

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

INCONEL 718 SÜPERALAŞIMININ TERMOKİMYASAL BORLANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan DİNÇ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

INCONEL 718 SÜPERALAŞIMININ TERMOKİMYASAL BORLANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hasan DİNÇ
(506111416)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN

HAZİRAN 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506111416 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Hasan DİNÇ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**İNCONEL 718 SÜPERALAŞIMININ TERMOKİMYASAL BORLANMASI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Erdem ATAR
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü

Teslim Tarihi : **03 Mayıs 2013**
Savunma Tarihi : **06 Haziran 2013**

Aileme,

ÖNSÖZ

Öncelikle tez çalışmam sırasında maddi ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, tecrübeleriyle her zaman yol gösteren ve yolumu aydınlatan değerli danışman hocam Doç. Dr. Murat BAYDOĞAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Değerli hocalarım Prof. Dr. Eyüp Sabri KAYALI ve Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU'na tecrübeleriyle her zaman yardımcı oldukarı için teşekkür ederim. Borlama çalışmalarım esnasında bana yardımlarıyla destek olan Yük. Müh. Amir MOTELLABZADEH'e, Müh. Mehmet Akif ÜNAL'a teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarım sırasında yardım eden laboratuvar arkadaşlarıma teşekkür ederim. Son olarak, hayatımın her alanında beni maddi ve manevi destekleyen, her zaman yanımda olan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2013

Hasan DİNÇ
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. SÜPERALAŞIMLAR	3
2.1 Süperalaşımların Metalurjisi	4
2.2 Nikel Bazlı Süperalaşımlar	6
2.3 Demir-Nikel Bazlı Süperalaşımlar	7
2.3.1 Inconel 718 demir-nikel bazlı süperalaşımı	8
2.3.1.1 Inconel 718 süperalaşımındaki fazlar.....	8
2.3.1.2 Inconel 718 süperalaşımının mekanik özellikleri	10
2.4 Kobalt Bazlı Süperalaşımlar	10
3. BORLAMA.....	13
3.1 Borlamanın Tanımı	13
3.2 Borlama Yöntemleri.....	14
3.2.1 Kutu borlama.....	14
3.2.2 Pasta borlama	17
3.2.3 Sıvı borlama	17
3.2.3.1 Akımsız tuz banyo borlama	18
3.2.3.2 Elektrolitik tuz banyo borlama.....	18
3.2.4 Gaz borlama	19
3.3 Borlama İşleminin Avantajları.....	20
3.4 Borlama İşleminin Dezavantajları.....	20
4. NİKEL BAZLI ALAŞIMLARIN BORLANMASI.....	21
4.1 Nikel Bazlı Alaşımların Borlanmasında Oluşan Fazlar	21
4.2 Borlanmış Nikel Bazlı Alaşımların Karakterizasyonu ve Mekanik Özellikleri	23
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	29
5.1 Numune Hazırlama İşlemleri	29
5.2 Borlama İşlemi	29
5.3 Karakterizasyon Çalışmaları	30
5.4 Sertlik Ölçümleri.....	31
5.5 Aşınma Testleri	31
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME	33
6.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri	33
6.2 Elektron Prob Mikro Analizleri	42
6.3 X-ışını Difraksiyonu Analizleri.....	44
6.4 Sertlik Ölçümlerinin Sonuçları	48

6.5 Aşınma Testi Sonuçları	50
7. GENEL SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR.....	57
EKLER.....	61
ÖZGEÇMİŞ	69

KISALTMALAR

AMS	: Amerikan Askeri Standartları
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
EPMA	: Elektron Prob Mikro Analizi
HSP	: Hekzagonal Sıkı Paket
KHM	: Hacim Merkezli Kübik
KYM	: Yüzey Merkezli Kübik
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
THM	: Hacim Merkezli
XRD	: X-ışını Difraksiyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Süperalaşımlarda alaşım elementlerinin rolleri	5
Çizelge 2.2 : Nikel bazlı süperalaşımların bileşimi.	6
Çizelge 2.3 : Demir-nikel bazlı süperalaşımların kimyasal kompozisyonu.....	8
Çizelge 2.4 : Niyobyum içeren süperalaşımlarda görülen fazlar.....	9
Çizelge 2.5 : Isıl işlem şartlarına göre Inconel 718'in özellikleri	10
Çizelge 2.6 : Kobalt bazlı süperalaşımların bileşimi	11
Çizelge 3.1 : Borlanmış bazı metallerin yüzeylerinde oluşan fazlar ve sertlikleri	14
Çizelge 3.2 : Sıvı ortam borlamasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri .	19
Çizelge 3.3 : Gaz halindeki borlayıcı bileşikler ve özellikleri.....	19
Çizelge 4.1 : Ekabor-1 tozu ile 850°C'de 6 saat borlanmış bazı alaşımlarda görülen tabakalar	23
Çizelge 5.1 : Inconel 718 alaşımının kimyasal bileşimi	29

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Jet motorunda tipik malzeme dağılımı.	3
Şekil 2.2 : Çökelti sertleşmesi ile mukavemetlendirilmiş nikel bazlı süperalaşımların mikroyapısı.....	4
Şekil 2.3 : Al+Ti içeriğinin nikel bazlı süperalaşımların mukavemetine etkisi.	7
Şekil 2.4 : Kübik morfolojide çökelti içeren nikel bazlı alaşımların mikroyapısı	7
Şekil 2.5 : Inconel 718'deki fazların mikroyapısı.	9
Şekil 3.1 : Kutu borlama işleminin şematik görünümü.	15
Şekil 3.2 : Borlama kutusunun detaylı görünümü	16
Şekil 3.3 : Üzerine pasta borlama ajanı sürülmüş numune.....	17
Şekil 4.1 : a) Borlanmış Inconel 718 alaşımlarının SEM görüntüsü b) Borlanmış Inconel 718 alaşımlarının EPMA analizi	22
Şekil 4.2 : Saf nikelin 800°C'de 7 saat borlanması sonucu oluşan tabakalar	23
Şekil 4.3 : Saf nikelin 800°C'de 7 s borlanması sonucu yüzeyden itibaren elde edilen sertlik değerleri.....	24
Şekil 4.4 : İşlemsiz ve borlanmış numunelerin aşınma testi sonucu yüzey profilleri.	24
Şekil 4.5 : a) 950°C sıcaklıkta 4 saat borlanmış numunenin optik mikroskop görüntüsü b) 950°C sıcaklıkta 4 saat borlanmış numunenin SEM görüntüsü.....	25
Şekil 4.6 : 950°C'de 8 saat borlanmış saf nikelin SEM görüntüsü.	25
Şekil 4.7 : 950°C'de 8 saat borlanmış saf nikelin çeşitli bölgelerinden alınan sertlik değerleri.....	26
Şekil 4.8 : Inconel 722 alaşımlarının borlanması sonucu oluşan tabakalar	26
Şekil 4.9 : Borlanmış Inconel 722 alaşımlarının bileşim ve sertlik profili.....	27
Şekil 5.1 : a) Deneylerde kullanılan paslanmaz çelik kutu b) Borlama işleminde kullanılan elektrik dirençli fırın	30
Şekil 5.2 : Elektron prob mikro analizi cihazı	30
Şekil 6.1 : 800°C'de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımlarının SEM görüntüleri	33
Şekil 6.2 : 800°C'de borlanan AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımlarının SEM görüntüleri	34
Şekil 6.3 : 900°C'de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımlarının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi.....	34
Şekil 6.4 : 900°C'de borlanan AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımlarının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi.....	35
Şekil 6.5 : 1000°C'de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımlarının SEM görüntüleri	36
Şekil 6.6 : 1000°C'de borlanan AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımlarının SEM görüntüleri	36
Şekil 6.7 : 800°C'de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımlarının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi.....	37

Şekil 6.8 : 800°C'de borlanan AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi	38
Şekil 6.9 : 900°C'de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi	39
Şekil 6.10 : 900°C'de borlanan AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi	39
Şekil 6.11 : 1000°C'de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi	40
Şekil 6.12 : 1000°C'de borlanan AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi	40
Şekil 6.13 : Farklı sürelerde borlanmış AMS 5662 ve AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının yüzeylerinde oluşan toplam tabaka kalınlıkları a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat.....	41
Şekil 6.14 : 800°C'de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının EPMA analizi	42
Şekil 6.15 : 1000°C'de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının EPMA analizi	43
Şekil 6.16 : AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının 800°C'de borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.....	44
Şekil 6.17 : AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının 900°C'de borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.....	45
Şekil 6.18 : AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının 1000°C'de borlanması sonucu elde edilen XRD paternler	45
Şekil 6.19 : AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının 800°C'de borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.....	46
Şekil 6.20 : AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının 900°C'de borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.....	46
Şekil 6.21 : AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının 1000°C'de borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.....	47
Şekil 6.22 : AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının 800°C'de 8 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik değerleri	48
Şekil 6.23 : AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının 900°C'de 12 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik değerleri	48
Şekil 6.24 : AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının 1000°C'de 12 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik değerleri	49
Şekil 6.25 : AMS 5662 borlanmış numunelerin relatif aşınma dirençleri a) 800°C b) 900°C c)1000°C.....	50
Şekil 6.26 : AMS 5663 borlanmış numunelerin relatif aşınma dirençleri a) 800°C b) 900°C c)1000°C.....	51
Şekil 6.27 : a) Borlanmamış AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının aşınma iz görüntüsü b) borlanmamış AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının aşınma iz görüntüsü	52
Şekil 6.28 : 800°C' de borlanmış AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının aşınma izi görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat	52
Şekil 6.29 : 900°C' de borlanmış AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının aşınma izi görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat	52
Şekil 6.30 : 1000°C' de borlanmış AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının aşınma izi görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat	52
Şekil 6.31 : 800°C' de borlanmış AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının aşınma	

	izi görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat	53
Şekil 6.32 :	900°C' de borlanmış AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının aşınma izi görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat	53
Şekil 6.33 :	1000°C' de borlanmış AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının aşınma izi görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat	53
Şekil A.1 :	800°C'de borlanmış Inconel 718 süperalaşımının yüzeyden uzaklık sertlik grafikleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat	63
Şekil A.2 :	900°C'de borlanmış Inconel 718 süperalaşımının yüzeyden uzaklık sertlik grafikleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat	65
Şekil A.3 :	1000°C'de borlanmış Inconel 718 süperalaşımının yüzeyden uzaklık sertlik grafikleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat	67

INCONEL 718 SÜPERALAŞIMININ TERMOKİMYASAL BORLANMASI

ÖZET

Borlama ısıtıl işlemi; difüzyon kontrollü bir yüzey sertleştirme prosesi olup, yüksek sıcaklıklarda bor atomlarının malzeme yüzeyine difüzyonu sonucu yüzeyde borür fazlarını içeren tabakaların meydana gelmesidir. Borlama ısıtıl işlemi demir esaslı ve demir dışı malzemelere uygulanabilmektedir. Ancak uygulama oranı olarak demir esaslı malzemeler (özellikle çelikler) ilk sırayı alır. Demir dışı malzemeler olarak, nikel, kobalt, molibden ve titanyum esaslı malzemeler örnek verilebilir. Borlama işlemi sonucu oluşan borür tabakaları yüksek sertlik ve aşınma direncine sahiptirler. Ayrıca borlama işlemi, korozyon ve oksidasyon direncini arttırmakta ve sürtünme katsayısını düşürmektedir. Borlama yöntemleri: kutu borlama, pasta borlama, sıvı borlama ve gaz borlamadır.

Süperalaşımlar, nikel, demir nikel ve kobalt bazlı alaşımlar olup yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini ve metalurjik kararlılıklarını muhafaza eden malzeme grubudur. İlk süper alaşımlar östenitik paslanmaz çeliklerin bir modifikasyonu olup günümüzde kullanımda olan birçok malzeme 1950-1970 yılları arasında geliştirilmiştir. 1980'lerde gelişen teknoloji ile bazı elementlerin süperalaşımlara katılabilme olanağının artmasıyla bugün yoğun ilgi duyulan spesifik mekanik özellikler kazanmışlardır. Bu nedenle de yüksek sıcaklık uygulamaları söz konusu olduğunda süperalaşımlar diğer tüm ticari metalurjik malzemelerden daha çok tercih edilmektedirler. Süperalaşımların başlıca uygulama alanlarına uçaklar ve endüstriyel gaz türbinleri (pervane kanatçıkları, yanma odaları, diskler, şaftlar), nükleer güç sistemleri (hareket mekanizmaları için kontrol çubukları, akış valfleri, yaylar), uzay araçları (aerodinamik araç zırhları, roket motor parçaları), petrokimya sanayisi (reaksiyon kapları, borular, pompalar), ısıtıl işlem ekipmanları (tepsiler, karıştırıcılar, konveyör bantları) örnek olarak verilebilir.

Inconel 718; demir nikel bazlı süperalaşım grubundan olup önemli miktarda nikel, demir ve niyobyum içermektedir. İçerdiği yüksek niyobyum sayesinde çökelti sertleştirilmesi ile mukavemetlendirilebilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda dahi mekanik özelliklerini (kopma, yorulma, sürünme) korumaktadır. Genel olarak kullanım yerleri; gaz türbinleri, roket motorları, uçak motorları, nükleer reaktörler ve proses ekipmanlarıdır.

Demir esaslı malzemelerin termokimyasal yöntemle borlanması üzerine birçok çalışma yapılmış ve son yıllarda bu çalışmalar oldukça hızlanmıştır. Araştırmalar neticesinde elde edilen sonuçlarla birçok gelişmiş ülke, borlama işlemini sanayilerine aktarmıştır. Borlama işlemi endüstriyel olarak daha çok çelikler üzerine uygulanmaktadır ve birçok çelik grubu üzerinde detaylı araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak, süperalaşımlar üzerinde yapılan araştırmalar oldukça sınırlıdır ve az sayıda çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, AMS 5662 ve AMS 5663 ısıtıl işlemlerine tabi tutulmuş Inconel 718 süperalaşımının, termokimyasal yöntemle borlanması sonucu oluşan fazları

tespit etmek ve borlama sonucu oluşan borür tabakasının malzemenin mekanik özelliklerine etkisini incelemektir. Bunun için Inconel 718 süperalaşımına ait numuneler, 800, 900 ve 1000°C sıcaklıklarda 2, 4, 8 ve 12 saat süre ile Ekabor-2 tozu içerisinde kutu borlama yöntemiyle borlanmıştır. Borlama işlemi ardından numunelerin XRD analizi ile faz tayini, SEM ile kesit incelemesi, EPMA analizi ile oluşan tabakaların elementel analizi, sertlik ölçümleri ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan incelemeler sonucu Inconel 718 süperalaşımının borlanması sonucu üç farklı tabakanın meydana geldiği görülmüştür. Bunlardan yüzeye en yakın olanı Ni_2Si fazından meydana gelen silisid tabakasıdır. İkinci olarak ise Ni_4B_3 , Fe_2B ve FeB fazlarından meydana gelen borür tabakasıdır. Son olarak ise difüzyon tabakası mevcuttur. Artan sıcaklık ve süre ile tabakaların kalınlıkları artmaktadır. AMS 5662 ısıtılma işlemine tabi tutulmuş numunelerde tabaka kalınlıkları daha fazladır. En yüksek tabaka kalınlığı değeri AMS 5662 Inconel 718 malzemesinin 1000°C'de 12 saat borlanması ile elde edilmiştir. En düşük tabaka kalınlığı ise AMS 5663 Inconel 718' in 800°C'de 2 saat borlanması sonucu elde edilmiştir. Borür tabakasının sertliğinin 1900 HV civarında olduğu saptanmıştır. Yapılan aşınma testleri sonucu yüzeyin sürtünme katsayısının % 50 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca malzemenin aşınma direncinde artma saptanmıştır.

THERMOCHEMICAL BORIDING OF INCONEL 718 SUPERALLOY

SUMMARY

If a system works under wear condition, its surface properties are important beside bulk properties. It is necessary to develop surface properties of these materials. There are many coating technologies to develop surface properties of a material. Thermochemical (boriding, nitriding), and thermoreactive diffusion processes (TRD), pack sementation techniques, plasma spray, physical vapour deposition (PVD), chemical vapour deposition (CVD), laser operations etc. are some examples of these technologies. While some of the layers obtained by these techniques form physical bond, some others form strong chemical bond with substrate by diffusion.

Boron, in general, used in metallurgy (such as in abrasives, cutting tools, magnets and soldering) for the following purposes; to reduce melting temperature (thus to lower the energy consumed), to increase fluidity (as a fluxing agent), to increase strength (hardenability) of the steel to reduce the corrosion of the refractory material in the furnace. Boron is also used in the production of pure, strong metals to remove the oxygen and nitrogen dissolved in the metal or chemically bound to it. Boron, as a non-metallic solid element, can penetrate and form an alloy with steel under high temperatures. It forms a molecular bond with the metal. Unlike chrome, boron does not add a layer to the original surface. Boron treatment does the opposite. It removes carbon and other impurities from the steel, leaving a pure iron boride layer with boron. Boron can significantly increase the hardenability of steel without loss of ductility. Its effectiveness is most noticeable at lower carbon levels. The addition of boron is usually in very small amounts ranging from 5-30 ppm. Boron, bordering the transition between the metals and non-metals, is regarded as a semiconductor rather than a metallic conductor. Due to its ability to dissolve metal oxide films, as a flux, boron is used in soldering and welding. More specifically, boron trichloride is used in the refining of aluminium, magnesium, zinc, and copper alloys to remove nitrides, carbides, and oxides from molten metal. It has been used successfully as a soldering flux for alloys of aluminium, iron, zinc, tungsten, and monel.

Boriding (also known as boronizing) is a thermochemical surface hardening process in which boron atoms are diffused into the surface of work piece to form complex borides with the base metal. There is no mechanical interface between the complex borides and the substrate as this is a true diffusion process. The resulting case layer has a hard, slippery surface capable of performing at higher temperatures than most surface treatments. Practically any ferrous material can be boronized, as well as many Ni, Ti and Co alloys. However, it is important to note, the higher the content of alloy elements, the slower the diffusion rate. There are many kind of boriding techniques. All processes involves heating well-cleaned sample to 800-1000 °C, preferably for 1-12 hours in contact with a boronaceous solid powder or boronizing compound, paste, liquid or gaseous medium. The property of the borided layer depends strongly on the composition and structure of the boride layer and the

composition of the base (substrate) material. There are many advantages boriding heat treatment for materials. First of them, obtained layer has extremely high hardness values. (about 1400-2000 HV) Beside of this, this layer shows excellent resistance to abrasive and adhesive wear with low friction coefficient. In addition, boriding heat treatment increases resistance to corrosion and oxidation.

Superalloys is a group of alloys usually based on group VIIA elements and designed for high temperatures where relatively severe mechanical stressing is encountered and where high surface stability is frequently required. In any system where high resistance to under static, fatigue and creep conditions are required, the superalloys are appropriate material group to choice for high temperature applications. The first superalloys are modification of austenitic stainless steels. In 1980s, by developing technology to make alloys for superalloys, some elements have gained excellent mechanical properties, which desired for high temperatures application, to superalloys. Therefore, when the subject is high temperature applications, superalloys are more preferred then other commercial metallurgical materials. However, as high temperature materials are relatively expensive, the superalloys should be employed only after consideration of others that are available. When weight-saving is important, titanium alloys can be preferred instead of superalloys, but their poor oxidation resistance restricts their application to below about 700 °C.

For some electricity-generating power plant applications which rely upon superheated steam at about 565°C, high strength creep resistant ferritic steels are preferred on account of their lower cost. The superalloys come into their own particularly in extreme environments, when resistance to oxidation and corrosion is required; for this purpose, they are often used in combination with protective coatings. The superalloys exhibit an outstanding combination of high temperature strength, excellent creep rupture life, toughness and resistance to oxidation and corrosion. Beyond that, these properties are maintained to elevated temperatures - in some cases to within a few hundred degrees of the melting temperature. For many high temperature applications, other materials are unable to match this combination of properties.

Inconel 718; is an iron-nickel based superalloy that contains a significant amount of iron, nickel and niobium. Due to high content of niobium, it can be strengthened by precipitation mechanism. Inconel 718 is hardened by the precipitation of secondary phases (e.g. gamma prime and gamma double-prime) into the metal matrix. The precipitation of these nickel- (aluminum, titanium, niobium) phases is induced by heat treating in the temperature range of 600 to 800°C. For this metallurgical reaction to properly take place, the aging constituents (aluminum, titanium, niobium) must be in solution (dissolved in the matrix); if they are precipitated as some other phase or are combined in some other form, they will not precipitate correctly and the full strength of the alloy will not be realized. To perform this function, the material must first be solution heat treated. Inconel 718 alloy is used especially aggressive and hot environments. It can be used in gas turbines, rocket engines, aircraft engines, nuclear reactors and process equipments.

There are lots of researches on boriding of ferrous materials by thermochemical method and recent years they have accelerated. By results obtained these researches, many developed country have transferred boriding processes to their industries. Industrially, boriding process is applied generally to steels and detailed researches

have made on many steel groups. However, researches on boriding of superalloys are limited.

The aim of this research is to determine the obtained phases and effect of boride layer to mechanical properties of thermochemical borided AMS 5662 and AMS 5663 heat treatment applied Inconel 718 superalloy. For this, samples of Inconel 718 superalloy were borided in 800, 900 and 1000°C for 2, 4, 8 and 12 hours in Ekabor-2 powder by pack boriding. After boriding process, examination of cross section by SEM (scanning electron microscope), phase determination by XRD (X-ray diffractometer), elemental analyse of obtained layers by EPMA (electron probe microanalyser), hardness measurements and wear tests were applied borided samples.

According to results of these investigations, it has determined that obtained layer, by boriding of Inconel 718 superalloy, has three distinct layers. The first layer of these layers, which most closed to surface is silicid layer, contains Ni_2Si phase. Second layer is boride layer consists of Ni_4B_3 and FeB . The last layer is diffusion layer. Thickness of all layers increases by increasing time and temperature. AMS 5662 heat treated Inconel 718 superalloy has higher thickness than AMS 5663 heat treated. The highest thickness is attained in borided AMS 5662 Inconel 718 superalloy in 1000 C for 12 hours and the lowest thickness is attained in borided AMS 5663 Inconel 718 superalloy in 800°C for 2 hours. Hardness values are up to 1600 HV in boride layer. Also wear resistance develops by boriding heat treatment.

1. GİRİŞ

Süperalaşımlar, yüksek sıcaklık uygulamaları için geliştirilmiş yüksek alaşımlı malzeme grubudur. Uzun yıllardır, yüksek sıcaklık uygulaması içeren tasarımlarda östenitik paslanmaz çelikler tercih edilmiştir. Fakat yüksek sıcaklıklarda bu çeliklerin mukavemeti yetersiz kalmıştır. Daha sonra aynı malzeme grubu yerine titanyum alaşımları tercih edilmiştir. Fakat bu durumda da titanyum alaşımlarının oksitlenme problemi ortaya çıkmıştır. İlerleyen yıllarda, alaşımlama prosesi geliştikçe süperalaşımlar üretilmeye ve tasarımda kullanılmaya başlanmıştır.

Inconel 718, süperalaşım ailesinin demir-nikel bazlı grubundandır. Çökelti sertleşmesi ile yüksek mukavemet değerlerine sahip olmakta ve dayanımını 650°C'ye kadar korumaktadır. Dolayısıyla Inconel 718; uçak motorları, nükleer tesisler gibi yüksek sıcaklık dayanımı ve mukavemeti istenen uygulamalarda aranan malzeme grubu haline gelmiştir.

Nikel bazlı süperalaşımların, yüksek sıcaklık mukavemeti yüksek olsa da; aşınma dayanımlarının arttırılması gereklidir. Bir malzemenin karakteristik özellikleri, bulk özelliklerinin yanında, yüzey özelliklerine de bağlıdır. Malzemeler çevresi ile yüzeyleri ile temas halindedir. Dolayısıyla bir malzemenin yüzey özellikleri ne kadar iyi olursa, servis şartlarında dayanımı ve kullanım ömrü o kadar yüksek olur. Aşınma ve korozyon, kullanım esnasında önemli maddi ve can kayıplarına neden olmaktadır. Bu nedenle son yıllarda yaygın olarak çalışılan başlıca konular arasında üretilen parçanın çevre şartlarında bozulmasını önleyecek kaplamaların gerçekleştirilmesi üzerine olmuştur.

Termokimyasal bir kaplama işlemi olan borlama, daldırma tekniği ile kaplamaya en uygun olan metodlardan bir tanesidir. Türkiye'nin dünyada en büyük bor rezervine sahip olan ülke olması sebebiyle ve bor bileşiklerinin üstün özellikleri göz önüne alındığı takdirde, bor kaplamaların ülkemiz açısından önemi ortaya çıkmaktadır. Bu amaçla, demir esaslı malzemelerin borlanması konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Gelişmiş ülkelerin endüstrisinde bor kaplama yaygın olarak kullanılmaktadır.

Çelikler üzerine borlama konusunda yüzlerce araştırma yapılmasına rağmen, süperalaşımalar konusundaki çalışmalar sınırlı kalmıştır. Birçok sürtünmeli ortamda, süperalaşımların kullanım alanı bulması, bu malzemenin kütleli özelliklerinin yanında yüzey özelliklerinin de önemli olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

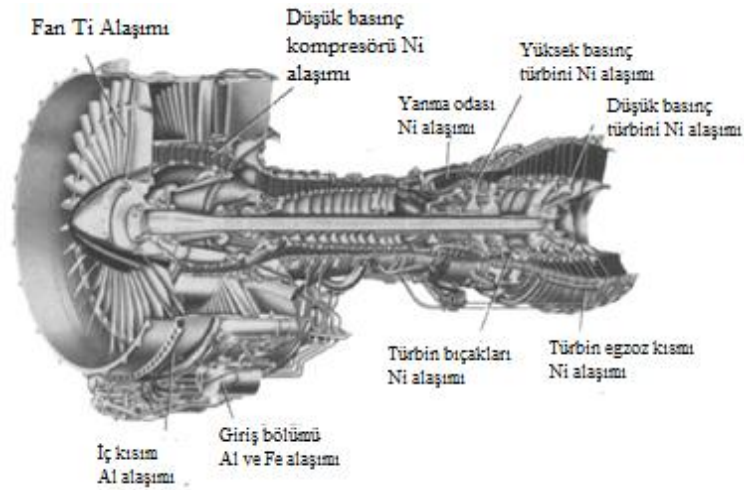
Bu çalışmada; iki farklı ısıtım işlemi görmüş Inconel 718 süperalaşımı, üç farklı sıcaklık ve dört farklı sürede termokimyasal olarak borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlanan yüzeylerin, geniş bir spektrumda yüzey özellikleri araştırılmıştır. Inconel 718 süperalaşımının borlanabilirliği ve örneklerin kaplama tabaka yapıları metalografik olarak incelenmiştir. Ayrıca, kaplama tabakasının sertlik ve aşınma gibi mekanik özellikleri de araştırılmıştır. Gelişmiş araştırma tekniklerinden, x-ışınları difraksiyon analizi kullanılarak, kaplama tabakasını oluşturan fazların dağılımları, taramalı elektron mikroskobu(SEM) kullanılarak, fazların mikroyapıları ve elektron mikroprob analiziyle, elementlerin kaplama tabakası boyunca dağılımları belirlenmiştir.

2. SÜPERALAŞIMLAR

Yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan malzemelerin, kullanıldığı atmosferin aşındırıcı etkilerine karşı dayanıklı olması, mukavemetini kaybetmemesi ve bunların yanında metalurjik kararlılığını muhafaza etmesi gerekmektedir. Bu şartları karşılamak için, tasarımcılar 20. yüzyılın ortalarında paslanmaz çeliği geliştirdiler ve tasarımlarda kullandılar. Fakat paslanmaz çeliğin mukavemeti yeterli düzeyde olmadığı için paslanmaz çeliğin bileşiminin çeşitlendirilmesiyle 'süperalaşım' fikri ortaya çıktı [1].

Süperalaşım; nikel, demir-nikel ve kobalt bazlı alaşımlar olup 650°C sıcaklığa kadar korozyon, oksidasyon direncinin yanısıra mekanik özelliklerini koruyan malzeme grubudur. Kullanıldıkları ortam şartlarından dolayı bu alaşımlardan beklenen özellikler, yorulma, sürünme dayanımı, yüksek mukavemet, yüksek korozyon direnci ve yüksek metalurjik kararlılıktır. Bu şartları bir arada barındırdığından dolayı diğer metallerden ayrı bir öneme sahiptirler [2].

Süperalaşım, jet motorlarının sıcak kısımlarında kullanılan birincil alaşımlardır. Dolayısıyla motor ağırlığının %50'sini süperalaşım oluşturmaktadır. Tipik bir jet motoru ve malzeme dağılımı şekil 2.1 de görülmektedir.



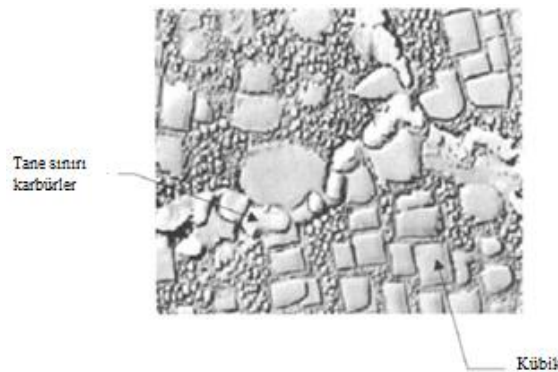
Şekil 2.1 : Jet motorunda tipik malzeme dağılımı [2].

Süperalaşımların diğer uygulama alanları, roket motorları, buhar türbinleri, pistonlu motorlar, ısıtım ekipmanları, kimyasal ve petrokimyasal tesisler ve medikal sistemlerdir [3].

2.1 Süperalaşımların Metalurjisi

Nikel; KYM yapıda olup $8,908 \text{ g/cm}^3$ yoğunluğa ve 1453°C ergime sıcaklığına sahiptir. Demir oda sıcaklığında KHM, kobalt ise HSP yapıya sahiptir. Demir ve kobalt bazlı süperalaşımlar yüksek alaşımlıdır ve oda sıcaklığında östenitik γ KYM yapıya sahiptir. Dolayısıyla süperalaşımlar, KYM yapının üretim ve işleme avantajlarını barındırırlar [4].

Demir ve nikel bazlı süperalaşımlar, katı çözelti sertleştirilmesi, çökelti sertleştirilmesi ve tane sınırlarında karbür oluşumu ile mukavemetlendirilir. Östenit (γ) olarak dizayn edilen KYM nikel matris yüksek oranda demir, kobalt, molibden, volfram, titanyum ve alüminyum gibi katı çözelti elementi içerir. Bu süperalaşımlardaki en önemli çökelti, γ' KYM yapısındaki Ni_3Al veya Ni_3Ti ' dir. γ' çökeltisi, A_3B formunda bir bileşik olup A; nikel, kobalt, demir gibi görece düşük elektronegatif elementleri; B ise alüminyum, titanyum ve niyobyum gibi görece elektropozitif elementleri temsil etmektedir. γ' çökeltisi, γ matrisle %1 uyumsuzluğa (mismatch) sahiptir. Bu yüzden γ' çökeltileri düşük yüzey enerjileri ile uzun süreli kararlılığa sahiptir. γ ve γ' arasındaki coherency yüksek sıcaklıklarda korunur ve çok düşük irileşme hızına sahiptir. Böylece $0,7 \text{ Tm}$ sıcaklıklarda bile alaşımların aşırı yaşlanma hızı düşüktür. γ/γ' uyumsuzluğu γ' çökeltisinin morfolojisini belirler. Küçük uyumsuzluklar(%0,05) küresel çökelti oluştururken; yüksek orandaki uyumsuzluklar kübik çökelti oluşturur. (Şekil 2.2) [2].



Şekil 2.2 : Çökelti sertleştirilmesi ile mukavemetlendirilmiş nikel bazlı süperalaşımların mikroyapısı [2].

Yapıda önemli oranda niyobyum mevcut ise, THM yapıda γ'' çökeltileri (Ni_3Nb) oluşabilir. Bu çökelti Inconel 718 gibi alaşımların mukavemetlendirilmesinde önemli rolü üstlenir. Fakat γ'' çökeltisi metastabil olduğundan; yaklaşık 650°C ve üstü sıcaklıklarda uzun süreden sonra δ 'ya dönüşerek mukavemet kaybına neden olmaktadır [5].

Ticari süperalaşımların bileşimleri oldukça komplekstir; birçok alaşım elementi içerirler. Çizelge 2.1' de bu elementlerin rolleri görülmektedir.

Çizelge 2.1 : Süper alaşımlarda alaşım elementlerinin rolleri [7].

Alaşım Elementi	Katı Çözelti Oluşturucu	γ' Oluşturucu	Karbür Oluşturucu	Tane Sınırı Mukavemetlendirici	Oksit Oluşturucu
Cr	x		x		x
Al		x			x
Ti		x	x		
Mo	x				
W	x		x		
B				x	
Zr				x	
C				x	
Nb		x	x		
Hf			x	x	
Ta		x	x	x	

Çizelge 2.1'den görüleceği gibi birçok alaşım elementin karbür oluşturma görevi vardır. Tane sınırı mukavemetlendirmesi bu alaşımların karbürleri ile sağlanmaktadır. Karbürler süperalaşımlarda üç önemli rol oynarlar. Birincisi, tane sınırı karbürleri düzgün şekilde oluştuğunda, tane sınırını güçlendirir, tane sınırı kaymasını engeller ve tane sınırı boyunca gerilme gevşemesini sağlarlar. İkinci olarak tane içinde ince şekilde dağılmış karbürler, γ' çökeltileri ile sertleştirilemeyen kobalt bazlı alaşımlarda mukavemet artışını sağlarlar. Son olarak karbürler, diğer elementleri bağlayarak, kullanım esnasında faz kararlılığını sağlarlar. Karbürler matristen daha sert ve kırılgan olduğundan dağılımları, alaşımın yüksek sıcaklık sünekliğini, mukavemetini ve sürünme özelliklerini etkilemektedir. Yapıda karbür yoksa, tane sınırlarında boşluklar oluşacak ve tane sınırı kayması görülecektir. Karbürler tane sınırlarında film şeklinde oluşursa, bu durumda da malzemede gevreklik görülecektir. Bu yüzden optimum karbür dağılımı önemlidir [2].

2.2 Nikel Bazlı Süperalaşımlar

Nikel bazlı süperalaşımlar, yüksek sıcaklık dayanımları, mukavemetleri, toklukları ve yüzey özellikleri sayesinde diğer metallerden oldukça farklıdır. Son yıllarda yapılan çalışmalar ile birlikte bu alaşımların çalışma sıcaklıkları 1050°C'ye kadar çıkmıştır. Bu sıcaklık malzemenin ergime noktasının yaklaşık %90'ıdır [3].

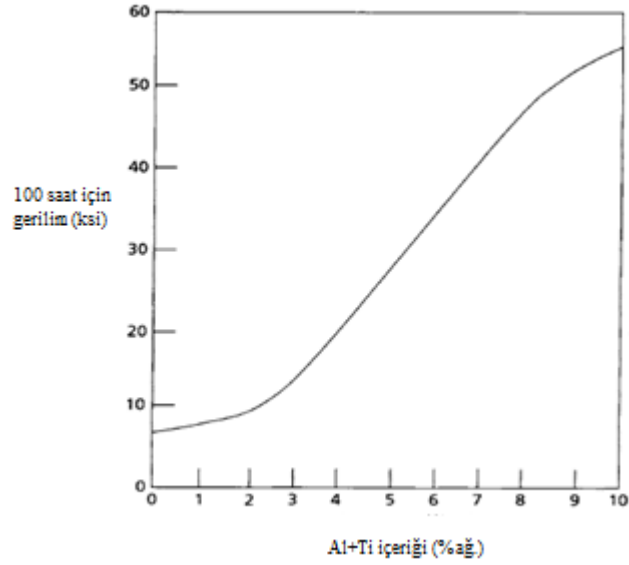
Nikel bazlı süperalaşımlar, süperalaşımlar içinde en kompleksi, en çok kullanılan ve birçok metalurjiste göre en ilgi çekici olanıdır. Jet motorlarının ağırlığının yarısını bu alaşım grubu oluşturmaktadır. En önemli karakteristikleri, yüksek faz kararlılığı ve KYM nikel matrisin bir çok mekanizma ile mukavemetlendirilebilmesidir. Çizelge 2.2' de nikel bazlı süperalaşımların bileşimi görülmektedir.

Çizelge 2.2 : Nikel bazlı süperalaşımların bileşimi [6].

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

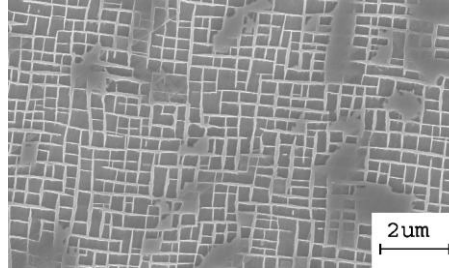
Tablodan da görüleceği üzere nikel bazlı süperalaşımlar en az %50 nikel içerirler ve KYM östenitik matrisin yüksek faz kararlılığıyla karakterize edilirler. Birçok nikel bazlı alaşım, %10-20 krom, %8'e kadar alüminyum ve titanyum, %5-15 kobalt ve az miktarda bor, zirkonyum, hafniyum ve karbon ihtiva ederler [2].

Nikel bazlı alaşımlardaki en önemli çökelti, östenitik γ nikel matris içindeki γ' fazıdır. γ' fazı ile sertleştirilebilen alaşımlara Rene 80 ve Inconel 713C verilebilir. Genel olarak alüminyum ve titanyum miktarının fonksiyonu olarak γ' miktarı arttıkça, mukavemet artar. Bu ilişki şekil 2.3' te görülmektedir [6].



Şekil 2.3 : Al+Ti içeriğinin nikel bazlı süperalaşımların mukavemetine etkisi [6].

γ' fazı hacim olarak %25'ten az ise, çökeltiler küresel şekildedir. % 35'ten yüksek oranlarda ise kübik şekildedir. Şekil 2.4 'te yüksek hacimde γ' çökelti fazı içeren nikel bazlı alaşımların mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 2.4: Kübik morfolojide çökelti içeren nikel bazlı alaşımların mikroyapısı [3].

2.3 Demir- Nikel Bazlı Süperalaşımlar

Demir-nikel bazlı süperalaşımlar, östenitik paslanmaz çelikten geliştirilmiştir. Bu grubun bir çok üyesi % 25-45 nikel ve %15-60 demir içerir. Krom oranı %15-28 arası değişir ve oksidasyon direncini arttırmak için kullanılır. Molibden oranı ise %1-6 arasındadır ve katı çözelti sertleştirmesinde rol oynar. Titanyum, alüminyum ve niyobyum da çökelti sertleştirici elementlerdir. Çizelge 2.3'de demir-nikel bazlı süperalaşımların bileşimi görülmektedir.

Çizelge 2.3 : Demir-nikel bazlı süperalaşımların kimyasal kompozisyonu [6].

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

Inconel 718 gibi niyobyum içeren alaşımlarda γ'' çökeltisi, Ni_3Nb ana çökeltidir. γ' ile karşılaştırıldığında γ'' çökeltisi, daha düşük sıcaklıklarda kararlı olduğundan Inconel 718'in kullanılabildiği maksimum sıcaklık 650°C civarındadır. Buna rağmen Inconel 718 hala en çok kullanılan süperalaşımdır. Düşük sıcaklıklarda en güçlü süperalaşımdır fakat 650-800°C arasında mukavemetini hızla kaybeder [8].

2.3.1 Inconel 718 demir-nikel bazlı süperalaşımı

Inconel 718; International Nickel Corporation tarafından 1950'li yıllarda geliştirilen, çökelti sertleştirilmesiyle sertleştirilebilir nikel demir bazlı süperalaşımdır. Alaşım korozyon dayanımı ve yüksek mukavemet yanında, iyi kaynak edilebilirliğe sahiptir. 700°C'ye kadar yüksek sürünme dayanımı vardır. Genel olarak kullanım yerleri; gaz türbinleri, roket motorları, uçak motorları, nükleer reaktörler ve proses ekipmanlarıdır [9,10].

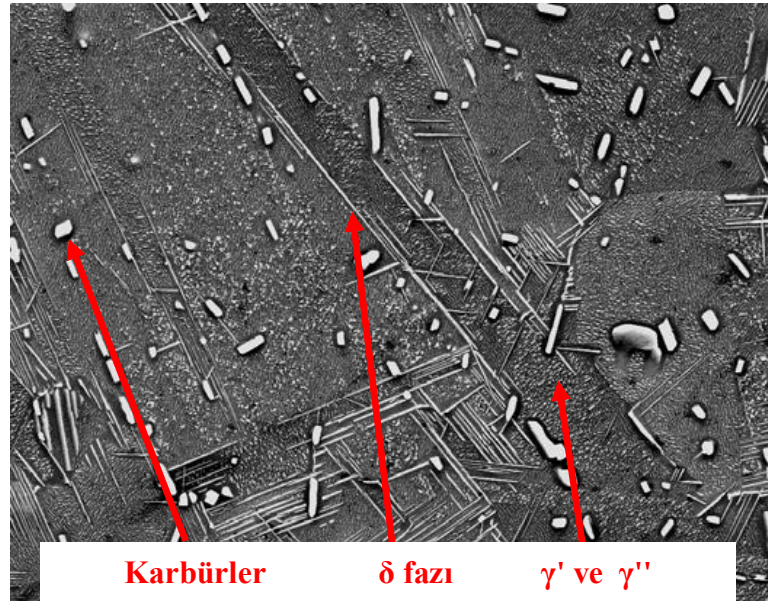
2.3.1.1 Inconel 718 süperalaşımındaki fazlar

Inconel 718 süperalaşımı çökelti sertleştirilmesiyle sertleştirilebilen alaşımdır. Çizelge 2.3'ten görülebileceği gibi önemli miktarda niyobyum içermektedir. Niyobyum, birçok süperalaşımda alüminyum ve titanyum ile γ' fazını oluşturur. Ayrıca Inconel 718 ve 706'da THM yapıda γ'' (Ni_3Nb) fazını oluşturarak mukavemetlendirme sağlar. Bu uyumlu faz; iki γ' fazının sıkı paketlenmesiyle oluşmaktadır. Yapıda disk veya levha şeklinde görülebilir ve γ' fazına göre daha kararlıdır. Bu yüzden sıcaklığa ve kompozisyona bağlı olarak ortorombik δ (Ni_3Nb) fazına dönüşebilir. Delta fazı matris ile koherent değildir ve yapıda disk ve hücreler şeklinde görülür. Bu faz tane yapısını kontrol eder, dolayısıyla mukavemete katkısı pek yoktur. Diğer bir faz ise direkt γ' fazından oluşan η (Ni_3Ti) fazıdır. Bu faz da tane sınırlarında oluşmakta ve sünekliği önemli ölçüde düşürmektedir. Inconel 718'de oluşan tüm fazlar çizelge 2.4'te görülmektedir [11].

Çizelge 2.4 : Niyobyum içeren süperalaşımlarda görülen fazlar [5].

İSİM	SEMBOL	YAPI	KİMYASAL FORMÜL
Gama	γ	KYM	Katı Çözelti
Gama Prime	γ	KHM	$Ni_3(Al,Ti,Nb)$
Gama Double Prime	γ	THM	$Ni_3(Al,Ti,Nb)$
Delta	δ	Ortorombik	$Ni_3(Nb_8Ti_2)$
Eta	η	HSP	$Ni_3(Ti,Nb)$
MC Karbür	MC	Kübik	NbC
M ₆ C Karbür	M ₆ C	Komp. Kübik	$(Nb,Mo,Ni)_6C$
Laves	-	Hegz. MgZn ₂	$(Fe,Cr)_2(Ti,Nb)$

Çizelge 2.4'ten görüldüğü üzere diğer önemli bir faz karbürlerdir. Nikel-demir bazlı alaşımlar MC tipi karbür oluştururlar. Bu karbürler ısıtılma işlem ve dövme gibi işlemler sırasında tane boyutunu kontrol ederler. Genellikle titanyum ve niyobyum elementlerince zengindirler. Niyobyum MC türü karbürleri stabilize eder ve yüksek sıcaklıklarda bile M₂₃C₆ ve M₆C tipi karbürlere dönüşebilirler. Niyobyumun %3,5'ten %5' e artmasıyla dayanım artmaktadır. Fakat %5'in üstündeki Nb oranında Laves ve δ fazları oluşmakta; bu fazlar da tokluğu ve dayanımı düşürmektedir.



Şekil 2.5 Inconel 718'deki fazların mikroyapısı [41].

2.3.1.2 Inconel 718 süperalaşımının mekanik özellikleri

Inconel 718 süperalaşımı farklı ısıtım koşullarında, farklı mekanik özellikler göstermektedir.

Çizelge 2.5 : Isıtım şartlarına göre Inconel 718' in özellikleri [12].

Oda Sıcaklığı Çekme Özellikleri			690 Mpa yük altında 650°C gerilme kopması	
İşlem	%0,2 Akma Dayanımı	Kopma Dayanımı	Uzama%	
Yok	1330	1525	19	95 saat, %24 uzama
940 C 1s, havada soğ.	1240	1460	18	194 saat, %11 uzama
955 C 1s, havada soğ.	1180	171	20	122 saat, % 14 uzama
980 C 1s, havada soğ.	1172	170	25	270 saat, % 2 uzama

Isıtım şartlarına bağlı olarak Inconel 718 alaşımının akma, çekme ve stress-rupture dayanımı Çizelge 2.5'te görülmektedir. En yüksek çekme dayanımı direkt yaşlandırılmış malzemede görülmektedir. Daha düşük çözeltiye alma sıcaklıkları daha yüksek mukavemet sağlamalarına rağmen, daha yüksek çözeltiye alma sıcaklıkları (1010 °C'ye kadar) yüksek stress rupture dayanımı sağlamaktadır [12].

2.4 Kobalt Bazlı Süperalaşımlar

Alaşımsız kobalt 415°C'nin altındaki sıcaklıklarda HSP yapıya sahipken, yüksek sıcaklıklarda KYM yapıya dönüşür. Fakat nikel ile alaşım yaparsa oda sıcaklığından ergime sıcaklığına kadar KYM yapı kararlı hale gelir. Döküm kobalt alaşımları %50-60 Co, %20-30 Cr, %5-10 W, %0,1-1 C içerirler. Dövme alaşımları ise yaklaşık %40 Co yanında, işlenebilirliği arttırması amacıyla yüksek miktarda (yaklaşık %20) Ni içerirler. Çizelge 2.6 'da bazı Co bazlı süperalaşımların bileşimi görülmektedir. Döküm sonrasında Co esaslı alaşımlar sürekli bir KYM matris ve çeşitli karbür fazlarından ($M_{23}C_6$, M_7C_3 ve MC) oluşmaktadır. Mukavemet sağlayan karbürler, alaşımın kabuk kalıp içinde soğutulması sırasında oluşmaktadır. Dentritik bölgeler arasında ve tane sınırlarında çökelirler. Yüksek sıcaklıkta kullanım sırasında ikincil karbürler çökelirler. Bu karbürler dislokasyon hareketini engelleyerek mukavemet sağlarlar [13].

Çizelge 2.6 : Co bazlı süperalaşımların bileşimi [6].

ALAŞIM	C	Ni	Cr	Co	Fe	W	Ti	Al	Ta
AirResist 215	0,35	0,5	19	63	0,5	4,5	-	4,3	7,5
FSX 414	0,25	10	29	52,5	1	7,5	-	-	-
HAYNES 25	0,1	10	20	54	1	15	-	-	-
MAR-M 918	0,05	20	20	52	-	-	0,2	-	7,5
X-40	0,5	10	22	57,5	1,5	7,5	-	-	-

Co bazlı süperalaşımlarda mukavemet arttırıcı parçacıklar bulunmaz. Bu alaşım grubu katı çözelti ve karbür kombinasyonu ile mukavemet kazanır. Bu durum Co bazlı alaşımların kullanım alanını sınırlandırmaktadır. Co bazlı süperalaşımlar endüstriyel ve uçak türbinlerinde gerilme-kırılma parametreleri, yüksek korozyon ve oksitlenme direnci gibi özellikleriyle kullanılmaktadır. Çökelme sertleştirme mukavemetlendirme açısından önemli olmasına rağmen ısıt işlemlerle güçlendirme konusu henüz geliştirilmemiştir. Endüstriyel uygulamalarda Co bazlı alaşımlar döküm sonrası halleriyle kullanılmaktadır [7,13].

3. BORLAMA

3.1 Borlamanın Tanımı

Malzemelerin yüzey performanslarını geliştirmek için yaygın olarak kullanılan birçok yöntem vardır. Genel olarak bu yöntemler iki esasa dayanır;

- 1) arayer katı çözelti oluşturma amacıyla küçük atomların yüzeye difüzyonu
- 2) yüzeye difüze olmuş atomların ana malzeme ile kimyasal reaksiyonu sonucu yüzeyde yeni bileşiklerin oluşması.

Borlama; difüzyon kontrollü bir yüzey sertleştirme prosesi olup, yüzeye difüze olmuş bor atomlarının ana malzeme ile reaksiyonu sonucu yüzeyde borür tabaksının oluşturulmasıdır [14].

Borlama prosesi, yüzey temizliği iyi yapılmış malzemelere, yüksek sıcaklıkta (700-1000°C), 1-12 saat aralığında katı, pasta, sıvı ve gaz ortamlarında gerçekleştirilebilmektedir. Son çalışmalar, plazma borlama ve akışkan yataкта borlama gibi yeni tekniklerin geliştirildiğini göstermektedir.

Borlama prosesi sırasında; yüksek sıcaklıkta bor atomları, bor kaynağından metal yüzeyine yayınırlar ve uygun borürler oluştururlar. Bu borürlerin en önemli özellikleri sert oluşu ve aşınma dirençlerinin yüksek oluşudur. Borlama sonucu oluşan tabaka tek fazlı veya çok fazlı olabilir [15, 16].

Borlama işlemi, demir esaslı malzemelerin dışında demirdışı, sermet ve seramik malzemelere de uygulanabilir. Ancak uygulama oranı olarak demir esaslı malzemeler (özellikle çelikler) ilk sırayı alır. Demirdışı malzemeler olarak, nikel, kobalt, molibden ve titanyum esaslı malzemeler örnek verilebilir. Ayrıca sinterlenmiş karbürlerin yüzeyleri borlanarak, aşınma dirençleri artırılabilir [17].

Çizelge 3.1 : Borlanmış bazı metallerin yüzeyinde oluşan fazlar ve sertlikleri [15].

Ana Metal	Borür Tabakasındaki Fazlar	Tabaka Sertliği, HV
Fe	FeB	1900-2100
	Fe ₂ B	1800-2000
Co	CoB	1850
	Co ₂ B	1500-1600
	Co ₃ B	700-800
Ni	Ni ₄ B ₃	1600
	Ni ₂ B	1500
	NiB	900
Ti	TiB	2500
	TiB ₂	3370
Mo	Mo ₂ B	2000
	MoB ₂	2100
	Mo ₂ B ₅	2100

3.2 Borlama Yöntemleri

Borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı bileşikler, katı, sıvı veya gaz fazında olabilirler. Yöntemler ana olarak iki gruba ayrılırlar:

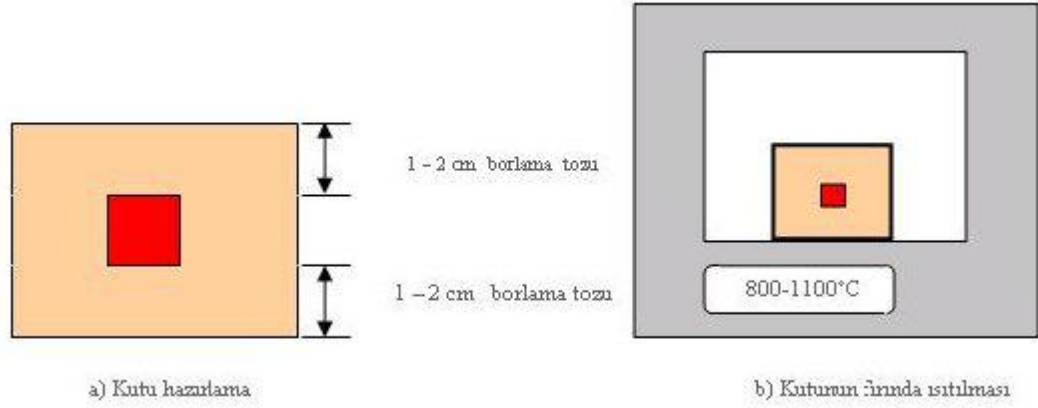
- 1) Termokimyasal yöntemler (kutu, pasta, sıvı ve gaz borlama)
- 2) Termokimyasal olmayan yöntemler (PVD, CVD, plazma sprey kaplama ve iyon biriktirme)

Termokimyasal yöntemler de dört grup altında toplanmaktadır [15].

3.2.1 Kutu borlama

Kutu borlama, en yaygın kullanılan borlama yöntemidir. Bu yöntemde borlanacak parçalar, ısıya dayanıklı kutu (genellikle paslamaz çelik) içinde bor kaynağına gömülür. Parça üzerindeki toz kalınlığı ortalama olarak 0,5-2 mm. arasındadır. Böylece üniform bir bor tabakası sağlanırken; yöntem bor tabakasının mikroyapısı ve oluşumu sadece borlama ajanının aktivitesine, işlem sıcaklığına ve borlama yapılan malzeme türüne bağlıdır [18].

Kutu borlama prosesi esnasında, fırın borlama sıcaklığına ısıtılır (genellikle 800°C-1100°C arası) ve yüksek sıcaklıkta bor atomları metal içine difüze olup borür tabakasını oluşturur. Borlama sıcaklığında yeterli süre beklendikten sonra kutu fırından alınır ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Şekil 3.1' de kutu borlama işleminin şematik görüntüsü görülmektedir [19].



Şekil 3.1 : Kutu borlama işleminin şematik görünüşü [20].

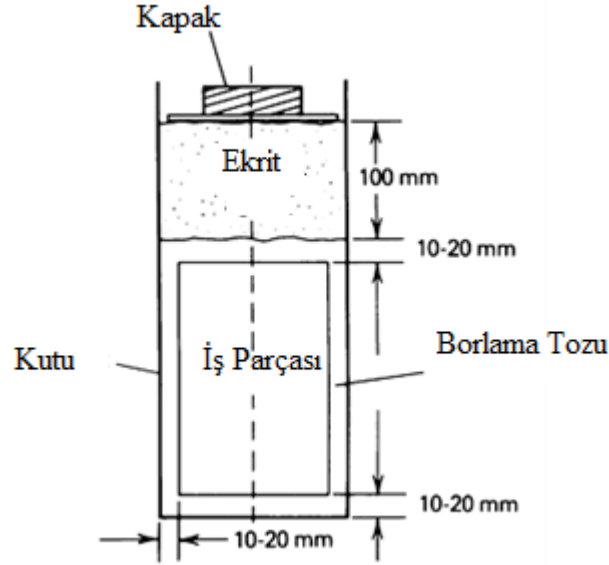
Kutu borlama işlemi bazı komplikasyonların önüne geçmek için koruyucu gaz atmosferinde uygulanabilmektedir. Bu durumda kutu, koruyucu gaz içeren retorta konur ve işlem fırında tamamlanır veya retort fırın direkt olarak gaz kaynağına bağlanır. Koruyucu gaz saf argon, saf azot veya argon ve azotun hidrojen ile karışımı veya özel durumlarda saf hidrojen olabilir. Oksijen içeren bileşikler borlama işlemine zarar verdiği için karbonmonoksit içeren gazlar kullanılmamalıdır. Gaz akışı fırın sıcaklığı 300°C'ye düşene kadar devam etmelidir.

Borlama tozu; bor karbür (B_4C), ferro bor (FeB), amorf bor (B) gibi aktif bor kaynağı, SiC ve Al_2O_3 gibi akışkanlık sağlayan dolgu malzemesi ve aktivatörlerden oluşur. Bu aktivatörler $NaBF_4$, KBF_4 , $(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 ve $Na_2B_4O_7$ gibi bileşikler olabilir. Ayrıca Ekabor (BorTec, GmbH, Hürth, Almanya) gibi özel ticari tescilli tozlar da mevcuttur.

Ticari olarak kullanılan borlama tozlarının bileşimleri aşağıda verilmektedir [18,19].

- %5 B_4C , %90 SiC , %5 KBF_4
- %85 B_4C , %15 Na_2CO_3
- %95 B_4C , %5 $Na_2B_4O_7$
- %84 B_4C , %16 $Na_2B_4O_7$
- Amorf bor (%95-97), %(3-5) KBF_4
- %95 Amorf Bor, %5 KBF_4

- % 79 B₄C, %16 Na₂B₄O₇, %5 KBF₄
- %60 B₄C, %5 B₂O₃, %5 NaF, %30 demir oksit
- %(40-80) B₄C, %(20-60) Fe₂O₃
- %50 Amorf Bor, %1 NH₄F.HF, %49 Al₂O₃
- %100 B₄C
- %20 B₄C, %5 KBF₄, %75 Grafit



Şekil 3.2 : Borlama kutusunun detaylı görünümü [17].

Şekil 3.2'den de görüleceği üzere, iş parçası alttan ve üstten 10-20 mm arası bor tozunun içine gömülür. Borlama tozunun üzerine ise Ekrit tozu ilave edilir. Bu toz örtü malzemesi olarak kullanılır. Ayrıca yüksek sıcaklıkta borlama süresince toz borlama ürünlerine oksijen sızmasını ve oksitlenmeyi engeller. Ekrit tozu üzerine ise alümina ilave edilerek hava ile temas tamamen engellenebilir. Son olarak ise kutu kapağı kapatılarak borlama işlemine geçilir [21].

3.2.2 Pasta Borlama

Pasta borlama kutu borlamanın zor veya maliyetinin yüksek olacağı, zaman kaybının aza indirgenmek istendiği durumlarda uygulanan yöntemdir. Yöntem, %45B₄C (200-400 mesh tane boyutuna sahip) ve %55 kriyolit (Na₃AlF₆ flaks ilaveli) veya geleneksel borlama toz karışımı B₄C+SiC+KBF₄ iyi bir bağlayıcı ajan ile (bütil asetatla çözülmüş nitroselüloz, metil selülozun sulu çözeltisi, veya hidrolize edilmiş etil silikat) gerçekleştirilmektedir. Macun şeklindeki borlama ajanı, sertleştirilmek istenen yüzeye 2-5 mm kalınlığında sürülür ve fırınlamadan önce kuruması sağlanır. Kurutma işleminden sonra macunlanmış parça fırına konur ve uygun sıcaklıkta borlama işlemi gerçekleştirilir. İşlem demir esaslı malzemelere geleneksel fırınlarda (genellikle tüp fırın) 800-1000°C aralığında ortalama 5 saat süre ile uygulanmaktadır. Bu yöntemde borlama kesinlikle koruyucu gaz atmosferinde yapılmalıdır. Koruyucu atmosfer olarak argon, NH₃ veya N₂ kullanılmaktadır. Yöntemin en önemli avantajları grift şekilli parçaların istenilen kısımlarının borlanabilmesi ve işlem süresinin kısa olmasıdır [22].



Şekil 3.3 : Üzerine pasta borlama ajanı sürülmüş numune.

3.2.3 Sıvı Borlama

Bu yöntem bileşikler, aktivatör ve redükleyici maddelerden oluşan erimiş tuzla iş parçasının daldırılması işlemidir. Fakat bu yöntemin aşağıdaki gibi birçok dezavantajı mevcuttur:

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

- İşlem için iş parçasını korozyondan koruyacak fırınlara ihtiyaç vardır.

Yöntem akımsız ve elektrolitik tuz banyo borlama olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır [23].

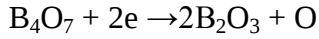
3.2.3.1 Akımsız tuz banyo borlama

Demir esaslı malzemelerin elektroless tuz banyo borlaması, ağırlıkça %30 B₄C içeren boraks bazlı eriyikte yaklaşık 900°C civarında gerçekleştirilir. Borlama işlemi %20 B₄C ile birlikte ferroalüminyum içeren eriyikte daha verimli hale getirilebilir. Çünkü ferroalüminyum daha etkili bir indirgendir. Fakat en iyi sonuçlar %55 boraks, %40 civarı ferrobör ve %4 civarı ferroalüminyum içeren banyo karışımında alınmaktadır. Ayrıca 75:25 oranında KBF₄-KF tuz banyosu 670°C'nin altında nikel bazlı alaşımların borlanmasında iyi sonuçlar göstermektedir.

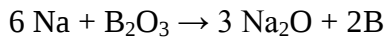
3.2.3.2 Elektrolitik tuz banyo borlama

Bu yöntemde katot olarak davranan demir esaslı parça ve anot olarak kullanılan grafit 940°C sıcaklıkta 0,15 A/cm² akım yoğunluğunda 4 saat süre ile elektrolitik boraks banyosuna daldırılır. Genel olarak, uniform bir tabaka elde etmek için parçalar banyo içinde sürekli döndürülür. Daha sonra havada soğumaya bırakılırlar. Yüksek akım yoğunluğu düşük alaşımlı çeliklerde kısa süre içerisinde ince bir borür tabakası oluşturur. Yüksek alaşımlı çeliklerde daha yüksek kalınlıkta tabakalar için, uzun süre daha düşük akım yoğunluğuna ihtiyaç vardır.

Erimiş durumdaki tetraborat borik asit ve oksijene parçalanır:



Aynı anda sodyum iyonları katot ile nötrale olur ve borik asit ile reaksiyona girerek bor atomu oluşturur:



Bu proseste en yüksek borlama imkanı katodun yakın bölgesindedir. Çizelge 3.2' de sıvı ortam borlamasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri görülmektedir.

Çizelge 3.2 Sıvı ortam borlamasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri[24].

MALZEME	FORMÜL	MOLEKÜL AĞIRLIĞI	TEORİK BOR MİKTARI (%)	ERGİME SICAKLIĞI (°C)
BORAKS SUSUZ	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	381,42	11,35	-
BORAKS BORİK OKSİT	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	201,26	21,50	741
	B_2O_3	69,64	31,07	450
BOR KARBÜR	B_4C	55,29	78,29	2450

3.2.4 Gaz Borlama

Gaz borlama;

- $\text{B}_2\text{H}_6\text{-H}_2$
- Bor halide- H_2 veya N_2
- $(\text{CH}_3)_3\text{B}$ ve $(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$ gibi organik bor bileşikleri

içeren gaz karışımlarında yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen borlama prosesidir. $\text{B}_2\text{H}_6\text{-H}_2$ karışımı ile borlama ticari olarak uygun değildir. Bunun nedeni B_2H_6 gazının zehirli ve patlayıcı olmasıdır. Organik bor bileşikleri kullanıldığında borür ve karbür tabakaları aynı anda oluşmaktadır. BBr_3 pahalıdır ve suyla reaksiyonunu engellemek zordur. BF_3 yüksek redüksiyon sıcaklığına sahiptir (çok kararlı yapıya sahiptir.) HF kıvılcımları meydana getirir. BCl_3 gaz borlama için en uygun gazdır. Çizelge 3.3' te gaz borlamada kullanılan gazların bazı özellikleri gösterilmektedir [25].

Çizelge 3.3 : Gaz halindeki borlayıcı bileşikler ve özellikleri[25].

Gazlar	Kimyasal Formül	Molekül Ağırlığı gr.	Teorik Bor Miktarı,%	Donma Noktası °C
Bor Tri Florid	BF_3	67,82	15,95	-128,8
Bor Tri Klorid	BCl_3	117,9	9,23	-107,3
Bor Tri Bromit	BBr_3	250,57	4,32	-46
Di-Boran	B_2O_3	26,69	39,08	-165,5
Bor Tri Metil	$(\text{CH}_3)_3\text{B}_3$	55,92	19,35	-161,5
Bor Tri Etil	$(\text{C}_2\text{H}_5)_3\text{B}$	98,01	11,04	-94

3.3 Borlama İşleminin Avantajları

Borlanmış tabakaların en önemli özelliği, borür tabakasının çok yüksek sertlik (1200-5000 HV) ve ergime noktasına sahip olmasıdır. Bor tabakasının yüksek sertliğinin yanında düşük sürtünme katsayısına sahip olması aşınma direncinin yüksek olmasını, bu da maliyet ve malzeme kaybının en aza inmiş olması demektir. Borlama işleminin bazı avantajları aşağıda belirtilmiştir [26].

- Bor tabakası sertliğini yüksek sıcaklıklarda 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, koroziif ortamda yüksek yorulma direncine sahiptir.
- Borlama işlemi yağlayıcı kullanımı azaltmakta ve sürtünme katsayısını düşürmektedir.

3.4 Borlama İşleminin Dezavantajları

Borlama işleminin avantajları yanında, önemli dezavantajları da mevcuttur [27].

- 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.

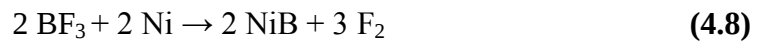
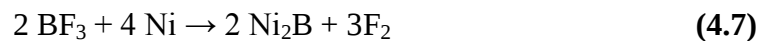
4. NİKEL BAZLI ALAŞIMLARIN BORLANMASI

4.1 Nikel Bazlı Alaşımların Borlanmasında Oluşan Fazlar

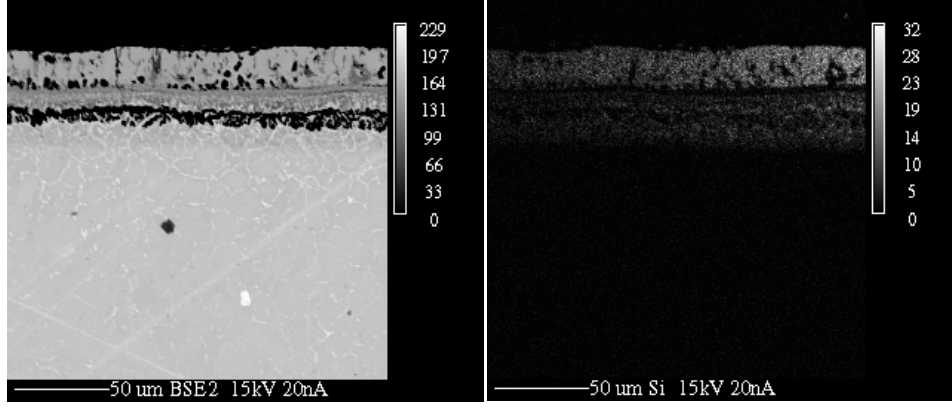
Demir bazlı alaşımların borlanması, yıllardır başarı ile uygulanan prosestir. Nikel bazlı alaşımların borlanması da son yıllarda ilgi çeken konuların başındadır. Yapılan çalışmalar nikel bazlı alaşımların, akışkan yataкта, elektrokimyasal ve kutu borlama yöntemleriyle borlanabileceğini göstermektedir [28,29]. Fakat kutu borlama ile borlanan nikel bazlı alaşımlarda, oluşan bor tabakası daha komplekstir. Nikel bazlı alaşımların borlanması için ticari Ekabor-Ni tozu geliştirilmiştir. Bu toz, silisyum içermemektedir. Fakat bu toz dışında silisyum içeren bir toz kullanılırsa, termodinamik çalışmalar iki reaksiyonun olacağını göstermiştir. Bunlar borlanma ve silisyumlamadır. İşlemin gerçekleştiği sıcaklık ve alaşımın nikel içeriği, bu reaksiyonlardan hangisinin baskın olacağını belirlemektedir. Demir bazlı malzemelerin borlanmasında oluşan reaksiyonlar aşağıdaki gibidir [30]:



Nikel bazlı alaşımların borlanmasında ise aşağıdaki reaksiyonlar meydana gelmektedir:

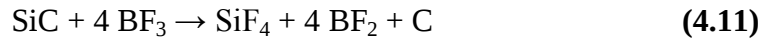
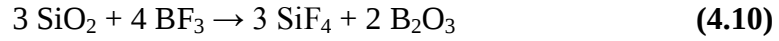
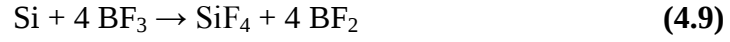


Fakat silisyum içeren borlama tozu kullanıldığında borür tabakası üstünde silisid tabakası oluşmaktadır. Şekil 4.1'de borlanmış Inconel 718 alaşımının SEM ve EPMA görüntüleri görülmektedir.

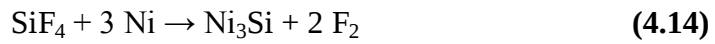
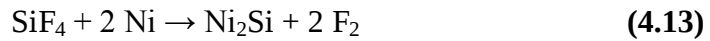


Şekil 4.1 : a) Borlanmış Inconel 718 alaşımlarının SEM görüntüsü b) Borlanmış Inconel 718 alaşımlarının EPMA analizi.

Şekil 4.1' de bu çalışmada kullanılan borlanmış nikel bazlı alaşımda, borür tabakası üzerinde silisid fazı görülmektedir. Geleneksel borlama tozları akıcılığı sağlamak için SiC içermektedir. Si, tozdaki florürler ile reaksiyona girerek silisyum tetraflorürü oluştururlar. Muhtemel reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:



Silisyum tetraflorür de yüzeyde nikkelle aşağıdaki reaksiyonları gerçekleştirir:



Dolayısıyla borür tabakasının ve silisid tabakalarının oluşması termodinamik koşullara bağlıdır. Çizelge 4.1'de Ekabor-1 tozu ile 850°C'de 6 saat borlanmış bazı alaşımlarda hangi tabakaların oluştuğu görülmektedir [31].

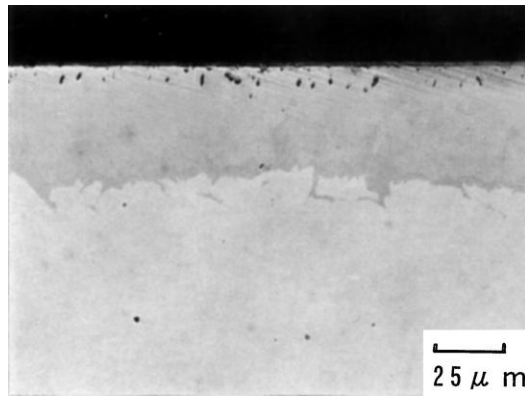
Çizelge 4.1 : Ekabor-1 tozu ile 850°C'de 6 saat borlanmış bazı alaşımlarda görülen tabakalar [31].

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

Çizelge 4.1'den de görüleceği üzere normal borlama koşullarında demir esaslı alaşımlarda silisyumlanma görülmemektedir. Nikel bazlı alaşımlarda nikel oranı arttıkça silisyumlanma ihtimali artmaktadır. Eğer nikel tamamen safsa borlama işlemi esnasında sadece silisyumlanma görülmektedir.

4.2 Borlanmış Nikel Bazlı Alaşımların Karakterizasyonu ve Mekanik Özellikleri

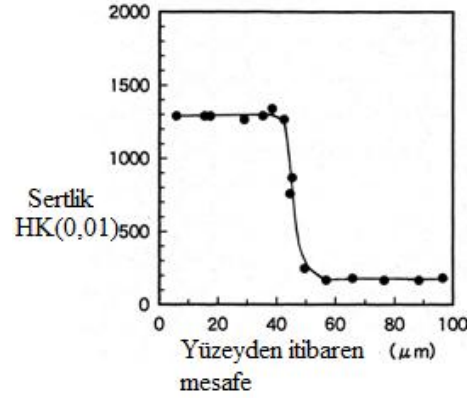
Nikel bazlı alaşımların borlanması sonucu oluşan mikroyapı, kullanılan borlama tozunun bileşimine bağlıdır. Ueda ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada borlama ajanı olarak silisyum içermeyen toz kullanılmıştır [32]. Borlama sonucu oluşan tabaka Şekil 4.2'de görülmektedir.



Şekil 4.2 : Nikelin 800°C 7 saat borlanması sonucu oluşan tabaka [32].

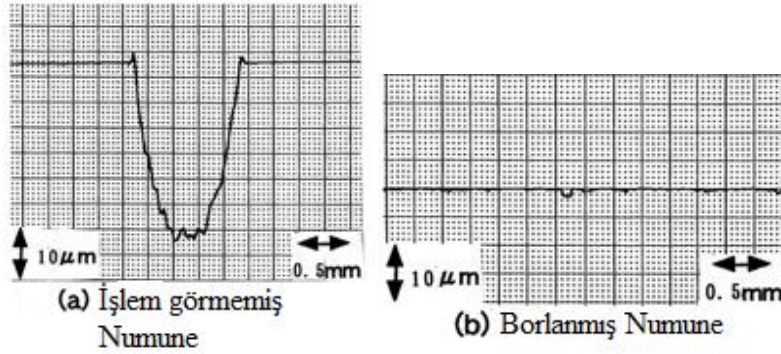
Şekil 4.2'den de görüleceği üzere yapıda sadece borür tabakası mevcuttur ve kalınlığı yaklaşık 40 μm'dir. Yapılan sertlik çalışmaları sonucu ise sertlik değerlerinin

yüzeyde 1300 HK'ye kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Şekil 4.3'te yüzeyden itibaren elde edilen sertlik değerlerinin grafiği görülmektedir.



Şekil 4.3: Saf nikelin 800 °C'de 7 saat borlanması sonucu yüzeyden itibaren elde edilen sertlik değerleri [32].

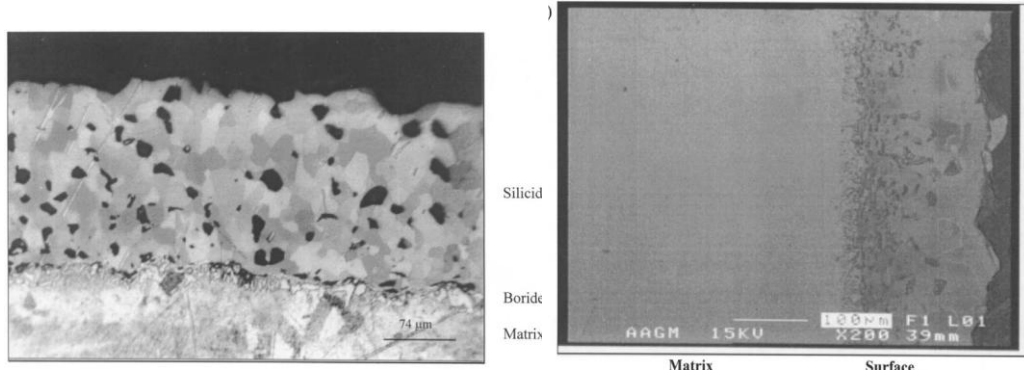
Borlanmış numunelere uygulanan aşınma testleri sonucu sürtünme katsayısının yarı yarıya düştüğü tespit edilmiştir. Şekil 4.4'te işlemsiz ve borlanmış numunelerin yüzey profilleri görülmektedir.



Şekil 4.4 : İşlemsiz ve borlanmış numunelerin aşınma testi sonucu yüzey profilleri [32].

Şekil 4.4'ten de görüleceği üzere işlemsiz nikelin aşınma sonucu iz derinliği yaklaşık 8 μm iken borlanmış nikelde bu değer yaklaşık 1 μm civarındadır. Yine işlemsiz numunede aşınma iz büyüklüğü yaklaşık 34 μm iken borlanmış numunelerde 2 μm'dir.

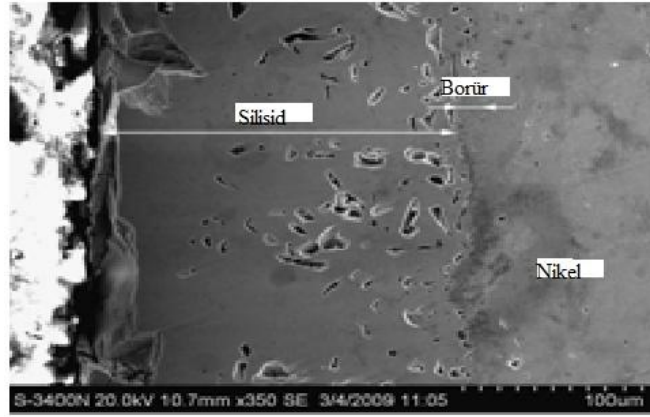
Özbek ve arkadaşları ise yaptığı çalışmada %99,5 saflıktaki nikeli silisyum içeren ekabor tozu ile 950 °C sıcaklıkta borlamışlardır [33].



Şekil 4.5 a) 950°C sıcaklıkta 4 saat borlanmış numunenin optik mikroskop görüntüsü
b) 950°C sıcaklıkta 4 saat borlanmış numunenin SEM görüntüsü [33].

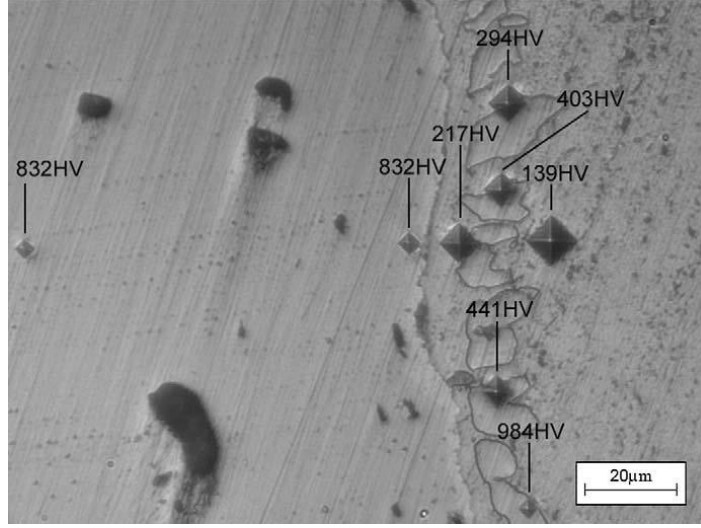
Şekil 4.5'ten de görüleceği üzere borür tabakasının üzerinde kalın bir silisid tabakası mevcuttur. XRD analizleri sonucu silisid tabakasının Ni_5Si_2 , borür tabakasının ise Ni_2B 'den meydana geldiği tespit edilmiştir. Matrisin sertliği 100 HV civarında iken kaplama tabakasının sertliği 805 HV'ye kadar yükselmiştir.

Benzer şekilde Dong Mu ve arkadaşları da saf nikeli 850, 900 ve 950°C'de farklı sürelerde silisyum içeren ekabor ile borlamışlardır [34]. Bu çalışmada elde edilen SEM görüntüsü Şekil 4.6'dadır.



Şekil 4.6 : 950°C'de 8 saat borlanmış saf nikelin SEM görüntüsü [34].

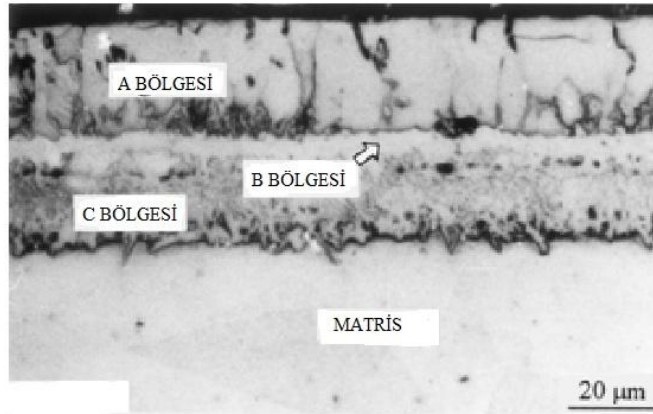
Şekil 4.6'dan da görüleceği üzere benzer şekilde silisid tabakası mevcuttur. Numunelere uygulanan XRD analizleri sonucu, silisid fazının Ni_5Si_2 ' den; borür tabakasının ise Ni_2B ' den meydana geldiği tespit edilmiştir. Fakat diğer sonuçlardan farklı olarak 850°C'de 2 saat borlama sonucu Ni_3Si fazı tespit edilmiş fakat borür fazına rastlanmamıştır. Bunun nedeni silisid tabakasının kalın olması sonucu X ışınlarının borür tabakasına ulaşamaması ile açıklanmıştır.



Şekil 4.7 : 950°C 'de 8 saat borlanan saf nikelin çeşitli bölgelerinden alınan sertlik değerleri [34].

Şekil 4.7'de 950°C'de 8 saat borlanan saf nikelin çeşitli bölgelerinden alınan sertlik değerleri görülmektedir. Silisid tabakasının sertliği 832 HV olarak tespit edilmiştir. Sadece borür tabakasından alınan sertlik değeri ise 984 HV'dir. Difüzyon bölgesi ve borür tabakası etrafında alınan sertlik değerleri ise 139 ile 441 HV arasındadır.

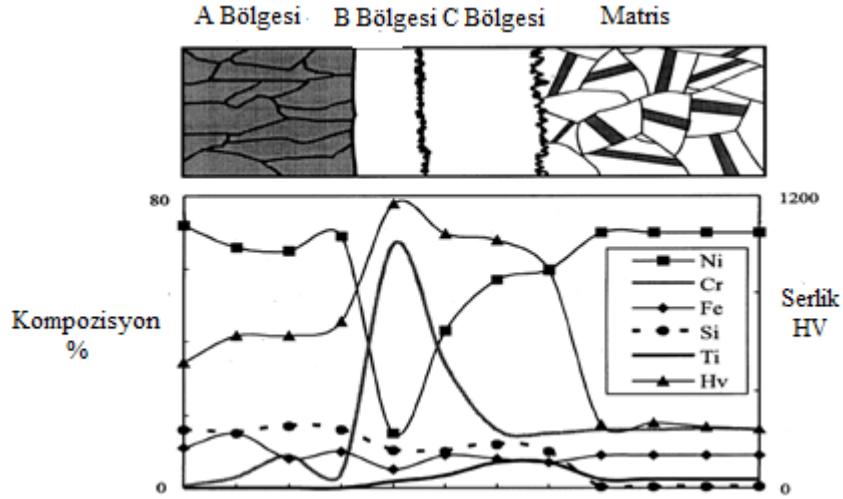
Literatür çalışmaları incelendiğinde, Inconel alaşımlarının borlanması ile ilgili çalışmalar az sayıdadır. Bu çalışmalardan biri W. Muhammad ve arkadaşlarının Inconel 722'yi borladıkları çalışmadır [35]. Çalışma kapsamında Inconel 722 alaşımı 900°C'de 10 saat süre ile borlanmıştır. Elde edilen mikroyapı görüntüleri Şekil 4.8'de görülmektedir.



Şekil 4.8 : Inconel 722 alaşımının borlanması sonucu oluşan tabakalar [35].

Şekil 4.8'den de görüleceği üzere borlama sonucu oluşan tabakalar üç bölgeye ayrılmıştır ve üç bölge için de karakterizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Yüzeye yakın olan A bölgesi kolonsal yapıdadır. B ve C bölgesi ise dağlayıcıdan fazla

etkilenmemiştir. Numune yüzeyinden tabakalar kaldırılarak sırasıyla A, B ve C bölgelerinin XRD ve EDS analizleri yapılmıştır.



Şekil 4.9 : Borlanmış Inconel 722 alaşımının bileşim ve sertlik profili [35].

Şekil 4.9'da borlanmış Inconel 722 alaşımının bileşim ve sertlik profili görülmektedir. Matriste silisyum oranı sıfıra yakın iken, yüzeye yakın A bölgesinde %20 civarındadır. Bunun nedeni borlama sırasında meydana gelen silisyumlama olayıdır. XRD analizleri sonucu bu A bölgesinin Ni_2Si ' den meydana geldiği tespit edilmiştir.

B ve C bölgesinin ise borür tabakası olduğu tespit edilmiş ve Ni_4B_3 ve Ni_2B fazlarına rastlanmıştır. Numunelere uygulanan aşınma testleri sonucu işlemsiz alaşımda ağırlık kaybının %3, borlanmış alaşımda ise ağırlık kaybının %1 olduğu tespit edilmiştir.

Dolayısıyla, nikel ve nikel bazlı alaşımların kutu borlanması sonucu oluşan tabakalar borlama ajanının silisyum içeriğine göre farklılık gösterir.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada kimyasal bileşimi Çizelge 5.1'de verilen, AMS 5662 ve AMS 5663 ısıt işlemleri uygulanmış Inconel 718 süperalaşımı kutu borlama yöntemi ile borlanmış ve karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.1: Inconel 718 süperalaşımının kimyasal bileşimi,%ağ. [6].

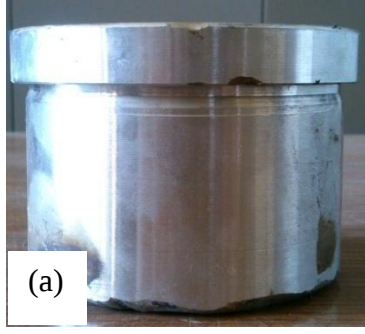
Ni	Fe	Cr	Nb	Co	Mo	W	Ti	Al	C
52,5	18,5	19	5,1	-	3	-	0,91	0,5	0,08

5.1 Numune Hazırlama İşlemleri

Deneylerde, silindirik boru şeklindeki Inconel 718 süperalaşımından 2,5 cm. çapında, yaklaşık 0,6 cm. yüksekliğinde silindirik numuneler kesilmiştir. Borlama işlemi öncesi kesilen numuneler sırasıyla 180, 320, 400, 600, 800, 1000 meşlik zımpara ile zımparalanmıştır. Ardından 0,3µm'lik alümina ile parlatılmıştır. Son olarak 5 dakika süre ile ultrasonik temizleyicide aseton içinde yüzey temizliği gerçekleştirilmiştir.

5.2 Borlama İşlemi

Yüzeyleri temizlenmiş numuneler borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama yöntemlerinden kutu borlama yöntemi kullanılmıştır. Numuneler şekil 5.1 a'da görülen paslanmaz çelik kutular içinde Ekabor-2 tozu içine gömülmüştür. Ekabor tozu üzerine oksitlenmeye önlemek için Ekrit tozu eklenmiştir. Daha sonra numuneler Şekil 5.2 b'de görülen Protherm marka PID kontrollü ısıt işlem fırınında 800, 900 ve 1000°C sıcaklıkta 2, 4, 8 ve 12 saat boyunca borlanmıştır.



Şekil 5.1 a) Deneylerde kullanılan paslanmaz çelik kutu **b)** Borlama işleminde kullanılan elektrik dirençli fırın.

5.3 Karakterizasyon Çalışmaları

Borlama işleminin ardından numunelerin; taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile kesit incelemeleri, X-ışınlar difraksiyonu (XRD) analizi, EPMA (electron probe microanalyzer) analizi, mikro sertlik ölçümleri ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. SEM ile kesit incelemesi çalışmaları HITACHI marka TM-1000 model masaüstü taramalı elektron mikroskobu ile çeşitli büyütmelerde gerçekleştirilmiştir. EPMA analizleri, İTÜ bünyesindeki Prof. Dr. Adnan Tekin Malzeme Bilimleri ve Üretim Teknolojileri Uygulama Araştırma merkezinde yapılmıştır. EPMA cihazı şekil 5.2' de görülmektedir. Numunelerin X- ışınları haritalaması yöntemiyle tabakalarda elementel analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2 Elektron Prob Mikro Analizi cihazı [36].

XRD analizleri, Cu K α t p ile 35 kV ve 28,5 mA değerlerinde yapılmıştır. Numuneler 10-80 2 θ değerleri arasında 2 $^{\circ}$ /dk aralıklarla taranmıştır.

5.4 Sertlik  l  mleri

Mikrosertlik  l  mleri, SHIMADZU HMV-2 cihazı ile 0,025 kg. yük altında 10 saniye bekleme süresi ile yapılmıştır. Numuneler bakalite alındıktan sonra kesitten çeşitli aralıklarda 5' er  l  m n ortalaması alınarak sertlik değerleri elde edilmiştir.

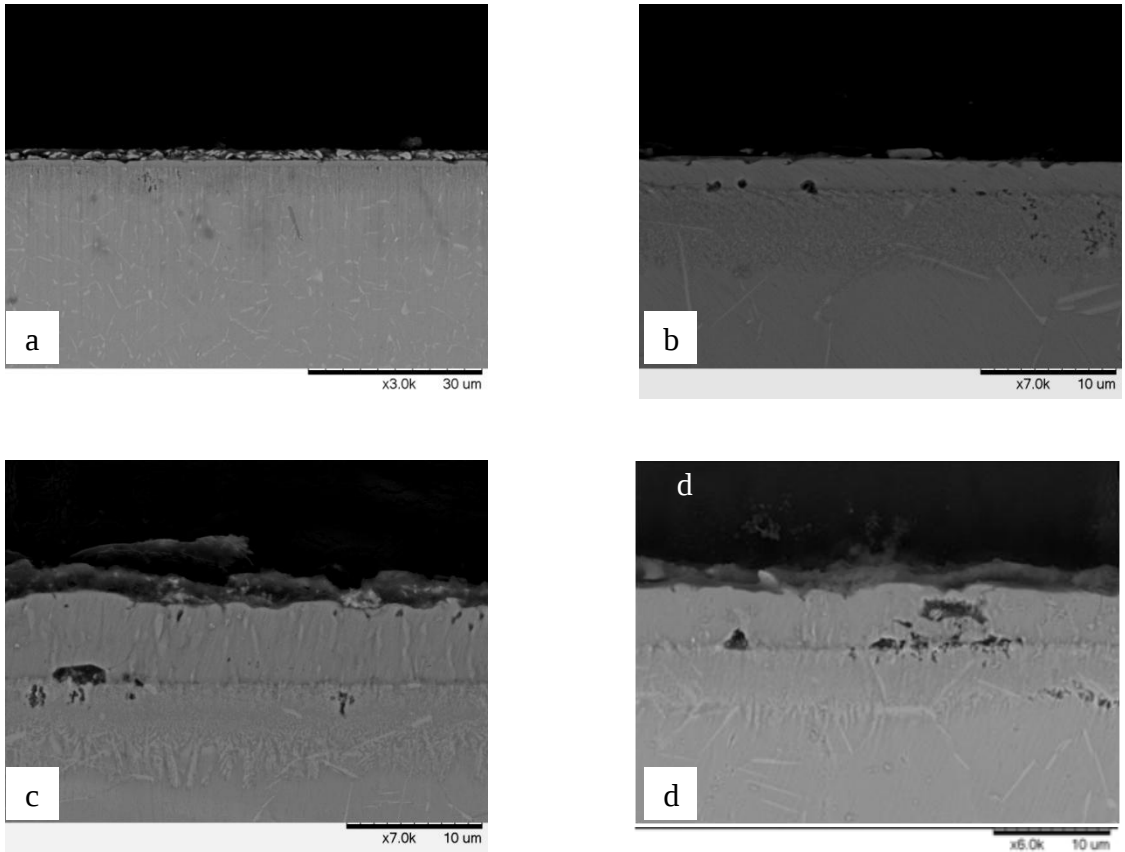
5.5 Aşınma Testleri

Aşınma testleri karşı hareketli aşınma cihazında ve kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. Karşı hareketli aşınma deneylerinde aşındırıcı bir bilya düz bir yüzey üzerinde (numune), yatay ekseninde ve belirli bir genlikte sağa ve sola belirli genlikte hareket etmektedir. Deneylerde aşındırıcı bilya olarak 5 mm.  apında Al₂O₃ bilya kullanılmış, deneyler 5 mm genlikte (aşınma izinin uzunluğu), 3N yük altında 5 mm/sn hızda ve toplam 40000 mm. uzunlukta gerçekleştirilmiştir. Ardından profilometre ile aşınma iz derinlikleri ve genişlikleri ölçülmüştür. Bu değerler yardımı ile aşınma iz alanları hesaplanmıştır. Borlanmamış Inconel 718 süperalaşımının aşınma direnci 1 kabul edilerek, relatif aşınma dirençleri tespit edilmiştir.

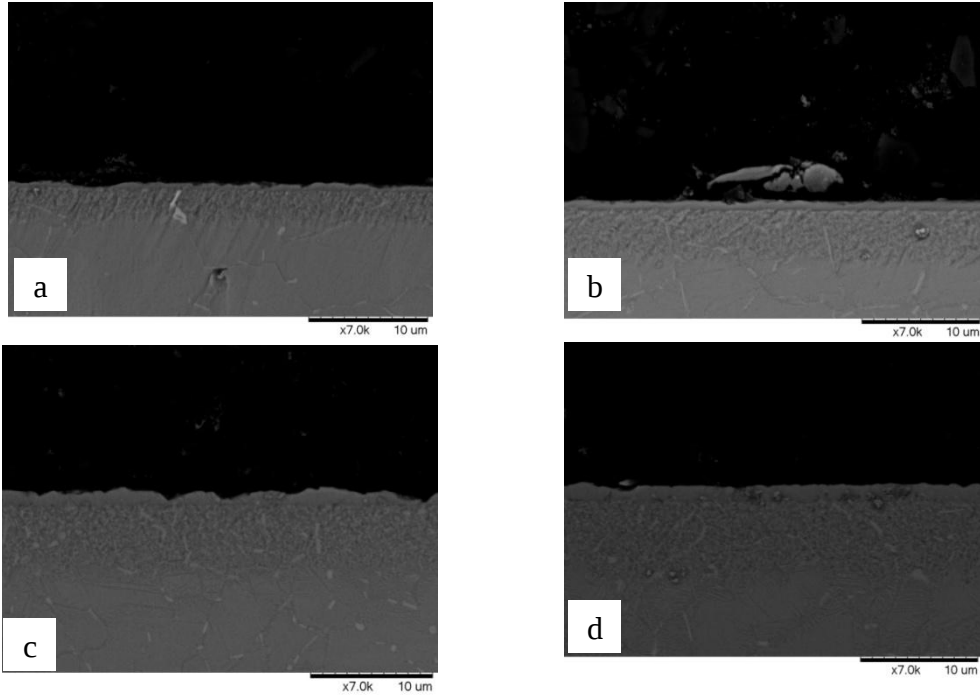
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

6.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) İncelemeleri

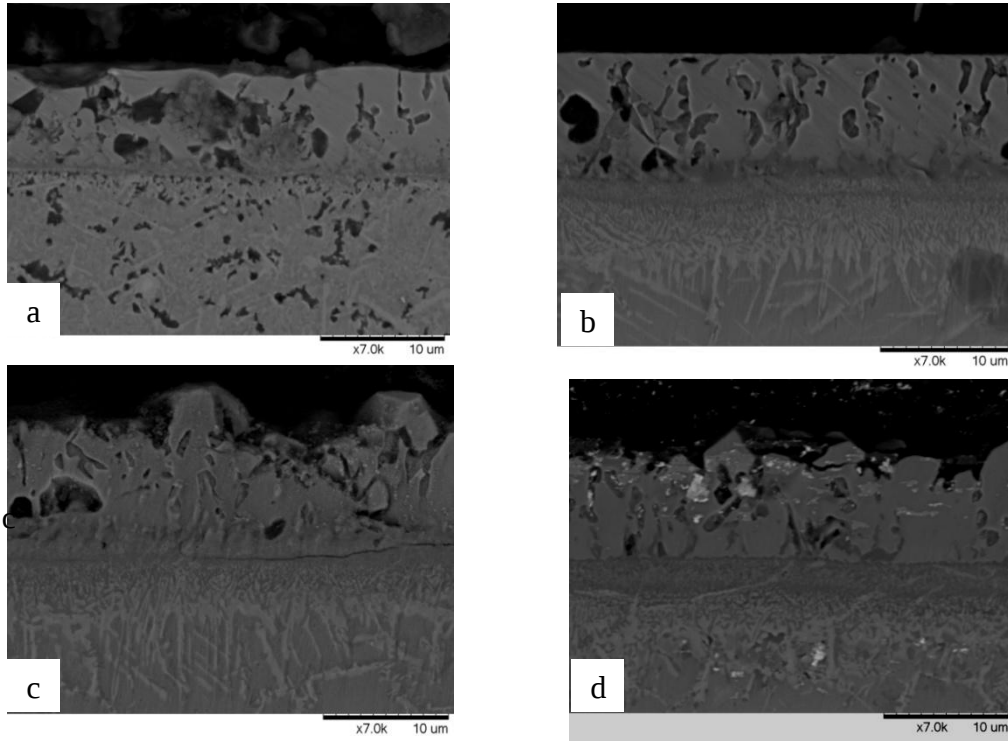
Numuneler borlama işleminin ardından kesilip, bakalite alınmıştır. Sonrasında klasik metalografi teknikleri kullanılarak kesit incelemesi için hazır hale getirilmişlerdir. SEM ile yapılan kesit incelemeleri sonucu borlanan tüm numunelerin yüzeyinde; silisid tabakası, borür tabakası, difüzyon tabakası ve matris net bir şekilde görülmektedir. (Şekil 6.1-6.2)



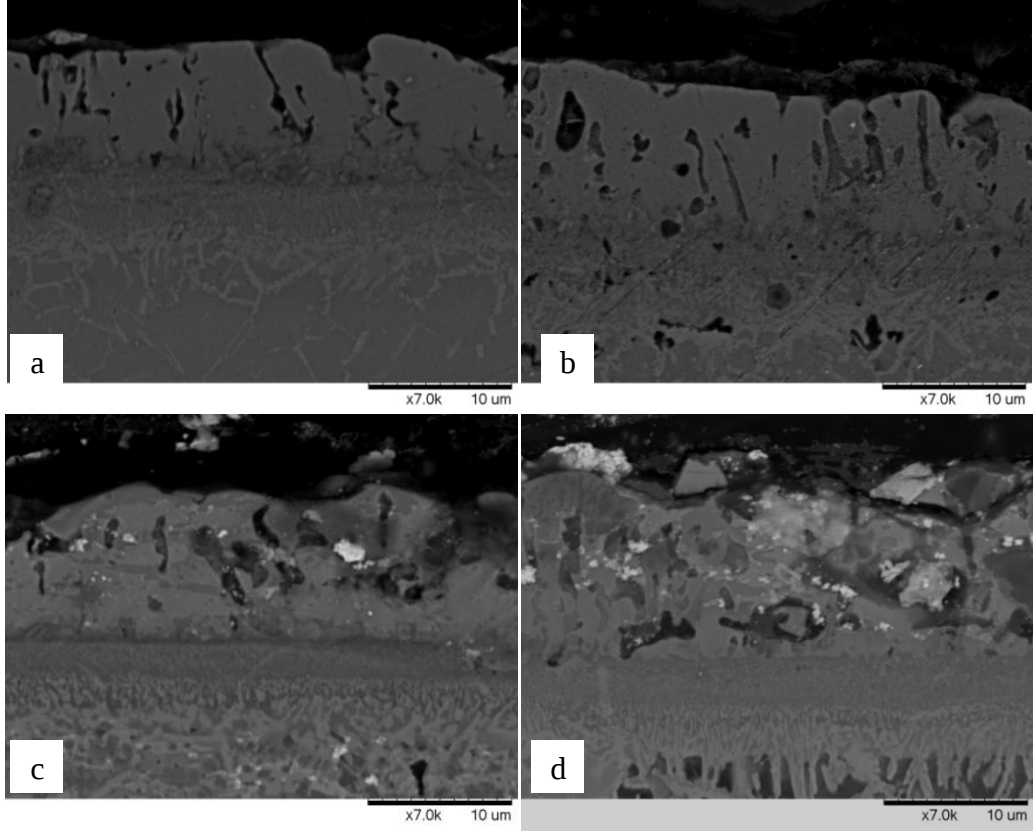
Şekil 6.1 : 800 °C' de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının SEM görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat.



Şekil 6.2 : 800 °C' de borlanan AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının SEM görüntüleri a) 2saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat

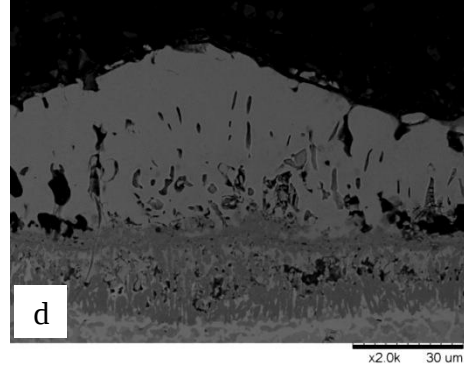
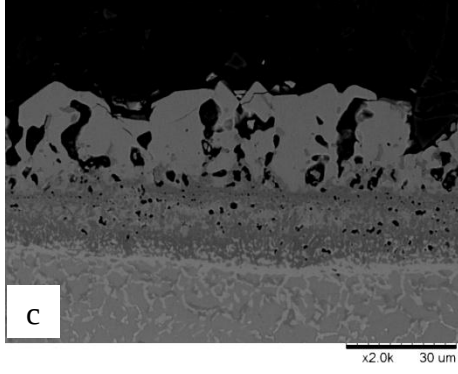
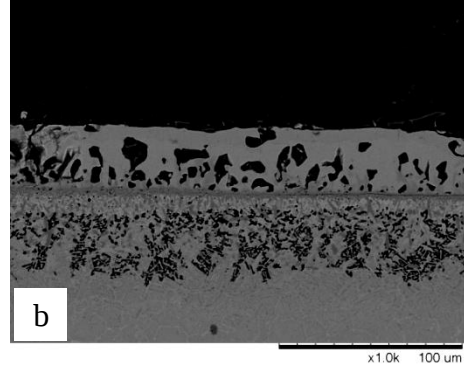
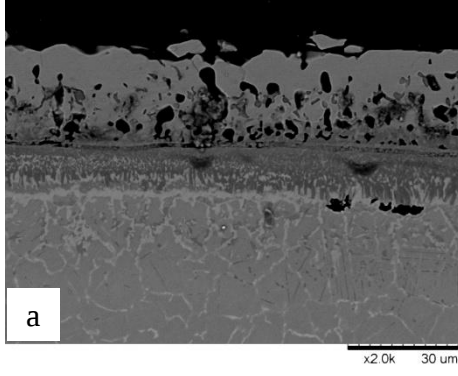


Şekil 6.3 : 900°C' de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının SEM görüntüleri a) 2saat b) 4saat c) 8 saat d) 12 saat.

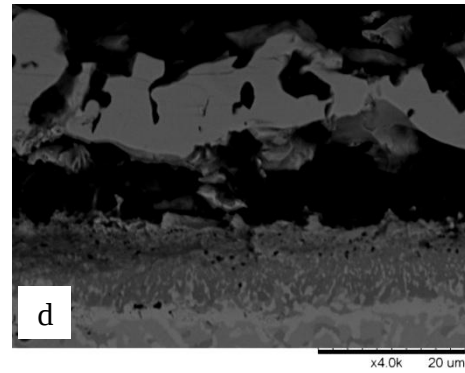
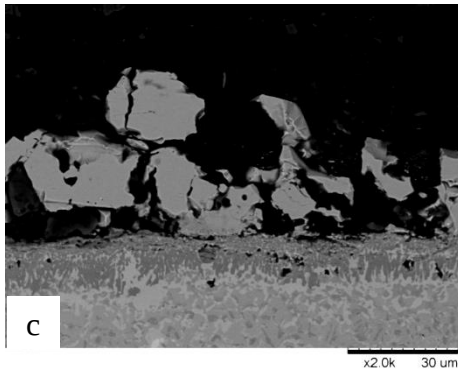
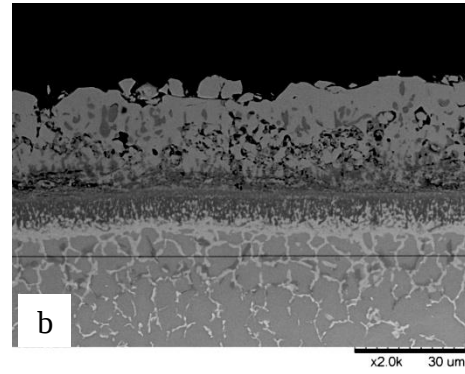
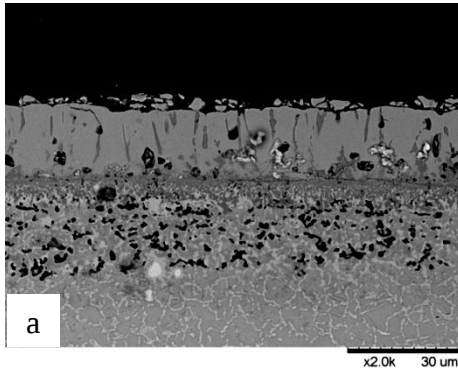


Şekil 6.4: 900°C' de borlanan AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının SEM görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat.

Şekillerden de görüleceği üzere 800°C' deki borlama işlemleri sonucu, silisid ve borür tabakası kalınlıkları düşük değerlerdedir. Bunun nedeni, sıcaklığın düşük olması sonucu bor atomlarının malzeme yüzeyine difüzyonunun az olmasıdır. Sıcaklık 900°C' ye yükseldiğinde ise borür ve silisid tabakalarının kalınlığı artmakta ve tabakalar net bir şekilde görülmektedir. 900°C' deki borlama işlemlerinde silisid tabakasının kalınlığı daha yüksektir. Ayrıca 900°C 8 saat ve 12 saat borlama işlemlerinde borür ve silisid tabakası arasında çatlaklar göze çarpmaktadır. Bu durum, silisid ve borür fazlarının ısıl genleşme katsayılarının farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Numuneler havada soğutulduğundan dolayı borür ve silisid tabakalarının soğuma hızları birbirinden farklıdır. Soğuma hızı farklılığından dolayı çatlaklar oluşmaktadır. Ayrıca silisid oluşumu esnasında , iç gerilmeler oluşmaktadır. Bu iç gerilmeler artan borlama sıcaklığı ve süresi ile artar. Dolayısıyla artan sıcaklık ve sürelerde çatlaklar da büyümektedir. Özellikle 1000°C' deki borlama işlemlerinde silisid tabakasındaki çatlaklardan dolayı bu tabakada dağılma görülmüştür. Bu durum daha sonraki kısımlarda açıklanacağı üzere aşınma sonuçlarını da etkilemektedir.

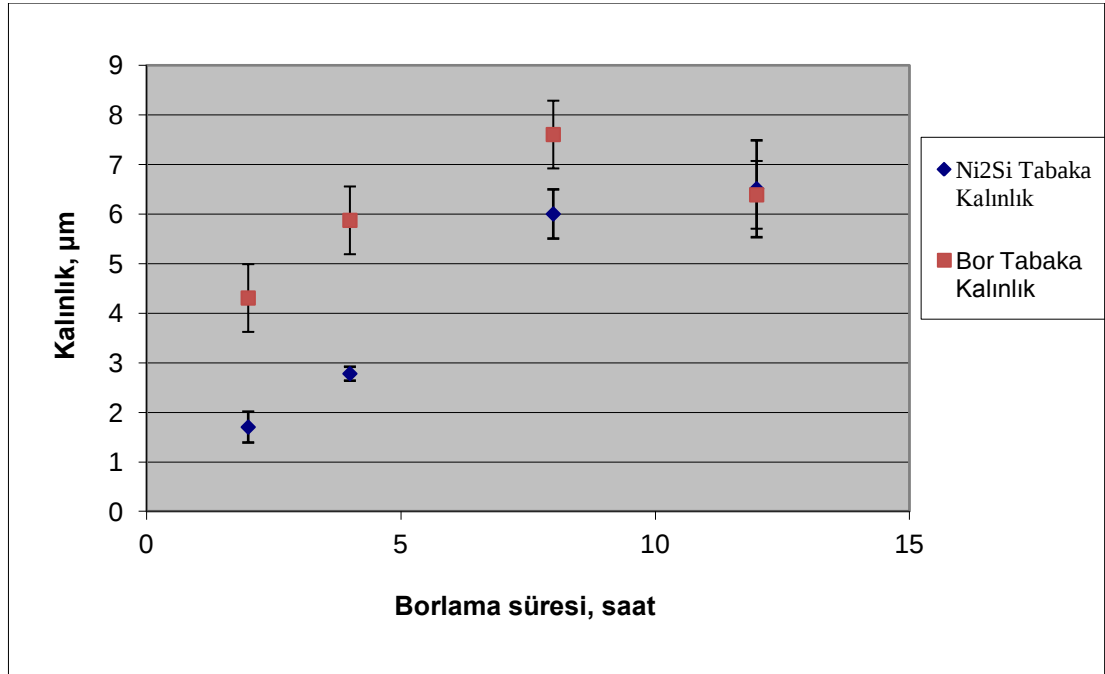


Şekil 6.5 : 1000°C' de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının SEM görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat.

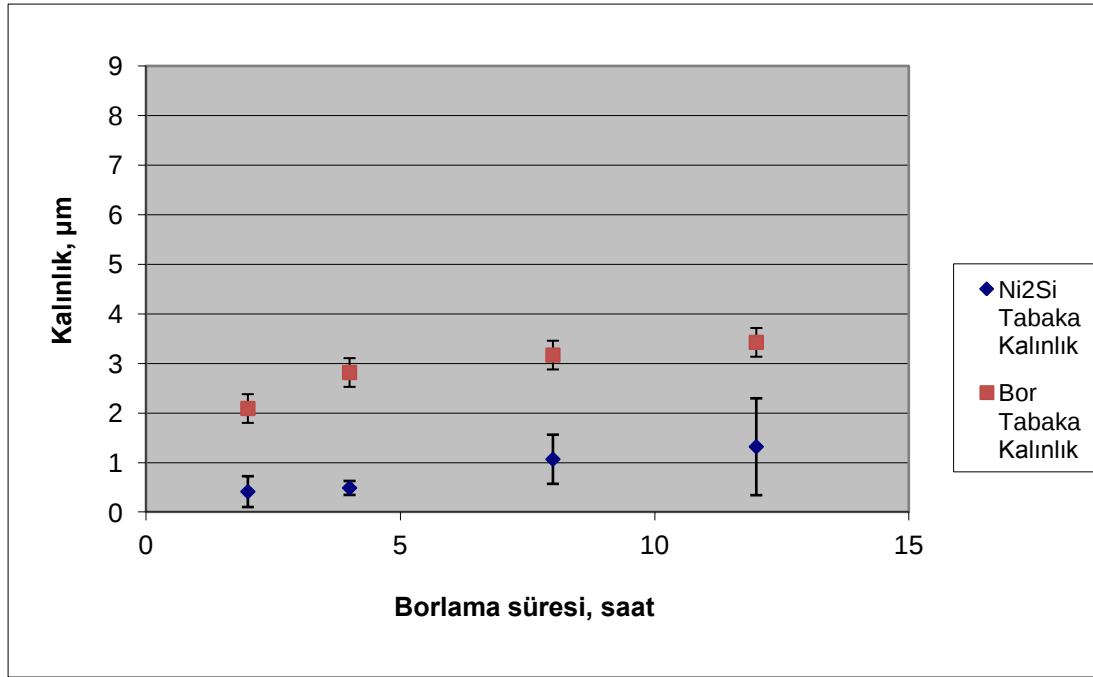


Şekil 6.6 : 1000°C' de borlanan AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının SEM görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat.

Yüzeye en yakın ve kolonsal haldeki tabaka Ni_2Si 'den oluşan silisid tabakasıdır. Bu tabaka homojen görünümündedir ve sıcaklık, süre arttıkça kalınlığı artmaktadır. (Şekil 6.3-6.10). Shen ve arkadaşları ile Üçışık ve arkadaşlarının yaptıkları saf nikelin borlama çalışmalarında da[33,34] silisid tabakasının oluştuğu belirtilmektedir. Ueda ve arkadaşları ise, çalışmalarında [32] SiC içermeyen ve nikel bazlı alaşımların borlanması için kullanılan Ekabor-Ni tozu kullanmışlardır. Bu çalışmada silisid tabakası gözlemlenmemiştir. Ayrıca oluşan silisid tabakası bor atomlarının difüzyonunu önemli ölçüde engellemektedir. Dolayısıyla silisid tabakasının oluşmadığı durumda borür tabakasının kalınlığı daha fazladır. Silisid tabakasının altında ise Ni_4B_3 , Fe_2B ve FeB 'den meydana gelen borür tabakası görülmektedir. Nikel bazlı alaşımların borlanması ile ilgili yapılan daha önceki çalışmalarda demir borür fazına rastlanmamıştır. Fakat Inconel 718 süperalaşımında Fe oranı yüksek olduğundan bor atomları demir atomları ile de reaksiyona girmektedirler. 800 °C sıcaklıktaki borlama proseslerinde Fe_2B ; 900 ve 1000 °C sıcaklıklardaki borlama proseslerinde ise FeB fazları görülmektedir.

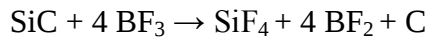
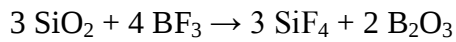
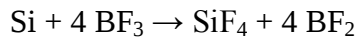


Şekil 6.7 : 800 °C' de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi.

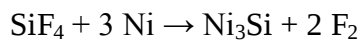
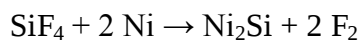
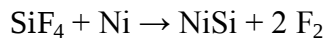


Şekil 6.8 : 800 °C' de borlanan AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi.

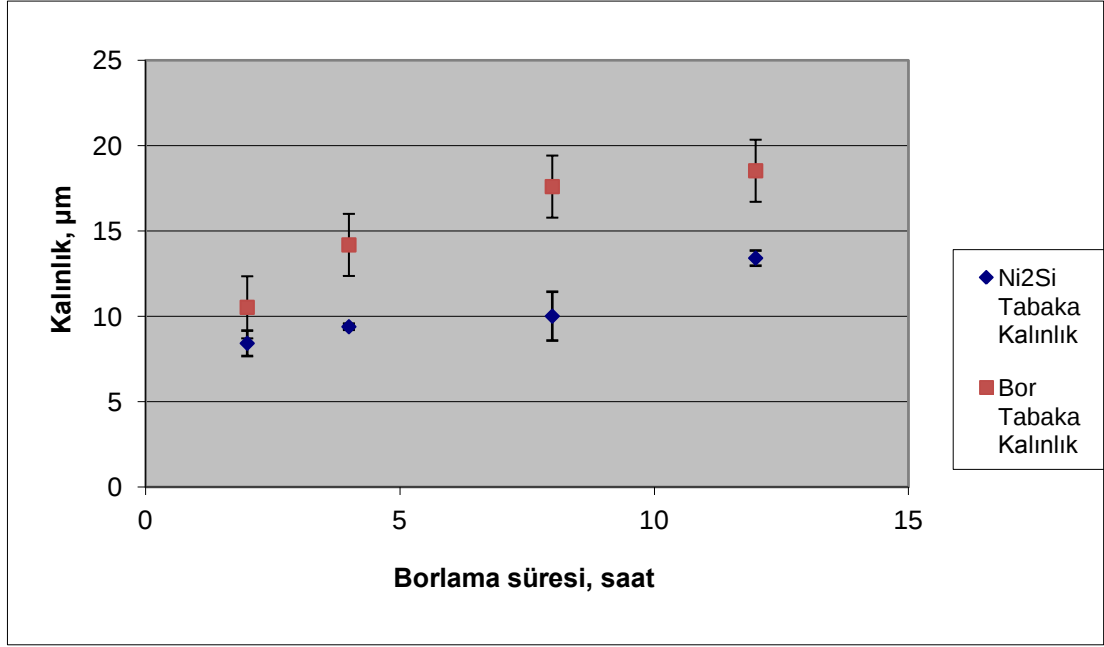
Borlama işlemlerinde Ekabor-2 tozu kullanılmıştır. Bu toz, akışkanlığı sağlamak amacıyla SiC içermektedir. Hunger ve Trute çalışmalarında [30], nikel bazlı alaşımların borlanmasında silisid oluşum mekanizmasını açıklamaktadır. Buna göre Si, tozdaki florürler ile reaksiyona girerek silisyum tetraflorürü oluştururlar. Muhtemel reaksiyonlar aşağıdaki gibidir:



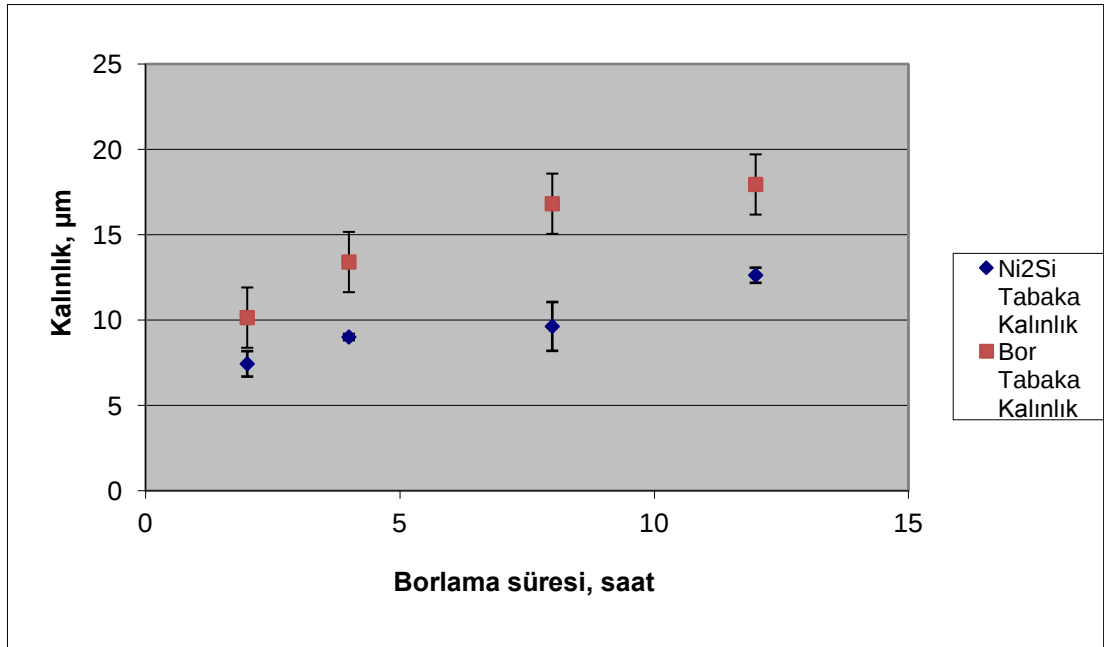
Silisyum tetraflorür de yüzeyde nikel ile aşağıdaki reaksiyonları gerçekleştirir:



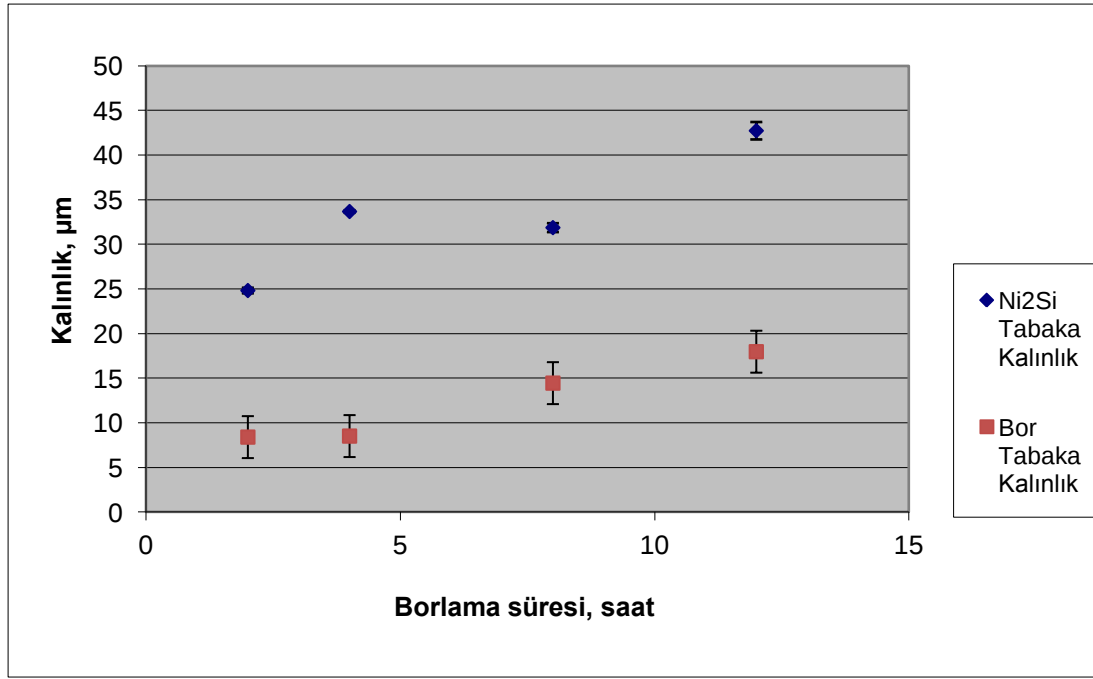
W. Muhammed ve arkadaşları; yaptıkları çalışmada [35] inert atmosfer kullanılsa dahi silisid oluşumunun engellenemeyeceğini belirtmektedirler. Çünkü kutu hazırlanmasında dahi bir miktar havanın içeride kalacağını söylemektedirler.



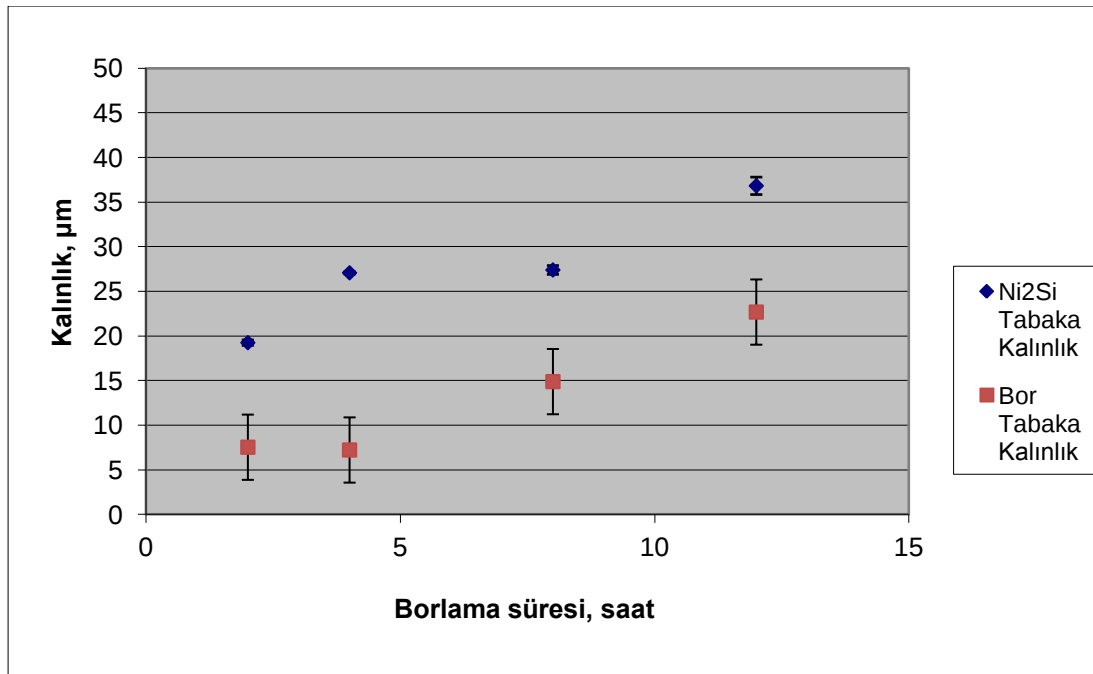
Şekil 6.9: 900 °C' de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi.



Şekil 6.10 : 900 °C' de borlanan AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi.

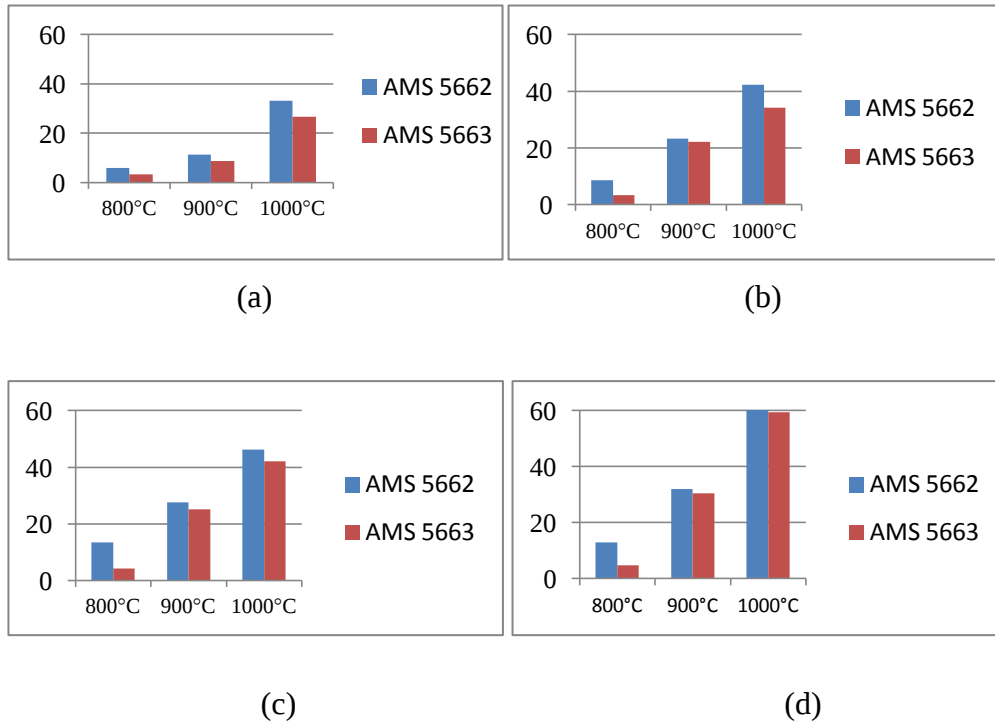


Şekil 6.11 : 1000 °C' de borlanan AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi.



Şekil 6.12 : 1000 °C' de borlanan AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının borlama süresine bağlı olarak kalınlık değişimi.

SEM görüntülerden ve kalınlık-süre grafiklerinden de görüleceği üzere borlama sıcaklığı ve süresi arttıkça silisid ve borür tabakalarının kalınlığı da artmaktadır. Grafikler incelendiğinde, 800°C'deki borlama işlemlerinde borür tabakasının kalınlığı silisid tabakasından daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, silisid tabakasının ince olmasından dolayı bor atomlarının malzeme içine difüzyonunun daha kolay olmasıdır. Ayrıca saf nikelin borlanması ile ilgili yapılan sonuçlar ile Inconel 718'in borlanması sonucu elde edilen tabakalar karşılaştırıldığında kalınlıkların Inconel 718 süperalaşımında daha az olduğu görülmektedir [32,33]. Bu, alaşım elementlerinin bor atomlarının difüzyonunu engellemesi ile açıklanmaktadır. Malzemedeki alaşım elementi oranı ne denli fazla olursa, borür tabakasının kalınlığı o kadar azalmaktadır [37]. Ayrıca silisyumun varlığı, borun nikel içinde çözünürlüğünü azaltmaktadır [38].

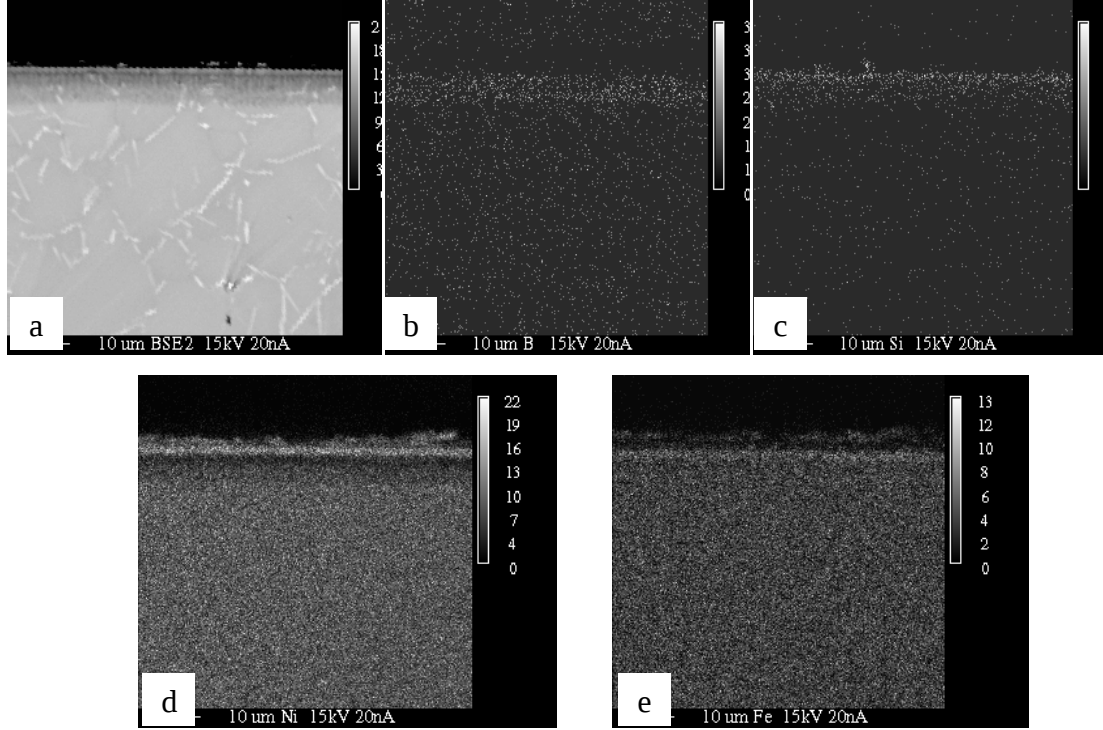


Şekil 6.13 : Farklı sürelerde borlanmış AMS 5662 ve AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının yüzeyinde oluşan toplam tabaka kalınlıkları a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat.

AMS 5662 ve AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımı üzerinde oluşan tabaka kalınlıkları karşılaştırıldığında, AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının yüzeyindeki tabaka kalınlıklarının daha yüksek değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni AMS 5663 Inconel 718 alaşımında ısıl işlem sonucu oluşan çökeltilerin, bor atomlarının difüzyonunu zorlaştırmasıdır.

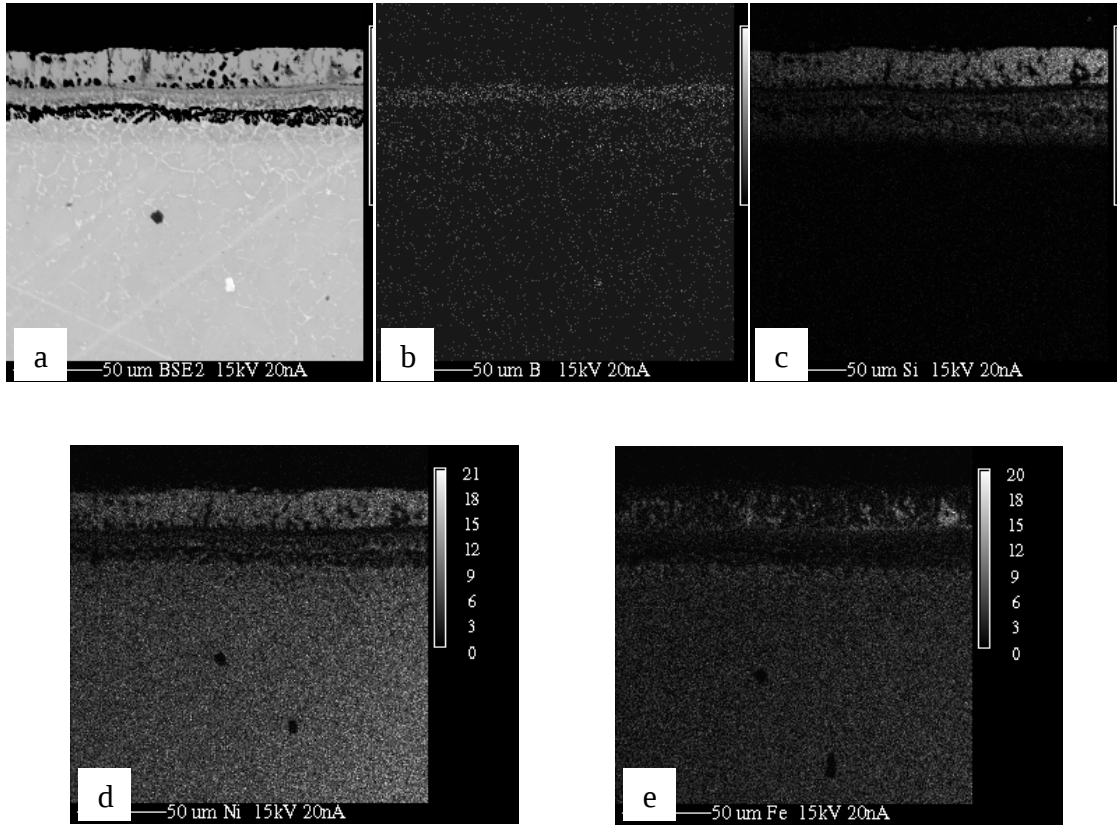
6.2 Elektron Prob Mikro Analizleri

EPMA analizlerinde haritalama tekniği kullanılmıştır. Oluşan tabakalarda B, Ni, Si ve Fe elementleri aranmıştır.



Şekil 6.14 : 800°C' de borlanan AMS 5662 alaşımının EPMA analizi a)SEM görüntüsü b) B elementi c) Si elementi d) Ni elementi d) Fe elementi.

800°C' de borlanan numunelerde daha önce de belirtildiği gibi tabaka kalınlıkları düşük değerlerdedir. EPMA analizi için çekilen SEM görüntüsünde de bu durum net bir şekilde görülmektedir. Silisyum elementi analizi sonucu da üst tabakanın silisid tabakası olduğu anlaşılmıştır. Bor elementi analizi sonucu da alt tabakanın borür tabakası olduğu net bir şekilde görülmektedir.

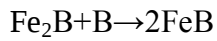


Şekil 6.15 : 1000°C' de borlanan AMS 5662 alaşımının EPMA analizi a) SEM görüntüsü b) B elementi c) Si elementi d) Ni elementi e) Fe elementi.

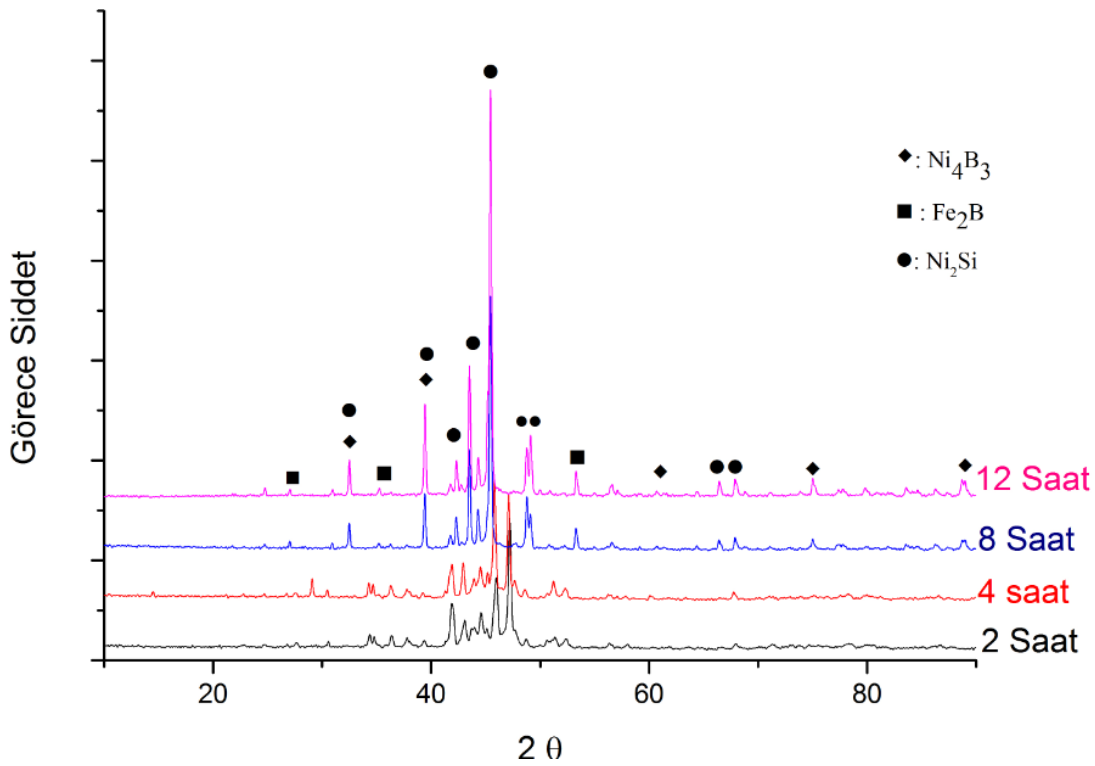
EPMA analizlerinden de görüleceği üzere, en üst tabakada silisyum elementi yüksek değerlerdedir. Bu da, bu tabakanın Ni_2Si ' den meydana geldiğini doğrulamaktadır. Yine bu tabakada nikelce zenginken, bor elemanı değeri düşüktür. Silisid tabakasının altındaki tabaka da ise, bor elementi görülmektedir. Dolayısıyla bu tabakanın borür tabakası olduğu kanıtlanmıştır. En alt tabakada ise demirce zengin tabaka göze çarpmaktadır. Bu sonuçlar da literatürdeki çalışmalar ile uyumludur [39].

6.3 X-ışınları Difraksiyonu Analizleri

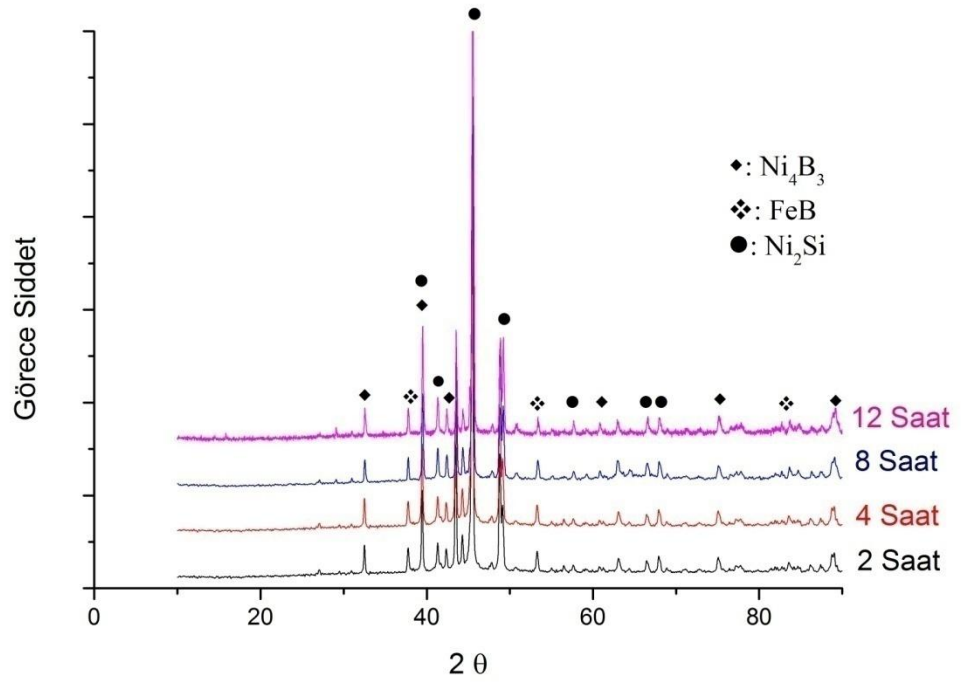
Kaplama tabakasında oluşan fazları tespit etmek için, x-ışınları difraksiyon analiz yöntemi kullanılmıştır. Borlanmış numunelere yapılan XRD analizi sonucu tüm numunelerde görülen silisid tabakasının Ni_2Si fazını içerdiği görülmüştür. Borür tabakasının ise Ni_4B_3 ve demir borürden meydana geldiği saptanmıştır. 800 °C' deki borür tabakasında Fe_2B ; 900 ve 1000C' deki borür tabakasında ise FeB fazının oluştuğu gözlemlenmiştir. Literatürde demir borürlerin oluşum mekanizmaları incelendiğinde[40], düşük sıcaklık ve sürelerde öncelikle Fe_2B 'nin meydana geldiği görülmektedir. Artan difüzyon süresi ve sıcaklığı ile



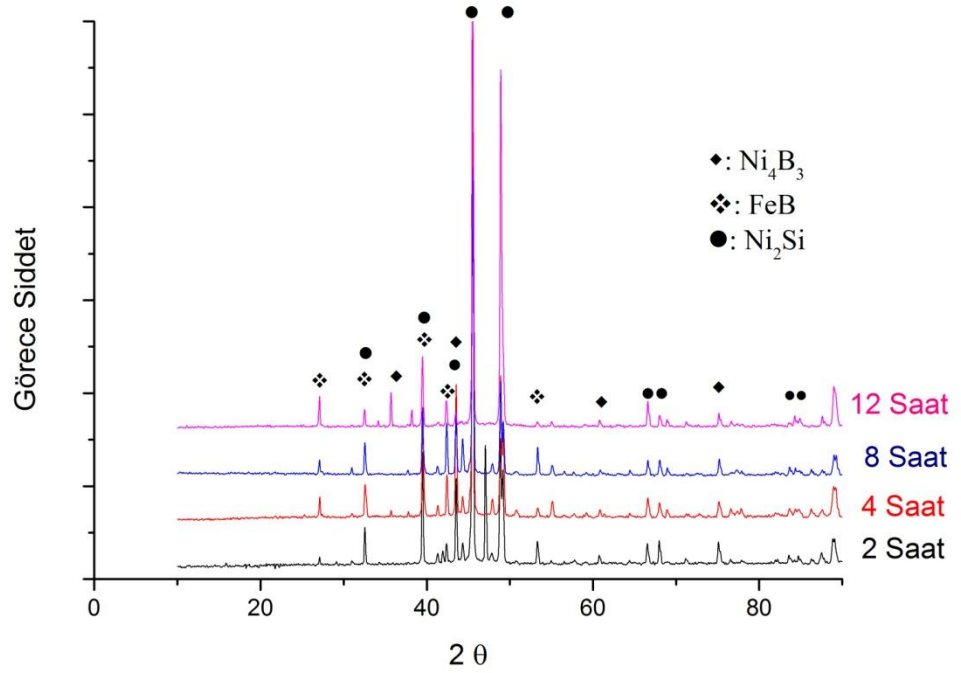
reaksiyonuna göre FeB fazı oluşmaktadır. Dolayısıyla düşük sıcaklıkta Fe_2B , yüksek sıcaklıklarda ise FeB fazı oluşmaktadır.



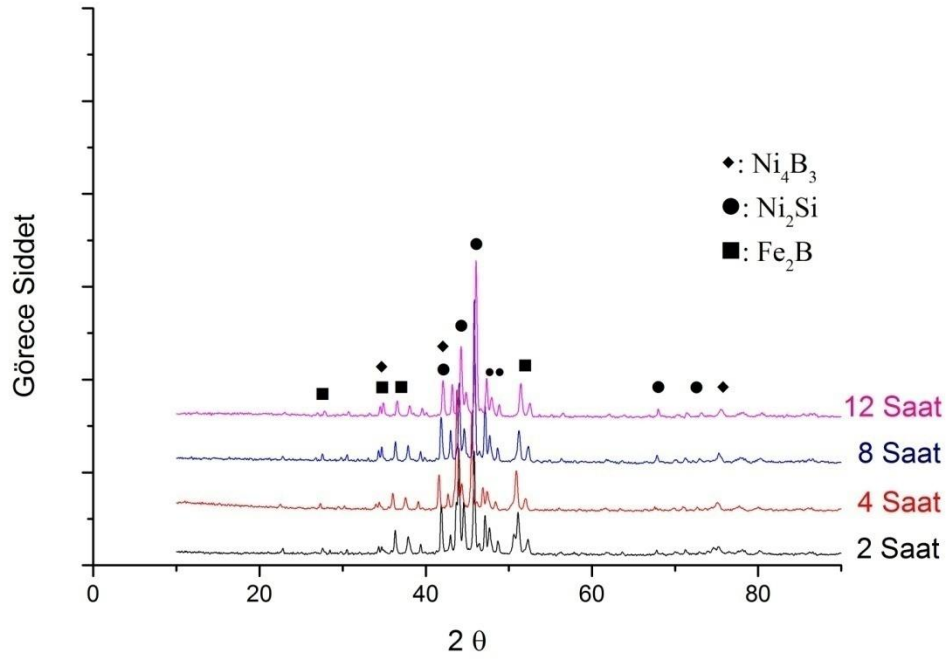
Şekil 6.16 : AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının 800 °C'de borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.



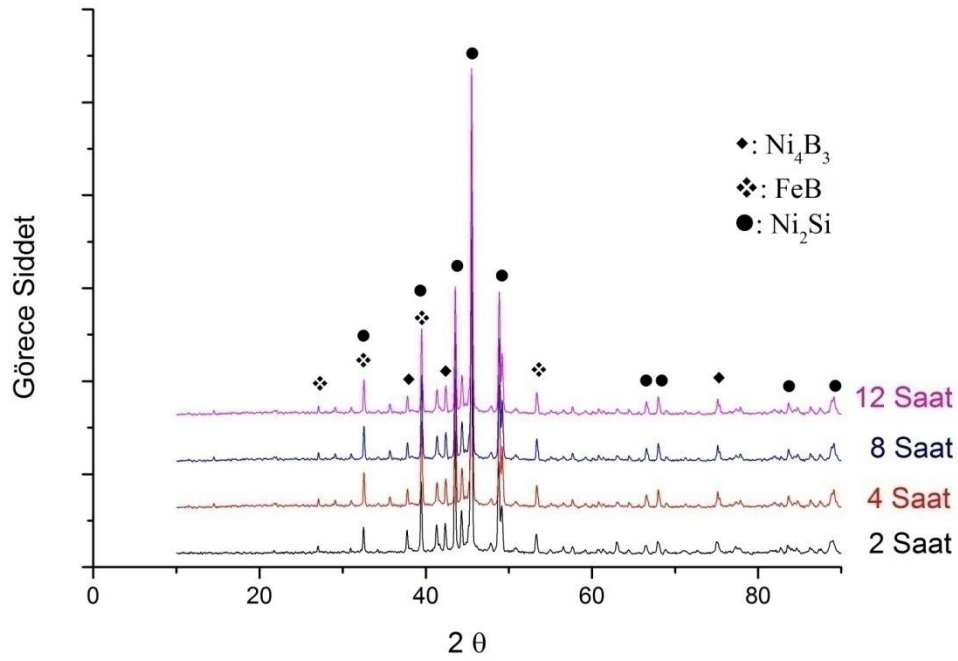
Şekil 6.17 : AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının 900°C'de borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.



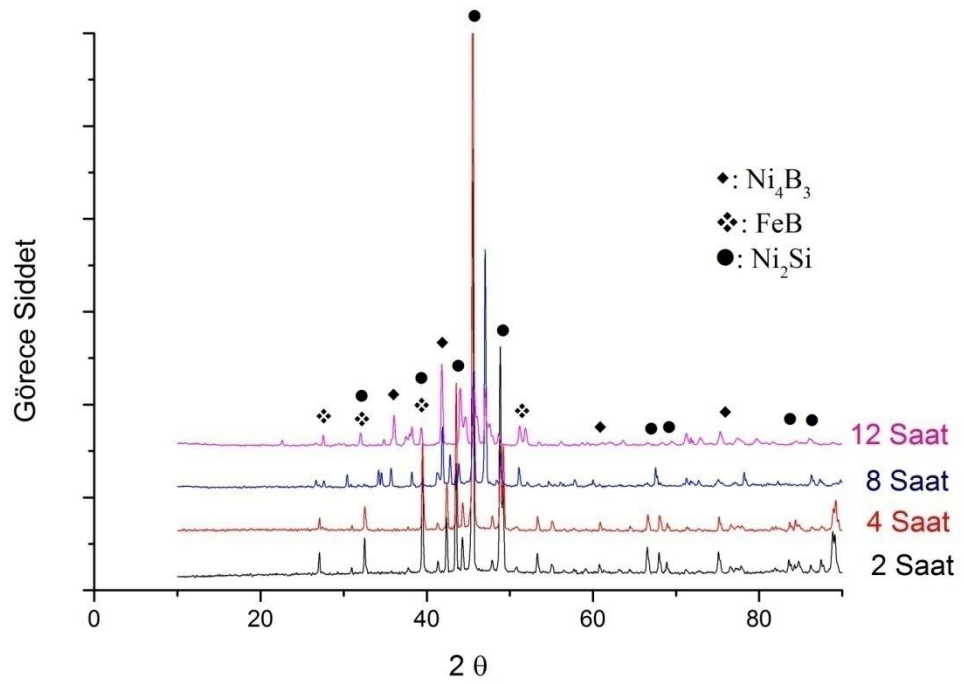
Şekil 6.18 : AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının 1000°C'de borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.



Şekil 6.19 : AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının 800°C'de borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.



Şekil 6.20 : AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının 900°C'de borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.

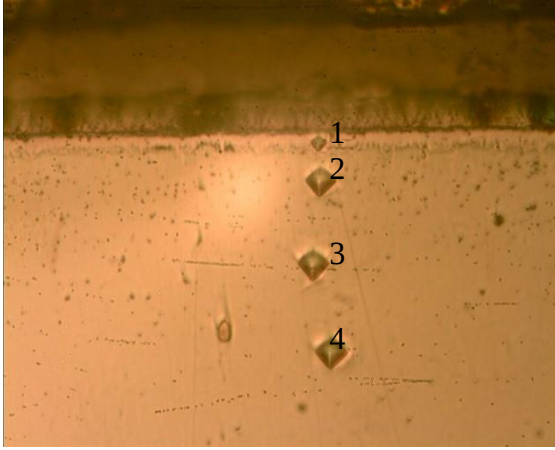


Şekil 6.21 : AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının 1000°C'de borlanması sonucu elde edilen XRD paternleri.

XRD paternleri incelendiğinde, 800°C'de 2 saat borlanan numunelerde piklerin düşük şiddette olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, oluşan tabaka kalınlıklarının az olmasıdır. 1000°C' de borlanan numunelerde ise süre arttıkça borür fazlarının pikleri azalmaktadır. Bu; artan süre ile artan silisid tabakası kalınlığının, X-ışınlarının borür tabakasına ulaşmasını engellemesi ile açıklanabilir. 900°C' de borlanan numunelerde ise pik şiddetleri eşit değerlerdedir. Borlanan tüm numunelerde silisid fazının Ni_2Si ' den, borür fazının Ni_4B_3 ' ten meydana geldiği görülmektedir. Sıcaklığa bağlı olarak demir borür fazının Fe_2B ve FeB ' den oluştuğu saptanmıştır. Tabaka kalınlıkları piklerin şiddetine etki etmektedir.

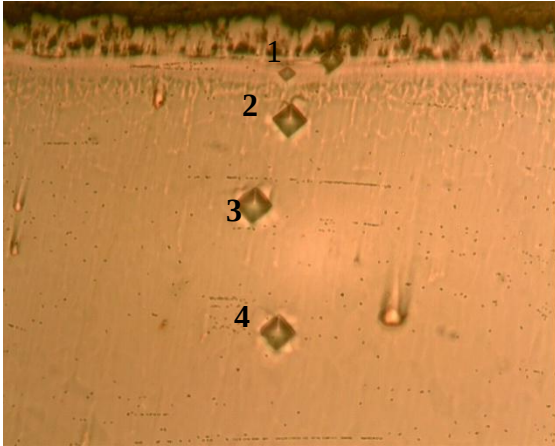
6.4 Sertlik Ölçümlerinin Sonuçları

Farklı sıcaklık ve sürelerde yapılan termokimyasal borlama sonucu elde edilen sertlik değerleri aşağıda görülmektedir. Sertlik değerleri borür tabakasından itibaren, matrise kadar alınmıştır.



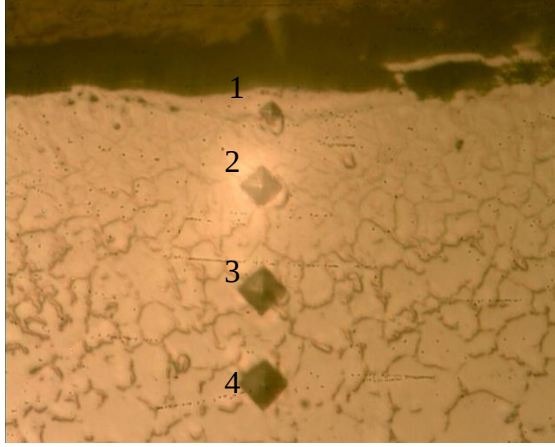
İz No	Sertlik Değeri (HV0.025)
1	609
2	484
3	440
4	422

Şekil 6.22 : AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının 800°C' de 8 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik değerleri



İz No	Sertlik Değeri (HV0,025)
1	1682
2	342
3	340
4	330

Şekil 6.23 : AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının 900°C' de 12 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik değerleri



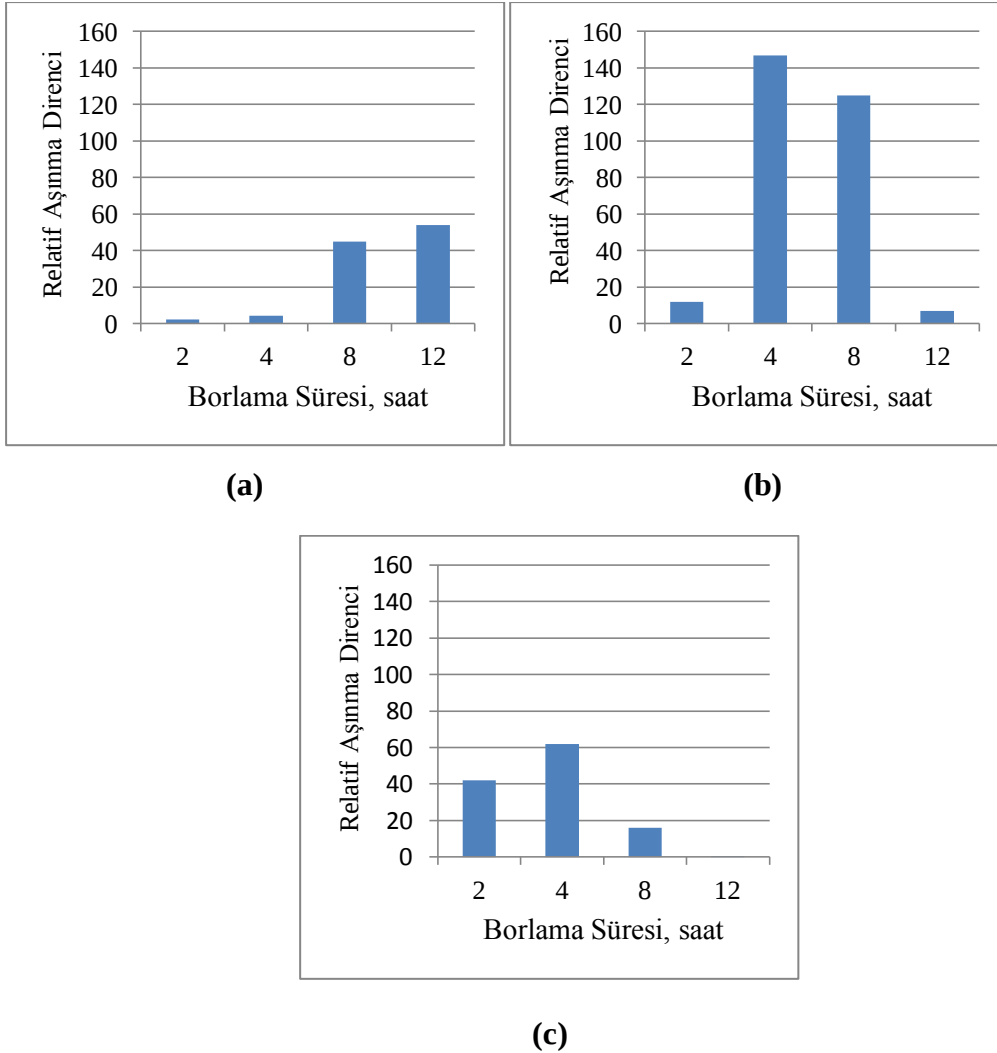
İz No	Sertlik Değeri (HV0,025)
1	1789
2	591
3	336
4	334

Şekil 6.24 : AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının 1000°C' de 12 saat borlanması sonucu kesitte elde edilen sertlik değerleri.

Borlanmış numunelerin yüzeyinden itibaren alınan sertlik değerlerinin grafiği EK-A' da verilmiştir. Şekiller ve grafikler incelendiğinde, yüzeyden matrise doğru sertliğin azaldığı görülmektedir. Borür tabakasından alınan sertlik değerleri 1800 HV' ye yakındır. Difüzyon bölgesinde bu sertlik değerleri 600 HV' ye düşerken matriste 300 HV' ye kadar azalmaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde sertlikte benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür. Saf nikelin borlandığı çalışmalarda sertlik, daha düşük değerlerde kalmıştır [34]. Inconel 600'ün borlanması sonucu benzer fazlar elde edilmiş ve aynı şekilde sertlik-mesafe profili, bu çalışmadaki profillere benzemektedir [29].

6.5 Aşınma Testi Sonuçları

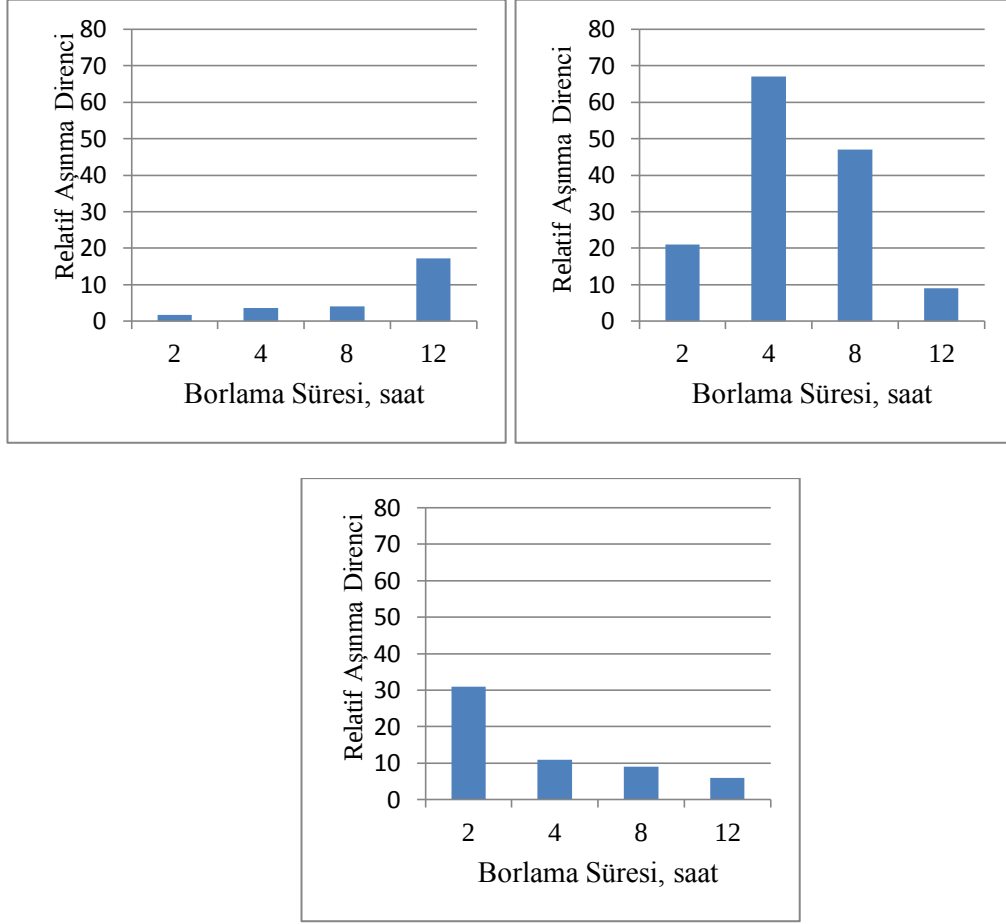
Aşağıdaki çizelgelerde orjinal Inconel 718 süperalaşımının ve borlanmış numunelerin aşınma testi sonucu relatif aşınma dirençleri görülmektedir. Değerlendirmede, borlanmamış Inconel 718 süperalaşımının aşınma direnci 1 olarak kabul edilmiş ve bu orana göre karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 6.25 : AMS 5662 borlanmış numunelerin relatif aşınma dirençleri a) 800°C b) 900°C c) 1000°C.

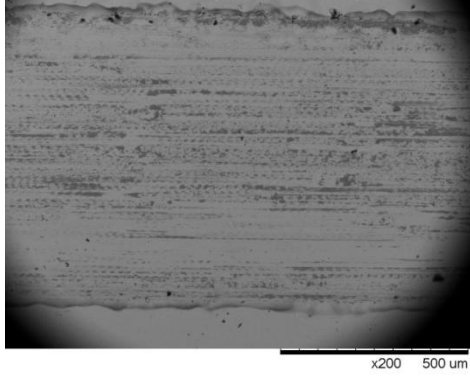
Şekil 6.26' dan da görüleceği üzere 800°C' deki borlama işlemlerinde relatif aşınma direnci değerinde sürekli bir artış vardır. 900 ve 1000°C' deki borlama işlemlerinde ise önce bir artış sonra bir azalış söz konusudur. Bunun nedeni silisid fazının oluşumu esnasında meydana gelen iç gerilmelerdir. Bu gerilme değerleri artan sinterleme sıcaklığı ve süresi ile artmaktadır. Dolayısıyla yüksek sıcaklık ve sürelerde silisid tabakasından parça kopmakta ve bu parçalar aşındırıcı bilya ile

yüzeyden daha çok parça kaldırmaktadır. Sonuç itibarıyla aşınma direnci düşmektedir. Aynı durum AMS 5663 grubu numuneler için de geçerlidir (Şekil 6.27).

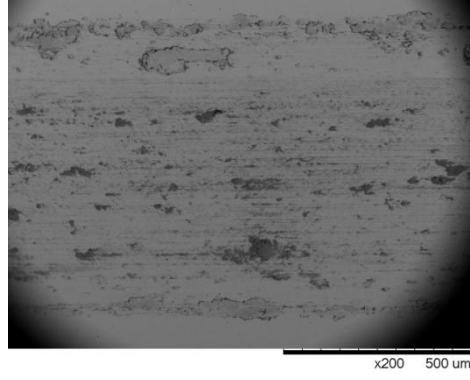


Şekil 6.26 : AMS 5663 borlanmış numunelerin relatif aşınma dirençleri a) 800°C b) 900°C c) 1000°C.

Aşınma izi görüntülerine bakıldığında ise, AMS 5662 ısıtılmasına tabi tutulmuş numunelerin 800°C' de borlanması sonucu aşınma izinde giderek küçülme görülmektedir. 900 ve 1000°C' deki borlama işlemlerinde ise aşınma izinde önce bir küçülme daha sonra ise büyüme görülmektedir. Aynı durum, AMS 5663 numuneleri için de geçerlidir.

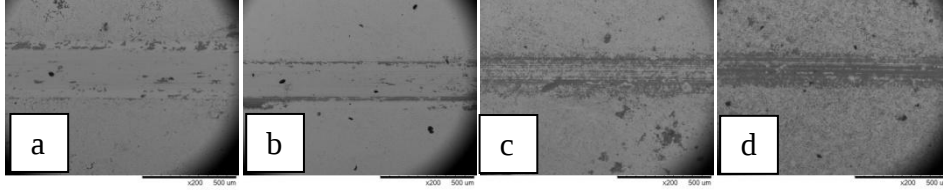


a

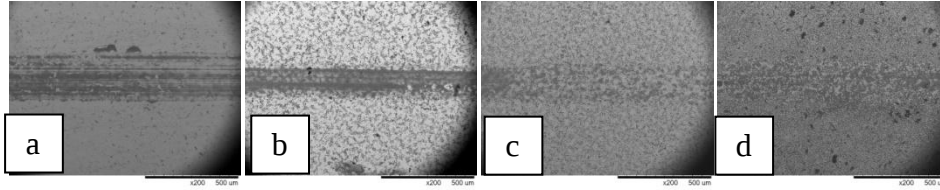


b

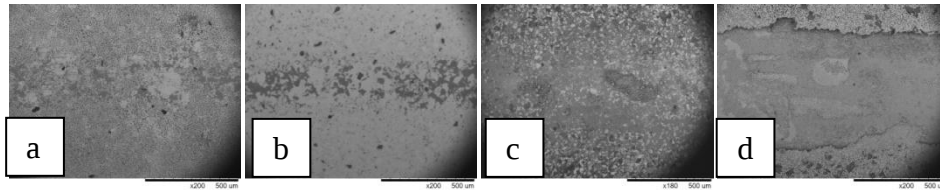
Şekil 6.27 : a) Borlanmamış AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının aşınma iz görüntüsü b) borlanmamış AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının aşınma iz görüntüsü.



Şekil 6.28 : 800°C' de borlanmış AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının aşınma izi görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat.

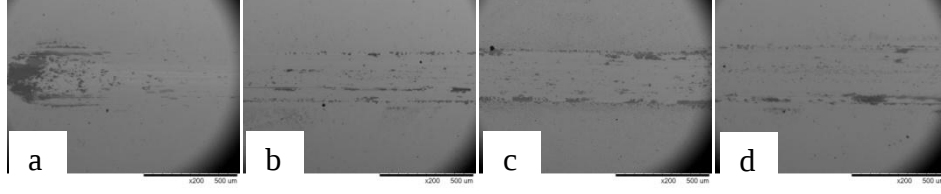


Şekil 6.29 : 900°C' de borlanmış AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının aşınma izi görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat.

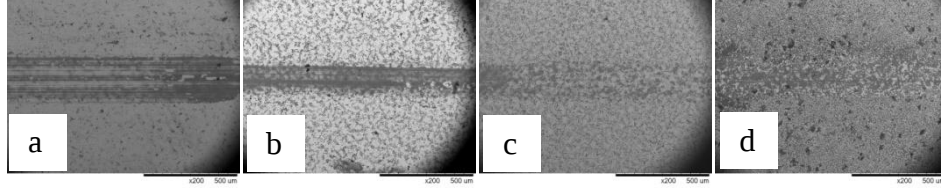


Şekil 6.30: 1000°C' de borlanmış AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının aşınma izi görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat

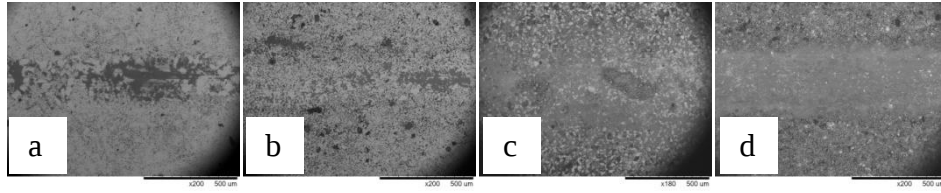
İz görüntülerinden, 1000°C' de borlanmış numunelere uygulanan aşınma testi sonucu silisid tabakasının kalktığı ve malzemenin yüzeyinden daha çok parça kaldırdığı görülmektedir. Dolayısıyla nikel bazlı alaşımların Ekabor tozu içinde yüksek sıcaklıklarda ve uzun sürelerde borlanması aşınma direncine olumsuz etki yapmaktadır.



Şekil 6.31: 800°C' de borlanmış AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının aşınma izi görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat



Şekil 6.32: 900°C' de borlanmış AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının aşınma izi görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat



Şekil 6.33: 1000°C' de borlanmış AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının aşınma izi görüntüleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat

AMS 5662 grubu alaşımına benzer sonuçlar, AMS 5663 grubu için de elde edilmiştir. 1000°C' de yapılan borlama işlemleri sonucu yüzeyden parça kalktığı aşınma izi görüntülerinden görülmektedir.

7. GENEL SONUÇLAR

Inconel 718 süperalaşımı, termokimyasal olarak kutu borlama yöntemi ile borlanmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) Borlanmış tüm numunelerde silisid ve borür tabakaları oluşmuştur. Bu tabakaların kalınlığı artan süre ve sıcaklık ile artmaktadır. Çalışmada AMS 5662 ısıtıl işlemi görmüş numune yüzeyinde oluşan tabaka kalınlıkları, aynı sıcaklık ve sürede borlanmış AMS 5663 ısıtıl işlemi görmüş numune yüzeyinde oluşan tabaka kalınlıklarından daha fazladır. Bunun nedeni AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımında oluşan çökeltilerin bor atomu difüzyonunu engellemesidir.
- 2) Tabaka kalınlıkları silisid için 0,4-42 mikrometre; borür tabakası için 2-18 mikrometre arasında değişmektedir. En düşük tabaka kalınlıkları AMS 5663 Inconel 718 süperalaşımının 800°C' de 2 saat borlanması ile elde edilirken, en yüksek tabaka kalınlıkları AMS 5662 Inconel 718 süperalaşımının 1000°C' de 12 saat süre ile borlanması sonucu elde edilmiştir.
- 3) Yapılan faz tayinleri sonucu, silisid tabakasının Ni_2Si ; borür tabakasının Ni_4B_3 , Fe_2B ve FeB fazlarından oluştuğu görülmüştür. 800°C' deki borlama işlemlerinde Fe_2B , 900°C' deki borlama işlemlerinde FeB fazı oluşmaktadır.
- 4) Yapılan sertlik ölçümleri sonucu en yüksek sertlik değerinin borür tabakasında olduğu tespit edilmiştir. Artan borlama süresi ile borür tabakasının sertliği artmaktadır. Bu tabakanın sertliği 1860 HV' ye kadar çıkmaktadır. Kesitten sertlik profilleri incelendiğinde, borür tabakasından sonra sertlik değerleri azalmakta ve matriste sabit bir değerde devam etmektedir.
- 5) Borlanmış numunelere yapılan aşınma testleri sonucu, sürtünme katsayısının orjinal numunelere göre yarı yarıya azaldığı tespit edilmiştir. Borlama işlemi sonucu aşınma direnci, orjinal numuneye göre artmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Donacihe, M., Donacihe, S.,** (2002). *Superalloys A Technical Guide*, 1-18 Second edition, ASM International.
- [2] **Campbell, F.C.,** (2006). *Manufacturing Technology For Aerospace Structural Materials*, 211-272, Elsevier.
- [3] **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.
- [4] **Reed, R.,** (2007). *Physical Metallurgy and Microstructure of Superalloys* University of Birmingham.
- [5] **Patel, S.J., Smith, G.D.,** The Role Of Niobium In Wrought Superalloys, Special Metals Corporatiton.
- [6] **Bradley, E.F,** (1988). "*Microstructure*" in *Superalloys*, A technical guide, ASM International.
- [7] **Smallman, R. E., Bishop, R.J.,** (1999). *Modern Alloy Developments, in Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering*, 6th edition, Butterwoth-Heinemann.
- [8] **Choi, H.S, Choi, J.,** (1972). Precipitation In Inconel 718 alloy, *Journal of the Korean Nuclear Society*, Volume 4.
- [9] **Kuo, C.M., Yanga, Y. T., Borb, H. Y., Wei, C. N. ve Tai C.C.,** (2008). Aging effects on the microstructure and creep behavior of Inconel 718 superalloy.
- [10] **Url-1** <http://new.bibus.cz/pdf/Special_Metals/Nikl/prehled/inconel-alloy_718a718SPF_725.pdf>, alındığı tarih: 25.03.2013.
- [11] **Zhang, H. Y., Zhang, S. H., Cheng, M. ve Li, Z. X.** (2010). Deformation characteristics of δ phase in the delta-processed Inconel 718 alloy, *Materials Characterization*, 61.
- [12] **Davis, J. R.** (1997). *Heat resistant materials*, 37-91, ASM International.
- [13] **Coutsouradis, D., Davin, A. ve Lamberigts, M.,** (1987). Cobalt-based superalloys for applications in gas turbines, *Materials Science and Engineering*, volume 88, 11-19
- [14] **Ozdemir, O., Omar, M. A., Usta, M., Zeytin, S., Bindal, C., Üçışık, A.H.,** (2009). An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel, *Vacuum* 83, 175–179
- [15] **Sinha, A. K. ,** (1991). *Boriding(Boronising)*, ASM Handbook, Vol. 4, J. Heat Treating, pp. 437-447

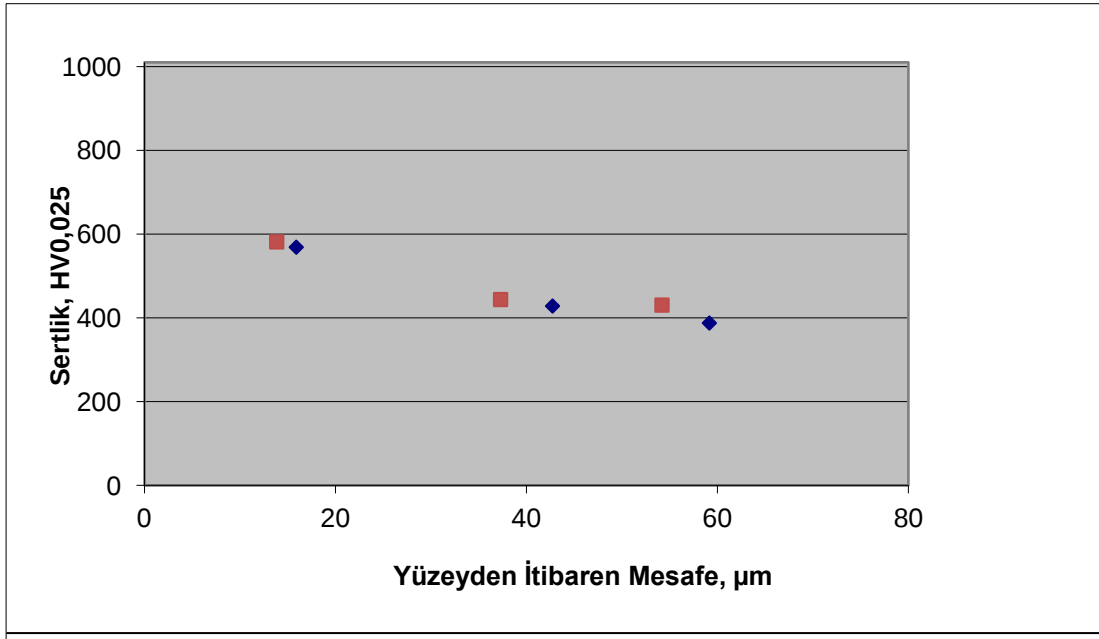
- [16] **Şen, U.**, (1997). Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri, *Doktora tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [17] What is Boronising? Lindberg Heat Treating Company Ceramic Consulting Group, 12/(1995).
- [18] **Davis, J.R.**, (2002) *Surface hardening of steels, Understanding the basics*, 365-413 ASM International.
- [20] **Bayça, U.S., Şahin, S.**, 2004, Borlama, *Mühendis Ve Makina* , 532.
- [19] **Ersöz, A.**, Elektrokimyasal Borlama İle Çeliklerin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi, *yüksek lisans tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007, İstanbul.
- [21] **Azaklı, Y., Tarakçı, M., Genç, Y., Çalık, A.** (2012)., Fe-8Mo İkili Alaşımının Kutu Borlama Yöntemi ile Kaplanması, *International Iron and Steel Symposium*, 2-4 Nisan 2012, Karabük, Türkiye.
- [22] **Gissler, W., Jehn, H.A.**, (2002). *Advanced techniques for surface engineering*, Kluwer Academic Publishers.
- [23] **Simonenko, A. N., Shestakov, A., Poboinya, V.N.**, (1982). Liquid boriding in induction salt baths, *Metal Science and Heat Treatment*, Volume 24, 360-361.
- [24] **Baştürk, S., Erten, M.**, Borlama İle Yüzey Sertleştirme Çalışmaları, *Mühendis ve Makina*, Cilt:47 Sayı: 563 57-74
- [25] **Kulka, M., Makuch, N., Pertek, A., Piasecki, A.** (2012). An alternative method of gas boriding applied to the formation of borocarbured layer, *Materials characterization* 72(2012) 59-67.
- [26] **Genel, K.**, (2005). Boriding kinetics of H13 steel *Vacuum* 80, 451-457.
- [27] **Vangavati, R.**, (2006)., Boron induced surface modification of transition metals, *yüksek lisans tezi*, New Jersey Institute of Technology.
- [28] **Anthymis, K.G. Zinoviadis, P., Rousso, D., Tsipas, D.N.**, (2002). Boriding of nickel in a fluidized bed reactor, *Materials research bulletin*, 37, 515-522
- [29] **Sista, V., Kahvecioglu, O., Kartal, G., Zeng, Q.Z., Kim, J.H, Eryilmaz, O.L., Erdemir, A.**, (2013). Evaluation of electrochemical boriding of Inconel 600, *Surface and coating technology* 215, 452-459.
- [30] **Hunger, H.J., Trute, G.**, (1994). Succesful boronizing of nickel based alloys, *Materials science forum* vols. 163-165 pp 341-348.
- [31] **Koichiro, K., Shimotake H. ve Mrazek F.C.**, (1983). Boriding of nickel and other metals at temperatures below 670 °C *J. Electrochem. Soc.* Volume 130, Issue 1, Pages 147-151.
- [32] **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.
- [33] **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.

- [34] **Dong, M., Shen, B., Yang, C., Zhao, X.,** (2009). Microstructure analysis of boronized pure nickel using boronizing powders with SiC as diluent, *Vacuum* 83 1481-1484.
- [35] **Muhammad, W., Hussain, K, Tauqir, A, Ulhaq, A. ve Khan, A.Q.,** (1999). Evaluation of Halide-Activated Pack Boriding of INCONEL 722, *Metallurgy and materials transactions A*, Volume 30 A.
- [36] **Url-2** < <http://www.atum.itu.edu.tr/tr/wp-content/uploads/2012/09/epma2.jpg>>, Alındığı tarih: 14.04.2013
- [37] **Carbucciccho, M., Paloubanni, G.,** (1987). Effects of alloying elements on the growth of iron boride coatings, *Journal of materials science letters* 6 1147-1148
- [38] **Tung, S. K., Lim, L.C., Lai, M.O., Wu, H.,** (1997). Evolution of nickel borides in Ni-Si-B brazed joints of nickel during post-braze heat treatment, *Materials science and technology*, Vol.13 1051-1056
- [39] **Ruryan, L., Wang, X., Zhu, M., Zhang, J.,** (2004). Effect of borate coating on corrosion resistance of pure nickel in molten LiCl, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, Vol:14 143-147
- [40] **Dybkov, V.I., Lengauer, W. Barmak, K.,** (2005). Formation of boride layers at the Fe-10% Cr alloy-boron interface, *Journal of alloys and compounds*, 12060 1-10
- [41] **Url-3** < http://www.mah.seupload_uploadNi-base%20superalloys.pdf>. Alındığı tarih : 23.03.2013

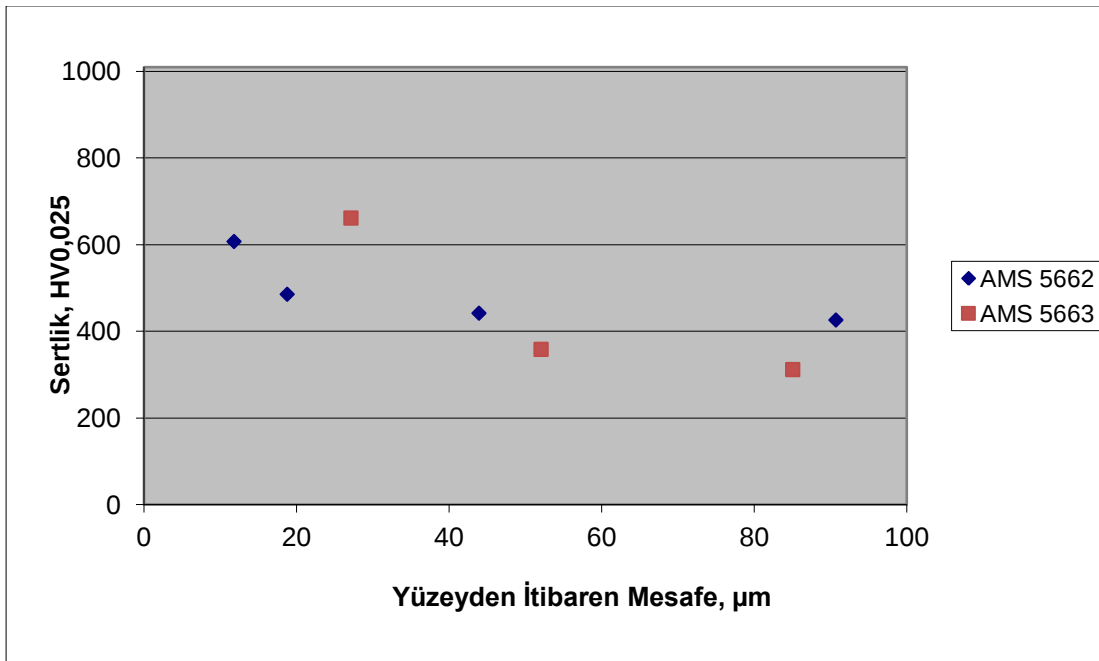
EKLER

EK A: Sertlik-Yüzeyden İtibaren Mesafe

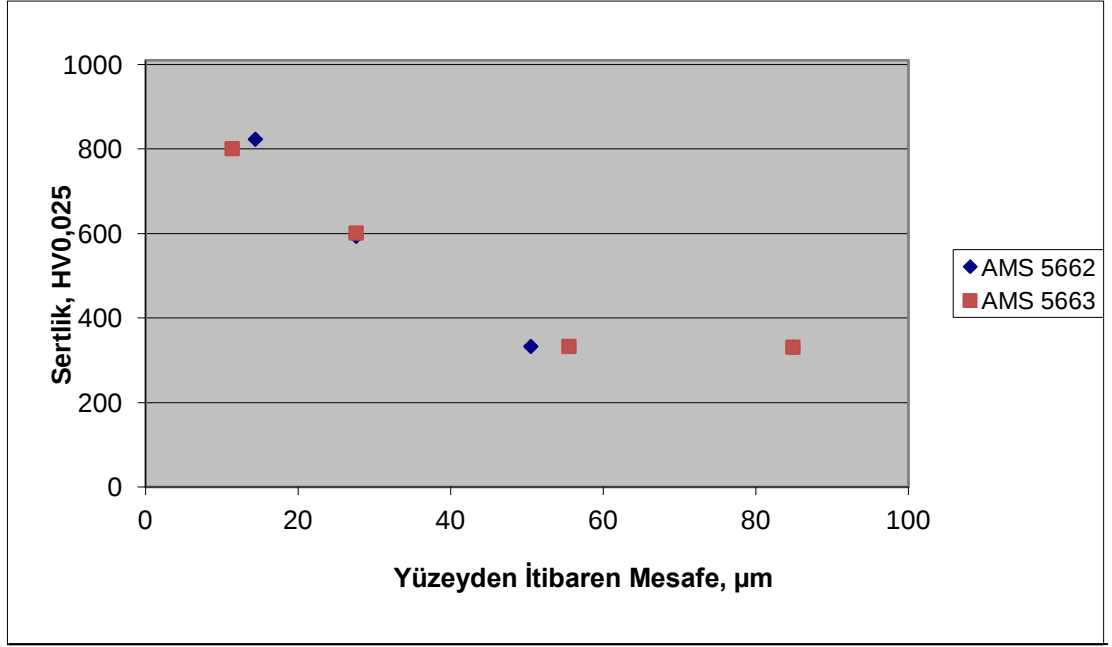
EK A



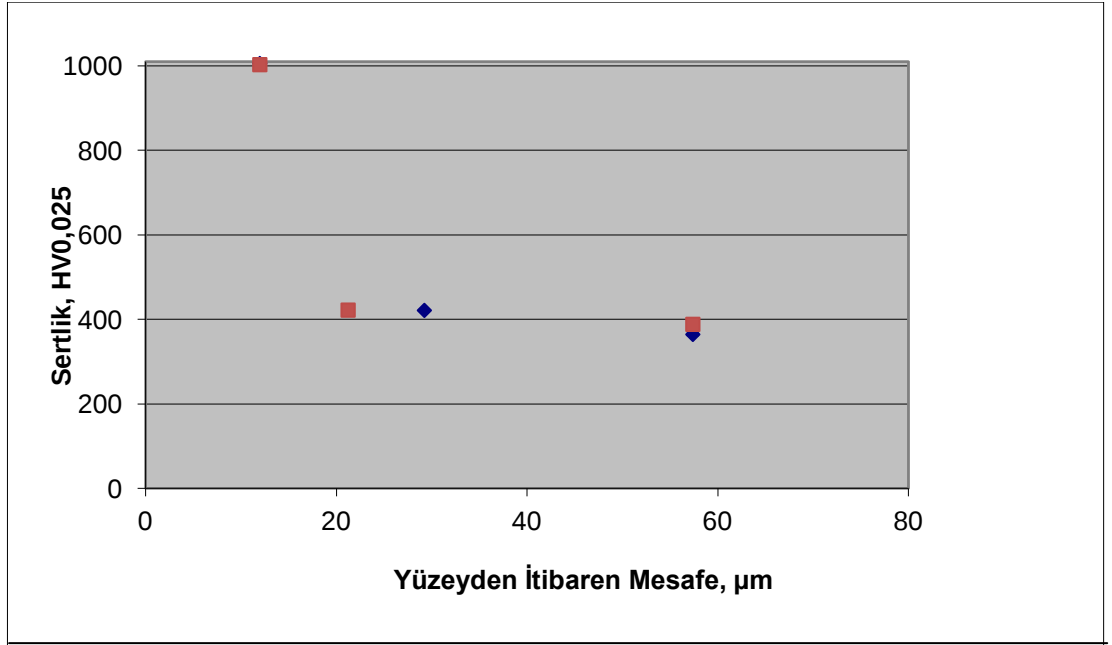
(a)



(b)

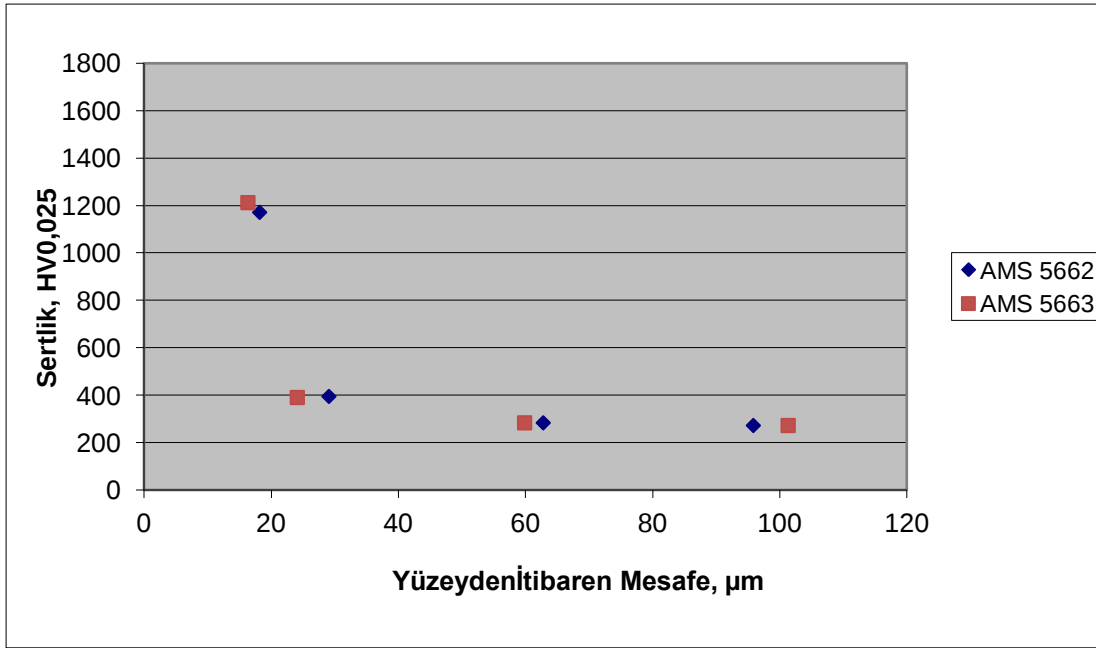


(c)

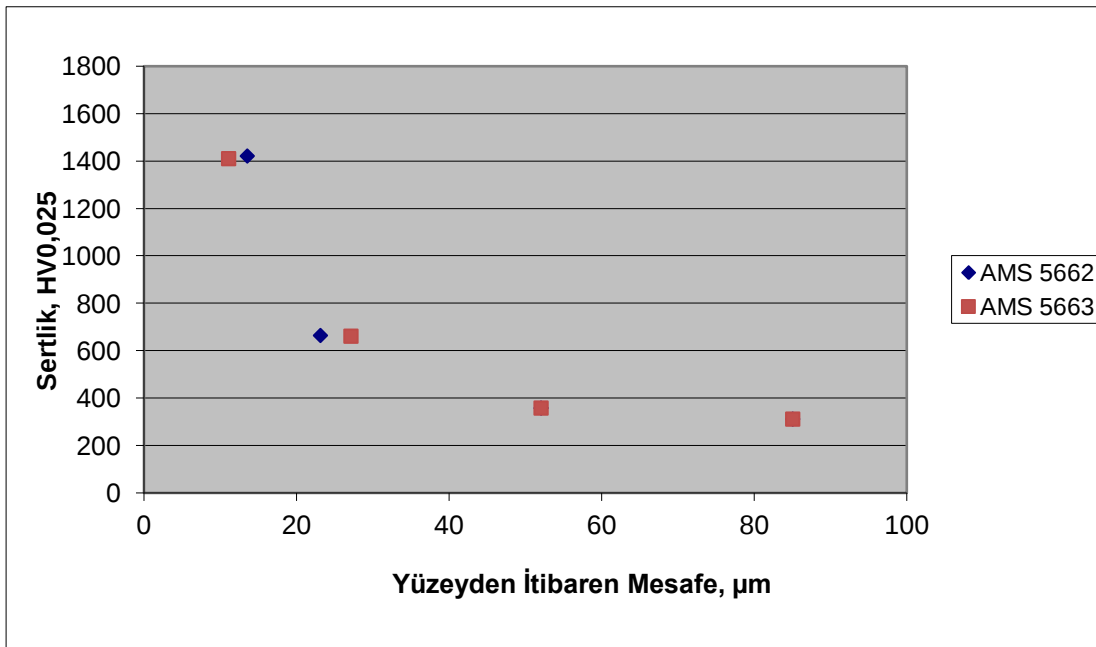


(d)

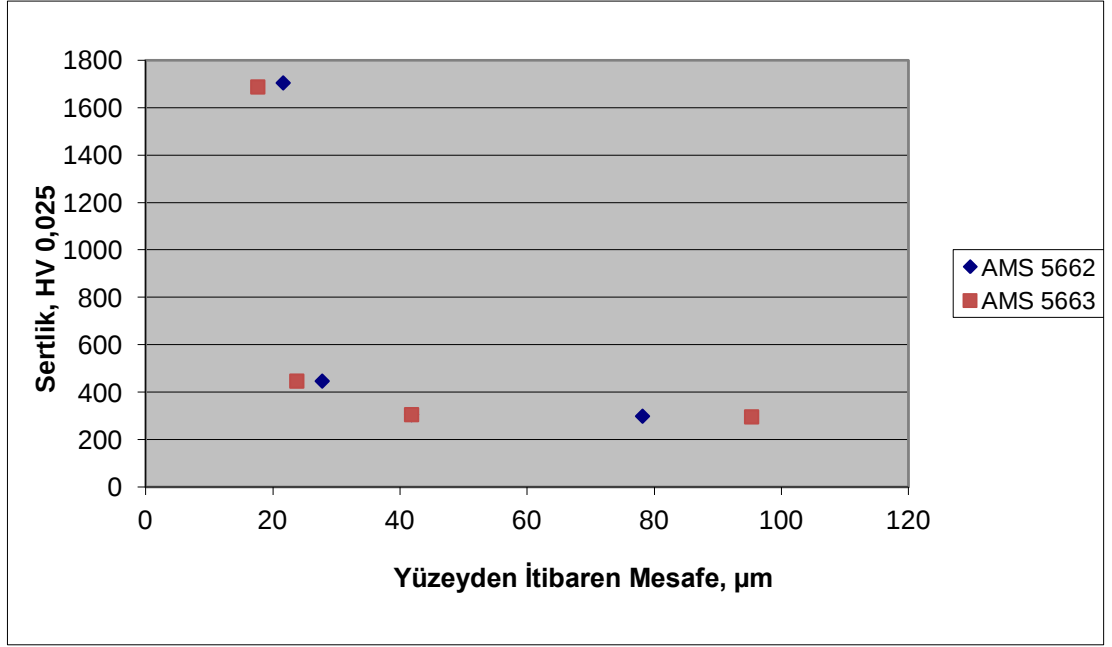
Şekil A.1 : 800°C'de borlanmış Inconel 718 süperalaşımının yüzeyden uzaklık sertlik grafikleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat



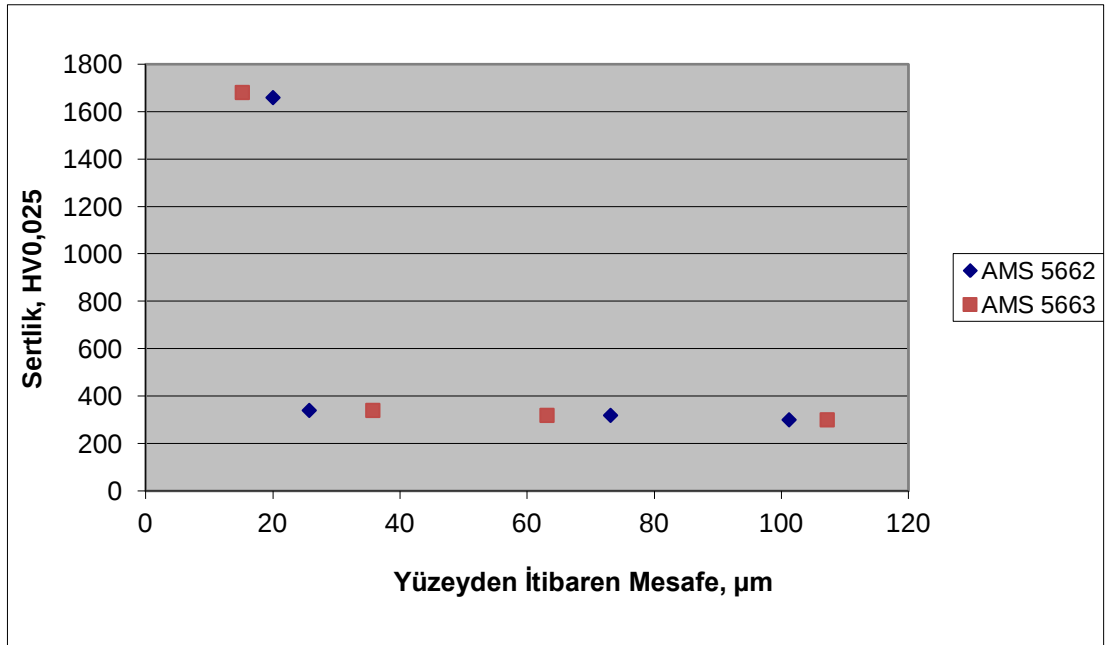
(a)



(b)

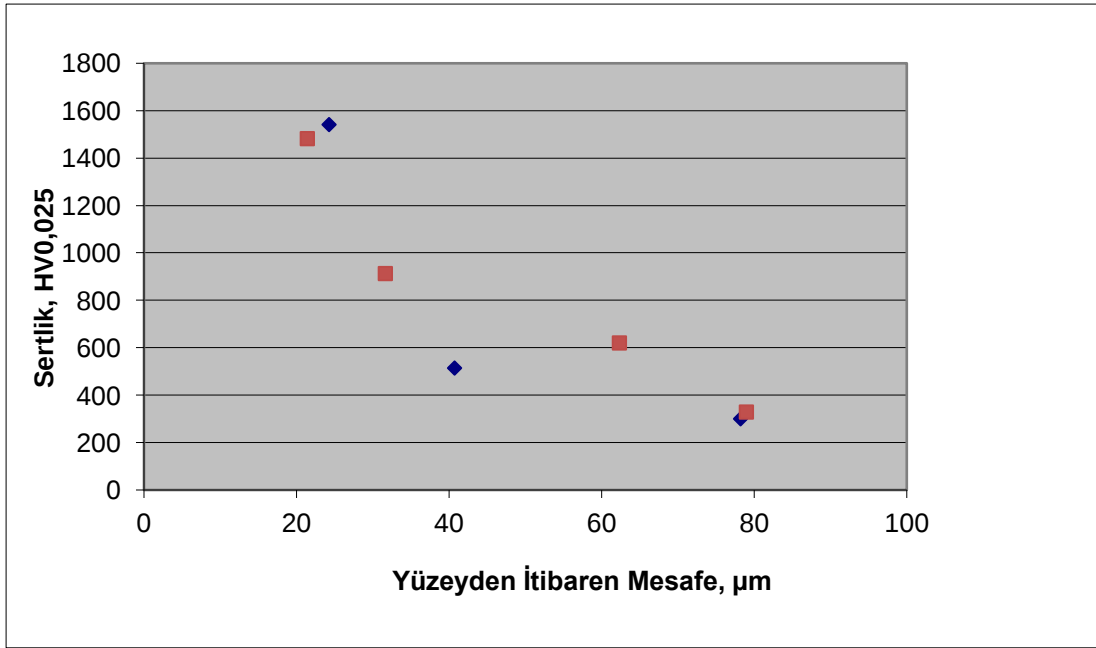


(c)

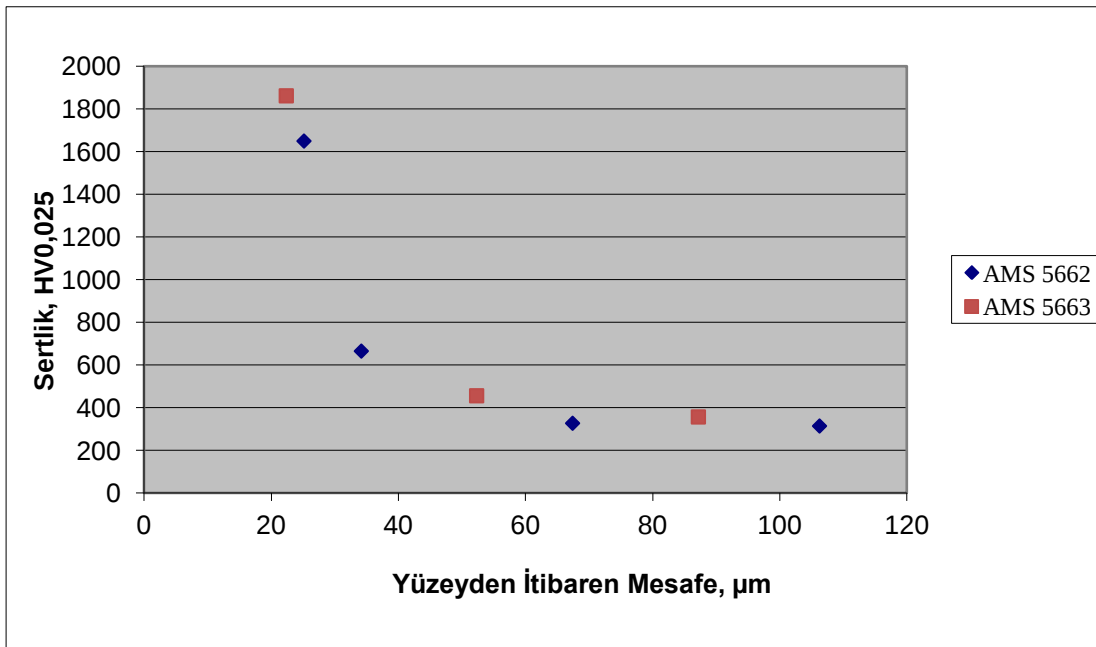


(d)

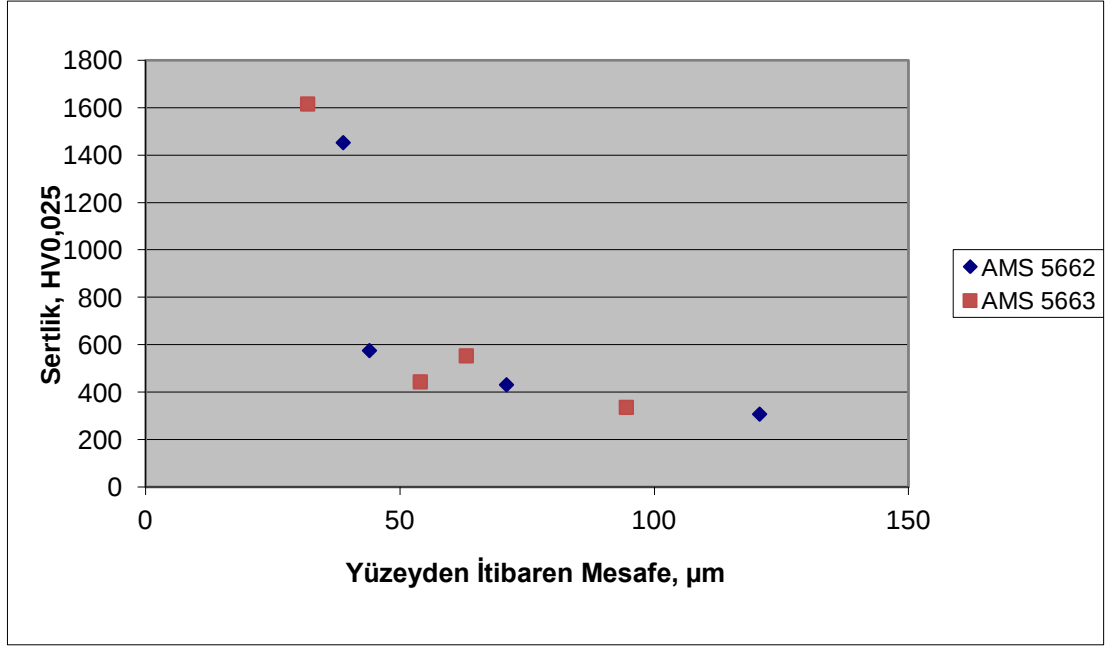
Şekil A.2 : 900°C'de borlanmış Inconel 718 süperalaşımının yüzeyden uzaklık sertlik grafikleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat



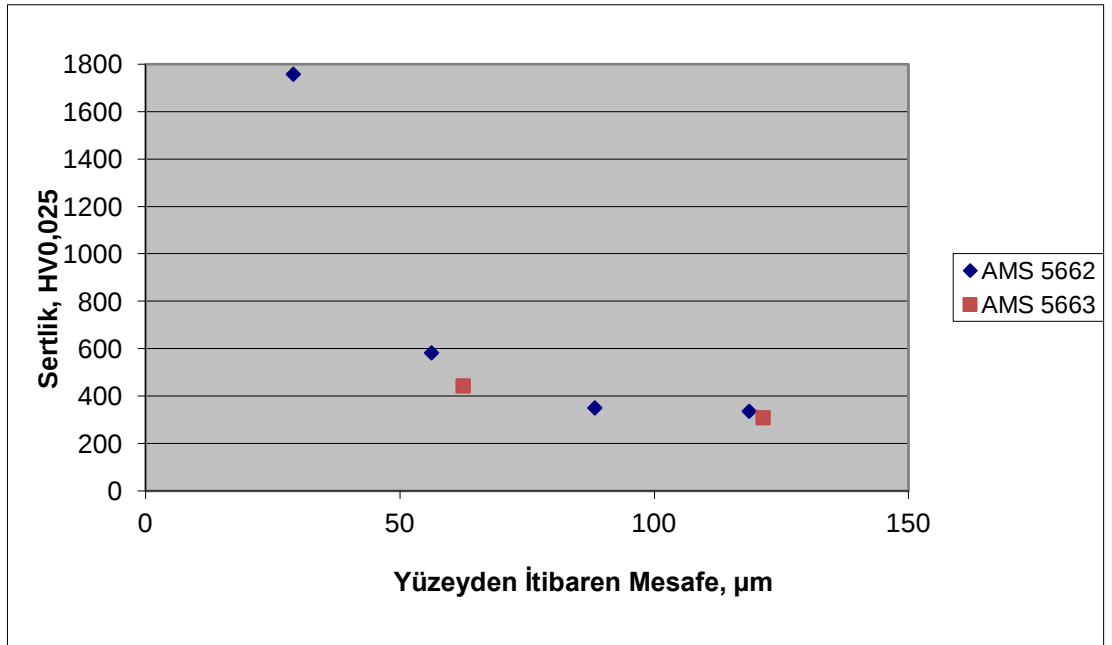
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil A.3 : 1000°C'de borlanmış Inconel 718 süperalaşımının yüzeyden uzaklık sertlik grafikleri a) 2 saat b) 4 saat c) 8 saat d) 12 saat

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Hasan Dinç

Doğum Yeri ve Tarihi: Keşan - 25/11/1989

Adres: Valide-i Atik Mah. Mantar Sok. No:13 D:8 Üsküdar/ İSTANBUL

E-Posta: dincha@itu.edu.tr

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi/ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Dinç, H., Motellabzadeh A., Baydoğan, M., Çimenoglu, H. 2013: Thermochemical Boriding of Inconel 718 Superalloy *International Journal of Arts and Sciences(IJAS'13)* Mayıs 28-31, 2013 Prag, Çek Cumhuriyeti.