



**T.C.**  
**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÇİFT KATMANLI KAPLANAN INCONEL 625 ALAŞIMININ AŞINMA  
DİRENCİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Hüseyin ÇAKIR**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY**  
**TEMMUZ-2016**



T.C.  
İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇİFT KATMANLI KAPLANAN INCONEL 625 ALAŞIMININ AŞINMA  
DİRENCİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Hüseyin ÇAKIR**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY  
TEMMUZ-2016**

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

**Hüseyin ÇAKIR**

## ÖZET

### ÇİFT KATMANLI KAPLANAN INCONEL 625 ALAŞIMININ AŞINMA DİRENCİNİN ARAŞTIRILMASI

Nikel esaslı süperalaşımalar korozyon ve oksidasyona karşı dirençleri ile ön plana çıkmaktadır. Bundan dolayı bu alaşımlar yüksek sıcaklık ve korozitif ortam koşullarında sıklıkla tercih edilirler. Ni-bazlı süperalaşımların uygulama alanlarının başında petrol endüstrisi, kimya endüstrisi ve türbin yapımı gelir. Ancak, aşınma dirençleri tatmin edici olmadığına bu alaşımlar abrasif veya adhesif aşınma şartlarında kullanılacak ise uygun bir aşınma önleyici gerektirmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada Ni bazlı alaşımlardan olan Inconel 625 alaşımına farklı sıcaklık ve sürelerde borlama ardından TRD işlemi uygulanarak çift katmanlı olarak kaplanmıştır. Kaplama işlemlerinin ardından geleneksel metalografik incelemeler ve mikro-abrasyon aşınma testleri uygulanmıştır.

Çalışma sonucunda silisid içeriksiz 14-151  $\mu\text{m}$  kalınlık ve 1503-2334 HV sertlik değerlerine sahip kompleks borür tabakaları elde edilmiştir. XRD analizleri sonucunda numunelerde  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{CrB}$ ,  $\text{NiB}$ ,  $\text{MoB}_2$ ,  $\text{Ni}_3\text{B}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{B}$  fazları ve  $\text{Co}_{23}\text{B}_6$  çökeltisi tespit edilmiştir. Çift katmanlı kaplanan tüm numuneler yüzeyi kaplanmayan Inconel 625 alaşımına göre daha iyi aşınma direnci göstermiştir. Kaplama tabakalarındaki sertlik artışı aşınma direncini artmıştır. Aşınma mekanizması olarak tüm malzemelerde karışık tip olarak adlandırılan oyuklanma ve yuvarlanma aşınma mekanizmalarının bir arada olduğu aşınma tipi meydana gelmiştir. Ancak sertlik artışı ile oyuklanma tipi aşınmadan yuvarlanma tipi aşınmaya doğru bir geçiş eğilimi olduğu gözlemlenmiştir.

2016, 74 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Ni bazlı süperalaşımlar, Inconel 625, Borlama, Termo-reaktif difüzyon tekniği, Aşınma

## **ABSTRACT**

### **DETERMINATION OF THE ABRASION RESISTANCE OF DOUBLE COATED INCONEL 625 ALLOY**

Nickel-based superalloys possess good resistance to both corrosion and oxidation. Therefore, these alloys are widely preferred for the applications in corrosive high temperature and ambient conditions. Ni-base superalloys are thus mainly used in the oil, chemical and turbine construction industries. However, the use of a corrosion inhibitor is usually needed if the alloy is used in a highly abrasive and adhesive wear conditions and the alloy does not have a satisfactory abrasion resistance. Therefore, Ni-based alloy Inconel 625 were subjected to boriding using different temperatures and holding times followed by a coating using thermo-reactive-diffusion (TRD) method, thus a double coating was obtained on the surface in this study. After the coating process, conventional metallographic examination and micro-abrasion wear test was applied.

In this study, complex boride layers with a thickness of 14-151  $\mu\text{m}$  and a hardness of 1503-2334 HV were obtained on the surface of Inconel 625 alloy, which did not contain silicide. XRD analyses conducted also indicated that the phases of  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{CrB}$ ,  $\text{NiB}$ ,  $\text{MoB}_2$ ,  $\text{Ni}_3\text{B}_4$ , and  $\text{Fe}_2\text{B}$  as well as precipitate of  $\text{Co}_{23}\text{B}_6$  occurred. The surface coated specimens exhibited better wear resistance than that of the uncoated samples. The increase in the hardness of the coating layer increased wear resistance. A mixed mode of wear consisting of both Rolling and grooving types was observed after the wear of all the specimens. However, the increase in the hardness of the coating layer resulted in a tendency for the change of the wear mechanism from the grooving type to the rolling type.

2016, 74 pages

Keywords: Ni-based superalloys, Inconel 625, boriding, thermo-reactive diffusion technique, Wear

## TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışmam sırasında maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, tecrübeleriyle her zaman yol gösteren ve yolumu aydınlatan değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KANCA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan bilgi, tecrübe ve değerli zamanını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Ali GÜNEN hocama, borlama çalışmalarında yanımda olan Arş. Gör. Mehmet DEMİR hocama, TRD çalışmalarında destek olan Prof. Dr. Bülent KURT hocama, aşınma testlerinde gösterdiği ilgiden dolayı sayın Doç. Dr. Sabri GÖK hocama, görüntüleme çalışmalarında yardımcı olan MMK Metalürji ve TOSYALI Demir Çelik laboratuvarı çalışanlarına teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma sırasında onlardan çaldığım değerli zamanlar için bana hoşgörü ile yaklaşan değerli eşim Yadigâr ve canlarım Ayşenur, Azra ve Mustafa Ali' ye teşekkür ederim.

Hüseyin ÇAKIR

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER .....	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
SİMGELER ve KISALTMA DİZİNİ .....	X
1. GİRİŞ.....	1
2. SÜPERALAŞIMLAR.....	4
2.1. Süperalaşımların Metalurjisi .....	5
2.2. Nikel Bazlı Süperalaşımlar.....	7
2.2.1. Inconel Alaşımları.....	10
2.2.1.1. Bileşimleri .....	10
2.2.1.2. Özellikleri.....	10
2.2.1.3. İşlenebilirlik.....	11
2.2.1.4. Kaynak Edilebilirlik.....	12
2.2.1.5. Kullanım Alanları.....	12
2.2.2. Inconel 625 Nikel Bazlı Süperalaşımı.....	13
2.3. Demir Bazlı Süperalaşımlar.....	14
2.4. Kobalt Bazlı Süperalaşımlar.....	15
3. BORLAMA.....	17
3.1. Bor Elementi ve Borlama.....	18
3.2. Borlama İşlemi Sonucu Meydana Gelen Yapılar.....	18
3.2. Borlama Yöntemleri.....	20
3.2.1. Katı borlama .....	20
3.2.2. Pasta borlama .....	22
3.2.3. Sıvı borlama .....	23
3.2.3.1. Daldırma yöntemi.....	23
3.2.3.2. Elektrolitik yöntemi.....	23
3.2.3.3. Derişik Çözeltide Borlama.....	24
3.2.4. Gaz Ortamda Borlama.....	25

3.2.5. Plazma Borlama Yöntemi .....	27
3.3. Borlama İşleminin Avantajları.....	27
3.4. Borlama İşleminin Dezavantajları.....	28
4. NİKEL BAZLI ALAŞIMLARIN BORLANMASI .....	29
4.1. Nikel Bazlı Alaşımların Borlanmasında Oluşan Fazlar .....	29
4.2. Borlanmış Nikel Bazlı Alaşımların Karakterizasyonu ve Mekanik Özellikleri.....	30
5. TERMOREAKTİF DİFÜZYON YÖNTEMİ.....	31
5.1. TRD Yönteminin Üstünlükleri.....	31
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	33
6.1. Giriş .....	33
6.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler .....	33
6.3. Bor ve TRD Kaplama Aparatları.....	34
6.4. Numune Hazırlama.....	35
6.5. Borlama İşlemi.....	37
6.6. TRD İşlemi .....	37
6.7. Metalografik Muayene.....	38
6.8. X Işını Analizi.....	40
6.9. Mikrosertlik Analizi.....	40
6.10. Aşınma Testi.....	41
7. SONUÇLAR.....	44
7.1. Giriş.....	44
7.2. Metalografik İncelemeler.....	44
7.3. Tabaka Yapısı ve EDS Analizleri.....	51
7.4. XRD Analizleri.....	52
7.5. Mikro-abrasyon Aşınma Test Sonuçları.....	53
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR .....	69
ÖZGEÇMİŞ .....	74



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Çeşitli alaşım elementlerinin mikroyapıdaki olumlu etkileri .....	5
Çizelge 2.2. Çeşitli elementlerin süperalaşım üzerindeki etkisi. ....	9
Çizelge 2.3. Inconel alaşımlarının kimyasal kompozisyonları.....	10
Çizelge 2.4. Inconel 625 süperalaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	14
Çizelge 3.1. Sıvı borlamada kullanılan bor kaynakları ve özellikleri .....	25
Çizelge 3.2. Gaz halindeki borlayıcılar ve özellikleri. ....	26
çizelge 6.1. Inconel 625 alaşımının kimyasal bileşimi.....	34
Çizelge 6.2. Nanobor tozunun bazı özellikleri.....	34
Çizelge 7.1. Kaplama tabakası kalınlıkları ve sertlik değerleri.....	49
Çizelge 7.2. Mikro-abrasyon aşınma testi ile aşındırılan numunelerin aşınma iz hacmi değerleri.....	54

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Nikel bazlı süperalaşımdan imal edilen gaz türbin motoru.....	5
Şekil 2.2. Nikel bazlı süperalaşımlardaki $\gamma$ ve $\gamma'$ çökelti fazları. ....	6
Şekil 2.3. 1050°C’de sürünme testi sonrası CMSX-4 alaşımında TCP oluşumu. ....	7
Şekil 2.4. Periyodik tablodaki elementlerin süperalaşımlar üzerindeki etkileri.....	9
Şekil 3.1. Demir-bor denge diyagramı.....	18
Şekil 3.2. Bor tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapının şematik resmi.....	19
Şekil 3.3. Katı borlama yönteminin şematik resmi .....	21
Şekil 3.4. Üzerine pasta borlama ajanı sürülmüş numune .....	22
Şekil 3.5. Gaz borlama ünitesi.....	26
Şekil 6.1. Paslanmaz çelik pota.....	34
Şekil 6.2. Yüksek sıcaklık fırını.....	35
Şekil 6.3. Numune kesme cihazı.....	36
Şekil 6.4. Numune parlatma cihazı.....	36
Şekil 6.5. Numune bakalite alma cihazı.....	37
Şekil 6.6. Soğuk kalıplama tekniğiyle bakalite alınan numuneler.....	38
Şekil 6.7. Nikon MA 300 ters metal mikroskobu.....	39
Şekil 6.8. SEM mikroskobu.....	39
Şekil 6.9. X-ışını cihazı.....	40
Şekil 6.10. Mikrosertlik cihazı.....	41
Şekil 6.11. Sabit top mikro-abrasyon test yöntemi.....	42
Şekil 6.12. Deneylerde kullanılan SiC aşındırıcı partiküllerin SEM görünümü.....	43
Şekil 7.1. Ticari Inconel 625 alaşımının optik mikroyapı görünümü.....	44
Şekil 7.2. Nanobor tozu ile	
a) 800 °C’de 6 saat süre ile borlanan numunenin optik mikroyapısı.....	45
b) 900 ° C’de 6 saat süre ile borlanan numunenin optik mikroyapısı.....	45
c) 1000 °C’de 6 saat süre ile borlanan numunenin optik mikroyapısı.....	46
Şekil 7.3. Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış ardından 1000 °C’de 2 saat süreyle Ti-Fe-C tozuyla TRD işlemine tabi tutulan inconel 625 alaşımının mikroyapı resimleri.	
a).....	47
b).....	47

c).....	48
Şekil 7.4. Farklı süre ve sıcaklıklarda borlama ardından 1000 C’de 2 saat süre ile Ti-Fe-C tozları ile TRD işlemine tabi tutulan numunelerin kaplama bölgesinden matrise doğru sertlik dağılımı.....	50
Şekil 7.5. 900 °C’de 6 saat süre ile borlanan numunenin farklı bölgelerinden alınan EDS analiz değerleri.....	51
Şekil 7.6. 900 °C’de 2 saat borlamanın ardından 1000 °C’de 2 saat süre Ti-Fe-C tozu ile TRD işlemine tabi tutulan numunenin EDS haritası.....	52
Şekil 7.7. 1000 °C’de 3 saat süre ile borlanmış Inconel 625 alaşımın XRD analizi.....	52
Şekil 7.8. 1000 C’de 6 saat süre ile borlamanın ardından 2 saat süre ile Ti-Fe-C tozu ile TRD uygulanan numunenin XRD analizi.....	53
Şekil 7.9. İşlemsiz ticari Inconel 625 alaşımının Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kaybı grafiği.....	55
Şekil 7.10. 800 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanan ardından da 1000 °C’de 2 saat TRD işlemine tabi tutulan numunelerin Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kayıpları grafiği.....	56
Şekil 7.11. 800, 900 ve 1000 °C’de 2 saat borlanan ardından da 1000 C’de 2 saat TRD işlemine tabi tutulan numunelerin Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kayıpları grafiği.....	56
Şekil 7.12. 900 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanan ardından da 1000 °C’de 2 saat TRD işlemine tabi tutulan numunelerin Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kayıpları grafiği.....	57
Şekil 7.13. 800, 900 ve 1000 °C’de 4 saat borlanan ardından da 1000 C’de 2 saat TRD işlemine tabi tutulan numunelerin Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kayıpları grafiği.....	58
Şekil 7.14. 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanan ardından da 1000 °C’de 2 saat TRD işlemine tabi tutulan numunelerin Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kayıpları grafiği.....	58
Şekil 7.15. 800, 900 ve 1000 °C’de 6 saat borlanan ardından da 1000 C’de 2 saat TRD işlemine tabi tutulan numunelerin Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kayıpları grafiği.....	59

Şekil 7.16. 90 rpm 5 N'luk yük altında aşınma testine tabi tutulan işlemsiz numunenin SEM aşınma yüzey görüntüsü.....	61
Şekil 7.17. 90 rpm ve 5 N luk yük altında teste tabi tutulan S1 numunesinin SEM aşınma yüzey görüntüsü.....	62
Şekil 7.18. 90 rpm ve 5 N luk yük altında teste tabi tutulan S4 numunesinin SEM aşınma yüzey görüntüsü.....	63
Şekil 7.19. 90 rpm ve 5 N luk yük altında teste tabi tutulan S7 numunesinin SEM aşınma yüzey görüntüsü.....	65



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### KISALTMALAR

KHM	:Hacim Merkezli Kübik
KYM	:Yüzey Merkezli Kübik
HSP	:Hekzagonal Sıkı Paket
TCP	:Topolojik Sıkı Paket
TRD	:Termo-reaktif difüzyon
EPMA	:Elektron Prob Mikro Analizi
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
XRD	:X-ışını Difraksiyonu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
THM	: Hacim Merkezli
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
RPM	: Revolution Per Minute

## 1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte endüstride kullanılan malzemeler her geçen gün yeni geliştirilen malzemelere yerini bırakmıştır. Maden bilimci ve kimyacı olan William Gregor tarafından 1800'lü yıllara doğru Titanyum keşfedilmiştir. Titanyum oksitten titanyumu elde etmek yüz yıldan fazla bir sürede gerçekleşmiştir. Titanyum alaşımları sahip olduğu mekanik özellikleri dolayısıyla 1900'lü yıllarda endüstride hızlı bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır (Leyens ve Peters, 2003). Ancak Titanyum ve alaşımlarının yüksek sıcaklıklardaki korozyona (oksitlenme) uğrama durumları oda sıcaklığına göre 7-8 kat daha fazla olması insanoğlunu yüksek sıcaklıklarda kullanılmak üzere yeni malzeme oluşumları üzerine araştırmaya yönlendirmiştir. İlk süperalaşımlar 1950-1970 yılları arasında Östenitik paslanmaz çeliklerin bir modifikasyonu olarak geliştirilmiştir (Dinç,2013).

Ortalama 0,6 Tm sıcaklıklarda kullanılabilen ve buna rağmen oksitleyici ortamlarda aşırı mekanik gerilim ve gerinimlere dayanabilmek için kararlılıklarını koruyabilen malzemeler "süperalaşımlar" olarak tanımlanırlar. Genel olarak Ni, Fe ve Co olmak üzere üç farklı grupta incelenirler (Sims ve ark., 2007).

Süperalaşımlar 900-1050 °C'ye kadar mekanik özellikleri ve metalürjik kararlılıklarını kaybetmezler (Pollock ve Tin, 2006). 1980' li yıllarda teknolojik ilerlemeler sayesinde süperalaşımlara bazı elementlerin katıla birliği denenmiş ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Daha sonraları bu alandaki çalışmalar hızlanmış ve bu alaşımlara has spesifik özellikler kazandırılmıştır. Nikel esaslı alaşımlar korozyon (Ueda ve ark., 2000; Petrova ve ark., 2007) ve oksidasyona karşı mükemmel dirençleri (Ueda ve ark., 2000; Zhao ve ark., 2004; Petrova ve ark., 2007) ile bilinmektedir. Süperalaşımlar özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında sıklıkla tercih edilirler. Süperalaşımların başlıca uygulama alanlarına uçak motorları ve endüstriyel gaz türbinlerinin; yanma odaları, pervane kanatçıkları, diskler ve şaftlarda, nükleer güç sistemlerinde ise; kontrol çubukları, yaylar ve akış valflerinde, uzay araçlarında aerodinamik araç zırhları, roket motor parçaları), petrokimya sanayisi (reaksiyon kapları, borular, pompalar), ısıl işlem ekipmanları tepsiler, karıştırıcılar, konveyör bantları) vb. birçok spesifik kısımlar örnek verilebilir (Dinç,2013).

Inconel 625, nikel krom bazlı süperalaşım gurubundandır. Yüksek mukavemeti, kolay işlenebilme özelliği (kaynakla birleştirme dahil) ve üstün korozyon direnci dolayısıyla kullanılan bir alaşımdır. Inconel 625 'in çalışma sıcaklık aralığı dondurucu soğuklardan 982°C'ye kadardır. Inconel 625'in yüksek mukavemeti nikel-krom tabanı üzerine, molibden ve niobyum katkılarının pekiştirici etkisinden gelir. Bu nedenle, inconel 625 için diğer nikel esaslı alaşımlarda olduğu gibi çökme sertleşmesi işlemlerine ihtiyaç duyulmaz. Inconel 625 içeriğindeki bu elementlerin bir diğer görevi ise geniş çalışma aralığındaki korozitif ortamlar ve oksidasyon, karbürizasyon gibi yüksek sıcaklık etkilerine karşı yüksek direnç sağlamaktır. Inconel 625'i deniz suyunda kullanım için mükemmel bir seçim haline getiren başlıca özellikleri; karıncalanma ve çatlak korozyonu gibi bölgesel korozyona uğramaması, yüksek korozyon yorulma dayanımı, yüksek çekme mukavemeti ve klorid iyon gerilim korozyonu çatlamasına dayanıklı olmasıdır. Ancak, düşük yüzey sertliğinden dolayı Inconel 625 alaşımının aşındırıcı veya yapışkan aşınma koşullarında kullanılması durumunda uygun aşınma koruması gerektirir (Anonymous,2013).

Günümüzde metal yüzeylerinin dış ortamların etkilerinden korunması, kullanımları sırasında maruz kaldıkları aşınma, sürtünme korozyon ve yorulma, etkilerini en aza indirmek amacıyla çok geniş çeşitlilikte yüzey modifikasyonu işlemleri uygulanmaktadır. Malzeme yüzeyinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde en kolay ve en ekonomik yöntemlerin başında yüzey sertleştirme işlemleri gelir. Bu yöntemler malzeme yüzeyinde nitür, karbür veya borür oluşturularak yüzeyin sert, mukavemetli ve aşınmaya dayanıklı olmasını sağlarken matris kısmında herhangi bir sertlik değişimi meydana getirmediklerinden statik ve dinamik yüklere maruz kalan malzemelerde meydana gelecek enerjiyi absorbe ederek tokluk sağlar. Bu yöntemlerin başında termokimyasal işlemlerden olan borlama ve TRD (Termo - reaktif difüzyon) ısıl işlemi gelir (Çakır ve ark.,2016).

Borlama termokimyasal bir yüzey kaplama yöntemi olup herhangi bir bor bileşiği kullanılarak yüksek sıcaklıklarda bor atomlarının malzeme içerisine yayılması sonucu altlık malzeme ile kimyasal bir bağa sahip borür fazlarının oluşumudur. Dünyadaki bor rezervlerinin yaklaşık %70'inin Türkiye'de olması sebebiyle ve bor bileşiklerinin üstün özellikleri göz önüne alındığında, bor kaplamaların ülkemiz açısından ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Borlama prosesi katı, sıvı gaz, plazma ve iyon difüzyonu gibi çeşitli tekniklerle uygulanmaktadır (Sinha, 1991). Bu yöntemler arasında katı borlama (kutu borlama) tekniği en kullanışlı olup diğer yöntemlere nazaran daha teknolojik, basit ve ekonomiktir (Güven ve ark.,2013). Patentlerde belirtilen %5 B<sub>4</sub>C, %5 KBF<sub>4</sub> ve %90 SiC oranlarındaki karışımlar katı borlama için ideal sayılmaktadır. Toz karışım sızdırmaz bir pota içerisine konur ve kaplanacak parça toz karışım içine gömülür. İşlemin uygulanacağı borlama sıcaklığında hazır bekletilen fırın içerisine pota yerleştirilir, işlem süresince bekletilir ve ardından pota fırından alınarak açık havada soğumaya bırakılır. Katı borlama tekniğinde deney parçası yüzeyinde oluşan kalıntılar katman oluşturmadığından daha kolay temizlenmektedir (Bayça ve Şahin,2004).

Bir diğer termokimyasal kaplama yöntemlerinden biri olan TRD prosesi, çelik malzemelerin yüzeyinde karbür, nitrür ve karbo-nitrür gibi sert ve aşınma direnci yüksek olan tabakaların oluşturulduğu bir yöntemdir, TRD prosesinde çelik altlık malzemede karbon ve azot, vanadyum, niyobyum, tantalyum, krom, molibden veya tungsten gibi karbür veya nitrür oluşturu elementlerle biriken bir tabaka meydana getirmek için difüze olur. Difüze olan karbon ve azot biriken tabakada karbür ve nitrür oluşturu elementlerle ana matrix malzeme yüzeyinde metalurjik olarak bağlanmış olan karbür ve nitrür tabakaları yoğun bir biçimde oluşturacak şekilde reaksiyona girer (Kon,2006).

Bu çalışmada; Inconel 625 süperalaşımı çift katmanlı (borlama ardından TRD) kaplanmış ve bu kaplama tabakasının aşınma direnci araştırılmıştır. Çift katmanlı kaplama işleminin sebebi nitrürleme (Aw ve ark., 1997; Sun, 2003), borlama (Muhammed ve ark., 1999; Baydoğan ve ark., 2013) ve TRD (Arai, 1991) proseslerinde istenilen kalınlık ve sertlikte kaplama tabakaları elde edilemediğinden uygulanmıştır. Inconel 625 süperalaşımı belirlenen sıcaklık ve sürelerde önce borlama ardından TRD işlemine tabi tutulmuştur. Çift katmanlı kaplanan numunelerin kaplama tabakalarının mikroyapı incelemeleri optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM), EDS (energy-dispersive spectroscopy) ve XRD (x-ray diffraction) ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kaplama tabakasının sertlik, kaplama tabakası kalınlığı incelenmiştir. Kaplanan ve kaplanmayan numunelerin aşınma dirençleri mikro-abrasyon aşınma testi ile belirlenmiştir.



## 2. SÜPERALAŞIMLAR

Süperalaşımalar, normal alaşımlara göre yüksek sıcaklıklardaki şiddetli mekanik gerilimlere ve yüzey yapılarındaki değişimlere karşı geliştirilmiş ısı kararlılığı yüksek, nikel, demir-nikel veya kobalt bazlı alaşımlardır (Field, 1968).

Süperalaşımalar, yüzey dengesinin gerektiği ve yüksek gerilmelerin yaşandığı 650 °C ve üstü sıcaklıklarda tercih edilmektedir. “Süperalaşım” ifadesi demir, nikel, kobalt ve krom kombinasyonları veya demir, nikel ve kobalt esaslı malzeme alaşımları için kullanılabilir. Bu alaşımlar daha düşük miktarlarda tungsten, molibden, tantal, niyobyum ve alüminyum olmak üzere çeşitli demir, nikel, kobalt ve krom elementleri içerirler. Sürünme-kırılma (creep-rupture) direncini arttırmak için, nikel esaslı süperalaşımlara, düşük miktarlarda bor, zirkonyum ve hafniyum katılması uygundur (Ezugwu, 1998).

Süperalaşımlara yüksek sıcaklık alaşımları da denmektedir. Mühendislik malzemelerinde aranan daha iyi dayanım-ağırlık oranı, yüksek ısılarında stabilite ve korozyon dirençleri sağladıklarından dolayı geliştirilmişlerdir. Süperalaşımalar yüksek ısı, aerodinamik sürtünme ve korozyon etkilerinin çok hissedildiği uzay ve havacılık endüstrisinde, turbojet motorlarının türbin kanatları ve fırın parçalarında, korozif etkili kimyasalların muhafaza ve taşınmasında kullanılan potalarda ve petrol rafineri tesisleri gibi bazı endüstrilerde diğer alaşımlara göre çok iyi sonuçlar verdiği için tercih edilmektedirler (Anonim, 2009).

Süperalaşımların oluşturduğu malzeme grubu için kesin bir sınır çizilmesi zordur. Ancak çoğunlukla kabul gören bir tanıma göre süperalaşımalar daha çok VIII A grubu elementlerinden oluşan ve yüksek sıcaklık uygulamaları amacıyla konfigüre edilen sıradan uygulamalara nazaran daha yüksek mekanik gerilimlerde ve yüzey stabilitesinin maksimum seviyede olması istenen uygulamalarda kullanılan alaşımlardır (Çelik, 2006).

Süperalaşımların yapı ve özellikleri farklıdır ve genel itibarıyla üç gruba ayrılırlar. Bunlar:

- Nikel bazlı süperalaşımalar
- Demir bazlı süperalaşımalar
- Kobalt bazlı süperalaşımalar



Şekil 2.1. Nikel bazlı süperalaşımdan imal edilen gaz türbin motoru (Loria, 1992).

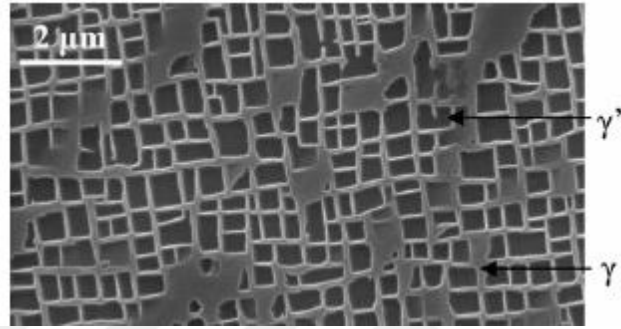
## 2.1. Süperalaşımlar Metalurjisi

Süperalaşımlar içerdiği fazlar bakımından incelendiğinde oldukça zengin alaşımlar olduğu görülmektedir. Nikel bazlı süperalaşımlarda ana malzeme gamma ( $\gamma$ ) fazında ve YMK yapıdadır. Aynı zamanda matris Co, Fe, Cr, W, Mo, Re gibi çeşitli elementler içermektedir. Al-Nb-Ta-Cr-Ti gibi elementlerin matris yapıda katı eriyik sertleşmesine etkisi olduğu bilinmektedir. Farklı alaşım elementlerinin mikroyapıya olan etkileri tablo 2.1 de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Çeşitli alaşım elementlerinin mikroyapıdaki olumlu etkileri (Zeitara, 2011).

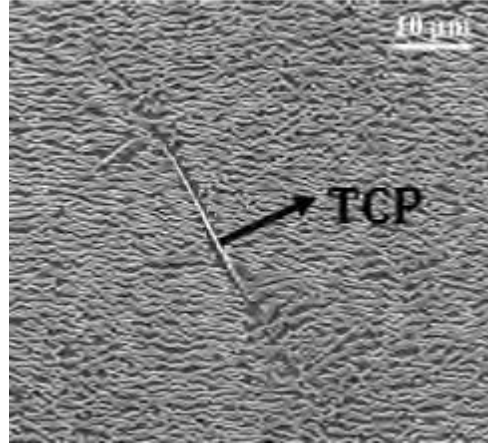
Alaşım Elementi	Mikroyapıdaki Etkisi
Co-Cr-W-Fe-Mo-Ta-Re-Ru	Katı eriyik sertleşmesi
W-Nb-Ta-Ti-Mo-Hf	MC
Cr	M7C3
Cr-Mo-W	M23C6
Mo-Nb-W	M6C
Al-Ti	$\gamma'$ Ni <sub>3</sub> (Al-Ti)
Co	$\gamma'$ Solvus sıcaklığını düşürür
Al-Ti-Nb	Çökelme sertleşmesi
Al-Cr-Y-La-Ce	Oksidasyon direnci
B-Ta	Sürünme özelliklerini geliştirir
B	Kopma gerilmesini artırır
Re-Ru	$\gamma'$ Tane irileşmesini geciktirir
Cr-Mo-W-Re	TCP oluşumuna neden olur

Süperalaşımlarda gama ( $\gamma$ ) fazı ile birlikte görülen gama üssü ( $\gamma'$ ) olarak adlandırılan ve ana malzeme ile uyumlu NiAl, Ni<sub>3</sub>Al, NiAl<sub>3</sub> bileşimindeki çökelti fazıdır (Reed, 2006). Şekil 2.2'de  $\gamma$  fazı ve  $\gamma'$  fazı mikroyapısı birlikte görülmektedir. Yapıda oluşan bu fazlar çökeltme sertleşmesine neden olmakta ve bu faz tek kristalli süperalaşımlarda 973 °C' ye kadar olan sıcaklıklarda dislokasyon oluşumunu sınırlandırarak sertleşmesini sağlamaktadır (Jovanovic ve ark., 2007).



Şekil 2.2. Nikel bazlı süperalaşımlardaki  $\gamma$  ve  $\gamma'$  çökelti fazları (Graverend ve ark., 2007).

Topolojik sıkı paket fazlarında “TCP” nikel bazlı süperalaşımlarda rastlanan ve istenmeyen fazlardandır. Süperalaşımlarda bu fazların oluşmasının nedeni olarak ilave edilen Mo-W-R gibi refrakter elementlerin etkin olduğu söylenebilir. P, R, s, m, gibi isimler verilen bu fazlar kimyasal kompozisyondan, ısıl işlem metodundan ve servis şartlarının kontrolsüzlüğünden kaynaklandığı düşünülmektedir. TCP fazlarının çekirdeklenmeleri  $A_xB_y$  bileşimdeki tane sınırlarındaki karbürlerin üzerinde gerçekleşmektedir. TCP oluşumuna neden olan bir diğer neden de yüksek sıcaklıklarda  $\gamma'$  yapısının irileşmesidir. TCP fazları mikroyapıda parlak görünürler. Bu faz malzemenin düşük sıcaklıkta gevrekleşmesine neden olup, erken yorulmasını tetiklediğinden istenmeyen bir durumdur. Şekil 2.3'de CMSX-4 alaşımında TCP fazı görülmektedir bu faz 1050 °C' de sürünme testi sonrasında meydana gelmiştir. MC, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, M<sub>6</sub>C bileşimindeki karbürler ve M<sub>3</sub>B<sub>2</sub> bileşimindeki tetragonal yapılu bir intermetalik olan borürlerde nikel bazlı süperalaşımların yapılarında görülen diğer fazlar olarak karşımıza çıkmaktadır (Reed, 2006; Graverend ve ark., 2007; Zhen ve ark., 2011).



Şekil 2.3. 1050 °C'de sürünme testi sonrası CMSX-4 alaşımında TCP oluşumu (Graverend ve ark., 2007).

## 2.2. Nikel Bazlı Süperalaşımalar

Nikel elementi; yoğunluğu 8,908 g/cm<sup>3</sup> ve ergime derecesi 1453°C olup oda sıcaklığında YMK yapıya sahiptir. Oda sıcaklığında demir HMK, kobalt ise HSP yapıdadır. Demir ve kobalt esaslı süperalaşımalar yüksek alaşımlıdır aynı zamanda oda sıcaklığında östenitik  $\gamma$  KYM yapıdadırlar. Bu nedenle süperalaşımalar, YMK yapının üretim ve işleme avantajlarını içerirler(Dinç, 2013).

Nikel bazlı süperalaşımlarda katı eriyikler ve ikincil faz intermetalik çökelti mekanizmaları yapının mukavemetlendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Katı eriyik nikel alaşımları daha çok tavlama sıcaklığında ve tavlama temperlenmesinde kullanılır. Maksimum süneklik ve yorulma dayanımı, 870-980°C'lik düşük tavlama sıcaklığında elde edilir. Optimum yorulma direnci ise 1120-1200°C'lik bir yüksek sıcaklık tavlamasında elde edilir. Aynı zamanda yüksek sıcaklık tavlaması 600°C'den daha yüksek çalışma koşullarında sürünme kopma özelliklerini sağlar. Katı eriyik nikel alaşımları genellikle uzay uygulamalarında kullanılırlar. Hastelloy X, Inconel 601, Inconel 625 gibi süperalaşımalar bazı önemli katı eriyik nikel alaşımlarındandır (Anonim, 2009).

Bu alaşımlar genellikle çökeltme-sertleşmesi ile dayanımı arttırılan nikel alaşımları olup, mikroyapıda ikinci bir fazın çökeltmesi sonucu meydana gelirler.  $\gamma'$  veya  $\gamma''$  fazları çökelen fazlardır, alaşımın sertliğini ve dayanımını yükseltirler. Genellikle bu alaşımlarda,  $\gamma'$  intermetalik Ni<sub>3</sub>(Al,Ti) fazın oluşumunda çökelti sertleşmesini sağlamak

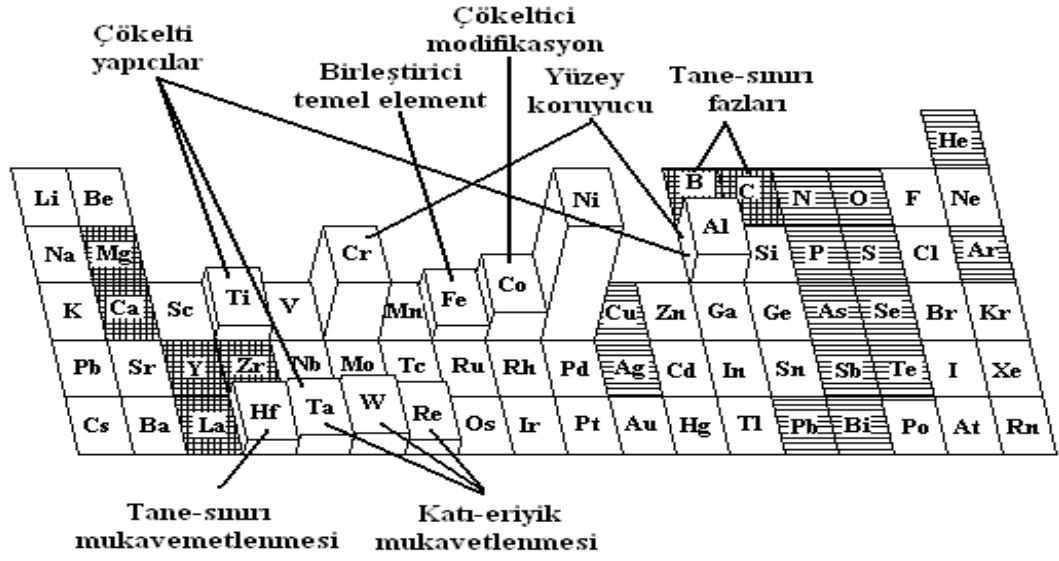
için alüminyum ve titanyum kullanılır. Nadiren de olsa bazen alüminyum ve titanyumunla birlikte niobiyumda kullanılır. Bunun sonucunda ise  $\gamma''$   $Ni_3Nb$  oluştuğu gözlenir. Inconel 718 süperalaşımında çökeltme sertleşmesi sıcaklığını geciktirdiği görülmüştür. Bu nedenle niobiyumun dayanımlı süperalaşımlarda kaynak kabiliyeti yüksektir (Dye ve ark., 2001).

Inconel 600'ün bir çökeltme çeşidi olan Inconel 750 alaşımında, 540 °C'de yapılan çekme deneylerinde Inconel 600'den yaklaşık üç kat daha fazla akma mukavemeti göstermiştir. Çökeltme sertleştirmeli süperalaşımlar için uygulanan ısıl işlemler sırasıyla, 600-815 °C'de, bir veya daha fazla çökelti için devamında 970-1175°C'da gerçekleştirilmektedir (Veli Çay ve Ozan, 2005).

Uzay ve havacılık endüstrisi çökeltme-sertleştirmeli süperalaşımların en fazla tercih edildiği alanlardır. Roket motorları, uçak türbin kanatları (pervane kanadı, disk, shaft, halka), çeşitli kompresörler ve nükleer enerji üreteçlerinde (yay, cıvata vb.) kullanım alanlarından bazılarıdır (Bradley, 1989).

Yüksek çalışma sıcaklıklarındaki ortamlarda döküm alaşımları dövme alaşımlarına göre daha iyi sonuç vermektedir. Bu uygulamaların genelinde döküm nikel süperalaşımları tercih edilir. Türbin pervane kanatlarında özellikle INCO 713, INCO 100, B-1900, MAR-M 247 ve MAR-M 200 gibi döküm nikel süperalaşımları kullanılmaktadır. Ayrıca B-1900, MAR-M 247 ve MAR-M 200 gibi yüksek dayanımlı döküm alaşımlarına az miktarda hafnium elementi katılması orta sıcaklık sünekliğini yükseltmek amacıyla kullanılır (Anonymous, 2012).

Inconel 625 alaşımı 800 ° C altındaki sıcaklıklarda son derece kapsamlı ve bazı durumlarda da 1200 ° C altındaki sıcaklıklarda (Smith ve ark., 2001; Spinelli ve ark., 2004) orta mukavemeti ve mükemmel aşınma direnci kombinasyonu gerektiren uygulamalarda kullanılan katı çözümlü güçlendirilmiş nikel bazlı bir süperalaşımdır. Inconel 625 esas olarak ostenit mikroyapısına sahiptir. Katı çözümlünün kuvvetlendirilmesini sağlayan Cr ve Mo gibi elementlerin yer değiştirmesi ile alaşım oluşturan elementler daha da mukavemetlendirilmiştir. Çökelti güçlendirilmesi için Nb, Al ve Ti gibi elementlerin bulunması ile birlikte aynı zamanda dağıntık  $C_0$  fazı [ $Ni_3(Al, Ti, Nb)$ ], yarı kararlı  $C_{00}$  fazı ( $Ni_3Nb$ ), bloklu MC (M tarafından güçlendirilebilir Nb, Ti),  $M_6C$  (M Si, Ni, Cr temsil eder) ve  $M_{23}C_6$  (M Cr temsil eder) karbürleri (Anonymous, 2013; Zhang, 2013) göstermektedir.



Şekil 2.4. Periyodik Tablodaki Bazı Elementlerin Süperalaşımlara etkileri(Koster, 2010)

Çizelge 2.2. Çeşitli Elementlerin Süperalaşımlar Üzerindeki Etkisi (Bradley, 1989).

Element Etkileri	Fe-esaslı	Co-esaslı	Ni-esaslı
Kati-eriyik Mukavemetlendiriciler	Mo, Cr	Mo, Nb, Cr, Ta, Ni, W	Fe, Co, Cr, Mo, W, Ta
Yüzey merkezli kübik matris stabilize ediciler	Co, C, Ni	Ni	Co
<b>Karbür şekilleri;</b> MC tipi M <sub>7</sub> C <sub>3</sub> tipi M <sub>23</sub> C <sub>6</sub> tipi M <sub>6</sub> C tipi	Ti -- Cr Mo	Ti Cr Cr W, Mo	Nb, Mo, W, Ta, Ti Cr Mo, Cr, W W, Mo
<b>Karbonitritler;</b> M(CN) tipi	N, C	N, C	N, C
Karbürlerin genel çökelticileri	P	--	--
$\gamma'$ Ni <sub>3</sub> (Al, Ti)	Ti, Al, Ni	--	Ti, Al
Hegzagonal $\eta$ (Ni <sub>3</sub> Ti) dönüşüm geciktiriciler	Zr, Al	--	--
$\gamma'$ 'nin çözücü sıcaklığını yükselticiler	--	--	Co
$\gamma'$ 'nin çözücü sıcaklığını düşürücüler	--	--	Cr
Sertleşme çökelticiler ve/veya intermetalikler	Nb, Al, Ti	Mo, Al, Ta, W	Ti, Al, Nb
Oksidasyon direnci	Cr	Cr, Al, Ta	Cr, Al, Ta
Sıcak korozyon direnci geliştiriciler	Y, La	Th, La, Y	Th, La
Sülfidasyon direnci	Cr	Cr	Cr
Tane sınırı morfolojisi değişkenleri tarafından sürünme-kopma özelliklerini artırıcılar	B	Zr, B	Zr, B
Ara-sıcaklı sünekliliğini geliştiriciler	--	--	Hf
Tane sınırı segregasyonuna neden olucular	--	--	Zr, C, B,

### 2.2.1. Inconel Alaşımları

Inconel alaşımlarını ilk gelişim serüveni 1940'lı yıllara dayanmaktadır. İngiltere, Hereford şehrindeki Wiggin Works'teki araştırmacılar tarafından Whittle jet motorunun geliştirilmesi amacıyla geliştirilmiştir.

Inconel, Special Metals şirketinin ticari siciline kayıtlı östenitli nikel – krom bazlı süperalaşım ailesinin markasına verilen adıdır. Bu alaşımlar genel itibariyle yüksek sıcaklık alaşımlarıdır. Inconel alaşım ailesinin öne çıkan ticari isimleri arasında: Inconel 625, Chronin 625, Altemp 625, Haynes 625, Nickelvac 625 ve Nicrofer 6020' i sayabiliriz (Anonymous, 2014).

#### 2.2.1.1. Bileşimleri

Inconel alaşımlarında birçok farklı element olmasına rağmen hepsinde matris nikel, diğer element ise kromdur.

Çizelge 2.3. Inconel alaşımlarının kimyasal kompozisyonları

ALAŞIM	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Co	Mn	Cu	Al	Ti
Inconel 600	72.0	14-17	6-10	-	-	-	1	0.5	-	-
Inconel 617	44.2-56	20-24	3	8-10	-	10-15	0.5	0.5	0.8-1.5	0.6
Inconel 625	58	20-23	5	8-10	3.15-4.15	1	0.5	-	0.4	0.4
Inconel 718	50-55	17-21	Denge	2.8-3.3	4.75-5.5	1	0.35	0.3	0.65-1.15	0.3
İnconelX750	70	14-17	5-9	-	0.7-1.2	1	1	0.5	0.4-1	2.25-2.75

#### 2.2.1.2. Özellikler

Inconel alaşımları, özellikle oksidasyon ve korozyonun yoğun hissedildiği uygulamalarda, ısı ve basıncın maruziyeti altındaki çok ağır çalışma şartlarında kullanım için ideal bir alaşımdır. Inconel, ısıya maruz kaldığında ısıyla birlikte kalın, kararlı ve pasifize edici bir katman oluşturarak yüzeyde oksitlenmenin yayılmasını durdurur. Çelik ve alüminyum gibi malzemelerin yüksek sıcaklıklarda oluşan kristal boşlukları sonucu mukavemetlerini yitirerek plastik deformasyona uğramalarına karşın inconel alaşımları aynı sıcaklık aralığında mukavemetini koruduğundan, yüksek sıcaklık uygulamaları için

vazgeçilmez alaşımlardır. Inconel alaşımlarının cinsine bağlı olarak katı çözeltili takviyesi veya çökeltme takviyesi sayesinde yüksek sıcaklık mukavemeti kazandırılır. Ayrıca nikel içerisine az miktarda niyobyum ilavesi ile intermetalik  $Ni_3Nb$  bileşiği veya gama primer fazı oluşturularak yaşlandırma sertleştirilmesi veya çökeltme dayanımı elde edilir. Yüksek sıcaklıklarda kayma ve akmayı yapıda oluşan gama primer fazı engellemektedir, bu faz küçük kübik kristaller teşekkül ederek yüksek sıcaklık dayanımını güçlendirmektedir (Anonymous, 2014).

### **2.2.1.3. İşlenebilirlik**

Inconel alaşımları işleme sırasında hızlı bir şekilde sertleştiğinden bilinen üretim yöntemleriyle işlenmesi ve şekillendirilmesi oldukça zordur. Birinci işlemde hemen sonra sertleşme olduğundan ikinci işlemde ve daha sonraki aşamalarda parçanın veya kesici aletin tahrip olmasına neden oluyor. Özellikle Inconel 718 gibi alaşımlarda kullanılan kesici aletin sert, kesme hızının yavaş ve geçiş sayısının en az olması gerekmektedir. Bir diğer işleme tekniği olarak da yaşlandırma öncesi solüsyon haldeyken şekillendirme yapıp sadece temizlik pasosu yaşlandırma sertleştirilmesi sonrasına bırakılabilir. Dış açma işlemi dış yüzeylerde tek noktadan tornalama veya ovalama yöntemiyle yapılabileceği gibi deliklerde ve iç cidarlarda dış açmak yerine paslanmaz çelikten hazırlanan dişli aksam delik içine veya iç yüzeylere kaynak ya da lehim ile monte edilebilir. Ayrıca deliklere dış açmada freze tezgahlarında kullanılabilir. Plakalar su jetleri kullanılarak kesilirler. Yine nikel alaşımların işlenmesinde, yeni teknoloji fırça takviyeli seramik kesiciler de kullanılmaktadır. Bu kesiciler geleneksel kesicilere göze 8 kat daha fazla aşındırıcı özelliğe sahiptirler. Tamamen yaşlandırılmış Inconel 718 alaşımına dış açmak için indüksiyon fırınlarında 705 °C de tane irileşmesi olmadan ovalama tekniğiyle dış açılabilir. Ayrıca Inconel alaşımları yukarıda saydığımız teknikler dışında seçimli lazer eritme yöntemiyle de işlenebilirler (Anonymous, 2014).



#### **2.2.1.4.Kaynak edilebilirlik**

Inconel alaşımlarının kaynak sırasında ısı tesiri altındaki bölgede çatlama olması ve alaşımı meydana getiren elementlerinin mikroyapıda ayrışmasından dolayı kaynakla birleştirmeyi güçleştirmektedir. Bu sorunu aşmak için yeni alaşım tasarımları ve kaynak teknolojileri kullanılmaya başlanmıştır. Genellikle gaz tungsten ark kaynağı ve elektro ışın kaynağı tercih edilmektedir (Anonymous, 2014).

#### **2.2.1.5.Kullanım alanları**

Inconel alaşımları sıradan alaşımların kullanılamayacağı zor çalışma şartları altında kullanılmaktadırlar. Daha çok gaz türbin kanatları, sızdırmazlık contaları ve yanma odaları ile turbo şarj rotorları ve contaları, elektrikli su altı kuyu pompalarının motor şaft millerinde, yüksek sıcaklık kilit mekanizmaları, kimyasal işlem potaları ve basınç kapları, eşanjör boruları, nükleer basınçlı su reaktör buhar jeneratörlerinde, ateşli silah susturucu patlama tamponlarında ve Formula Bir(F-1) ve NASCAR egzost ekipmanlarında kullanılırlar. Ayrıca atık yakma fırınlarının kazanlarında da kullanılmaktadır. Avrupanın en büyük füzyon cihazının kazanı (Joint European Torus)da Inconel'den imal edilmiştir (Anonymous, 2014).

- Kuzey Amerika Havacılık dairesinin tasarladığı X-15 adlı roket uçağın dış yüzeyini " Inconel X" denilen bir Inconel alaşımıyla kaplamıştır.
- F-1 roket motorunun güç üretme hücresinde Inconel X-750 alaşımı kullanılmıştır.
- Ayrıca Inconel, yeni teknoloji süper arabaların McLaren MP4-12C ve Koenigsegg Agera'nın hafif spor egzostlarında da kullanılmaktadır.
- Yine Inconel alaşımları, yüksek uçlu ateşli silahların susturucularıda ve namlu ağız ekipmanlarında da kullanılmaktadır. Susturucu olarak daha çok küçük veya makineli tüfeklerde tercih edilmektedir.
- Uçakların kara kutularındaki kazıyıcı kayıt cihazları da haddelenmiş Inconel alaşımlarından yapılmaktadır (Anonymous, 2014).

### 2.2.2. Inconel 625 nikel bazlı süperalaşım

Inconel 625, nikel krom bazlı süperalaşım sınıfındandır. Yüksek mukavemeti, kolay işlenebilme özelliği (kaynakla birleştirme dahil) ve üstün korozyon direncinden dolayı kullanılan bir alaşımdır. Inconel 625 'in çalışma sıcaklık aralığı dondurucu soğuklardan 982°C ye kadardır. Inconel 625 'in yüksek mukavemeti nikel-krom tabanı üzerine, molibden ve niobyum katkılarının pekiştirici etkisinden ileri gelmektedir. Bu nedenle, Inconel 625 için diğer nikel esaslı alaşımlarda olduğu gibi çökelme sertleşmesi işlemlerine ihtiyaç duyulmaz. Inconel 625 içeriğindeki bu elementlerin bir diğer görevi ise hem oksidasyon ve karbürizasyon gibi yüksek sıcaklık etkileri hem de alışılmadık derecede zor korozyon ortamlarına karşı mükemmel bir korozyon direnci sağlar. Inconel 625'i deniz suyunda kullanım için mükemmel bir seçim haline getiren başlıca özellikleri; karıncalanma ve çatlak korozyonu gibi bölgesel korozyona uğramaması, yüksek korozyon yorulma dayanımı, yüksek çekme mukavemeti ve klorid iyon gerilim korozyonu çatlamasına dayanıklı olmasıdır. Ancak, düşük yüzey sertliğinden dolayı Inconel 625 alaşımının aşındırıcı veya yapışkan aşınma koşullarında kullanılması durumunda uygun aşınma koruması gerektirir (Anonymous, 2013).

Bağlama kabloları için tel halat, Motor devriye hücumotlar için pervane kanatları, denizaltı yardımcı tahrik motorları, denizaltı hızlı bağlantı kesme parçaları, donanma yardımcı tekneleri için egzoz boruları, denizaltı haberleşme kabloları için kılıf, denizaltı enerji aktarımı yapan sistemlerin kontrolleri ve buhar hattı körükleri bazı kullanım alanlarıdır. Potansiyel uygulamaları olarak yaylar, mühürler, batık kontrolleri için körük, elektrik kablosu bağlayıcıları, bağlantı elemanları, esnek aygıtlar ve oşinografik alet bileşenleri vardır. Yüksek çekme, sürünme ve kopma dayanımı; olağanüstü yorulma ve termal yorulma dayanımı, oksidasyon direnci; mükemmel kaynak ve lehim kabiliyeti INCONEL 625alaşımınıhavacılık alanında rakipsiz kılan özellikleridir. Uçak kanal sistemleri, egzoz sistemleri, itme rezerve sistemleri, direnç çevresel kontrol sistemleri konut motor kontrolleri, yakıt ve hidrolik boru, püskürtme çubukları, körük, türbin kefen yüzükleri ve ısı değiştirici boru yapıları kaynaklı petek gibi uygulamalarda kullanılır. Ayrıca yakma sistemi geçiş gömlekleri, türbin mühürleri, kompresör kanatları ve itme odası roket tüp için de uygundur (Leyens, 2003).

Inconel 625 süperalaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri çizelge 2.4' te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Inconel 625 süperalaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri

İNCONEL 625 ALAŞIMININ FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	
Öz Kütle	8,44 gr/cm <sup>3</sup>
Erime Noktası	1290-1350 °C
Küri Sıcaklığı	-196 °C
İNCONEL 625 ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ	
Ortalama Çekme Direnci	120-150 ksi
Çalışma Sıcaklığı	982 °C
Sertlik	145-220 Brinell

### 2.3. Demir Bazlı Süperalaşımalar

Demir bazlı alaşımlarda ana element demirdir. Ayrıca kompozisyonda ciddi oranda krom- nikel ve çok az oranda molibden veya tungsten bulunmaktadır. Katı eriyik ve intermetalik çökeltme bu tür karbürlerin mukavemetlendirme mekanizması olarak sayılabilirler. Bu yapıdaki intermetalik çökeltmeler genellikle Ni<sub>3</sub>(Al,Ti)  $\gamma'$  fazı tipindedir. Demir bazlı süperalaşımların Cr-Ni miktarları ve mukavemetlendirme fazları, paslanmaz çeliklerden farklılık arz eder. Demir bazlı süperalaşımlar %25-35 arasında nikel içerirken paslanmaz çeliklerde bu oran %0-20 civarındadır (Veli Çay ve Ozan, 2005).

Demir bazlı süperalaşımları hepsi yüksek oranda demir içermeyebilir. Örneğin Demir nikel bazlı süperalaşımlar Fe, Ni, Cr, Co, az oranda Mo, W ve Nb gibi elementlerin kombinasyonlarından ibarettir. Bu tanımlamaya en uygun örnek olarak; katı eriyik dayanımlı Hastelloy X alaşımı (%16 Fe ve %49 Ni içeren) ile  $\gamma'$ - mukavemetlendirilen Inconel 718 alaşımları (%18.5 Fe ve %52.5 Ni içeren) gösterilebilir. Bu alaşımlar, Fe içeren nikel bazlı süperalaşımlardır ve bunlara demir nikel süperalaşımı denir. Inconel 901 süperalaşımı  $\gamma'$ -mukavemetlenen nikel bazlı veya karmaşık demir-nikel-krom esaslı bir süperalaşımdır. Yüksek dayanım ve düşük termal genleşme bu alaşımın öne çıkan özelliklerindedir. Multimet (N-155) alaşımı da karmaşık bileşimli katı eriyik dayanımlı alaşımlardandır (Veli Çay ve Ozan, 2005).

Krom, Demir bazlı süperalaşımarda oksidasyon direncini yükselten element olarak bilinir. Kromla birlikte takviye olarak nikel ve mangan da oksidasyon direncini yükseltmekte yardımcı olurlar. Ayrıca yüksek sıcaklık dayanımını arttırmak için düşük oranda bor elementi katılabilir. 504°C üzeri sıcaklıklarda KYM yapıda olmaları demir bazlı süperalaşımaların öne çıkan özelliklerindedir. Kafes yapısının kapalı paketli olması yapının direncini arttırmaktadır. Mukavemetlendirme mekanizması İntermetalik çökelti tarafından sağlanan demir bazlı süperalaşımaların ilk uygulama alanları arasında, gaz türbin motorlarının bıçakları, diskleri ve bağlama ekipmanları sayılabilir. Gaz türbin motorlarının bazı tipleri, gaz türbin diskleri ve jantları A-286 alaşımından yapılmaktadır. Ayrıca A-286 alaşımı türbin kutuları yapımında da kullanılmaktadır (Veli Çay ve Ozan, 2005).

Demir bazlı süperalaşımalar: INCOLOY (800, 801, 802, 807, 825, 903, 907, 909), A-286, ALLOY 901, DISCALOY, HAYNES 536, H-155, V-57'dir.

#### **2.4. Kobalt Bazlı Süperalaşımalar**

Kobalt bazlı süperalaşımarda, ana element olarak kobalttır. Ayrıca kompozisyonda önemli miktarda Ni, Cr, W az miktarda Mo, Nb, Ta, Ti ve nadiren de Fe gibi elementler bulunur. Kobalt bazlı süperalaşımalarında mukavemetlendirme mekanizması olarak katı eriyik ve karbür fazları etkindir (Bahadır, 2010).

Katı eriyik kobalt alaşımları

- a)Haynes 188, UMCo-50 ve S-816 alaşımlarıdır. Çalışma sıcaklıkları 650°C – 1150°C arasındadır.
- b)MP-35N ve MP-159 alaşımlarıdır. Bunlarda yaklaşık 650°C sıcaklıkta bağlayıcı alaşımlar olarak sınıflandırılır.
- c)Stellite6B alaşımı bu da aşınma dirençli alaşım grubundadır.

Kobalt bazlı süperalaşımaları ikincil karbür fazları veya intermetalik fazları içerdiğinden dolayı tamamen katı eriyik alaşımı sayılmazlar. Bunun sonucunda da yaşlanma ve oda sıcaklığında süneklik kaybı meydana gelir (Bahadır, 2010).

Kobalt bazlı süperalaşımaların tamamı ısıl işlemler sırasında ve yumuşatma tavlama yaparken kristal kafesleri KYM yapıdadırlar. Sadece MP-35N ve MP-159 alaşımlarında yapı kapalı-paket hegzagonaldir, bunu sağlamak için tercih edilen

termomekanik işlem süresince kontrollü şekilde yapının dönüşmesi sağlanır. Stellite 6B ve Haynes 25 alaşımları, kısmen kapalı-paket hegzagonal (cph) yapıya dönüşme eğilimine sahiptir. Kobalt bazlı süperalaşımdan en yaygın kullanım alanı olan Haynes 25 alaşımıdır. Gaz türbinlerinin yüksek sıcaklık uygulamalarında, nükleer reaktör ekipmanlarında, biyouyumlu tıbbi implantlarda ve soğuk çalışma ortamlarındaki sistemlerde tercih edilmektedirler (Bahadır, 2010).

MAR-M302, MAR-M509, X-40 ve WI-52 gibi ikincil karbür faz mukavemetlendirmeli kobalt bazlı süperalaşımlar daha çok uçakların yakıt motor türbinlerinde ve sabit kanatlarda tercih edilmektedirler. İyi kaynak kabiliyeti, yüksek çalışma sıcaklığı ve oksidasyon direnci gibi özellikler bu alaşımların özelliklerindedir (Bradley, 1989).

Kobalt bazlı Süperalaşımlar: ELGILOY, HAYNES 188, L-605, MAR-M918, MP35N, MP159, STELLITE 6B

### 3. BORLAMA

#### 3.1. Bor Elementi ve Borlama

Kimyasal sembolü “B”olan bor elementi, periyodik cetvelin III A grubunda bulunan ve ametal olan tek elementidir. Yerkabuğunun 51. en çok bulunan elementi olup, doğada daima bileşik halinde bulunan bir elementtir. Boroksitler ( $B_2O_3$ ) boratların yapısında bulunan borik asitlerin tuzları veya esterleridirler. Sanayide borik asit elde etmede kullanılan bileşiklere verilen genel addır (Ediz ve Özdağ, 2001).

Bor elementi oksijenle bileşik yapmaya kimyasal ilgisi en fazla olan elementlerdendir. Yapı itibariyle de karbon ve silisyumla benzerlik gösterir. Bor genellikle bor mineralleri bileşikleri şeklinde bulunur ve bor oksitleri açısından zengindir, ancak piyasada en yaygın olan ve tercih edilenleri; boraks, kolemanit ve üleksit'tir (Roskill, 1995).

Demir esaslı malzemelerin bor ile kaplanması işlemi ilk çağlardaki teknolojilerden bu zaman kadar süregelmiştir. Günümüzde bor bileşiklerinin uygulama alanları hızla artmaktadır, şu an itibariyle 400'den fazla endüstriyel alanda uygulandığı bilinmektedir (Çalık, 2002).

Dünyadaki bor madeni yataklarının yaklaşık olarak %72'si ülkemizdedir. Ancak bu önemli rezervin sadece %18 den Borat üretimi yapmaktayız. Bu alanda üretim yapan ileri teknolojiye sahip ülkeler boratlardan saf borun yanında, bortrioksit ( $B_2O_3$ ), borkarbür ( $B_4C$ ), bornitrür (BN), diboran ( $B_2H_6$ ) ve ferrobör (FeB) gibi saflaştırılmış bileşikler elde ederek sanayinin bir çok alanında uygulamışlardır (Özsoy, 1991).

Borlama prosesi ilk olarak metal ve alaşımların yüzeyine Moisson tarafından 1985 senesinde Rusya'da gerçekleştirilmiştir (Matuschka, 1980).

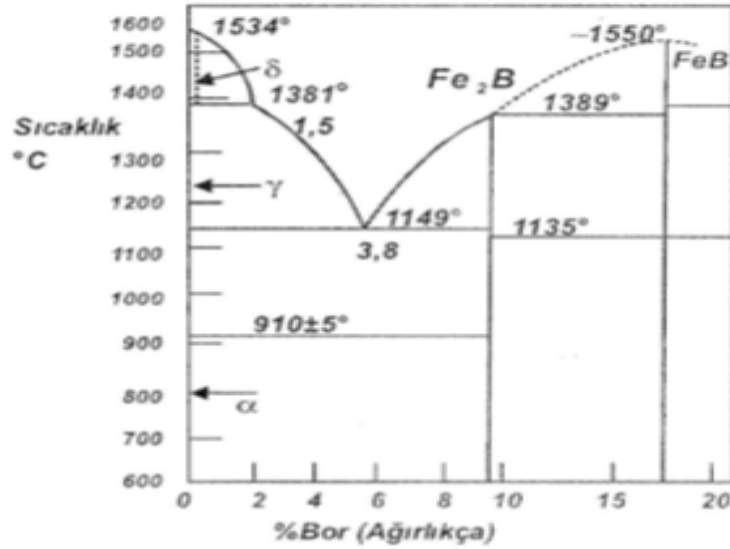
Bor ve bor bileşikleri Çelik endüstrisinde üç alanda çokça tercih edilmektedir:

- Çelik imalatında cüruf oluşturucu,
- Çeliklerle alaşım yapıcı element,
- Çeliklerin yüzeyine difüze edilerek kaplama ve sertleştirme proseslerinde kullanılmaktadır(Taşçı, 1993).

Borlama yüzey sertleştirme işlemi ile oluşan bor tabakasının sert, sürtünme katsayısının ise düşük olması, asit ve bazlardan kaynaklı korozitif ortamlara ve yüksek

sıcaklıklardaki korozyona iyi direnç göstermesi gibi üstün özellikler borlamanın diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre tercih edilirliliğini arttırmaktadır. Ayrıca borlama prosesinin alaşımsız çeliklerde olumlu sonuçlar vermesi ticari açıdan bir avantaj sağlamaktadır (Bozkurt, 1984). Borun atom çapının demirin atom çapına oranının ¼ seviyesinde olması nedeniyle demirle katı eriyik yapabilmektedir (Mal ve Tarkan, 1973). Demirin bor çözme miktarı sıcaklık parametrelerine göre değişmekte ve ferrit fazında 20-80 ppm, ostenit fazında ise 55-60 ppm civarındadır. Bor atomları kafes yapıda ostenit fazda ara yer katı eriyiği, ferrit fazında ise yer alan katı eriyiği şeklinde yerleşir (Keown ve Pickering, 1997).

Demir-bor denge diyagramında meydana gelen ara bileşikler sırasıyla miktarca % 8.83 bor içeren  $Fe_2B$  ve miktarca % 16.23 bor içeren  $FeB$ 'dur. Ayrıca miktarca % 3.8 bor içeren ve ergime sıcaklığı 1149 °C olan ötektik faz meydana gelmektedir (Şekil 3.1). Bu diyagrama göre borlanmış yüzeyler 1149 °C ye kadar olan ısılardan etkilenmeyecektir (Atik, 2001).  $FeB$  denge diyagramı Şekil 3.1'de görülmektedir.

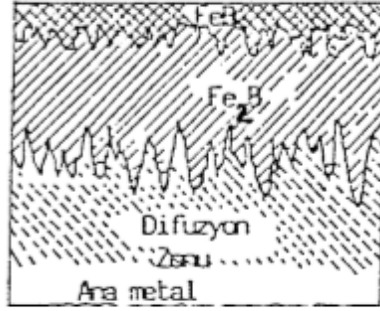


Şekil 3.1.  $FeB$  (Demir-bor) denge diyagramı (Atik, 2001).

### 3.2. Borlama İşlemi Sonucu Meydana Gelen Yapılar

Borlama işleminde kaplama tabakası, borun malzeme yüzeyine yayılması sonucu altlık malzemenin en üst bölümünde oluşan bileşik tabaka (borlu bölge), bileşik tabakanın altında ki geçiş bölgesi ve en iç kısmında ise borlamanın etkilerinden etkilenmeyen matris

(çekirdek bölgesi) den meydana gelir. Borür tabakasının kalınlığı farklı parametrelere göre değişebilir bunlar; malzemenin kimyasal kompozisyonu, işlem sıcaklığı, işlem yöntemi ve işlem süresine bağlıdır(Çalık, 2002). Şekil 3.2’ de bor tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapının şematik resmi verilmiştir.



Şekil 3.2. Bor tabakası, geçiş bölgesi ve ana yapının şematik resmi (Taşçı, 1993).

Bor tabakasında istenilen tek faz testere dişi şeklindeki  $Fe_2B$  fazıdır.  $FeB$  ve  $Fe_2B$  çift fazlı tabakanın oluşmasından daha fazla istenir, çünkü  $FeB$  fazı borca zengindir. Bu faz yaklaşık ağırlıkça % 16.23 oranında bor içerir ve diğer demir bor fazlarından daha gevrek olduğundan bu fazın oluşması arzu edilmez.  $Fe_2B$  fazı ağırlıkça % 8.93 bor içerir.  $FeB$  ve  $Fe_2B$  fazlarının ısıl genişleme katsayıları birbirinden farklıdır.  $\alpha$   $FeB$  fazının ısıl genişleme katsayısının  $23 \times 10^{-6} / ^\circ C$  iken,  $\alpha$   $Fe_2B$  fazınınki ise  $7.85 \times 10^{-6} / ^\circ C$  dir. Bu fazlar arasındaki ısıl genişleme katsayısı farklılığı bor katmanında çatlama ve kabuk atma, yırtılma gibi istenmeyen durumlara sebep olur. Meydana gelen bu olumsuzluklar sonucunda herhangi bir yük uygulandığı zaman kaplama tabakasının pul pul ve yaprak şeklinde döküldüğü belirtilmiştir (Jain ve Sandararayan, 2002). Ayrıca  $FeB$  ve  $Fe_2B$  fazlarının ısıl genişleme katsayılarının farklı olmasından dolayı birbirlerine çekme ve basma gerilmeleri uygulamakta ve fazlar arasında yüzeye paralel ve dik çatlaklar oluşturmaktadır. Bundan dolayı borür tabakasından mümkün olduğunca  $FeB$  fazının oluşumu istenmez (Oian ve Stone 1995).

Geçiş bölgesi ise; borlama prosesi sırasında, matris içeriğinde mevcut elementler geçiş bölgesinde yeniden difüze olarak yerleşirler. Karbon ve silis gibi elementler,  $FeB$  ve  $Fe_2B$  fazlarında çözünmediğinden bu elementler yüzeyden matrise doğru itilirler. Bu bölgedeki bor miktarı az olduğundan borür oluşturamayacaktır. Bu olay sonucunda geçiş bölgesinin oluştuğu düşünülmektedir. Geçiş bölgesinin mikroyapısı hem matristen hem



de borür tabakasından farklılık gösterir. Bu bölgenin kalınlığı, borür tabakasının 10 ile 15 katı arasındadır (Bozkurt ve ark., 1983).

### **3.3. Borlama Yöntemleri**

Borlama bir yayınma işlemi olduğundan, karbürleme ve nitrürlemeyle benzerlik gösterir. Difüzyon prosesine dayanan borlama termokimyasal bir işlemdir. Önceden belirlenen işlem sıcaklıklarında metalik malzeme yüzeyine difüze olan bor elementi, malzeme yüzeyinde matris ile bir veya birden fazla intermetalik fazdan oluşan bir katman meydana getirir. Borlama işleminde bor elementi ile matrisin aynı ortamda bulunduğu sırada meydana gelen kimyasal veya elektro-kimyasal tepkimeler sonucunda bor elementinin metal yüzeyine difüzyonu olayıdır. Borlayıcı ortamda, bor vericiler (bor veya bileşikleri), reaksiyonu hızlandırıcı aktivatör, oksijenle irtibatı kesecek olan dolgu veya deoksidanlar bulunur. Aktivatörler oluşan tabakanın homojen artmasını sağlarlar. Dolgu ve deoksidanlar ise bor elementinin oksijene afinitesi olduğundan işlem sıcaklığında oksijeni bağlayarak redükleyici görevi görürler ve ayrıca borlayıcıların matrise yapışmalarını engellerler.

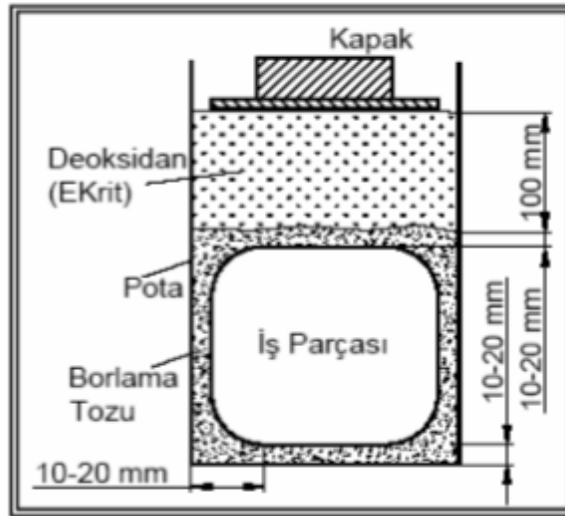
Borür tabakası çok yüksek sertlik, yüksek ısınma direnci, iyi adhezyon direnci, yüksek sıcaklıklarda mukavemet, yüksek sıcaklıklara kadar sertliğini koruma ve demir esaslı malzemelere yakın ısıl genleşme katsayısı gibi olumlu özelliklere sahiptir (Türktekin, 1998).

#### **3.3.1. Katı Borlama**

Metal malzeme, granül halindeki bor vericiler ile aynı ortamda 800-1000°C arası sıcaklıklarda 4-10 saat arasında bekletilir. Bu işlem için ısıya dayanıklı paslanmaz çelik malzemeden pota kullanılır, bor tozu potaya konur ve borlanacak malzeme boşluk kalmayacak şekilde toz içerisine gömülür. Malzeme toz harmanının merkezine yerleştirilir ve yüzeyde en az 10 mm kalınlığında toz katmanı olmalıdır. Pota veya kutuların kapakları kapatıldıktan sonra daha önce ısıtılan fırınlara yerleştirilir. Fırının kapağı kapatılır ve proses sıcaklığına ulaşması sağlanır. İşlem süresi kadar belirlenen ısıda bekletildikten sonra pota fırından çıkartılarak soğutulur. Borlanan metal malzeme

kutu içerisinden çıkartılır. Borlama prosesinde pota kapağı kendi ağırlığı ile pota üzerinde durmalıdır. Sementasyon işlemindekinin aksine hava almayacak şekilde kapatılmasına gerek yoktur. Ancak işlem normal atmosfer kontrollü fırında gerçekleşecekse kapak hava almayacak şekilde iyice sıkılmalıdır. Yine koruyucu gaz atmosferi ortamında da yapılabilen bu yöntem ucuz ve aynı zamanda kendine özgü bir teknik uygulamayı gerektirmez.

Borlama işleminde kullanılan bor vericilerin ana bileşeni bor karbür ( $B_4C$ ), amorf bor ve ferrobordur.  $B_4C$  içlerinde en ucuz olanıdır. Saf amorf borun çok pahalı olması ve ferrobord saflaştırma işlemlerinin çok zor olması nedeniyle bu maddelerin kullanımı sınırlıdır.  $B_4C$  ise borlayıcı ortamlar içerisinde amorf bor ve ferrobordan hem ucuz olup hemde bileşimi zamana göre sabittir. Uygun tane boyutu ve aktivatör seçimi sonuçları olumlu etkilemektedir. Ayrıca amonyum klörür amorf bor tuzuna katıldığında aktivatör görevi görür. Ferrobord kullanılarak yapılan borlama işleminde oluşan tabakanın teknik olarak kullanılması imkansızdır (Sinha, 1991).



Şekil 3.3. Katı borlama yönteminin şematik resmi (Sinha, 1991).

Katı ortam borlamasında kullanılan bileşiklerin % ağırlık oranları aşağıda verilmiştir (Özsoy, 1991).

1. % 60  $B_4C$  + %30  $Fe_2O_3$  + %5  $NaF$  + %5  $B_2O_3$
2. % 50 Amorf bor + %49  $Al_2O_3$  + %1  $NH_4F.HF$
3. % 100  $B_4C$

4. % (7,5-40) B<sub>4</sub>C + % (50-90) SiC + % (2,5-10) KBF<sub>4</sub>
5. % 84 B<sub>4</sub>C + % 16 Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>
6. % 95 Amorf bor + % 5 KBF<sub>4</sub> veya % 5 NaBF<sub>4</sub>
7. % 20 B<sub>4</sub>C + % 75 Grafit + % 5 KBF<sub>4</sub>
8. % (40-80) B<sub>4</sub>C + % (20-60) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
9. % 80 B<sub>4</sub>C + % 20 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (Sinha, 1991).

### 3.3.2. Pasta Borlama

Pasta borlama işleminde kullanılacak granül haldeki borlayıcılar macun kıvamına getirilir ve metal malzemenin yüzeyine kalınlığı 2 mm olacak şekilde sürülür. Bu işlemden sonra yüzeye sürülen macunun hemen kısa süre içinde kurutulması gerekmektedir. Kurutma işlemi maksimum 150 °C de ön ısıtma kabiniinde, ısıtılmış hava akımıyla veya kurutma fırınları kullanılarak yapılabilir. Gerekli görülürse macun katmanı üzerine takviye yapılabilir. Kurutma işlemi tamamlandıktan sonra yüzeyi macunlanmış metal malzemeler ön ısıtma yapılmış fırınlara konur ve fırın kapağı kapatılarak proses sıcaklığına ulaşması sağlanır. Borlama için gerekli süre ve sıcaklıkta fırında bekletilen metal malzemeler işlem sonunda dışarı alınır ve soğutulur. Soğuma işlemi tamamlandıktan sonra parça yüzeyine yapışan kalıntılar temizlenir ve malzeme borlanmış olur. Bu teknikle yapılan borlama işlemi mutlaka koruyucu gaz ortamında yapılmalıdır. Koruyucu gaz kullanılmadan yapılan borlamada oluşan borür tabakası istenilen seviyede olmaz. Ayrıca bu teknikle lokal borlama yapılabilmektedir. Macun borlamada macun içeriği B<sub>4</sub>C, kriyolit ( Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> ) ve bağlayıcı sıvı olarak hidolize etilsilikattan oluşmuş, koruyucu gaz olarak da; Argon, Formier Gazı, NH<sub>3</sub> ve saf azot gazı kullanılabilir (Uzun, 2002).



Şekil 3.4. Üzerine pasta borlama ajanı sürülmüş numune (Dinç, 2013).

### 3.3.3. Sıvı Borlama

Bu yöntemde borlama ortamı sıvıdır. Borlanacak malzeme 800-1000°C arasındaki sıcaklıktaki sıvı bor vericilerle aynı ortam içerisinde 2-6 saat süresince bor difüzyonu oluşumu sağlanır. Sıvı borlama üç değişik şekilde uygulanabilir;

- Tuz eriyiği içinde elektrolitsiz (daldırma)
- Tuz eriyiği içinde elektrolitli
- Derişik çözeltide (Özsoy, 1991).

#### 3.3.3.1. Daldırma Yöntemi

Bu yöntem ergitilmiş elektrolitsiz tuz eriyiği ya da normal sıvı borlama tekniği olarak da bilinir. Daldırma yönteminde borlayıcı olarak  $B_4C$ 'in katı fazı ile sıvı haldeki sodyum klorit ( $NaCl$ ) tercih edilir. Proses temelde boraksın viskozite azaltma teknikleriyle elektrolit halinde erimesidir (Selçuk, 1994)

Ortamın ana bileşeni olarak boraks, aktivatör olarak ise  $B_4C$ ,  $SiC$ ,  $Zr$ ,  $B$ , vs. kullanılır. Erimiş boraks banyolarına bor karbür katarak yapılacağı gibi klorürlerin karışımına veya klorürler ile floritlerin karışımına bor karbür takviyesi ile de yapılabilir. Bu proses hem ucuz hem de fazla uzmanlık gerektirmez. Yöntemi dezavantajlı kılan zorluklar arasında termal şok, borlamadan sonra parçanın temizliği, büyük boyutlu ve karmaşık geometrili parçalara uygulanamaması sayılabilir. Uygulama sıcaklığı 800-1000 °C ve borlama süresi 2-6 saattir.

#### 3.3.3.2. Elektroliz Yöntemi

Yüksek sıcaklıktaki tuz banyosunda, elektrolit iş parçasının katot ve grafit çubuğun da anot olarak davrandığı bir işlem olarak uygulanır. Ergitilmiş boraks tuz banyosu görevi görür. Deneysel çalışmalar sonucunda bu yöntemin başarısı kanıtlanmıştır. Ergimiş boraksın yüksek viskozitesinden kaynaklanan uygulama sıcaklığı homojensizliği ortaya çıkmaktadır. Bu da endüstriyel uygulamalarda boraks eriyiğinin

yüksek viskozitesi 850°C'nin altında borlamayı pratik olarak imkansız hale getirir. 850°C'nin üzerindeki ısılarda tuz banyosunda homojenliği sağlamak oldukça güçleşir.

Özellikle kompleks parçalarda, farklı akım şiddetleri kullanılarak borür tabakasının kalınlığının eşit olması sağlanabilir. Bu teknikte borlanmış metal malzeme yüzünde oluşan tuz tabakasının temizlenmesi oldukça zor ve masraflıdır. Ayrıca elektrolizle borlama da anodun bir bölgesinde oluşan ince borür tabakası, katmanların dengesiz ve düzensiz kalınlaşmasına yol açar. Sodyum klorür ve borasit anhidritin karışımı ile yapılan çalışmalarda banyodaki sıcaklık dağılımında homojenlik sağlandığı, parçaların daha kolay yıkandığı ve viskozitenin düştüğü görülmektedir. İşlem uygulama sıcaklığı 800-1000°C de 30 dakika -5 saat süre ile yapılır. Tuz banyosundaki akım yoğunluğu 0.2 A/cm<sup>2</sup> seçilerek, 600-700°C sıcaklıkta ve 2-6 sürede sade karbonlu çelikte 15-70µm kalınlıkta bor tabakası elde edilmiştir. Bu yönteminde dezavantajları olarak, tesisatın pahalı olması, kompleks parçalarda homojen tabaka kalınlığı sağlamanın zorluğu ve NaCl, B<sub>4</sub>C, NaBF bileşiminden oluşan tuz eriyiğinde farklı problemlerin çıkması sayılabilir (Selçuk, 1994).

### **3.3.3.3. Derişik Çözeltide Borlama**

Laboratuvar çalışmalarında boraks ve borasitli anhidriti çözeltilerinde yüksek frekanslı ısıtma ile deneyler yapılmış ve az miktarda bor yayılımı gözlenirse de istenilen birleşik katmanlar sağlanamamıştır. Bu çözeltiden farklı oranlar kullanılarak yapılan deneylerde kapalı borür tabakası oluşmamış ve ancak tabakaların 1000 °C sıcaklıkta 'ta 10 dakika süre ile 0,1 A/cm<sup>2</sup> akım ve 450 kHz frekans altında doymuş boraks derişimin de oluştuğu görülmüştür. Uygulama sırasında açığa çıkan bor halojenlerinin ilgili asit oluşumlarının suya karşı afinitesi, yöntemi başarısız kılan etken olmuştur (Selçuk, 1994).

Çizelge 3.1. Sıvı borlamada kullanılan bor kaynakları ve özellikleri (Baştürk ve Erten 2006)

<b>Malzeme</b>	<b>Formül</b>	<b>Molekül Ağırlığı gr.</b>	<b>Teorik Bor Miktarı %</b>	<b>Ergime Sıcaklığı (°C)</b>
<b>Boraks Susuz</b>	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	381,42	11,35	-
<b>Boraks</b>	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201,26	21,50	741
<b>Borik Oksit</b>	$\text{B}_2\text{O}_3$	69,64	31,07	450
<b>Bor Karbür</b>	$\text{B}_4\text{C}$	55,29	78,29	2450

#### 3.3.3.4. Gaz Ortamda Borlama

Bu yöntemde borlama prosesi için borlayıcı olarak bor halojenleri, diboran ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) ve organik bor bileşikleri tercih edilir. İşlem başarısını etkileyen başlıca faktörler olarak borlayıcı ortamda kullanılan gazın içeriği, basıncı ve gazın tanktan ortama yayılma hızı sayılabilir. Borlayıcı olarak  $\text{BF}_3$ ,  $\text{BBR}_3$ ,  $\text{BCl}_3$  saf veya su ile;  $\text{B}_2\text{H}_6$  su ile ve  $(\text{CH}_3)_3\text{B}/(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$  kullanılır. Bu bor vericilerden diboran ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) ile birlikte bor halojenleri kullanıldığı takdirde istenilen sonuçlar alınabilir. Ancak diboran zehirli ve patlayıcıdır bir gazdır. Ayrıca diboranın hidrojen ile inceltmesi çok pahalı olup  $150^\circ\text{C}$  'ye yakın sıcaklıklarda ayrışması nedeniyle sıcak parçalara uygulamak istendiğinde soğutulması gerekir. Bu da yöntemi karışık bir hale getirir. Araştırmacıların bir çoğu bu zorluklara rağmen diboran ve su ile gaz ortamda borlamayı gerçekleştirmişlerdir (Bozkurt, 1984).

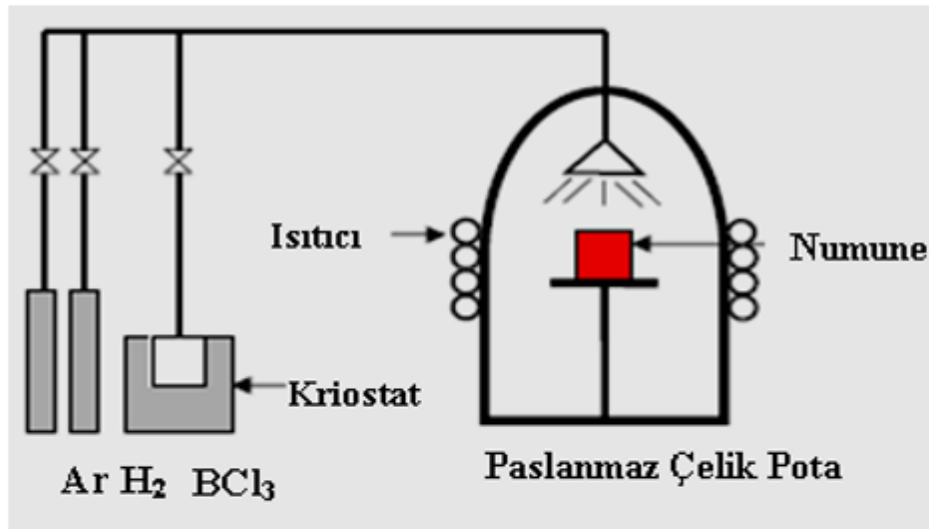
Borlayıcı olarak bor triklorit kullanıldığında klor proses sırasında ayrışır, serbest kalan klor ortamdaki hidrojen ile reaksiyona girerek  $\text{HCl}$  meydana getirir. Açığa çıkan  $\text{Cl}$  ve  $\text{HCl}$ , atmosfer ve sıcaklık şartlarına bağlı olarak demir malzemesi ile reaksiyona girer. Bu teknikte karşılaşılan en büyük problem budur. Çeliğin borlaması sırasında demir klorit oluşur. Bu oluşan demir klorit demir borür'ün oluşumunu engelleyerek korozyona neden olur.

Amerika'da ki bir araştırmalarda bor ve borkarbürden açığa çıkan gaz kullanılarak borlama yapılan bir teknik geliştirilmiştir. Bu yöntemde, borklorit ile hidrojen karıştırılarak  $1300-1500^\circ\text{C}$  de karbonca zengin sıcak grafit çubuk üzerine göndererek bor karbür oluşumu sağlanır. Ergime derecesi yüksek malzemelere bu yöntem uygulanmış

ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Demir bazlı malzemelerin yanı sıra silika, mullite, Ti, Ni, Co ve W gibi malzemelerin borlanması başarıyla gerçekleştirilmiştir (Uzun, 2002).

Çizelge 3.2. Gaz halindeki borlayıcılar ve özellikleri (Kulka ve Ark., 2012).

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



Şekil 3.5. Gaz borlama ünitesi (Bayça ve Şahin, 2004).

### 3.3.3.5. Plazma Borlama Yöntemi

Plazma maddenin dördüncü hali olup enerji yüklemeleriyle fazlar arasındaki geçişler hızlandırılarak madde en sonunda plazma fazına eritilir. Katı maddeye enerji yüklenerek sıvı hale, sıvı halden de enerji yüklenerek gaz ve gaz halinden de enerji yükleyerek plazma haline getirilebilir (Barış, 2007). Plazma içerisinde, elektron iyon, foton, uyarılmış atom, ve nötral atom veya molekül içeren karışımdır. Uygulama sırasında ısı enerjisi verilerek, ışınla veya elektriksel boşalma ile plazma elde edilir. Elektriksel boşalmadır en yaygın plazma yöntemidir (Hunger ve Lobig, 1997; Uluköy, 2005).

Bu yöntemle borlamada  $\text{BCl}_3$ ,  $\text{B}_2\text{H}_6$ ,  $\text{BF}_3$  ve TEB gibi bor bileşikleri ve redükleyici olarak argon veya  $\text{H}_2$  kullanılır. 800–1000 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10-2 Pa gibi düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır (Hunger ve Lobig, 1997; Uluköy, 2005). Diğer borlama yöntemleriyle kıyaslandığında çevreyi daha az kirlettiğinden üzerinde çalışılan bir yöntemdir (Bayça ve Şahin, 2004; Uluköy, 2005).

Plazma borlamanın avantajları: Yüksek enerji verimliliği, düşük çarpılma ve düşük işlem sıcaklığıdır (Uzun, 2002). Diğer yöntemlerde (katı, sıvı, gaz) tabaka kalınlığı ve homojenliği kontrol edilemezken, plazma borlamada bu mümkündür (Barış, 2007). Ayrıca kompleks parçalarda homojen difüzyon tabakası, sertlik ve yüzeyde tek fazlı  $\text{Fe}_2\text{B}$  tabakası elde edilebilmesidir (Barış, 2007). Plazma borlamanın dezavantajları ise: Bu yöntemde kullanılan  $\text{BCl}_3$  ve  $\text{B}_2\text{H}_6$  gazlarının pahalı, zehirli, patlayıcıdır ve korozyona neden olmasıdır (Hunger ve Lobig, 1997; Bayça ve Şahin, 2004; Barış, 2007).

### 3.4. Borlama İşleminin Avantajları

Borlanmış tabakaların en önemli özelliği, oluşan borür tabakasının ana matris malzemeye oranla çok yüksek sertlik (1200-5000 HV) ve ergime noktasına sahip olmasıdır. Ayrıca bor tabakasının yüksek sertliğinin yanında sürtünme katsayısının düşük olması, aşınma direncinin yüksek olmasını, bu da maliyetin ve malzeme kaybının minimum seviyeye inmesi demektir. Borlama işleminin bazı avantajları şöyle sıralanabilir:



- Bor tabakası sertliğini yüksek çalışma sıcaklıklarında da muhafaza etmektedir.
- Borlama işlemi ile sertleştirilebilir birçok çelik grubuyla karşılaştırılabilir yüzey özellikleri elde edilebilir.
- Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin oksidan olmayan seyreltik asitlere karşı korozyon direncini ve erozyon direncini arttırmaktadır. Bu özellikleri sebebi ile endüstride çokça kullanılmaktadır.
- Borlanmış yüzeyler yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direncine ve ergimiş metal korozyon direncine sahiptir.
- Borlanmış parça, korozif ortamda yüksek yorulma direncine sahiptir.
- Borlama işlemi yağlayıcı kullanımı azaltmakta ve sürtünme katsayısını düşürmektedir (Genel, 2005)

### **3.5 Borlama İşleminin Dezavantajları**

Borlama işleminin avantajları yanında, bazı dezavantajları da mevcuttur. Bunlar:

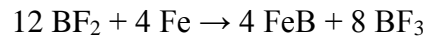
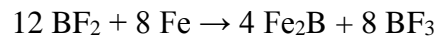
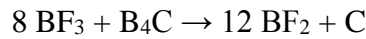
- Borlamaya tabi tutulan malzemelerde bor tabaka kalınlığının %5-20'si oranında boyut artışı görülmektedir. Bu artış, borlanan malzemenin cinsine ve borlama şartlarına bağlıdır.
- Genelde borlanmış alaşımlı çelik parçaların döner temaslı yorulma özellikleri yüksek basınçlı yüzeylerde sementasyon ve nitrasyonla kıyaslandığı zaman çok zayıftır. Borlamanın bu özelliği sebebiyle, dişli üretiminde bir sınırlama söz konusudur (Vangavati, 2006).

## 4. NİKEL BAZLI SÜPERALAŞIMLARIN BORLANMASI

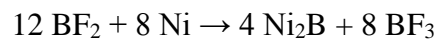
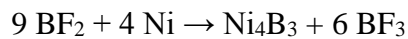
Endüstriyel uygulamalar göz önünde bulundurulduğunda borür kaplamalar önemli bir yere sahiptir. Borlama ısıl işlemi en fazla çeliklere (düşük karbonlu çelikler, karbonlu çelikler, takım çelikleri, kalıp çelikleri, paslanmaz çelikler vs.)( Özdemir ve Ark., 2009; Kulka ve Ark., 2012; Wang ve Ark., 2013) demir dışı metallere (nikel, kobalt, molibden, titanyum vs.) (Hausner, 1966; DongMua ve Yanga, 2009; Güneş ve Ark., 2015; Ataibiş ve Taktak, 2015) sermetlere (Karakan ve Ark., 2002) kadar birçok malzeme grubuna uygulanmaktadır. Ancak nikel esaslı süperalaşım için yapılan çalışmalar sınırlıdır (Sen, 2004; Fan ve Ark., 2010; Deng ve Ark., 2015).

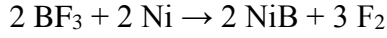
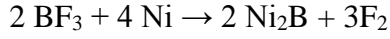
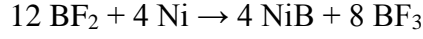
### 4.1. Nikel Bazlı süperalaşımın Borlanmasında Oluşan Fazlar

Son yıllarda nikel bazlı alaşımların borlanması da ilgi çeken konuların başındadır. Yapılan deneyler neticesinde nikel bazlı alaşımların, akışkan yatakta, elektrokimyasal ve kutu borlama yöntemleriyle borlanabildiği görülmektedir (Anonymous, 1995; Çalık, 2002). Ancak kutu borlama yönteminde oluşan bor tabakası daha komplekstir. Nikel bazlı alaşımların borlanmasında kullanılmak üzere ticari Ekabor-Ni tozu geliştirilmiştir. Bu toz, silisyum içermemektedir. Borlamada Ekabor-Ni tozu dışında silisyum içeren bir toz kullanıldığı takdirde, termodinamik çalışmalar iki reaksiyonun olacağını göstermiştir. Bu iki reaksiyon sonucu bor ve silisyum tabakaları oluşacaktır. İşlem sıcaklığı, süresi ve alaşımların nikel içeriği, bu reaksiyonlardan hangisinin baskın olacağını belirlemektedir. Demir bazlı malzemelerin borlanmasında oluşan bazı reaksiyonlar aşağıdaki gibidir (Özsoy, 1991):



Nikel bazlı alaşımların borlanmasında ise aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelmektedir:





Fakat silisyum içeren borlama tozu ile borlama işlemi yapıldığında borür tabakası üstünde silisid tabakası oluşmaktadır.

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

Nikel bazlı alaşımların borlanmasında kullanılan tozun bileşimi, borlama sonucu oluşan mikroyapıyı etkilemektedir. Ueda ve arkadaşlarının deneysel çalışmalarında silisyum içermeyen borlama tozu kullanarak 40 µm kalınlığında 1300 HV sertliğinde sadece borür tabakası elde etmişlerdir (Ueda ve Ark., 2000).

Özbek ve arkadaşları %99,5 saflıktaki nikeli ekabor tozu ile borlamışlardır. Borlama işlemi sonucunda yapıda borür tabakasının üzerinde silisid tabakası elde ettiklerini ancak aşınma dirençlerinde iyileşme sağladıklarını belirtmişlerdir (Özbek ve Ark., 2000).

Dong Mu ve arkadaşları da saf nikeli farklı süre ve sıcaklıklarda ekabor tozlarıyla borlamışlar. Çalışma sonucunda sadece silisid fazları elde ettiklerini, borür fazlarının oluşmamasını ise silisid tabakasının kalın olması dolayısıyla X ışınlarının bu tabakaya ulaşmamasına bağlamışlardır. Silisid tabakasının altında 832-948 HV sertlik değerleri elde etmeleri sebebiyle bu sertliklerin borür fazlarından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir (Dong ve Ark., 2009).

Literatür araştırmalarında süperalaşımlarının borlanması ile ilgili çalışmalar henüz yeni ve az sayıdadır. W. Muhammad ve arkadaşlarının çalışmalarından biri olan Inconel 722'yi borladıkları çalışmadır (Muhammed ve Ark., 1999). Inconel 722 alaşımı 900°C'de 10 saat süre ile borlanmıştır. Kaplama tabakasından yüzeyden matrise doğru üç bölge oluştuğunu belirtmişlerdir. Bu bölgelerin sırasıyla Ni<sub>2</sub>Si, Ni<sub>4</sub>B<sub>3</sub> ve Ni<sub>2</sub>B fazlarından oluştuğunu EDS ve XRD analizleriyle belirlemişlerdir. Ayrıca aşınma dirençlerinde üç kat daha dirençli olduğunu saptamışlardır.

Dolayısıyla, nikel ve nikel esaslı alaşımların kutu borlama yöntemiyle elde edilen tabakaların karakterizasyonu, borlama tozundaki silisyum içeriğine bağlı olarak değiştiği gözlenmektedir.

## 5. TERMOREAKTİF DİFÜZYON YÖNTEMİ

TRD yöntemi ilk defa 1970' li yıllarda Japonya' da geliştirilmiştir. Bu yöntemde vanadyum (V), niobyum (Nb), titanyum (Ti), krom (Cr) gibi elementlerin 800-1200°C sıcaklıkları arasında çeşitli proseslerle metal yüzeyine yayınımla nüfuziyeti sonucunda yüzeyde karbür tabakalarının oluşturulmasıdır. Oluşan sert ince film kaplama tabakası metalin aşınma direncinin 2-20 kat artmasını sağlamıştır (Khafri ve Ark., 2008)

TRD yöntemiyle elde edilen kaplama tabaka kalınlıklarına kimyasal buhar biriktirme (CVD) veya fiziksel buhar biriktirme (PVD) teknikleri ile de ulaşılabilmektedir. CVD tekniği ile elde edilen kaplamaların kalınlıkları (2,5 µm) dur, bu da TRD prosesinde elde edilenlere yakındır (Arai, 1991).

Bu proseste oluşan kaplama tabakalarının sertlikleri, elde edilen metal-karbürlerin (TiC, NbC, VC, CrC) cinsine bağlıdır ve matris malzemenin sertliğinden farklıdır. Elde edilen karbürlerin aşınma dirençleri çok yüksektir (Tavakoli ve MousaviKhoie, 2010).

Karbürlerden en kararlı ve sert olanı TiC'dir ve sertliği 3200-3800 kg/mm<sup>2</sup>, arasında değişmektedir. Diğer karbürlerin sertlikleri; VC-2900-3200 kg/mm<sup>2</sup> NbC-1800-2500 kg/mm<sup>2</sup> ve Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>-1600-2000 kg/mm<sup>2</sup> civarındadır (Sarıkaya, 2007).

Termo - reaktif difüzyon prosesi ile çelik malzemelerin yüzeyinde sert ve aşınma direnci çok yüksek olan karbür, nitrür ve karbo - nitrür gibi tabakaların oluşturulduğu bir yöntemdir. TRD prosesinde matris malzemedeki karbon ve azot, vanadyum, niobyum, tantalum, krom, molibden ve tungsten gibi karbür veya nitrür oluşturu elementlerle biriken bir tabaka meydana getirmek için nüfuz eder. Yüzeğe yayılan karbon ve azot biriken tabakada karbür ve nitrür oluşturu elementlerle matris yüzeyinde metalurjik olarak bağlanan karbür ve nitrür tabakaları yoğun bir biçimde elde edilecek şekilde reaksiyona girer (Kon, 2006).

Aşırı yükler altında çalışan malzemelerde matrisin sertliği kaplama tabakasının çökmesini engelleyecek sertlikte olmalıdır (Sarıkaya, 2007).

### 5.1. TRD Yönteminin Üstünlükleri

TRD yönteminin üstünlükleri şöyle sıralanabilir (Kon, 2006).

- Basit donanım

- Kolay operasyon
- Seçici karbür kaplama
- Düşük maliyet
- Girintili çıkıntılı bölgelerde üniform kaplama
- Uzun banyo ömrü
- Malzemeye yapışan tozun kolay temizlenmesi
- Koruyucu atmosfer gerektirmemesi
- Kolay su verebilme ( göbek sertliği)
- Atık ve zehirli gaz olmaması, çevreye zarar vermemesi
- Kalıp ömrünün artması
- Kalıp parlatılmasında kullanılan işçilikten tasarruf
- Yağlayıcıdan tasarruf (veya hiç yağlayıcı kullanılmadan)
- Yüzey işlemlerindeki ve boyutsal hassasiyetteki artıştan ötürü, ürün kalitesinin artması
- Daha az kalıp malzemesi kullanılarak, kalıp malzemesi ve üretim maliyetlerinde azalma.

## 6. MATERYAL VE YÖNTEM

### 6.1. Giriş

Bu çalışmada, inconel 625 alaşımı 800, 900 ve 1000 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 saat sürelerde ilk katman olarak 10-50 nm boyutundaki nanobor tozu ile kaplanmıştır. Daha sonra tüm borlanmış numuneler 1000 °C de 2 saat süresince TRD tekniği ile demir, titanyum ve karbon (Ti-Fe-C) tozlarıyla ikincil katman şeklinde kaplanmıştır. Kaplanan numuneler, kaplama bölgesi mikroyapısını incelemek amacıyla metalografik muayeneye tabi tutulmuştur. Bu amaçla, optik mikroskobu ve SEM incelemeleri yapılmıştır. Birleşme bölgesinde oluşabilecek fazlar EDS ve X-Ray analizleri ile belirlenmiştir. Kaplama tabakasının mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla numuneler mikrosertlik ve aşınma testlerine tabi tutulmuştur.

Çalışmanın amacı, nikel esaslı süperalaşım lar üzerinde borlama ile ilgili sınırlı sayıda, borlama artı TRD çalışmaları ile ilgili herhangi bir literatürü bilgiye rastlanmadığından hem dünya hem de ülkemiz literatürüne inconel 625 alaşımının çift katmanlı kaplama özelliklerinin kazandırılmasıdır. Böylece korozyon direnci ve yüksek çalışma sıcaklıklarında kendini kanıtlayan inconel 625 alaşımının, yüzeyinin borlama ve termo-reaktif difüzyon tekniği ile çift katmanlı kaplanarak uzay ve uçak endüstrisi gibi hızla gelişen teknolojilerde güvenle kullanılacağı düşünülmektedir. Deneylerden elde edilen veriler sonucunda, bu malzemenin kullanım alanlarının genişleyeceği öngörülmektedir. Ayrıca değişen parametrelere göre yapılan deney sonuçları bu konuda gelecekte yapılması planlanan çalışmalara ışık tutacaktır.

### 6.2. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Deneylerde kullanılan inconel 625 nikel esaslı süperalaşımı numunesi 10x10x5mm ebadında hassas kesme cihazında hazırlanmıştır. Inconel 625 nikel esaslı süperalaşımının kimyasal bileşimi çizelge 6.1'de görülmektedir. Kaplama işleminde kullanılan nanobor tozunun bazı özellikleri çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. İncel 625 Alaşımının Kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim (% Ağırlıkça)										
Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	Co	Mn	Al	Ti	Si	Diğer
58	20-23	5	8-10	3,15-4,15	1	0,5	0,4	0,4	0,5	3,05

Çizelge 6.2. Nanobor tozunun bazı özellikleri (Günen, 2013).

Borlama Maddesi	Tane Boyutu	İçeriği	Sertliği (Mohs)	Bileşimi
Elementel Nanobor	10-50 nm	%99,7 saflık derecesine sahip	9,3	%95 Nanobor + %5 NaBF <sub>4</sub>

### 6.3. Bor ve TRD Kaplama Aparatları

Bor ve TRD uygulamaları, paslanmaz çelikten imal edilen potalar (Şekil 6.1) ve protherm yüksek sıcaklık fırını (Şekil 6.2) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.1. Paslanmaz çelik pota



Şekil 6.2. Yüksek sıcaklık fırını

#### 6.4. Numune Hazırlama

Numuneler, mikro yapı analizleri, aşınma ve X-ışını analizleri için 10x10x5 mm ebatlarında metalografik numune kesme cihazı kullanılarak kesilmiştir (Şekil 6.3). Kesilen numunelerin tüm yüzeyleri 180-240-320-400-600-800-1000-1200 ve 1500 mesh'lik zımparayla zımparalanmıştır. Zımparalanan numuneler bor ve TRD işlemi öncesi alkol ile temizlenmiştir.





Şekil 6.3. Numune kesme cihazı



Şekil 6.4. Numune parlatma cihazı



Şekil 6.5. Numune bakalite alma cihazı

### 6.5. Borlama İşlemi

Tüm yüzeyleri zımparalanan ve alkolle temizlenen numuneler paslanmaz çelik pota içerisine kaplama toz karışımıyla birlikte yerleştirilmiş ve potanın ağzı sıkıca kapatılmıştır. Daha sonra hazırlanan potalar 800, 900 ve 1000 °C’lerde 2, 4 ve 6 saat süre parametreleri kullanılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Her bir parametre için fırın işlem sıcaklığına sırası ile 800, 900 ve 1000 °C sıcaklığa kadar kademeli olarak ısıtılmıştır. İşlem sonrasında fırından çıkarılan potaların ağzı açılarak açık havada soğumaya bırakılmıştır.

### 6.6. TRD İşlemi

İkinci katmanda kaplama elde etmek için daha önce borlanmış numunelerin tüm yüzeyleri 1500 mesh’ lik zımparayla bastırmadan zımparalanmıştır ve alkolle temizlenen

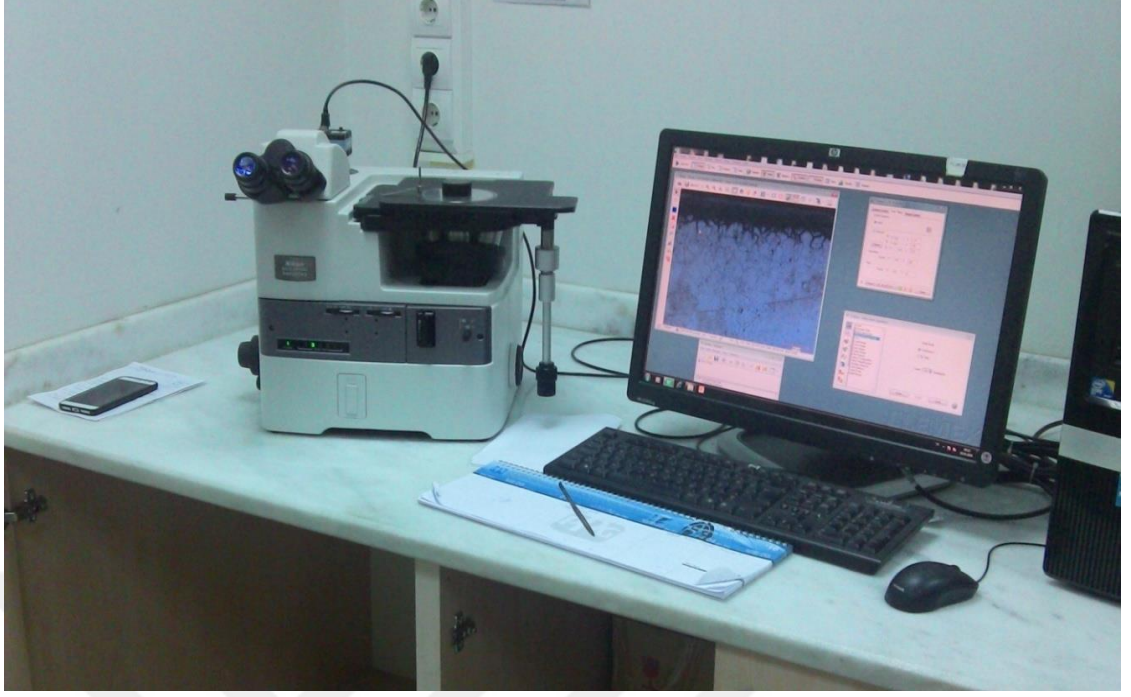
numuneler paslanmaz çelik pota içerisine kaplama toz karışımıyla birlikte yerleştirilmiş ve potanın ağzı sıkıca kapatılmıştır. Daha sonra hazırlanan potalar 1000 °C'deki 2 saat bekletilerek kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. İşlem sonrasında fırından çıkarılan potalar su ile hızla soğutulmuş ve potanın ağzı açılarak numuneler çıkarılıp yine hızlı bir şekilde suda soğutulmuştur.

### 6.7. Metalografik Muayene

Borlama ve TRD yöntemiyle kaplanan numuneler soğuk kalıplama tekniği kullanılarak kalıplanmış (Şekil 6.6) ve sırasıyla kaba ve ince zımparalama kademelerinden geçirilerek ana malzemeye ulaşıncaya kadar zımparalanmıştır. Zımparalanan numuneler sırasıyla 3 ve 1 mikronluk elmas solüsyonlar kullanılarak parlatılmış ve parlatma işleminden sonra numuneler 5 ml Nitrik asit, 10 ml Asetik asit ve 15 ml Hidroklorik asit çözeltisi ile dağlanarak mikroyapılar ortaya çıkarılmıştır. Böylece kaplama tabası kesiti ve kaplama tabakası ana malzeme ara yüzeyi optik mikroskobu ve SEM için hazır hale getirilmiştir. Optik mikroskobu için Nikon MA 300 ters metal mikroskobu ve Clemex görüntü analiz sistemi kullanılmıştır (Şekil 6.7). SEM analizleri için ise JEOL JSM-5600 marka SEM cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.8). SEM ile birlikte, kaplama tabakası ve ara bölgesinde oluşması muhtemel faz ve karbürler için EDS analizleri de yapılmıştır.



Şekil 6.6. Soğuk kalıplama tekniğiyle bakalite alınan numuneler



Şekil 6.7. Nikon MA 300 ters metal mikroskobu



Şekil 6.8. SEM mikroskobu

## 6.8. X-Işını Analizi

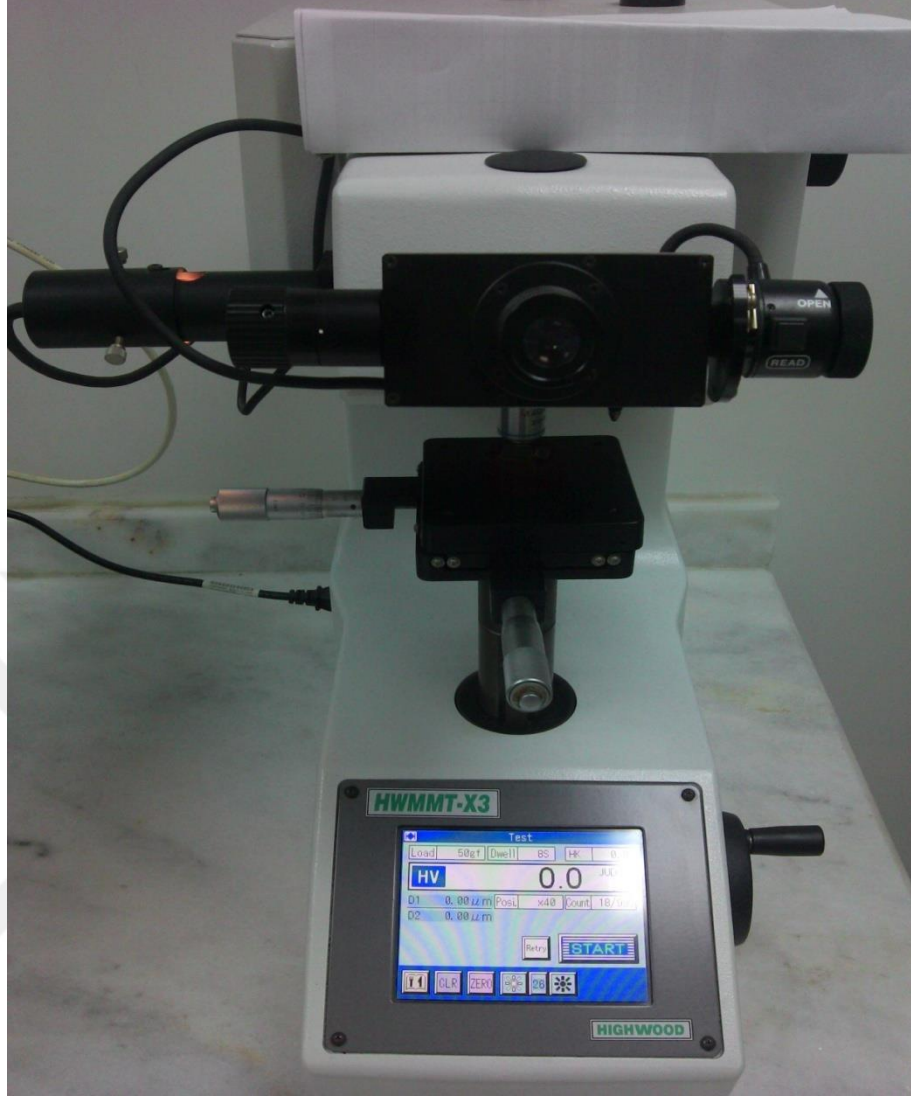
Farklı sıcaklık ve sürelerde borlama ve TRD kaplama işlemi yapılan inconel 625 nikel esaslı süperalaşımının kaplama yüzeyi temizleme işleminden geçirildikten sonra yüzeyde oluşan karbür fazlarını tespit etmek amacıyla x-ışını analizi yapılmıştır. X-ışını analizleri, BRUKER AXS D8 ADVANCE marka cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. X-ışını cihazı

## 6.9. Mikrosertlik Analizi

Bir malzemenin sertliği, kendisinden daha sert bir malzemeye karşı gösterdiği dirençle tanımlanır ve malzemenin deformasyon davranışının bir ölçümüdür. Bu çalışmada, aynı zamanda optik mikroskop için hazırlanan numuneler üzerinden yani kaplama tabası kesitinden, ara bölge ve ara bölgeye yakın ana malzemeden mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. Mikrosertlik ölçümleri, HIGHWOODHWMMT-X3 marka mikrosertlik cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.10). Mikrosertlik ölçümlerinde 50 gf yük ve 10 saniye süre parametreleri kullanılmıştır.

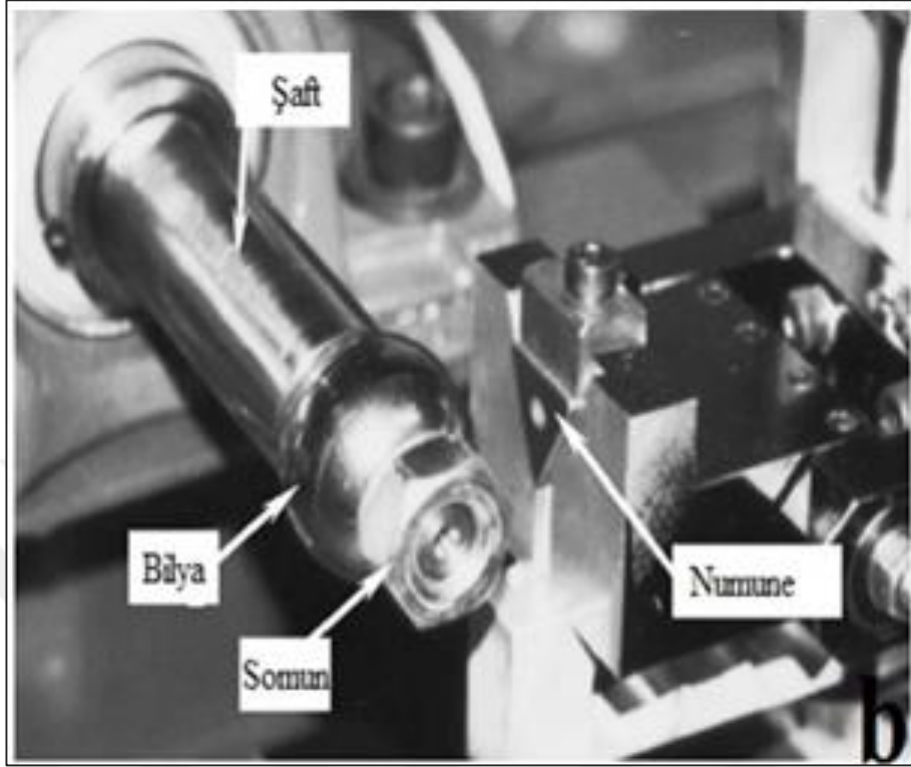


Şekil 6.10. Mikrosertlik cihazı

### 6.10 Aşınma Testi

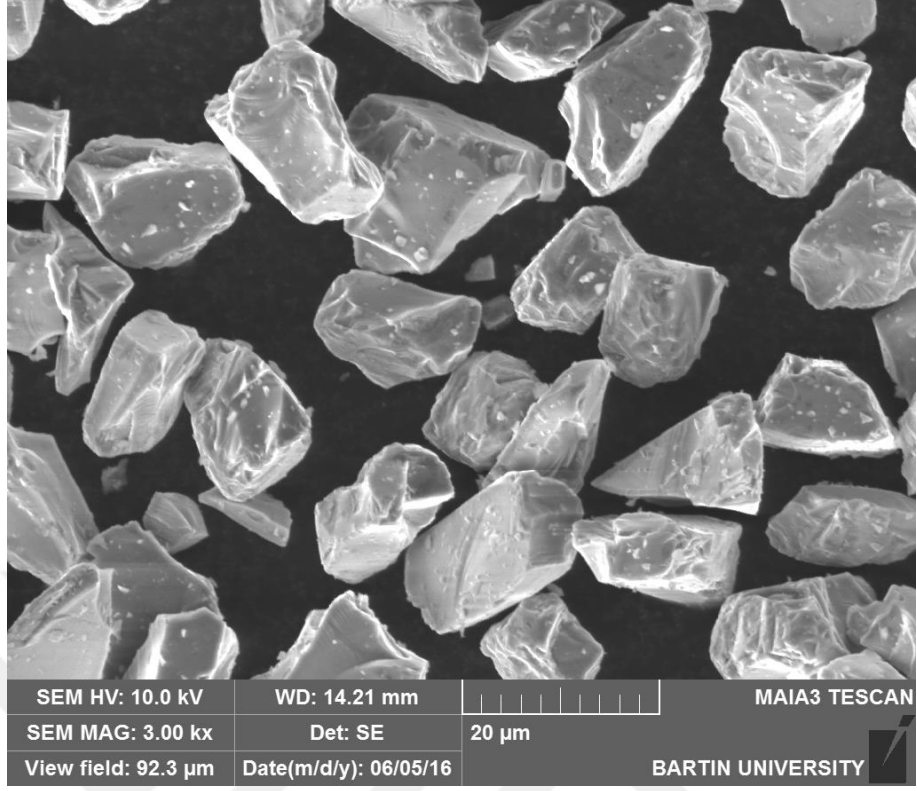
Son yirmi yıldan bu yana özellikle ince kaplamaların daha yaygın olarak kullanılmaya başlamasına bağlı olarak mikro abrasyon aşınma testleri sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Başlarda sadece sert film tabakaların kalınlıklarının ölçülmesinde kullanılan bu yöntem günümüzde sert ince film kaplamaların aşınma performanslarının değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada da yüzeyi farklı sıcaklık ve sürelerde borlama işlemine tabi tutulan ve sonrasında, yine TRD yöntemi kullanılarak ikinci bir yüzey modifikasyonu uygulanan numunelerin aşınma dirençleri

sabit top (fixed ball) mikro-abrasyon aşınma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.11).



Şekil 6.11. Sabit top mikro-abrasyon test yöntemi.

Deneylerde 1" (25,4mm) çapında AISI 52100 rulman çeliği kullanılmıştır. Aşındırıcı olarak 800 mesh SiC aşındırıcı partikül içeren solüsyon kullanılmıştır (Şekil 6.12). Solüsyon oranı % 75 saf su % 25 aşındırıcı partiküldür. Deneyler 90 d/dk (rpm) dönme devrinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma zamanı olarak 3 dk 20 sn lik birimlerde de aşındırıcı solüsyon damlatılmıştır. Aşınma testi sonrası yüzeylerde meydana gelen aşınma izlerinin yorumlanabilmesi için SEM Mikroskobu kullanılmıştır. Ayrıca 3D profilometreden de faydalanılmıştır.



Şekil 6.12. Deneylerde kullanılan SiC aşındırıcı partiküllerin SEM görünümü



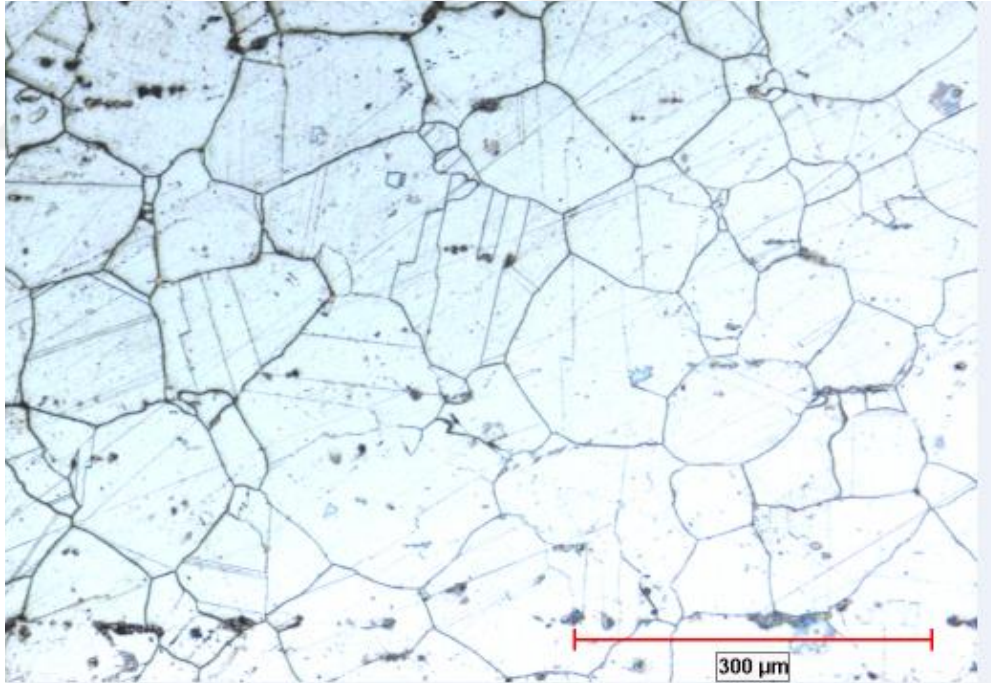
## 7. SONUÇLAR

### 7.1. Giriş

Bu çalışmada, inconel 625 malzemesinin yüzeyi ilk katmanda değişken süre ve sıcaklıklarda nanobor tozuyla borlanmış, daha sonra ikinci katmanda TRD tekniği kullanılarak Ti-Fe-C tozuyla kaplanmıştır. Birinci katmanda borlama süreleri 2-4-6 saat ve sıcaklıklar ise 800-900 ve 1000 °C olarak uygulanmıştır. İkinci katmanda ise 1000 °C ve süre 2 saat süre ile malzeme yüzeyi Ti-Fe-C tozlarıyla kaplanmıştır. Birinci ve ikinci katmanda elde edilen kaplamalardan ortaya çıkan sonuçlar ayrı ayrı olarak ele alınmış ve tartışılmıştır.

### 7.2. Metalografik İncelemeler

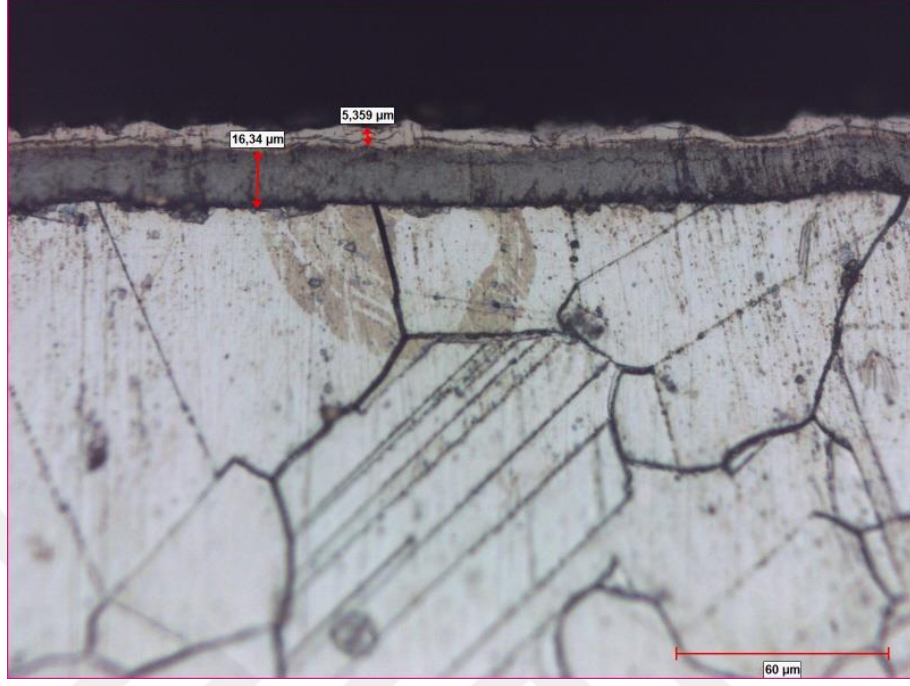
Şekil 7.1’de herhangi bir kaplama işlemi uygulanmayan Inconel 625 alaşımının mikroyapısı görülmektedir.



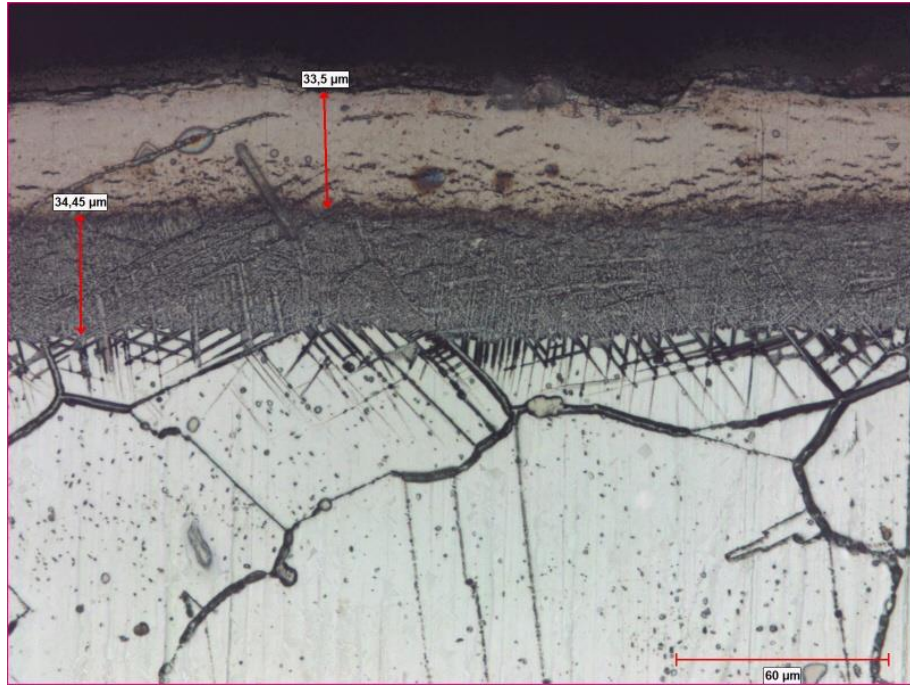
Şekil 7.1. Ticari Inconel 625 alaşımının optik mikroyapı görünümü

Şekil 7.1 incelendiğinde yüzey merkez kübik yapıya sahip metal ve alaşımlarda sıkça karşılaşılan tavlama ikizlenmesi açık bir şekilde görülmektedir.

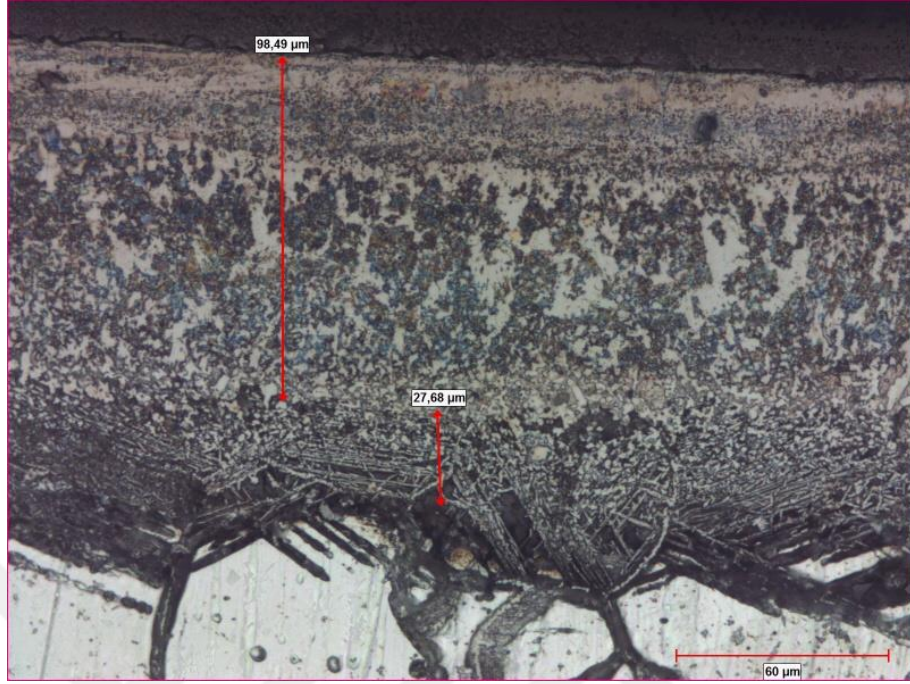
Şekil 7.2’ de farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış inconel 625 alaşımının mikroyapı resimleri verilmiştir.



a)



b)

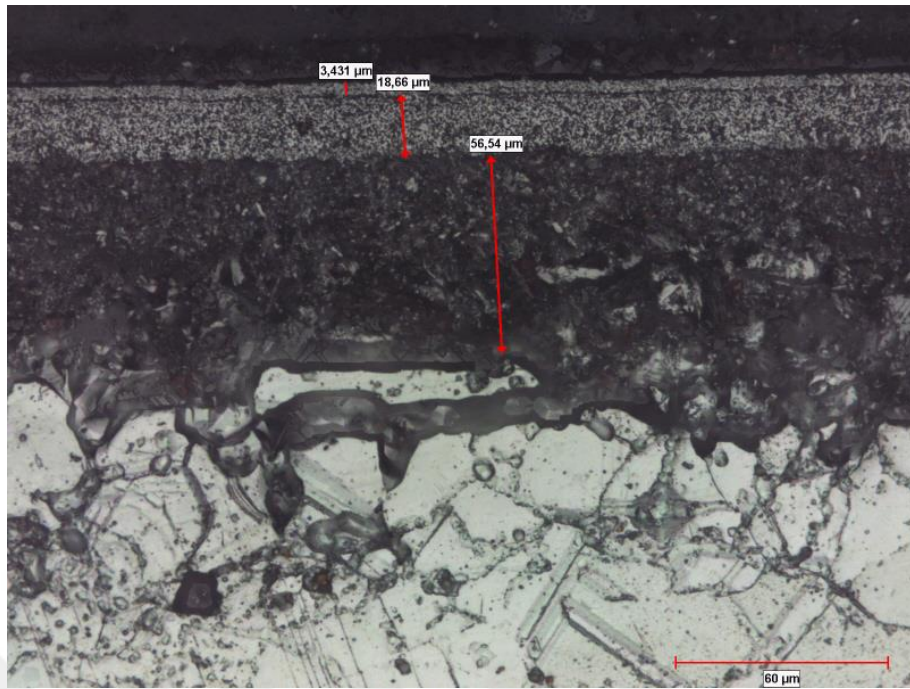


c)

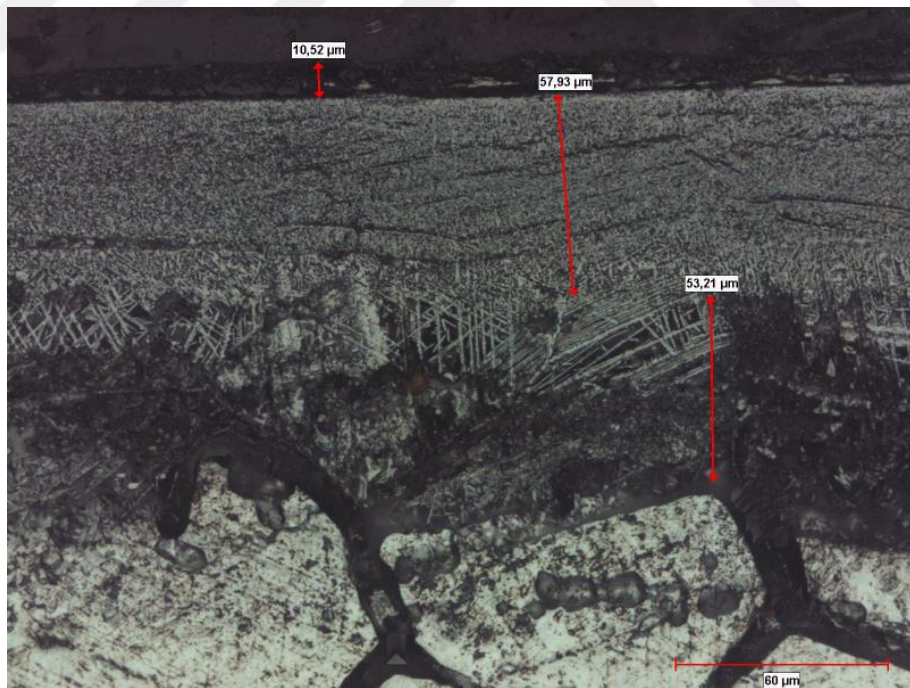
Şekil 7.2. Nanobor tozu ile a) 800 °C b) 900 °C c) 1000 °C’de 6 saat süre ile borlanan numunelerin optik mikroyapıları

Şekil 7.2. incelendiğinde inconel 625 alaşımının yüzeyinde sadece borür tabakasının olduğu görülmektedir. Ekabor ile yapılan borlama işlemlerinde istenmeyen silisid tabakası (Ueda ve Ark., 2000; Sen, 2004; Fan ve Ark., 2004) nanobor tozu ile engellenmiştir. Tüm numunelerde çift katmanlı bir kaplama tabakası elde edilmiştir. Üst katmanın Cr’ce zengin alt tabakanın ise Ni’ce zengin olduğu EDS analizleri ile desteklenmiştir. Çeliklerdeki geçiş bölgesi gözlemlenmemiştir ancak sertlik ölçümlerinde kaplama tabakasının altında matristen daha sert bir bölgeye rastlanmıştır. Ayrıca artan işlem süresi ve sıcaklığı kaplama tabakası kalınlığını arttırmıştır.

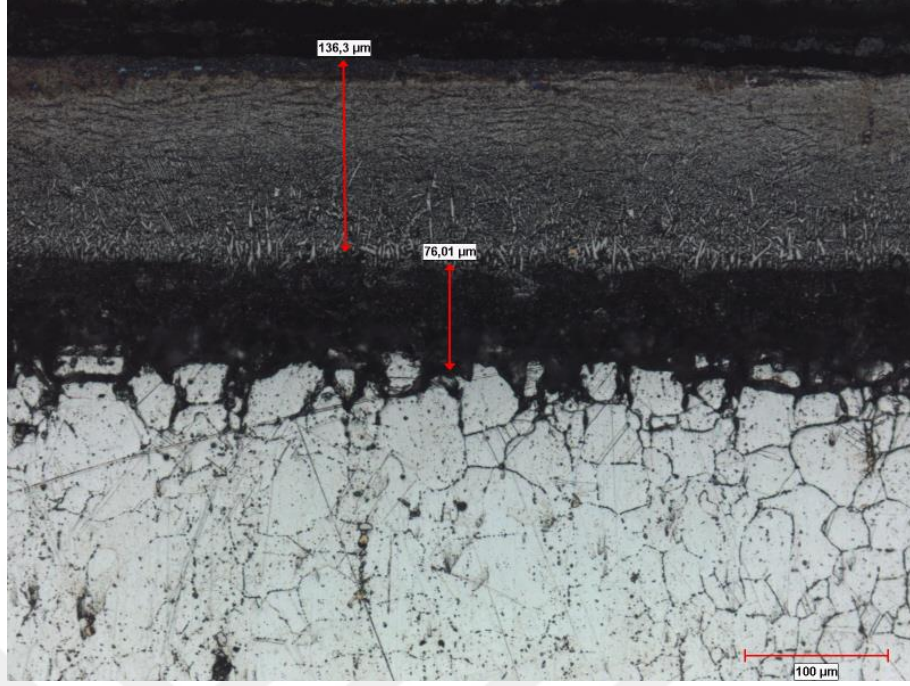
Şekil 7.3’ de farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış ardından 1000 °C’de 2 saat süreyle Ti-Fe-C tozuyla TRD işlemine tabi tutulan inconel 625 alaşımının mikroyapı resimleri verilmiştir.



a)



b)



c)

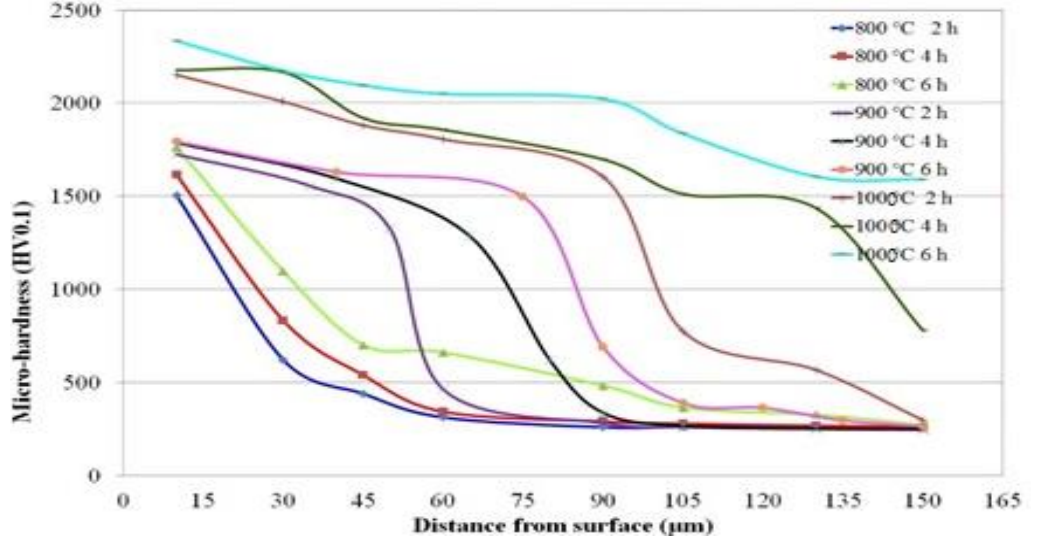
Şekil 7.3.Farklı sıcaklık ve sürelerde borlanmış ardından 1000 °C’de 2 saat süreyle Ti-Fe-C tozuyla TRD işlemine tabi tutulan inconel 625 alaşımının mikroyapı resimleri.

Şekil 7.3. incelendiğinde borlama işleminin ardından TRD’nin uygulanması ile yüzeyde ince bir TRD tabakasının olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca borlama işlemi sonucunda mikroyapıda görülmeyen geçiş bölgesi özellikle şekil 7.3. c’de açık bir şekilde görülmüştür. En üst tabakanın Ti’ce zengin olduğu EDS analizleri ile belirlenmiştir. TRD uygulanan tüm numunelerin kaplama tabakası kalınlıklarında artış tespit edilmiştir.

Çizelge 7.1. Kaplama tabakası kalınlıkları ve sertlik değerleri

Numune Adı	Borlama Tabaka Kalınlığı (nm)	Borlama+TRD Tabaka Kalınlığı (nm)	Mikro sertlik (HV <sub>0.05</sub> )
800 °C 2 Saat	5	14	1503
800 °C 4 Saat	11	20	1615
800 °C 6 Saat	22	25	1761
900 °C 2 Saat	6	58	1725
900 °C 4 Saat	20	68	1787
900 °C 6 Saat	23	78	1793
1000 °C 2 Saat	22	95	2151
1000 °C 4 Saat	65	135	2177
1000 °C 6 Saat	85	151	2334

Optik mikroskop tabaka kalınlıkları ölçümlerine göre hem sadece borlanmış hem de borlanmış artı TRD uygulanmış numunelerde sıcaklık ve sürenin artışına paralel olarak kaplama tabakalarında artış tespit edilmiştir. TRD işlemi ile borlama tabakasının iki katı aşan tabakalar elde edilmiştir. Ancak TRD kaplamaların < 20 µm (Şen, 2004; Fan ve Ark., 2010; Pouraliakbara ve Ark., 2015) oldukları göz önünde bulundurulduğunda bu duruma TRD işlemi sırasında borür fazlarının malzemenin içerisine doğru difüze olmalarının da katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Sertlik için ise artış söz konusu değildir hatta bazı numunelerde sertlik düşüşleri tespit edilmiştir. Bu duruma borca zengin fazların başka elementlerle farklı fazlar oluşturarak fazların bor içeriğinin azalmasına atfedilebilir. Numunelerin sertlik dağılımları Şekil 7.4’de görüldüğü üzere kaplama tabakasından matrise doğru düşüş şeklindedir. Ancak uzun süre ile borlanan numunelerdeki difüzyon bölgesi daha geniş olmuş ve bu bölgelerin sertlikleri daha yüksek şekilde ölçülmüştür.

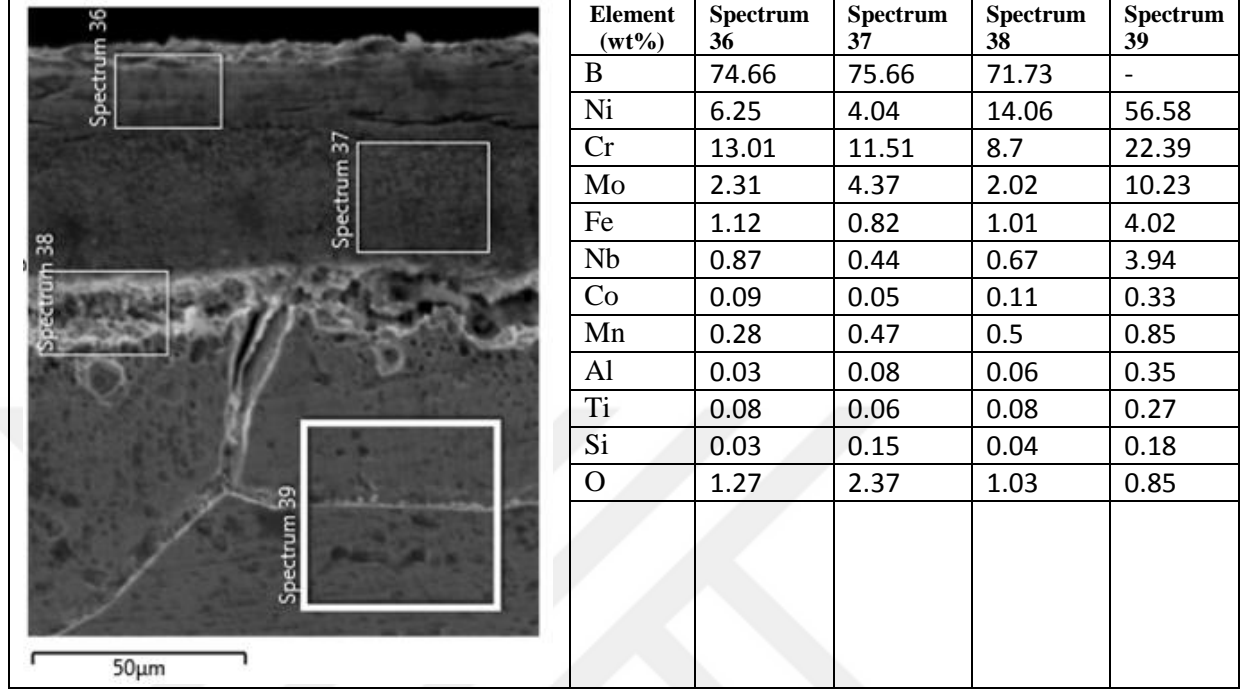


Şekil 7.4. Farklı süre ve sıcaklıklarda borlama ardından 1000 °C’de 2 saat süre ile Ti-Fe-C tozları ile TRD işlemine tabi tutulan numunelerin kaplama bölgesinden matrise doğru sertlik dağılımı.

Mikrosertlik ölçümleri sonucunda çeliklerin borlama işleminde olduğu gibi sertlik değerlerinin yüzeyden matrise doğru azaldığı tespit edilmiştir. Ticari Inconel alaşımının sertlik değeri 230 HV olduğu göz önünde bulundurulduğunda 10 katı aşan sertlik değerleri elde edilmiştir.

### 7.3. Tabaka Yapısı ve EDS Analizleri

Şekil 7.5. sadece borlama işlemi uygulanmış numunenin EDS analizi verilmiştir.



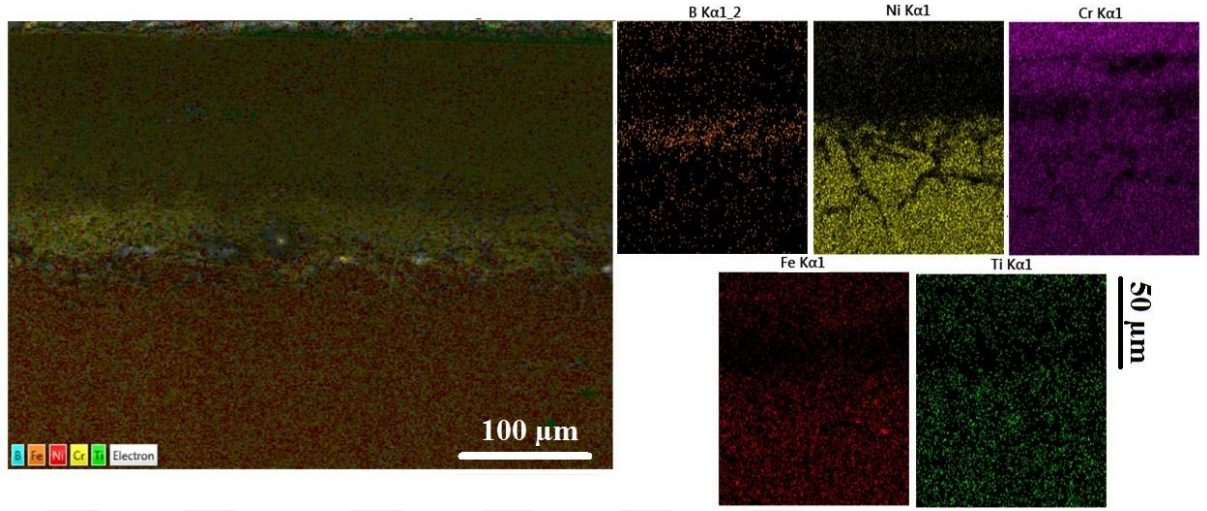
Şekil 7.5. 900 °C’de 6 saat süre ile borlanan numunenin farklı bölgelerinden alınan EDS analiz değerleri

Şekil 7.5’de kaplama bölgesi incelendiğinde yüksek bor oranı dikkat çekmektedir. Kaplama bölgesinde bor haricinde Cr, Ni, Mo ve Fe varlığı görülmektedir. Kaplama tabakasının üst kısmı Cr’ca zengin bir bölge oluşmuştur. Buna karşın Ni özellikle difüzyon bölgesinde yoğunlaşmıştır. Bu durum elementlerin sahip olduğu atom numaraları ile ilgilidir.

Şekil 7.6’da 900 °C’de 2 saat borlamanın ardından 1000 °C’de 2 saat süre Ti-Fe-C tozu ile TRD işlemine tabi tutulan numunenin EDS haritası verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere tabakanın en dış yüzeyinde TRD işlemi ile tatbik edilen tozdaki Ti içeriği altında sırasıyla Cr, Ni ve Fe elementleri yoğunluğu şeklinde belirlenmiştir. Bu durum en son uygulanan işlemin TRD olması dolayısıyla En dış yüzeyde Ti olması ve kromun atom numarası (24) demir (26) ve Nikelden (28) düşük olması sebebiyle borca en zengin olan (Fe, Cr) B’ye öncelikli olarak matristen faza girerek yüzeye doğru yayılmasından



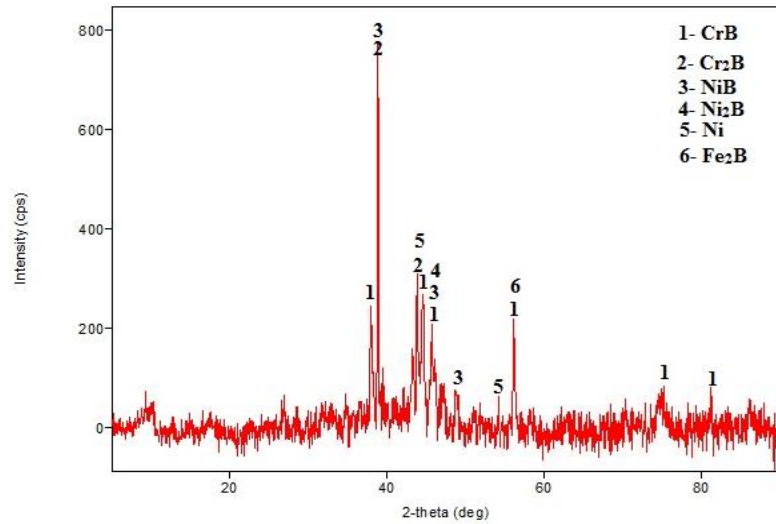
kaynaklanmıştır. Bu sayede malzemenin yüzeyi çok daha sert alt katmanlar ise setliği giderek azalmıştır.



Şekil 7.6. 900 °C’de 2 saat borlamanın ardından 1000 °C’de 2 saat süre Ti-Fe-C tozu ile TRD işlemine tabi tutulan numunenin EDS haritası

#### 7.4. XRD Analizleri

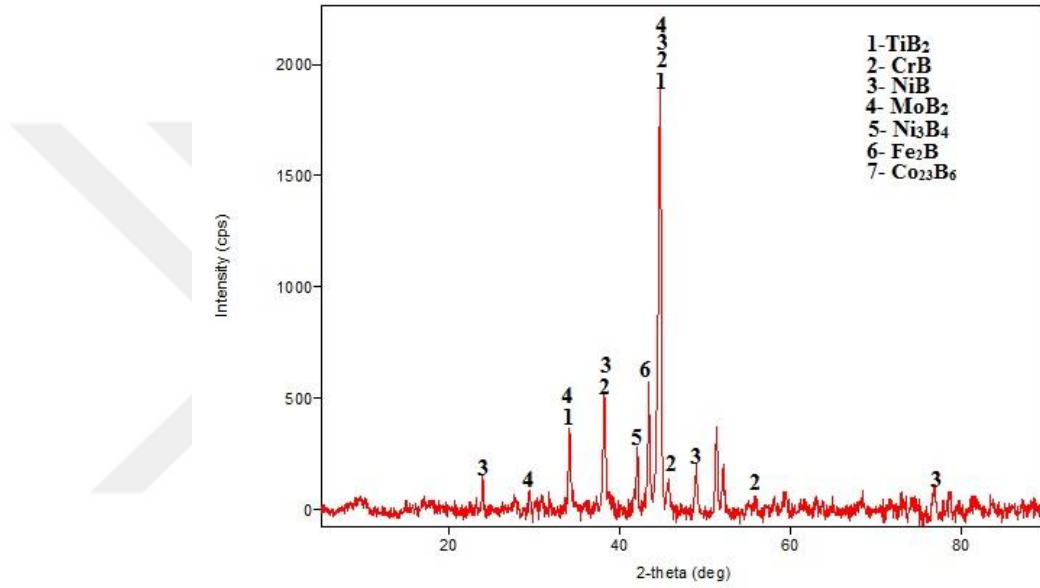
Şekil 7.7’de 1000 C’de 3 saat süre ile borlanmış Inconel 625 alaşımının XRD analizi verilmiştir.



Şekil 7.7. 1000 °C’de 3 saat süre ile borlanmış Inconel 625 alaşımının XRD analizi

Şekil 7.7. İncelendiğinde Nanobor tozu ile borlanan numunenin XRD analizleri baskın fazın CrB, Cr<sub>2</sub>B, NiB, Ni<sub>2</sub>B, Fe<sub>2</sub>B fazlarının yanında Ni fazına da rastlanmıştır. Buradaki elde edilen fazlar Inconel 625 alaşımının kimyasal içeriğindeki elementlerle uyuşmaktadır. Kimyasal içeriğinde bulunup tespit edilemeyen tek faz yapısı MoxBy fazlarıdır. Elde edilen serlik değerleri de bu fazları doğrular niteliktedir.

Şekil 7.8.de 1000 °C’de 6 saat süre ile borlamanın ardından 2 saat süre ile Ti-Fe-C tozu ile TRD uygulanan numunenin XRD analizi verilmiştir.



Şekil 7.8.de 1000 °C’de 6 saat süre ile borlamanın ardından 2 saat süre ile Ti-Fe-C tozu ile TRD uygulanan numunenin XRD analizi

Borlamanın ardından TRD uygulanan numunede TiB<sub>2</sub>fazı görülmektedir. TiB<sub>2</sub> elde edilmesi kullanılan Ti-Fe-C tozu dolayısıyla beklenen bir sonuçtur. Şekil 7.8’de de yüksek miktardaki Ti içeriği açık bir şekilde görülmüştür. TiB<sub>2</sub> yüksek sertlik değeri ile karakterize edilir. Ayrıca borlama işlemi uygulanan numunede tespit edilemeyen MoB<sub>2</sub> fazı da tespit edilmiştir.

### 7.5. Mikro-abrasyon Aşınma Test Sonuçları

Yapılan ısıtıl işlemin aşınma direnci üzerine etkilerini ve optimum ısıtıl işlem sürelerinin belirlenmesi amacıyla hem 800, 900 ve 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saat süre ile borlama ardından 1000 °C’de 2 saat süre ile TRD işlemi ile Ti-Fe-C tozları ile ısıtıl işleme

tabi tutulan Inconel 625 alaşımı hem de herhangi bir işlem uygulanmayan ticari Inconel 625 alaşımı kullanılmıştır. Deneylerde 5, 7,5 ve 10 N şeklinde 3 farklı yük kullanılmıştır. Aşındırıcı bilya olarak 1" (25,4mm) çapında AISI 52100 rulman çeliği, aşındırıcı olarak %25 lik (geri kalan kısım saf su) 800 mesh SiC aşındırıcı partikül içeren solüsyon kullanılmıştır. Deneyler 90 d/dk (rpm) dönme devrinde, 20 sn lik birimlerde de aşındırıcı solüsyon damlatılarak 3 dk sürede gerçekleştirilmiştir.

Aşınma testleri sonucunda aşındırılan yüzeylerin hacimleri

$V = \pi \cdot B^4 / 64 \cdot R$  formülü ile hesaplanarak belirlendi.

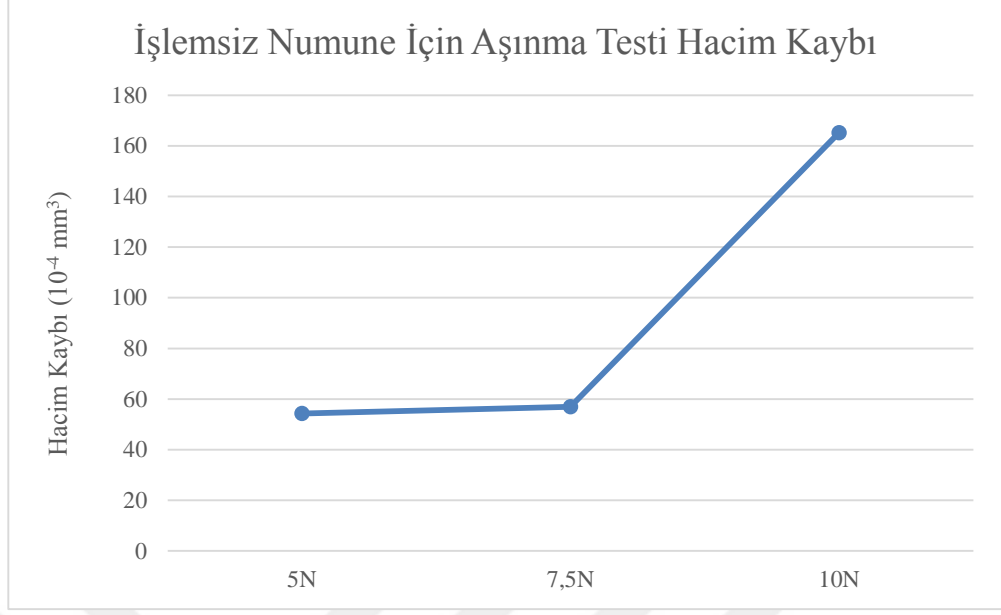
B: mm cinsinden kraterin dış çapı,

R: aşındırma işleminde kullanılan bilyanın yarıçapı (12,7 mm) dir.

Aşındırılan çift katmanlı kaplanan ve kaplanmayan numunelerin aşınma iz hacimleri sayısal verileri çizelge 7.2 de kıyaslamaları ise Şekil 7.9'da verilmiştir.

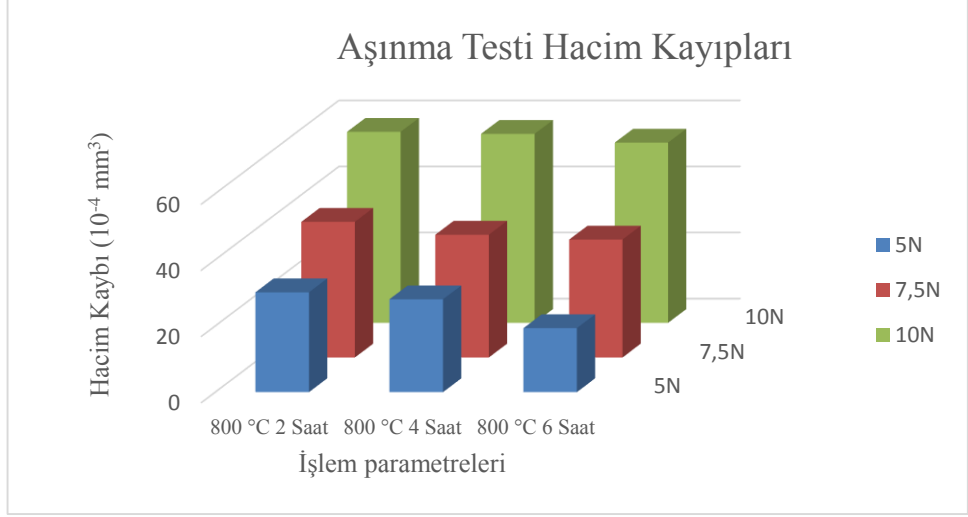
Çizelge 7.2. Mikro-abrasyon aşınma testi ile aşındırılan numunelerin aşınma iz hacmi değerleri

Numune kodları	Hacim kaybı, (10 <sup>-4</sup> mm <sup>3</sup> )		
	5N	7,5N	10N
<b>İşlemsiz Numune</b>	54.33	56.97	165.19
<b>800 °C 2 Saat</b>	30.16	41.00	57.81
<b>800 °C 4 Saat</b>	28.04	37.11	57.18
<b>800 °C 6 Saat</b>	19.33	35.63	54.53
<b>900 °C 2 Saat</b>	18.87	35.34	54.13
<b>900 °C 4 Saat</b>	16.30	31.73	41.65
<b>900 °C 6 Saat</b>	14.30	24.90	34.63
<b>1000 °C 2 Saat</b>	13.09	24.57	32.13
<b>1000 °C 4 Saat</b>	10.27	15.74	26.73
<b>1000 °C 6 Saat</b>	5.14	9.01	25.69



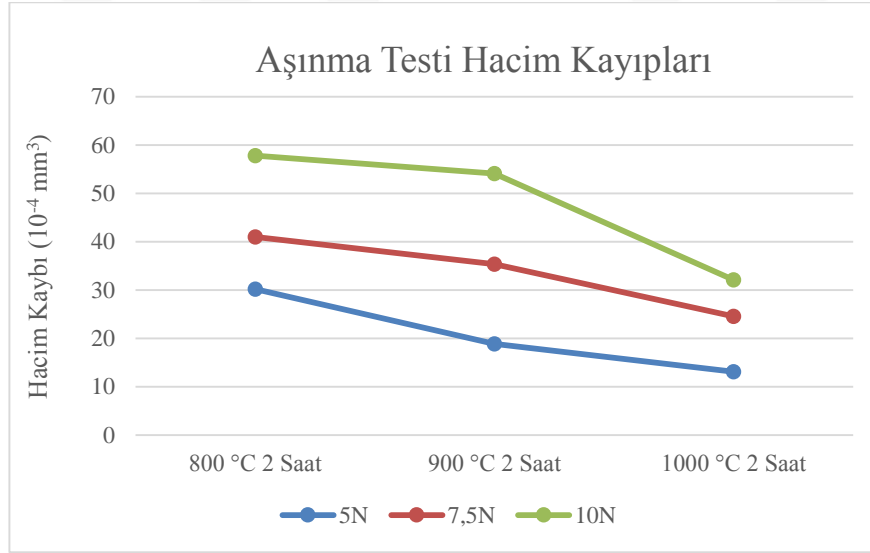
Şekil 7.9. İşlemsiz ticari Inconel 625 alaşımının Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kaybı grafiği

Şekil 7.9’da işlemsiz numunenin hacim kayıpları incelendiğinde artan yüklerle birlikte hacim kayıplarının da arttığı görülmekte, 10 N’luk yükte ise artış oranı 7,5 N’a göre daha fazla olmuştur. Bu durum aşındırıcı olarak kullanılan SiC aşındırıcı partiküllerinin uygulanan yük ile kırılarak daha fazla keskin köşeye sahip olmalarından dolayı daha fazla hacim kayıplarına neden olmuştur.



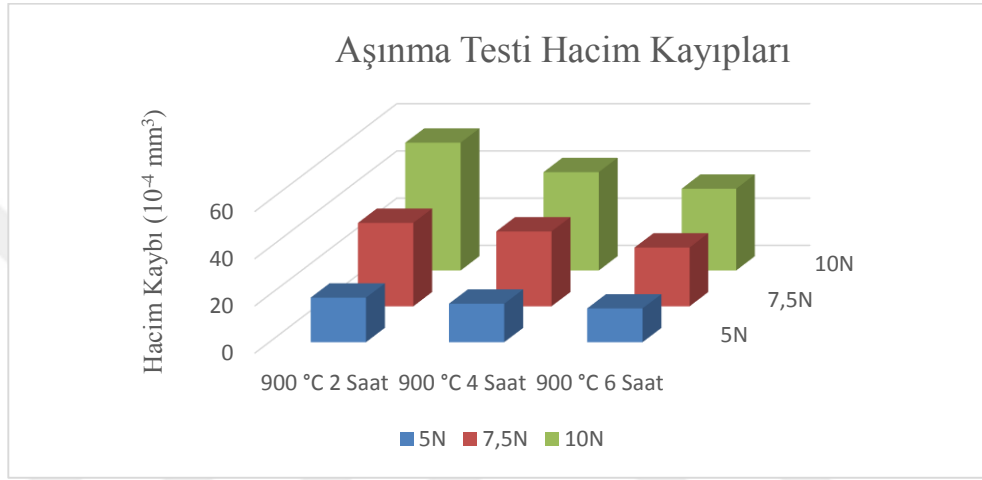
Şekil 7.10. 800 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanan ardından da 1000 °C’de 2 saat TRD işlemine tabi tutulan numunelerin Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kayıpları grafiği.

Şekil 7.10. incelendiğinde sabit sıcaklıkta borlama süreleri arttıkça numunelerdeki hacim kayıplarının azaldığı gözlenmektedir. Bu durum borlama sürelerinin artmasıyla numunenin yüzey sertliğinin ve kaplama tabakası kalınlıklarının artmasının sonucudur.



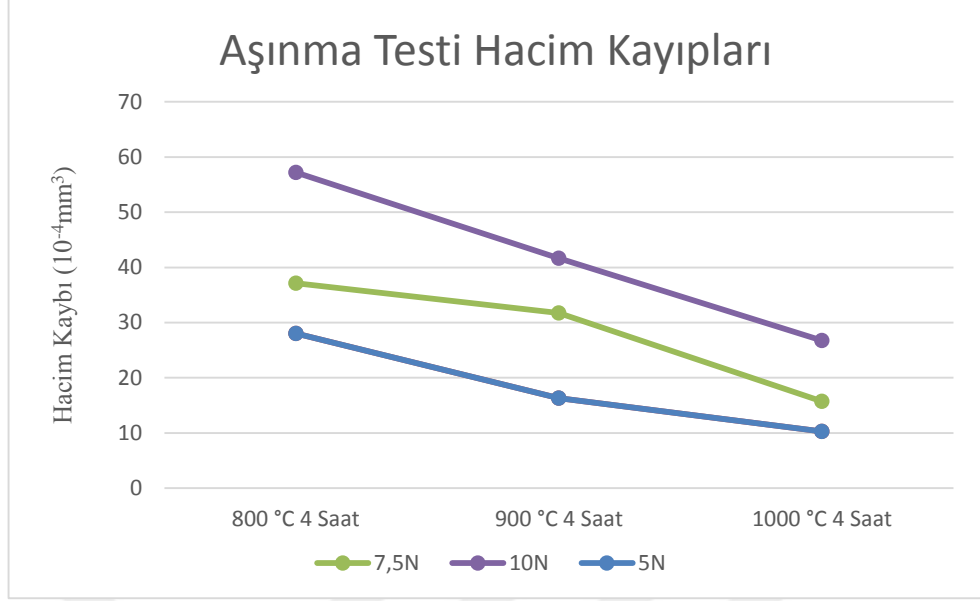
Şekil 7.11. 800, 900 ve 1000 °C’de 2 saat borlanan ardından da 1000 C’de 2 saat TRD işlemine tabi tutulan numunelerin Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kayıpları grafiği.

Şekil 7.11’de de borlama sıcaklığının artırılmasıyla hacim kayıplarının düştüğü görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere sıcaklık parametresindeki artış yüzey sertliğini arttırmakta ve sertlikle birlikte sürtünme direnci de arttırmaktadır.



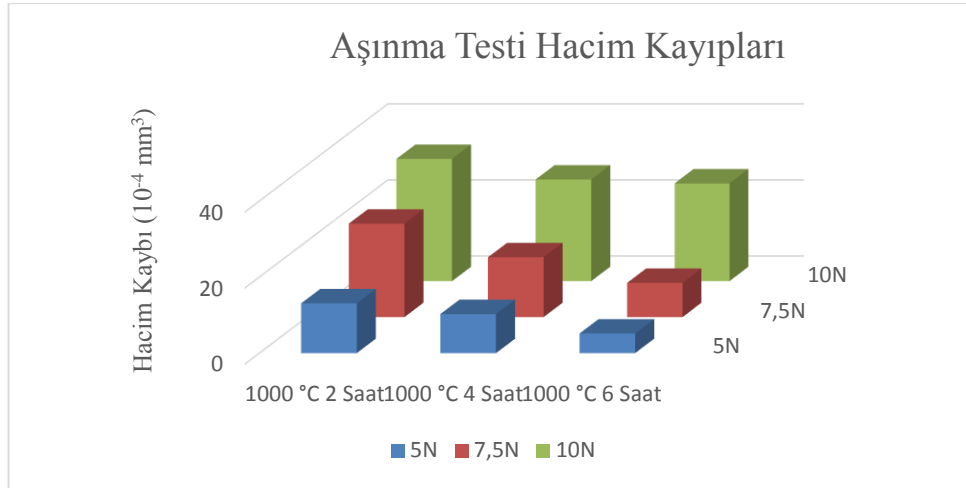
Şekil 7.12. 900 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanan ardından da 1000 °C’de 2 saat TRD işlemine tabi tutulan numunelerin Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kayıpları grafiği.

Şekil 7.12’de şekil 7.10’a benzer bir grafik olmasına rağmen borlama sıcaklığının artmasından dolayı şekil 7.10’daki değerlerden daha az hacim kayıpları gözlenmektedir. Bu durum hem borlama sıcaklığının hem de sürenin artmasıyla numunenin yüzey sertliğinin artışının sonucudur.



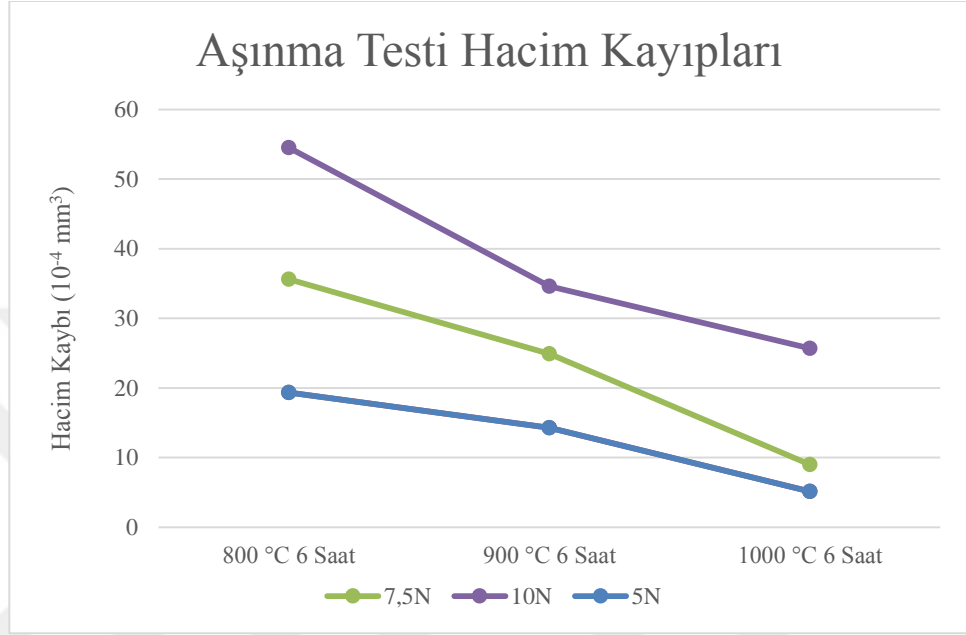
Şekil 7.13. 800, 900 ve 1000 °C’de 4 saat borlanan ardından da 1000 C’de 2 saat TRD işlemine tabi tutulan numunelerin Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kayıpları grafiği.

Şekil 7.13’de ise süre sabit kalsa dahi sıcaklık artışıyla birlikte hacim kayıplarında ki azalma dikkati çekmekte, yine bu durum borlama süresinin artışı ile yüzey sertliğinin artması olarak izah edilebilir.



Şekil 7.14. 1000 °C’de 2, 4 ve 6 saat borlanan ardından da 1000 °C’de 2 saat TRD işlemine tabi tutulan numunelerin Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kayıpları grafiği.

Şekil 7.14. incelendiğinde şekil 7.10 ve 7.12'ye göre daha az hacim kayıpları görülmekte. Şekil 7.10 ve 7.12'ye göre borlama sıcaklığının daha da artırılmasıyla, yüzeydeki kaplama tabakasının sertliğinin de arttığını söyleyebiliriz.



Şekil 7.15. 800, 900 ve 1000 °C'de 6 saat borlanan ardından da 1000 C'de 2 saat TRD işlemine tabi tutulan numunelerin Mikro-abrasyon aşınma testi sonrası hacim kayıpları grafiği.

Şekil 7.15'te görüldüğü gibi en az hacim kayıpları 1000 °C'de 6 saat süreyle yapılan borlama işlemi sonrasında elde edilmiştir. Bu da artan borlama süresi ve sıcaklığının yüzey sertliğini ve aşınma direncini arttırdığı şeklinde yorumlanabilir.

Yüke bağlı olarak numune hacim kayıpları incelendiğinde artan yüklerle birlikte numunelerin hacim kayıpları da artmıştır (Çizelge 7.2.). Bu artış aşındırıcı solüsyon içerisindeki partikül üzerine gelen yükün artması sonucu partikülün üzerindeki gerilimin artmasına bağlanabilir. Çünkü aşındırıcı top ile aşındırılan yüzey arasında sıkışan partiküle uygulanan yük arttığında partikül aşındırılan malzemenin yüzeyine daha fazla batmaya çalışacaktır. Bu batma işleminde rol oynayan önemli parametrelerden birisi şüphesiz ki numune hacim sertliği olacaktır. Numune sertliğinin artması genellikle yüzeye batan abrasif (abrasive) daha fazla direnç gösterileceğinden abrasif partikülün

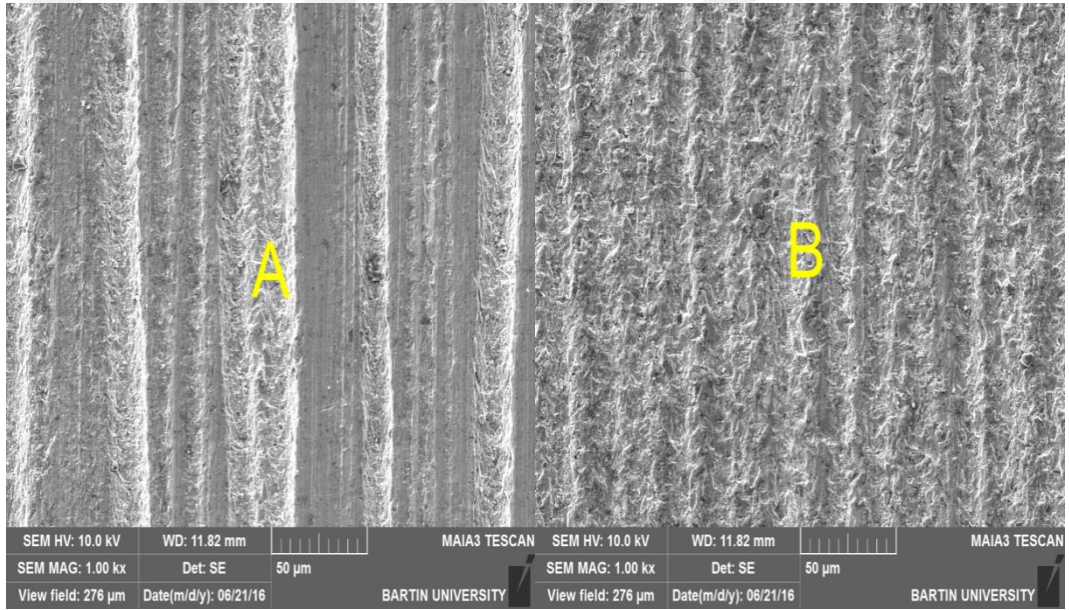
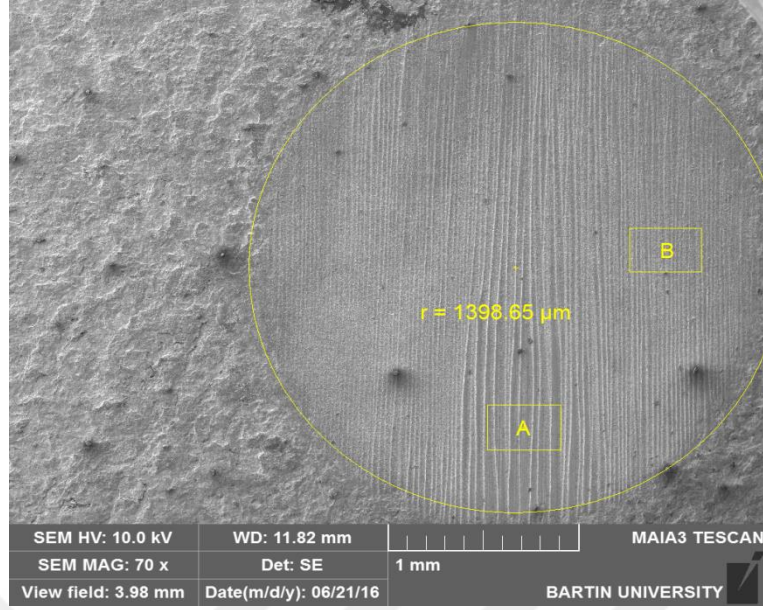


nüfuziyeti azalacaktır. Ancak partikül üzerindeki yükün artması nüfuziyeti arttıracaktır. Malzeme yüzeyine nüfuz eden partikülün ikinci işlemi ise önündeki malzemeye kuvvet uygulayarak onu bağlı olduğu yüzeyden koparmak olacaktır. Burada ise numunenin mikroyapı ve mikro mekanik özellikleri önem arz edecektir. 30-40 µm lik splatar halinde plastik deformasyon ile birbirine tutunan partiküller en zayıf oldukları splat bağlantı noktalarından abrasifin kesme etkisi ile koparlar. Böylece yüzeyden metal transferi gerçekleşir. Aşınma deneyi sonuçları incelendiğinde 5 N ile gerçekleştirilen testlerde ısıtılmış işlem görmüş numuneler 10 katı aşınma direnci gösterirken 7,5 N ve 10 N daki aşınma dirençleri yaklaşık 6 kat şeklinde gerçekleşmiştir. Bu durum artan yüklerle birlikte abrasif partikül üzerine gelen yükün artması partikülün kırılmasına böylece kırılan aşındırıcıların daha fazla keskin köşeye sahip olmasına yol açtığından aşınma kayıplarının artmasında ikinci bir partikül şeklinde etkisi olmuştur.

Hacim kayıpları göz önüne alındığında ısıtılmış işlem görmüş tüm numuneler farklı aşınma dirençleri göstermiş olsa da işlemsiz Inconel 625 alaşımından daha iyi aşınma direnci göstermişlerdir. Aşınma dirençleri sertlik artışlarına paralel bir şekilde olmuştur.

Top ve aşındırılan numune arasında meydana gelen aşınma mekanizmasının türü abrasif partikülün bu bölgedeki hareketi ile yakından ilgilidir. Eğer aşındırıcı partikül top üzerinde hareket edemez ise aşındırılan yüzey üzerinde bir seri paralel oluklar meydana getirilir. Bu tip aşınmaya oyuklanma (Grooving) tipi veya iki cisimli abrasyon denir. Eğer aşındırıcı partikül iki yüzey arasında rahat ediyorsa kamalamaya benzer bir etki ile yuvarlanma (Rolling) tipi veya üç cisimli abrasyon meydana getirir (Habig ve Ark. 1981; Batista ve Ark. 2001). Aşınma testine tabi tutulan numunelerdeki aşınma türünün tespiti amacıyla işlemsiz Inconel 625 alaşımı, 800, 900 ve 1000 °C'de 2 saat süre ile hem borlama hem de TRD işlemine tabi tutulan numunelerin aşınmış SEM yüzeyleri incelenmiştir.

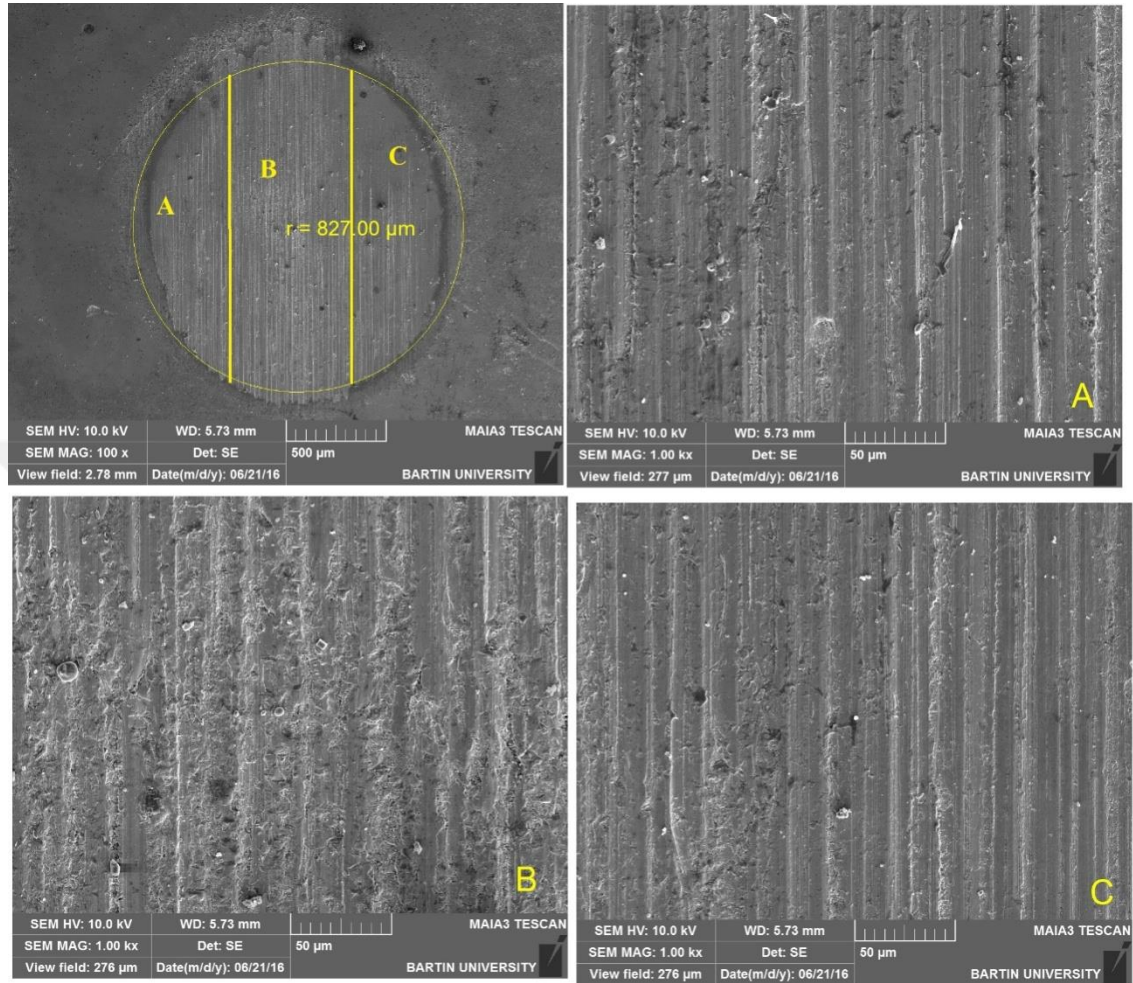
Şekil 7.16 da herhangi bir yüzey kaplama işlemine tabi tutulmadan mikroabrasyon testine tutulan Inconel 625 alaşımının SEM aşınma yüzey fotoğrafı verilmiştir. ASTM G77 standartlarında gerçekleştirilen test sonucunda elde edilen aşınma izleri beklenildiği şekilde dairesel geometride oluşmuştur.



Şekil 7.16. 90 rpm 5 N'luk yük altında aşınma testine tabi tutulan işlemsiz numunenin SEM aşınma yüzey görüntüsü.

A ile ifade edilen bölgenin büyük büyütmedeki fotoğrafı incelenirse Yuvarlanma ve oyuklanma tipi aşınma mekanizmalarının meydana geldiği görülmektedir. B ile ifade bölge incelendiğinde ise aşınma mekanizmasının oyuklanma'den yuvarlanma'e doğru baskınlaştığı ifade edilebilir.

Şekil 7.17’de 800°C’de 2 saat borlama ardından 2 saat TRD işlemine tabi tutulan ve 5 N ile aşındırılan numunenin SEM yüzey görünümü verilmiştir.

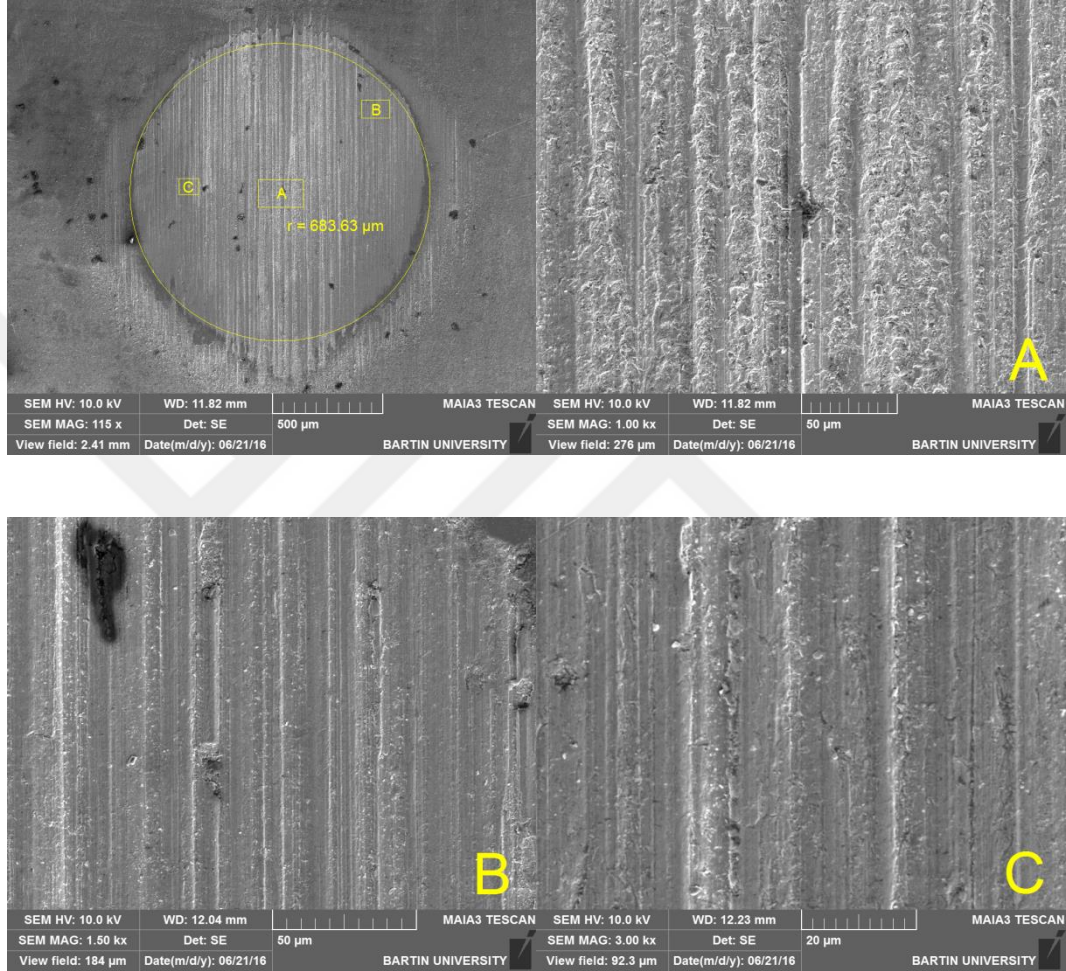


Şekil 7.17. 800 °C’de 2 Saat borlanan ve ardından 1000 °C’de 2 saat TRD işlemi uygulanan numunenin 90 rpm ve 5 N luk yük altındaki aşınma testi SEM yüzey görüntüsü.

Şekil 7.17. incelendiğinde aynı deney şartlarında işlemsiz numunenin aşınma dairesi yarıçapı 1398,65 µm olurken işlem görmüş numunenin aşınma iz yarıçapı 827 µm olmuştur. Numune hacim kayıplarında bu durum görülmektedir. Numune üzerindeki aşınma partikülleri incelendiğinde oyuklanma tipi aşınma baskın aşınma mekanizması (A edilen bölgede ise baskın aşınma mekanizmasının yuvarlanma az da olsa oyuklanma tipi aşınma izleri dikkat çekmektedir. Daha yüksek sertlikteki numunelerle kıyaslandığında

(Şekil 7.12 ve Şekil 7.13) burada aşındırıcı partikülün daha fazla malzeme koparması beklenen bir sonuçtur.

Şekil 7.18’de 900 °C’de 2 saat süre ile borlama ve ardından 2 saat süre ile TRD işlemi uygulanan numunenin SEM görünümü verilmiştir.

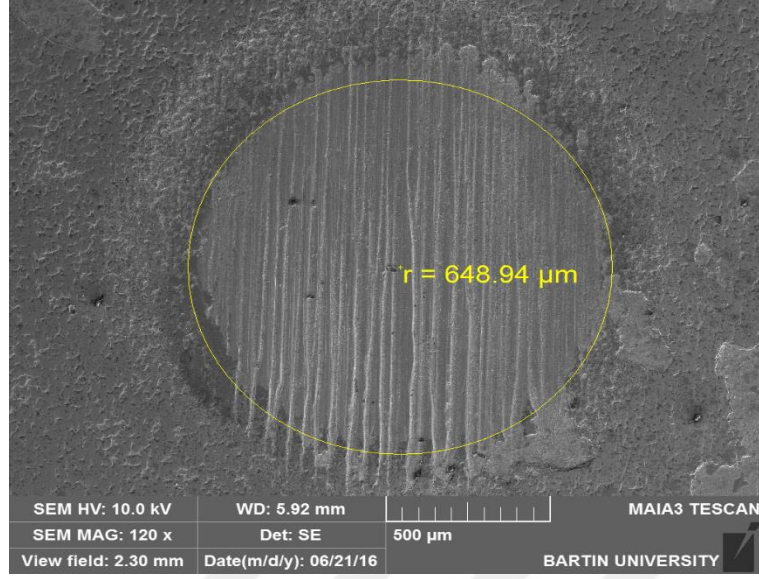


Şekil 7.18. 900 °C’de 2 Saat borlanan ve ardından 1000 °C’de 2 saat TRD işlemi uygulanan numunenin 90 rpm ve 5 N luk yük altındaki aşınma testi SEM yüzey görüntüsü.

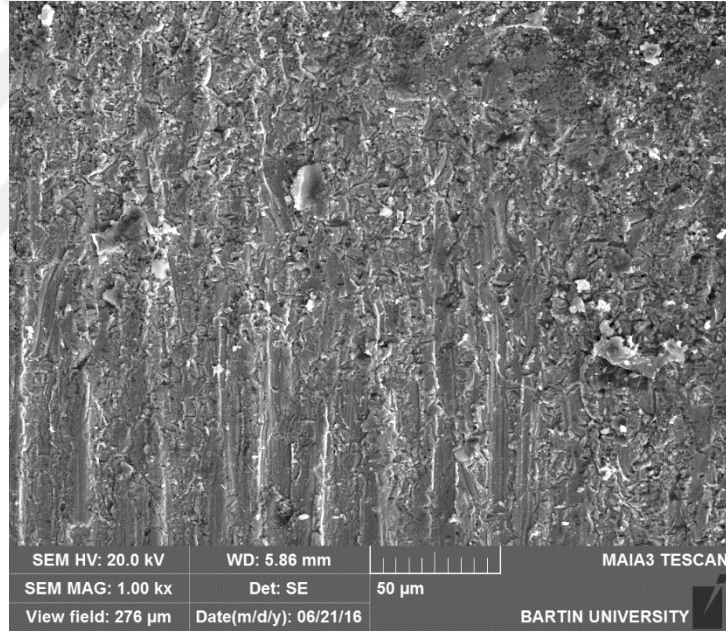
Şekil 7.18 incelendiğinde aynı deney şartlarında işlemsiz numunenin aşınma dairesi yarıçapı 1398,65 µm olurken işlem görmüş numunenin aşınma iz yarıçapı 683.63 µm olmuştur. Numune hacim kayıplarında yaklaşık yarı yarıya bir azalmanın varlığı

dikkat çekmiştir. Yine numune üzerinde oyuklanma ve yuvarlanma tipi aşınma mekanizmaları aşikar bir şekilde görülmektedir. Ancak işlemsiz ve 2 saat süre ile borlandıktan sonra TRD işlemine tabi tutulan numuneleri merkez bölgelerinde alınan aşınma izleri kıyaslanacak olursa (A ve B bölgeleri) aşındırıcı partikülün kayması sonucu meydana gelen ve resim üzerinde pürüzsüz paralel çizgiler olarak meydana gelen iz genişliğinin daha dar olduğu dikkat çekmektedir. Yuvarlanma tipi hasar mekanizmasının artmış olduğu ise dikkat çekmektedir. Bu durumu artan yüzey sertliği ile ilişkilendirmek mümkün olacaktır. Çünkü artan yüzey sertliği ile aşındırıcı partikül numune üzerinde yeterli batma veya kesme kuvvetini sağlayamadığı için küçük yongalar şeklinde yüzeyden partikül koparmaya çalışmış bu da mekanizmanın yuvarlanma tipi oluşmasına sebebiyet vermiştir.

Şekil 7.19'de 1000 °C'de 2 saat süre ile borlama ve ardından 2 saat süre ile TRD işlemi uygulanan numunenin SEM görünümü verilmiştir.



a)



b)

Şekil 7.19. 1000 °C’de 2 Saat borlanan ve ardından 1000 °C’de 2 saat TRD işlemi uygulanan numunenin 90 rpm ve 5 N luk yük altındaki aşınma testi SEM yüzey görüntüsü.

Şekil 7.19 incelendiğinde en yüksek yüzey sertlik değerlerinden birine sahip olan numunenin daire iz çapı diğer numuneler ile kıyaslandığında daha küçük çıkmıştır.

Aşınma mekanizması olarak diğer numunelerden bir farklı olmamasına rağmen resim üzerinde 1 ile işaretlenen ve aşındırıcı solüsyonun giriş bölgesi olan alanda aşınma mekanizmasının mikro Yuvarlanma olduğu görülmüştür. Bunun iki sebebe bağlamak mümkündür. Birincisi bu bölgede abrasif partiküller üzerine gelen yükün az olması neticesinde partiküllerin kayarak değil de yuvarlanarak malzemeye hasar vermeye çalışmasıdır. Diğer bir sebep ise bu bölgede yüzey sertliğinin daha yüksek olmasıdır. Şekil 7.19 B'deki yüksek büyütmedeki fotoğrafın üst kısmına bakıldığında Yuvarlanma tipi aşınma görünürken alt tarafta ise oyuklanma aşınma mekanizmasının oluşmaya başladığı görülmektedir.

Aşınma deney sonuçları incelendiğinde hem ısıtılma tabii tutulan hem de herhangi bir işlem uygulanmayan numunede mixed type olarak adlandırılan oyuklanma ve yuvarlanma aşınma mekanizmalarının bir arada olduğu karışık tip aşınma meydana gelmiştir. Ancak sertlik artışı ile oyuklanma tipi aşınmadan yuvarlanma tipi aşınmaya doğru bir geçiş gözlemlenmiştir.

## 8. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada Inconel 625 alaşımı önce 800, 900 ve 1000 °C de 2, 4, 6 saat süre ile Nanobor tozu ile borlama işlemine tabi tutulmuştur. Ardından borlanan numunelerin tamamı 1000 °C'de 2 saat süre ile Ti-Fe-C tozları ile TRD işlemine tabi tutulmuştur. Çift katmanlı olarak kaplanan ve kaplanmayan Inconel 625 alaşımından hazırlanan numuneler geleneksel mikro yapı analizleri ve mikro-abrasyon aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir.

1-Tüm deney koşullarında elde edilen borür içerikli çoklu fazlara sahip kaplama tabakaları elde edilmiştir. Mevcut literatürdeki Ni bazlı alaşımlardaki Silisid tabakası oluşumu kullanılan kaplama tozları sayesinde engellenmiştir.

2- Kaplama tabakalarının kalınlığı artan süre ile parabolik olarak artmıştır. Literatürdeki çalışmalara göre çok daha kalın kaplama tabakası kalınlıkları elde edilmiştir. Kaplama tabakaları 14-151 µm aralığındadır.

3- 230 HV civarında sertlik değerlerine sahip çelik Ni esaslı Inconel 625 süperalaşımı kaplama işlemi sonucunda yüzeyde 1503- 2334 HV sertlik değerlerine ulaşılmıştır.

4- XRD analizleri sonucunda borlama + TRD sonrası numunelerde TiB<sub>2</sub>, CrB, NiB, MoB<sub>2</sub>, Ni<sub>3</sub>B<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>B fazları ve Co<sub>23</sub>B<sub>6</sub> çökeltisi tespit edilmiştir.

5- Çift katmanlı kaplanan tüm numuneler ısı işleme tabi tutulmayan numunelere göre daha iyi aşınma direnci göstermiştir. Artan borlama süresi ile aşınma direnci artmıştır. Yükün artışı aşınma direncini azaltmıştır.

6- Aşınma mekanizması olarak tüm numunelerde oyuklanma ve yuvarlanma aşınma mekanizmalarının bir arada olduğu karışık tip aşınma meydana gelmiştir. Ancak sertlik artışı ile oyuklanma tipi aşınmadan yuvarlanma tipi aşınmaya doğru bir geçiş gözlemlenmiştir.



Çalıma sonuçları Nanobor tozları kullanılarak geleneksel borlama yöntemlerinde kullanılan EKabor 2 tozunda meydana gelen silisid tabakası oluşumunun engellenmesinin yanında daha kalın ve sert kaplamalar üretimine olanak sağladığından Ni-bazlı süperalaşımların olumsuzluğu olan aşınma direnlerinin 10 katı aşan iyileştirmeler yapılabileceğini göstermiştir. Ancak, Nano boyutlu tozların satış fiyatları yüksek (100 gr toz için 650 \$) ve 15-30 gün aralığında teslimat süresi vardır. Dolayısıyla mevcut durumda gerek ülkemizde gerekse de yurtdışında Nano boyutlu tozların maliyeti yüksek olduğundan endüstriyel uygulamalarda kullanımı yoktur. Sadece bilimsel çalışmalarda ve savunma sanayinde sınırlı olarak kullanılmaktadır. Bundan dolayı Nano boyutlu tozların tek sınırlaması olan yüksek maliyetlerinin makul seviye indirgenmesi üzerine çalışmalar yapılmalıdır. Ayrıca düşük sıcaklıklarda uygulanabilecek yeni kaplama yöntemleri üzerine çalışmalar yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Anonim, 2009 Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 25 (1-2) 302 - 330  
Erişim Tarihi: 20.05.2015
- Anonymous, 2013 Special Metals Corporation Products, "INCONEL alloy 625",  
<http://www.specialmetals.com/products>. Erişim Tarihi: 14.03.2016
- Anonymous, 2014 <http://www.nasa.gov> Erişim Tarihi: 12.02.2016
- Anonymous, 2014 <http://www.timet.com.tr/inkonel.asp> Erişim Tarihi: 10.08.2015
- Anonymous, 2013 <http://www.specialmetals.com/products>. Special Metals Corporation,  
(Aug 13) INCONEL and INCOLOY are trademarks of the Special Metals  
Corporation group of companies. Erişim Tarihi: 14.01.2016
- Arai T., 1991 Thermo reactive Deposition/Diffusion Process for Surface Hardening of  
Steels, ASM Handbook, V.4: Heat Treating. Materials Park, OH: ASM  
International, pp.1000-1014.
- Ataibiş, V., Taktak Ş. 2015 "Characteristics and growth kinetics of plasma paste  
borided Cp-Ti and Ti6Al4V alloy". Surface and Coatings Technology,  
279, 65-71.
- Atik, E., 2001. "Farklı bir yüzey sertleştirme yöntemi: Borlama", Makina Metal  
Dergisi, sayı:1.
- Aw P.K., Batchelor AW, Loh NL. 1997 "Structure and tribological properties of  
plasma nitrated surface films on Inconel 718". Surface Coating  
Technology, 89, 70-76.
- Bahadır B., 2010, "Süperalaşımın açık ve kontrollü atmosferde dökümü", Yüksek  
Lisans Tezi ,YTÜ,FBE İstanbul.
- Barış, M., 2007. Farklı borlama sürelerinin transmisyon çeliğinde abrasiv aşınma  
davranışlarına etkisinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi,  
Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara.
- Baştürk, S., Erten, M., (2006) Borlama İle Yüzey Sertleştirme Çalışmaları, *Mühendis ve  
Makina*, Cilt:47 Sayı: 563 57-74
- Batista, J.C.A., Matthews, A., Godoy. C., 2001. "Microabrasive wear of PVD duplex  
and single-layered coatings", Surface Coating Technology, V:142-144, pp.  
1137-1143.
- Bayça, S.,U., Şahin, S., 2004" Borlama" Mühendis ve Makine Dergisi, Sayı 532, Mayıs
- Baydoğan M., Dinç H, Motellabzadeh A., Çimenoglu H., 2013" Thermochemical  
Boriding of Inconel 718 Superalloy". Academic Journal of Science, ISSN:  
2165-6282 :: 2(2):385-389.
- Bozkurt N., 1984. "Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme" Doktora tezi İTÜ  
İstanbul.
- Bozkurt N., Geçkinli, E., Geçkinli, M., 1983. "Aturadiographic Study on Boronized  
Steel" Materials Science and Engineering , V, 57, pp, 181-186.
- Bradley E.F., 1989, "Superalloys", ASM International Metals Park, OH 44073.

- Çakır H., Kanca E., Günen A., Demir M., Çavdar F., IMSTEC 2016 Uluslararası Malzeme ve metalürji sempozyumu. 6-8 Nisan 2016 Nevşehir Üniversitesi Kapadokya/Nevşehir
- Çalık A., 2002. "Türkiye'nin Bor Madenleri ve Özellikleri" Makine ve Mühendis Dergisi, Sayı 508.
- Çelik A., 2006"Nickel Esaslı Süperalaşımların Talaşlı İşlenmesi İçin SiAlON Esaslı Kompozit Malzemelerin Geliştirilmesi Yüksek Lisans Tezi Fen Bilimleri Enstitüsü (Ağustos – 2006)
- Deng D., Wang C., Liu Q., Niu T., 2015"Effect of Standard heat treatment on micro structure and properties of borided Inconel 718". Transactions Nonferrous Materials Society China, 25, 437–443,.
- Dinç H., 2013 Inconel 718 Süperalaşımının Termokimyasal Borlanması", Yüksek Lisans Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
- DongMua B., Yanga C., Shena B., Jiangc H., 2009"Oxidationresistance of boridedpurecobalt". Journal of AlloysandCompounds, 479 (1–2), 629–633,.
- Dong, M.,Shen, B., Yang, C., Zhao, X., 2009. Microstructure analysis of boronized pure nickel using boronizing powder swith SiC as diluent, Vacuum 83 1481-1484
- Dye, D.,Hunziker, O., Roberts, S.M., Reed, R.C., 2001, "Modelling of the Mechanical Effects Inducedby the Tungsten Inert Gas Welding of IN718 Superalloy." Met. Trans., 32A, pp. 1713-1725..
- Ediz N., Özdağ H., 2001. "Bor Mineralleri ve Ekonomisi" DPÜ, FBE. Dergisi, Kütahya.
- Ezugwu, O., Wanga Z., M., Machadop A. R., 1998 "The machinability of nickel based alloys: a review", Journal of materials Processing Technology, Volume 86, Issues 1-3, 1-16
- Fan X.S., Z. G. Yang, C. Zhang, Y. D. Zhang, H. Q. 2010 Che, Evaluation of vanadium carbide coatings on AISI H13 obtained by thermo-reactive deposition/diffusion technique, Surf. Coat. Technol. 205, 641– 646.
- Field M. 1968., "Machining aerospace alloys", Iron and Steel Institute, Special Report 94, 151-160
- Genel K., 2005. Boriding kinetics of H13 steel Vacuum 80, 451-457.
- Graverend L. B.J.,Cormier J., Kruch S., Gallerneau F., Mendez j. 2010Microstructural Parameters Controlling High-Temperature Creep Life of the Nickel-Base Single- Crystal Superalloy MC2, The Minerals, Metals&Materials Societyand ASM International,.
- Günen A., Çarboğa C., Kurt B., Orhan N. 2013" Borlama işleminde kullanılan bor tozu tane boyutunun kaplama tabakası üzerine etkisi". Nevşehir Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2(1) 12-19,.
- Günen A., 2012 ."Nano Bor Tozu İle Yüzeyi Alaşımlandırılan Östenitik Paslanmaz Çeliğin Mekanik Özellikler Ve Korozyon Davranışının Araştırılması". Fırat Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü ,Doktora Tezi, Elazığ.
- Güneş İ., Keddam M., Chegroune R., Özçatal M. 2015" Growthkinetics of boridelayersformed on 99.0% puritynickel". BulletinMaterialsScience, 38 (4), 1113–1118,.

- Habig, K.H., Chatterjee-Fischer, R., 1981. "Behaviour of Boride Layers Alloyed Steels," *Tribology International*, V:14 Issue:4, pp. 209-
- Hunger, H. J., Lobig, G., 1997. Generation of boride layers on steel and nickel alloys by plasma activation of boron tri fluoride, *Thin Solid Films*, 310, 244 - 250.
- Hausner HH., 1966 "Coating of High Temperature Materials", Springer Science and Business Media Newyork pp. 29-35 DOI 10.1007/978-1-4757-1284-1,.
- Jain V., Sandararayan G. 2002. "Influence of the packthickness of the boronizing mixture on the boriding of steels" *Surface and Coating Technology* 149 H. 21-26.
- Jean Koster 2010 ASEN 4012
- Jovanovic T. M., Lukic B., Miskovic Z., Bobic I., Cvijovic I. Dimcic B., 2007. Processing and Some Applications of Nickel, Cobalt and Titanium Based Alloys, Association of Metallurgical Engineers of Serbia, Review Paper, UDC:669.2.245'873=20.
- Karakan M, Alsarar A, Çelik A. 2002 "Plazma Borlama". *Mühendis ve Makine*, 43, (512), 51-54,.
- Keown S.R., Pickering F.B., 1997. "Some aspects of the occurrence of Gooran in Alay sheels" *Metal science* 26,7, H 225-234.
- Khafri A. M., and Fazlalipour F. 2008 Vanadium Carbide Coatings on Die Steel Deposited by the Thermo-reactive Diffusion Technique. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, pp. 2465– 2470.
- Kon Ö., 2006 "Termoreaktif Difüzyon Yöntemiyle TiBCN Kaplanmış WC-Co Kesici Takımların ve Çeliklerin Aşınma Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi.
- Kulka M, Makuch N, Pertek A, Piasecki A. 2012 "An alternative method of gasboriding applied to the formation of borocarbured layer". *Materials Characterizations*, 72, 59–67,.
- Leyens, C., Peters, M., 2003 "Titanium and titanium alloys", Wiley-VCH,.
- Loria, E.A., 1992, Recent Development in The Progress of Superalloy 718, *JOM* 44 (6), 33–36
- Mal K.K., Tarkan S.E., 1973. "Diffused Boron Ups Hardness Wear Resistance of Metals" *Materials Engineering* 77, pp. 70-71.
- Matuschka, A.G.V. , 1980. "Boronizing" München, Wien: Hanser 100 s.
- Muhammad W, Hussain K, Tauqir A, Ulhaq A, Khan AQ. 1999 "Evaluation of halide-activated pack boriding of INCONEL 722". *Metallurgical and Materials Transactions A*, Volume 30A, 670-674,.
- Oian L.L., Stone G.A., 1995. "Study of the behavior of boron diffusion in plain carbon steels" *Journal of Materials Performance* V,4, N,1 Park Ohio.
- Özbek, İ., Akbulut, H., Zeytin, S., Bindal, C., Üçışık, A. H., 2000. The characterization of borided 99.5% purity nickel, *Surface and Coatings Technology* 126 166-170.
- Özdemir Ö, Omar MA, Usta M, Zeytin S, Bindal C, Üçışık AH. 2009 "An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel". *Vacuum*, 83, 175–179,.

- Özsoy, A., 1991. “Çeliğin Borlanması ve Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi” Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Petrova R.S., N. Suwattanont, K.K. Pallegar, R. Vangaveti.2007” Boroncoatingto combat corrosionandoxidation”, Corros. Rev. 25-555–569.
- Pollock, T. M., Tin, S., 2006. “Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, Microstructure, and Properties”. Journal Of Propulsion And Power Vol. 22, No. 2.
- Pouraliakbara H., G. Khalaj, L. Gomidželovic, M.J Khalaj, M. Nazerfakhari, 2015.Duplex ceramic coating produced by low temperature thermo-reactive deposition and diffusion on the cold work tool steel substrate: Thermodynamics, kinetics and modeling, Ceramics International41(9)350–9360.
- Reed C. R., 2006 The Superalloys Fundamentals and Applications, Cambridge University Press, New York,.
- Roskill, 1995 Information Ltd., 1995, The Economics of Boron, Londra, İngiltere.
- Sarıkaya Ö., 2007 Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri. Sakarya, s. 248-254.
- Selçuk B.,1994. Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Erciyes Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri.
- Sen U., 2004 Kinetics of titanium nitride coatings deposited by thermo-reactive deposition technique, Vacuum 75- 339–345.
- SmithG.D., D.J. Tillack, S.J. Patel, 2001 in: E.A. Loria(Ed.), Superalloys 718, 625, 706 and various derivatives, The Minerals Metals&Materials Society, Warrendale, PA, , pp. 35–46.
- Sims, C.T.,Stoloff, N.S., Hagel,2007 ”W.C. Superalloys II- High Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power”, John Wiley&Sonc Inc. New York, NY, USA.Reed, R., Physical Metallurgy and Microstructure of Superalloys University of Birmingham.
- Sinha, A.K., 1991. Boriding (Boronizing), ASM Handbook, J. HeatTreating, Ohio, USA., 4, 437-447.
- SpinelliJ.E., I.L. Ferreira, A. Garcia, J. 2004 AlloyComp. 384/ 217–226.
- Sun Y., 2003”Kinetics of layer growth during plasma nitriding of nickel based alloy Inconel 600”. Journal of Alloysand Compounds, 351 , 241–247,.
- Taşçı A., 1993. “Borlanmış çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları”, Y.Lisans. Tezi İTÜ. İstanbul.
- Tavakoli H. And MousaviKhoie S. M., 2010 An Electrochemical Study of the Corrosion Resistance of Boride Coating Obtained by Thermo-reactive Diffusion. Materials Chemistry and Physics, pp. 1134–1138.
- Türktekin M., 1998. H13 Sıcak İş Takım Çeliklerine Borlama ve Nitrüleme İşlemlerinin Birlikte Uygulanması. Erciyes Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, 79s, Kayseri.

- 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, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa.
- Uzun H.A., 2002 "Borlama İle Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma Ve Korozyona Karşı Dayanımları" S.D.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü Y. Lisans Tezi Isparta,
- Vangavati, R., 2006., Boron induced surface modification of transition metals, yüksek lisans tezi, New Jersey Institute of Technology.
- Veli Çay V, Ozan S., 2005 "Süperalaşım ve Uygulama Alanları". Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları. Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü-ELAZIĞ
- Wang B, Jin X, Xue W, Wu Z, Du J, Wu J. 2013 "High temperature tribological behaviors of plasma electrolytic borocarbonized Q235 low-carbon steel". *Surface Coating Technology*, 232, 142-149,.
- Zhang Y.J., Y.J. Huang, L. Yang, J.G. Li, J. 2013 *Alloy Comp.* 570 / 70-75.
- Zhao S., X. Xie, G.D. Smith, 2004 "The oxidation behavior of the new nickel-based superalloy Inconel 740 with and without Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> deposit", *Surf. Coat. Technol.* 185 / 178-183.
- Zhen-xue S., Jia-rong L., Shi-zhong L., Xiao-guang W., Xiao-dai Y., 2012 Effect of Ru on Stress Rupture Properties of Nickel-Based Single Crystal Superalloy at High Temperature, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 22/ 2106-2111.
- Zietara M., 2011. Microstructure Stability of Second and Fourth Generation Single Crystal Nickel-Base Superalloys During High Temperature Creep Deformation" Kraków.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Yazar 1973 yılında Antakya’da doğdu. İlkokul, Ortaokul ve Liseyi Antakya’da tamamladı. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü’nü 1996 yılında kazandı. 2000 yılında “Teknik Öğretmen” unvanı ile mezun oldu. 2013 yılında Öğretim Görevlisi olarak Hatay Mustafa Kemal Üniversitesi Payas Meslek Yüksekokulunda işe başladı. 2013-2014 eğitim öğretim yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans eğitime başladı. Halen İskenderun Teknik Üniversitesi İskenderun Meslek Yüksekokulu Makine ve Metal Teknolojileri Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

## **TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR**

Çakır H., Kanca E., Günen A., Demir M., Çavdar F., IMSTEC 2016 Uluslararası Malzeme ve metalürji sempozyumu. 6-8 Nisan 2016 Nevşehir Üniversitesi Kapadokya/Nevşehir