INCONEL 718 SÜPER ALAŞIMININ FARKLI YÖNTEMLERLE BORLANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tolgahan ÇALI

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2021

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

INCONEL 718 SÜPER ALAŞIMININ FARKLI YÖNTEMLERLE BORLANMASI

Tolgahan ÇALI

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Şubat 2021

TEZ ONAY SAYFASI

Tolgahan ÇALI tarafından hazırlanan "Inconel 718 Süper Alaşımının Farklı Yöntemlerle Borlanması" adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 11 / 02 / 2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği** ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

Başkan : Doç. Dr. Yusuf KAYALI ……
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Üye : Doç. Dr. Ali GÜNEN ……
İskenderun Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER ……
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... /..... /..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....
Prof. Dr. İbrahim EROL
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

11 / 02 /2021



Tolgahan ÇALI

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

INCONEL 718 SÜPER ALAŞIMININ
FARKLI YÖNTEMLERLE BORLANMASI

Tolgahan ÇALI
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER

Bu araştırmada, Inconel 718 süperalaşımı kutu borlama (KB) ve plazma pasta borlama (PPB) yöntemleriyle borlanmıştır. KB işlemi 850°C, 900°C ve 950°C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerince EKabor 2, PPB işlemi 700 °C ve 750 °C sıcaklıklarda 2 ve 4 saat sürelerince %100 susuz boraks pasta kullanılarak uygulanmıştır. Elde edilen borür tabakalarının karakterizasyonu optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu, X-ışını, mikrosertlik testi ve aşınma testleri ile gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri bilye-disk aşınma cihazıyla 0,3 m/s kayma hızı, 10 N yük ve 300 m kayma mesafesiyle WC-Co bilyeye karşı uygulanmıştır. Elde edilen borür tabakalarının sertlik değerleri 50 gr yük 10 sn ile uygulanarak tespit edilmiştir. Karakterizasyon çalışmaları sonucunda hem KB hem de PPB numunelerin borlama sıcaklığının ve süresinin artmasıyla yüzeyde oluşan borür tabaka kalınlıkları ve mikrosertlik değerlerinin arttığı bunun da aşınma dirençlerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Borlama işleminin tüm deney şartlarında işlemsiz numuneye göre daha iyi bir aşınma direnci göstermiş olmakla birlikte PPB işleminin aşınma direncinin KB işlemine göre daha iyi olduğu ortaya konmuştur. Borlama işlemi sonucunda KB numunelerin mikrosertlikleri 1181-1763 $HV_{0,05}$, aşınma hızları 361,94 ile $227,12x10^{-6}$ mm^3/Nm aralığında, PPB numunelerin mikrosertlik değerleri ise 1679-1978 $HV_{0,05}$, aşınma hızları 234,45 ile $117,23x10^{-6}$ mm^3/Nm aralığında ölçülmüştür.

2021, x+66 sayfa

Anahtar Kelimeler: Borlama, Nikel esaslı süper alaşım, Inconel 718, Aşınma

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

BORIDING OF INCONEL 718 SUPERALLOY
USING DIFFERENT METHODS

Tolgahan Çalı

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Şükrü ÜLKER

In this research, Inconel 718 superalloy was boronized by Pack-Boriding (PB) and Plasma Paste Boriding (PPB) methods. PB with EKabor2 was processed at 850°C, 900°C and 950°C for 2, 4 and 6 hours and, PPB with 100% dehydrated borax was processed at 700°C and 750°C for 2 and 4 hours. The characterization of the obtained boride layers was carried out by optical microscope, scanning electron microscope, X-ray, microhardness test and wear tests. Wear tests were applied against WC-Co ball with 0,3 m/s sliding speed, 10 N load and 300 meters sliding distance with ball-on-disc. The hardness values of the obtained boride layers were determined by applying 50 g load for 10 seconds. As a result of characterization studies, it was found that the boride layer thicknesses and microhardness values formed on the surface of both PB and PPB samples increased due to the increase in boriding temperature and boriding time, which improved their wear resistance. Although the boriding process showed better wear resistance than the untreated sample under all experimental conditions, it was found that the wear resistance of the PPB process was better than the PB process. As a result of the boronization process, the microhardness of the PB samples is between 1181 and 1763 $HV_{0,05}$, the wear rate is between 361,94 and 227,12x10^{-6} mm^3 / Nm, the microhardness values of the PPB samples are 1679-1978 $HV_{0,05}$, the wear rate is between 234,45 to 117,23x10^{-6} mm^3 / Nm.

2021, x+66 pages

Keywords: Boriding, Nickel superalloy, Inconel 718, Wear

TEŞEKKÜR

Numunelerin kesilmesi için gereken imkânların taraflarınca sunulmasından dolayı Makine Mühendisi Ahmet ŞİMŞEK'e ve ŞDL Zincir Fabrikasına, çalışmanın deneysel sürecinde bulunduğu her türlü yardım ve desteğinden ötürü Afyon Kocatepe Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bölümü Araştırma Görevlisi Mahmud Cemaleddin YALÇIN'a, sağladıkları Mikrosertlik Ölçümleri imkânından ötürü Kırıkkale Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Onur OKUR'a ve Kırıkkale Üniversitesi Malzeme Mühendisliği bölümüne, bu alanda çalışmalar yapmam konusunda vermiş olduğu ilhamdan dolayı Gümüşhane Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü Öğretim Görevlisi Erdar KAPLAN'a ve bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Şükrü ÜLKER'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca tezin araştırma ve yazım sürecinde yardım ve desteklerinden dolayı çok değerli arkadaşlarım Umutcan ÖZBAYRAK ve Tayfun ÇELİK'e teşekkürlerimi iletiyorum.

Bu çalışmamı maddi ve manevi anlamda desteklerini hiçbir şekilde esirgemeyen anne ve babama ithaf ediyorum.

Tolgahan ÇALI

Afyonkarahisar 2021

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ vi
ŞEKİLLER DİZİNİ viii
ÇİZELGELER DİZİNİ x
1. GİRİŞ 1
1.1 Süper Alaşımlar 3
1.1.1 Süper Alaşımların Sınıflandırılması 5
1.1.2 Nikel Esaslı Süper Alaşımlar 6
1.1.3 Inconel 718 8
1.2 Bor 10
1.2.1 Borlama 10
1.2.1 Borlayıcı Ortam Bileşiminin ve Konsantrasyonunun Tabaka Kalınlığına Etkisi 12
1.2.2 İşlem Sıcaklığının ve Süresinin Tabaka Kalınlığına Etkisi 13
1.2.3 Borür Tabakasının Sertliği 13
1.2.4 Borür Tabakasının Aşınma Dayanımı 14
1.2.5 Borlama İşleminin Avantajları 14
1.2.6 Borlama İşleminin Dezavantajları 15
1.2.7 Borlama Yöntemleri 16
1.2.7.1 Kutu Borlama 16
1.2.7.2 Sıvı Borlama 17
1.2.7.3 Gaz Borlama 19
1.2.7.4 Pasta Borlama 19
1.2.7.5 Plazma Borlama 20
1.2.7.6 Plazma Pasta Borlama 21
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ 22
3. MATERYAL ve METOT 28
3.1 Numune Hazırlama 28
3.2 Kutu Borlama ve Plazma Pasta Borlama İşlemleri 29

3.2.1 Kutu Borlama İşlemi 29
3.2.2 Plazma Pasta Borlama İşlemi 30
3.3 Mikroyapı İncelemeleri 34
3.3.1 Kesit Alma, Bakalitleme ve Parlatma 34
3.3.2 Dağlama 34
3.3.3 Mikroyapı Analizleri 34
3.4 XRD Analizleri 35
3.5 Mikrosertlik İncelemeleri 35
3.6 Aşınma Analizi 37
3.7 SEM ve EDS Analizi 38
4. BULGULAR 39
4.1 Mikroyapı İncelemeleri ve Tabaka Kalınlıkları 39
4.2 SEM ve EDS Analizi 43
4.3 XRD Analizleri 47
4.4 Mikrosertlik Sonuçları 48
4.5 Kuru Kaymalı Aşınma 50
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 59
6. KAYNAKLAR 61
ÖZGEÇMİŞ 66

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

°C	Santigrat Derece
°K	Kelvin Derece
V	Volt
N	Newton
H_2O	Saf su
γ	Gama Fazı
γ'	Gama 1 Fazı
γ''	Gama 2 Fazı
Pa	Pascal
µm	Mikrometre
mm	Milimetre
Cr	Krom
Co	Kobalt
Ni	Nikel
Fe	Demir
Mo	Molibden
W	Tungsten
Ti	Titanyum
Al	Alüminyum
Ar	Argon
S	Kükürt
P	Fosfor
Si	Silisyum
Mn	Mangan
Nb	Niyobyum
Ta	Tantal
BN	Bor nitrür
B_4C	Bor karbür
CrB	Krom bor
TiB	Titanyum bor
TiN	Titanyum nitrür
TiC	Titanyum karbür
NiB	Nikel bor
FeB	Ferrobor
Cr_2O_3	Krom III Oksit
B_2O_3	Bor III oksit
Al_2O_3	Alüminyum III oksit
H_2O_2	Hidrojen peroksit
HCl	Hidroklorik asit
HNO_3	Nitrik asit
NH_4Cl	Amonyum klorür
CH_3COOH	Asetik asit
SiC	Silisyum karbür
mbar	milibar

Simgeler (Devam)	
g	Gram
L	Litre
j	Joule
mL	Mililitre
Nm	Newtonmetre
H_3PO_4	Fosforik asit
Ra	Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü

Kısaltmalar	
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
EDS	Enerji Dağılım Spektrometresi
HK	Knoop Sertliği
HT	Isıl İşlem
HV	Vickers Sertliği
KB	Kutu Borlama
OM	Optik Mikroskop
PPB	Plazma Pasta Borlama
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
RPM	Dakika Başı Devir
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SLM	Seçici Lazer Eritme
TS	Termal Sprey Kaplama
XRD	X Işını Kırınımı
YMK	Yüzey Merkezli Kübik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1 Demir-Bor Denge Diyagramı 11
Şekil 1.2 Borlama işlemi sonucu oluşan tabakalar 12
Şekil 3.1 Yüzey pürüzlülük cihazı 28
Şekil 3.2 Fırından çıkartılan potalar 29
Şekil 3.3 PPB cihazı 30
Şekil 3.4 PPB cihazı şematik gösterimi 30
Şekil 3.5 Boraks'ın kalsinasyon işleminin akış şeması 31
Şekil 3.6 Numunelerin üzerinde ki pastanın görünümü 31
Şekil 3.7 Isıtma cihazı 33
Şekil 3.8 Ultrasonik banyo 33
Şekil 3.9 Optik mikroskop 35
Şekil 3.10 Mikrosertlik cihazı 36
Şekil 3.11 Kuru kaymalı bilye aşınma testi 37
Şekil 4.1 Borlama yöntemlerinden elde edilen tabaka kalınlıklarının kıyaslanması 40
Şekil 4.2 PPB numunelerin 200x ölçeğinde çekilmiş optik mikroskop görüntüleri 40
Şekil 4.3 850 °C'de KB numunelerin mikroyapı görüntüleri 41
Şekil 4.4 900 °C'de KB numunelerin mikroyapı görüntüleri 41
Şekil 4.5 950 °C'de KB numunelerin mikroyapı görüntüleri 42
Şekil 4.6 950 °C'de KB numunelerin SEM görüntüleri 43
Şekil 4.7 950 °C'de 2 saat süresince borlanmış numunenin SEM görüntüsü üzerindeki sarı çizginin EDS Analizi 44
Şekil 4.8 950 °C'de 2 saat süresince borlanmış numunenin bor tabakasından malzeme matrisine olan doğrusal alanda tespit edilen elementler 44
Şekil 4.9 950 °C'de 4 saat süresince borlanmış numunenin SEM görüntüsü üzerindeki sarı çizginin EDS Analizi 45
Şekil 4.10 950 °C'de 4 saat süresince borlanmış numunenin bor tabakasından malzeme matrisine olan doğrusal alanda tespit edilen elementler 45
Şekil 4.11 950 °C'de 6 saat süresince borlanmış numunenin SEM görüntüsü üzerindeki sarı çizginin EDS Analizi 46

Şekil 4.12 950 °C'de 6 saat süresince borlanmış numunenin bor tabakasından malzeme matrisine olan doğrusal alanda tespit edilen elementler 46
Şekil 4.13 XRD Analizi 47
Şekil 4.14 Mikrosertlik izleri 48
Şekil 4.15 PPB numunelerin yüzeyinden malzemeye doğru sertlik ölçümleri 49
Şekil 4.16 KB numunelerin yüzeyinden matrise sertlik ölçümleri 49
Şekil 4.17 Sürtünme katsayıları ve aşınma hızları 50
Şekil 4.18 850 °C'de KB numunelerin sürtünme grafiği 51
Şekil 4.19 900 °C'de KB numunelerin sürtünme grafiği 51
Şekil 4.20 950 °C'de KB numunelerin sürtünme grafiği 52
Şekil 4.21 PPB numunelerin sürtünme grafiği 52
Şekil 4.22 İşlem görmemiş numunenin aşınma izleri 53
Şekil 4.23 İşlem görmemiş numuneden EDS analizi için belirlenmiş noktalar 53
Şekil 4.24 Şekil 4.23'de gösterilmiş object1 noktasının EDS grafiği 54
Şekil 4.25 Şekil 4.23'de gösterilmiş object2 noktasının EDS grafiği 54
Şekil 4.26 750 °C 'de 4 saat süresince PPB numunenin aşınma izleri 55
Şekil 4.27 750°C'de 4 saat süresince PPB numuneden EDS analizi için belirlenmiş noktalar 55
Şekil 4.28 Şekil 4.27'de gösterilmiş object1 noktasının EDS grafiği 56
Şekil 4.29 Şekil 4.27'de gösterilmiş object2 noktasının EDS grafiği 56
Şekil 4.30 950 °C 'de 6 saat süresince KB numunenin aşınma izleri 57
Şekil 4.31 950°C'de 6 saat süresince KB numuneden EDS analizi için belirlenmiş noktalar 57
Şekil 4.32 Şekil 4.31'de gösterilmiş object1 noktasının EDS grafiği 58
Şekil 4.33 Şekil 4.31'de gösterilmiş object2 noktasının EDS grafiği 58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1 Süper alaşımlara elementlerin etkileri 5
Çizelge 1.2 Süper alaşımların sınıflandırılması 6
Çizelge 1.3 Inconel 718'in kimyasal bileşimi 9
Çizelge 1.4 Borlanmış çeliklerin yüzey sertlikleri 15
Çizelge 3.1 Aşınma deneyi parametreleri 37
Çizelge 4.1 Borlanmış numunelerin tabaka kalınlıkları 39
Çizelge 4.2 Borlanmış numunelerin mikrosertlik değerleri 48
Çizelge 4.3 Borlanmış numunelerin sürtünme katsayıları ve aşınma hızları 50

1. GİRİŞ

Süper alaşımlar, 650 °C ve üzerinde ki sıcaklıklarda dayanımlarını koruyabildiklerinden yüksek performans gerektiren zorlu uygulama alanlarında tercih edilen malzemelerdir. Yüksek sıcaklık uygulama alanlarında kullanılmak üzere geliştirilmiş bu malzemeler, yüksek sıcaklıklarda yüksek kopma dayanımına, yüksek süneklik özelliğine, yüksek sürtünme, korozyon ve oksidasyon direncine sahiptirler (Bhattacharya vd. 1983).

Ergime noktası oldukça yüksek olan süper alaşımlar Nikel, Demir-Nikel ve Kobalt esaslı süper alaşımlar olmak suretiyle üç grupta sınıflandırılabilir (Donachie vd. 1984). İleri teknoloji hava-uzay taşıt motorlarının %50'si Nikel esaslı süper alaşımlardan oluşmaktadır. Uzun süre boyunca 700 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda korudukları dayanımlarından ve korozif ortama olan dirençlerinden ötürü; petrokimyasal ekipmanlar, nükleer reaktörler, uzay araçları, deniz altılar, endüstriyel gaz türbinleri, buhar güç fabrikaları, uçak motorları ve diğer yüksek sıcaklık uygulama alanlarında tercih edilirler (Warbuton 1967).

Direnç ve dayanımlarını geliştirmek adına titanyum, alüminyum, niyobyum, tungsten, molibden vb. elementleri içeren süper alaşımlar geliştirilmiştir. Inconel 718, en yaygın olarak kullanılan önemli nikel esaslı süper alaşımlardan biridir. Ayrıca ısıl işlem sonucu çökelme sertleşmesi mekanizması sayesinde dayanımı arttırılabilir.

Benzersiz özellik kombinasyonu ve yaygın kullanıma rağmen, Inconel 718 ve diğer birçok süper alaşımın aşınma dirençleri, özellikle yüksek sıcaklık aşınma dirençleri genellikle yetersiz kabul edilir (Kurzynowski vd., Günen vd. 2017).

Ni bazlı süper alaşımların aşınma dirençlerinin iyileştirilmesi amacıyla son yıllarda çeşitli kaplama yöntemleri ile sert seramik, karbür ve kompozit kaplamaların oluşturulması çalışılmaktadır (Günen vd. 2017). Termal sprey kaplamalar, kimyasal buhar biriktirme, seçici lazer eritme, borlama ve nitrürleme yöntemleri süper alaşımların aşınma performanslarının iyileştirme yöntemleri arasındadır.

Panagopoulos vd. (1989) tarafından yapılan çalışmada Inconel 625 numunesi yüzeyi plazma sprey yöntemiyle Ni-Cr ile kaplanmıştır. Kaplanan ve kaplanmayan numunelerin NaCl ve H_3PO_4 asidik ortamlarında korozyon davranışları incelenmiştir ve kaplanmış numunenin korozyon direncinde iyileşmeler görüldüğünü belirtmiştir.

Motyka vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada Inconel 713LC, Inconel 625, Inconel 738LC, Inconel 100 ve Inconel 718 numunelerine $AlCl_3$ ve H_2 mevcudiyetinde düşük düzeyde CVD alüminizasyonuna tabi tutulmuştur. Süper alaşımların kimyasal bileşiminin, alüminid tabakasının mikro yapısını ve kalınlığını etkilediği belirtilmiştir.

Zhang vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada Inconel 625 süper alaşımı tozlarının ve %97,5 saflıkta TiB_2 tozlarının seçici lazer eritme yöntemiyle üretildiği ve sonucunda Inconel625/TiB_2 kompozisasyonunun başarılı bir şekilde oluşturulduğu, oluşan kompozisyonda nano/mikrosertliğin ve elastisite modülünün arttığı gözlemlenmiştir.

Petrove vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada AISI 4340, AISI 304, Inconel 625, Inconel 718 ve titanyum alaşımları üzerine B_4C ve KBF_4 toz karışımıyla kutu borlama işlemi uygulanmıştır. İşlem sonucunda düşük karbonlu çeliklerde 100 kat, yüksek-gerilmeli alaşım çeliklerinde 2,5 kat ve östenit paslanmaz çeliklerde 10 kat korozyon direnç artışı gözlemlediğini belirtmişlerdir. Aynı şekilde yazarlar aşınma direncinde artış, aşınma hacim kaybında azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir. Yüksek sıcaklık oksidasyon direnci testinde bor kaplanmış demir alaşımların 800 °C sıcaklığa kadar dayanabildikleri bildirilmiştir.

Aw vd. (1997) tarafından yapılan çalışmada sıcak dövülmüş, çözeltide yaşlandırılmış Inconel 718 süperalaşımı 2 saat süresince 1025 °C sıcaklıkta ısıtılmış, suda soğutulmak ve sonrasında 780 °C sıcaklıkta 6 saat süresince ısıtıldıktan sonra havada soğutulmak suretiyle ısıl işleme tabi tutulmuştur. Yüzeyleri parlatılan numuneler 1:1 oranında N_2:H_2 gaz karışımı ortamında 550, 600, 650, 700 ve 750 °C sıcaklığında 9 saat süresince, 1:1 oranında N_2:H_2 gaz karışımı ortamında 600 °C sıcaklığında 1, 4 ve 16 saat süresince, 1:3, 3:1, ve 9:1, N_2:H_2 gaz karışımı ortamında 600 °C sıcaklığında 9 saat süresince nitrürlenmiştir. İşlem sonucunda en yüksek mikrosertlik değeri 1290 HK olarak (1.1

N_2:H_2, 9 saat) parametrelerinde 600 °C sıcaklığında ve en düşük mikrosertlik değeri 950 HK olarak (1:1 N_2:H_2, 9 saat) parametrelerinde 750 °C nitrürlenmiş numunede, en yüksek kabuk derinliği 10,6 µm olarak (1:1 N_2:H_2, 9 saat) parametrelerinde 700 °C nitrürlenmiş numunede, en yüksek yüzey pürüzlülüğü 0,532-066 µm olarak (1:1 N_2:H_2, 9 saat) parametrelerinde 650 °C nitrürlenmiş numunede oluşmuştur. Yüzeyde, Inconel 718'in ihtiva ettiği krom nitrojen ile etkileşime girmiş CrN fazı meydana getirmiştir. Maksimum sertlikte 3 kat artış gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayısı 3,7 kat azalmıştır.

Literatürde görüldüğü üzere küçük atom yarıçaplı elementler (bor, karbon, nitrojen gibi), altlık malzemenin kimyasal bileşimine ve diğer difüze kaplama tozlarına bağlı olarak altlık malzeme ile borürler, karbürler veya nitrürler oluşturmak için yüksek sıcaklıklarda yüzeye yayıldığı bunun sonucunda oluşan kaplama tabakalarının ise sertlik, aşınma direnci ve korozyon dirençlerinde iyileşme sağlayabileceği tespit edilmiştir (Arai vd. 1991).

1.1 Süper Alaşımlar

Temel yapısı nikel (Ni) kobalt (Co), veya demirden (Fe) oluşan ve yüksek oranlarda krom (Cr), düşük miktarlarda da tungsten molibden (Mo), tungsten (W), titanyum (Ti) ve alüminyum (Al) içeren alaşımlar süper alaşımlar olarak isimlendirilir. Nikel, kobalt veya demir bakımından en az birinden zengin içeriğe sahiptir.

Süper alaşımlar 20. yüzyılın ortalarında (II. dünya savaşı'ndan kısa bir süre sonra) turbo şarj, gaz jeneratör türbin motor komponentleri havacılık ve uçak türbin motorları gibi yüksek sıcaklık ve yüksek mekanik özellikler gerektiren ortamlarda etkili çalışma performansı gerektiren uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Süper alaşımların sürünme dayanımı, korozyon direnci ve yüksek sıcaklıklarda bile dayanımlarını koruyabilmesi gibi üstün özellikleri nedeniyle süper alaşımlara olan talep artmaktadır. Bu durum motorların daha yüksek sıcaklıklarda çalışmasına imkân sağlamaktadır. Böylece ekonomi ve çevre açısından üstünlük sağlamaktadır (Pollock vd. 2006, Gustafsson 2012).

Son yıllarda artan bu talepler ile süper alaşımlar; uçaklar, gemiler, roket tahrik sistemleri, petrokimyasallar, nükleer reaktörler, denizaltı uygulamaları gibi kullanım alanları genişletilmiştir (Ulutan vd. 2011).

Genellikle süper alaşımlara ilave edilen katkı elementleri, alaşımların mekaniksel özelliklerini bileşim oranlarına bağlı olarak değiştirmektedir. Bu elementler alaşımların;

- Dayanımını arttırır,
- Sertliği yükseltir,
- Sertleşmeyi kolaylaştırır,
- Korozyona karşı dayanımı yükseltir,
- Mıknatıslanma özelliğini geliştirir,
- Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı arttırır,
- Elektrik direncini yükseltir,
- Isı etkisi altında genleşmeyi ayarlar,
- Kristal yapısını inceltir.

Demir, kobalt ve nikel esaslı alaşımlarda aşağıdaki tabloda bulunan elementlerin ilavesi sonucu çeşitli element etkileri elde edilebilirler. Element etkileri Çizelge 1.1'de gösterilmiştir (Donachie 1984).

Çizelge 1.1 Süperalaşımlara eklenen elementlerin oluşturduğu etkiler.

Element Etkileri	Fe Esaslı	Co Esaslı	Ni Esaslı
Katı çözelti mukavemetlendirici	Cr, Mo	Nb, Cr, Mo, Ni, W, Ta	Co, Cr, Fe, Mo, W, Ta
YMK Matris stabilize edici	C, W, Ni	Ni	—
MC tipi karbür oluşturucu	Ti	Ti, Ta, Nb	W, Ta, Ti, Mo, Nb
M_7C_3 tipi karbür oluşturucu	—	Cr	Cr
$M_{23}C_6$ tipi karbür oluşturucu	Cr	Cr	Cr, Mo, W
M_6C tipi karbür oluşturucu	Mo	Mo, W	Mo, W
M (CN) tipi karbür oluşturucu	C, N	C, N	C, N
γ' –Ni_3 (Al, T) oluşturucu	Al, Ti, Ni	—	Al, T
Hegzagonal η (Ni_3Ti) oluşumu geciktirici	Al, Z	—	Al, Ti
γ' fazının çözünme sıcaklığı yükseltici	—	—	Co
γ' fazının çözünme sıcaklığını düşürücü	—	—	Cr
γ' irileşmesini geciktirici	—	—	Re
Sertleştirici çökeltiler ve/veya ara metaller	Al, Ti, Nb	Al, Mo, W, Ta, Ti	Al, Ti, Nb
γ'' (Ni_3Nb) oluşturucu	—	—	Nb
Oksitlenme direnci artırıcı	Cr	Al, Cr	Al, Cr
Sıcak korozyon direnci geliştirici	La, Y	La, Y, Th	La, Th
Sülfidasyon direnci artırıcı	Cr	Cr	Cr
Kopma sünekliğini artırıcı	B	B, Zr	B, Zr
Tane sınırı segregasyonu neden olucu	—	—	B, C, Zr
İşlenebilirlik artırıcı	—	Ni_3Ti	—
Ara sıcaklık sünekliği geliştirici	—	—	HF
Karbürlerin genel çökelticileri	P	—	—

1.1.1 Süper Alaşımların Sınıflandırılması

Süper alaşımlar, nikel esaslı süper alaşımlar, demir esaslı süper alaşımlar ve kobalt esaslı süper alaşımlar olmak suretiyle üç ana grupta incelenirler. Süper alaşımların sınıflandırılması Çizelge 1.2'de verilmiştir (Choudhurt ve El-Baradie 1998).

Çizelge 1.2 Süper alaşımların sınıflandırılması.

Nikel Esaslı	Demir Esaslı	Kobalt Esaslı
Inconel (587, 597, 600, 617, 625, 706, 718, X-750, 901)	Incoloy (800, 801, 802, 807, 825, 903, 907, 909)	Haynes 188
Nimonic (75, 80A, 90, 105, 115, 263, 942, PE.16, PK.33, C-263)	A-286	L605
Rene (41, 95)	Alloy 901	MAR-M918
Udimet (400, 500, 520, 630, 700, 710, 720)	Discaloy	MP159
Pyromet 860	Haynes 556	Stallite 6B
Astroloy	H-155	Elgilov
Hastelloy (C-22, G-30, S, X)	V-57	
M-252		
Waspaloy		
Unitemp AF2-IDA6		
Cabot 214		
Haynes 230		

1.1.2 Nikel Esaslı Süper Alaşımlar

Nikel esaslı süper alaşımlar çok fazla sayıda elementin bir araya gelmeleri sonucu oluştukları için oldukça karmaşık yapılardır. Ayrıca sülfür, silisyum, oksijen, nitrojen ve fosfor gibi sağlığa zararlı elementler uygun ergime uygulamaları boyunca kontrol edilmelidir. Aynı zamanda kurşun, bizmut ve selenyum gibi diğer elementler de önemli bölümler için çok küçük oranlarda (milyonda bir düzeyinde) tutulmalıdır. Birçok nikel esaslı dövme alaşımlar ağırlıkça %10-20 arası krom, %8 titanyum ile alüminyum karışımı, %5-15 arası kobalt ve az miktarda bor, magnezyum, karbon ve zirkonyum ihtiva ederler.

Mukavemet kazandırma ve karbür oluşumu etkisi gösteren diğer yaygın alaşım elementleri niyobyum, tungsten ve molibdendir. Ayrıca yüzey stabilizasyonunun gelişimi için alüminyum ve krom sırasıyla Al_2O_3 ve Cr_2O_3 oluşturur ve bu oluşum bu gelişim için gereklidir (Aggen vd. 1990).

Çeşitli alanlarda sahip oldukları güçlü mekanik ve kimyasal özellikleriyle çeşitli alaşımlar meydana gelmiştir. Son yıllarda oldukça yaygın olarak kullanılan bazı nikel esaslı süper alaşımların kompozisyonları ve kullanım alanları aşağıdaki gibidir (İnt. Kyn. 2):

- Inconel 600 (76Ni-15Cr-8Fe), standart inşaat malzemesi olarak nükleer reaktörlerde, kimya endüstrisindeki ısıtıcılarda, damıtma cihazlarında, buharlaştırıcılarda ve yoğuşturuculardа kullanılan bir alaşımdır.
- Nimonic 75 (Ti ve C ilaveli 80/20 Ni-Cr alaşımı) gaz türbinlerinde, fırın bileşenlerinde ve ısıl işlem ekipmanlarında kullanılan bir alaşımdır.
- Inconel 601, geliştirilmiş oksidasyon ve nitrasyon direnci ile kimyasal işleme, kirlilik kontrolü, havacılık ve güç üretimi için alüminyum ve silikon ilaveleri ile azaltılmış nikel (%61 oranında Ni ihtiva eden) alaşımıdır.
- Inconel X750 alaşımı alüminyum ve titanyum ilaveleriyle yaşlanma sertleşmesi yapılır, bu sayede gaz türbinlerinde, roket motorlarında, nükleer reaktörlerde, basınçlı kaplarda, alet yapımında ve uçak yapılarında kullanılır.
- Inconel 718 (55Ni-21 Cr-5Nb-3Mo), Kaynak sırasında çatlama sorunlarının üstesinden gelmek için içeriğine niyobyum ilave edilmiştir. Uçak ve yerleşik gaz türbin motorlarında ve kriyojenik tankajlarda kullanılır.
- Alaşım X (48Ni-22 Cr-18Fe-9Mo + W), Havacılık uygulamaları için yüksek sıcaklıkta yassı haddelenmiş bir alaşımdır.
- Waspaloy (60Ni-19Cr-4Mo-3Ti-1.3Al), Jet motoru uygulamaları için tescilli alaşımdır.
- ATI 718 Plus: Standart Inconel 718 alaşımının çalışma sıcaklığı kapasitesini 55 ^{0}C kadar artıran daha düşük maliyetli bir alaşımdır, motor üreticilerinin yakıt tüketim verimliliğini artırmasına olanak tanır.
- Nimonik 90 (Ni en az %54, Cr %18-21, Co %15-21, %Ti 2-3, Al %1-2): Türbin kanatları, diskler, dövme parçalar ile sıcak işleme kesici takımlarda kullanılır.

- Rene' N6. (4Cr-12Co-1Mo-W6-Ta7-Al5.8-Hf0.2-Re5-denge Ni) Jet motorlarında kullanılan 3. nesil tek kristalli alaşımdır.
- TMS 162 (3Cr- 6Co-4Mo-6W-6Ta-6Al-5Re-6Ru-denge Ni) Türbin bıçaklarında kullanılan 5. nesil tek kristalli alaşımdır.

1.1.3 Inconel 718

Inconel alaşımları, çok çeşitli bileşimleri ve mekanik özellikleri kapsayan Ni-Cr bazlı süper alaşımlar ailesine aittir. Ni ve Cr, yüksek sıcaklıklarda hareket eden korozyon, oksidasyon, karbonlama ve diğer hasar mekanizmalarına karşı direnç sağlar (Thomas vd. 2006).

Inconel 718 (N07718) 760 - 982 °C arasında yüksek mukavemete ihtiyaç duyulan uygulamalarda kullanılan nikel esaslı östenitik bir süper alaşımdır. Mukavemetine ek olarak sahip olduğu oksidasyon direnci de bu sıcaklıklarda oldukça tatmin edicidir. Ayrıca kriyojenik sıcaklıklarda da mükemmel darbe ve çekme dayanımı sergiler. Genellikle çökelme sertleştirmesi ısıl işlemi ile özellikleri optimize edilerek kullanılır. Inconel 718 malzemesi havacılık ve uzay sanayi alanında türbin pervane parçalarında, roket motor parçalarında, bağlantı elemanlarında, kimyasallarla temas eden vanalarda, bağlantı elemanlarında, denizcilik parçalarında ve parçalarında, çok özel amaçlar için üretilmiş depo tanklarında ve nükleer reaktörlerde sıklıkla tercih edilmektedir ve kullanılmaktadır.

Inconel 718 süper alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 1.3'te verilmiştir (İnt. Kyn. 1).

Çizelge 1.3 Inconel 718 süper alaşımının kimyasal bileşimi.

Element	**Oran (%)**
Nikel (Ni)	%50 - %55 arası
Krom (Cr)	%17 - %21 arası
Demir (Fe)	%12 - %24 arası
Molibden (Mo)	%2,8 - %3,3 arası
Nb+Ta (Niyobyum + Tantal)	%4,75 - %5,5 arası
Karbon (C)	%0,08 (maksimum)
Mangan (Mn)	%0,35 (maksimum)
Silisyum (Si)	%0,35 (maksimum)
Bor (B)	%0,006 (maksimum)
Fosfor (P)	%0,015 (maksimum)
Kükürt (S)	%0,015 (maksimum)
Alüminyum (Al)	%0,2 - %0,8 (maksimum)
Kobalt (Co)	%0,3 (maksimum)
Titanyum (Ti)	%0,65 - %1,15 (maksimum)

Havacılık ve uzay sanayisinde kullanılan araçlarda bulunan egzoz sistemlerinin tasarımlarında belirlenmiş olan limit değerlerinde en önemli etken olarak yüksek sıcaklık ortamlarında ki mukavemet değeridir. Yüksek sıcaklık ortamlarında ki mukavemet; sürünme direnci olarak ifade edilir, γ, γ', Ni_3Nb, $M_{23}C_6$ gibi fazlar ise bu kompozisyonların eldesiyle sağlanır. Inconel 718 üstün özellikleri ile piyasada kullanılan malzemelerden bu yönleriyle ayrışır (Nevcanoğlu 2019). Inconel 718 süper alaşım malzemesinin diğer önemli özellikleri:

- Üstün gerilme, kopma ve kırılma direnci ve darbe dayanımına sahip olması,
- Üstün kaynak edilebilirlik özelliğine sahip olması,
- Isıl işlem uygulanabilirlikte üstün kolaylık,
- Oda sıcaklığı ortamında istenilen elektriksel iletkenlik özelliğine sahip olması,
- Plaka, şerit ve levha olarak çeşitli form ve şekillerde kullanılabilir olması olarak tanımlanabilir.

Yukarıda belirtilen üstün özelliklerinin yanı sıra yüksek sıcaklık ortamlarında meydana gelen aşınmaya karşı yüksek direnç gösteremezler. Spesifik kullanım alanlarında hem yüzeyin dirençli hale gelmesi hem de malzemenin kopma ve kırılma direnci, gerilme direnci ve darbe dayanımını koruyabilmesi bakımından bir takım yüzey iyileştirme işlemleri uygulanır. Aşınma direncinin arttırılması yüzeyin borlanması suretiyle sağlanır. İşlem sonrası metalik yüzeyde oluşan borür tabakası malzemeye üstün aşınma direnci kazandırmaktadır.

1.2 Bor

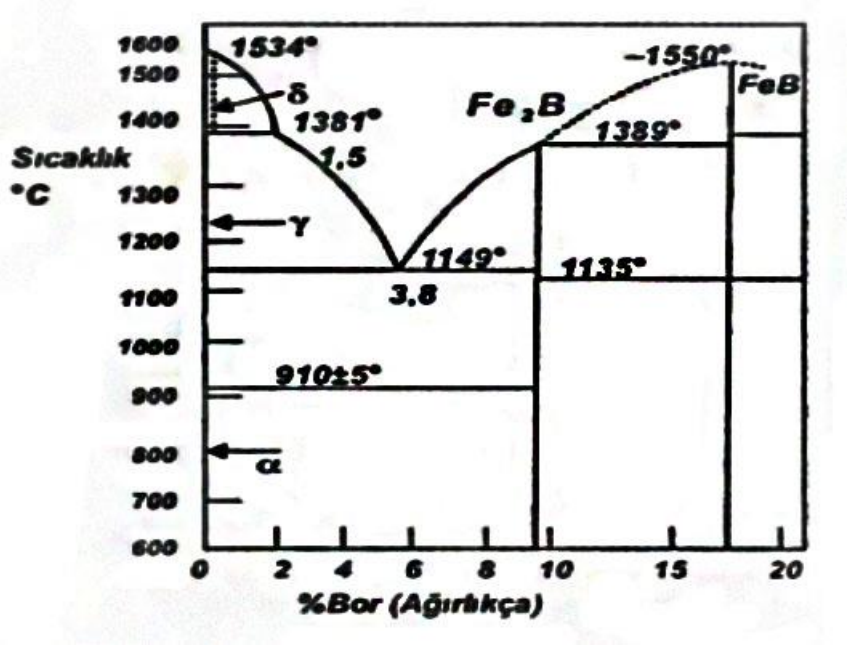
Dünyada bulunan madeni bor yataklarının takribi olarak %72'si ülkemizdedir. Ancak bu önemli rezervin yalnızca %18'inden Borat üretimi yapılmaktadır. Bu alanda ileri teknolojiye sahip üretim yapan ülkeler boratlardan saf borun yanı sıra, bornitrür (BN), bortrioksit (B_2O_3), diboran (B_2H_6), borkarbür (B_4C) ve ferrobor (FeB) gibi saflaştırılan bileşik eldesini sanayinin birçok alanında uygulamışlardır (Özsoy 1991). Bor ve bileşikleri; tarım sektörü, inşaat-çimento sektörü, seramik sanayi, ilaç ve kozmetik sanayi, tıp, tekstil sektörü, otomobil sanayi, kimya sanayi, metalürji ve malzeme, enerji sektörü, elektrik-elektronik ve iletişim sanayi, uzay ve havacılık sanayi, nükleer sanayi ve cam sanayi olmak üzere oldukça geniş kullanım alanlarına sahiptir (Özbek 2000). Çok çeşitli alanlarda kullanılan bor bileşikleri, araştırmacıları borlama işlemleri üzerine çalışmalar yapmaya yöneltmektedir.

1.2.1 Borlama

Borlama işlemi ilk defa Moisson tarafından 1985 yılında metal ve alaşımların yüzeyine uygulanmak suretiyle Rusya'da gerçekleştirilmiştir (Matuschka 1980). Borlama, malzeme yüzeyini sertleştiren, aşınma ve korozyon direncini artıran bir işlem olarak metalik malzemelere, metal dışı alaşımlara hatta sermetlere kadar uygulanan termokimyasal bir yüzey işlemidir. Diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine nazaran borlamanın tercih edilmesinin sebebi oluşturan bor tabakasının düşük sürtünme katsayısı ve yüksek sertlik değerleri sağlaması yüksek sıcaklıklardaki korozyona, asit ve bazlardan kaynaklı oluşan korozif ortamlara karşı üstün direnç sergilemesidir (Bozkurt 1984).

Demirin atom çapının, borun atom çapının 4 katı olmasından dolayı bor demirle katı eriyik yapabilmektedir.

Demir-bor denge diyagramında %16,23 oranında bor içeren FeB ve %8,83 oranında bor içeren Fe_2B ara bileşikleri oluşur. Ayrıca 1149 °C ergime sıcaklığına sahip ve %3,8 oranında bor içeren ötekteik faz oluşmaktadır. Borlanan yüzeyler Demir-Bor denge diyagramına göre 1149 °C ye kadar olan sıcaklıklardan etkilenmeyecektir (Atik 2001). Demir-Bor denge diyagramı Şekil 1.1'de gösterilmiştir.

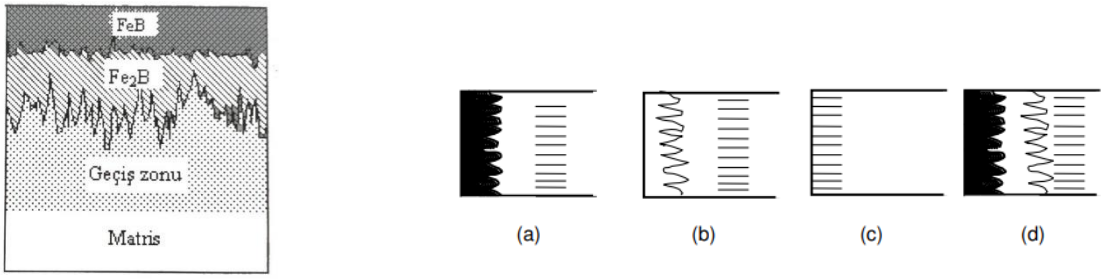


Şekil 1.1 Demir-Bor denge diyagramı.

Borlama işlemindeki kaplama tabakası, bor kaplama bileşiminin yüzeyde yayılmasıyla altlık malzemede ki en üst tabakada meydana gelen borlu bölgeden (bileşik tabaka), borlu bölge altındaki geçiş bölgesinden ve en iç kısmındaysa borla etkilerinin olmayan çekirdek bölgesinden (matris) oluşur. Farklı parametrelere göre borür tabakasının kalınlığında değişimler olabilir, bunlar; işlem sıcaklığı, malzemenin kimyasal kompozisyonu, işlem süresi ve işlem yöntemi parametreleriyle ilişkilidir (Delikanlı vd. 2003).

Fazlar arasında oluşan geçiş bölgesinde ise; borlama işlemi esnasında matris içeriğinde bulunan elementler geçiş bölgesine yeniden difüze etmek suretiyle yerleşirler. Silisyum ve karbon gibi elementler, FeB ve Fe_2B fazları içinde çözünmediğinden bu elementler matrise doğru yüzeyden itilirler. Bu bölgede az miktarda bor bulunduğundan borür

oluşturulamayacaktır. Geçiş bölgesinin bu olay sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Hem matristen, hem de borür tabakasından dolayı geçiş bölgesinin mikroyapısı farklılık gösterir. Şekil 1.2' de geçiş bölgesi, bor tabakası, difüzyon zonu ve ana yapının şematik resmi verilmiştir.



Şekil 1.2 Borlama işlemi sonucu oluşan tabakalar, a) Tek fazlı FeB tabakası, b) Tek fazlı Fe_2B tabakası, c) Difüzyon zonu, d) Çift fazlı FeB+Fe_2B tabakası.

Fe_2B fazı testere dişi şeklindedir ve bor tabakasında istenilen tek fazdır. Borca zengin olan Fe_2B fazı, FeB ve Fe_2B çift fazlı tabakanın oluşmasına nazaran daha fazla istenir. FeB fazı ağırlıkça yaklaşık % 16,23 oranlarında bor içermektedir ve bu fazın diğer demir bor fazlarına istinaden daha gevrek oluşu bu fazın oluşmasını istenmez kılar. Fe_2B fazının içerdiği bor oranı % 8,93'dür. FeB ve Fe_2B fazları birbirlerinden farklı ısıl genleşme katsayılarına sahiptir. Isıl genleşme katsayısı α FeB fazında $23x10^{-6}$ / °C, αFe_2B fazında ise $7,85x10^{-6}$ / °C dir. FeB ve Fe_2B fazları ısıl genleşme katsayısındaki farklılıklardan dolayı birbirlerine basma çekme gerilmeleri uygulamaktadır ve bu durum bor katmanında kabuk atma, yırtılma ve çatlama gibi istenmeyen durumlara neden olur. İstenmeyen bu durumlar neticesinde herhangi bir büyüklükte yükün uygulanması sonucu kaplama tabakasının yaprak ve pul pul şeklinde döküldüğü belirtilmiştir. Bu yüzden yapıda FeB ve Fe_2B fazlarının birlikte oluşumu tekli faz (Fe_2B) göre istenmez (Jain ve Sandararayan, 2002).

1.2.1 Borlayıcı Ortam Bileşiminin ve Konsantrasyonunun Tabaka Kalınlığına Etkisi

Ortamda yeterli miktarda bulunan bor, borür tabaka kalınlığında artışa sebep olur. Yeterli miktarda bor verici ortamın bulunmayışı borür tabaka oluşumunu durdurur. Bunun sonucunda ince borür tabakası oluşur. Bor karbürden (B_4C) bor oluşumu için redüktan (SiC) kullanılarak ortamda redüksiyon sağlanır ve SiC ile B_4C bileşiminden Bor (B), Bor

karbürden (B_4C) kopar ve B (elementel bor) elde edilir. Serbest kalan bor (B) oksijenle B_2O_3 oluşturur. Bu oluşumu engellemek için SiC ortamda yeterince bulunmalıdır. Redüktan olan SiC demiri de redükleyerek serbest kalan borun demire yayılmasını sağlar. Yayılma sonucu FeB ve Fe_2B fazları tabakalar oluşturur. KBF_4, borun demire yayılışını hızlandırır (Bayca ve Şahin 2004, Uluköy vd. 2006).

1.2.2 İşlem Sıcaklığının ve Süresinin Tabaka Kalınlığına Etkisi

Bor elementi B_4C'den belirli sıcaklık ortamında serbest kalabilir. FeB ve Fe_2B borürlerini oluşturan demir ve B_2O_3'ün koredüksiyonu (birlikte redüksiyonu), ayrı ayrı redüksiyonlarından daha hızlıdır. İşlem sürdükçe yüzeye olan bor yayılımı sürecektir. Bu sayede borür tabakasının kalınlığında artış meydana gelecektir. Ancak borlama işlemi süresince redüksiyon işlemi de sürmelidir. Redüksiyon işlemi borlama sıcaklığına bağlı olarak gerçekleşir. Borlama süresi, malzemenin borlama işlem sıcaklığında kaldığı süredir (Bayca ve Şahin 2004).

1.2.3 Borür Tabakasının Sertliği

Altık malzemenin cinsi ve yüzeyde oluşan borür tabakasının fazları borlanmış malzemelerin sertliğini etkiler. Metalik malzemelerde oluşan FeB fazı, Fe_2B fazından daha gevrek ve serttir. Borlama sonucunda oluşan Fe_2B tabakasının Vickers sertliği 1800 ile 2000 HV aralığındadır. Oluşan iki fazlı Fe_2B ve FeB tabakasının Vickers sertliği 1900 ile 2400 HV aralığındadır. İki fazlı tabaka daha yüksek Vickers sertlik değerine sahiptir. Borlanmış malzemelerin sertliği malzeme yüzeyinden malzemenin iç kısmına doğru azalmaktadır. Tabaka altında bulunan bölgenin deformasyona uğramasına ve borür tabakasının bozulmasına sebebiyet vereceğinden Rockwell ve Brinell sertlik yöntemleri tercih edilmez (Matuschka 1980).

1.2.4 Borür Tabakasının Aşınma Dayanımı

Daha yumuşak ve daha yüksek sürtünme katsayısına sahip malzemeler aşınan, daha sert ve daha düşük sürtünme katsayısına sahip malzemeler ise aşındıran malzemelerdir (Çiftçi 1999). Malzemelerde aşınma malzeme yüzeyinden başladığından bulunduğundan oluşturdukları makine parçaları ve mekanizmalarda güvenirlik, ömür gibi önemli etkenler yüzey özellikleri ile doğrudan ilişkilidir. Aşınma dayanımı ve sürtünme katsayısı bir sistemin özelliklerini oluşturmakla birlikte malzemenin sertliğiyle de doğrudan ilgilidir. Bor tabakasının tek veya çift faz oluşu ve tabakanın oluşum biçimi, tabakanın aşınma dayanımını etkiler. FeB fazında oluşan aşınma Fe_2B fazında oluşan aşınmadan daha fazladır. FeB fazının Fe_2B fazından daha gevrek oluşu buna neden olmaktadır. Bor elementinin oksijenle olan bağ kuruculuğunun yüksek olması metalik yüzey üzerinde oluşturduğu koruyucu oksit tabakasının yüzeyde yağlayıcı görevi üstlenerek sürtünme katsayısını düşürür ve yüzeylerin sıcaklık sonucunda birbirine kaynamasını da önler (Bayca ve Şahin 2004).

1.2.5 Borlama İşleminin Avantajları

Borlama işleminin en önemli avantajı, borür tabakasının çok yüksek sertlik değerlerine (1450 HV - 5000 HV) ve ergime sıcaklıklarına sahip olmasıdır. Diğer alışılmış sertleştirme metotlarından olan nitrürasyon ve semantasyona göre borlama işlemi sonucu oluşan borür tabakasının sade karbonlu çeliklerde ki sertlik değerleri çok daha yüksektir. Hatta bu sertlik, sert krom kaplamanın ve sertleştirilmiş takım çeliklerinin sertliklerinden daha yüksek, tungsten karbürün sertlik değerineyse eşdeğerdir.

Borlanmış çeliklerin ve diğer sert metallerin yüzey sertlikleri Çizelge 1.4'de verilmiştir.

Çizelge 1.4 Borlanmış çeliklerin yüzey sertlikleri.

Malzeme	Mikrosertlik (kg/mm^2 veya HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 Çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 çeliği	630-700
Yüksek hız çeliği BM 42	900-910
Nitrürlenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Nimonic 80	2100
Inconel 625 (Nanobor)	2100
Inconel 625 (h-NBN)	1450
Inconel 625 (EKabor 2)	1750
Inconel 600	2000
Nickel 201	1900
Sert krom kaplama	1000-1200
Semetit karbürler, WC+Co	1160-1820 (30 kg)
Al_2O_3+TiC+ZrO_2 seramikler	1730 (30 kg)
Al_2O_3+ZrO_2 seramikler	1483 (30 kg)
Sialon seramikler	1768 (30 kg)
Elmas	10000

1.2.6 Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlama işleminin avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır. Gaz ortamında plazma nütrürasyon ve sementasyonu gibi diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerine nazaran daha yüksek işletim ve işçilik maliyetleri vardır. Plazma nitrürasyon ve gaz karbürizasyon işlemlerinin borlamaya göre kolay ve daha kısa sürede gerçekleşmesi borlama için bir dezavantajdır. Ancak korozyon direncinin, yüksek sertliğin ve kalıcı yüksek aşınmanın arzu edildiği durumlarda borlama işlemi tercih edilir. Borlama işlemine yapılan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5 ile %20 oranlarında boyutsal olarak artış olmaktadır (Singhal 1977, Matuschka 1980, Fichtl 1981, Sinha 1991)

1.2.7 Borlama Yöntemleri

Borlama yöntemleri, termokimyasal ve termokimyasal olmayan yöntemler olmak üzere iki ana grupta gerçekleştirilir. En çok kullanılan yöntem ise termokimyasal yöntemlerdir. Termokimyasal bor kaplama yöntemleri bor atomunun metale sıcaklık ve zamanın birbirlerine bağlı fonksiyonu ile difüze olması işlemine dayanmaktadır. Bu yöntemler; kutu borlama, sıvı borlama, pasta borlama ve plazma (gaz ortamında) borlama olarak sıralanabilir. Termokimyasal olmayan bor kaplama yöntemleri ise fiziksel buhar biriktirme (PVD), kimyasal buhar biriktirme (CVD), plazma sprey ve iyon biriktirme yöntemleridir. (Fichtl 1981, Sinha 1991)

1.2.7.1 Kutu Borlama

Kutu borlama, borlanacak malzeme bor verici ortam olarak tanımlanan bir toz karışımı içinde belirli sıcaklık ve sürelerde beklemesi suretiye gerçekleşir. Borlanacak malzeme, çevresi yeterli miktarda (yaklaşık 10-20mm) olacak şekilde bor verici ortamın içine gömülür ve üst bölüme (pota ağzı ile bor verici ortam arasına) SiC ya da türevleri olan dolgu malzemesi (yaklaşık 100 mm) eklenir ve pota kapağı, havanın işlem ortamına girmesi engellenecek şekilde kapatılır. Kutu borlama işleminde çeşitli bor bileşenleri kullanılmaktadır. Toz karışımlarını oluşturan ve kutu borlama işleminde kullanılan bileşenler; aktivatörler, akışkanlar ve katı bor kaynaklarıdır (Matuschka 1980, Fichtl 1981, Özbek 2000). Bu toz karışımları genellikle ticari uygulamalarda kutu borlama işlemlerinde kullanılmak üzere tercih edilmektedir. Sementasyona benzeyen bu yöntem; ekonomik olarak ucuzluk, gereken cihazın ve donanımların basitliği, fazda mevcut bileşenlerin değişikliğe uğramaması, toz bileşiminin kolayca değiştirilebilmesi ve işlem kolaylığı gibi faktörlerle geniş uygulama alanlarına sahiptir. Potanın işlem esnasında kalkmalara, çatlaklara ve yüksek iç gerilmelere neden olmaması ve yeniden toz ilavesiyle (%20-50) borlama işlemine devam edebilmesi bakımından fırının toplam hacmi %60 geçmemelidir. Pota malzemesi olarak alümina, paslanmaz çelik veya alaşımsız çelikler kullanılabilmektedir. Fırın içinde homojen olarak ısı dağılımı sağlamak adına borlama işlemine tabi tutulacak parçalar fırına uygun bir şekillere sahip olmalı ve fırının içine parçalar yerleştirilirken bu durumlar dikkate alınmalıdır (Matuschka 1980, Özbek 2000).

Tipik ticari borlama toz karışımlarının bileşimleri (% ağırlıkça)

- %5 B_4C, %90 SiC, %5 KBF_4
- %50 B_4C, %45 SiC, %5 KBF_4
- %85 B_4C, %15 $Na_2B_4O_7$
- %95 B_4C, %5 $Na_2B_4O_7$
- %84 B_4C, %16 $Na_2B_4O_7$
- Amorf bor (%95-97)
- %(40-80) B_4C + %(20-60) Fe_2O_3
- %60 B_4C + %5 B_2O_3 + %5NaF + %30 Demir oksit
- %50 Amorf bor + %1 $NH_4HF.HF$+%49Al_2O_3
- %100 B_4C
- %20 B_4C + %5 KBF_4 + %75 Grafit
- %95 Amorf bor, %5 KBF_4

Amorf bor, ferrobor ve bor karbür (B_4C) yaygın olarak kullanılan bor kaynaklarıdır. Amorfbor ve ferrobor kalın borür tabakası oluştururlar ve çok iyi bor kaynaklarıdır. Akışkan olarak Al_2O_3 ve SiC, aktivatör olarak ise Na_2Co_3, KBF_4, $NaBF_4$, BaF_2, $Na_2B_4O_7$, NH_4Cl, Na_2Co_3 ve $(NH_4)_3BF_4$ kullanılmaktadır. Borlama işlemi, hem uygun bir toz karışımlarıyla, hem de çeşitli ticari toz karışımlarıyla da yapılabilmektedir (Fichtl 1981, Sinha 1991).

1.2.7.2 Sıvı Borlama

Sıvı borlama yönteminde bor verici ortam sıvı haldedir ve banyo şeklindedir. Bu işlemin uygulandığı sıcaklık 670 °C ile 1000 °C sıcaklıkları aralığındadır. Elektrolitik sıvı borlama ve elektrolizle sıvı borlama olarak iki şekilde uygulanır. Demir esaslı malzemelerin elektrolitik sıvı borlanması boraks esaslı eriyiklerin üzerine %30 oranında B_4C eklenmesi suretiyle 900-950 °C sıcaklık aralıklarında gerçekleşir.

Elektrolitik borlamanın dezavantajları:

- İşlem sonucunda reaksiyona girmemiş borun ve parça yüzeyindeki tuz kalıntılarının parça yüzeyinden uzaklaştırılması gerekir. Bu işlem para ve zaman kaydına yol açar.
- Borlama işleminde viskozitenin artmaması için ortama tuz ilavesi yapılır ve bu da maliyeti arttırır.
- Fırınların korozif ortamlara dirençli olması gerekir.

Nikel esaslı alaşımlar %75 oranında KBF_4 ve %25 oranında KF sonucu oluşan tuz banyosuyla 850 ^oC sıcaklığın üstündeki uygulamalarda istenilen bor tabaka kalınlığı elde edilebilir.

Demir esaslı alaşımlarda ise %55 boraks, %45 B_4C karışımı, 1:1 oranında $BaCl_2$:NaCl kullanımıyla yüksek sıcaklıklarda çok yüksek tabaka kalınları elde edilebilir. Bu işlem Sodyum sülfat (Na_2SO_4), borik asit, ferro-silis, boraks esaslı tuz banyolarında gerçekleştirilebilmektedir (Samsanov vd. 1966, Bozkurt 1984, Bindal 1991, Sinha 1991, Özsoy ve Yaman 1993)

Elektrolizle borlama işlemi tuz banyosunda gerçekleştirilir. Demir esaslı altlık malzeme katot, grafit elektrot ise anot olarak ve elektrolit olarak boraks ($Na_2B_4O_7$) kullanılır. Bu işlem 900-950 °C sıcaklıkta, 4-6 saat süresince 0,15-0,2 A/cm^2 akımda gerçekleştirilir (Samsanov vd. 1966, Sinha 1991, Özsoy ve Yaman 1993). Homojen bir kaplama tabakası elde etmek için işlem sırasında parça döndürülür. Çok kısa sürelerde yüksek akım yoğunluğu kullanarak düşük alaşımlı çeliklerde ince tabakalar elde edilebilir. Alaşımlı çeliklerin daha kalın tabakalara sahip olması için uzun sürelerde düşük akım yoğunluğu kullanılır (Sinha 1991). Borür tabaka kalınlığındaki artış borlama süresinin, borlama sıcaklığının ve akım yoğunluğunun artışıyla meydana gelir. Tabakanın yapısal karakteri borlama sıcaklığı, akım yoğunluğu ve borlama süresinden etkilenmez (Samsanov vd. 1966).

1.2.7.3 Gaz Borlama

Gaz borlama işleminde bor taşıyabilen gazlar kullanılır. Bu gazlar bor hidrürler ve bor halojenlerdir. Borlayıcı ortam olarak en çok:

- $(CH_3)_3B$ ve $(C_2H_5)_3B$ gibi organik bor bileşikleri,
- Borhalid-H_2 veya %75 N_2, %25 H_2 gazları karışımı,
- Diboran (B_2H_6)-H_2 karışımı kullanılır.

Gaz borlama işlemi basit bir işlem olsa da kompleks ekipmanlar gerektirir. Diboran oldukça pahalı ve zehirli bir borlayıcıdır (Sinha 1991). Patlayıcı ve zehirli olan Diboran-H_2 karışımı ticari olarak kullanılmamaktadır. Organik bor bileşiklerinin kullanılmasıyla borür ve karbür bileşikleri oluşur. Gaz borlama işlemi için en çok tercih edilen borlayıcı BCl_3'dür. İşlem 700-950 °C sıcaklık aralığında 67 KPa (0,67 bar) basınç altında 1:15 BCl_3:H_2 gaz ortamında gerçekleşir. H_2 yerine 75:25 oranında N_2:H_2 kullanımının tabaka kalitesinin artmasına ve FeB fazının azalmasına neden olur (Hegewaldt vd. 1984).

1.2.7.4 Pasta Borlama

Kutu borlamaya nazaran pasta borlama işlemi basit ucuz ve zamandan tasarruf edilmek istendiği durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Pastalar ile yapılan kısmi borlamalar son dönemlerde yaygınlaşmıştır. Borlama pastası ile kitlesel (toplu olarak) üretilmiş veya karmaşık şekle sahip parçalar kısmen veya tamamen seri bir şekilde borlanabilir. Bu süreçte geleneksel borlama toz karışımı B_4C+SiC+KBF_4 veya %55 kriyolit (fluks ilaveli Na_3AlF_6) ve %45 oranında B_4C (200-400 mesh tane boyutu) iyi bir bağlayıcı ajan ile (hidrolize edilmiş etil slikati, bütik, metil selülozun sulu çözeltisi veya asetatta çözünmüş nitroselüloz) püskürtülerek 1 ila 2 mm kalınlığında kaplama tabakası oluşturulmakta ve kurutulmaktadır. İşlem, demir esaslı malzemelere geleneksel fırınlarda 800-1000 °C sıcaklık aralıklarında, 5 saat süresince koruyucu atmosfer altında (N_2, NH_3 veya Argon) uygulanmaktadır. Bu işlemde gazın özellikleri, borlayıcı ürünün davranışını büyük oranda etkiler. Argon en iyi sonucu veriyor olsa da NH_3'de yerine kullanılabilir. Pasta borlama işlemi parça üzerinde seçilen belirli alanların veya büyük parçaların borlanması için oldukça elverişli bir işlemdir.

1.2.7.5 Plazma Borlama

Plazma, maddenin dördüncü hali olup enerji yüklemeleriyle iyonlaşan gaz ortamı plazma fazını oluşturur. Katı maddenin enerji ile yüklenmesiyle sıvı hal, sıvı halin de enerji ile yüklenmesiyle gaz ve gaz halinin de enerji ile yüklenmesiyle madde plazma haline erişir (Barış, 2007). Plazma içerisinde elektron; molekül, nötral atom ve uyarılmış atom, foron veya iyon içeren karışıma sahiptir. Uygulama esnasında ısı enerjisinin elektriksel boşalma veya ışınla verilmesiyle plazma elde edilir. En yaygın plazma oluşturma yöntemi elektriksel boşalmadır (Karakan vd. 2002, Uluköy 2005).

Bu yöntemle borlamada BCl_3, B_2H_6, BF_3 ve TEB gibi bor bileşikleri ve redükleyici olarak argon veya H_2 kullanılır. 800–1000 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10^{-2} Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır (Hunger ve Lobig, 1997; Uluköy 2005). Plazma borlama yönteminin diğer borlama yöntemlerine nazaran tercih edilmesinin nedeni çevreyi daha az kirletmesidir (Bayca ve Şahin 2004, Uluköy 2005).

Plazma borlamanın avantajları düşük işlem sıcaklığı, düşük çarpılma ve yüksek enerji verimliliğidir (Uzun 2002). Diğer yöntemlerde (katı, sıvı, gaz) tabakanın homojenliği ve tabakanın kalınlığı kontrol edilemezken, plazma borlamada kontrol edilebilirdir. Ayrıca karmaşık parçalarda homojen sertlik, homojen difüzyon tabakası ve yüzeyde tek fazlı Fe_2B tabakası elde edilebilmesidir (Barış 2007).

Plazma borlamanın dezavantajları ise plazma borlama yönteminde kullanılan BCl_3 ve B_2H_6 gazlarının patlayıcı, zehirli ve pahalı olmasının yanı sıra korozyona sebebiyet vermesidir (Barış 2007).

1.2.7.6 Plazma Pasta Borlama

Gaz ortamında ya da tuz banyosunda borlamanın neden olduğu bir takım olumsuz nedenlerden ötürü (patlayıcı ve zehirli olma özelliği, çevre kirliliği gibi) değiştirilmiş, yenilenmiş borlama işlemleri geliştirilmektedir. Bu işlemlerde biri de plazma borlama işlemidir. Alışılmış borlama işlemlerine göre birçok avantaja sahiptir: İşlem sıcaklığının düşük olmasından dolayı yüksek enerji verimliliği, parçada meydana gelebilecek çarpılmaların en aza indirgenebilmesi, yüksek sıcaklık ekipmanlarını ve yüksek sıcaklık fırınlarını gerektirmemesi, kalın bor tabakası ve kontrol edilebilir kimyasal kompozisyona sahip olması bu avantajlardandır. Fakat bu yöntemde de bazı sınırlamalar mevcuttur. Bor verici kaynak olarak son derece patlayıcı, zehirli ve pahalı olan B_2H_6 ve BCl_3 gazları kullanılır. BCl_3'ün vakum odasında oluşturduğu korozyon problemini önlemek için plazma pasta borlama işlemi geliştirilmiştir. Pasta, amorf bor ve boraks ile hazırlanır. Pasta karışımından plazma yöntemiyle elde edilen aktifleşmiş bor, demirin içerisine doğru yayınır (Sinha 1991, Yoon vd. 1999).

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

Ueda vd. (2000) tarafından yapılan çalışmada saf nikel malzemesi ticari silisyum içermeyen EkaborNi tozu ile 700 °C ve 900 °C sıcaklıklarda 2 saat süresince kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan XRD analizi sonucunda Ni_2B fazının varlığı ortaya konmuştur. 1,96 N yük ile Kayma hızı 20 mm/dakika, kayma strok mesafesi 5 mm ve kayma mesafesi uzunluğu 2 saat olarak ball-on-flat aşınma testi yapılmıştır. 0,098 N yük ile Knoop sertlik testi yapılmıştır. 0,49 N yük altında dakikada sıcaklığın 20 K arttırıldığı vakum ortamında Vickers mikrosertlik testi yapılmıştır. Yapılan mikrosertlik deneyleri sonucunda bor tabakasının 1300 HK sertliğe sahip olduğu bulunmuştur. Borlanmış numunenin 800° K sıcaklıkta olduğu esnada ölçülen Vickers mikrosertlik değeri 600 HV olduğunda, sıcaklığın artmasıyla azalan sertlik değerinin azalmasında azalmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu sıcaklık, kaplanmamış numunenin sertliğini koruyabildiği maksimum sıcaklıktır.
Bu çalışma sonucunda;

- Bor tozuyla saf nikele uygulanan borlama işlemi sonucunda silisyum içeriksiz toz kullanılmasıyla nikel silisid oluşumunun engellenerek kalın borür tabakasının oluşumunun mümkün olduğu, borür tabakasının Ni_2B fazı içerdiği ve Knoop sertliğinin 1300 HK olduğu,
- Borlanmış nikelin yüksek-sıcaklık sertliğinin işlem görmemiş nikelden daha yüksek olduğu,
- Borlama işleminin sürtünme ve aşınma özelliklerini arttırdığı ortaya konmuştur.

Houghton vd. (2011) tarafından yapılan çalışmada Inconel 718, Incoloy 945 ve Incoloy 945X alaşımlarının işlem görmemiş, Armoloy ile kaplanmış ve plazma nirtürlenmiş olarak kuru kayma koşullarında ki karakteristiği incelenmiştir. Incoloy 945 ve Incoloy 945X'e göre en iyi aşınma ve sürtünme davranışı sergileyen süper alaşım Inconel 718'dir. Bu çalışmada Armoloy kaplamanın adhesiv aşınmasına karşı en iyi çözüm olduğu ortaya konmuştur.

Günen vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada Inconel 625 süper alaşımına borotitanyumlama işlemi uygulanmıştır ve aşınma davranışı incelenmiştir. Numuneler 800, 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerinde %90 Nanobor ve %10 KBF_4 toz karışımıyla kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur. Ardından borlanan her numuneye %45 Ferro-Ti, %45 Al_2O_3 ve %10 NH_4Cl tozu karışımıyla 1000 °C sıcaklıkta 2 saat süresince kutu titanyumlama işlemi uygulanmıştır. XRD analizi ile TiB_2, CrB, NiB, MoB_2, Ni_3B_4, Fe_2B, $Fe_xNi_{23-x}B_6$ fazları tespit edilmiştir.

- Kaplama sıcaklığının ve süresinin artması tabaka kalınlıklarının da artışına sebebiyet vermiştir. Kaplama kalınlıkları 15 µm ile 165,2 µm olarak ölçülmüştür. Kaplama üzerinde 4 farklı bölge tespit edilmiştir;
  1. Titanyumca zengin bor tabakası,
  2. Krom, nikel, demir ve molibden bor içeren çoklu faz borür tabakası,
  3. Difüzyon bölgesi
  4. Altlık malzeme.
- Çalışmada serbest top mikro abrasyon aşınma testi uygulanmıştır. Dönme hızı 90 rpm ve uygulanan yük 5, 7,5 ve 10N olarak seçilerek 3 dakika süresince free-ball aşınma testi uygulanmıştır. Aşınma deneyleri, kaplama sıcaklığı ve süresi artışının kaplanmamış malzemeye oranla 2,5 ile 4 kat arası hacim kaybında azalma meydana getirdiğini ve artan tabaka kalınlığının sertlik değerlerini arttırdığı ve aşınma direncini iyileştirdiğini ortaya koymuştur.
- 5 (TiB bölgesi) ve 25 (çoklu faz borür bölgesi) g yükler ile 15 saniye süresince Vickers mikrosertlik deneyi uygulanmıştır. TiB_2 tabakası sertlik değerleri 2513-3354 HV arasında değişirken TiB2 tabakası altında ki bölgede 2003-2714 HV arasında değişen sertlik değerleri ölçülmüştür.

Mu vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada %99,9 oranında saf nikel, %8 oranında B_4C, %4 oranında KBF_4 ve %88 oranında SiC içeren LSB-II tozuyla 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2,4,6 ve 8 saat süresince kutu borlanmıştır. İşlem sonrası XRD analizinde Ni_3Si, Ni_5Si_2, Ni_2Si, Ni_2B fazları tespit edilmiştir. Borlanmış saf nikelin SEM analizi sonucu, altlık malzeme yüzeyinde oluşan Silisid'in eşit granüler bir morfolojiye sahip olduğunu ve nikel altlık malzeme üzerinde oluşan bor tabakasının iğne şeklinde bir yapıya

sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca bor kalınlığının sıcaklık ve sürenin artmasıyla 36 µm'den 237 µm'ye arttığı bulunmuştur. Silisid ve bor tabakalarına mikrosertlik deneyi yapılmıştır. Silisid tabakasının 832 HV, bor tabakasının 984 HV sertliğe sahip olduğu bulunmuştur. Bor tabakasının silisid tabakasından daha sert olduğu, tabaka kalınlığının işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olduğu ortaya konmuştur.

Karabulut vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada Inconel 718'in eklemeli imalat yöntemiyle üretilip, numuneler 600 °C 2 Saat (HT_1) ve 1100 °C 2 saat (HT_2) sürelerince ısıtılıp havayla soğutulması suretiyle ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işleme uygulanan numunelerin mikroyapı, mikrosertlik ve aşınma dirençleri dövme ile üretilen malzemeye göre kıyaslanmıştır. Dövülen malzeme 323 HV sertlik değerine sahipken HT_1 342 HV ve HT_2 268 HV sertlik değerlerine sahip olmuştur. Dövülen malzemenin aşınma derinliği 23 µm olarak ölçülürken HT_1 22 µm ve HT_2 ise 29 µm olarak ölçülmüştür. Bu çalışma sonucunda elde edilen veriler gösteriyor ki Inconel 718'in mikrosertliği ısıl işlem ile artırılabilir ya da azaltılabilir. Yüksek sıcaklıklarda uygulanan ısıl işlem; sertliği azalttığı için aşınma direncini de azaltmıştır. Aşınma; numuneye uygulanan sıcaklık parametresine değil elde edilen sertliğe bağlıdır.

Campos-Silva vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada Inconel 718 malzemesi 900 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerince kutu borlanmıştır. Yüzeyde Ni_2Si tabakasının oluşumunu önlemek adına %90 oranında B_4C, %10 oranında KBF_4 toz karışımı kullanılmıştır. Nano indentasyon testi, 50 mN yükün kesiti alınan numune yüzeyinden 5 µm sabit uzaklıkta kalması suretiyle yapılmıştır. Çizik testi için; kısmi yük aralığı 1-80, hız oranı 1 (mm/dk), yük oranı 11,29(N/dk) ve çizik uzunluğu 7 mm olarak belirlenmiştir. XRD taraması sonucunda 900 °C'de 6 saat süresince kutu borlanmış numunede Ni_4B_3, Ni_2B, Ni_3B, Cr_2B fazları tespit edilmiştir. Bu testlerle düşük yükler sonucunda oluşan çiziklerin borlanmış yüzeyin dış bölgesindeki yüksek çekme gerilmeleriyle tabakanın bozulmaya başladığını ve Hertzian çatlaklarının tabakayı kohezif olarak çökerttiği ortaya konmuştur. Ayrıca Nikel borür tabakasının iç bölgelerinde kompresif artık gerilmelerin ters etki oluşturarak 900 °C'de 6 saat süresince borlanan numunede kritik yükü 76N'a yükseltmiştir. Tüm numunelerde çizik yükü artarken ufalanma ve pul pul dökülme gibi adhesiv kayıpların katman delaminasyonunun meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Günen (2020) tarafından yapılan çalışmada Inconel 718 malzemesine 850 °C, 950 °C ve 1050 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerinde %90 B_4C ve %10 KBF_4 toz karışımı sonucu oluşturulan bor verici ortamda kutu borlama işlemi yapılmış, 25 °C, 400 °C ve 750°C sıcaklıklarda kuru kayma testi yapılmıştır. Kaplama işlemi esnasında oksidasyonun engellenmesi amacıyla 2 cm kalınlığında olacak şekilde Al_2O_3 tozu karışımın en üst kısmına eklenmiştir. Numuneler işlem sonrası 70 mL H_3PO_4 ve 30mL su karışımında 60 saniye süresince 5V gerilim ile elektro dağlama işlemi uygulanmıştır. Mikrosertlik deneyleri ise 15 saniye süresince 100 gram yük olmak üzere uygulanmıştır. Aşınma 5N yükte, 0,6 m/s kayma hızıyla 30 dakika boyunca uygulanmıştır. Bu parametrelerin sonucunda;

- Silisid içermeyen bor tabakalarının oluşturulduğu,
- Borlama süresinin ve sıcaklığının artması; tabaka kalınlığını, sertliği ve yüzey pürüzlülüğünü artırdığı,
- XRD sonucunda Ni_3B_4 ve Cr_2B'nin yüksek oranlarda, Cr_3Ni_2, Cr_2B_3, FeB ve Fe_2B'nin düşük oranlarda oluştuğu,
- Sürtünme katsayısında artışın gözlemlendiği,
- Tüm numunelerin üstün aşınma direnci sergilediği,
- En etkili aşınma mekanizmasının; sıcaklık parametrelerinden bağımsız olarak mikroçatlaklar ve pul pul dökülmelerden dolayı oksidasyon tipi aşınma olarak belirlendiği,
- Aşındırıcı topun 25 °C ve 250 °C sıcaklıkta aşınma kaybına uğramadığı, ancak 750 °C sıcaklıkta kopan kaplamaların sıcaklık etkisiyle aşındırıcı topa yapışmasına bağlı olarak aşınma topunun ağırlığında artışın meydana geldiği ,
- Borlanmış numunenin 750 °C sıcaklığa 5N yükte 1800 metre mesafeye kadar dayanabildiği ortaya konmuştur.

Makuch vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada Nickel 201, Inconel 600 ve Nimonic 80A süperalaşımlarının üzerine $Na_2B_4O_7$ boraks tozunun etil alkol karışımı sonucu oluşan pasta sürülmüştür ve oda sıcaklığında 24 saat süresince pastanın kuruması sağlanmıştır. Numunelere 800 °C sıcaklıkta 3 saat süresince plazma pasta borlama işlemi uygulanmıştır. Kaplanan numunelere XRD analizi yapılmış ve sonuca göre Nickel 201

alaşımında Ni_2B ve Ni_4B_3 fazları, Inconel 600 alaşımında Ni_3B, Ni_2B, Ni_4B_3, CrB ve Cr_2B fazları, Nimonic 80A alaşımında Ni_3B, CrB, Ni_4B_3, Cr_2B fazları tespit edilmiştir. Kaplama tabaka kalınlıkları Nickel 201 alaşımı için 54,24 ± 3,07, Inconel 600 alaşımı için 44,41 ± 2,24 ve Nimonic 80A alaşımı için 41,31 ± 1,56 µm olarak bulunmuştur. Numunelere 50 mN yük altında nano indentasyon testi uygulanmıştır ve Nickel 201 alaşımında en yüksek sertlik değeri olarak 1900,8 HV, Inconel 600 alaşımında 2028,0 HV ve Nimonic 80A alaşımında 2115,9 HV değerine ulaşılmıştır. Altlık malzemede bulunan Krom içeriğinin malzeme karakterizasyona etkisi incelenmiştir. Altlık malzemede bulunan krom içeriği bor tabakasında elastisite modülünün ve sertliğin artmasına neden olmuştur. Ancak krom içeriği kırılma tokluğunu değerlerinde düşüşe neden olduğu bildirilmiştir.

Zafar vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada Inconel 718 koruyucu kılıfının abrasiv aşınma davranışı incelenmiştir. SS-304 Çeliği üzerine 1mm kalınlığında serpilen Inconel 718 tozlarının mikrodalga aplikatörüyle altlık malzeme üzerinde Inconel 718 koruyucu tabakası oluşturulması sonucu altlık malzemeye tutunan koruyucu Inconel 718 tabakasının mikrosertliğinde 316±14 HV'den 564±22 HV'ye bir artış olduğu ve aşınma direncinde iyileşmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda Inconel 718 koruyucu tabakasında aşınma sonucu oluşan ağırlık kaybı %70 oranında azaltılmıştır.

Özbek vd. (1999) tarafından yapılan çalışmada %99,5 oranında saf nikel malzemesi %90 oranında SiC, %5 oranında B_4C ve %5 oranında KBF_4 içeren Ekabor II tozu kullanılarak 950 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 8 saat süresince kutu borlanmıştır. Mikroyapı, SEM ile incelenmiştir, yüzeyde Silisid'in eşit granüler bir morfolojiye sahip olduğunu ve nikel altlık malzeme üzerinde oluşan bor tabakasının iğne şeklinde olduğu bulunmuştur. XRD analizi sonucu yüzeyde Ni, Ni_5Si_2 ve Ni_2B fazları tespit edilmiştir. Borlama işlemi sonucu 123 ile 281 µm aralığında tabaka kalınlığı elde edilmiştir. Mikro sertlik değeri 100 HV olan altlık malzemenin işlem sonucunda ki mikro sertliğin 747 ile 805 HV aralığında olduğu bulunmuştur.

Dinç vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada Inconel 718 malzemesi Ekabor 2 kullanılarak 900 °C sıcaklıkta 2,4,8 ve 12 saat süresinde borlanmıştır. XRD analizi

sonucunda tabakada Ni_2Si, Ni_4B_3 ve FeB fazları tespit edilmiştir. Mikro sertliğin ve buna bağlı olarak aşınma direncinin 8 saate kadar borlanmış numunelerde arttığı, 12 saat süresince borlanmış numunede ise azaldığı tespit edilmiştir.

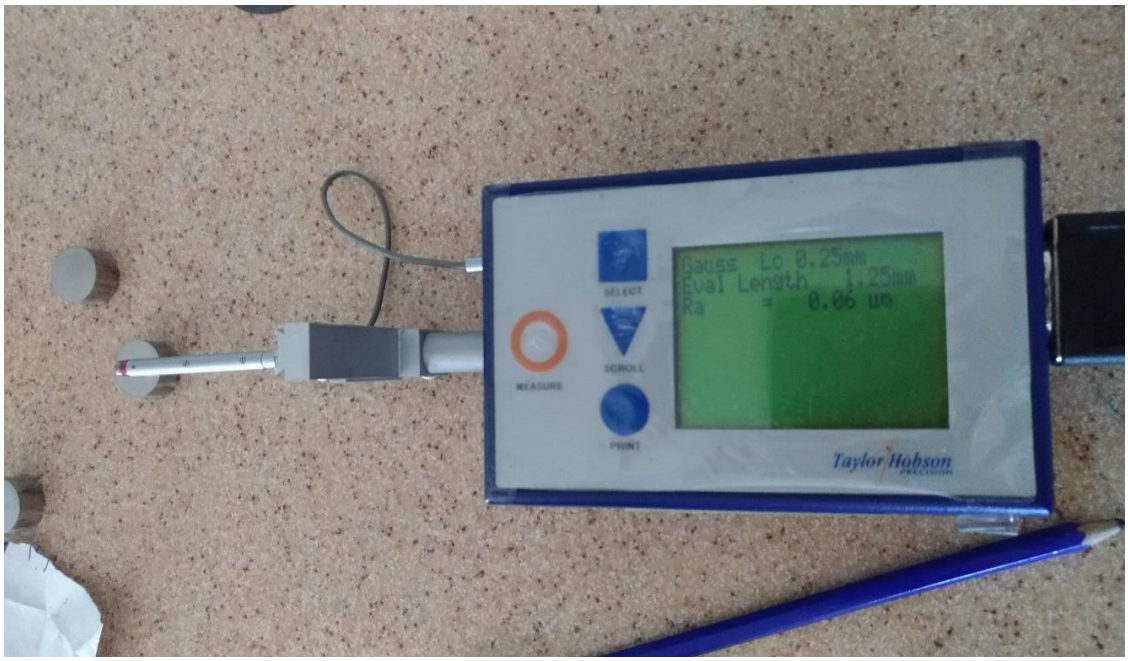
Güneş vd. (2015) tarafından yapılan çalışmada %99,0 saflıkta Nikel 201 süperalaşımı 850, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat sürelerinde B_4C ve KBF_4 bor verici ortamında kutu borlanmıştır. XRD taraması sonucu NiB, Ni_2B, Ni_3B, Ni_4B_3 fazları tespit edilmiştir. 39,62 (850 °C 2 saat) ile 312,58 (950 °C 6 saat) µm aralığında tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. Mikrosertlik değeri işlem görmemiş malzemede 186 $HV_{0,05}$ ölçülürken borlanmış numunede 1642 (850 °C 2 saat) -1854 (950 °C 6 saat) $HV_{0,05}$ sertlik değerleri ölçülmüştür. Bor aktivasyon enerjisi 20387 kJ mol^{-1} olarak bulunmuştur.

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Numune Hazırlama

Bu çalışmada Birçelik tarafından temin edilen 500 mm uzunluğunda 20 mm çapında Inconel 718 süper kullanılmıştır.

Numune kalınlığı 12 mm olacak şekilde Metkon MetaCut-M 250 Cut-off Machine marka kesme diski cihazı ile kesilmiştir. Kesilen yüzeylerin paralelliğin sağlanması için numunenin iki yüzeyi de torna tezgâhıyla alın tornalama işlemine tabi tutulmuştur. Hazırlanan numuneler kabadan inceye doğru 120-240-400-600-800'lük zımparalarla kademeli bir şekilde Metkon Forcipol 2V Grinder-Polisher markalı parlatma cihazı kullanılarak metalografik olarak zımparalanmıştır. Parlatılmış yüzeylerin pürüzlülük değerlerini belirlemek amacıyla Şekil 3.1'de gösterilen Taylor Hobson marka yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır ve Ra değeri 0,06 olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.1 Yüzey pürüzlülük cihazı.

3.2 Kutu Borlama ve Plazma Pasta Borlama İşlemleri

KB ve PPB işlemleri için Afyon Kocatepe Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarları kullanılmıştır.

3.2.1 Kutu Borlama İşlemi

Potalar içerisine dökülen Ekabor 2 tozunun içine numuneler gömüldükten sonra işlem sırasında iç kısma hava girişini engellemek adına üst yüzeye Ekrit tozu dökülmüş ve potanın kapağı kapatılarak şamot çamuru ile sıvanmıştır. Üç pota olmak suretiyle potalar kamara tip fırının içine yerleştirilmiş ve ısıtma işlemi başlatılmıştır. İşlem 850 °C, 900 °C ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 6 saat fırın içerisinde kalmak ve sonrasında havada soğutmak suretiyle numuneler KB işlemine tabi tutulmuştur.

Fırın içindeki sıcaklık istenilen değere ulaştıktan sonra borlama işlemi için gereken süre tutulmuştur. Fırından çıkan potalar Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



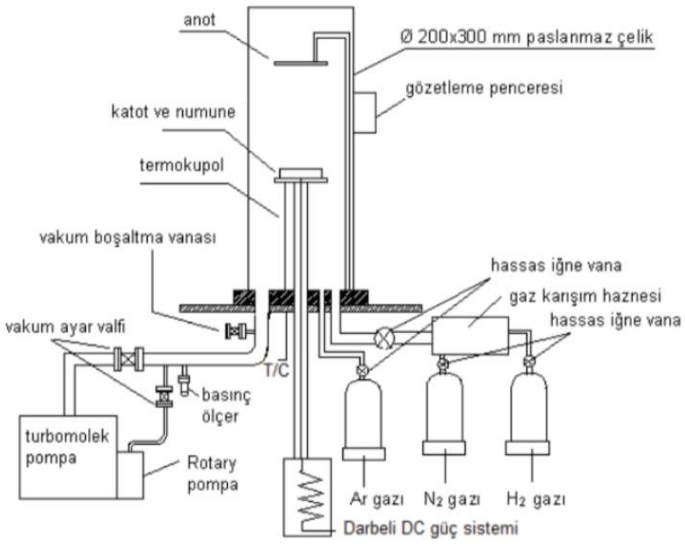
Şekil 3.2 Fırından çıkartılan potalar.

3.2.2 Plazma Pasta Borlama İşlemi

Plazma pasta borlama (PPB) işlemi Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan plazma nitrürleme cihazı kullanılarak yapılmıştır. 700 °C ve 750 °C sıcaklıklarda 2 ve 4 saat sürelerince %100 susuz boraks pasta ile uygulanmıştır. PPB işlemlerinin gerçekleştirildiği plazma ünitesi Şekil 3.3'de, şematik görünümü ise Şekil 3.4'de verilmiştir.

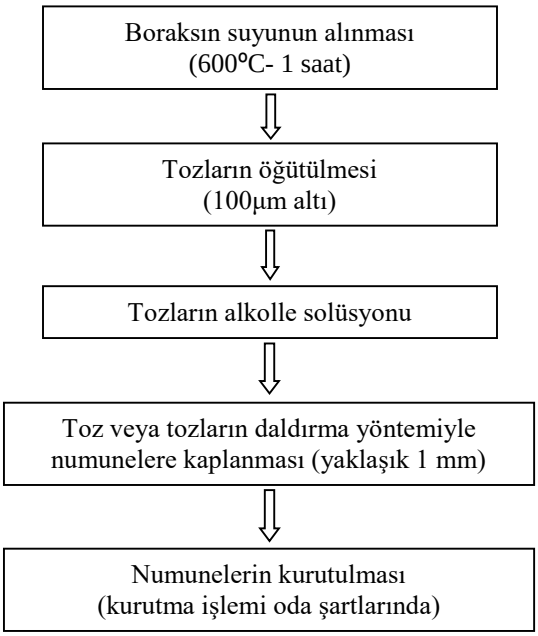


Şekil 3.3 PPB cihazı.



Şekil 3.4 PPB cihazı şematik gösterimi.

Boraks'ın kalsinasyon işlemi ve pasta haline getirilinceye kadar geçen sürecin işlem akış şeması Şekil 3.5'de görülmektedir.



Şekil 3.5 Boraks'ın kalsinasyon işleminin akış şeması.

Numune üzerindeki pastaların görünümü Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 Numuneler üzerindeki pastanın görünümü.

PPB işlemi aşağıdaki adımlarla gerçekleştirilmiştir:

- Hazırlanan numuneleri katot üzerine yerleştirdikten sonra plazma haznesi kapatılmıştır.
- Vakum basıncı $8{,}4x10^{-2}$ mbar vakuma getirilmiştir.
- PPB işlemine geçmeden önce 5 mbar gaz basıncında yaklaşık 500V gerilim altında ve 20 dakika süreyle H_2 gazı ile ön saçılma yapılmıştır.
- Deney planında belirlenen oranda (%70 N_2 - %30 H_2) gaz karışımı ortama verilmiştir.
- Ortam basıncı 5 mbar'a sabitlenmiştir.
- Uygulanan gerilim artırılarak deney planındaki sıcaklığa (700, 750 °C) ulaşıncaya kadar numuneler ısıtılmıştır. Katot üzerine yerleştirilen numuneler arasındaki simetri nedeniyle ortadaki bir numuneden alınan sıcaklık değeri bütün numuneler için aynı kabul edilmiştir. Sıcaklık ölçümü için mineral izoleli K tipi temokupl kullanılmıştır.
- Belirlenen sıcaklığa ulaşır ulaşmaz PPB işlem zamanı başlatılmıştır. (2 ve 4 saat)
- İşlem sonunda numunelerin oksitlenmemesi için vakum pompasının çalıştırılması ve gaz gönderimi devam ettirilmiş, numuneler oda sıcaklığına kadar soğumaya bırakılmıştır

PPB numunelerin üzerinde kalan tortu atıklarını numuneden uzaklaştırmak, gerçek kaplama yüzeyine erişebilmek, etkili ve gerçekçi ölçümler yapabilmek adına numuneler bazı işlemlerden geçirilir. Öyle ki bu işlemler yüzeyde ki tabakaları uzaklaştırırken kaplamanın kendisine zarar vermemelidir.

PPB numuneler içi saf su dolu beherlerin içerisine yerleştirilmiştir ve Şekil 3.7'de görülen Velp Scientifica markalı cihaz üzerine beherler konularak cihaz 200 °C sıcaklığa ayarlandıktan sonra 15 dakika boyunca kalıntıların çıkarılması sağlanmıştır. Sonrasında KB ve PPB numuneler içi alkol dolu beherlerin içerisine konuşmuş ve Şekil 3.8'de görülen Bandelin Sonorex marka ultrasonik banyo içerisine yerleştirilerek numuneler temizlenmiştir.



Şekil 3.7 Isıtma cihazı.



Şekil 3.8 Ultrasonik banyo.

3.3 Mikroyapı İncelemeleri

3.3.1 Kesit Alma, Bakalitleme ve Parlatma

Borlama işleminden sonra tabaka kalınlığını görüntüleyebilmek için numunenin kesme diski ile kesiti baz alınarak kesilmiştir. Kesiti alınan numunelerin kesitsel paralelliğini sağlamak için numuneler zımparalanmıştır. Numunelerin kesit yüzeyi kalıp içerisinde dış yüzeye temas etmesi suretiyle kalıplara yerleştirilmiştir. Bakalite alma işlemi soğuk kalıplama işlemi ile uygulanmıştır. Bakalit kalıbın içerisinden çıkartılan ve kesiti alınan numuneler sırasıyla 240-400-600-800-1000-1200'lük zımparalar ile metalografik olarak parlatılmıştır. Zımparalanan numuneler, çuhaya 1 μm boyutundaki alümina süspansiyon dökülmesi suretiyle parlatılmıştır.

3.3.2 Dağlama

Dağlama işlemi için 20 ml HCl, 25 ml Deiyonize (saf) su, 1 ml HF, 4 ml H_2O_2 ile hazırlanan dağlayıcı içerisinde 30 saniye süreyle bekletilmiştir.

3.3.3 Mikroyapı Analizleri

Tabaka kalınlıklarını görüntüleyebilmek için kesiti alınan numunelerden Şekil 3.9'da görülen OLYMPUS U-PMTVC markalı Optik Mikroskop kullanılmıştır. Tabakalarının kalınlığı optik mikroskoba bağlı bir aparat yardımıyla ölçülmüştür.



Şekil 3.9 Optik mikroskop.

3.4 XRD Analizleri

Borlanmış yüzeylerdeki mevcut fazların analizi Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (TUAM) bulunan Shimadzu XRD–6000 cihazında CuK_a (l = 1,5418 Å) radyasyonu kullanılarak 2θ 20-100° arasında gerçekleştirilmiştir. 900 °C'de 2, 4, 6 saat KB ve 700 °C'de 2 ve 4 saat PPB numunelere uygulanmıştır.

3.5 Mikrosertlik İncelemeleri

Yüzey sertliğini ölçmek için Kırıkkale Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan Şekil 3.10'da görülen Galileo Durametrio markalı Vickers HV1 OD modelli Vickers mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümler 50 gr yük ve 10 saniye bekletme süresinde uygulanmıştır.



Şekil 3.10 Mikrosertlik cihazı.

Mikrosertlikler 3.1 ve 3.2 numaralı formüller ile hesaplanır.

$$HV = \frac{2P \sin\frac{\alpha}{2}}{d^2} = \frac{1.8544P}{d^2} \quad (3.1)$$

$$d = \frac{d1+d2}{2} \quad (3.2)$$

P= kg cinsinden uygulanan yük,
α= Tepe açısı= 120°,
d=taban köşegen uzunluğudur (mm)

3.6 Aşınma Analizi

Kuru kaymalı aşınma testi için Afyon Kocatepe Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan bilye disk aşınma cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.11'de aşınma işlemi gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Kuru kaymalı aşınma testi.

Aşınma deneyleri için kullanılan parametreler Çizelge 3.1'de verilmiştir .

Çizelge 3.1 Aşınma deneyi parametreleri.

Kayma mesafesi	Yük	İz çapı	Kayma hızı
300 metre	10 N	14 mm	0,3 mm/s

Deney düzeneği içerisinde gömülü yazılım ile sürtünme katsayıları (μ) deney süresince anlık olarak hesaplanmıştır. Aşınma hızı 3.3 numaralı formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Aşınma\ hızı = \frac{Aşınma\ hacmi}{Kayma\ mesafesi \times Uygulanan\ yük} \tag{3.3}$$

Aşınma hacmi denklem 3.4 ve 3.5 ile hesaplanmıştır.

$$Aşınma\ hacmi = Aşınma\ alanı\ \times\ Çevre \tag{3.4}$$

$$Çevre = \pi \times d \tag{3.5}$$

Aşınma alanları Taylor Hobson marka tribometer cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

3.7 SEM ve EDS Analizi

KB ve PPB numunelerin SEM ve EDS analizleri Afyon Kocatepe Üniversitesi bünyesinde bulunan Teknoloji ve Uygulama Araştırma Merkezinde (TUAM) yapılmıştır.

4. BULGULAR

4.1 Mikroyapı İncelemeleri ve Tabaka Kalınlıkları

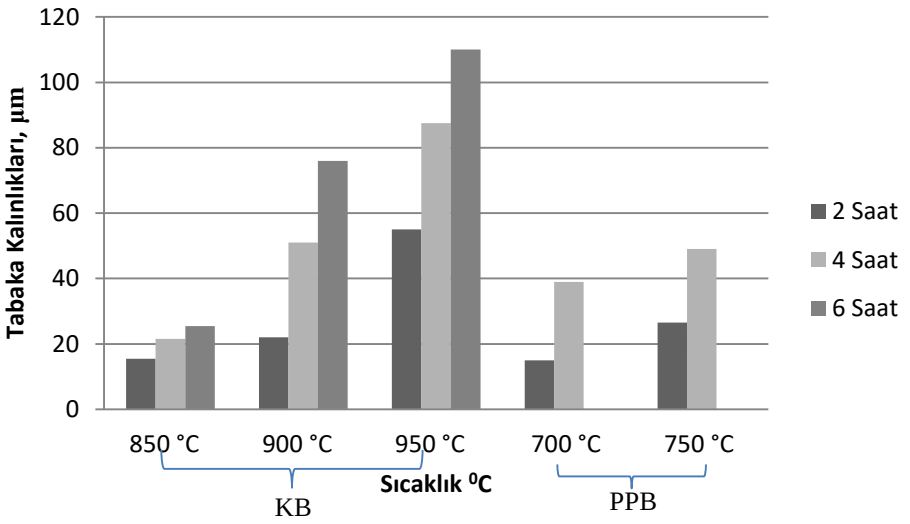
Kesiti alınan numunelerin tabaka kalınlıkları Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: Numunelerin tabaka kalınlıkları.

Sıcaklık/Süre	2 saat	4 saat	6 saat
850 °C	15,5 µm	21,5µm	25,5 µm
900 °C	22 µm	51µm	76 µm
950 °C	55 µm	87,5 µm	110 µm
700 °C	15 µm	39 µm	--/--
750 °C	26,5 µm	49 µm	--/--

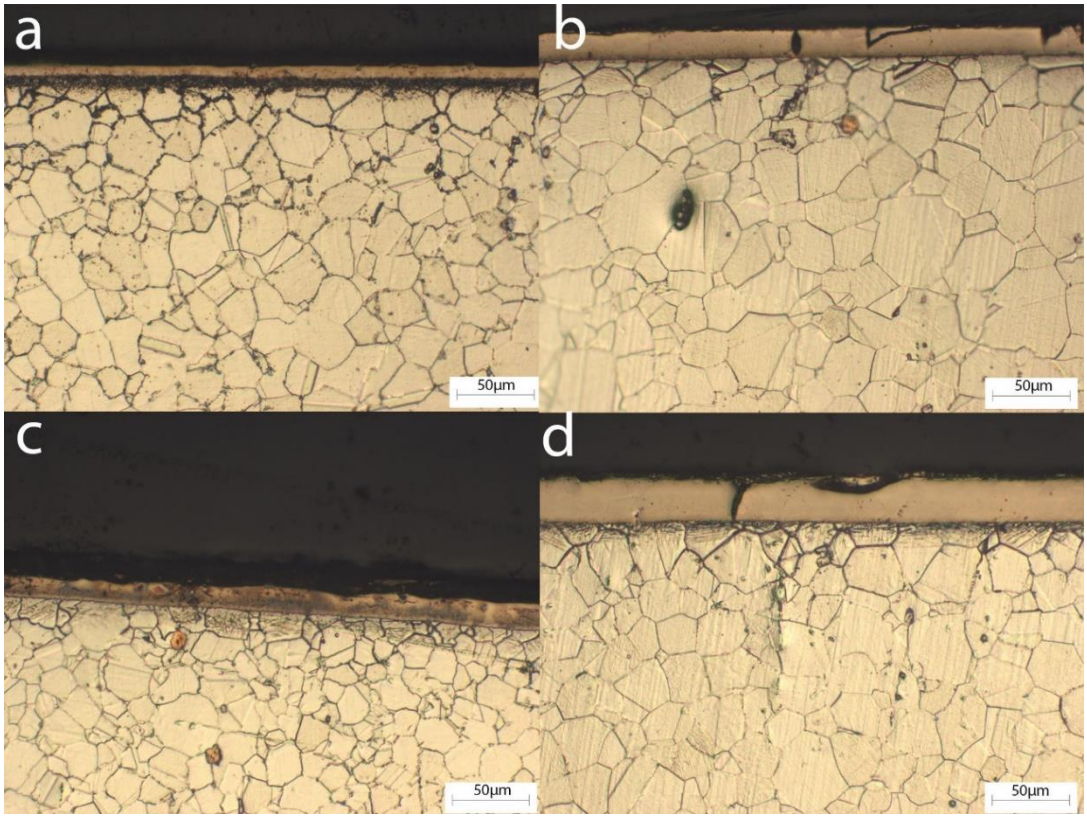
Borlama işlem sıcaklığı ve süresinin artması borür tabaka kalınlığını artırmış olup bu durum literatürde gerçekleştirilmiş çalışmalar ile uyumludur (Ueda vd. 2000, Ülker vd. 2011, Günen vd. 2017, Günen 2020). PPB numunelerin KB numunelere göre daha düşük sıcaklıklarda daha yüksek tabaka kalınlıklarına sahip olduğu ortaya konmuştur (Ülker vd. 2011, Makuch vd. 2019). Aynı sıcaklık farklı sürelerde PPB numunelerin (700 °C 2 saat - 700 °C 4 saat) tabaka kalınlıklarında en yüksek %160 değerinde artış görülürken, KB numunelerde (900°C 2 saat - 900 °C 4 saat) %131,82 oranında bir artış görülmüştür. Ayrıca hem sıcaklık hem süre bakımından PPB işleminde en düşük sıcaklık ve süreden en yüksek sıcaklık ve süreye (700 °C 2 saat - 750 °C 4 saat) %226,7 oranında bir artış görülürken KB işleminde (850 °C 2 saat - 950 °C 6 saat) %609,7 oranında bir artış görülmüştür.

Tabaka kalınlıklarının borlama yöntemleriyle olan ilişkisi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



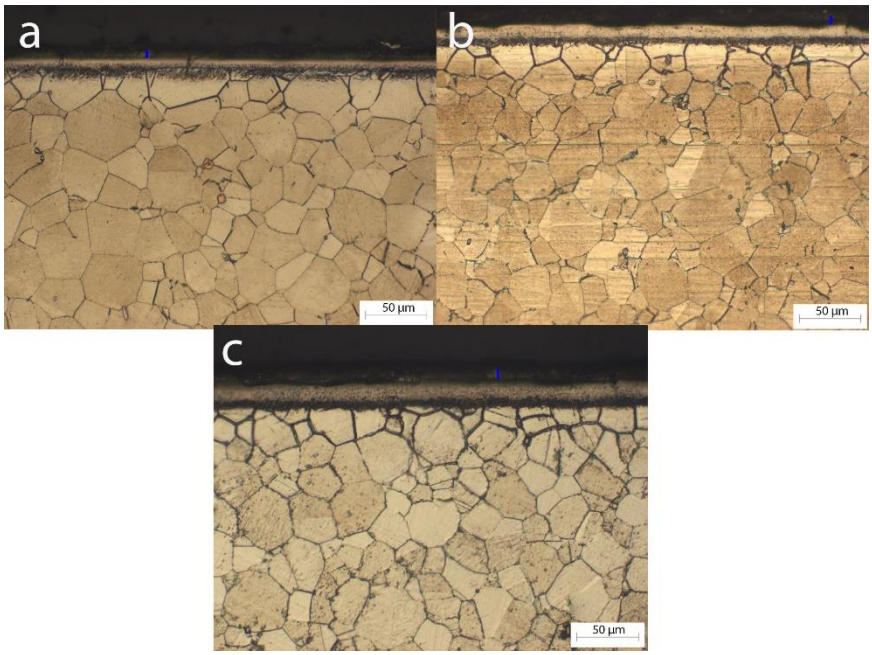
Şekil 4.1 Borlama yöntemlerinden elde edilen tabaka kalınlıklarının kıyaslanması.

PPB numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



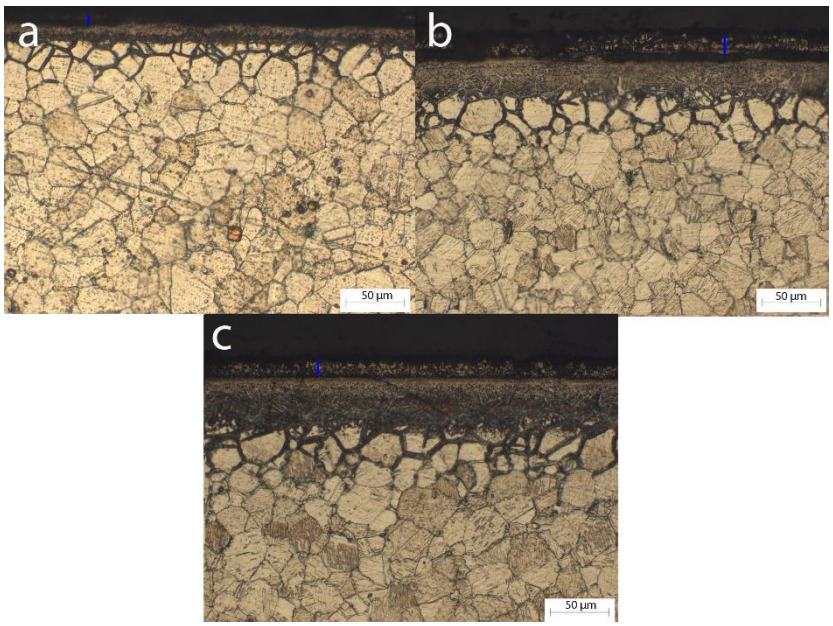
Şekil 4.2 PPB numunelerin 200x ölçeğinde çekilmiş optik mikroskop görüntüleri (a) 700 °C 2 saat, (b) 700 °C 4 saat, (c) 750 °C 2 saat, (d) 750 °C 4 saat.

850°C'de KB numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



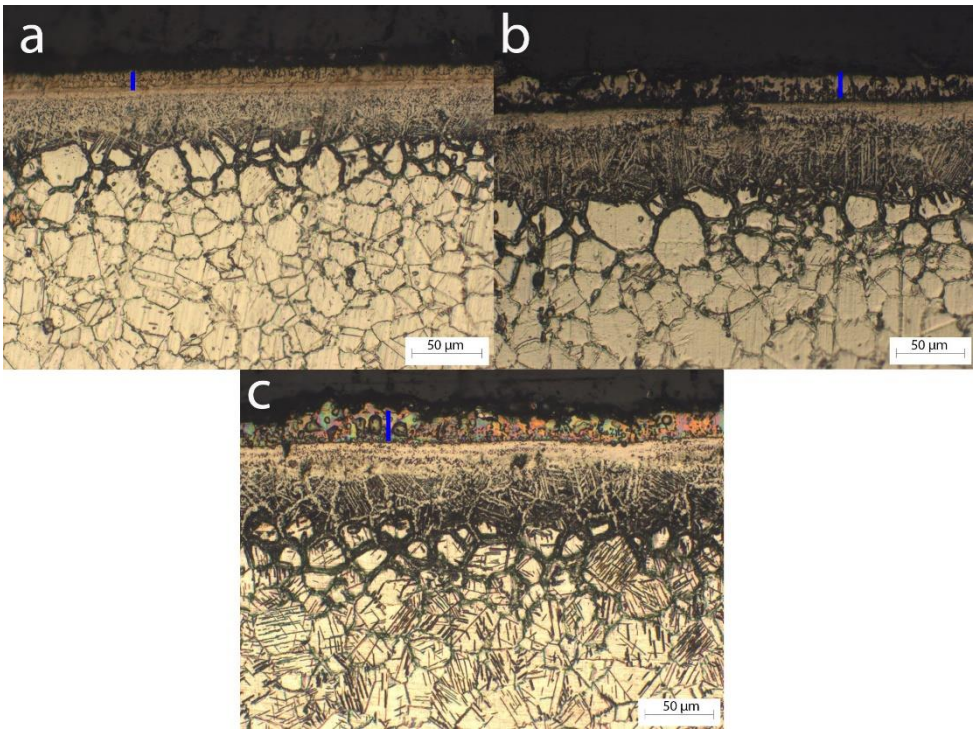
Şekil 4.3 850 °C'de (a) 2 saat süresince, (b) 4 saat süresince, (c) 6 saat süresince KB numunelerin 200x ölçeğinde çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.

900°C'de KB numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 900 °C'de (a) 2 saat süresince, (b) 4 saat süresince, (c) 6 saat süresince KB numunelerin 200x ölçeğinde çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.

950 °C'de KB numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 4.5'de gösterilmiştir.

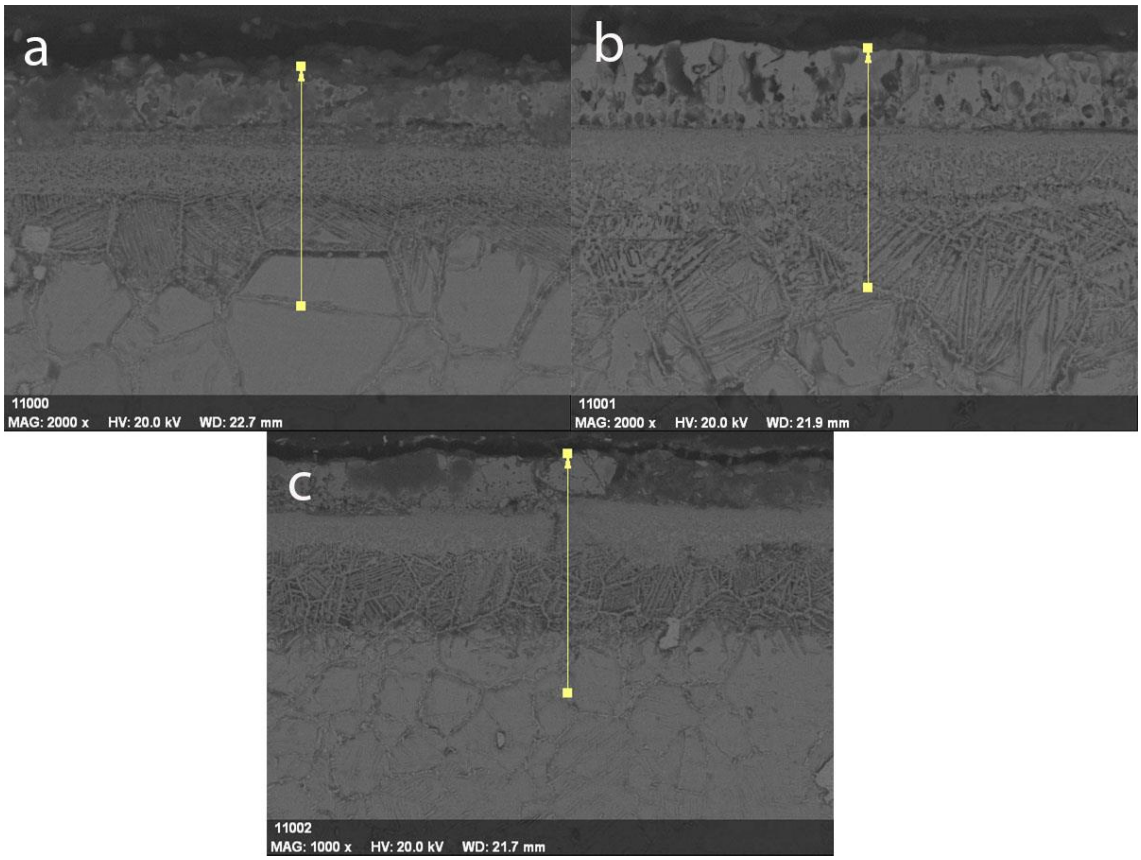


Şekil 4.5 950 °C'de (a) 2 saat süresince, (b) 4 saat süresince, (c) 6 saat süresince KB numunelerin 200x ölçeğinde çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.

Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5'de Nikel silisid tabakası mavi çizgiler ile belirtilmiştir. Mikroyapı analizleri sonucu PPB numunelerin tabaka kalınlıklarında oluşan geçiş bölgelerinin KB numunelere oranla daha ince olduğu belirlenmiştir. KB işleminde oluşan geçiş bölgesinin sıcaklığın ve sürenin artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Geçiş bölgesinin sıcaklık ve süreyle olan ilişkisi, artan sıcaklık ve sürelerde numune yüzeyine daha çok bor yayınımının oluşu ve yüzeye yayınan borların diğer bileşikleri geçiş bölgesine itmesinden kaynaklanmaktadır (Bayca ve Şahin 2004). Borlama sıcaklık ve süresinin artmasıyla silisid tabakasının aşırı büyümesinin sonucu olarak borun yüzeyden olan difüzyonunun giderek zorlaşması sebebiyle kaplama tabakasından iç kısımlara doğru geçişinden kaynaklanarak düz bir yapıdan iğneli yapıya geçiş olmuştur (Özbek vd. 2000, Mu vd. 2009, Dinc vd. 2013).

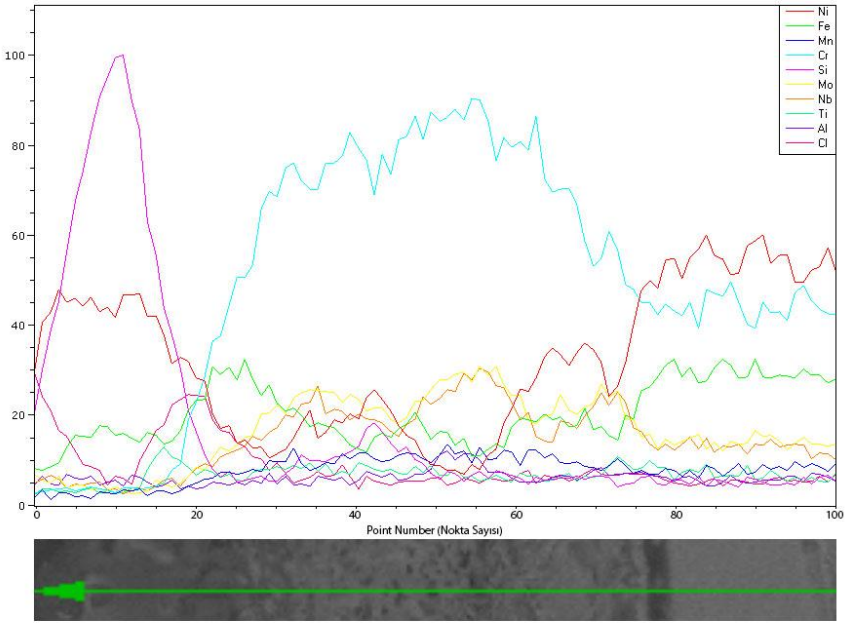
4.2 SEM ve EDS Analizi

950 °C‘de 2, 4 ve 6 saat sürelerince KB numunelerin üzerindeki bor tabakalarının SEM görüntüleri Şekil 4.6’da verilmiştir. SEM görüntülerine ve EDS analizlerine bakıldığında üst tabakada Si tabakasının olduğu gözlenmiştir (Dinç vd. 2013, Çalık vd. 2017, Günen vd. 2017).



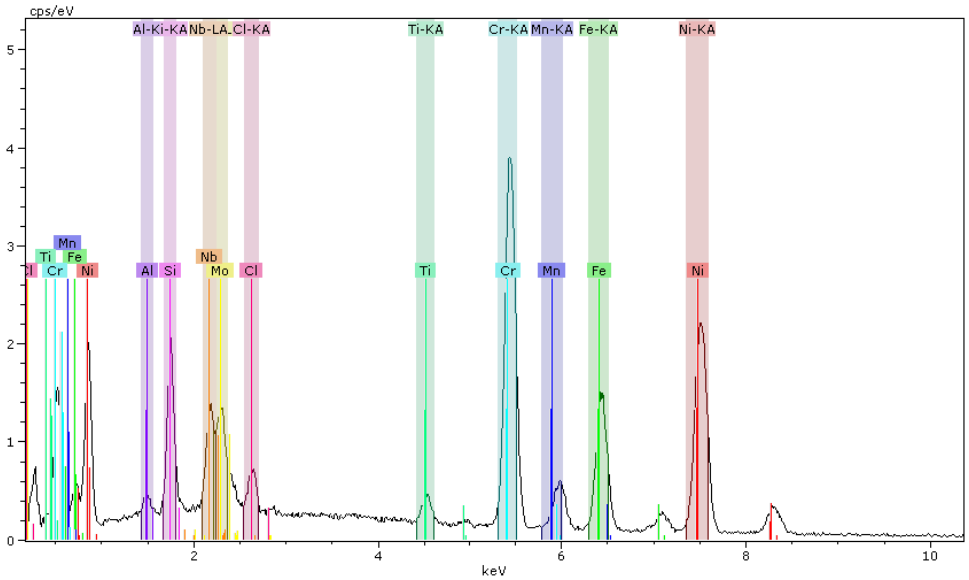
Şekil 4.6 950 °C‘de a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat sürelerince KB numunelerin SEM görüntüleri.

950 °C'de 2 saat süresince borlanmış numunenin SEM görüntüsü üzerindeki sarı çizginin EDS Analizi Şekil 4.7'de verilmiştir.



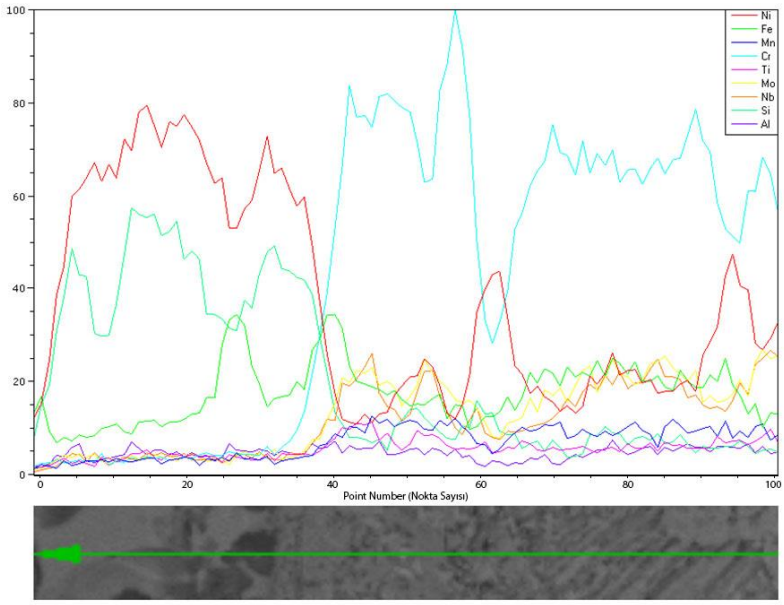
Şekil 4.7 950 °C'de 2 saat süresince borlanmış numunenin SEM görüntüsü üzerindeki sarı çizginin EDS Analizi.

950 °C'de 2 saat süresince borlanmış numunenin bor tabakasından malzeme matrisine olan doğrusal alanda tespit edilen elementler Şekil 4.8'de verilmiştir.



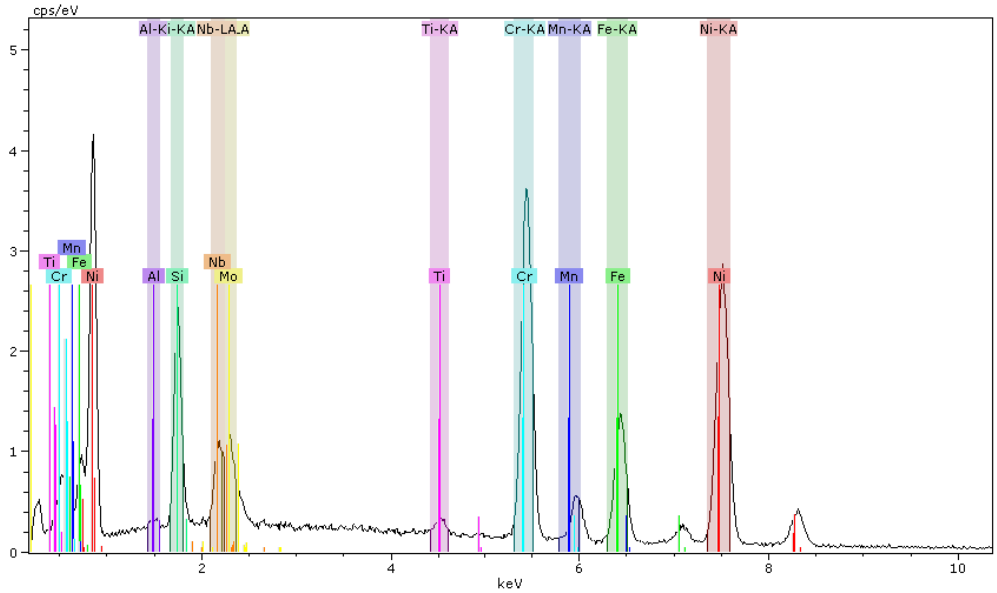
Şekil 4.8 950 °C'de 2 saat süresince borlanmış numunenin bor tabakasından malzeme matrisine olan doğrusal alanda tespit edilen elementler.

950 °C'de 4 saat süresince borlanmış numunenin SEM görüntüsü üzerindeki sarı çizginin EDS Analizi Şekil 4.9'da verilmiştir.



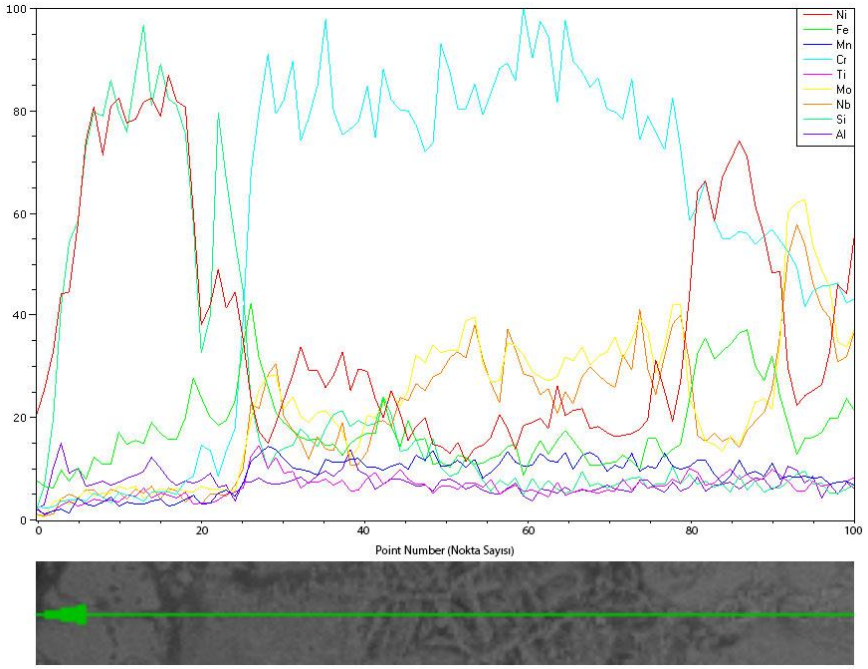
Şekil 4.9 950 °C'de 4 saat süresince borlanmış numunenin SEM görüntüsü üzerindeki sarı çizginin EDS Analizi.

950 °C'de 4 saat süresince borlanmış numunenin bor tabakasından malzeme matrisine olan doğrusal alanda tespit edilen elementler Şekil 4.10'da verilmiştir.



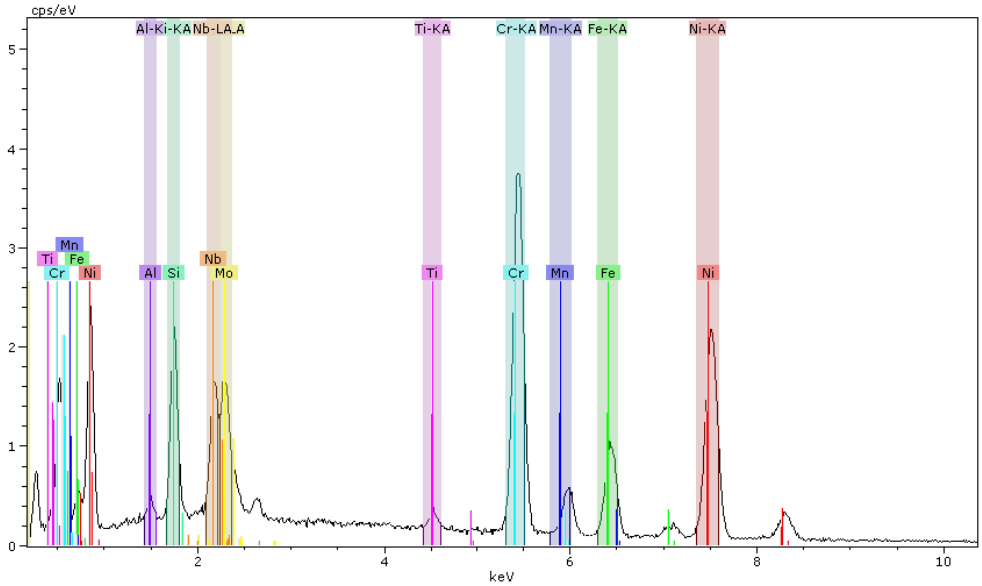
Şekil 4.10 950 °C'de 4 saat süresince borlanmış numunenin bor tabakasından malzeme matrisine olan doğrusal alanda tespit edilen elementler.

950 °C'de 6 saat süresince borlanmış numunenin SEM görüntüsü üzerindeki sarı çizginin EDS Analizi Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11 950 °C'de 6 saat süresince borlanmış numunenin SEM görüntüsü üzerindeki sarı çizginin EDS Analizi.

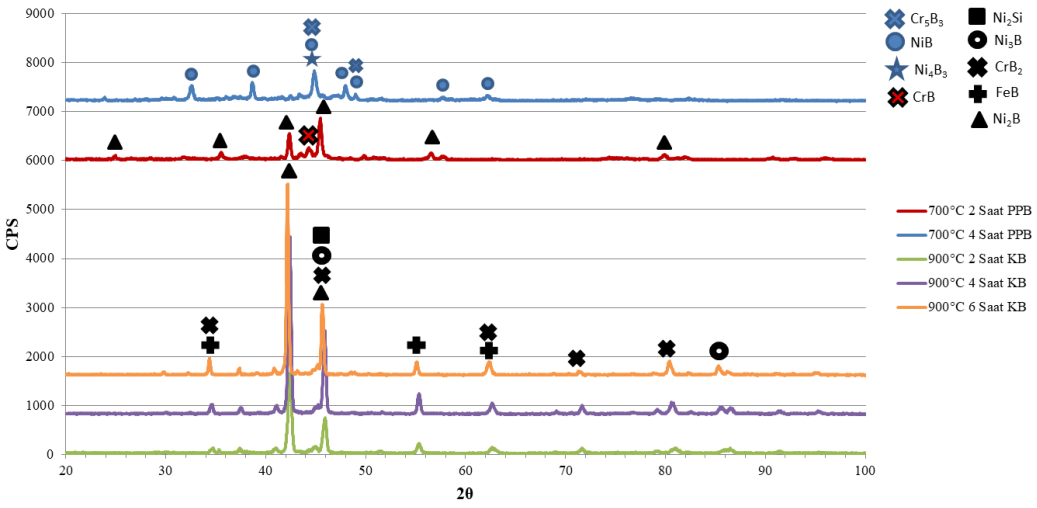
950 °C'de 6 saat süresince borlanmış numunenin bor tabakasından malzeme matrisine olan doğrusal alanda tespit edilen elementler Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12 950 °C'de 6 saat süresince borlanmış numunenin bor tabakasından malzeme matrisine olan doğrusal alanda tespit edilen elementler.

4.3 XRD Analizleri

700 °C sıcaklıkta 2 ve 4 saat süresince PPB ve 900 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat süresince KB numunelere Şekil 4.4'de gösterilen XRD analizi yapılmıştır. KB numunelerde Ni_2B, CrB_2, FeB, Ni_3B, Ni_2Si fazları oluşurken (Ueda vd. 2000, Günen vd. 2017, Campos-Silva vd. 2018, Campos-Silva vd. 2019, Günen 2020), 700 °C'de 2 saat süresince PPB numunede CrB ve Ni_2B, 700 °C'de 4 saat süresince PPB numunede ise Ni_4B_3, Cr_5B_3 ve NiB fazlarının oluştuğu gözlemlenmiştir (Makuch vd. 2019). KB numunelerde şiddeti yüksek faz olarak Ni_2B olarak tespit edilmiştir. İşlem sonucunda optik mikroskop ile alınan görüntülerde tespit edilen bor tabakasının üzerindeki silisid tabakası, XRD analizlerinde de görülmektedir. Literatürde EKabor 2 ile borlanan tüm Ni ve Ni esaslı alaşımlarda bor tabakasının yüzeyinde silisid tabakası oluştuğu bildirilmiştir (Ueda vd. 2000, Günen 2020). 700°C'de 2 saat süresince PPB numunede en baskın faz Ni_2B ve 700°C'de 4 saat süresince PPB numunede NiB'dur. Şekil 4.13'de 700 °C 2 ve 4 saat süresince PPB, 900 °C 2, 4 ve 6 saat süresince KB numunelerin XRD analizleri gösterilmiştir.

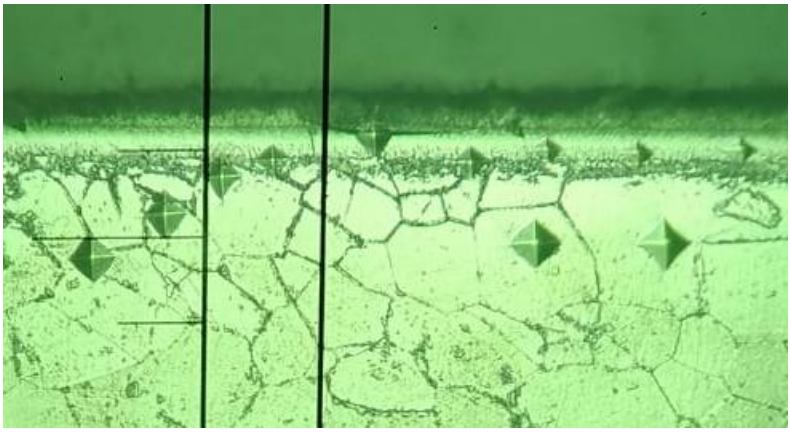


Şekil 4.13 XRD analiz sonuçları.

KB ve PPB işlemlerinde işlem süresinin uzamasıyla kaplama tabakasında ki B yayınımı artar ve bunun sonucunda tabaka sertliği artar (Günen 2020).

4.4 Mikrosertlik Sonuçları

Bileşiminde fazla miktarda Cr bulunan fazlar yapıları gereği daha gevrek yapılara sahiptir. Gevrek yapılar yüzey sertliğini arttırır (Campos-Silva vd. 2018).Numuneden alınan mikrosertlik ölçümleri Şekil 4.14'de gösterilmiştir.



Şekil 4.14 Mikrosertlik izleri.

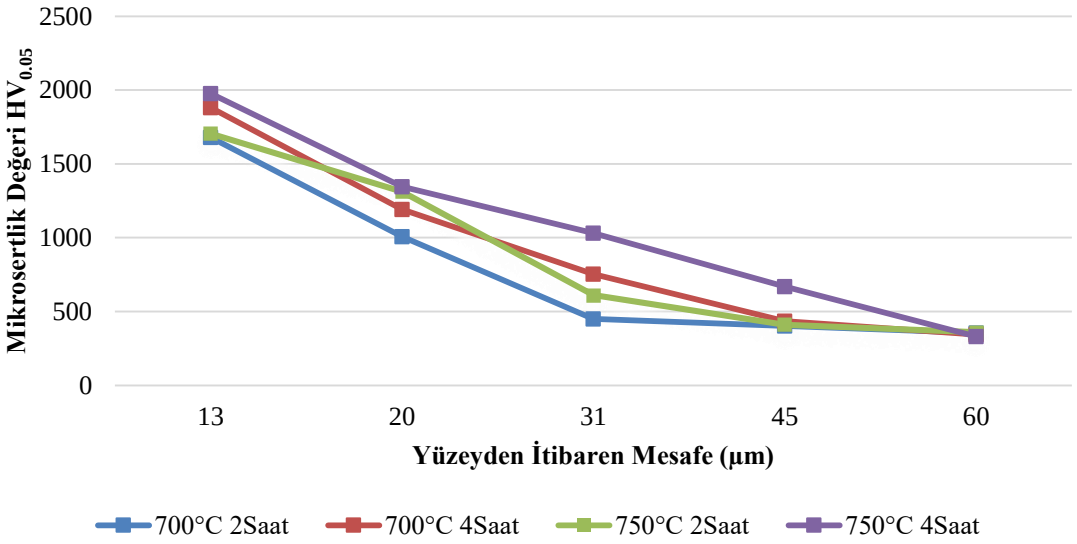
Ölçülen mikrosertlik değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Numunelerin mikrosertlik değerleri ($HV_{0,05}$).

Parametre/Mesafe(µm)	**13 µm**	**20 µm**	**31 µm**	**45 µm**	**60 µm**	**140 µm**
700°C 2 Saat	1679	1008	449	403	354	
700°C 4 Saat	1881	1191	754	434	344	
750°C 2 Saat	1704	1313	611	410	360	
750°C 4 Saat	1978	1345	1032	670	331	
850°C 2 Saat	1181	710	531	466	355	338
850°C 4 Saat	1276	803	660	490	373	359
850°C 6 Saat	1315	961	723	510	352	337
900°C 2 Saat	1237	984	793	492	354	317
900°C 4 Saat	1325	1068	881	593	341	321
900°C 6 Saat	1456	1150	923	673	364	337
950°C 2 Saat	1672	1093	858	633	378	321
950°C 4 Saat	1717	1123	901	650	405	339
950°C 6 Saat	1763	1173	970	710	403	329

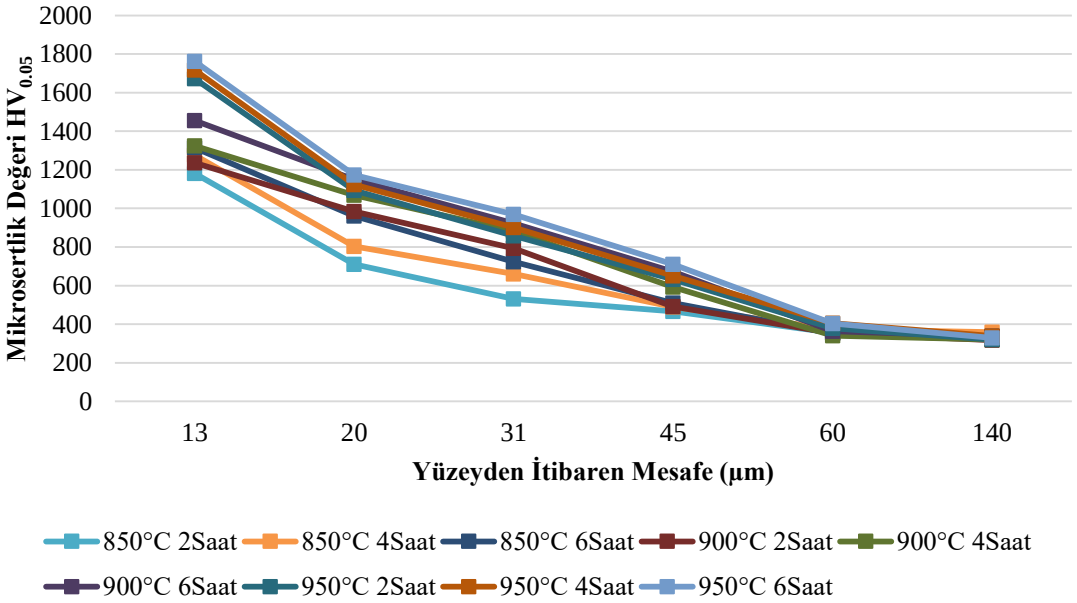
İşlem sıcaklığının ve süresinin arttırılmasıyla ilişkili olarak mikrosertlik sonuçlarında da artışın olduğu gözlemlenmiştir. PPB numunelerde KB numunelere göre daha düşük sıcaklıklarda daha yüksek sertlik değerleri elde edilmiştir. Bu durumun CrB, Cr_5B_3, NiB ve Ni_4B_3 fazlarının meydana gelmesi sonucu olduğu düşünülmektedir. Yine KB numunelerin yüzeyindeki silisid tabakasının oluşumu yüzey sertliğini düşürmüştür

(Muhammad vd. 1999, Deng vd. 2014, Günen ve Kanca 2017). KB numunelerde yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlığının yüzey sertliğiyle ilişkili olduğu bulunmuştur. Yüksek tabaka kalınlığına sahip numunelerin sertlik değerlerinin de yüksek olduğu ortaya konmuştur (Ülker vd. 2011, Günen vd. 2017, Günen 2020). Yüzeyden malzemeye doğru alınan PPB numunelerin mikrosertlik ölçümleri Şekil 4.15'de verilmiştir.



Şekil 4.15 PPB numunelerin yüzeyinden malzemeye doğru sertlik ölçümleri.

Yüzeyden malzemeye doğru alınan KB numunelerin mikrosertlik ölçümleri Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16 KB numunelerin yüzeyinden matrise sertlik ölçümleri.

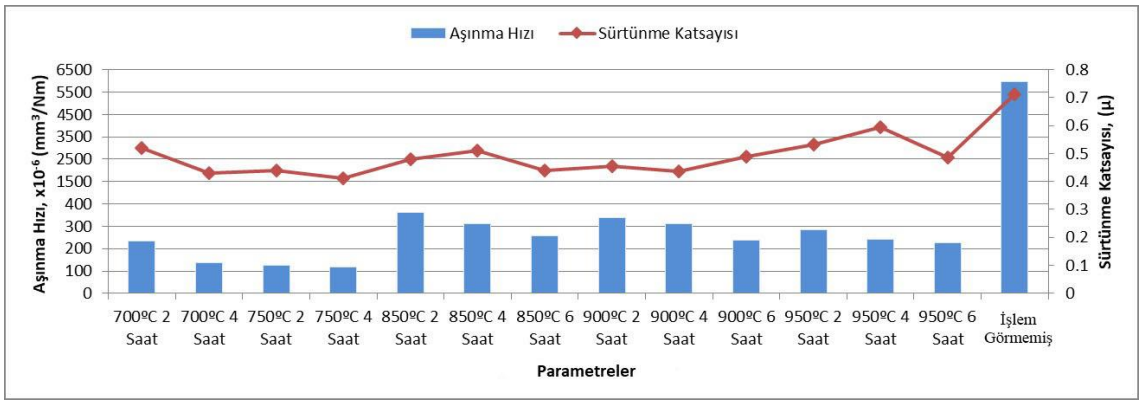
4.5 Kuru Kaymalı Aşınma

Aşınma testi sonucu elde edilen sayısal değerler Çizelge 4.3'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.3 Borlanmış numunelerin sürtünme katsayıları ve aşınma hızları.

Borlama Yöntemleri	Parametre	Sürtünme Katsayısı (μ)	Aşınma Hızı, x10^{-6} mm^3/Nm
PPB	700 °C 2 Saat	0,52	234,45
	750 °C 2 Saat	0,44	136,27
	700 °C 4 Saat	0,43	126,02
	750 °C 4 Saat	0,41	117,23
KB	850 °C 2 Saat	0,48	361,94
	850 °C 4 Saat	0,51	312,85
	850 °C 6 Saat	0,44	258,63
	900 °C 2 Saat	0,45	337,03
	900 °C 4 Saat	0,44	310,65
	900 °C 6 Saat	0,49	239,29
	950 °C 2 Saat	0,53	285,74
	950 °C 4 Saat	0,59	243,25
	950 °C 6 Saat	0,49	227,13
İşlemsiz		0,71	6447,47

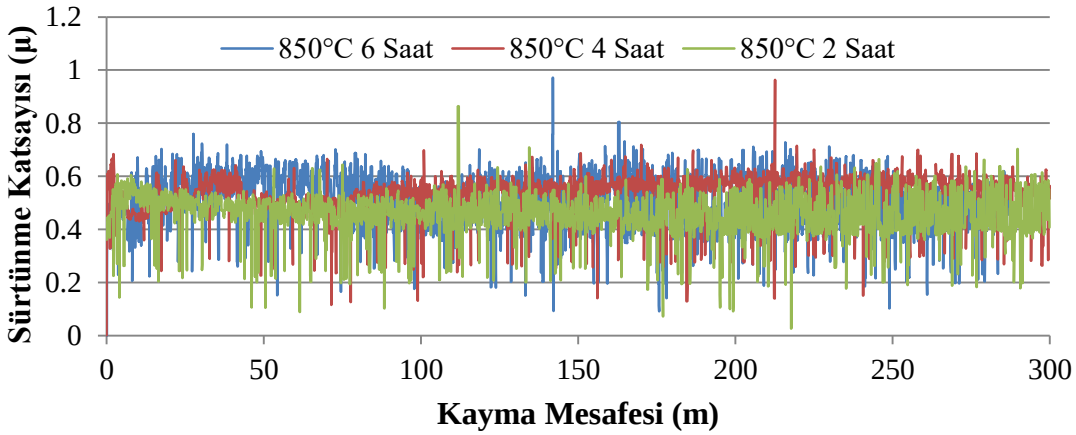
Farklı yöntemlerle borlanmış numunelerin ve işlem görmemiş numunenin sürtünme katsayıları ve aşınma hızları arasında ki ilişki Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17 Sürtünme katsayıları ve aşınma hızları.

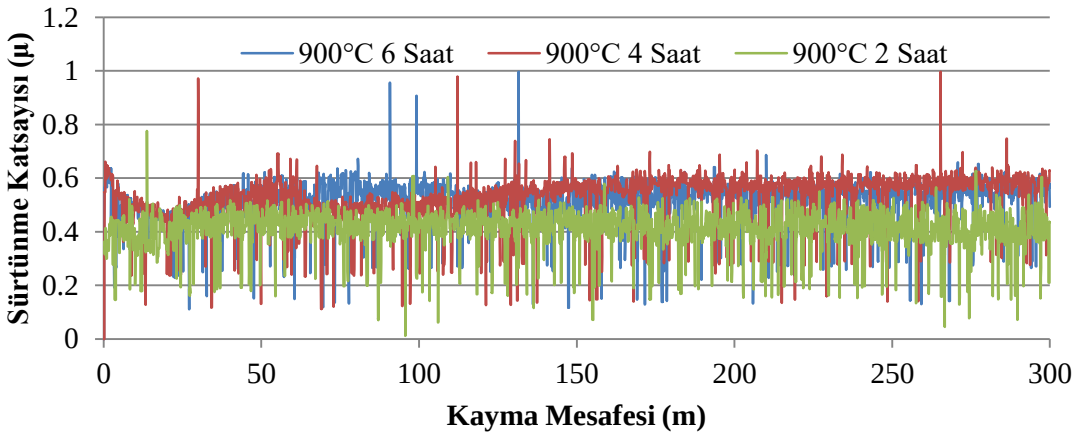
Borlanmış numunelerin işlem görmemiş malzemeye göre aşınma hızında 17 (850 °C 2 saat) ile 55 (750 °C 4 saat) kat aralığında bir iyileşmeyle artışın meydana geldiği (Ueda vd. 2000, Günen 2017, Barış 2007, Işıtan vd. 2016, Ülker vd. 2011), PPB numunelerin KB numunelere göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğundan daha yüksek

aşınma direnci sergilediği tespit edilmiştir. KB'nin PPB'den daha büyük aşınma izlerine sahip olmasının sebebi aşınma esnasında yüzeyden ayrılıp aşınmaya dahil olan silisyum tabakasından kaynaklanmaktadır (Dinç 2013). Ayrıca borlama işlemi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısının aşınma direnciyle herhangi bir bağı olmadığı görülmüştür. 850 °C'de KB numunelerin kayma mesafesi boyunca ölçülen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 4.18'de verilmiştir.



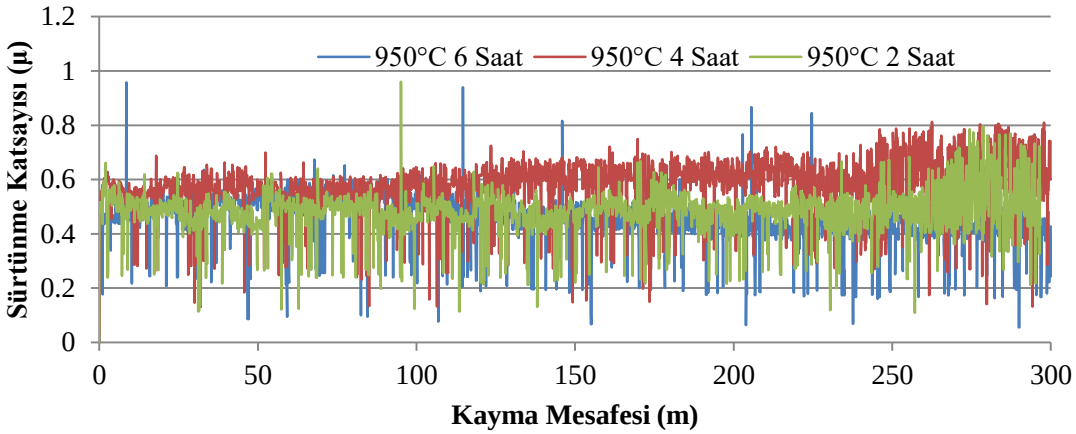
Şekil 4.18 850 °C'de KB numunelerin sürtünme grafiği.

900 °C'de KB numunelerin kayma mesafesi boyunca ölçülen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 4.19'da verilmiştir.



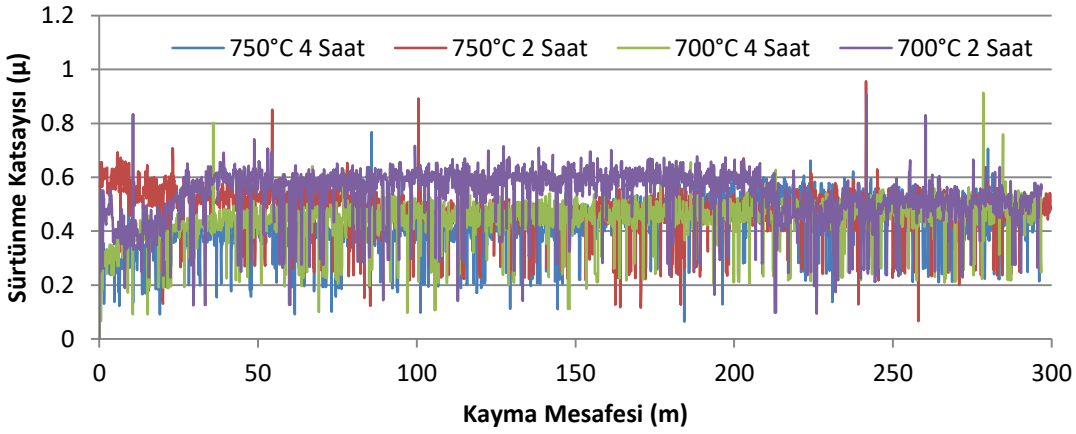
Şekil 4.19 900 °C'de KB numunelerin sürtünme grafiği.

950 °C'de KB numunelerin kayma mesafesi boyunca ölçülen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 4.20'de verilmiştir.



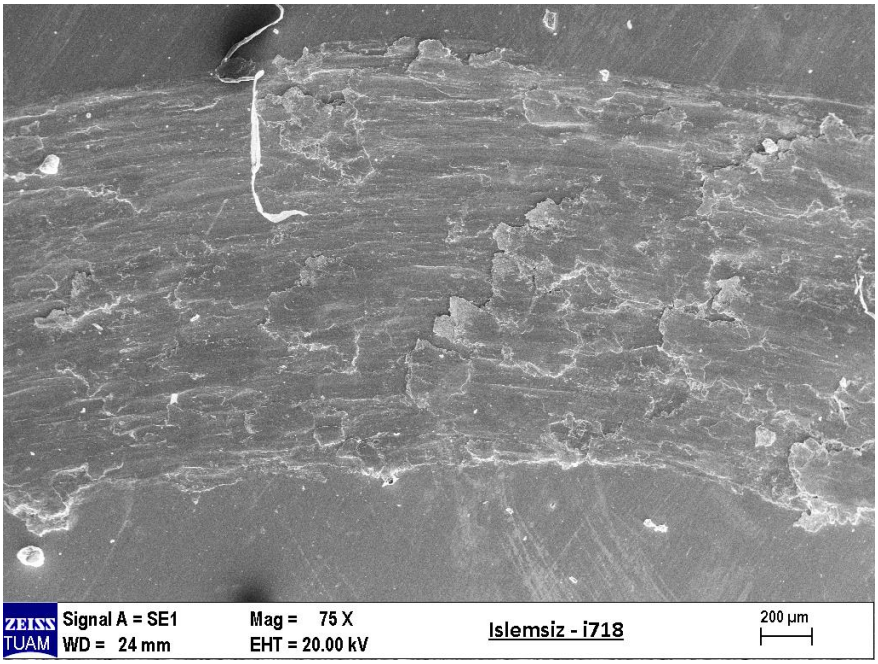
Şekil 4.20 950 °C'de KB numunelerin sürtünme grafiği.

PPB numunelerin kayma mesafesi boyunca ölçülen sürtünme katsayısı grafiği Şekil 4.21'de verilmiştir.



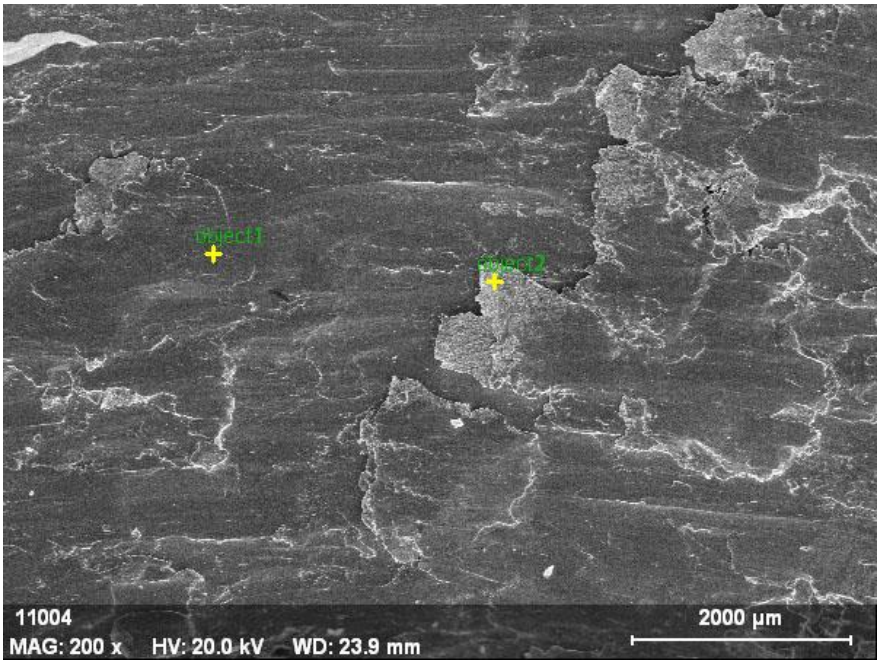
Şekil 4.21 PPB numunelerin sürtünme grafiği.

İşlem görmemiş numunede oksidatif aşınma mekanizması sonucu oluşan delaminasyon ile birlikte abrazif aşınma mekanizmasının oluşturduğu aşınma izleri görülmüştür (Günen vd. 2020). İşlem görmemiş numunenin aşınma izleri Şekil 4.22'de verilmiştir.



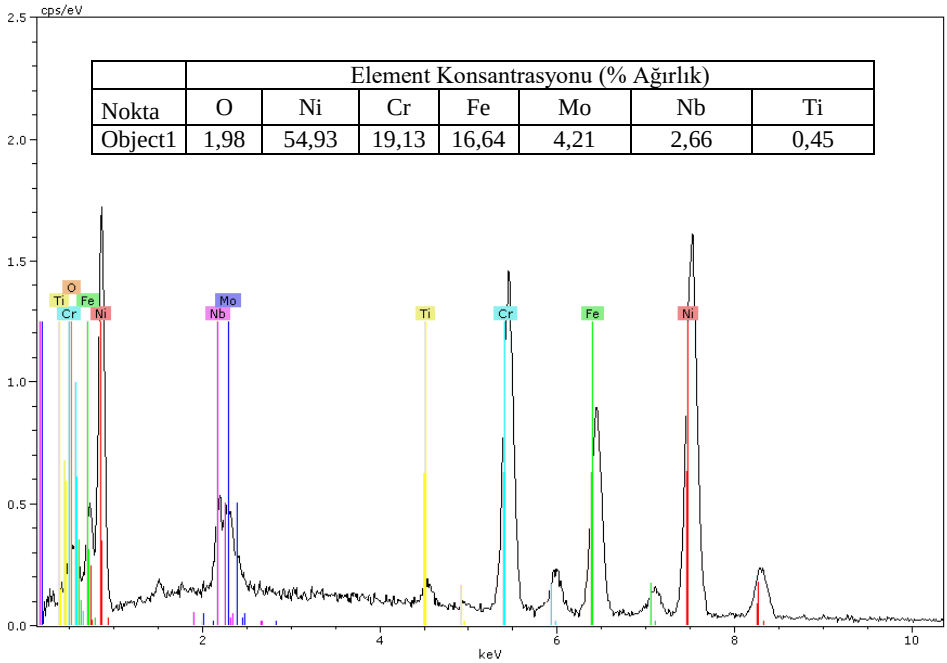
Şekil 4.22 İşlem görmemiş numunenin aşınma izleri.

İşlem görmemiş numuneden EDS analizi için belirlenmiş noktalar Şekil 4.23'de verilmiştir.



Şekil 4.23 İşlem görmemiş numuneden EDS analizi için belirlenmiş noktalar.

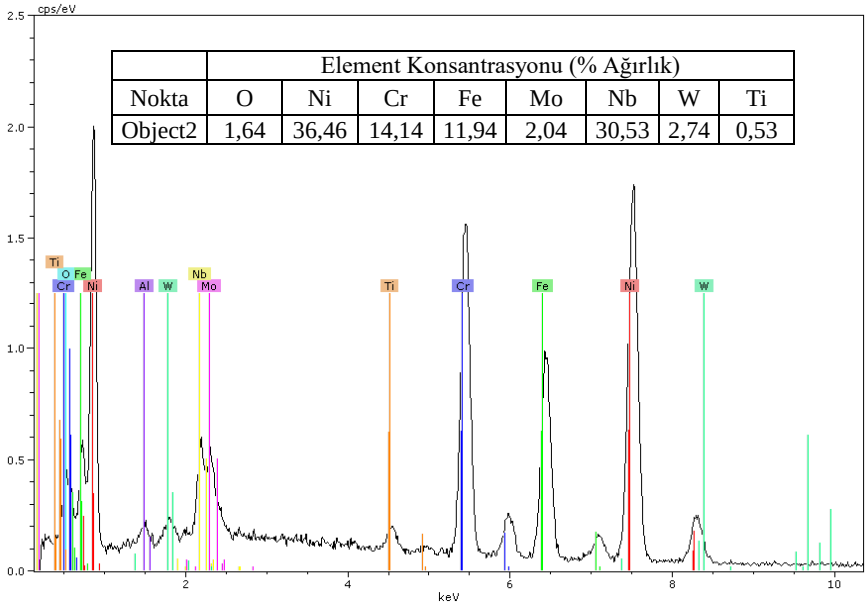
Belirlenen noktalarda yapılan EDS analizi ile oksitlenmenin mevcudiyeti ortaya konmuştur. Şekil 4.23'de gösterilmiş object1 noktasının EDS grafiği Şekil 4.24'de verilmiştir.



	Element Konsantrasyonu (% Ağırlık)						
Nokta	O	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Ti
Object1	1,98	54,93	19,13	16,64	4,21	2,66	0,45

Şekil 4.24 Şekil 4.23'de gösterilmiş object1 noktasının EDS grafiği.

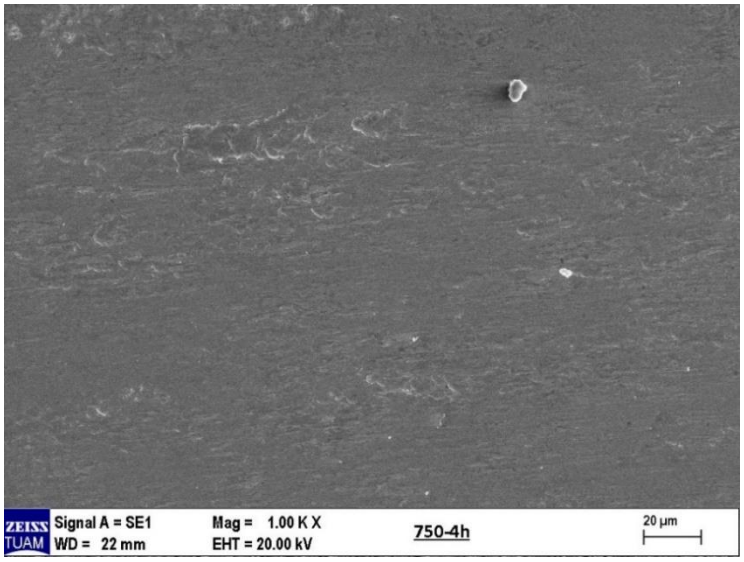
Şekil 4.23'de gösterilmiş object2 noktasının EDS grafiği Şekil 4.25'de verilmiştir.



	Element Konsantrasyonu (% Ağırlık)							
Nokta	O	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	W	Ti
Object2	1,64	36,46	14,14	11,94	2,04	30,53	2,74	0,53

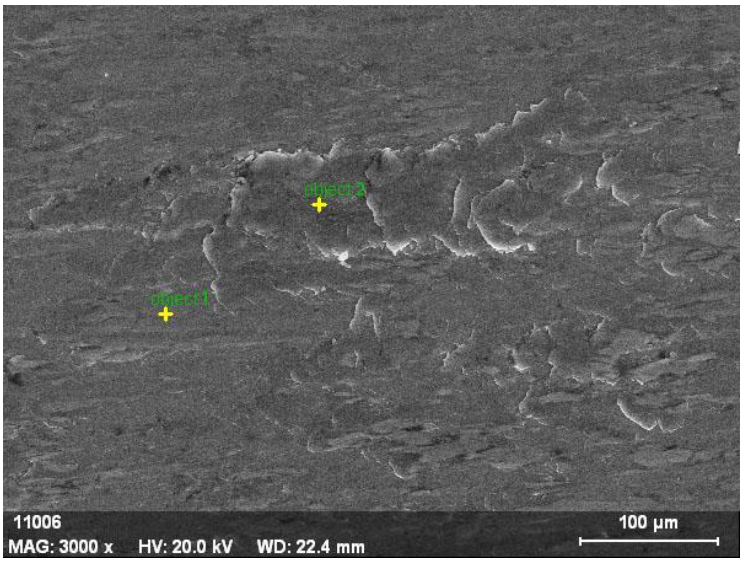
Şekil 4.25 Şekil 4.23'de gösterilmiş object2 noktasının EDS grafiği.

750 °C ‘de 4 saat süresince PPB numunede de oksidatif aşınma mekanizması görülmektedir. Ancak burada işlem görmemiş numuneyle kıyaslandığında daha küçük aşınma izlerinin oluştuğu bulunmuştur. Ayrıca abrazif aşınma izleri de görülmüştür (Günen vd. 2020). 750 °C ‘de 4 saat süresince PPB numunenin aşınma izleri Şekil 4.26’da verilmiştir.



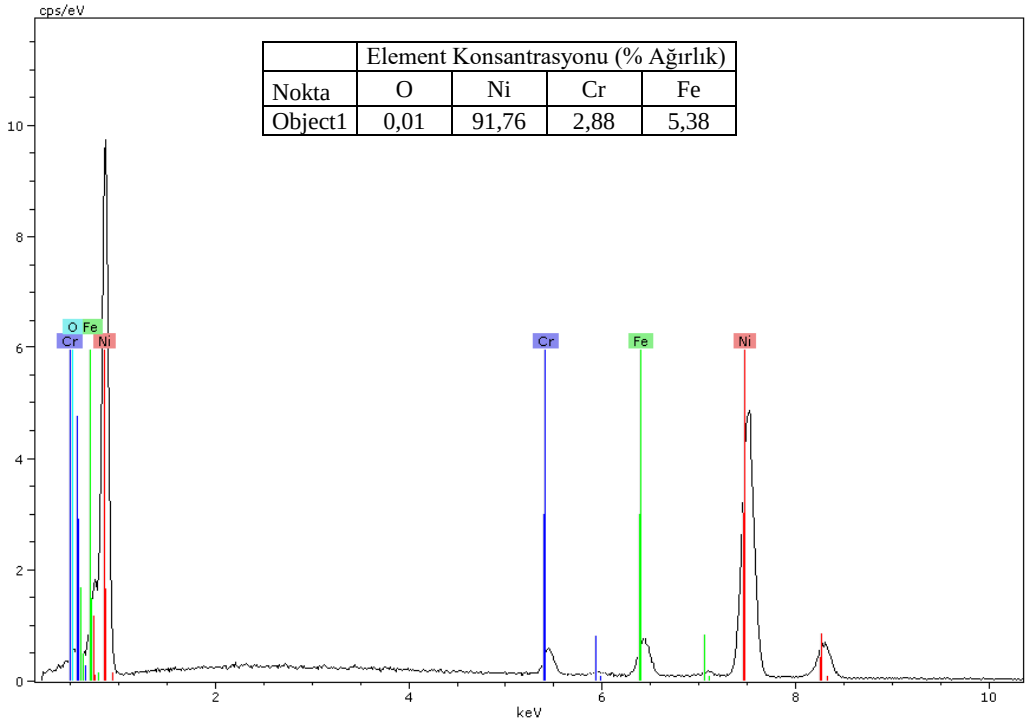
Şekil 4.26 750 °C ‘de 4 saat süresince PPB numunenin aşınma izleri.

750 °C ‘de 4 saat süresince PPB numuneden EDS analizi için belirlenmiş noktalar Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.27 750 °C ‘de 4 saat süresince PPB numuneden EDS analizi için belirlenmiş noktalar.

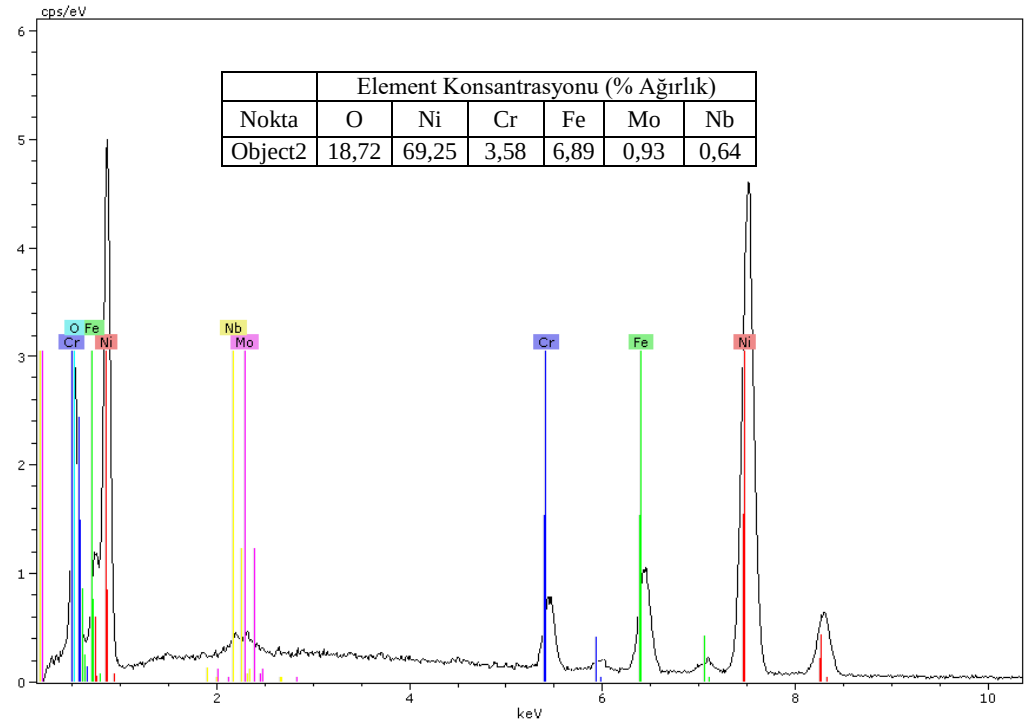
Şekil 4.27'de gösterilmiş object1 noktasının EDS grafiği Şekil 4.28'de verilmiştir.



	Element Konsantrasyonu (% Ağırlık)			
Nokta	O	Ni	Cr	Fe
Object1	0,01	91,76	2,88	5,38

Şekil 4.28 Şekil 4.27'de gösterilmiş object1 noktasının EDS grafiği.

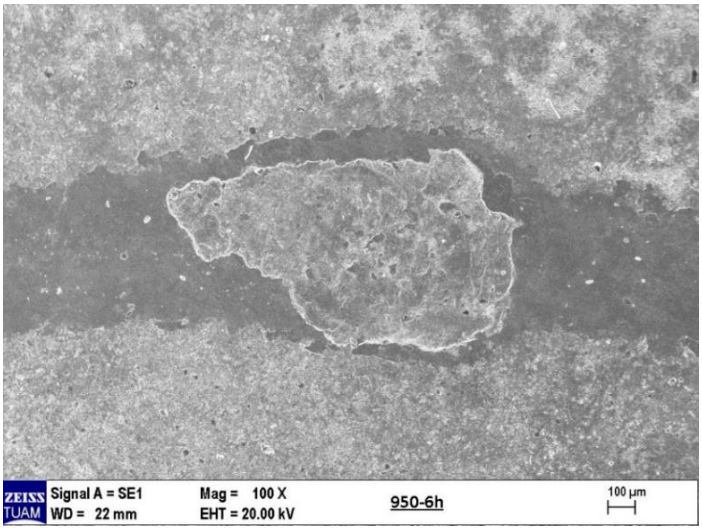
Şekil 4.27'de gösterilmiş object2 noktasının EDS grafiği Şekil 4.29'da verilmiştir.



	Element Konsantrasyonu (% Ağırlık)					
Nokta	O	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb
Object2	18,72	69,25	3,58	6,89	0,93	0,64

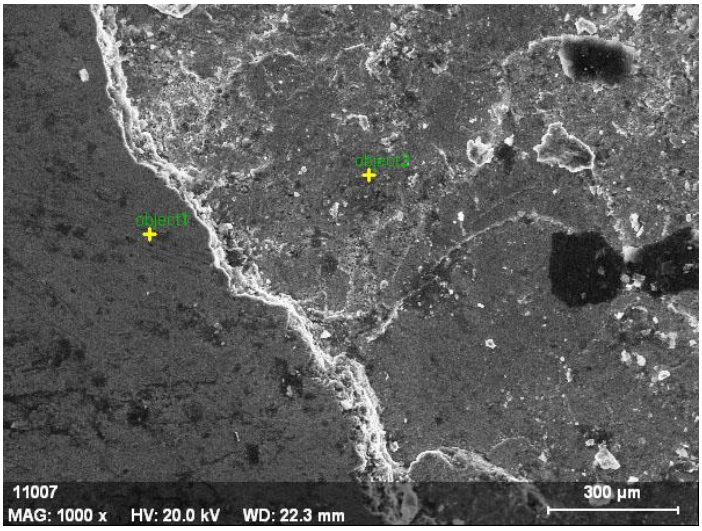
Şekil 4.29 Şekil 4.27'de gösterilmiş object2 noktasının EDS grafiği.

950 °C ‘de 6 saat süresince KB numunede de belirlenmiş noktalardan yapılmış EDS analizleri sonucunda oksitlenmenin olduğu ve bunun aşınma esnasında oksidatif aşınma mekanizmasıyla birlikte bir miktar silisyum tabakasının ayrıldığı ve delaminasyon izleri oluşturduğu görülmüştür. PPB numuneyle kıyaslandığında daha büyük, işlem görmemiş numuneyle kıyaslandığında ise daha küçük aşınma izlerine ulaşılmıştır. Ayrıca abrazif aşınma mekanizmasının oluşturduğu abrazif aşınma izleri görülmüştür (Günen vd. 2020). 950 °C ‘de 6 saat süresince KB numunenin aşınma izleri Şekil 4.30’da verilmiştir



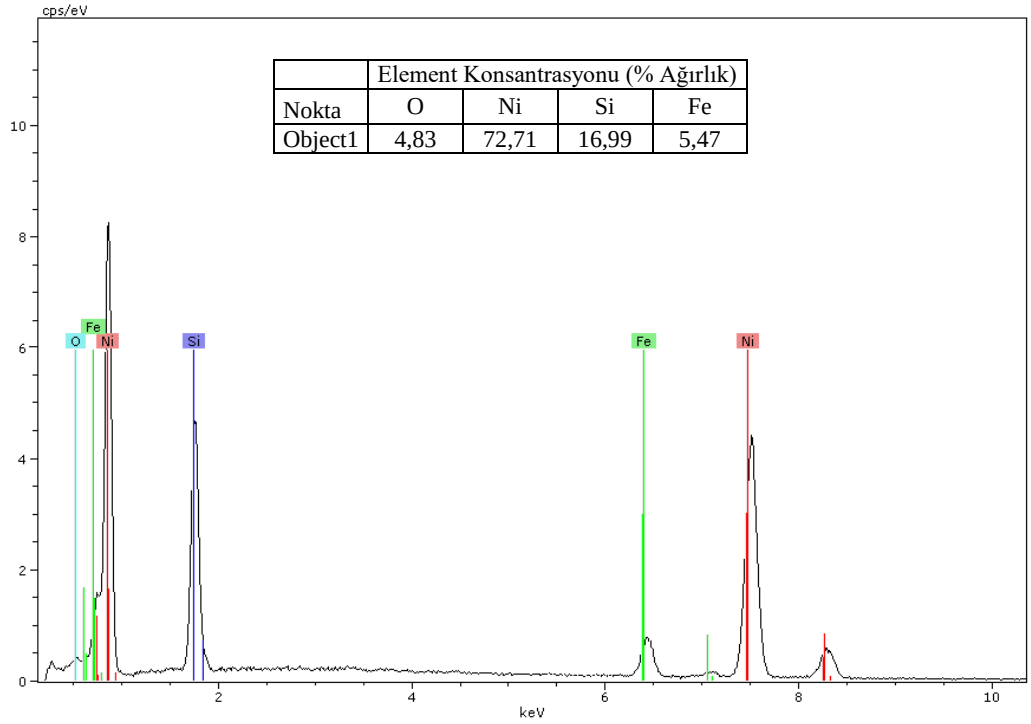
Şekil 4.30 950 °C ‘de 6 saat süresince KB numunenin aşınma izleri.

950 °C ‘de 6 saat süresince KB numuneden EDS analizi için belirlenmiş noktalar Şekil 4.31’de verilmiştir.



Şekil 4.31 950 °C ‘de 6 saat süresince KB numuneden EDS analizi için belirlenmiş noktalar.

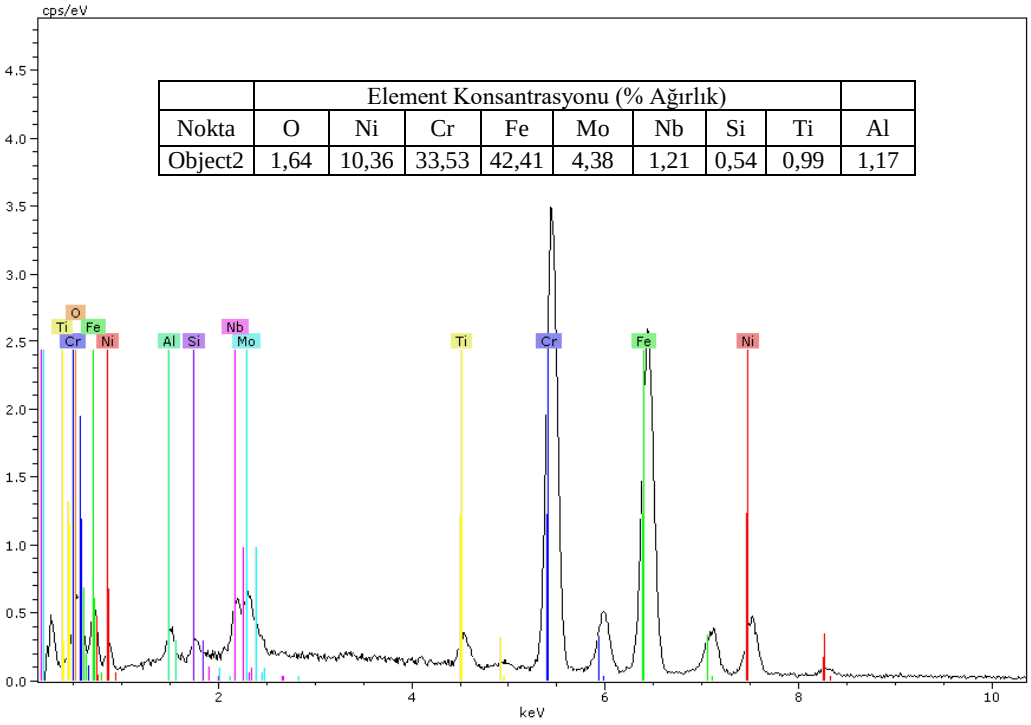
Şekil 4.31'de gösterilmiş object1 noktasının EDS grafiği Şekil 4.32'de verilmiştir.



	Element Konsantrasyonu (% Ağırlık)			
Nokta	O	Ni	Si	Fe
Object1	4,83	72,71	16,99	5,47

Şekil 4.32 Şekil 4.31'de gösterilmiş object1 noktasının EDS grafiği.

Şekil 4.31'de gösterilmiş object2 noktasının EDS grafiği Şekil 4.33'de verilmiştir.



	Element Konsantrasyonu (% Ağırlık)								
Nokta	O	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Si	Ti	Al
Object2	1,64	10,36	33,53	42,41	4,38	1,21	0,54	0,99	1,17

Şekil 4.33 Şekil 4.31'de gösterilmiş object2 noktasının EDS grafiği.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Ni esaslı süper alaşımlar içerisinde en fazla kullanım alanı bulunan Inconel 718 alaşımının termokimyasal borlama yöntemlerinden olan KB ve PPB yöntemleriyle yüzey modikasyonu çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

1- Borlama işleminden sonra yapılan XRD analizinde KB numunelerde Ni_2B, CrB_2, FeB, Ni_3B, Ni_2Si fazları elde edilmiştir. 700°C 2 saat süresince PPB numunede CrB, Ni_2B fazları ve 700°C 4 saat süresince PPB numunede ise ve Cr_5B_3, Ni_4B_3 ve NiB fazları tespit edilmiştir. PPB işleminde işlem süresinin artmasıyla (700 °C 4 saat) bor yayınımı artmış ve borca zengin yeni fazlar oluşmuştur. Yeni fazların tabaka sertliğini ve aşınma direncini arttırdığı ortaya konmuştur.

2- Elde edilen fazlara bağlı olarak KB yönteminde 1181 ile 1763 $HV_{0,05}$ sertlik değerleri elde edilmişken PPB yönteminde ise 1679 - 1978 $HV_{0,05}$ sertlik değerleri elde edilmiştir.

3- PPB yönteminde daha düşük sıcaklıklarda uygulanmış olmasına rağmen PPB işlemi için daha düşük aktivasyon enerjisi ile gerçekleştirilebildiği için KB göre daha kalın kaplama tabakaları elde edilmiştir.

4- Borlanmış numunelerin işlem görmemiş malzemeye göre aşınma hızında 17 (850 °C 2 saat) ile 55 (750 °C 4 saat) kat aralığında bir iyileşmeyle artışın meydana geldiği, PPB numunelerin KB numunelere göre yüzeyinde silisid tabakası ihtiva etmediğinden daha yüksek aşınma direnci sergilediği ortaya konmuştur. Ayrıca borlama işlemi sonucunda elde edilen sürtünme katsayısının aşınma direnciyle herhangi bir bağı olmadığı bulunmuştur.

5- İşlem görmemiş Inconel 718 alaşımının mikrosertlik değeri 301,99 HV ve aşınma hızı $6447,47x10^{-6}$ mm^3/Nm olarak ölçülmüştür. KB numunelerin tabaka kalınlıkları 850 °C sıcaklık 2 saat süresinden 950 °C sıcaklık 6 saat süresine kadar sırasıyla 15,5 µm'den 110 µm'ye, mikrosertlik değerleri 1181 $HV_{0,05}$'den 1763 $HV_{0,05}$'ye artış ve aşınma hızları $361,94x10^{-6}$ mm^3/Nm'den $227,13x10^{-6}$ mm^3/Nm'ye düşüş göstermiştir. PPB numunelerin ise 700 °C sıcaklık ve 2 saat süresinden 750 °C sıcaklık ve 4 saat süresine kadar sırasıyla 15 µm'den 49 µm'ye 1679 $HV_{0,05}$'den 1978 $HV_{0,05}$'ye artış ve aşınma hızları $234,45x10^{-6}$ mm^3/Nm'den $117,23x10^{-6}$ mm^3/Nm'ye düşüş göstermiştir.

6- SEM ve EDS analizleri sonucunda oksidativ aşınma mekanizmasıyla oluşan delaminasyon izleri ve abraziv aşınma izleri tespit edilmiştir.
7- Sıcaklık ve işlem süresinin artması borür tabaka kalığının artışına, borür tabaka kalınlığının artışı yüzey sertliğinin artışına ve yüzey sertliğinin artışının aşınma direncinin artmasına neden olduğu ortaya konmuştur. PPB işlemi KB işlemine oranla daha düşük sıcaklıklarda daha yüksek tabaka kalınlıklarına, daha sert yüzeylere ve daha az yüzey direncine sahip olur. Sıcaklık ve sürenin artmasıyla değerlerde iyileşme gözlemlenir.
8- Inconel 718 üzerinde uygulanan KB ve PPB yüzey işlemlerinin endüstriyel uygulamalarda kullanılabileceği, her iki işlemde de sertlik ve aşınma direncinin iyileştirilmesi bakımından etkili yöntemler olduğu saptanmıştır.

PPB ve KB numunelerin 3D topografi yüzey taraması ile aşınma-yırtılma izleri ve yüksek sıcaklık aşınma davranışları incelenebilir. Oksidasyon ve korozyon davranışları araştırılabilir. Nano indentasyon ile elastisite modülü, tabakanın kırılma tokluğu ve gerilme yığılmaları incelenebilir.

6. KAYNAKLAR

Aggen G, 1990, The Materials Information Society, Metals Handbook, Wrought and P/M Superalloys, Volume 1, ASM International, ABD.

Arai T, Harper S, 1991, Thermoreactive Deposition/Diffusion Process, ASM Handbook, 4, ASM Int., Materials Park, Ohio, 448–453.

Atik E, 2001, Farklı Bir Yüzey Sertleştirme Yöntemi: Borlama, Makina Metal Dergisi, 1, 1-4.

Aw P.K, Batchelor A.W, Loh N.L, 1997, Structure and tribological poroperties of plasma nitrided surface films on Inconel 718, Surface and Coatings Technology, 89, 70-76.

Barış M, 2007 Farklı Borlama Sürelerinin Transmisyon Çeliğinde Abrasiv Aşınma Davranışlarına Etkisinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 66s, Ankara.

Bayca S. U, Şahin S, 2004, Borlama, Mühendis ve Makina Dergisi, 532, 51-59.

Bhattacharya S.K, Javaid A, Lewis M.H, Walbank J, 1983, Wear Mechanisms of Syalon Ceramic Tools when Machining Nickel-Based Material. Metals Technology, 10, 482-483.

Bozkurt N, 1984, Bor Yayınımıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 113s, İstanbul.

Çalık A, Uçar N, Delikanlı K, Çarkcı M, Karakaş S, 2017, Boriding kinetics and mechanical properties of borided commercial-purity nickel, Indian Journal of Engineering & Material Sciences, 24, 362-368.

Campos-Silva I, Contla-Pacheco A.D, Figueroa-Lopez U, Martínez-Trinidad A.J, Garduno-Alva A, Ortega-Aviles M, 2019, Sliding wear resistance of nickel boride layers on an Inconel 718 superalloy, Surface & Coatings Technology, 378, Article number 124864.

Campos-Silva I, Contla-Pacheco A.D, Ruiz-Rios A, Martínez-Trinidad A.J, Rodríguez-Castro G, Meneses-Amador A, Wong-Angel W.D, 2018, Effects of scratch tests on the adhesive and cohesive properties of borided Inconel 718 superalloy, Surface & Coatings Technology, 349, 917-927.

Choudhurt M. A, El-Baradie I. A, 1998, Machining nickel base superalloys: Inconel 718, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, c. 212, sayı 3, 195–206.

Çifçi C, 1999, Sade Karbonlu Çeliklerin Borlanmasında, Borür Tabakası Özelliklerine, Karbon miktarının Etkisi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 91s, Ankara.

Delikanlı K, Çalık A, Uzun H.A, 2003, Sade Karbonlu Bir Çeliğin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1-5.

Deng D, Wang C, Liu Q, Niu T, 2015 Effect of standard heat treatment on microstructure and properties of borided Inconel 718, Transactions Nonferrous Meterials Society China, 25(2), 437-443.

Dinç H, 2013, Inconel 718 Süper Alaşımının Termokimyasal Borlanması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 68s, İstanbul.

Dinç H, Motallabzadeh A,, Çimenoğlu H, 2013, Thermochemical Boriding of Inconel 718 Superalloy, Academic Journal of Science, 2, 385-389.

Donachie M. J, 1984, Superalloys a technical guide, ASM International, ABD, 110–221.

Fichtl W, 1981, Boronizing and its Practical Applications, Materials in Engineering, 2, 276-286.

Gustafsson D, 2012. High Temperature Fatigue Crack Propagation Behavior of Inconel 718. (Doctoral), Linköping University, Linköping, Sweden.

Günen A, 2020, Properties and High Temperature Dry Sliding Wear Behavior of Boronized Inconel 718, Metalurgical And Materials Transactions A, Volume 51 A, 939.

Günen A, Kanca E, 2017, Farklı bor kimyasalları ile borlanmış Inconel 625 alaşımının karakterizasyonu, Pamukkale Üniversitesi Müh. Bilimleri Dergisi, 4, 411-416.

Günen A, Kanca E, Çakır H, Karakaş M. S, Gök M. S, Küçük Y, Demir M, 2017, Effect of borotitanizing on microstructure and wear behavior of Inconel 625, Surface & Coatings technology, 311, 374-382.

Güneş İ, Keddam M, Chegroune R, Özçatal M, 2015, Growth kinetics of boride layers formed on %99.0 purity nickel, Bulletin of Materials. Science, 38, 1113-1118.

Hegewaldt F, Singheisser L, Türk M, 1984, Gasborieren, HTM, 39, 1, 7, 15.

Houghton A, 2011, Characterising and reducing seizure wear of inconel and incoloy superalloys in a sliding contact, Wear, 271,1671–1680.

Işıtan A, Armağan E, Kaplan Y, Onar V, 2016, Wear Behavior of Boronized AISI D2 Tool Steel, 16th International Materials Symposium IMSP'2016, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

Jain V, Sundararajan G, 2002, Influence of the Pack Thickness of the Boronizing Mixture on the Boriding of Steel, Surface and Coatings Technology, 21 – 26.

Karabulut Y, Tascioglu E, Kaynak Y, 2021, Heat treatment temperature-induced microstructure, microhardness and wear resistance of Inconel 718 produced by selective laser melting additive manufacturing, Optik – International Journal for Light and Electron Optics, 227, Article number 163907.

Karakan, M, Alsaran, A, Çelik, A, 2002 Plazma Borlama, Mühendis ve Makina Dergisi, 43(512):51-54.

Kurzynowski T, Smolina I, Kobiela K, Kuz´nicka B, Chlebus E, 2017, Mater. Design, 132, 349–59.

Makuch N, Kulka M, Dziarski P, Taktak S, 2019, The influence of chemical composition of Ni-based alloys on microstructure and mechanical properties of plasma paste borided layer, Surface & Coatings Technology, 367, 187-202.

Matuschka A.G, 1980 Boronizing, Heyden, 11-45, Londra 100s.

Mu D, Shen B, Yang C, Zhao X, 2009, Microstructure analysis of boronized pure nickel using boronizing powders with SiC as diluent, Vacuum, 83, 1481-1484.

Muhammad W, Hussain K, Tauqir A, Ulhaq A, Khan A. Q, 1999, Evaluation of halide-activated pack boriding of INCONEL 722, Metallurgical and Materials Transactions A, 30A, 670-674

Nevcanoğlu A, 2019, TIG Kaynağı Yöntemi ile Birleştirilmiş Inconel 718 Süper Alaşım Malzemenin Kaynak Sonrası Özelliklerinin İncelenmesi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 110s, İstanbul

Özsoy A, Yaman Y.M, 1993, The Effect of Thermocycling Liquid Boronizing on The Thickness of The Boride Layer and The Transition Zone, Scripta Metallurgica et Materialia, 29, 231-236.

Özbek İ, 2000 Borlama Yöntemiyle (AISI M50, AISI M2) Yüksek Hız Çeliklerinin ve AISI W1 Çeliğinin Yüzey Performanslarının Geliştirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 180s, Sakarya.

Özbek İ, Akbulut H, Zeytin S, Bindal C, Ucisik A.H, 2000, The characterization of borided 99.5% purity nickel, Surface and Coatings Technology, 126, 166-170.

Panagopoulos C, Koutsomichalis A, Badekas H, 1990, A study of Ni-Cr plasma- sprayed coatings on Inconel 625, Surf. Coat. Technol. 41, 343–349.

Petrova R.S, Suwattananont N, Samardzic V, 2008, The effect of boronizing on metallic alloys for automotive applications, J. Mater. Eng. Perform. 17, 340–345.

Pollock T, Sammy M. T, 2006, Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure, and Properties", Journal Of Propulsion And Power, 22, 361-374.

Samsanov G.V, Epik A.P, 1966, Coatings of High Temperature Materials, Ed. Hausner, H.H., Plenium Press, 7-35.

Singhal S.C, 1977, A Hard Diffusion Boride Coating for Ferrous Materials, Thin Solid Films, 45, 321-329.

Sinha A.K, 1991 Asm Handbook Vol.4. Boriding (Boronizing), 437-447.

Thomas A, El-Wahabi M, Cabrera J. M, Prado J. M, 2006, High temperature deformation of Inconel 718, Journal of Materials Processing Technology, 177, 469-472.

Ueda N, Mizukoshi T, Demizu K, Sone T, Ikenaga A, Kawamoto M, 2000 Boriding of nickel by the powder-pack method, Surface and Coatings Technology 126, 25-30.

Uluköy A, 2005, 21NiCrMo2 (AISI 8620) Çeliğinden yapılmış dişli çarklara karbürleme ile beraber borlama işleminin uygulanması, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 129s, Denizli.

Uluköy A, Can A. Ç, 2006, Çeliklerin Borlanması, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12, 189-198.

Ulutan D, Özel T, 2011, Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 51, 250-280.

Ülker Ş, Güneş İ, Taktak Ş, 2011, Investigation of tribological behaviour of plasma paste boronized of AISI 8620, 52100 and 440C steels, Indıan Journal of Engineering&Material Sciences, 18, 370-376.

Warbuton P, 1967, Problems of Machining Nickel-Based Alloys, Iron and Steel Institute Special Report, 94, 151-160.

Yoon J. H, Jee Y. K, Lee S. Y, 2002 Plasma Paste Bronozing Treatment of the Stainless Steel AISI304, Surface and Coatings Technology, 71-75.

Zafar S, Ramesh C. S, Sharma A.K, 2014 Abrasive Wear Behaviour of Inconel 718 Microwave Clad, Proceedings of NTC-2014 National Tribology Conference, Bangalore.

Zhang B, Bi G, Nai S, Sun C, Wei J, 2016, Microhardness and microstructure evolution of TiB_2 reinforced Inconel 625/TiB_2 composite produced by selective laser melting, Opt. Laser Technol. 80, 186–195.

İnternet Kaynakları

1- https://bircelik.com/ , 11.10.2020

2- https://insg.org/wp-content/uploads/2019/01/INSG_Insight_20_Nickel_Alloys_2013.pdf , 11.10.2020

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Tolgahan ÇALI
Doğum Yeri ve Tarihi	: Kırıkkale 17/03/1996
Yabancı Dili	: İngilizce
İletişim (Telefon / e-posta)	: +90 507 763 62 78 / tolgahancali@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise	: Şehit Üsteğmen İbrahim Abanoz Anadolu Lisesi, (2010 – 2014)
Lisans	: Gümüşhane Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, (2014 – 2018)
Yüksek Lisans	: Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens., Makine Mühendisliği ABD, (2019 – 2021)