyük parçalar halinde olduğu için boyut küçültme işlemine gerek duyulmuştur. Öncelikle numuneler Şekil 5.1.a'da verilen Discotom 100 kesme cihazı ile daha küçük parçalar haline getirilmiştir. Boyutları biraz daha azalan parçalar Secotom 50 hassas kesme cihazı ile boyut küçültme işlemine devam ettirilmiştir. Kesme cihazından çıkan parçalara otomatik zımparalama işlemine tabi tutabilmek için Şekil 5.1.b'de verilen CitoPress 10 cihazı yardımıyla bakalite alma işlemi

yapılmıştır. Bakalite alınan numunelerin Şekil 5.1.c’de verilen Tegramin 30 cihazı ile sırasıyla 240-400-600-800-1000-1200-2000-3000 zımpara aşamalarından geçirilerek parlatma için yüzeyleri temizlenmiştir. Daha sonra Tegramin 30 cihazına Floc Parlatma keçesi takılmıştır. Deneyler için kullanılan numunelerin önce 6 µm sonrasında 3 µm elmas süspansiyon kullanılarak yüzey parlatma işlemi sonlandırılmıştır.



Şekil 5.1: Metalografik cihazlar; a) Discotom 100 kesme cihazı, b) CitoPress 10, c ) Tegramin 30.

### 5.3 Borlama İşlemi

Yüzeyleri temizlenmiş numuneler borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama yöntemlerinden kutu borlama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde borlanacak parçalar, ısıya dayanıklı kutu (genellikle paslanmaz çelik) içine borlama tozuyla (ticari ekabor) kaplanmak üzere 10-20 mm kadar gömülmüştür. Bu işlemden sonra üst kısma dolgu malzemesi (SiC, ekrit, alüminyum tozu vs.) doldurularak hava geçişi engellenecek şekilde kapak kapatılmıştır. İşlem esnasında, fırın borlama sıcaklığına ısıtılmış ve yüksek sıcaklıkta borlama işlemi ile metal yüzeyine bor yayılması gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklıkta yeterli süre beklendikten sonra kutu fırından alınıp oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. İşlemler sırasıyla aşağıda gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir:

1. Aşama: Numuneler hava alamayan paslanmaz çelik kutu içerisine yerleştirildikten sonra yüzeylerine tam temas sağlayacak şekilde bor tozuna gömülür (Şekil 5.2).
2. Aşama: Malzemelerin boylarını aşacak şekilde tamamen bor tozuna gömülürler ve bir sonraki aşamaya geçilir (Şekil 5.3).
3. Aşama: Bor tozunun üzerine kömür tozu dökülerek 4. Aşamaya geçilir (Şekil 5.4).

4. Aşama: Paslanmaz kutunun kapağı kapatılır ve belirlenen sıcaklıktaki fırına yerleştirilip saatinin dolması beklenir (Şekil 5.5).



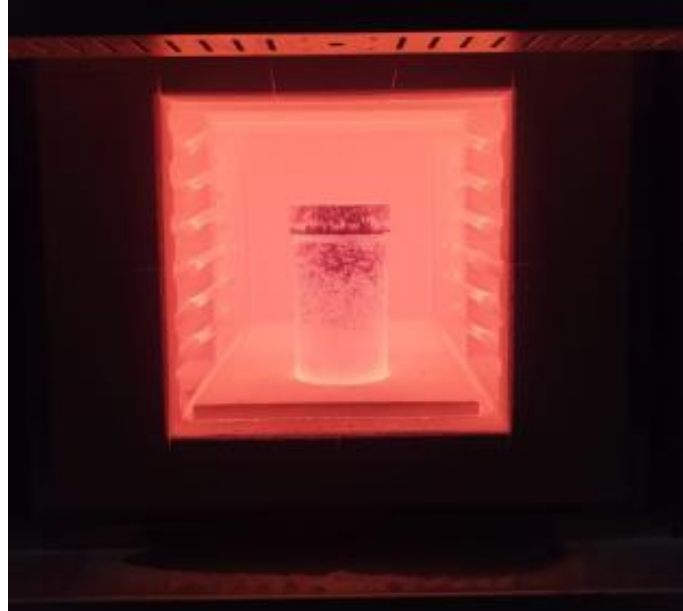
Şekil 5.2: Borlanacak numunelerin bor tozuna gömülmesi (1. Aşama).



Şekil 5.3: Borlanacak numunelerin bor tozu ile üzerinin kapatılması (2. Aşama).



Şekil 5.4: Borlanacak numunelerin üzerinin kömür tozu ile kapatılması (3. Aşama).



Şekil 5.5: Borlanacak numunelerin fırında belirlenen sıcaklıkta bekletilmesi (4. Aşama).

#### 5.4 Karakterizasyon Çalışmaları

Borlama işleminin ardından numunelerin; taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile kesit incelemeleri, X-ışınlar difraksiyonu (XRD) analizi, optik mikroskop analizi, mikro sertlik ölçümleri ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Optik görüntüler Şekil 5.6'da verilen, dijital görüntüleme ve ergonomik verimlilik için optimize edilmiş yenilikçi bir tasarıma sahip ters çevrilmiş bir materyal mikroskobu olan Eclipse MA200 cihazında alınmıştır.



Şekil 5.6: Eclipse MA200 Optik Mikroskobu.

Şekil 5.7’de verilen CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM cihazında ise malzemenin mikroyapısal görüntüleri alınmıştır. Alınan görüntülerden SEM cihazının eklentisi olan EDX elementel analiz yapılmıştır.



Şekil 5.7: CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI SEM Cihazı.

### 5.5 Sertlik Ölçümleri

Yüzey temizleme işlemleri görmüş işlem görmüş ve işlem görmemiş numuneler Şekil 5.8’de verilen Q10 A+ QNESS Mikro sertlik cihazı kullanılarak Vickers sertlik testi yapılmıştır. Kullanılan deney setinde batıcı uç tepe açısı  $136^\circ$  olan elmas kare piramit tercih edilmiştir.

F yükü ile malzemeye bastırılan piramit ucun bıraktığı dörtgen izin köşegenleri ölçülerek hesaplanan ortalama köşegen uzunluğu bulunur. Gerekli hesaplamalar yapılarak sertlik değerleri bulunur. Ölçme hatalarını azaltmak ve heterojen yapılarda ortalama değer elde edebilmek için yükü ve dolayısıyla izi büyütmek faydalıdır. Yük 1-120 kgf arasında değişebilir. Vickers yönteminde büyük piramit açısından dolayı az derinliklere rağmen geniş diyagonaller elde edilir. Yüklü numune üzerinde kalma süresi yaklaşık 20 saniyedir. Test aşamasında bor tabakasından başlanıp matris malzemeye kadar sertlik değerleri ölçülmüştür. Deneyle sırasında uygulanan yük HV0.01 seçilmiştir.



Şekil 5.8: Q10 A+ QNESS Mikro Sertlik Cihazı.

## 5.6 Aşınma Testleri

Aşınma, hareket eden bağlantı elemanının arasındaki boşluğun artmasına, istenmeyen hareket serbestliğine ve bununla bağlantılı olarak hassasiyetin azalmasına yol açar. Titreşimle beraber mekanik yüklemenin artmasına ve aşınmanın şiddetlenmesine neden olur. (Güldaş, 1998). Sürtünerek çalışan bütün makine elemanlarında aşınma büyük miktarlarda malzeme kaybına ve enerji israfına neden olmaktadır. Bundan dolayı, günümüz teknik sistemlerinde yapılan çok sayıdaki araştırmalar sürtünmeyi ve aşınmayı azaltma ve kontrol etme çalışmaları şeklinde yaygınlaşmaktadır. Teknik anlamda ise aşınma, parçaların yüzeylerinde mekanik sebeplerle mikron boyuttaki tanelerin kopmasıyla olumsuz bir değişikliğin meydana gelmesidir (Akbulut vd., 1993).



Şekil 5.9: UTS TRİBOMETER T10/20 Cihazı.

Aşınma testi Şekil 5.9’da verilen UTS TRİBOMETER T10/20 cihazı kullanılarak aşınma testi 3N, 5N, 10N ve 15N yükler altında yapılmıştır. Aşınma testi sonrasında malzemede meydana gelen çelik bilyenin izinin yapısını görmek için aşınma testi ardından optik mikroskoptan incelemesi yapılmıştır.

### 5.7 XRD Analizi

Altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış numune içerisinde ki fazların tayini için Şekil 5.10’da verilen RIGAKU-Ultima IV cihazında analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.10: RIGAKU - Ultima IV XRD Analiz Cihazı.

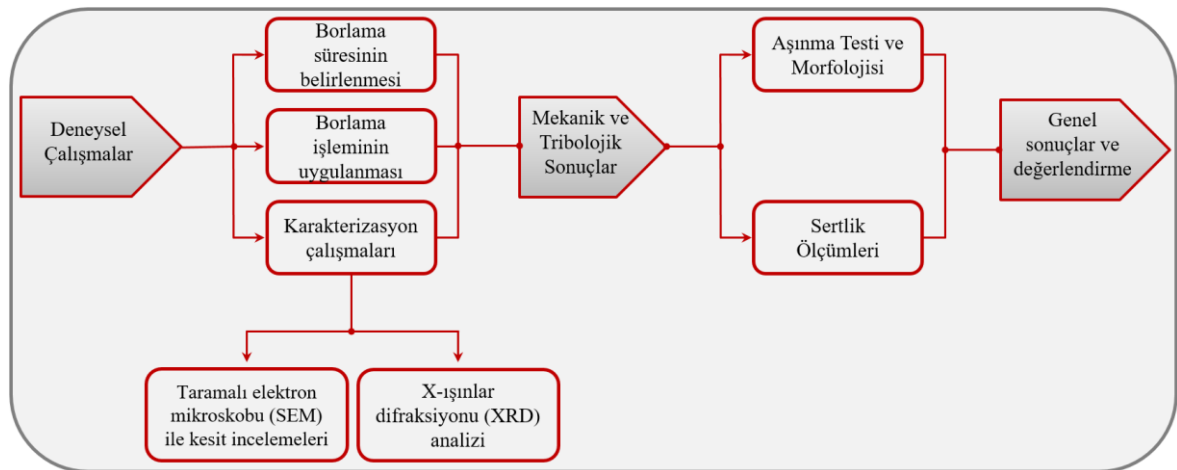
## BÖLÜM 6



## DENEYSEL SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, Ni bazlı bir süper alaşım olan Inconel 718 altlık malzeme kullanılarak, termokimyasal metot ile borlanması sonucu oluşan fazları bulmak ve borlama işlemi sonrasında oluşan borür tabakasındaki malzeme dayanımının araştırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Inconel 718 altlık malzemesi üzerine, kutu borlama işlemi uygulanarak 950 °C’de üç farklı fazda (4-8-16 saat) borlama difüzyonu gerçekleştirilmiştir. Bor kaplama tabakasının yaklaşık kalınlığı  $30 \pm 10 \mu\text{m}$  büyüklüğünde belirlenmiştir.

Altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış numune üzerinde sertlik ve aşınma testleri yapılarak borlanmış malzemenin dış etkenlere nasıl bir tepki gösterdiği araştırılmıştır. Altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan malzeme içerisindeki fazların tespiti için XRD analizleri yapılmıştır. Uygulanan metalografik işlemler sonucu bor kaplı Inconel 718 süper alaşımların zımparalanarak parlatılma işleminden sonra optik mikroskop analizi uygulanmıştır. Kesit alınan malzemeler üzerinde metalografik işlemler uygulanarak SEM ve EDX analizlerinin ayrıntılı karakterizasyonları araştırılmıştır. Kaplamaların üretimleri sonrasında ayrıntılı olarak aynı sıcaklık (950 °C) içerisinde üç farklı zaman diliminde borlanmış malzemelerin sertlik ve aşınma davranışlarının farklılık gösterdiği incelenmiştir.



Şekil 6.1: Deneyel çalışmada izlenen yöntemim akış şeması.

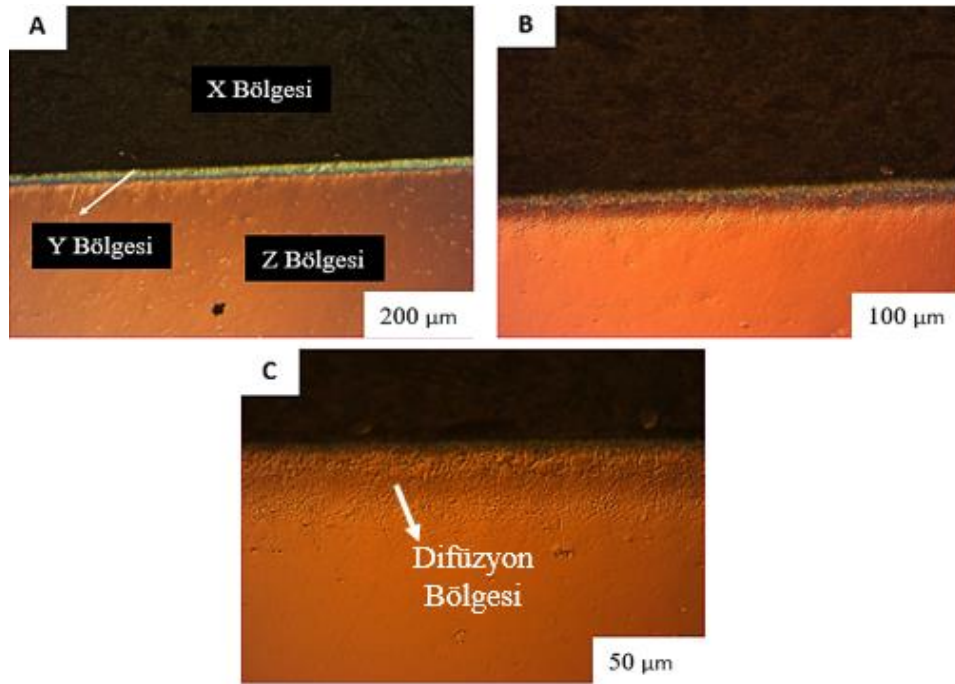
### 6.1 Optik Mikroskop Mikroyapı Analizleri

Altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış numunenin optik görüntüleme işlemi uygulanan metalografik işlemler (Şekil 5.1), sonucu zımparalılıp parlatılma işleminden sonra uygulanmıştır. Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'de ki görüntülerde X, Y ve Z ile adlandırılan bölgelere bakacak olursak bütün görsellerde X bölgesi bakalite malzemesi yani dolgu malzemesini ifade etmektedir. Y ile adlandırılmış bölge bor tabakasını göstermektedir. Z bölgesi ise bize matris yani ana malzemeyi göstermektedir.

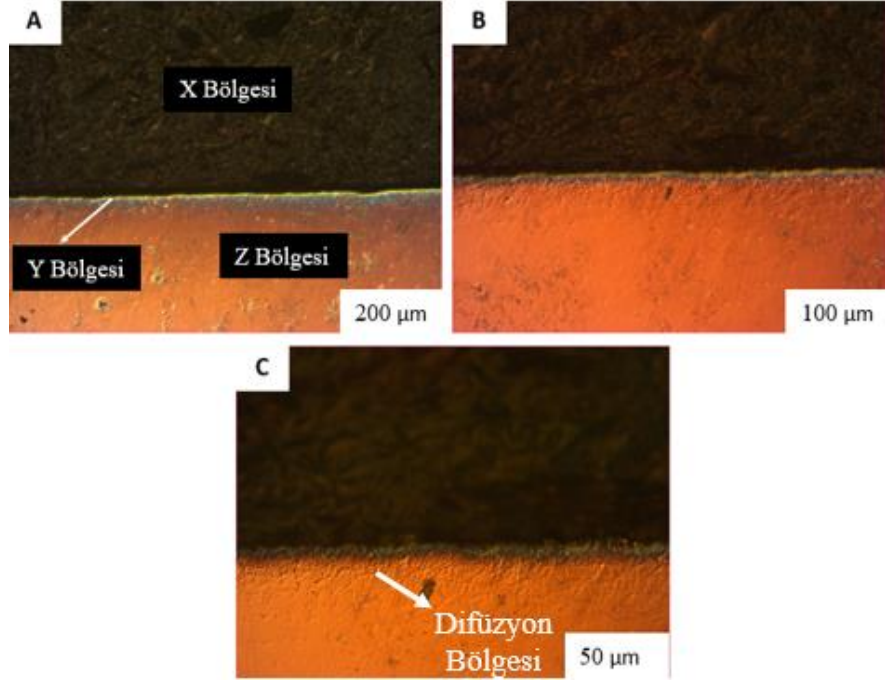
X Bölgesi → Dolgu (Bakalite) Malzemesi

Y Bölgesi → Kaplama Bölgesi

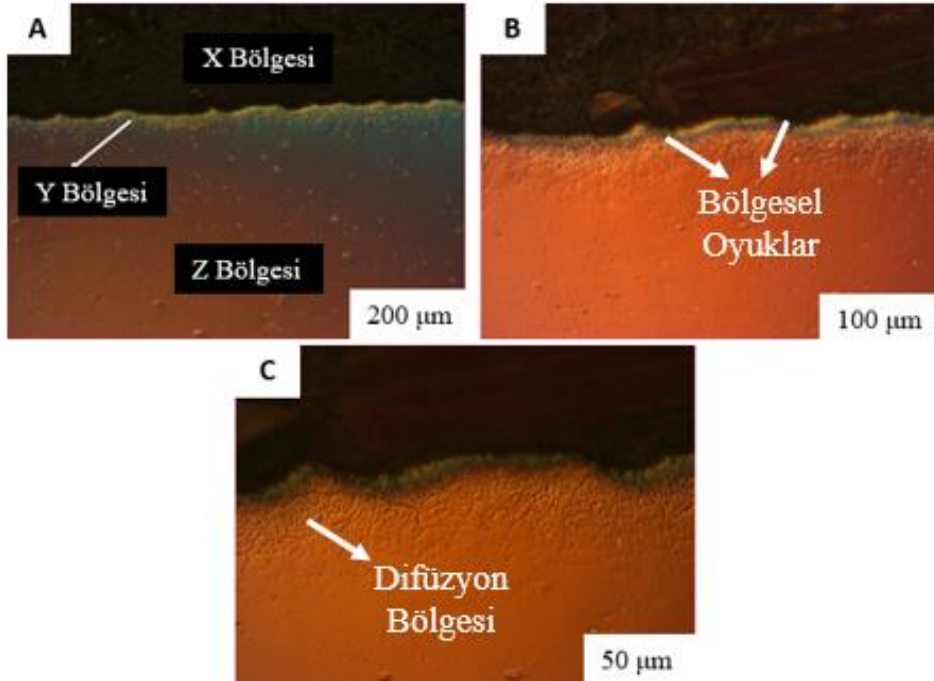
Z Bölgesi → Ana Malzeme



Şekil 6.2: 950 °C'de 4 saat boyunca borlamaya tabi tutulan numunelerin, a) 50X büyütme, b) 100X büyütme ve c) 200X büyütmeyle alınmış görüntüleri.



Şekil 6.3: 950°C’de 8 saat boyunca borlamaya tabi tutulan numunelerin, a) 50X büyütme, b) 100X büyütme ve c) 200X büyütmeleden alınmış görüntüleri.



Şekil 6.4: 950°C’de 16 saat boyunca borlamaya tabi tutulan numunelerin, a) 50X büyütme, b) 100X büyütme ve c) 200X büyütmeleden alınmış görüntüleri.

Altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış numunenin 950 °C'deki borlama işlemleri sonucu borlanmış tabaka resimleri Şekil 6.2-6.4 verilmiştir. 950 °C'de 8 saat ve 16 saat borlama işlemlerinde borür ve silisid tabakası arasında çatlaklar göze çarpmaktadır. Hunger ve Trute çalışmalarında (1994), Ni bazlı alaşımların borlanması silisid oluşum mekanizmasını açıklamaktadır. Bu duruma sebep olarak sürenin uzunluğu beyan edilmiştir. Numuneler havada soğutulduğundan dolayı borür ve silisid tabakalarının soğuma hızları birbirinden farklıdır. Bundan dolayı soğuma hızı farklılığı çatlakların oluşumuna olanak sağlamıştır. Ayrıca silisid oluşumu esnasında, iç gerilmeler de oluşmaktadır. Bu iç gerilmeler artan borlama sıcaklığı ve süresi ile artmaktadır. Artan sıcaklık ve sürelerde çatlakların da büyüdüğü tespit edilmiştir.

Şekiller üzerinde yapılan incelemelerde 4 saatlik borlama sonrasında oluşan tabakanın netliği ile difüzyon bölgesinin de netliği 8 ve 16 saat borlanmış numunelere göre daha iyidir. 16 saatlik numunede ki gözlemlenen bölgesel oyukların 8 ve 4 saatlik borlanmış numunelere göre çok fazla rastlanmadığı tespit edilmiştir.

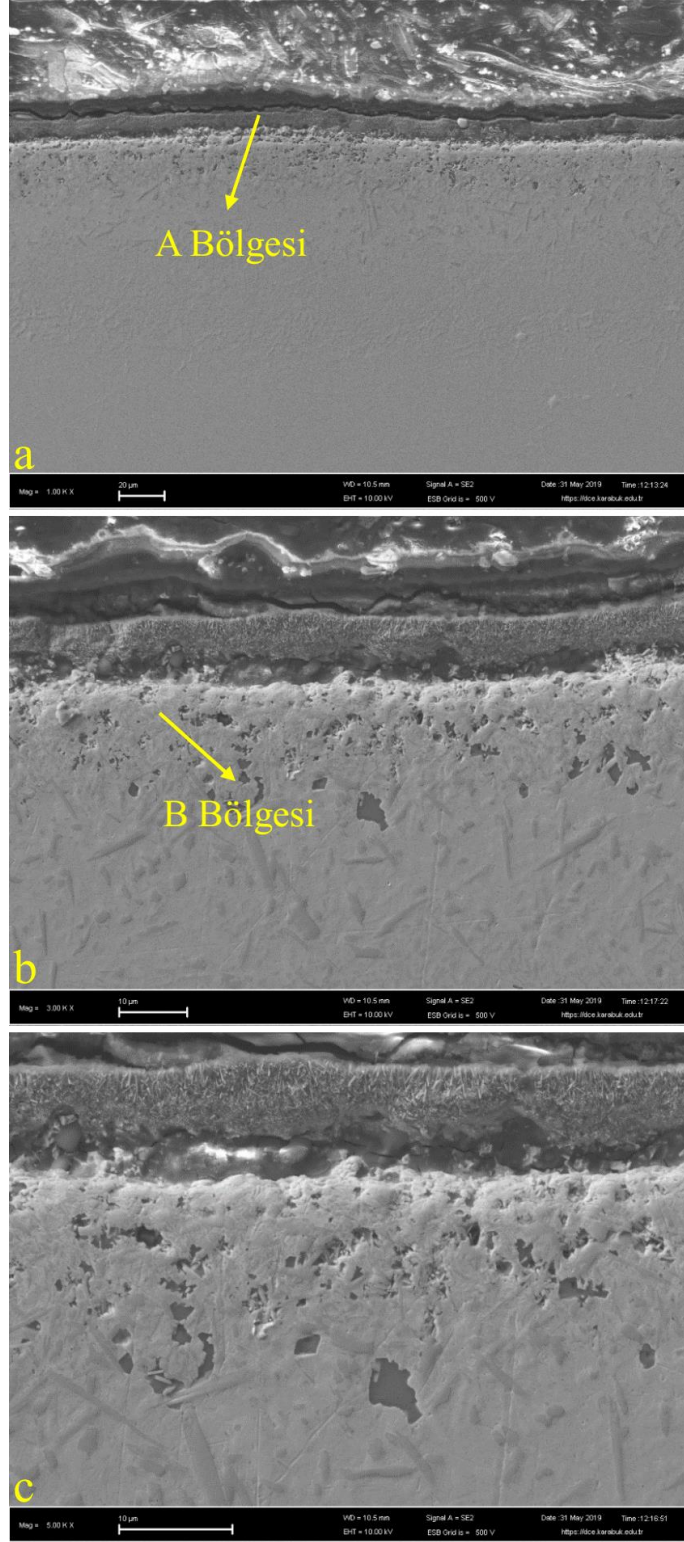
## 6.2 Borlanmış Numunelerin SEM ve EDX Analizleri

Kutu borlama yöntemiyle altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış numune tabakasının 950 °C sıcaklığında 4 saat borlanması sonrasında elde edilen SEM, line-EDX ve haritalama EDX mikroyapı analizleri sırasıyla Şekil 6.5-6.7'de verilmektedir. Numuneler borlama işlemine tabi tutulduktan sonra kesit alınıp bakalit malzemesi içersine alınmıştır. 240-400-600-800-1000-1200-2000-3000 zımpara aşamalarından geçirilerek önce 6 µm sonrasında 3 µm elmas süspansiyon kullanılarak yüzey parlatma işlemler uygulanmış ve kesit incelenmesi için numuneler hazır hale getirilmiştir.

- A Bölgesi  $\longrightarrow$  Kaplama Bölgesi
- B Bölgesi  $\longrightarrow$  Difüzyon Bölgesi
- C Bölgesi  $\longrightarrow$  Oluşumu Gözlenen Çukur Bölge

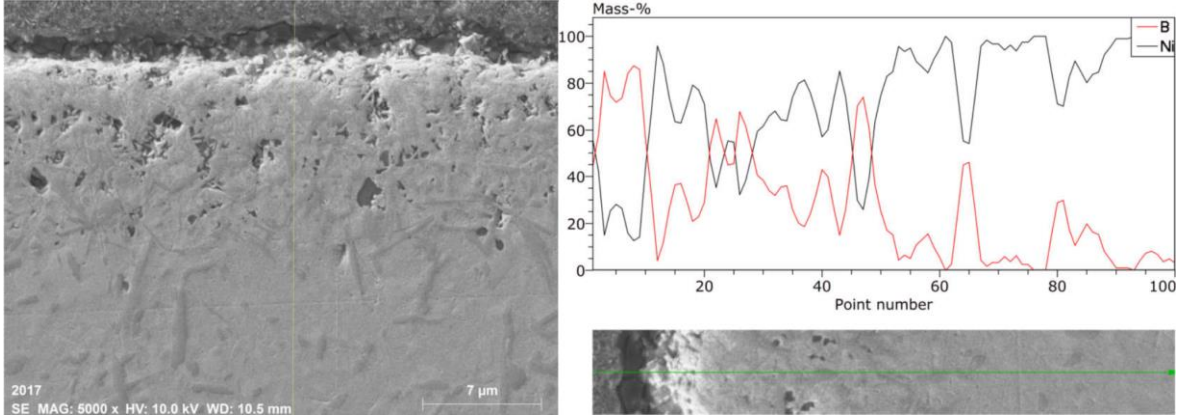
Altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış numune görüntülerinde A bölgesi bor tabakasını, B bölgesi ise difüzyon bölgesini temsil etmektedir. A bölgesinin en düz ve temiz olduğu görüntüler 4 saatlik borlama sonucu alınan görüntülerde elde edilmiştir. 8 ve 16 saatlik numunelerden alınan görüntülerde düzlük ve temizlik bozulmaya başlamıştır.

Zamana bağlı difüzyyon sürenin artması ile kaplanan malzeme yapısında olumsuz bir şekilde etkilenmektedir.

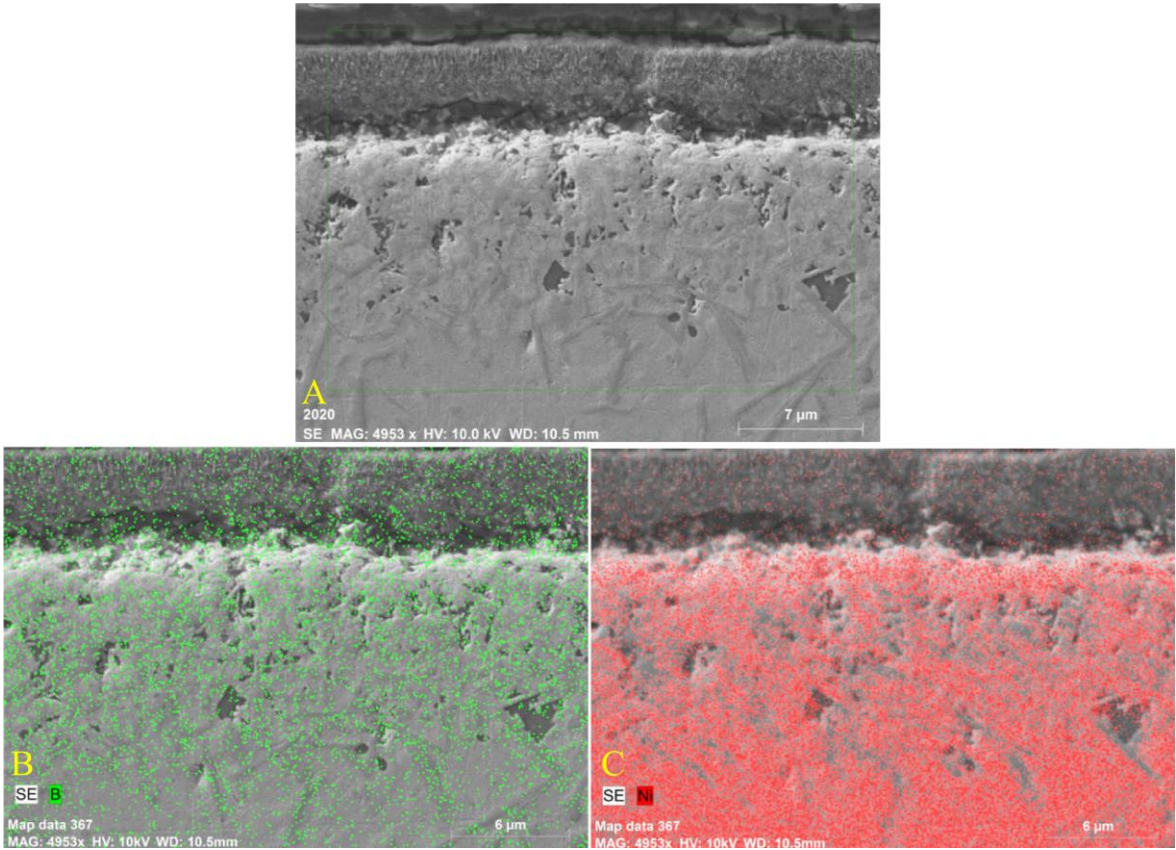


Şekil 6.5: 950 °C’de 4 saat borlama sonrası a) 1000X SEM görüntüsü, b) 3000X SEM görüntüsü, c) 5000X SEM görüntüsü.



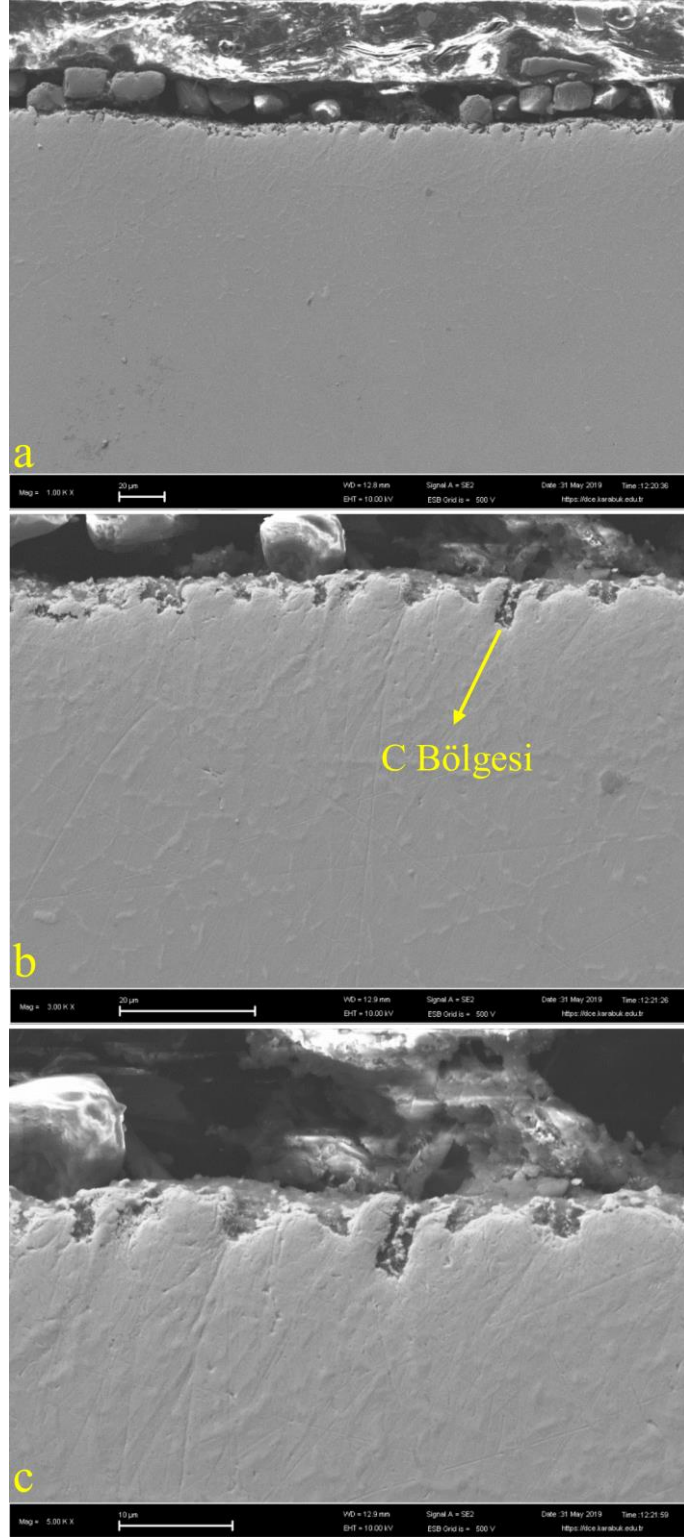


Şekil 6.6: 950 °C’de 4 saat borlama sonrası 5000X SEM görüntüsünden alınan line-EDX analizi.



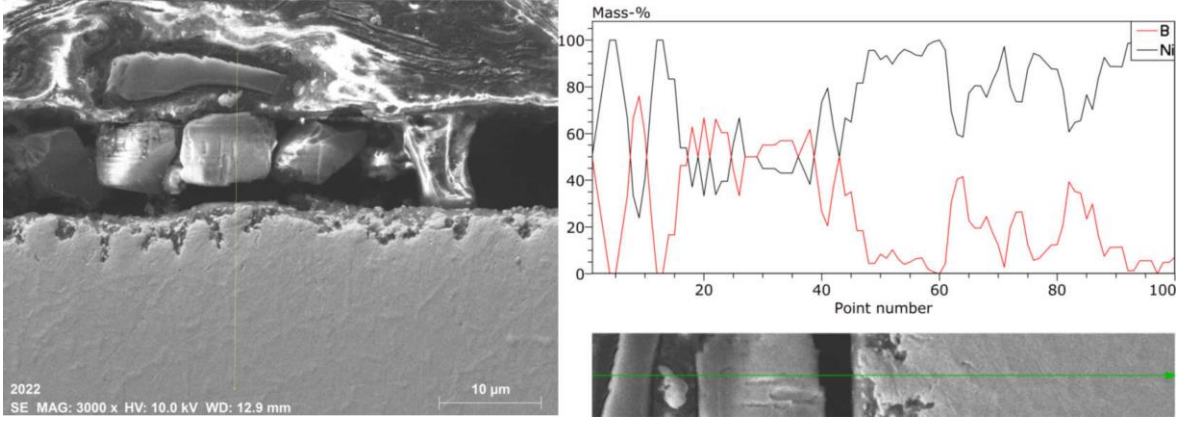
Şekil 6.7: a) 950 °C’de 4 saat borlama sonrası 5000X SEM görüntüsünden alınan haritalama EDX analizi, b) Haritalamada *B* dağılımı, c) Haritalamada *Ni* dağılımı.

Altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış numuneye uygulanan SEM analizinde kesit yüzeyde bor tabakası, difüzyon tabakası ve matris net bir şekilde görülmektedir (Şekil 6.5, Şekil. 6.8 ve Şekil 6.11). Verilen analiz sonucunda tabakadan matrise doğru gelindikçe bor tabakasının sürekli azaldığı bor tabakasının en az seviyeye indiği noktada Ni tabakasının arttığı yapılan deneyler sonucunda elde edilmiştir. Bor dağılımının oluşan tabaka etrafında yoğun bir şekilde arttığıda gözlenmektedir. Kutu borlama yöntemiyle altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış numune yüzeyi üzerinde 950 °C sıcaklığında 8 saat borlanması sonrasında elde edilen SEM, line-EDX ve haritalama EDX mikro-yapı analizleri Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da verilmektedir.

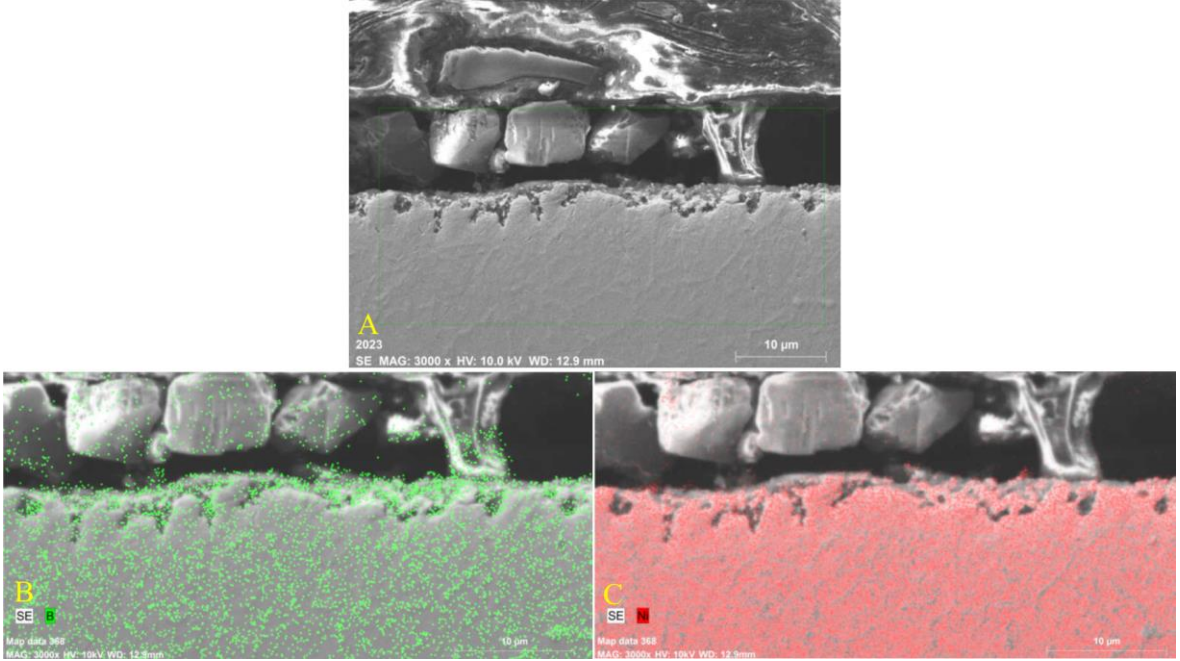


Şekil 6.8: 950 °C’de 8 saat borlama sonrası a) 1000X SEM görüntüsü, b) 3000X SEM görüntüsü, c) 5000X SEM görüntüsü.





Şekil 6.9: 950 °C’de 8 saat borlama sonrası 5000X SEM görüntüsünden alınan line-EDX analizi.

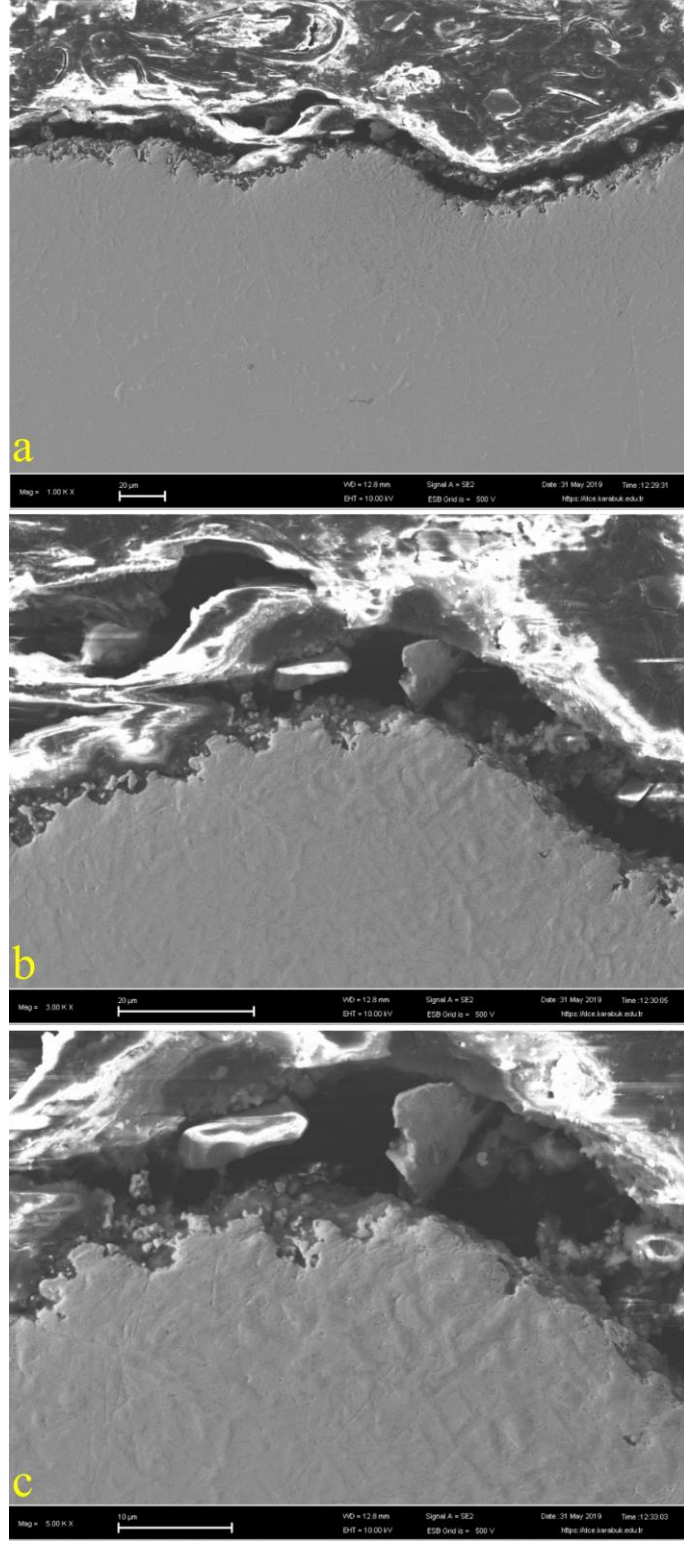


Şekil 6.10: a) 950 °C’de 8 saat borlama sonrası 5000X SEM görüntüsünden alınan haritalama EDX analizi, b) Haritalamada B dağılımı, c) Haritalamada Ni dağılımı.

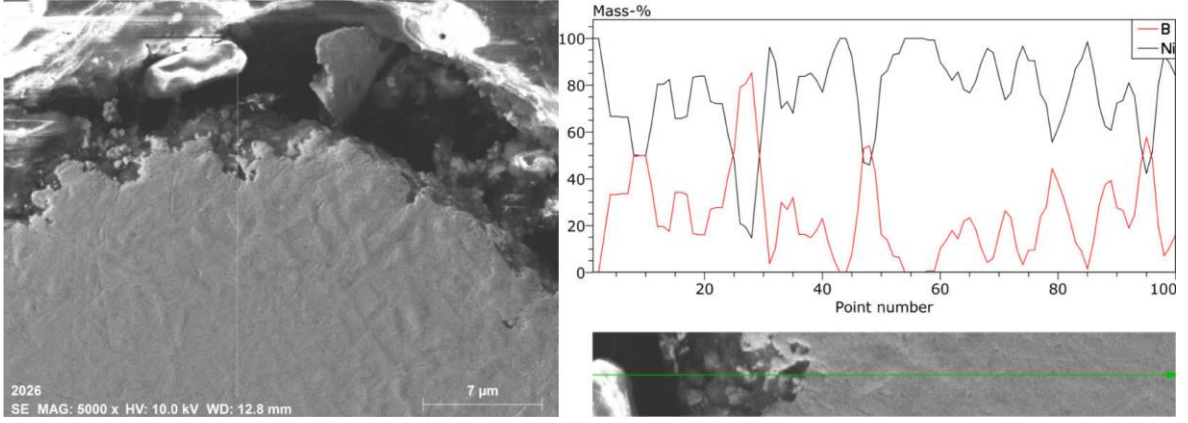
Oluşan tabakanın 4 saat borlanmış numunedeki tabakadan daha geniş bir tabaka olduğu tespit edilmiştir. Tabakadan matrise doğru gelindikçe bor miktarının azaldığı Ni miktarının arttığı görülmektedir. Yapılan analizler sonucunda bor dağılımının oluşan tabaka etrafında yoğun olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6.11, Şekil 6.12 ve Şekil 6.13 arasında verilen görüntülerde 950 °C’de 16 saat borlama sonrası alınan SEM, line-EDX ve haritalama EDX analizleri verilmiştir. SEM görüntülerinde bor tabakasının net bir şekilde oluştuğu görülmektedir. Borun, borlama süresinin artması ile beraber difüze olmasında artış görülmektedir. Uygulanan line-EDX analizi Şekil 6.12’de verilmiştir. Deneyler sırasında oluşan bor tabakasının çok kalın olduğu alınan SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır.

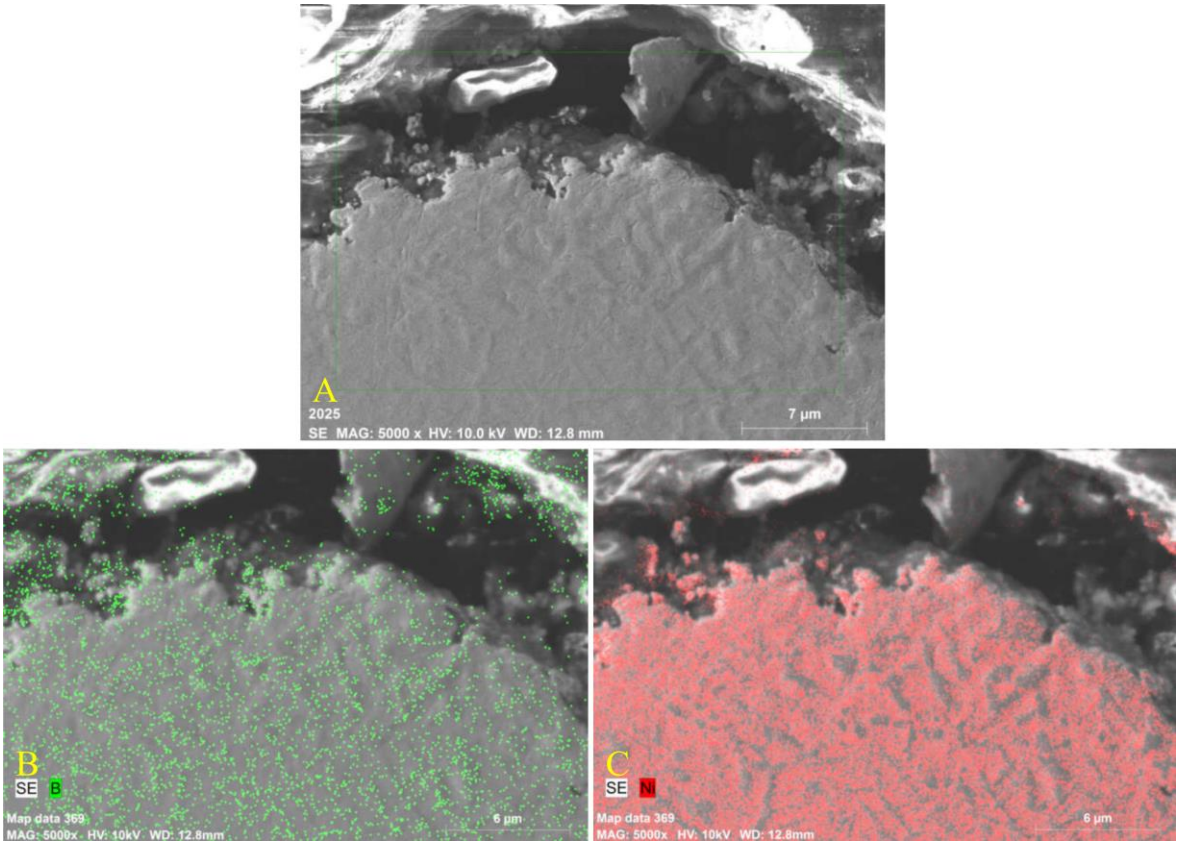
Şekil 6.13’de 950 °C’de 16 saat borlama sonrası 5000X SEM görüntüsünden alınan haritalama-EDX analizi verilmiştir. Verilen analiz sonucunda tabakadan matrise doğru gelindikçe bor miktarının azaldığı Ni miktarının arttığı açık bir şekilde görülmektedir. SEM sonuçları literatür ile karşılaştırılması sonrasında literatürü destekler şekilde üç ana bölgeden oluştuğu bor tabakası, silisid tabakası ve ana malzeme olduğu elde edilmektedir. (Özbek vd., 2000).



Şekil 6.11: 950 °C’de 16 saat borlama sonrası a) 1000X SEM görüntüsü, b) 3000X SEM görüntüsü, c) 5000X SEM görüntüsü.



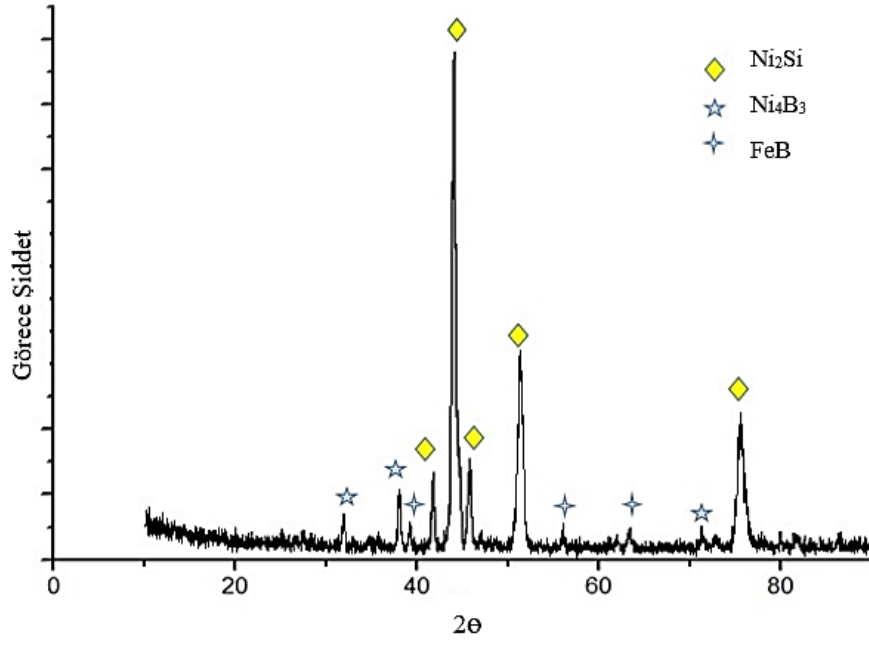
Şekil 6.12: 950 °C’de 16 saat borlama sonrası 5000X SEM görüntüsünden alınan line-EDX analizi.



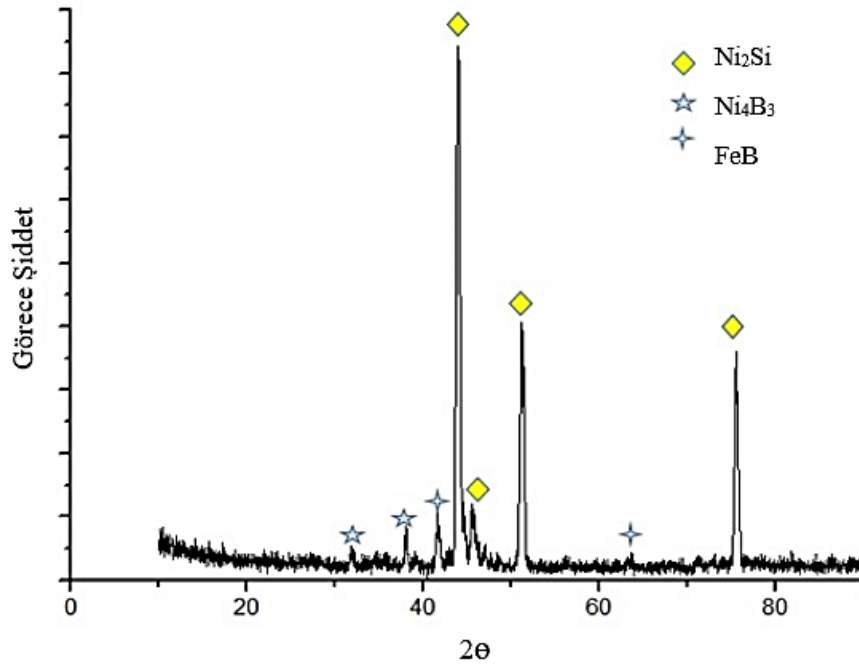
Şekil 6.13: a) 950 °C’de 16 saat borlama sonrası 5000X SEM görüntüsünden alınan haritalama EDX analizi, b) Haritalamada *B* dağılımı, c) Haritalamada *Ni* dağılımı.

### 6.3 Borlanmış Tabakaların XRD Analizleri

Altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış numuneler borlama işleminin ardından değişik faz işlemlerini tayin edilebilmesi amacıyla XRD analizleri yapılmış olup, XRD analizi sonuçları Şekil 6.14 Şekil 6.15 ve Şekil 6.16 verilmiştir. Borlanmış numunelere yapılan XRD analizi sonucu tüm numunelerde görülen silisid tabakasının  $Ni_2Si$  fazını içerdiği tespit edilmiştir. Malzeme yüzeyindeki fazların zaman ile birbiri arasında farklılık gösterdiği anlaşılmakta olup, bunların arasında piklerin en düşük olduğu 950 °C'de 16 saat borlanmış numüne olduğu gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni ise, malzemenin süre ve sıcaklık faktörlerinin birleşmesi sonucunda difüzyon seviyesinin artmasıdır. Bu artan süre ile artan silisid tabakası kalınlığının, X-ışınlarının borür tabakasına ulaşmasını engellemesi ile açıklanabilir. 4 ve 8 saatlik numunelerde 40-50 °C aralığında yüksek bir  $Ni_2Si$  fazına rastlanmıştır. 16 saatlik numunede eşit dağılım görülmüştür. 4 saatlik borlanmış numunede  $Ni_4B_3$  fazının 30-40 °C aralığında bir dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Bir farklı faz olan FeB fazının 55-75 °C'leri arasında bir dağılım göstermektedir. FeB fazı 4 saatten 16 saatlik numuneye geçince yerini  $Ni_2Si$  fazına bıraktığı tespit edilmiştir. Borlama tüm numunelerde silisid fazının  $Ni_2Si$ 'den, borur fazının  $Ni_4B_3$ 'ten meydana geldiği görülmektedir. Sıcaklığa bağlı olarak demir borür fazının FeB'den oluştuğu saptanmıştır. Oluşan tabaka kalınlıkları piklerin şiddetine etki etmektedir. Tespit edilen bu sonuç literatürle de aynı doğrultuda benzerlik göstermektedir. Shen vd. (2009) ile Üçışık vd. (2000) yapmış oldukları deneysel çalışmalarında saf nikelin borlama çalışmalarında da silisid tabakasının yüzeylerde oluştuğu belirtilmektedir.

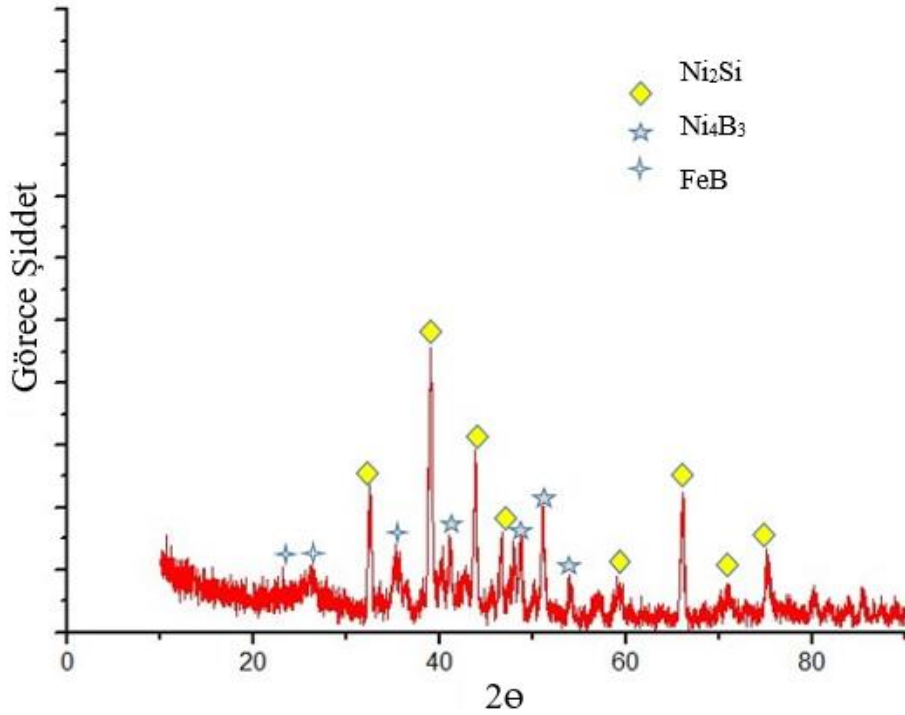


Şekil 6.14: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C'de 4 saat borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.



Şekil 6.15: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C'de 8 saat borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.

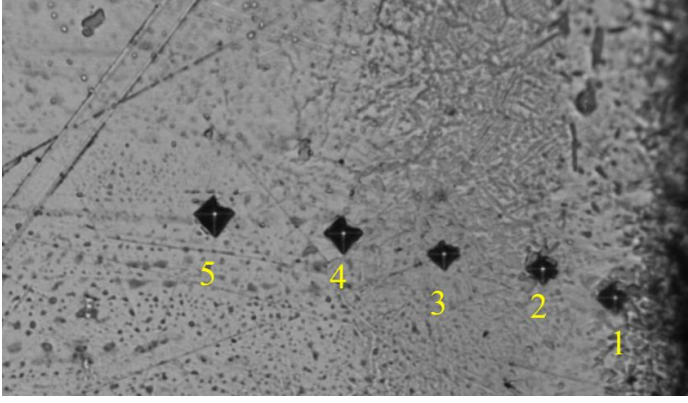




Şekil 6.16: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C'de 16 saat borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.

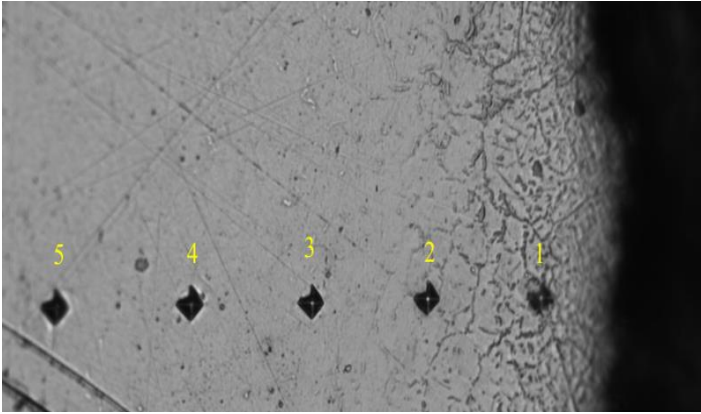
#### 6.4 Borlanmış Numunelerin Sertlik Ölçümlerinin Sonuçları

Altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış numunelerin sertlik sonuçlarının incelendiğinde, borlamanın en etkili olduğu süre 4 saatlik uygulama da tespit edilmiştir. Uygulaması gerçekleştirilen numunelerin sertlik değerleri borür tabakasından itibaren, matrise kadar alınmıştır. Borlanmış numunelerin yüzeyinden itibaren alınan sertlik değerleri 4,8 ve 16 saat borlama sonucuna göre sırasıyla Şekil 6.17, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da verilmiştir. Sertlik deneyi mikrosertlik yöntemi ile vickers veya knoop batıcı uçları kullanılarak yapılmaktadır (Matuschka, 1980). Deney esnasında yüksek yüklerin tercih edilmesi durumunda çatlama ve dökülme gibi sebeplerden dolayı hatalı ölçümlere yol açabilir. Ayrıca, yüksek yük tercihi tabakanın bozulmasına ve tabakanın altındaki bölgenin deforme olmasına neden olabilir. Genellikle testlerde 50-100 gr 'lık yüklerle ölçüm yapılmaktadır (Özsoy, 1991).



Ölçüm Numarası	Ölçüm Değeri (HV)
1	1312
2	1107
3	902
4	620
5	480

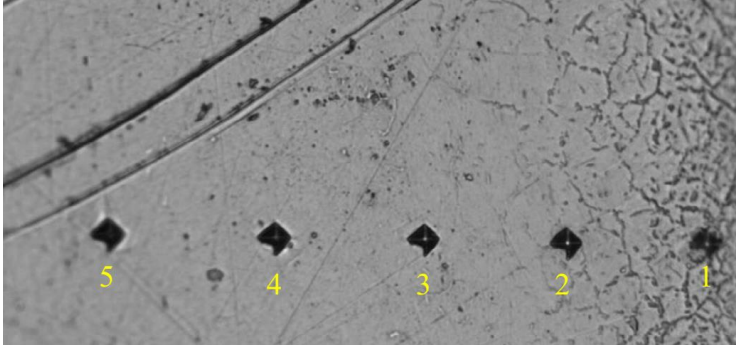
Şekil 6.17: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C’de 4 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik değerleri.



Ölçüm No	Ölçüm Değeri (HV)
1	1272
2	1082
3	950
4	640
5	484

Şekil 6.18: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C’de 8 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik değerleri.





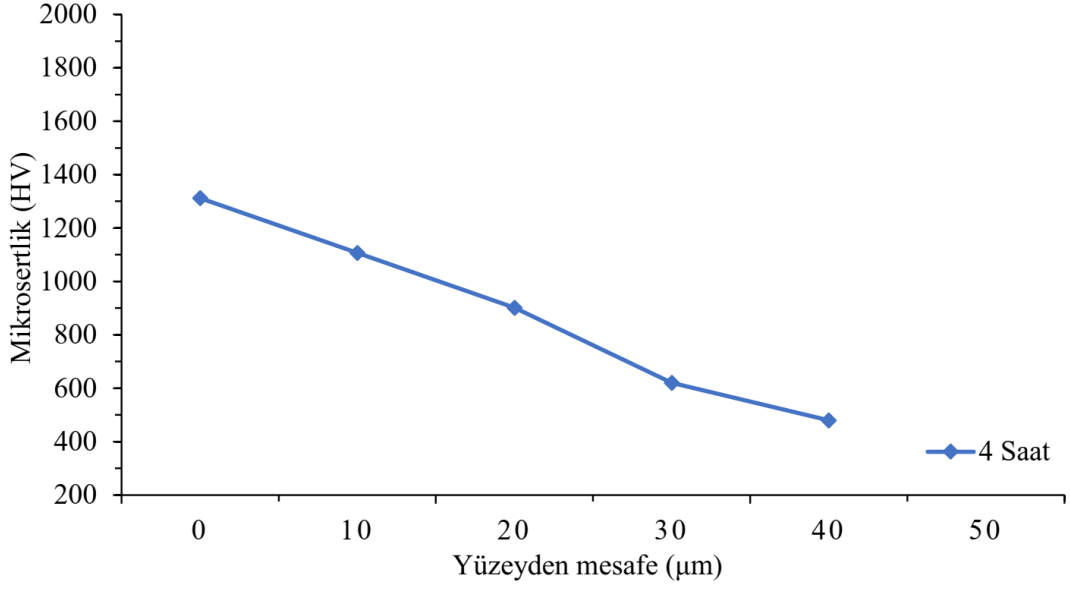
Ölçüm Numarası	Ölçüm Değeri (HV)
1	1150
2	1080
3	970
4	680
5	488

Şekil 6.19: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C’de 16 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik değerleri.

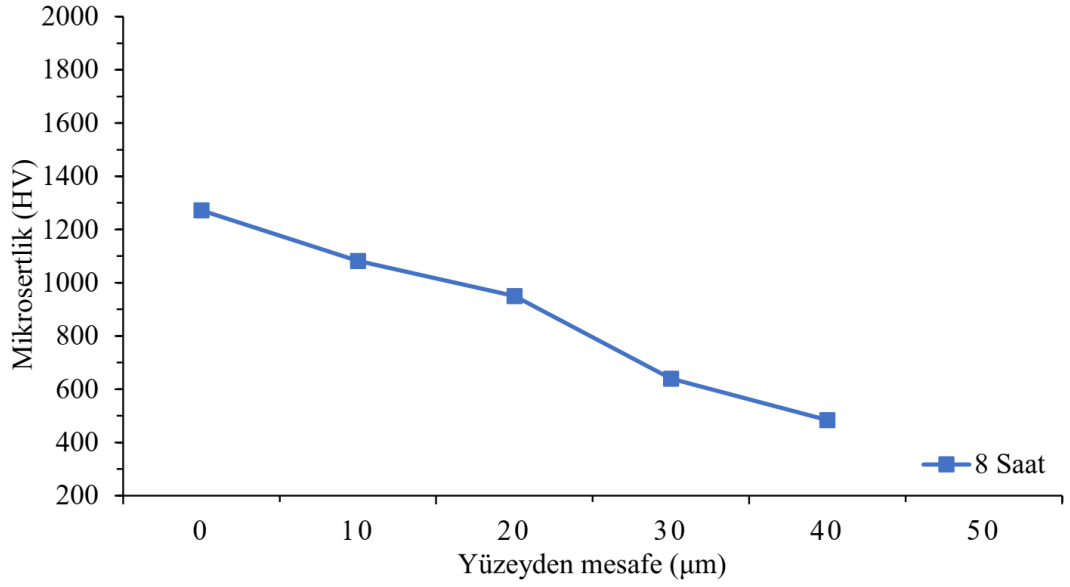
Uygulanan sertlik ölçümlerinden sonra numunelerden alınan şekiller incelendiğinde, yüzeyden matrise doğru sertliğin azaldığı görülmektedir. 4 saatlik borlama sonrası alınan sertlik sonuçları incelendiğinde, borür tabakasından alınan sertlik değerleri 1312 HV'ye yakındır. Difüzyon bölgesinde bu sertlik değerleri 902 HV'ye düşerken matriste 480 HV'ye kadar azalmaktadır.

8 saatlik borlama sonrası alınan sertlik sonuçları incelendiğinde, borür tabakasından alınan sertlik değerleri 1272 HV'ye yakındır. Difüzyon bölgesinde bu sertlik değerleri 950 HV'ye düşerken matriste 484 HV'ye kadar azalmaktadır.

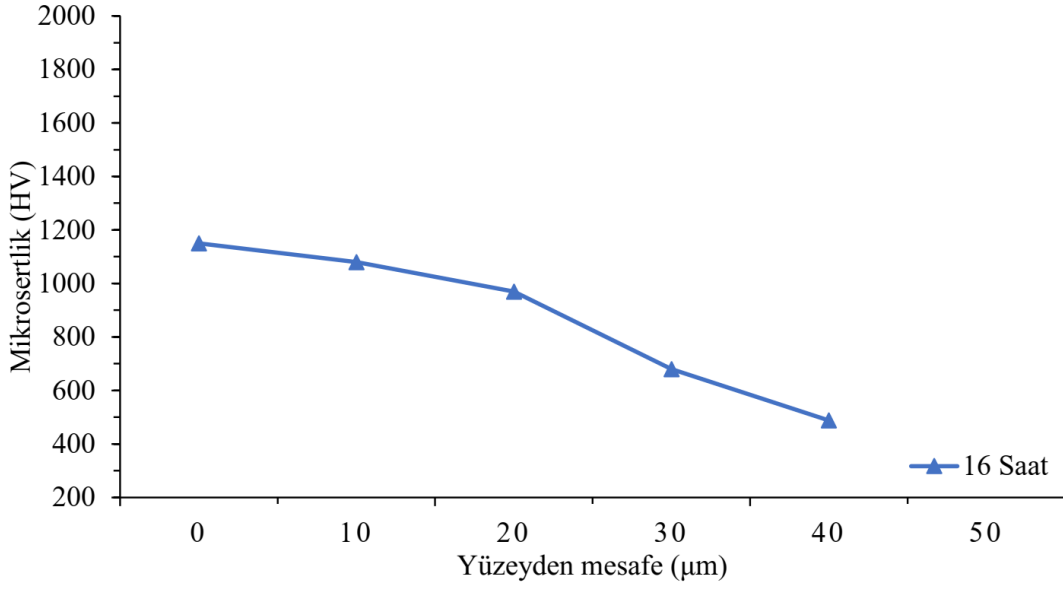
16 saatlik borlama sonrası alınan sertlik sonuçları incelendiğinde, borür tabakasından alınan sertlik değerleri 1150 HV'ye yakındır. Difüzyon bölgesinde bu sertlik değerleri 970 HV'ye düşerken matriste 488 HV'ye kadar azalmaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde, sertlikte benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür. Saf nikelin borlandığı çalışmalarda sertlik, daha düşük değerlerde saptanmıştır (Dong vd., 2009). Inconel 600' ün borlanması sonucu benzer fazlar elde edilmiş ve aynı şekilde sertlik-mesafe profili, bu çalışmadaki profillere benzemektedir (Sista vd., 2013). Genel olarak sertlikler incelendiğinde, bor tabakasından difüzyon bölgesine geçerken sertlik düşüşü çok belirginken difüzyon bölgesinden sonra o kadar fazla bir sertlik düşüşü ve matrisin kendi içerisinde de çok fazla sertlik değişim değerleri de görülmemektedir.



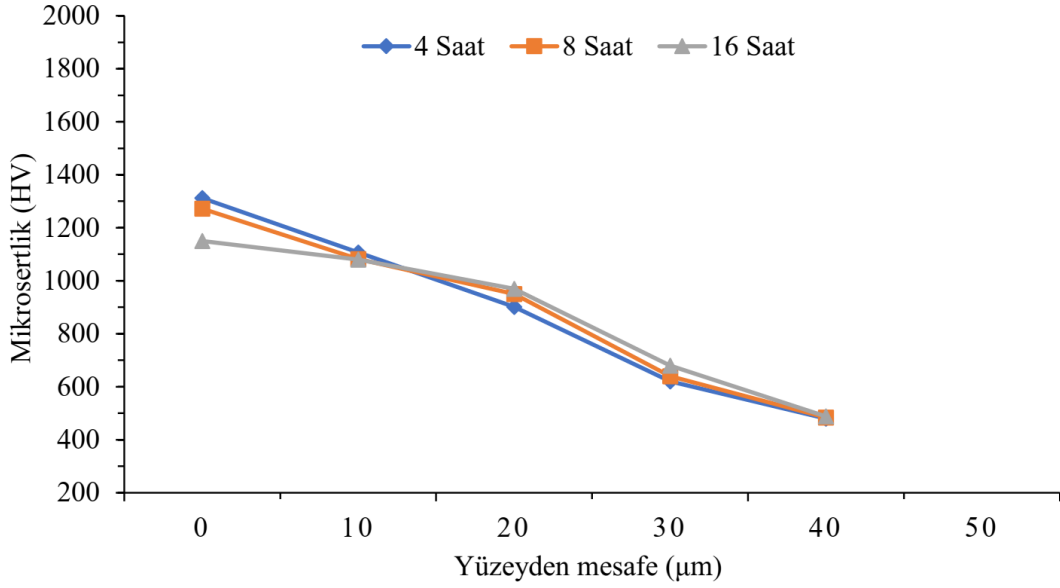
Şekil 6.20: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C’de 4 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik/mesafe grafiği.



Şekil 6.21: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C’de 8 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik/mesafe grafiği.



Şekil 6.22: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C’de 16 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik/mesafe grafiği.

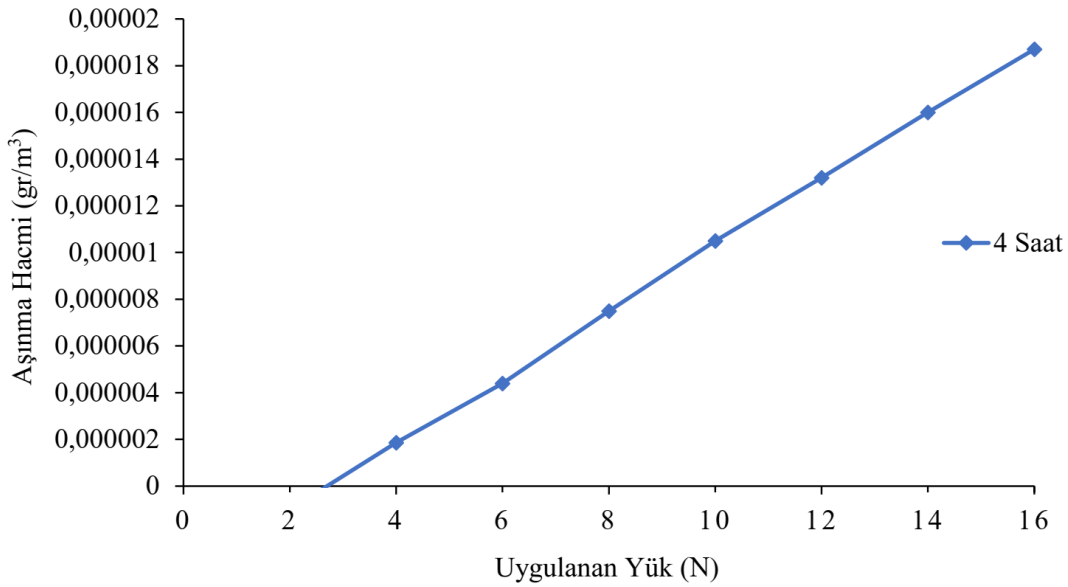


Şekil 6.23: Inconel 718 süper alaşımının 950 °C’de 4, 8 ve 16 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik/mesafe grafiği.

### 6.5 Aşınma Testi Sonuçları

Aşınma birbiriyle temasta olan iki karşı yüzeyin bağıl hareket yaptığında oluşan yüzey hasarı olarak tanımlanabilir. Malzemelerin kendinden daha sert bir malzeme ile sürekli temas hareketi sonucu yüzeyde oluşan deformasyonlardır. Sürtünme katsayısı ve aşınma

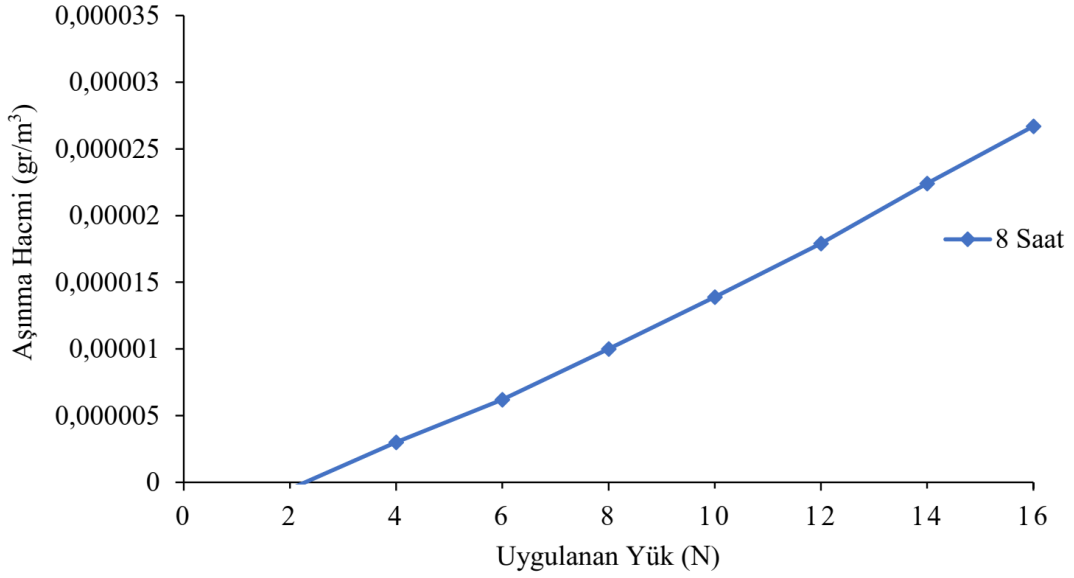
mukavemeti bir sistem özelliği olmakla beraber, genellikle yüksek aşınma dayanımı için malzemenin daha sert ve sürtünme katsayısının düşük olması istenir. Borlama ile istenilen bu özellikler sağlanır. Borlanmış malzemelerde teflona yakın bir sürtünme katsayısı elde edilebilir. Darbesiz yüklemenin söz konusu olduğu dişli çarklarda kullanılan yönlendirme tamburlar ve abraziv aşınmaya maruz kalan plastik enjeksiyon makinelerinin aşınmaya maruz kalan bölgelerinde borlanmış yüzeylerin yüksek aşınma mukavemetine sahip oldukları belirlenmiştir. Ancak borlama işlemi doğru tribolojik model tercihleri yapılmadığı takdirde veya seçilen modelde beklenen işleve elverişli borlama işlemi ve uygun ek ısıl işlemler yapılmadığı takdirde sementasyon ve nitrürasyon prosedürlerinden daha kötü neticeler verebilir (Bozkurt, 1984). Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 4 saat, 8 saat ve 16 saat zaman dilimi içerisinde 950 °C’de borlanmış malzemelerin aşınma değerlerini spesifik yaklaşımlarla değerlendirecek olursak;



Şekil 6.24: 950 °C’de 4 saat borlanan numunenin aşınma hacmi/uygulanan yük grafiği.

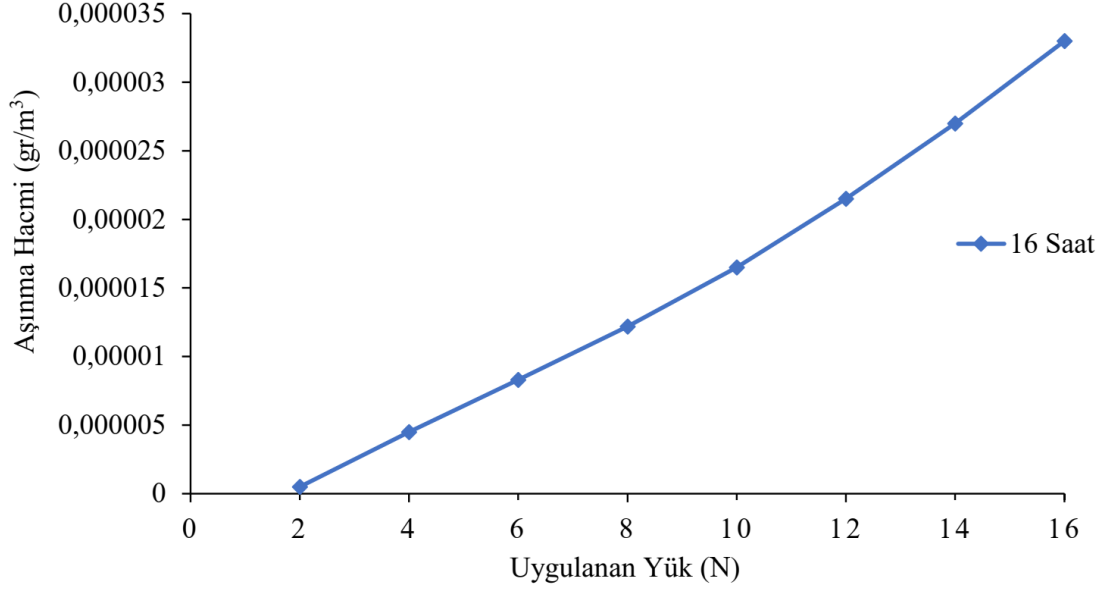
Şekil 6.24’de 950 °C’de 4 saatlik borlama işlemi sonrasında kuru kayma aşınma testlerine tabi tutulan numunenin hacim kaybı grafiği verilmiştir. Uygulanan yük ile beraber aşınma hacminin arttığı tespit edilmiştir. Çünkü artan yük ile birlikte ball on disk aşınma cihazındaki aşındırıcı olarak kullanılan bilyanın üzerine gelen kuvvetin artması bu bilyanın daha fazla aşağıdaki yüke batmasına sebebiyet vercektir. Bilyanın karşı yüzeye daha fazla batması önünde birikecek malzeme oranına artmasına sebebiyet vercektir. Dolayısıyla malzemenin aşınmasında etkili olana batma ve kesme kuvvetleri daha fazla aratacağından arttan yük ile

birlikte numunedeki yükte birlikte hacim kaybı artacaktır. Borlamanın etkisiyle numune üzerindeki sertlik ne kadar yüksek olursa kendisine batmak isteyen bilyeyaya göstereceği direnç fazla olacağından numune yüzeyindeki sertlik artışı aşınma direncinin artmasına sebebiyet verecektir (Baştürk ve Erten, 2012).



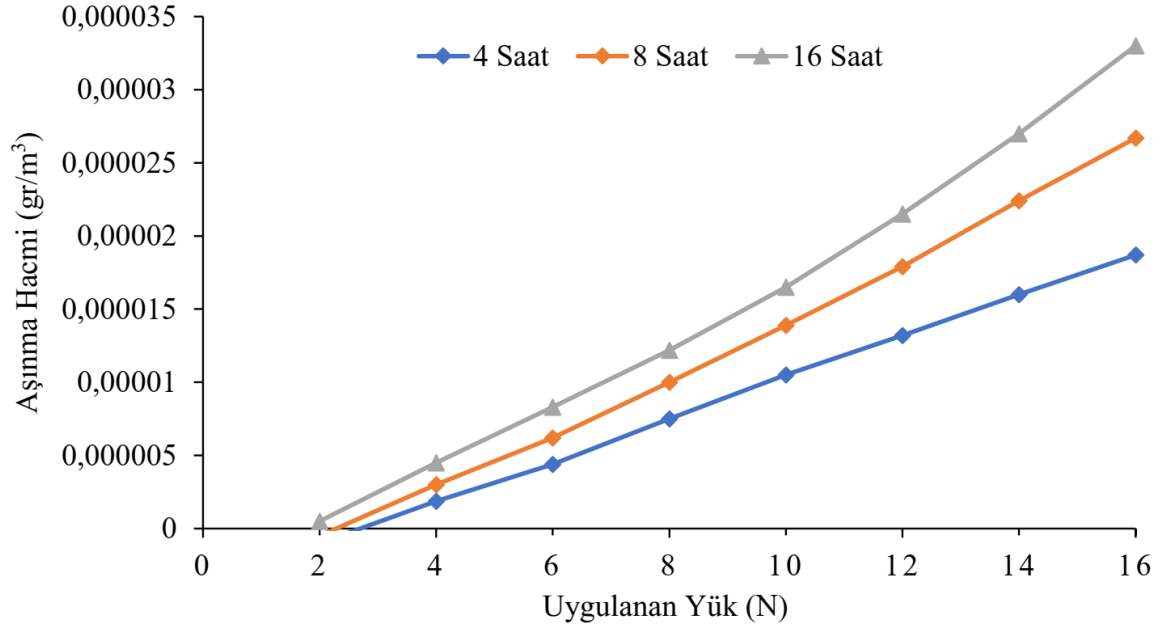
Şekil 6.25: 950 °C’de 8 saat borlanan numunenin aşınma hızı/uygulanan yük grafiği.

8 saatlik borlama işleminden sonra elde edilen hacim kaybı grafiği şekil 6.25’de verilmiştir. Bir önceki yani 4 saatlik borlama süresine sahip numune ile bu numune karşılaştırıldığında 4 saat borlama işleminin daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Tablo 6.1’de elde edilen değerler rakamsal olarakta bu sonuçları açıklamaktadır.



Şekil 6.26: 950 °C’de 16 saat borlanan numunenin aşınma hacmi/uygulanan yük grafiği.

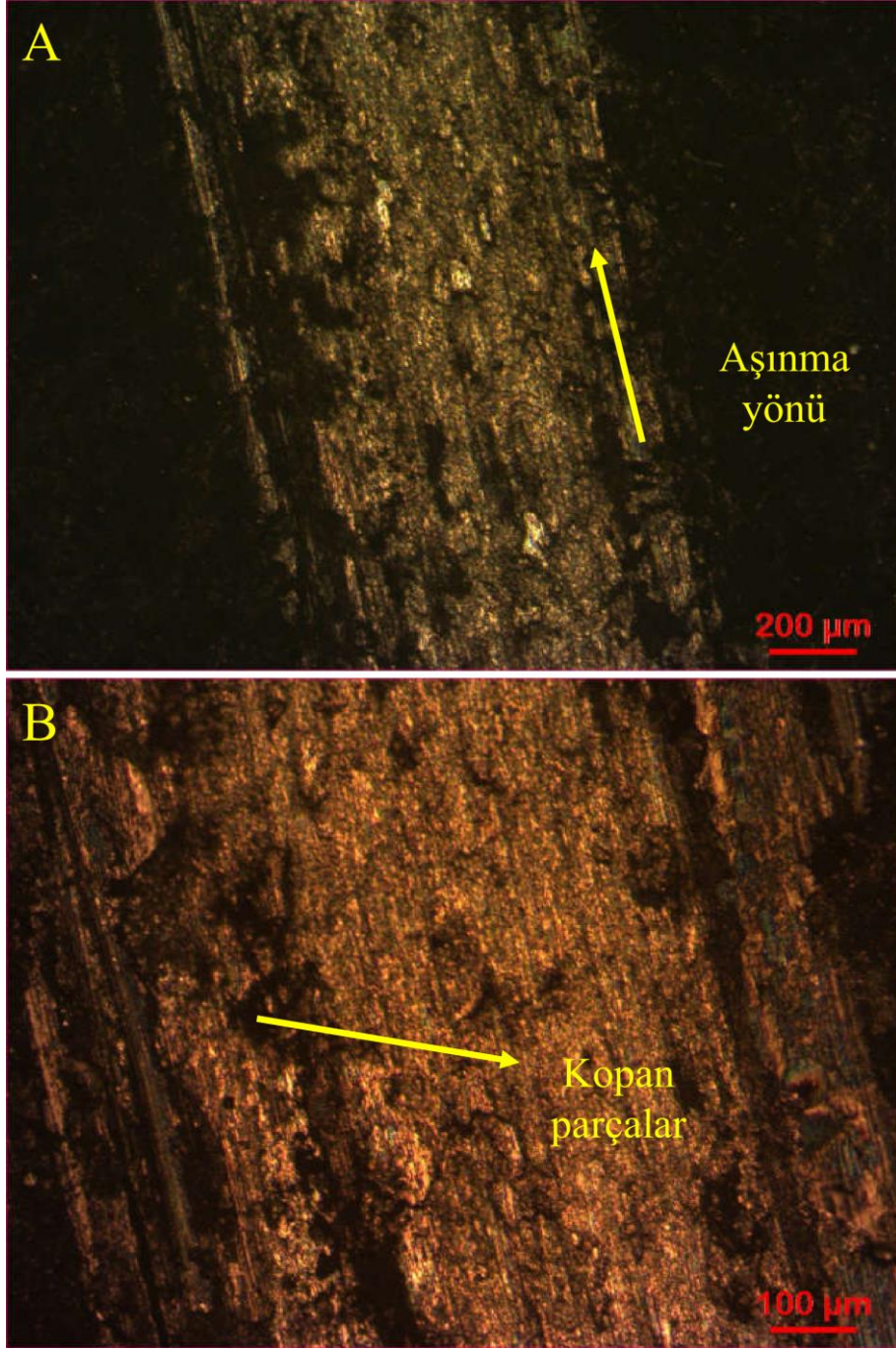
16 saatlik borlamanın aşınma hızının bu kadar fazla olmasının sebebi ise difüzyonun çok fazla olmasından kaynaklı ve havada soğumaya bırakılan numunelerin tabakası ve matrisin birbirinden farklı soğuma hızlarına sahip olmasından dolayı yüzeyde pürüzlülük meydana gelmesidir. Artan yüzey pürüzlülüğü ile de aşınmanın düşmesine sebep olmaktadır. (Sandvik Coromant, 1994; Özçatalbaş, 2000; Kuşak vd., 1990). Yüzey pürüzlülüğünün artması da borlama süresinin artması oluşumu gözlemlenen tabaka kalınlığını arttırması ile birlikte yüzey ve difüzyon bölgesi boşlukları da arttırarak tabakanın özelliklerinde azalmaya yol açar (Selçuk, 1994).



Şekil 6.27: 950 °C’de 4, 8 ve 16 saat borlanan numunelerin aşınma testi sonucu aşınma hacmi/uygulanan yük grafiği.

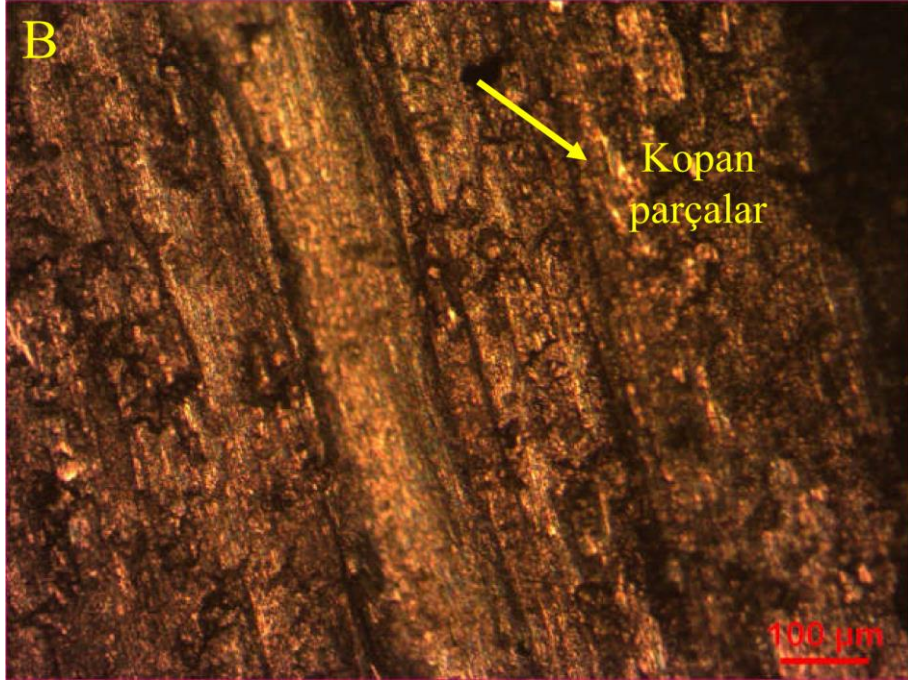
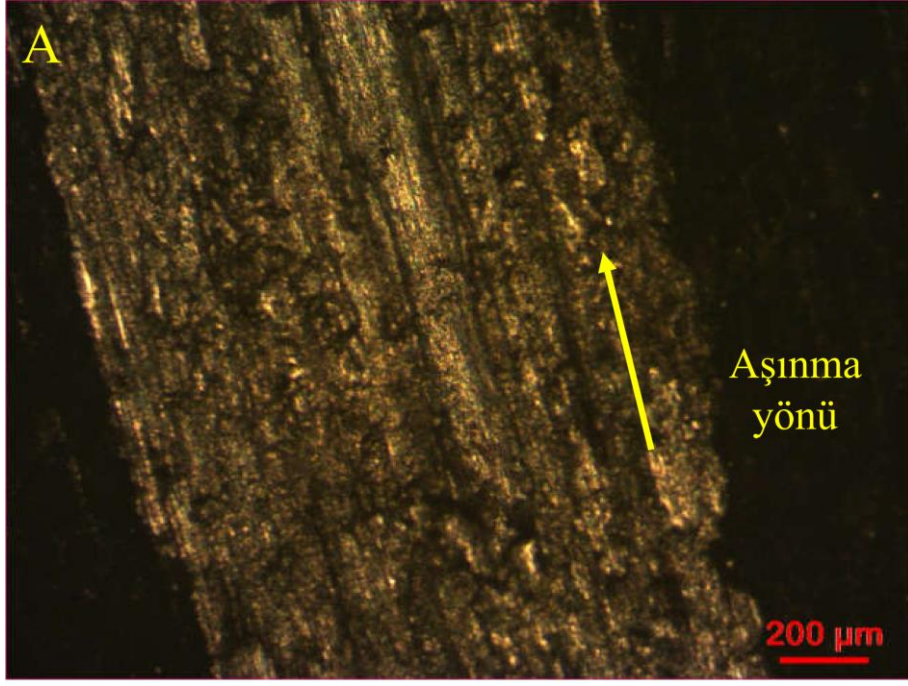
Alınan optik ve SEM görüntüleri incelendiğinde, yüzeydeki çukurların oluşumu net bir şekilde görülmektedir. Altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış numuneler üzerine uygulanan aşınma testi sonrasında aşınma hacmi sayısal verileri kullanılarak Şekil 6.27’deki grafik oluşturulmuştur. Farklı malzemeler üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bilgiler ışığında çeliğe 900 °C’de 4 saatte uygulanan borlama işleminde elde edilen veriler, güçlü bir yüzey sertliğinin, düşük bir sürtünme katsayısı ile birleştirilmesine olanak sağlamaktadır. Bundan dolayı elde edilen bulgular iyi bir aşınma dayanımını beyan etmektedir (Barkat vd., 2017). Grafikten elde edilen sonuçlar, sertlik sonuçları ile bağdaşmaktadır. 4, 8 ve 16 saatlik numunelerde 3N, 5N, 10N ve 15N yükler altında ki aşınma testi incelendiğinde, 4 saatlik numune Şekil 6.24 hacmi/uygulanan yük grafiği incelenmesinde yükün artması ile beraber aşınma hacminin de arttığı fakat en yüksek yükte dahi 8 ve 16 saatlik numunelerden daha iyi bir aşınma direncine sahip olduğu yapılan testlerde elde edilmiştir.



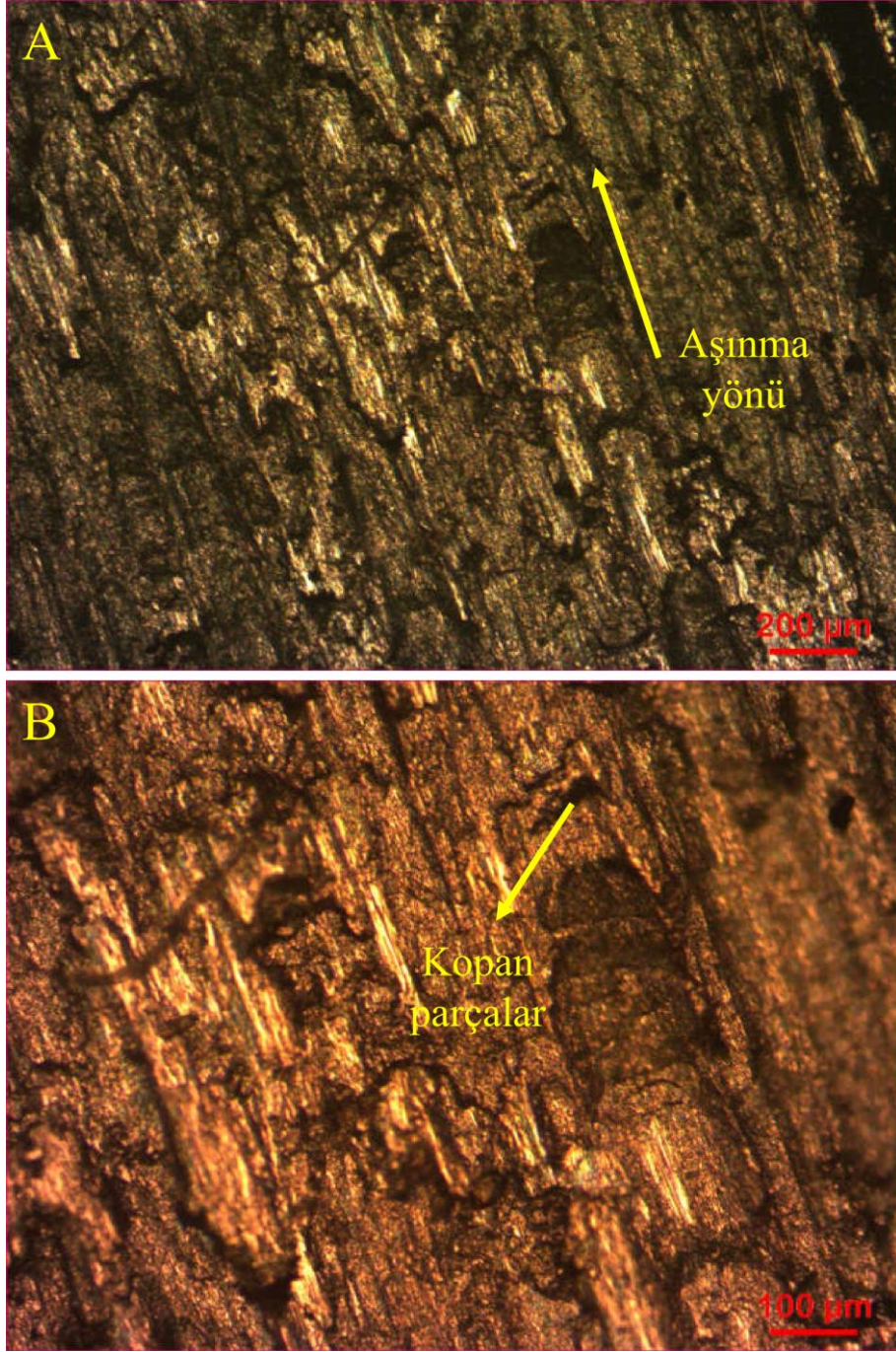


Şekil 6.28: 950 °C'de 4 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulan, a) 50X, b) 100X optik görüntüleri.





Şekil 6.29: 950 °C'de 8 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulan, a) 50X, b) 100X optik görüntüleri.



Şekil 6.30: 950 °C’de 16 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulan, a) 50X, b) 100X optik görüntüleri.

Şekil 6.28’te verilen görsellere baktığımızda 950 °C’de 4 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulmuş malzemeye uygulanan aşınma testi sonrasında abrasif aşınma mekanizmaları tespit edilmiştir. Sert bir parçanın daha yumuşak bir parçadan, parça kaldırarak yaptığı aşınmaya abrasif aşınma denir. Yüzeydeki kalıntılar ve çizikler genellikle malzeme yüzeyi ile temas halinde olan aşındırıcı sert bilye tarafından oluşturulmaktadır (Yılmaz vd., 2012).



Şekil 6.28a'da verilen görsel aşınma yüzeyinin 50x büyütmeden alınmıştır. Görselde aşınma genişliğinin çok geniş olmadığı tespit edilmiştir. Şekil 6.29'da verilen görsellere baktığımızda 950 °C'de 8 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulmuş malzemeye uygulanan aşınma testi sonrasında aşınma yüzeyinden alınan görüntü verilmiştir. 4 saatlik borlamaya tabii tutulan malzeme gibi abrasif aşınma mekanizması tespit edilmiştir. Şekil 6.28a'da verilen görsel aşınma yüzeyinin 50x büyütmeden alınmıştır. Görselde aşınma genişliğinin 4 saatlik malzemeye göre aşınma genişliğinin bir miktar arttığını görmekteyiz. Aşınma genişliğinin artması ile beraber aşınma hacminin de arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 6.30'da verilen görseller incelendiğinde 950 °C'de 16 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulmuş malzemeye uygulanan aşınma testi sonrasında aşınma yüzeyinden alınan görüntü verilmiştir. 4 ve 8 saatlik malzemeler gibi benzer abrasif aşınma mekanizması tespit edilmiştir. Görüntüler incelendiğinde aşınma genişliğinin en fazla malzeme olduğu görülmüş ve aşınma hızının da en fazla olduğu malzeme olarak tespiti yapılmıştır.

#### **6.6 Borlanmış Tabakanın Sertlik ve Aşınma Yüzey Özelliklerinin İrdelenmesi**

Altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış numuneler üzerinde 950 °C'de 3 farklı zaman diliminde (4 saat , 8 saat, 16 saat) yapılan borlama işlemi sonrasında malzeme yüzeylerinde incelenmek üzere uygulanan aşınma değerleri ve sertlik sonuçları tüm değerler Tablo 6.1'de verilmiştir. Verilen değerler incelendiğinde, borlama işlemi yapılan malzemeler içerisinde yüzey sertliği ve aşınma direnci en iyi olan numune 4 saat daha iyi sonuçlar yapılan deneyler sonucunda tespit edilmiştir.

Tablo 6.1: Farklı borlama sürelerine göre aşınma ve sertlik sonuçları.

<b>Borlama Süresi</b>	<b>Aşınma Yüğü (N)</b>	<b>Aşınma Hızı (gr/m)</b>	<b>Ağırlık Kaybı (gr)</b>	<b>Tabaka Sertliği (HV0.01)</b>
4 Saat	3	0,0000001	0,00001	1312
	5	0,000003	0,0003	
	10	0,000011	0,0011	
	16	0,000018	0,0018	
8 Saat	3	0,0000015	0,00015	1272
	5	0,000005	0,0005	
	10	0,000015	0,0015	
	16	0,000025	0,0025	
16 Saat	3	0,000003	0,0003	1150
	5	0,000007	0,0007	
	10	0,000018	0,0018	
	16	0,00003	0,003	

P.J. Wilbur ve arkadaşlarının (1997) yaptığı çalışma, borlama sonucunda tabakada oluşan Fe<sub>2</sub>B bileşiğinin aşınmaya karşı dirençli hale getirdiği tespit etmişlerdir. Başka bir çalışmada ise Eyre'nin (1975), iyon borlanmış demir disklerin karakterizasyonu irdelenmiş ve 900 °C de meydana geldiği gözlemlenen Fe<sub>2</sub>B bileşiklerinin yüzeyde tribolojik özelliklerinin geliştirdiği tespit etmişlerdir. Inconel 718 altlık malzeme üzerine borlama ile yapılan deneysel çalışmaların ışığında karbürleme ve borlama işlemine tabii tutulmuş numunelerin tribolojik özelliklerini karşılaştırmış ve borlamaya tabii tutulan malzemelerin karbürlemeye göre özellikle geçiş bölgesinde ki yüklemelerde abrasif aşınma dayanımı açısından çok daha iyi sonuçlar verdiğini ve bu özelliği yüksek sıcaklıklarda dahi koruduğu uygulanan deneylerde saptanmıştır. Ağırlık kayıpları her test öncesi ve sonrasında hassas terazi kullanılarak ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ağırlık kayıpları incelendiğinde, aşınmada olduğu gibi sert olan tabakanın daha az aşındığı ve aşınma kaybının daha az meydana geldiği uygulanan deneysel çalışmada görülmektedir.

## BÖLÜM 7

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen çalışmada, altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış malzemelerin termokimyasal borlanması üzerine deneysel araştırmalar yapılmıştır. Borlama işlemi 4 saat, 8 saat ve 16 saatlik sürelerde ve 950 °C sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmaların genel sonuçları aşağıda maddeler halinde özetlemiştir:

1. Mikroyapısal incelemelerde kullanılan optik mikroskop, SEM ve EDX analizleri değerlendirildiğinde, Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme yüzeyine bor tabakasının başarılı bir şekilde biriktiği tespit edilmiştir. Bor tabakasının en üniform yapısının 4 saatlik borlama süreci sonucunda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Inconel 718 süper alaşım altlık malzemedeki 8 ve 16 saatlik bor tabakaları incelendiğinde, difüzyondan kaynaklı olarak yüzeyden malzeme koptuğu, numuneler üzerindeki bazı bölgelerin ise eğimli, çukurcuklu ve gözenekli yapıda oldukları tespit edilmiştir.
2. XRD analizleri sonucunda elde edilen bulgular altlık malzeme tabakası üzerinde  $Ni_2Si$ ,  $Ni_4B_3$ ,  $FeB$  fazlarının oluştuğunu göstermiştir.
3. Sertlik analizleri neticesinde 950 °C sıcaklıkta 4 saat borlama işlemine tabi tutulan numunenin sertlik değerlerinin daha iyi çıktığı elde gözlemlenmiştir. Bor tabakasından matrise doğru sertlik değerleri ölçüldüğünde en sert difüzyon ve bor tabakasının oluşumunun 4 saatlik borlama sonucu oluştuğu tespit edilmiştir. Kesitten sertlik profilleri incelendiğinde ise, borür tabakasından sonra sertlik değerlerinin azalmakta olduğu ve matriste sabit bir değerde devam ettiği gözlemlenmiştir.
4. Aşınma analizlerinin bulguları ışığında sertlik değişimleri ile doğrudan bir bağlantı olduğu tespit edilmiştir. 3 N, 5N, 10 N ve 16 N aşınma yükü altında Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme yüzeyine bor tabakasının en başarılı şekilde biriktiği 4 saatlik borlanmış malzemenin aşınma direncinin de iyi olduğu tespit edilmiştir. 8 saatlik numunenin aşınma direnci 4 saatlik numunenin aşınma direncine kıyasla azaldığı, 16 saatlik numunenin ise aşınma dayanımının daha da düştüğü tespit edilmiştir.

Altlık malzemesi Inconel 718 süper alaşım olan bor kaplanmış malzemelerin ve gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, deneylerin yapılması ve sonuçların değerlendirilmesi aşamasında elde edilen veriler esas alınarak, gelecek çalışmalar için öneriler aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır.

- Yapılacak çalışmalarda farklı sıcaklıklar ve zaman süreçlerinin belirlenerek daha ayrıntılı verilerin elde edilmesi uygulanabilir.
- Dolgu malzesinin kömür tozu yerini farklı dolgu malzemeleri kullanılarak oluşan borür tabakasının özelliklerinin mikro yapısal yapılarının karşılaştırılması uygulanabilir.
- Aynı altlık malzemenin diğer kaplama yöntemleri uygulanarak karşılaştırmaları yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Akbulut, H., Durman, M. ve Yılmaz, F. (1993). SiC Seramik Partikül Takviyeli Alüminyum-Silisyum Metal Esaslı Kompozitlerin Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi. *VII. Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, s. 1183-1192.
- Anık, M., Körpe, E. ve Baksan, B. (2009). Isıl İşlemin Akımsız Ni-B Kaplamanın Mikroyapısına, Korozyon Direncine ve Sertliğine Etkisi. *Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22: 112-123.
- Ayter, T. (2005). Borlama İşleminin Çeliklerin Yüzey Kalitesi ve Aşınma Davranışına Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa, 110 s.
- Bahadır, B. (2010). Süper Alaşımların Açık ve Kontrollü Atmosferde Dökümü. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 65 s.
- Barış, M. (2007). Farklı Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasiv Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 80 s.
- Barkat, A., Hammou, A.D. ve Allaoui, O. (2017). Effect of Boriding on the Fatigue Resistance of C20 Carbon Steel. *Special issue of the 2nd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering*, Volume 132(3): 813-815.
- Başman, G. (2010). AISI 316 L Tipi Paslanmaz Çeliğin Termokimyasal Difüzyon Yöntemi ile Borlanması, Borlama Banyosu Bileşenlerinin Borür Tabakası Özelliklerine Etkisi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 279 s.
- Baştürk, S., ve Erten M. (2006). Borlama ile Yüzey Sertleştirme Çalışmaları. *Mühendis ve Makine*, 47 (563): 57-74.
- Bayça, S.U. ve Şahin, S. (2004). Borlama, *Mühendis ve Makine*, 45 (532): 51-59.
- Bekteş, M. (2010). Fe-Mn İkili Alaşımların Mekanik Özellikleri Üzerine Borlamanın Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Isparta, 79 s.
- Betteridge, W. ve Heslop, J. (1974). The Nimonic Alloys, and Other Nickel-Based High-Temperature Alloys. Edward Arnold 2nd Edition, New York, 498 s.
- Bircan, B. (2014). Inconel 718 Alaşımının Katı Partikül Erozyon Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 91 s.

- Bora, A.S. (2017). Alaşımız Düşük Karbonlu Yassı Mamüllerin Elektrokimyasal Olarak Borlanması ve Borlama İşleminin Mekanik Özelliklere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 85 s.
- Bozkurt, N. (1984). Bor Yayınımı ile Çeliklerde Yüzey Sertleştirme. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 91 s.
- Bradley, E.F. (1988). Microstructure in Superalloys A Technical Guide. American Society for Metals International, 439 s.
- Campbell, F.C. (2006). Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials. Elsevier Science, Missouri, 616 s.
- Campos, I. (2005). Effect Of Boron Paste Thickness On The Growth Kinetics Of Fe<sub>2</sub>B Boride Layers During The Boriding Proces. *Applied Surface Science*, 243: 429-436.
- Carbucicchio, M. ve Palombarini, G. (1987). Effects Of Alloying Elements On The Growth Of Iron Boride Coating. *J. Materials Science Letters*, 6: 1149-1145.
- Carbucicchio, M. (1984). On The Morphology Of Thermochemically Produced Fe<sub>2</sub>B/Fe Interfaces, *J. Materials Science Letters*, 3: 791-794.
- Choi, H.S ve Choi, J. (1972). Precipitation In Inconel 718 Alloy. *Journal Of The Korean Nuclear Society*, 4: 114-118
- Çalık, A. (2005). Termokimyasal Borlama Yöntemleri ve Önemi. *4th International Advanced Technologies Symposium*, 28-30 Eylül 2005, Konya, s. 839-844
- Çarkçı, M. (2012). Saf Nikelin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Isparta, 77 s.
- Çelebi, G.F. (2005). 31CrMoV9 ve 34CrAlNi7 Çeliklerinin Borlama Kinetiklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya, 160 s.
- Çelik, A. (2006). Nikel Esaslı Süper Alaşımların Talaşlı İşlenmesi İçin SiAlON Esaslı Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 109 s.
- Davis, J. R. (1997). Heat Resistant Materials, *American Society for Metals International*, Materials Park, 591 s.
- Demirel, Ç. (2013). AISI 8640 Ve GS 60 Çelik Malzemelerin Abrasif Aşınma Ve Korozyon Davranışına Borlama İşleminin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitim Anabilim Dalı, Karabük, 138 s.
- Deng, D., Wang, C., Liu, Q. ve Niu, T. (2015). Effect Of Standard Heat Treatment On Microstructure And Properties Of Borided Inconel 718. *Transactions Nonferrous*



*Metals Society China*, 25(2): 437-443.

- Dilektaşlı, E. (2014). Bazı Alaşımli Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışına Borlama İşleminin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 116 s.
- Dong, M., Shen, B., Yang, C. ve Zhao, X. (2009). Microstructure Analysis Of Boronized Pure Nickel Using Boronizing Powders With SiC As Diluent. *Vacuum* 83(12): 1481-1484.
- Ersöz, A. (2008). Elektrokimyasal Borlama ile Çeliklerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 106 s.
- Ezugwu, E.O. (2003). An Overview of The Machinability of Aeroengine Alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, 134 (2): 233-253.
- Genel, K. (2006). Boriding kinetics of H13 steel. *Vacuum* 80(5): 451-457.
- Gravesend, L., Cormier, B.J., Kruch, J., Gallerneau, S. ve Mendez, F. (2010) Microstructural Parameters Controlling High-Temperature Creep Life of the Nickel-Base SingleCrystal Superalloy MC<sub>2</sub>. *The Minerals, Metals & Materials Society and American Society for Metals International*, 43(11): 3988-3997.
- Güldeş, A. (1998). Aşınma Deney Aparatının Tasarımı, Üretimi ve Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 90 s.
- Günen, A., Çarboğa, C., Kurt, B. ve Orhan, N. (2013). Borlama İşleminde Kullanılan Bor Tozu Tane Boyutunun Kaplama Tabakası Üzerine Etkisi. *Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2 (1): 12-19.
- Güneş, İ. (2010). AISI 8620 Çeliğinin Değişik Pasta Karışımlarında Plazma Pasta Borlanması Ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar 73 s.
- Hunger, H.J. ve Trute, G. (1994). Boronizing to Produce Wear-Resistant Surface Layers, *Heat Treatment of Metals*, Volume 2: 31-39.
- Hagel, W.C. ve Wiley, J. (1972). The Superalloys. New York, 192 s.
- Hunger, H.J. ve Trute G. (1994). Successful Boronizing Of Nickel Based Alloys. *Materials Science Forum*, Volume 163-165: 341-348.
- İnanır, Z. (2012). Yüksek Çalışma Sıcaklıklarının Inconel 718 Alaşımının Yapısal Ve Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, İstanbul, 95 s.

- Kahraman, F. (2008). Süper Alaşımların Nitrürlenerek Yüzey Özelliklerinin İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon İmalat Anabilim Dalı, İzmir, 92 s.
- Karlı, A.M. (2005). AISI 440c ve 52100 Yatak Çelikleri Üzerinde Oluşturulan Karbür Ve Borürlerin Yüksek Sıcaklıklarda Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 78 s.
- Kartal, G. (2011). Katodik Redüksiyon-Termal Difüzyon Yöntemi ile Metallerin Borlanması (KRTD-Bor) ve Süreçlerin Optimizasyonu. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislikte İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, İstanbul, 119 s.
- Kayalı, Y. (2011). Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Afyon, 219 s.
- Koichiro, K., Shimotake, H. ve Mrazek F.C. (1983). Boriding Of Nickel and Other Metals at Temperatures Below 670 °C. *Journal of the Electrochemical Society*, Volume 130 (1): 147-151.
- Kuo, C.M., Yanga, Y. T., Borb, H. Y., Wei, C. N. ve Tai, C.C. (2008). Aging Effects On The Microstructure And Creep Behavior Of Inconel 718 Superalloy, *Materials Science and Engineering A*, s. 289-294.
- Küper A., Qiao X., Stock H.R. ve Mayr, P. (2000). A Novel Approach To Gas Boronizing. *Surface and Coatings Technology*, 130 (1): 87-94.
- Makuch, N, Kulka, M. (2014). Microstructural Characterization And Some Mechanical Properties Of Gas-Borided Inconel 600-Alloy. *Applied Surface Science*, 314: 1007-1018.
- Maragoudakis, N.E., Stergioudis, G., Omar, H., Pavlidou, E. ve Tsipas, D.N. (2002). Boronitriding of steel Us 37-1. *Materials Letters*, 57 (4): 949-952.
- Matthew, J.D. ve Stephen, J.D. (2002). Superalloys: A Technical Guide 2nd. Edition, *American Society for Metals International*, 439 s.
- Matuschka, A.G.V. (1980). Boronizing, Münche, Wien: Hanser., 100 s.
- Muhammad, W., Hussain, K, Tauqir, A, Ulhaq, A. ve Khan, A.Q. (1999). Evaluation of Halide-Activated Pack Boriding of Inconel 722. *Metallurgy And Materials Transactions A*, Volume 30 (3): 670-675.
- Özaydın, D. (2015). Toz Metalurjisi İle Üretilen Demir Esaslı Malzemelerde Borlamanın Mekanik Özelliklere Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 61 s.
- Özbek, İ., Akbulut, H., Zeytin, S., Bindal, C. ve Üçışık, A.H. (2000). The Characterization

- Of Borided 99.5% Purity Nickel. *Surface And Coatings Technology*, 126 (2): 166-170.
- 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*, 73 (3): 643-648.
- Özdemir, Ö., Omar, M.A., Usta, M., Zeytin, S., Bindal, C. ve Üçışık, A.H. (2009). An Investigation On Boriding Kinetics Of AISI 316 Stainless Steel. *Vacuum*, 83 (1): 175-179.
- Özdoğru, E.F. (2002). CrCoNi Süper alaşımın Yüksek Sıcaklık Oksidasyon Ve Karburizasyon Davranışı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı, İstanbul, 82 s.
- Özdoğru, F.E., Kaya, A.A. ve Kayalı, E. S. (2002). Bir Süper Alaşımın Yüksek Sıcaklıkta Oksidasyon ve Karburizasyon Davranışı. *XI. Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi*, 5-9 Haziran 2002, İstanbul, s. 162-168
- Özsoy, A. (1991). Çeliğin Borür Tabakası, Geçiş Zonu Ve Ana Matrisin Özelliklerinin İyileştirilmesi. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 66 s.
- Panus, D.A. (2006). In Vitro Characterization of Borided Titanium Alloy by Means of Corrosion and Electrochemical impedance Spectroscopy Methods in Simulated Body Fluids, New Jersey Institute of Technology, Newark, 121 s.
- Patel, S.J., Smith, G.D. (2005). The Role Of Niobium In Wrought Superalloys. Special Metals Corporation, The Minerals, Metals Materials Society, pp 10.
- Pertek, A. ve Kulka, M. (2002). Characterization of Complex (B+C) Diffusion Layers Formed on Chromium and Nickel-Based Low-Carbon Steel. *Applied Surface Science*, pp. 252-260.
- Qiao, Y., Kong, J., Zhou, R. ve Guo, X. (2019). Boronizing Of The Silicide Coating On a Multicomponent NbTiSi Based Alloy As Protection Against Corrosion At High Temperatures., *Vacuum*, 161: 314-323.
- Reed, R.C. (2006). The Superalloys: Fundamentals And Applications, Cambridge University Press., pp. 372.
- Roger, C.R. (2006). Historical Development of Superalloys. The Superalloys Fundamentals and Applications, Cambridge University Press., s. 363.
- Rus, J., Luis C. ve Tsipas, D.N. (1985). Boronising of 304 Steel, *J. Materials Science Letter*, 4: 558-560.
- Selçuk, B. (1994). Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Kayseri, 156 s.

- Simonenko, A. N., Shestakov, A. ve Poboynya, V.N. (1982). Liquid Boriding In Induction Salt Baths. *Metal Science And Heat Treatment*, Volume 24: 360-361.
- Sinha, A.K. (1991). Boriding (Boronising). American Society for Metals Handbook, *J. Heat Treating*, Volume 4: 437-447.
- Sista, V., Kahvecioglu, O., Kartal, G., Zeng, Q.Z., Kim, J.H, Eryilmaz, O.L. ve Erdemir, A. (2013). Evaluation Of Electrochemical Boriding Of Inconel 600. *Surface And Coating Technology* 215: 452-459.
- Şen, U. (1997). Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Bor Kaplanması ve Kaplama Özellikleri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 202 s.
- Taşçı, A. (1993). Borlanmış Çeliklerin Aşınma ve Korozyon Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 82 s.
- Tezcan, R. (1996). Borlama İşlemi ve Endüstriyel Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 86 s.
- Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Metalurji Mühendisleri Odası (2003). Bor Raporu. *Metalurji Dergisi*, 134: 11-72.
- Topuz, P. (2009). Akışkan Yataklı Fırında Farklı Çeliklerin Borlanması Ve Borlama Parametrelerinin Geliştirilmesi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 128 s.
- Ueda, N., Mizukoshi, T., Demizu, K., Sone, T., Ikenaga, A. ve Kawamoto, M. (2000). Boriding of nickel by the powder-pack method. *Surface and Coatings Technology*, 126 (1): 25-30.
- Uluköy, A. ve Can, A.Ç. (2006). Çeliklerin Borlanması. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12: 189-198 s.
- Uslu, I., Comert, H., Ipek, M., Özdemir, O. ve Bindal, C. (2007). Evaluation Of Borides Formed On AISI P20 Steel. *Materials and Design* 28: 55–61.
- Uysal, M. (2006). CrN, TiN Kaplanmış ve Kaplanmamış AISI 304 Paslanmaz Çeliğin Korozyon Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 106 s.
- Üçkardeşler, A. (2013). Çelik Dökümlerde Borlama Isıl İşleminin Abrasif Aşınma Direnci Üzerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Ankara, 127 s.
- Ülker, Ş., (2012). Farklı Gaz Karışımlarında Plazma Pasta Borlanmış AISI 8620 Çeliğinin Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, Afyon, 177 s.
- Ünüvar, F., (2013). Saf Kobaltın Borlama Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 75 s.

- Vangaveeti, R. (2006). Boron İnduced Surface Modification Of Transition Metals, New Jersey Institute of Technology 76: 113-120.
- Venkataraman, B. ve Sundararajan, G. (1995). The High Speed Sliding Wear Behaviour Of Boronized Medium Carbon Steel. *Surface Coating Technology*, 73 (3): 177-184.
- Wang, H., Zhao, Y., Yuan, X., Chen, K. ve Xu, R. (2013). Effect of Boronizing Treatment on Corrosion Resistance of 65Mn Steel in two Acid Mediums. *Physics Procedia*, Volume 50: 124-130.
- Yapar, U. (2003). Düşük Ve Orta Karbonlu Çeliklerin Termokimyasal Borlama İle Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 120 s.
- Yılmaz, R., Özyürek, D. ve Kibar, E. (2012). Yeniden Çözeltiye Alma Parametrelerinin 7075 Alüminyum Alaşımlarının Sertlik Ve Aşınma Davranışlarına Etkisi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Cilt 27 (2): 429-438.
- Yurtseven, R. (2008). Tel Çekme Sanayinde Borlamanın Endüstriyel Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli, 101 s.
- Zhao, J.C. ve Henry, F.M. (2002). The Thermodynamic Prediction of Phase Stability in Multicomponent Superalloys, 54 (1): 37-41.
- Zietara, M. (2011). Microstructure Stability of Second and Fourth Generation Single Crystal Nickel-Base Superalloys During HighTemperature Creep Deformation. *Materials Transactions*, Volume 52 (3): 336-339.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Hüseyin Duran  
Doğum Yeri ve Tarihi : Şişli/29.06.1991

### Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Makina Mühendisliği  
Yüksek Lisans Öğrenimi : Bartın Üniversitesi Makina Mühendisliği  
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce  
Bilimsel Faaliyet/Yayınlar : IMSTEC 2019 KIZILCAHAMAM

### İş Deneyimi

Stajlar : Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (2011)  
Baymak Makine Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi  
(2012)  
Projeler ve Kurs Belgeleri : ÇSGB C sınıfı İş güvenliği Uzmanlığı, TSE Araç Proje  
Uzmanı , TSE İş Ekipmanları Kontrol Uzmanı  
Çalıştığı Kurumlar : UBM Plastik Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi –  
Fabrika Müdürü  
HD Kalite Mühendislik ve Danışmanlık –  
Firma Kurucusu

### İletişim

E-Posta Adresi : huseyindurann@yandex.com

Tarih : 10/09/2019 (Tez sınav tarihi)