İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PASLANMAZ ÇELİK 310 VE 316 METALİNİN PLAZMA BORLAMA VE NİTRÜRLEME METODU İLE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ARAT

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Malzeme ve İmalat

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ

HAZİRAN 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PASLANMAZ ÇELİK 310 VE 316 METALİNİN PLAZMA BORLAMA VE NİTRÜRLEME METODU İLE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa ARAT
(503081311)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Mayıs 2011
Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Haziran 2011

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Murat VURAL (İTÜ)
Doç. Dr. Halit SüleymanTÜRKMEN (İTÜ)

HAZİRAN 2011

Aileme,

ÖNSÖZ

Tez çalışmamın her safhasında bana zaman ayıran, öneri ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ'e, deneysel çalışmalarımda bana katkıda bulunan laboratuar çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim. Maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, haklarını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim sevgili aileme ve tez çalışmam boyunca deneyler süresince izin konusunda ve manevi desteklerinden dolayı ekip liderim Z.Didem Çolakel'e teşekkür ederim.

Haziran 2011

Mustafa ARAT

(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Borlamanın Isıl İşlemler İçindeki Yeri 2
1.2 Borlama İşlemi ile Yüzey Sertleştirme 3
1.2.1 Katı ortamda borlama 4
1.2.2 Sıvı ortamda borlama 5
1.2.1.1 Normal sıvı borlama yöntemi 6
1.2.1.2.Elektroliz yöntemi 6
1.2.3 Gaz ortam borlaması 7
1.2.4 Pasta (macun) ile borlama 8
1.2.5 Borür tabakasının fiziksel ve kimyasal özellikleri 9
1.2.5.1 Tabaka kalınlığı 9
1.2.5.2 Sertlik 10
1.2.5.3 Aşınma 12
1.2.5.4 Artık gerilmeler 13
1.2.5.5 Korozyon direnci. 13
1.2.6 Borlanabilen metaller 14
1.3 Literatür Taraması 15
2. İYON (PLAZMA) BORLAMA **17**
2.1 Demir Esaslı Malzemelerin Borlanması 17
2.1.1 Demir-Bor ikili denge diyagramı 19
2.2 Borür Tabakası ve Geçiş Bölgesinin Oluşum Mekanizması 21
2.2.1 Borür tabakasının oluşumu, büyümesi ve geçiş bölgesi 21
2.2.2 Borür tabakası çeşitleri ve kalınlığı 23
2.2.3 Borlanabilir malzemeler ve metal borürler 24
2.2.3.1YMK yapıya sahip metaller için uygun çap hesaplanması 26
2.2.3.2 HMK yapıya sahip metaller için uygun çap hesaplanması 27
2.2.3.3 HSD kafes yapısına sahip metaller için uygun çap hesaplanması 28
2.3 Paslanmaz Çelik 310 ve 316L Metallerinin Özellikleri veKullanımAlanları 30

2.3.1 Paslanmaz çelik 310 metalinin özellikleri ve kullanım alanları 30
2.3.1.1 310 Paslanmaz çeliğin kullanım alanları 31
2.3.2 Paslanmaz çelik 316L metalinin özellikleri ve kullanım alanları..... 31
2.3.2.1 316L Paslanmaz çeliğin kullanım alanları..... 33
2.3.3 Malzemelerin plazma borlama ve nitrürlemeye uygunluğu 34
3. PLAZMA BORLAMA DENEYİ 35
3.1 Plazma Borlama Deney Sertlik Sonuçları 46
4. PLAZMA NİTRÜRLEME DENEYİ. 51
4.1 Plazma Nitrürleme Deney Sonuçları.....57
5. XRD ANALİZİ. 61
5.1 XRD Analizi İçin Uygun Açı belirlenmesi.....61
5.2 XRD Analiz Sonuçları.....62
6. DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI VE ÖNERİLER..... 65
6.1 Vakum Pompası Seçimi ve Kullanımı 65
6.2 Uygun Matrisli Metal Seçimi 66
6.3 Ark Oluşumunun İyileştirilmesi 66
6.4 Sıcaklık Ölçümünün İyileştirilmesi 67
6.5 Sızdırmazlık Özelliğinin Önemi ve Sonuçlara Etkisi 67
6.6 Sıcaklığın Deney Sonuçlarına Etkisi 68
6.7 Sürenin Deney Sonuçlarına Etkisi 69
6.8 Plazma Borlama ve Nitrürleme İçin Optimum Süre ve Sıcaklık..... 70
KAYNAKLAR..... 73
ÖZGEÇMİŞ..... 77

KISALTMALAR

A	**:** Anstron
a	**:** Kafes parametresi
Al	**:**Aluminyum
Al_2O_3	**:**Aluminyum oksit
Ar	**:** Argon
B	**:** Bor
BCl_3	**:**Bortriklorit
BN	**:**Bornitrür
B_2H_6	**:**Diboran
B_4C	**:**Borkarbür
C	**:** Karbon
Cr	**:** Krom
Cu	**:**Bakır
CVD	**:** Kimyasal buhar biriktirme
Fe	**:** Demir
FeB	**:** Demir Borür
HMK	**:** Hacim merkezli kübik kafes yapı
HSD	**:** Hekzagonal Sık Düzen HSD kafes yapı
HV	**:** Mikro sertlik birimi (Vickers)
Mo	**:**Molibden
N	**:** Azot
$Na_2B_4O_7$	**:**Susuz boraks
$Na_2B_4O_7$. 10H2O	**:**Boraksdekahidrat
$Na_2B_4O_7$. 5H2O	**:**Borakspentahidrat
Ni	**:**Nikel
PVD	**:**Fiziksel buhar biriktirme
R	**:** Atom yarıçapı
Si	**:**Silisyum
SiC	**:**Silisyumkarbür
Ti	**:**Titanyum
V	**:**Vanadyum
VC	**:**Vanadyumkarbür
YMK	**:** Yüzey Merkezli kübik kafes yapı
°C	**:** Derece

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 Katı ortam borlamasında kullanılan maddelerin bazı özellikleri..... 4
Çizelge 1.2 Sıvı ortam borlamasında kullanılan bor kaynakları ve özellikleri. 6
Çizelge 1.3 Gaz halindeki borlayıcı bileşikler ve özellikleri 7
Çizelge 1.4 Farklı malzemelerle oluşturulan bor tabakalarının özellikleri.....10
Çizelge 1.5 Borlama ile diğer yüzey sertleştirme işlemleri karşılaştırılması.....11
Çizelge 1.6 Bazı malzemelerin sürtünme katsayılarının karşılaştırılması.....12
Çizelge 1.7 Borür tabakası ve saf demire ait ısıl genleşme katsayıları 13
Çizelge 2.1 Demir borürlerin bazı fiziksel özellikleri 18
Çizelge 2.2 Teorik borür tabakası kalınlığı hesabı için yayınma katsayısı değerleri. 19
Çizelge 2.3 Plazma borlama ve nitrürleme prosesi için uygun metal tablosu 25
Çizelge 2.4 YMK yapıya sahip bazı metallerin kafes sabiteleri ve atom yarıçapları 27
Çizelge 2.5 HMK yapıya sahip bazı metallerin kafes sabitesi ve atom yarıçapları ...28
Çizelge 2.6 HSD yapıya sahip bazı metallerin kafes sabiteleri ve atom yarıçapları..29
Çizelge 3.1 Plazma borlama deney planı.....43
Çizelge 3.2 Borlanmamış 310 ve 316L paslanmaz çelik yüzey sertlik değerleri.....46
Çizelge 3.3 Borlanmış 310 ve 316L paslanmaz çelik yüzey sertlik değerleri 47
Çizelge 3.4 Borlanmış 310 paslanmaz çelik yüzey sertlik değerleri (2. Deney) 48
Çizelge 3.5 Borlanmış 310 paslanmaz çelik yüzey sertlik değerleri (2. Deney) 49
Çizelge 3.6 Borlanmış 316L paslanmaz çelik yüzey sertlik değerleri (2. Deney) 50
Çizelge 4.1 Plazma nitrürleme deney planı 55
Çizelge 4.2 Plazma nitrürleme deney sonuçları (2saat).....58
Çizelge 4.3 Plazma nitrürleme deney sonuçları (8saat).....58
Çizelge 4.4 316L Paslanmaz çelik plazma nitrürleme deney sonucu(2saat).....59
Çizelge 6.1 Deney sonuçları itibariyle en yüksek ulaşılabilen sertlik değerleri 69
Çizelge 6.2 Plazma nitrürleme sonrası sürenin sertliğe etkisi 70

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Isıl işlem yöntem ve çeşitleri....3
Şekil 1.2 : Katı borlama işleminin şematik gösterimi....5
Şekil 2.1 : Borlama sırasında borür tabakasının oluşum aşaması....19
Şekil 2.2 : Fe-B ikili denge diyagramı....20
Şekil 2.3 : Fe-B ikili denge diyagramı....20
Şekil 2.4 : Borür tabakasındaki diğer elementlerin yüzde ağırlık değişimleri....21
Şekil 2.5 : Fe_2B ve geçiş bölgesi kalınlığının borlama süresi ile değişimi....22
Şekil 2.6 : Borür tabakası çeşitleri....23
Şekil 2.7 : Yüzey merkezli kübik atom yapısı gösterimi....26
Şekil 2.8 : Hacim merkezli kübik atom yapısı gösterimi....27
Şekil 2.9 : Hekzagonal sıkı düzen atom yapısı gösterimi....28
Şekil 2.10 : 310 Paslanmaz çelik isim ve sınıflandırılması....30
Şekil 2.11 : 310 Paslanmaz çelik kimyasal bileşimi....30
Şekil 2.12 : 310 Paslanmaz çelik fiziksel özellikleri....30
Şekil 2.13 : 310 Paslanmaz çelik mekanik özellikleri....31
Şekil 2.14 : 310 Paslanmaz çelik imalat özellikleri....31
Şekil 2.15 : 316L Paslanmaz çelik isim ve sınıflandırılması....32
Şekil 2.16 : 316L Paslanmaz çelik kimyasal bileşimi....32
Şekil 2.17 : 316L Paslanmaz çelik fiziksel özellikleri....32
Şekil 2.18 : 316L Paslanmaz çelik mekanik özellikleri....33
Şekil 2.19 : 316L Paslanmaz çelik imalat özellikleri....33
Şekil 3.1 : 310 ve 316L Paslanmaz çelik deney numuneleri....35
Şekil 3.2 : Plazma borlama deney düzeneğinin şematik resmi....36
Şekil 3.3 : Plazma borlama deney odası....37
Şekil 3.4 : Deney odasının açılmış hali....38
Şekil 3.5 : Su soğutma sistemi....38
Şekil 3.6 : U Tipi civalı manometre....39
Şekil 3.7 : a. BF3 b. H2 c. Ar gazlarının bulunduğu tüpler....40
Şekil 3.8 : Gaz akış kontrol sistemi....41
Şekil 3.9 : Vakum pompası....41
Şekil 3.10 : Güç kaynağı....42
Şekil 3.11 : Plazma oluşumu....44
Şekil 3.12 : Alt rezistans açık durumda 750°C'de plazma oluşumu....44
Şekil 3.13 : Plazma borlanmış 310 ve 316L numuneleri....45
Şekil 4.1 : Plazma nitrürleme deney odası....52

Şekil 4.2 : Plazma nitrürleme deney odasına numunelerin yerleştirilmesi 53
Şekil 4.3 : U Tipi civalı manometre 53
Şekil 4.4 : Azot gazının bulunduğu tüp..... 54
Şekil 4.5 : Dijital göstergeli termometre 55
Şekil 4.6 : Plazma nitrürleme deneyi ark oluşumu 56
Şekil 4.7 : Plazma nitrürleme deneyi gaz debi kontrol ünitesi 57
Şekil 5.1 : Paslanmaz çelik plazma borlama XRD Grafiği 61
Şekil 5.2 : Paslanmaz çelik plazma nitrürleme XRD Grafiği 61
Şekil 5.3 : XRD grafiği (3 numaralı numune)..... 62
Şekil 5.4 : XRD grafiği (5 numaralı numune)..... 63

PASLANMAZ ÇELİK 310 VE 316 METALLERİNİN PLAZMA BORLAMA VE NİTRÜRLEME METODU İLE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu çalışmada paslanmaz çelik 310 ve 316 metallerinin farklı sıcaklık ve sürelerde plazma borlama ve plazma nitrürleme metodu ile yüzeye bor ve azot emdirilerek yüzey sertliğinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Borlama işlemi için iki farklı sıcaklık parametresi, nitrürleme işlemi için ise tek sıcaklık ve iki farklı süre ile deneyler yapılarak yüzey setliklerindeki değişim incelenmiştir. Yüzey sertleştirilmesi ile malzemenin mekanik özelliklerinin arttırılması ile kullanım alanlarının ve kullanım ömrünün arttırılması hedeflenmiştir. Plazma borlama işlemi için kullanılan iki farklı sıcaklık 650°C-750°C yapılmış ve süre olarak 2 saat borlama yapılmıştır. Nitrürleme işlemi için ise kullanılan sıcaklık 500°C alınmış, süre varyasyonları ise 2 saat ve 8 saat olarak deneyler yapılmış ve yüzey sertlik değişimleri incelenmiştir. Plazma borlama ve nitrürleme işlemi sonucunda yüzeyde cBN kristal yapı oluşturulmaya çalışılmış ve cBN elde edilmesi durumunda ulaşılan sertlik elmas sertliğine yakın değerlere ulaşılması beklenmiştir. Yapılan testler itibariyle elde edilen sertlik değerlerinde 2600HV seviyesinin üzreine çıkılmış ve sadece plazma borlama ve plazma nitrürleme prosesiyle elde edilebilecek sertlik değerlerinin daha üzerinde bir değer elde edilebileceği bu çalışma itibariyle ispatlanmıştır. Bu çalışma itibariyle yatırım maliyeti ve proses zorluğu sebebiyle sanayi uygulama aralığı çok dar olan bu prosesleri nispeten daha basit ve daha kısa sürelerde uygulanması ve yüksek sertlik değerleri elde edilebilmesi başarılmıştır. Bu çalışma itibariyle herhangi bir termokimyasal yüzey sertleştirme işlemi görmeyen numuneler ile plazma borlama ve plazma nitrürleme prosesi sırasıyla uygulanmak koşuluyla yüzey sertlik değerlerinde ilk duruma oranla 10 kat artış başarılmıştır.

IMPROVEMENT OF MECHANICAL BEHAVIOURS OF STAINLESS STEEL 310 AND 316 BY PLASMA BORIDING AND NITRIDING

SUMMARY

In this study, stainless steel 310 and 316 metals have been coated by plasma assited boriding and nitriding within dıiferent temparatures and times. For boriding process two different temperatures have been implemented and for nitriding process one temparature and two different timings have been implemented and surface hardnesses have been investigated with experiments. By improvement of surface hardness, mechanical behaviors of material have been improved and usage area and life of parts have been tried to improved. For plasma assisted boriding temperatures are 650°C and 750°C, experiment time is 2 hours for boriding, for nitriding process temperature is 500°C, time variants for experiments are 2hours and 8 hours. By plasma assisted boriding and nitriding process, cBN occurence at surface have been investigated for microhardness of 4000HV. With this thesis study; it has been proved that plasma boriding and nitriding proseses have a huge effect on the surface hardness. Those methods haven't been prefered due to high cost for investment. But with this study those investment cost can be reduced with low temperature and low timing for boriding and nitriding. Stainless steel 310 and 316L without any thermochemical surface hardening process surface hardnesses have been improved 10 times harder with the addition of plasma boriding and plasma nitriding processes to metals.

.

1. GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda kullanılan malzemelerin korozyon, sürtünme ve aşınma gibi tribolojik etkiler neticesinde azalan kullanım ömürlerinin arttırılması yüzey bölgesinin iyileştirilmesi ile mümkündür. Aşınma ve korozyondan dolayı dünya da her yıl önemli malzeme kayıplar olmaktadır. Ülkelerin korozyon nedeniyle kayıpları gayri safi milli hasılatlarının %3.5-5'i arasında değişmektedir. Yalnız Türkiye'deki 1991 yılı kaybı 4.5 milyar dolar olarak tahmin edilmektedir [1].

Bu çalışmada birçok sanayi uygulamalarında kullanılan 310 ve 316 paslanmaz çeliklerinin plazma(iyon) borürleme ve plazma nitrürlemesi yapılarak yüzey sertlik değerlerinde iyileşme değerleri incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Bor ve bileşiklerinden faydanılarak üretilen ürünlerde günlük hayatımızın hemen her alanında karşılaşmamız mümkündür. Temizlik sektöründe, ilaç sektöründe ve hemen hemen sanayinin her alanında kullanılmaktadır. En yaygın kullanım alanlarından biri de metal sektörüdür. En çok kullanılan tüketim alanları; cam yünü, diğer camlar yalıtım ürünleri, ateşe dayanıklı eşyalar, sabun ve deterjanlar, porselen, uçak ve otomotiv endüstrisi, tarım nükleer uygulamalar kozmetik, yüksek enerji yakıtları,elektrik aygıtları, elektro kaplama banyoları, boyalar ve birçok kimyasal uygulamalardır. En yüksek kullanım alanı ise metal sektörüdür. Bor saf şekilde metalurjik reaksiyonlarda bir oksijen giderici ve gaz giderici olarak kullanılır. Diğer bir önemli uygulaması ise seramiklerde kuvvetlendirici ve nükleer reaktörlerin konstrüksiyonunda yüksek yoğunluklu betona bir katkı maddesi olarak, uranyum-grafit pillerinde bir kontrol aracı olarak nötronları absorblama amaçlı kullanılmaktadır.

Borlama işlemi, demir esaslı malzemelere, demir dışı malzemelere ve toz metalurjisi ile üretilen malzemelere çok geniş bir alanda uygulanabilen bir termo-kimyasal yüzey sertleştirme işlemidir.

Borlama işlemi uzun bir geçmişe sahiptir. Çeliklerde bor yayınımıyla yüzey sertleştirme, ilk kez 1895 yılında Moissan tarafından yapılmıştır. 1970'li yıllardan

itibaren borlama konusunda çalışmalar hızlanmıştır. Günümüzde borlama, teknolojik olarak gelişmiş ve endüstride, özellikle alternatif bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Almanya'da katı ortamda borlama, Rusya'da ise sıvı ortamda borlama bir çok endüstriyel alanda başarıyla kullanılmaktadır.

Borlama işlemi ile, yüzeyde bor ve demir atomlarının sıcaklığının etkisi ile kimyasal bileşik oluşturarak yüzeyde FeB ve Fe2B tabakalarının birinin veya her ikisinin aynı anda oluşması sağlanır. Oluşan tabakalar malzemeye direnç ile birlikte korozyon ve aşınmaya karşı yüzeyde yaklaşık 2100 Vickers değerinde sertlik kazandırmaktır.

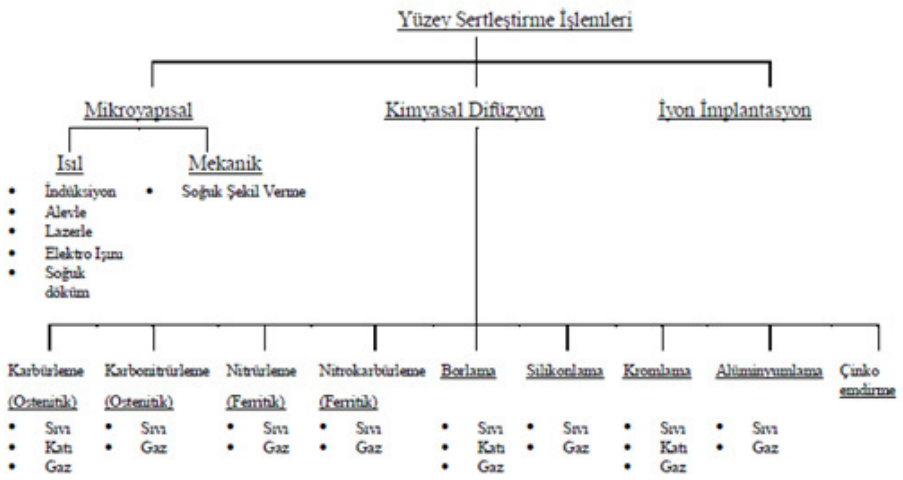
1.1 Borlamanın Isıl İşlemler İçindeki Yeri

Isıl işlem; metal ile malzemelerde katı halde sıcaklık değişmeleri ile bir Ya da birbirine bağlı birkaç işlemle, amaca uygun olarak malzemenin özelliklerini değiştirme işlemi olarak tanımlanır. Isıl işlem prosesi, parçaların belli bir sıcaklığa kadar ısıtılması, bu sıcaklıkta uygun bir süre bekletilmesi ve belirli bir programa uygun olarak malzeme sıcaklığınınoda sıcaklığına düşürülmesi şeklinde üç kademe olarak gerçekleşir.

Özellikle ihtiyaçlar ve gelişen teknolojinin sunmuş olduğu imkanlar sayesinde çok değişik ısıl işlem yöntemleri ortaya çıkmıştır. Örneğin malzemenin bütününün kimyasal bileşimini değiştirmek mümkün olduğu gibi, sadece yüzeyinin kimyasal bileşimini değiştirmek te mümkündür. Malzeme yüzeyinin sert ve aşınmaya dayanıklı, buna karşılık iç yapısının sünek olması arzu edildiğinde sadece yüzeyinin sertleştirilmesi yöntemine başvurulur. Bunun iin, yüzeyde belli bir derinlik seviyesine kadar sertleşme ve iyileştirme sağlayan yöntemler geliştirilmiştir. Kimyasal-ısıl işlemler adı verilen sementasyon, nitrürasyon, karbonitrürasyon, metal olan Ya da olmayan elementlerin Ya da bileşiklerin difüzyonu gibi yöntemlerle malzemenin iç yapısına bir değişim olmadığı takdirde yüzeyin istenilen seviyede sertliğini oluşturabilmek mümkündür. Şekil 1.1'de ısıl işlem yöntemleri gösterilmiştir.

Malzeme yüzeyinin srtleştirilmesinde; yüzeye karbon verilerek sertleştirme yapılabilir. Bu metoda sementasyon ile yüzey sertleştirmede denilir. Yüzeye sertlik arttırmak maksadıyla sertlik arttırıcı özellikleri bulunan element atomları nüfuz ettirilebilir. Bu metodlar genel olarak nitrürleme, borlama gibi metodlar olarak

bilinir. Ayrıca; iyi sertleştirme kabiliyeti olan çeliklerin yüzeyinde, arzu edilen sertleşme derinliğine kadar olan kısmı ostenirleşme sıcaklığüına kadar ısıtılarak ve ardından ani soğutma Ya da su verdirilerek bu bölgenin sertleştirilmesi diğer bir sertlik arttırma metodudur. Bu metodlara da alevle Ya da indüksiyonla yüzey sertleştirilme denir. Bu yöntemlerin dışında yüzeye çelik bilyalar püskürtülerek, özel haddeleme yöntemleri uygulanarak soğuk şekil değiştirme ile, kaynakla, püskürtme Ya da galvanik kaplama(kromlama) yöntemleriyle yüzeyde sert bir tabaka oluşturmak ta mümkündür.



Şekil 1.1: Isıl işlem yöntem ve çeşitleri

1.2 Borlama İşlemi İle Yüzey Sertleştirme

Borlama termokimyasal bir yüzey sertleştirme yöntemi olup, esas olarak metal yüzeyine bor atomu difüzyonu olarak tanımlanabilir. Borlama teknik olarak oldukça geliştirilmiştir. Bor atomları ısı enerjisi ile metal yüzeyinee yayınırlar ve esas metal atomlarıyla uygun borürler oluştururlar. Aynı zamanda yaygın yaygın şekilde sert ve aşınma direnci fazla tabakalar elde etmede kullanılmıştır. Bu işlem bor atomlarının metalik malzemelerin yüzeyinden içeriye doğru difüzyonu difüzyonu ile olmaktadır. İnce tabakalı Fe borür (Fe2B) fazı özellikle endüstriyel uygulamalar için istenmekedir.

Borlama ortamı, bor kaynağı (amorf bor, B4C, Na2B4O7,B2H6;...), aktivatör olarak (KBF4, NH4F,...), dolgu ve deoksidant olarak ise (SiC, Al2O3) oluşur. Aktivatörler borür tabakasının düzenli gelişmesine etki ederler. Dolgu malzemesi ve deoksidantlar ise borlama esnasında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam oluştururlar ve borlama malzemesinin ana malzemeye yapışmasını önlerler. Borlama işlemi esnasında kullanılan yöntem, borlama malzemesinin bileşimi, borlanacak malzeme cinsi, işlem süresi ve işlem sıcaklığı elde edilen tabakaya etki eden faktörlerdir. Genel olarak çelik borlama ortamında 850-1000 ^{o}C sıcaklığında 2-8 saat aralığında bekletilerek borlama gerçekleştirilir. Borlama dört ana grupta incelenir; katı sıvı, gaz ve pasta halinde bor verici macun ile yapılan borlama ortamlarıdır.

1.2.1 Katı ortamda borlama

Borlama işlemi yapılacak parça, toz halindeki bor verici ortam içinde genellikle 900-1000 ^{o}C sıcaklıkta 4-10 saat süreyle bekletilerek borlama işlemi gerçekleştirilir. Bu tür kutu sementasyona benzeyen bu yöntem, soy gaz atmosferinde yapılabileceği gibi sıkı kapatılmış kutularda olmak şartıyla normal atmosferdede yapılabilir. Borlanacak yüzeylerin etrafında elde edilmek istenen borür tabakasının özelliklerine göre tozların tane büyüklükleri 5-10 micrometre olmalıdır.

Borlama ortamının ana bileşeni bor karbür (B_4C), amorf bor ve ferro-bor olup bunların fiziksel özellikleri Tablo 1.1'de verilmiştir. B_4C diğerlerine göre ucuz olması sebebiyle daha fazla tercih edilir.

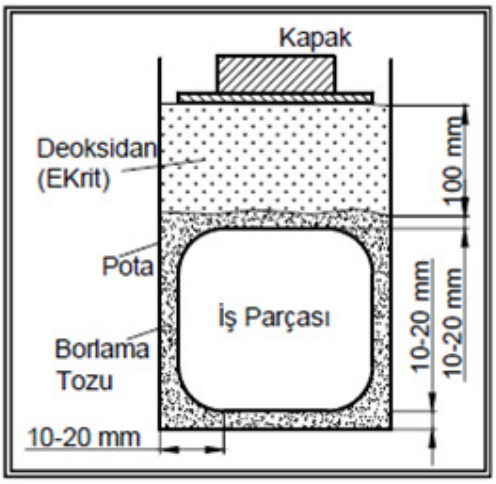
Ana borlayıcı kaynağa ilave olarak NH_4Cl, BaF, $NaBF_4$, NH_4F, Na_2CO3, KBF4 ve $NaAlF_6$ gibi aktivatörler kullanılır.

Çizelge 1.1: Katı ortam borlamasında kullanılan maddelerin bazı özellikleri[2]

Malzeme	**Molekül Ağırlığı**	**Teorik Bor Miktarı (%)**	**Ergime Sıcaklığı(^{o}C)**
Amorf Bor	10,82	95-97	2050
Ferro-Bor	-	17-19	-
Bor karbür	55.29	77.28	2450

Borlama işlemi sonucu oluşan Fe_2B ve FeB fazları arasındaki ısıl genleşme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlamalar meydana gelir. Bu durum bazı endüstriyel uygulamalar için borlamayı kabul edilemez duruma getirir. Bu olumsuz etkiyi yok

etmnin yolu oluşan fazlardan birini azaltmak Ya da tamamen ortadan kaldırmaktır. Bu faz FeB fazıdır. Katı ortam borlamasının kullanılması sonucu mümkün hale getirmiştir. H.P.Kehler tarafından bor kaynağı olarak B_4C, aktivatör olarak KBF_4, deoksidant olarak ise SiC kullanılmıştır. Bu sayede tek fazlı (Fe_2B) borür tabakalar ya da FeB oranının önemli ölçüde azaldığı tabakalar elde edilmiştir [3].



Şekil 1.2 : Katı borlama işleminin şematik gösterimi[23]

Katı borlamanın avantajları genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Sistem maliyeti diğer metodlara oranla daha uygundur
- Özel teknik gerekitmez
- Kolay elde edilebilir.
- Toz terkibi değişirilebilir.
- Minimum ekipman ve düşük maliyet olarak sıralanabilir.

Dezavantaj olarak ise bor dağılımın her yerde homojen olmaması gösterilebilir. Her yerde homojen olmayan dağılım sertlik ve davranış olarak farklılık göstermesine sebep olur [4].

1.2.2 Sıvı ortamda borlama

Bor verici ortam sıvıdır. Borlanacak malzeme, 800 – 1000 oC sıcaklıktaki bu ortamda 2 – 6 saat bekletilerek bor yayınımı gerçekleştirilir. Banyonun esas bileşenleri ve özelikleri Çizelge 1.2'de verilmiştir.

Sıvı ortama elektrik akımı (elektroliz) uygulanarak da borlama işlemi yapılabilir. Buna göre sıvı ortamdaki borlama "elektroliz" ve "normal sıvı ortam borlaması" olmak üzere ikiye ayrılır.

Çizelge 1.2: Sıvı ortam borlamasında kullanılan ana bor kaynakları ve özellikleri

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı	Teorik Bor Miktarı(%)	Ergime Sıcaklığı
Boraks	$Na_2B_4O_7.10H_20$	381,42	11,35	-
Susuz Boraks	$Na_2B_4O_7$	201,26	21,5	741
Meta bor asidi	HBO_2	43,83	24,69	-
Sodyum Bor Florid	$NaBF_4$	109,81	9,85	-
Borik oksit	B_2O_3	69,64	31,07	450
Bor karbür	B_4C	55,29	78,28	2450

1.2.2.1 Normal sıvı borlama yöntemi

Ortamın esas bileşeni borakstır. Aktivatör olarak B4C, SiC, Zr, B kullanılır. Çalışma sıcaklığı 800 – 1000^oC ve borlama süresi 2 – 6 saattir.

1.2.2.2 Elektroliz yöntemi

İşlem yüksek sıcaklıkta tuz banyosu olarak elektrolit kullanılıp yapılan bir elektroliz uygulamasına benzer. Katot olarak iş parçası, anot olarak grafit kullanılır. Akım yoğunluğu 0.2 – 0.7 A/cm^2, gerilim 2-14 volt olarak uygulanır. İşlem 800-1000^oC sıcaklıkta 0.5-5 saat süreyle yapılır.

Elektrolitin ana bileşeni boraks ve borik asittir. Borik aside NaF, NaCl, NAH+ B_20_3;

B_2O_3+Na_2CO_3; Na_2PO_4, Na_2SO_4, NaOH; B_4C+NaCl; B_2O_3+MF, B_2O_3+MOH, B_2O_3+M_2CO_3 (M=Li, Na, K) gibi aktivatörler ilave edilir. Bu aktivatörlerden ayrıca banyonun akışkanlığını arttırması istenir.

Genel olarak her iki yöntemin (normal sıvı , elektroliz) avantajlarını ve dezavantajları aşağıdaki gibi listelenebilir.

Avantajlar;

- Maliyeti düşük bir prosestir.
- Fazla ihtisas gerektirmez,kolay uygulanabilen bir metoddur.

Dezavantajları;

- Yüksek viskositeli erimiş boraksta 850°C nin altında borlama yapmak kesinlikle imkansızdır. Bu sıcaklığın üzerinde bile bor banyosu içerisindeki sıcaklığın eşit dağılımına ulaşmak çok zordur.
- Özellikle kompleks parçalarda bu farklı yoğunluk akımları bor tabakasının farklı kalınlıklarda olmasına neden olmaktadır.
- Sıkı bir şekilde yapışmış tuz tabakası iş parçaları üzerinde oluşur ve bu oluşan tabakaların borlama işlemi tamamlandıktan sonra uzaklaştırılması maliyet anlamında dezavantaj getirir
- Büyük boyutlu ve kompleks parçalara uygulanmaz.
- Tesisatı pahalıdır. Özellikle elektroliz metodunda.

1.2.3 Gaz ortam borlaması

Çizelge 1.3: Gaz halindeki borlayıcı bileşikler ve özellikleri

Malzeme	Formül	Molekül Ağırlığı	Teorik Bor Miktarı	Donma Noktası(oC)
Bor triflorid	BF_3	67.82	15.95	-128.8
Bor triklorid	BCl_3	117.9	9,23	-107.3
Bor trimbromid	BBr_3	250.57	4,32	-46
Di - boron	B_2H_6	26,69	39,08	-165,5
Bor trimetil	$(C_2H_3)_3B$	55,92	19,35	-161,5
Bor trietil	$(C_2H_5)_3B$	98,01	11,04	-94

Gaz ortam borlamasında kullanılan maddelerin çoğu oldukça hassastır. Bunlar; BF_3, BCl_3, B_2H_6, $(C_2H_3)_3B$'dir. Bunlardan di boran (B_2H_6), H_2 ile beraber uygulandığında çok olumlu sonuçlar alınabilmektedir. Tablo 1.3'te gaz halindeki borlayıcı bileşikler ve bazı özellikleri verilmiştir.

Gaz ortamında borlamın avantajları ve dezavantajları aşağıda listelenmiştir;

Avantajları;

- Gaz sirkülasyonunun bir sonucu olarak borun daha iyi yayılması
- Katı borlama işlemine göre gelişmiş sıcaklık kararlığı ve elde etme kolaylığı
- Homojen kaplama avantajı
- Parça boyutunun önemli olmaması, tank kapasitesi boyunca parça işlenebilmesi

Dezavantajları;

- Trimetil bor ise borlama ile birlikte C yayınımına neden olarak tabaka kalitesini bozar
- Tesisatı pahalıdır.
- Kullanılan gazlar zehirlidir
- Patlama tehlikesi vardır.

Dezavantajları gaz ile borlama prosesinin kullanım alanlarını sınırlamaktadır fakat diğer metodlara oranla daha homojen bir kaplama elde edilebilmesiönemli avantajlarından biridir. Gelişen teknoloji ile birlikte daha fazla kullanım alanı bulmasının sebebi de aynı şekilde diğer borlama metodlarına oranla daha iyi bir kaplama yüzeyi elde edilebilmesidir.

1.2.4 Pasta (Macun) ile kaplama

Katı ortam borlama yönteminde kullanılan tozların macun halde kullanıldığı borlama yöntemine verilen isimdir. Bu yöntemin en büyük avantajlarından biri kısmi borlama yapılabilmesidir.

Macun şeklindeki borlayıcı madde sertleştirilmek ve özellikleri iyileştirilmek istenen yüzeye 2-5mm kalınlık aralığında sürülür ve fırınlamadan önce kuruması sağlanır. Kurutma işleminden sonra macunlanmış parçalar fırına konur ve uygun sıcaklıkta borlama işlemi yapılır[5]. Bu yöntemle borlamanın mutlaka koruyucu gaz otamında yapılması gereki. Toz borlamaya göre işlem süresi oldukça kısadır [6].

Borlama işleminden sonra numune üzerine macunun yapışmasınbu yöntemin önemli sakıncasıdır. Bu etkiyi azaltmak için Konopelski ve Dibko tarafından sulu sodyum

silikat çözeltisi önerilmiştir. Ayrıca organik karakterli çeşitli çözeltiler ve %3 polivinil alkol ya da %0.5 metil selüloz içeren sulu çözeltilerde sözü edilen zorluğu azaltırlar [3].

1.2.5 Borür tabakasının fiziksel ve kimyasal özellikleri

1.2.5.1 Tabaka kalınlığı

Borlanan malzemenin cinsi, borlayıcı ortamın bileşimi işlem şekli, sıcaklık ve süre borür tabakasının kalınlığına etki eden faktörlerdir. Teorik olarak tabaka kalınlığı sınırsızdır ancak işlem sıcaklığının ve süresinin artması ile mümkündür. İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramında öteklik sıcaklığın (1149°C) altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda bölgesel erimeler meydana gelerek malzeme yüzeyini bozabilir [2].

Borlama sonucunda yüzeyde oluşan bor tabakası diş formunda oluşmaktadır. Oluşan bu tabaka yüzeyin kimyasal yapısının sıcaklığının etkisi ile değişmesi sonucu meydana gelmektedir. Yüzeyde FeB ve Fe2B kimyasal yapısına sahip dişli tabaka oluşmaktadır. Bazen FeB bazen Fe2B, bazende her iki tabaka birlikte oluşur. FeB fazı Fe2B fazından daha sert ve daha gevrektir.

Tabaka kalınlığını sınırlayan bir diğer faktörde kırılganlıktır. Tabaka kalınlığı arttıkça kırılganlığı da artacağı için özellikle çift fazlı tabakalarda kalınlığın fazla olmaması gerekir [7].

Çeliklerdeki alaşım elementi ve karbon miktarının artması ile bor difüzyonu azalmaktadır. Bunun sonucu olarak borür tabakasının hem kalınlığı azalmakta, hem de diş şeklindeki yapısı düzleşmektedir [2].

Çelik esaslı malzemeler için kullanım şartlarına göre 20-200 mikrometre seviyesinde tabaka kalınlığı uygundur. Kırılganlık yönünden alaşımlı çeliklerde 100 mikrometre, alaşımsız çeliklerde 200 mikrometre kalınlığa, hatta darbesiz aşınmaya maruz parçalarda su vermemek kaydıyla 400 mikrometre kalınlığa çıkılabilmektedir. Borlama sıcaklığının artması tabaka kalınlığını arttırmsına ilaveten poroziteyi de arttırarak tabakanın gevrekleşmesine ve kırılganlaşmasına yol açar [8]. Tabaka kalınlığı sertlik için en önemli faktördür, literatürce tabaka kalınlığı malzeme byunca olabilir fakat bu işlemi yapabilmek için proses sürelerinin uzatılması gerekmektedir. Bu da prosesi maliyetli bir hale getirmektedir. Maliyet arttırmamak için optimum

kalınlık elde edilmeye çalışılmaktadır. Yüzey sertliği, aşınma ve korozyon direnci gibi yüzey mekanik özelliklerini iyileştirmek için kaliteli bir yüzey ve optimum tabaka kalınlığı hedeflenir.

1.2.5.2 Sertlik

Borlu tabakanın özelliklerine ait çalışmalar daha çok sertlik, aşınma ve korozyon özellikleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Borlamanın en büyük etkisi sertlik üzerine olup, ana malzeme cinsine ve yüzeyde oluşacak FeB ve Fe_2B fazlarına bağlıdır. FeB fazı, Fe_2B fazından daha sert ve gevrektir. Borlama ile elde edilen sertlik; karbon çeliklerinde 1800-2000 HV, alaşımlı çeliklerde 2500-2800HV , titanyumda ise 3000HV civarındadır [9].

Çizelge 1.4: Farklı malzemelerle oluşturulan bor tabakalarının sertlikleri ve erime noktaları [10]

Malzeme	Oluşan Bileşik	Sertlik (HV)	Ergime Noktası
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe_2B	1800-2000	1390
Co	CoB	1850	1390
	Co_2B	1500-1600	1390
	Co_3B	700-800	1390
Co- 27.5Cr	CoB	2200	1390
	Co_2B	1550	1390
	Co_4B	700-800	1390
Ni	Ni_4B_3	1600	1390
	Ni_2B	1500	1390
	Ni_3B	900	1390
Mo	Mo_2B	1660	2000
	MoB_2	2330	2100
	Mo_2B_4	2400-2700	2100
W	W_2B_5	2600	2300
Ti	TiB TiB_2	2500 3370	1900 2980
Zr	ZrB_2	2250	3040
Re	ReB	2700-2900	2100

Sertlik bakımından borlu tabakanın en önemli bir başka özelliği de daha sonraki ısıl işlemlerde 900°C'e kadar bu sertliğini korumasıdır.

Borlama işlemi sonunda oluşan tabakaların özellikleri ana malzeme içindeki alaşım elementlerine bağlı olarak değişmektedir. Çizelge 1.4'te farklı malzemelerle oluşturulabilecek bor tabakalarının özellikleri verilmiştir.

Borlanmış çelikler ile diğer yöntemlerle sertleştirilmiş malzemelerin sertlik karşılaştırılmaları Çizelge 1.5'te görülmektedir.

Çizelge 1.5: Borlama ile diğer yüzey sertleştirme işlemleri sonucunda oluşan sertlik değerleri [10]

Malzeme	**Mikrosertlik (HV)**
Borlanmış Yumuşak Çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp Çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 Çeliği	1900
Se Verilmiş Çelik	900
Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş H13 kalıp Çeliği	540-600
Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş A2 Kalıp Çeliği	630-700
Yüksek hız çaliği (HSS) BM42	900-910
Nitrürlenmiş Çelik	650-1700
Karbürlenmiş Düşük Alaşım Çeliği	650-950
Sert krom Kaplama	1000-1200
Sinterlenmiş karbürler, WC+Co	1160-1820
Al_2O_3+ZrO_2 Seramik	1483
Al_2O_3+TiC+ZrO_2 Seramik	1738
Sialon Seramik	1569
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B_4C	5000
Elmas	>10000

Çizelge 1.5 incelendiğinde, borlanmış çeliklerde elde edilen yüzey sertlikleri, diğer yöntemlerle kıyaslandığında oldukça yüksek yüzey sertliği değerleri elde edildiği görülmektedir.

Sertlik ölçümleri mikrosertlik yöntemi ile vickers Ya da knoop uçları kullanılarak yapılır[12]. Ölçümlerde büyük yüklerin kullanılması çatlama ve dökülme gibi nedenlerden dolayı hatalı sonuçlara neden olur. Ayrıca büyük yükler tabakanın bozulmasına ve tabakanın altındaki bölgenin deformasyonuna neden olabilir. Genel olarak 50-100 gr'lık yüklerle ölçümler yapılır [13].

1.2.5.3 Aşınma

Sürtünme kaysayısı ve aşınma dayanımı bir sistem özelliği olmakla beraber, genellikle yüksek aşınma direnci için malzemenin daha sert ve sürtünme katsayısının mümkün olduğu kadar düşük olması istenir ki borlama ile bu özellikler büyük ölçüde sağlanır. (Çizelge 1.6) Borlanmış yüzeylerde teflona yakın bir sürtünme katsayısı elde edilebilir.

Çizelge 1.6: Bazı malzemelerin sürtünme katsayılarının karşılaştırılması[2]

	Sürtünme Katsayısı	
Malzeme	**Borlanmış**	**Borlanmamış**
Düşük karbonlu çelik	0.17 – 0.19	0.585 – 0.595
Takım çeliği	0.07 – 0.04	0.16 – 0.18

Darbesiz yüklemenin söz konusu olduğu derin çekme kalıpları, dişli çarklar, tekstil makinelerinde kullanılan yönlendirme tamburları, abraziv aşınmaya maruz kalan çuval doldurma nozulları, plastik enjeksiyon makinelerinin helezonları gibi makine parçalarında borlanmış yüzeylerin diğer işlemlerle elde edilenden çok yüksek aşınma direncine sahip oldukları belirlenmiştir.

Ancak bu yöntem, özellikle doğru tribolojik sistem seçimleri yapılmadığı takdirde veya seçilen sistemde beklenen fonksiyona uygun borlama işlemi veya uygun ek ısıl işlemler yapılmadığı takdirde sementasyon ve nitrürasyon işlemlerinden daha kötü sonuçlar verebilir [2].

Paslanmaz çelik için derin çekme kalıbı 60 HRC sertlik ve yüzeyi 0.005 – 0.008 mm sert kromla kaplı AISI A6 çeliğinden yapıldığında tahrip olmadan 2000 parça, aynı çelik yüzeyi borlandığı zaman ise 5000 parça ürettiği belirtilmektedir. Başka araştırmacılar düşük karbonlu çeliklerin derin çekme işleminde kullanılan borlanmış kalıpların ömürlerinin, borlanmamış kalıplardan 85 defa daha fazla olduğunu ileri sürmüşlerdir [2].

Borun oksijene afinitesi daha fazla olduğundan yüzeyde koruyucu ince bir oksit filmi oluşturmakta, bu oksit filmi yüzey yağlayıcı vazifesi görerek, sürtünmeli aşınma esnasında sürtünme katsayısını düşürürken, yüzeylerin birbirine kaynamasını önler. Kaymalı sürünmelerde açığa çıkan ısı, semente edilmiş tabakanın yumuşamasına neden olurken, borlu tabakaya etki etmez.

1.2.5.4 Artık gerilmeler

Metallerde borlama işlemi sonrası borür tabakasında ve borür tabakası – ana metal arasında artık gerilmeler oluşur. Malzemenin kimyasal bileşimi, borlama şartları ve uygulanan ısıl işlemler artık gerilmelere etki eden faktörlerdir. Tabakanın faz yapısı (tek fazlı ya da çift fazlı) ve geometrisi de (düz veya girintili çıkıntılı) artık gerilmelerin oluşumuna etki eder [2]. İdeal bir tabaka için tek fazlı ve tabaka geometrisinin dış formunda olması istenir.

Artık gerilmeler, FeB, Fe2B ve ana malzemenin ısıl genleşme katsayısının farklı olmasından kaynaklanır. Çizelge 1.7'de borür tabakası ve saf demire ait ısıl genleşme katsayıları verilmektedir.

Çizelge 1.7: Borür tabakası ve saf demire ait ısıl genleşme katsayıları[14]

Malzeme	Isıl Genleşme Katsayısı
Saf demir	$15.6 \times 10^{-6}\ {}^{o}C^{-1}$
FeB	$23 \times 10^{-6}\ {}^{o}C^{-1}$
Fe2B	$7.85 \times 10^{-6}\ {}^{o}C^{-1}$

Çift fazlı borür tabakalarında borlama sonrası Fe2B'de basma, FeB'de artık çekme gerilmeleri oluşur. Bu gerilmeler, tabakanın çatlamasına ve FeB fazının pullanarak dökülmesine neden olur. Tek fazlı ve çift fazlı tabakalardaki artık gerilme dağılımı Şekil 1.2'te görülmektedir.

Borlamadan sonraki uygulanan ısıl işlemlerde artık gerilmelere etki etmektedir. Soğuma hızı arttıkça artık gerilmeler azalmakta ve en yüksek artık gerilmeler borlamadan sonra fırında soğutma şartlarında gerçekleşmektedir [15].

1.2.5.5 Korozyon direnci

Borür tabakasının suya ve atmosfere karşı korozyon direncinin düşük olmasına karşılık, bazı asitlere ve sıvı metallere karşı iyi bir direnç gösterir. Özellikle HCL,

H_2SO_4, ve H_3PO_4 gibi asitlerle aluminyum, kurşun ve çinko gibi metallerin sıvı banyosunda borlu malzemelerin korozyon direnci çok yüksektir[12]. Yüksek kromlu çeliklerde borlama ile koruyucu olan krom borür meydana gelir. Bu bakımdan yüksek alaşımlı malzemelerin borlanmassıyla daha iyi korozyon özelliği her zaman elde edilemeyebilir [2].

1.2.6 Borlanabilen malzemeler

Bütün demir-karbon esaslı malzemeler, örneğin yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, ıslah çelikleri, takım çelikleri, çelik döküm, gri dökme demir dışında gerekse toz gerekse diğer yöntemlerle üretilen bütün ferro alaşımlara uygulabilmektedir. Refrakter metaller (W;Ta,Mo, Zr, Hf, Nb), karbürler (özellikle Co ile bağlı WC) ve Ni alaşımlara başarılı şekilde uygulanarak özel yapıda borlu tabakalar elde edilebilmektedir. Ti ve Ti esaslı alaşımlara bor yayınımı ile aşınmaya dayanıklı TiB_2 tabakası elde edilebilmektedir[11]. Titanyum ve titanyum alaşımlarının borlanması 1000-1200 ^oC arasındaki sıcaklıklarda yapılmalıdır. Titanyum ve refrakter metaller üzerine oluşan borür tabakasının sertlik değeri nikel ve kobalt üzerine oluşan tabakaya göre çok yüksektir[10].

Borlama yeni geliştirilen yöntemlerle Cu ve alaşımlarına da uygulanabilmektedir. Fakat düşük ergime sıcaklığına sahip Zn ve Al'a uygulanmamaktadır [2]. Bahsedilen malzemenin borlama işlemleri demir esaslı malzemelerin borlamasından farklı değildir [2].

Genel olarak borlama işleminin avantajlarını aşağıdaki şekilde sıralamak mümkündür[2];

- Özellikle nitrürleme iile kıyaslandığında borlanmış tabakaların sertliği yüksek sıcaklıklara korumaktadır.
- Bu yöntem çok geniş bir aralıktaki çelikler için uygulanabilir.
- Borlanmış yüzeyler 850 °C'ye kadar oksitlenme direncine sahiptir.
- Borlanmış malzemeler, oksitlenme ve korozyon ortamı altında yüksek yorulma dayanımı ve servis ömrüne sahiptir.

Dezavantajları ise[2];

- Gaz karbürleme ve plazma nitrürleme ile kıyaslandığında, esnek olmaması ve

yoğun işçilik gerektirmesi bu yöntemin daha pahalı olduğunu ortaya çıkarmaktadır.

- Borlama sonucu oluşan hacimsel büyüme, tabaka kalınlığının yüzde 5 ile 25 arasında değişmektedir. Bu büyümenin değeri temel malzeme kompozisyonuna bağlıdır ve belirli bir malzeme kombinasyonu ve yüzey sertleştirme işlemi için sabit kalmaktadır.
- Borlanmış malzeme yüzeyinden hassas işleme gerektiğinde, bu sadece elmas lepleme ile yapılabilmekte, çünkü konvansiyonel taşlama yöntemleri borlanmış tabakaların çatlamasına yol açabilmektedir.
- Çoğu çeliğin borlamasında korozyon-yorulma dayanımında artma gözlemlenmesine rağmen, eğilme-yorulma dayanımında çok az bir yükselme sağlanmaktadr.
- Genel olarak borlanmış çelik alaşımlarının karbürlenmiş ve nitrürlenmiş çeliklere göre dönmeye çalışan ve noktasal yorulmaya çalışan parçaların dayanımlarının çok düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple dişlilerin ve vidaların borlanması olduça sınırlıdır.
- Çoğunlukla borlamadan sonra borlanmış tabakaların bütünlüğünü korumak için takımları temperlemek ve sertleştirmek gerekebilir.

1.3 Literatür Taraması

Yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirmek suretiyle yapılan yüzey sertleştirme işlemleri, katı, sıvı veya gaz fazında bulunan elementlerin yüksek sıcaklıkta malzeme yüzeyine yayındırılması esasına dayanır. Budinski [16], yayınma işlemlerini değişik açılardan karşılaştırmıştır. Borlama işlemi sonucunda, nitrürleme ve karbürleme gibi klasik yayınma işlemlerine göre oldukça yüksek yüzey sertliklerine ulaşmıştır. Ancak borlama işlemi, nitrürlemeye göre oldukça yüksek bir sıcaklıkta gerçekleşmektedir.

Bindal[17], borlama süresi ve krom miktarına bağlı olarak, krom borürler tesbit etmiştir. Ve kromun çok fazla olmasa bile, kırılma tokluğunu düşürdüğünü belirlemiştir.

Hunger[18], değişik sıcaklıklarda yaptığı aşınma testleri sonucunda, orlanmış

yüzeylerin özellikle yüksek sıcaklıklarda, karbürlenmiş ve nitrürlenmiş yüzeylerden çok daha iyi aşınma dayanımı gösterdiğini belirlemiştir.

Genel[19], AISI W1 çeliğini 1-8 saat aralığında Ekabor-I bileşikleri kullanarak borlama işlemine tabi tutmuşlar ve yüzey sertliklerini ölçmüşlerdir. Sonuç olarak borlanmamış çeliklerde yüzey sertliği 260HV olmasına karşılık borlanmış AISI W1 çeliğinde 1690-1800 HV olduğu görülmüştür. Ayrıca bor tabakasının sertliği 950°C'ye kadar borlama sıcaklığına bağlı olarak azalan oranda artmaktadır. Bu sıcaklığın proses zamanı 6 saati geçmediği durumda optimum sıcaklık olduğuda belirtilmiştir. Ayrıca tabaka kalınlığı proses zamanı ve sıcaklığına bağlı olarak belirlenmek üzere ampirik formül elde edilmiştir.

K.S. Nam ve diğ.[20], düşük karbonlu çeliklerde plazma borlamanın etkilerini incelemişler ve borlanmış tabaka oluşum hızının ve sertliğin klasik borlamaya göre daha düşük olduğunu belirtmişler.

P.J. Wilbur[21], iyon borlanmış demir disklerin karakteristiklerini incelemişler ve 900 °C oluşan alfa-demir matrisindeki Fe2B bileşiklerinin aşınmaya en dayanıklı yüzeyleri oluşturduğunu belirlemişlerdir.

R. Iakovou ve diğ.[22], takım çeliklerini plazma aktarımlı ark yöntemi ile borlamışlar ve bu yöntemin aşınma dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak bu yöntemin 1.5mm kalınlığında ve 1000-1300HV sertliğinde uniform alaşımlanmış tabakalar oluşturulması için kolay ve etkili bir yöntem olduğunu belirlemişlerdir. Borlanmış tabakaların mikroyapılarına bakıldığüında Fe_2B tabakası, borid ve martenzitin ötektik karışımından oluştuğu gözlenmiştir. Ötektik bölgede bazı çatlaklar görülmesine rağmen bunun kaplamanın adezyon aşınmasına karşı direncin çok üzerinde çok etkili olmadığı görmüşlerdir. Aşınma testi için kullanılan disk üzerindeki pimin aşınma oranı uygulanan yüke bağlı olarak değişmekle beraber kayma hızından hemen hemen bağımsız olduğu görülmüştür. Aşınma oranının 0.13 ila 0.23 arasında değişen sürtünme katsayısına, sürtünme katsayısınında bor ve oksit tabakasına bağlı olduğu görülmüştür.

2. İYON (PLAZMA) BORLAMA

Birinci bölümde borlama ile ilgili değişik yöntemler kısaca tanıtılmıştır. Bu bölümde ise bu çalışma kapsamında borlama yöntemi olarak kullanılan plazma (iyon) borlama yöntemi daha geniş olarak incelenmiştir.

Termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinde iş parçaları yüzeylerinin; sert, aşınmaya ve yüzey basıncına dayanıklı, iç kısmının ise tok olması istenir. Bunu sağlamak için yüzey sertleştirme işlemi yapılır. Yüzeyin bileşimini değiştirerek yapılan işleme termokimyasal yüzey sertleştirme adı verilir. Borlama işlemi, nitrürleme ve nitrokarbürleme gibi termokimyasal bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Yüzeyde ince, sert bir tabaka oluşur. Plazma borlama işlemi plazma nitrürlemenin benzeri olması nedeniyle ve çalışmada numunelere plazma borlama prosesinden sonra plazma nitrürleme işlemi de yapıldığından dolayı iki metodda anlatılmıştır.

Gaz ortamda 300-700 Pa basınçla borlama yapmak mümkündür. İşlem sıcaklığı diğer borlama yöntemlerine kıyasla düşmekle ve borlama süresi kısalmaktadır. Reaktif gazın daha iyi kullanımı ile işlem atmosferinde $BC1_3$ buharının miktarı azaltılır. Bu yöntemde işlenen parça yüzeyinin aktiflenmesi katodik püskürtmeden dolayı (özellikle işlemin başlangıç aşamasında , yani ısınma esnasında) akkor ışık ile başarılır [24].

Yüzey difüzyonu ve kimyasal emilme gibi yüzey işlemlerinin büyük ölçüde yükseltilmiş yüzey enerjisinden dolayı yüzeydeki kimyasal reaksiyonlar katalitik etki ile hızlanırlar. Bunun sonucu oluşan iyon ve elektronlar elektrik alanına etkide bulunurlar. Sistemi besleyen enerji, bu iyon ve elektronlar tarafından iletilir. Elektriksel alanın etkisi altında iyon ve elektronlar gaz moleküllerin bu sıcaklığa ait ortalama enerjisinden daha yüksek bir enerji kazanırlar. Elektronlar ile moleküllerin çarpışmasında sonuç olarak moleküllerin bir kısım enerjisi iletilir. Bu durum, bu şartlar altında, sistem içindeki portiküller (iyonlar, atomlar, moleküller)'in uygun sayıları yüksek enerji ile mevcut olduklarından ve atmosferdeki bu sıcaklıkta dengeli enerji dağılımını anormal akkor ışık saçılımı olmadan karşılanabildiği için başarılır[24]. Bu sayede de borlama prosesinde plazma oluşturularak verim arttırılır.

2.1 Demir Esaslı Malzemelerin Borlanması

Elementlerin demirde çözünme kabiliyetleri, çözücü ve çözünen atomların izafi büyüklükleri ile belirlenmektedir. Borun atom çapı, demirin atom çapından yaklaşık %27 oranında küçüktür. Bu yüzden, çok sınırlı da olsa katı çözeltiler oluşabilmektedir[25]. Demir esaslı malzemelerin borlama işlemi sonucunda, esas olarak Fe_2B ve FeB olmak üzere iki borür oluşmaktadır ve tabakanın özelliklerim büyük ölçüde bu iki borür belirlemektedir. Oluşan bu borürlere ait bazı fiziksel özellikler Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Borun atomik boyutu, her iki tür katı eriyik oluşumu için gerekli olan değerlere yakındır. Bazı araştırmacılar da, borun α-demirinde hem yer alan hem de ara yer katı eriyiği bölgelerini işgal edebileceğini ve aynı zamanda yer alan bor atomlarının karbon gibi diğer ara yer atomları ile etkileşebileceklerini ileri sürmüşlerdir. Düşük sıcaklıklarda demir içerisinde bor çözünürlüğü mukayese edildiğinde 1/50 oranında ara yer atomu olarak, büyük oranda ise yer alan atomu olarak eridiği görülmüştür[24].

Çizelge 2.1: Demir borürlerin bazı fiziksel özellikleri[26]

Özellik	Fe_2B	FeB
Bileşim (%B ağ.)	8.83	16.23
Kafes yapısı ve parametreleri (°A)	Tetragonal h.m a=5.078, c=4.249	Ortorombik a-4.053, b=5.495, c=2.946
Teorik yoğunluk (g/cm^3)	7.43	6.75
Ergime Noktası (°C)	1390	1550
Isıl iletkenlik katsayısı (w/cm°C)	0.2-0.3	0.1-0.2
Isıl genleşme katsayısı (K^{-1}) 200 -600 °C arasında 100-800 °C	 7.85. 1 O^{-6} 9.2.1 O^{-6}	 23.10^{-6}
Young modülü (kg/mm^2)	30000 29000	60000
Özdirenç (20°C) (µohmcm)	38	80
Curie Sıcaklığı (°C)	742	325

Borlama süreci iki ana adımda gerçekleşmektedir. Birinci adımda, tepkime ortakları (partnerleri) arasındaki reaksiyonlar orta seviyede ve cismin yüzeyinde meydana gelir. Parçalanan partiküller, yüzeyde çok hızlı bir şekilde , sıkı ve ince bir borür tabakası oluştururlar. Bu oluşumun süresi sıcaklığa bağlıdır ve 900 °C'de 10 dakika civarındadır. Bu aşama, toplam borlama süresine oranla çok kısa bir zaman

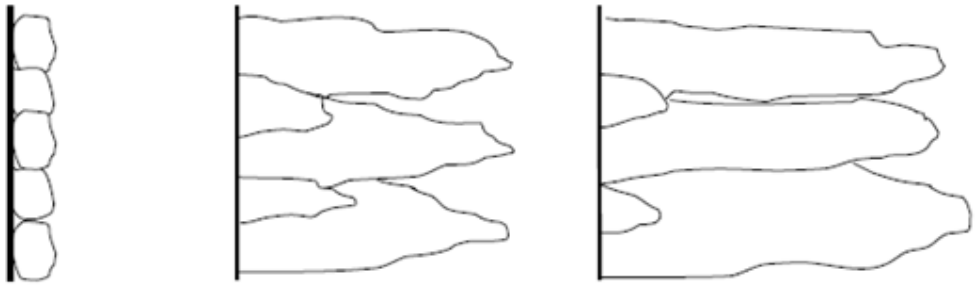
aldığından ihmal edilebilir. İnce ve sağlam olan birinci tabakanın oluşumundan hemen sonra ikinci adım başlar. Bu adım yayınma kontrollüdür. Oluşacak borlu tabakaların kalınlığı, yayınma kanunlarına uygun olarak borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak parabolik ($x^2 = D.t$) bir artış göstermektedir. Çizelge 2.2'de çok kullanılan bazı alaşımsız çelikler için yayınma katsayısı (D) değerleri verilmiştir[27].

Borlu tabakalar karekteristik görünümlere sahiptirler. Yayınma yönünün yüzeyden içeri doğru olmasından dolayı dişe benzer bir yapı oluşur, özellikle saf demir veya alaşımsız düşük karbonlu çeliklerde bu yapı açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 2.2: Teorik borür tabakası kalınlığı hesabı için yayınma katsayısı (D) değerleri

Malzeme (DIN)	D($cm^2s^{-1}10^{-8}$) 1000 °C	950 °C	900 °C	800 °C	Do $Cm^2s^{-1}10^{-3}$	Q kJ/kmol
Armco-Fe	3.40	2.16	1.22	0.330	8.91	131859
Ck15	2.88	1.87	1.06	0.319	4.77	126836
C45	2.45	1.56	1.02	0.283	2.22	120557
C60	2.29	1.44	0.924	0.262	1.83	119301
C100	1.69	0.982	0.497	0.207	0.667	113441

Karbon ve/veya alaşım elementlerinin miktarlarındaki artışla bu yapıda değişimler meydana gelmektedir[27]. Dişe benzer yapı görünümü Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



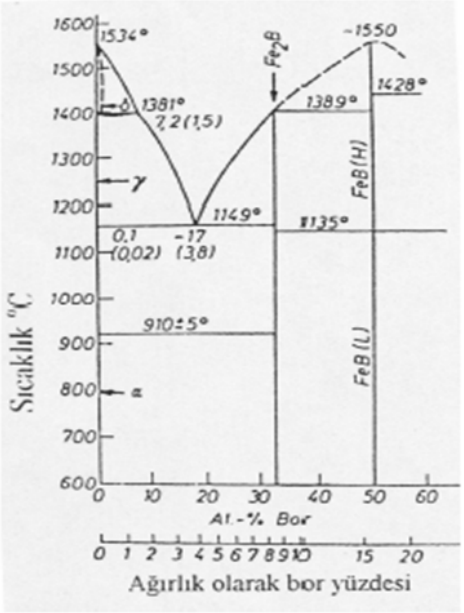
Şekil 2.1: Borlama sırasında borur tabakasının olusum aşaması[28]

2.1.1 Demir – Bor ikili denge diyagramı

Fe-B ikili denge diyagramı, ilk olarak Hansen (1958) tarafından düzenlenmiştir (Şekil 2.2). Bu denge diyagramına göre Fe-B ikili sisteminde ağırlık olarak;

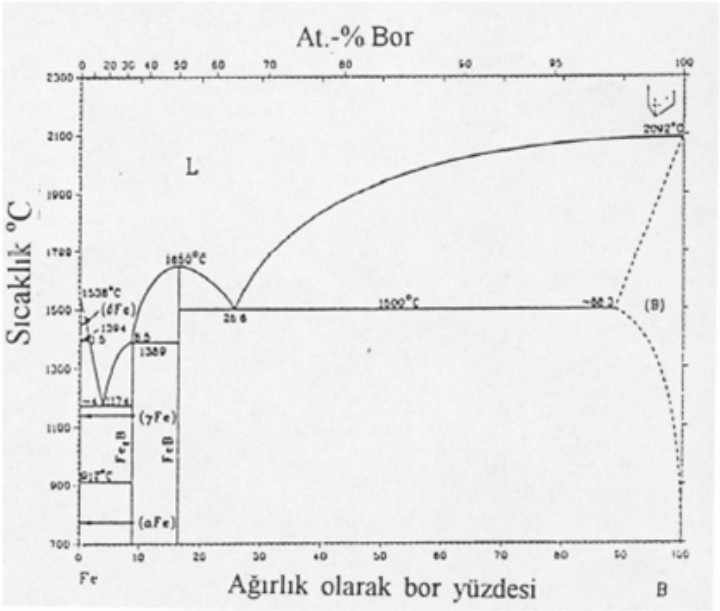
- % 8.83 bor oranında Fe_2B ve
- % 16.23 bor oranında FeB,

olmak üzere iki tür borür ve ergime noktası 1149 °C olan % 3.8 bor oranında bir ötektik oluşmaktadır [26].



Şekil 2.2: Fe-B ikili denge diyagramı [26]

Massalski (1986), demir-bor denge diyagramım Şekil 2.3'de görüldüğü gibi yeniden düzenlemiştir[29]. Hallemans vd.(1994), deneysel termodinamik ve faz diyagramı verilerini esas alıp, en küçük kareler metodunu uygulayarak, Fe-B faz diyagramını optimize etmek için termodinamik bir model kurmuşlardır[30]. Kurulan model sonucunda hesaplanan faz diyagramı ve termodinamik özelliklerin, deneysel sonuçlarla oldukça iyi uyum gösterdiğini belirtmektedirler.



Şekil 2.3: Fe-B ikili denge diyagramı [27]

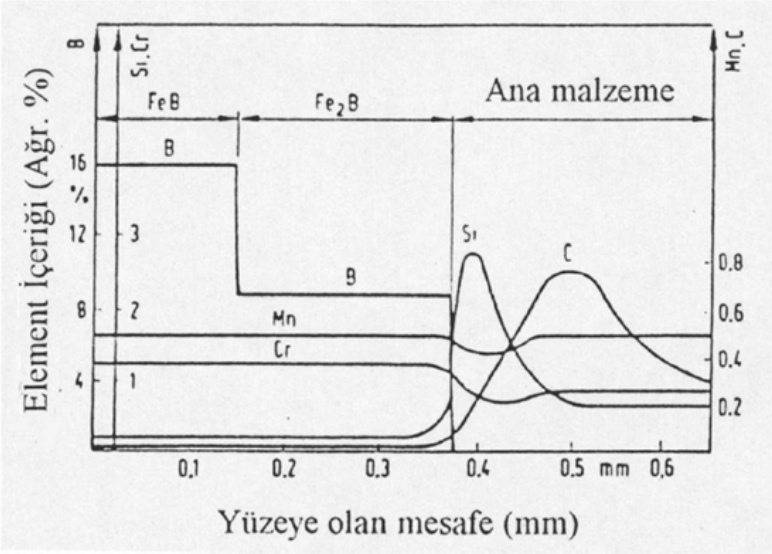
2.2 Borlamada Meydana Gelen Borür Tabakası ve Geçiş Bölgesinin Oluşum Mekanizması

2.2.1 Borür tabakasının oluşumu, büyümesi ve geçiş bölgesi

Borlama işleminin başlangıç safhasında tane sınırları, dislokasyonlar ve atom boşlukları gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde olduğu kadar, yüzeylerdeki pürüzler ve çizikler gibi makro hataların olduğu metal yüzeyindeki daha reaktif noktalarda da Fe_2B çekirdeği oluşur ve büyür. Bu oluşumu borca daha zengin bileşiklerin çekirdekleşmesi takip eder [31]. Yüksek saflıktaki demirlerde demir-bor reaktifliğinin çok düşük olduğu şartlarda, bu noktalardan sadece bazıları reaksiyona girmesi sebebiyle rastgele dapılıma sahip reaksiyon ürünü adacıklar meydana getirir.Ortamın bor potansiyelinin daha yüksek olduğu durumlarda (yüksek saflıkta olmayan demir alaşımlarında, metal yüzeyindeki daha az reaktif olan noktalara devreye girerek sürekli bir tabaka oluşturur. Sürekli tabakaya sahip olma durumu ise, daha düşük potansiyelli ortam ile daha reaktif metal şartlarında da sağlanabilmektedir. Borlama esnasında bor kristallerinin tercih yönü yayınma mekanizmasına bağlıdır. Borun yayınma mesafesi, borür tabakasından uzundur.fakat bor tabakasında bor yoğunluğu çok daha yüksektir [24].

Borür tabakasında ve alt bölgelerde bor ve diğer elementlerin dağılımı Şekil 2.4'te

verilmiştir.



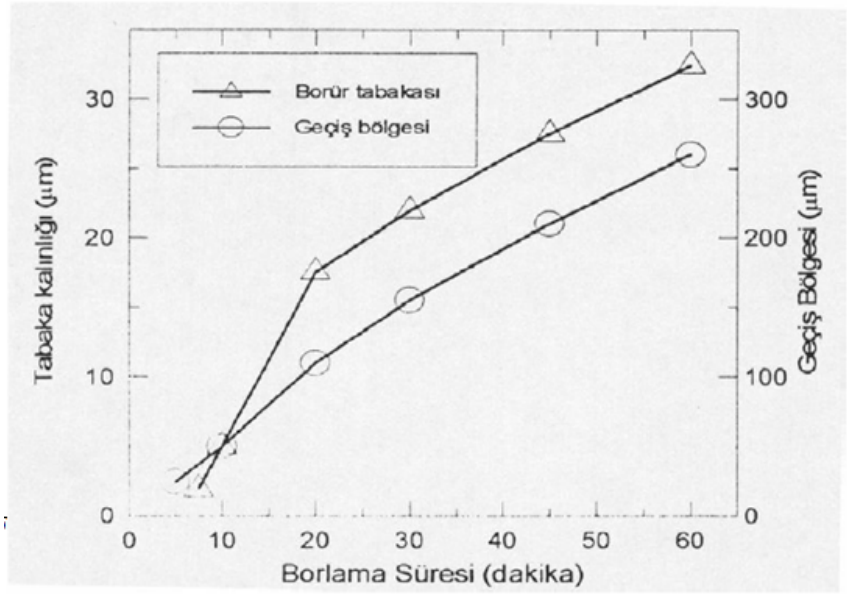
Şekil 2.4: Matriste ve borür tabakasındaki bor ve diğer elementlerin, yüzde ağırlık olarak değişimleri [32]

Malzeme ve işlem şartlarına bağlı olarak tek fazlı veya çok fazlı tabakalar elde edilmesine ve esas malzeme ile tabaka yüzeylerinde farklı morfolojilerin olabilmesine rağmen, pratikte tek fazlı (Fe_2B) ve girintili-çıkıntılı borür tabakası, daha sonraki ısıl işlemlere uygunluğı FeB'a göre daha az gevrek olması sebebiyle tercih edilmektedir.

Borlama işlemi esnasında çelik bileşiminde bulunan elementlerin yeniden dağıldıkları ve bu arada FeB ve Fe2B tabakalarının, karbon ve silisyumu çözündürme yeteneğine sahip olmamasından dolayı, bor yayınımı esnasında C ve Si'un borür tabakasından içeriye doğru itildikleri ve bunun sonucu olarak borür tabakası ile borlanan metal matriks arasında bir geçiş bölgesi oluşturduğu bilinmektedir [24].

Geçiş bölgesi, mikroyapı itibariyle esas malzeme yapısından farklı bir görünüme sahiptir ve borür tabakasına göre daha kalındır[33]. Borür tabakası tarafından karbonun içeriye itilmesi sonucunda geçiş bölgesinde, esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunacağı, çeşitli araştırmacılar tarafından ileri sürülmektedir. Bu bölgedeki bor dağılımı otoradyografi yöntemi ile inceleyen (Berzina vd., 1984), geçiş bölgesi kalınlığının, normal metalografik yöntemle beleirlenene göre daha büyük olduğunu beliirlemişlerdir. Aynı yöntemi kullanan (Bozkurt, 1984), geçiş bölgesinin,

borür tabakasından 10-15 kat fazla bir kalınlığa sahip olduğunu tesbit etmiştir [33].



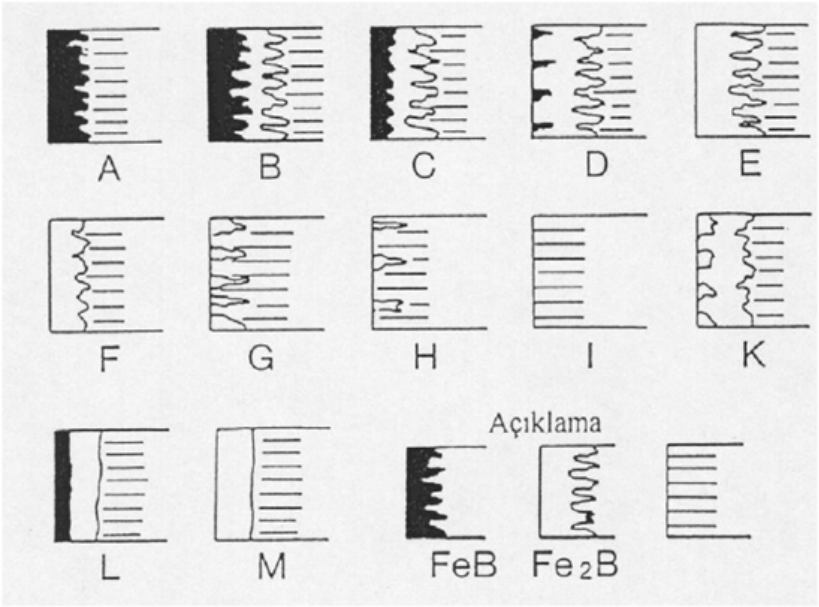
Şekil 2.5: Fe_2B ve geçiş bölgesi kalınlığının borlama süresi ile değişimi[27]

Genel olarak, geçiş bölgesindeki tane boyutu, ana malzeme boyutuna göre daha büyük olduğu halde, sinterlenmiş Fe-C alaşımlarında bu bölgede tane büyümesine rastlanmadığı ileri sürülmektedir[27]. Ck 15 çeliğinde borlama süresine bağlı olarak borür tabakası ve geçiş bölgesi kalınlıklarının farklı tarzlarda arttığını belirtmektedir(Şekil 2.5).

2.2.2 Borür tabakası çeşitleri ve kalınlığı

Çeşitli borlama yöntemleri ile 14 farklı yapıda borür tabakası elde edilebilmektedir. Kunst ve Schaaber tarafından geliştirilerek düzenlenen sistematik sınıflandırma Şekil 2.6' da gösterilmiştir [26].

Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzemenin bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olarak; ya düz bir formda veya parmaksı formda olabilir. Tabaka tiplerinden hareketle bazı tabaka özelliklerinin belirlenebileceğini söylemek mümkündür. Bu özel tabaka tipleri aşağıdaki gibi karakterize edilebilir:



Şekil 2.6: Borür tabakası çeşitleri[12]

A: Tek fazlı tabaka, sadece FeB

B: İki fazlı tabaka, Fe2B ve FeB

C: İki fazlı tabaka, B'dekinden daha ince bir FeB tab.

D: İki fazlı tabaka, yalnız FeB dişleri izole edilmiş

E: Tek fazlı tabaka, sadece Fe2B, kuvvetli dişler

F: Tek fazlı tabaka, sadece Fe2B, daha az kuvvetli dişler

G: Fe2B dişli özel tabaka

H: Fe2B dişleri çok izole edilmiş tabaka

I: Geçiş bölgcsi

K: Bozulmuş tabaka

L: İki fazlı tabaka, düz yani parmaksı değil

M:Tek fazlı tabaka, FeB ve Fe2B, düz

Endüstride E ve F tipi yani tek fazlı borür tabakası (Fe_2B) tercih edilmektedir. Bu tabakalar, düşük kırılganlık değerine sahiptir ve ana malzemeye, borlu tabakanın özelliklerini olumsuz yönde etkilemeden; borlama sonrası ısıl işlemler uygulanabilir[12].

Teorik olarak, adhezif aşınmayı önlemek için 5 μm'lik tabaka kalınlığı yeterlidir. Ancak, alaşımsız ve az alaşımlı çeliklerde olduğu gibi tabaka geometrisinin parmaksı olduğu durumlarda , bu kalınlıkta bir tabaka elde etmek mümkün değildir. Yüksek alaşımlı çeliklerde 15-20 μm kalınlık uygundur. Takım çeliklerinde, tabaka kalınlığının 75-100 μm' yi geçmemesi önerilir. Tabaka kalınlığı arttıkça tabakanın gevrekliği de artacağı için, özellikle çift fazlı (Fe_2B+FeB) tabakalarda, tabakanın çok kalın olmamasına dikkat edilmelidir. Alaşım elementlerinin oranı arttıkça çelik içerisine bor yayınımı güçleşmektedir. Ayrıca, yüksek alaşımlı çeliklerde oluşan borür dişleri daha yoğun, daha üniform ve kapalıdır.

2.2.3 Borlanabilir malzemeler ve metal borürler

Borlama işlemi uygulanacak malzemelerin, ısıl işlemlere uygunluk, gerekli mekanik dayanım, çok sert ve aşınmaya dirençli borür tabakası oluşturabilme yeteneği gibi özellikleri taşımaları gerekmektedir. Hemen hemen bütün demir esaslı malzemeler; dövme ve dökme çelikler, gri dökme demirler, küresel grafitli dökme demirler, sinterlenmiş demir ve çelikler, takım çelikleri ve diğer çelikler, belirtilen özellikleri sağlarlar ve bor yayınımı ile yüzeyleri sertleştirilebilirler [12].

Demir esaslı malzemelere ilaveten bazı demir dışı metaller ve alaşımları,genellikle özel teknikler kullanılarak, başarı ile borlanmaktadır. Titanyum, nikel ve bunların alaşımlarının borlanması oldukça enteresan ve iyi sonuçlar vermektedir. Titanyumun borlanması sonucunda, aşınmaya karşı oldukça dayanıklı, %18 bor ağırlık yüzdesi ile TiB_2 ve Ti_3B_4 oluşmaktadır. Ti_2B hegzogonal, TiB ise ortorombik kafes yapısına sahiptir[34].

Cr, Mn, Ni, Co, Mo, Ta, vb. demir dışı alaşımlar ile seramik malzemeler borlanabilir. Co ve Ni esaslı Wc ve TiC gibi karbürler çok sert ve yüksek ergime sıcaklığına sahip olmalarına karşılık, nemli atmosferik şartlarda, oksidasyon dayanımları düşüktür. Bunu uygulamak için borlama uygulanabilir. Ancak, Co veya Ni içeriğinin %6’ dan küçük olması gerekmektedir [35].

Al, Zn, Mg alaşımları düşük ergime sıcaklıklarından dolayı borlanamaz. Cu ve alaşımları klasik yöntemlerle borlanamaz[35]. Al ve Si borür tabakasında çözünemez. FeB ve Fe_2B fazının önünde birikerek, ferritik yapıya sahip bir bölge oluştururlar. Bu ferritik bölge çok yumuşaktır ve sertleştirilemez[34]. %l' den fazla Si içeren çeliklerin borlanması da uygun değildir, ancak çok ince tabakalar için

olumlu sonuçlar alınmıştır [35].

Çizelge 2.3: Plazma borlama ve nitrürleme prosesi için uygun metal tablosu

Metal	Bağıl Atom Kütl	Erime Noktası	Yoğunluk (g/	Atomik Çap	cBN a0	B-N Bond Length in cBN stru
İTRİYUM	88,90585	1526	4,47	2,27	3,615	1,565
LUTESYUM	174,967	1663	9,84	2,25	3,615	1,565
ZİRKONYUM	91,224	1852	6,51	2,16	3,615	1,565
HAFNİYUM	178,49	2227	13,31	2,16	3,615	1,565
SKANDİYUM	44,95591	1539	2,99	2,09	3,615	1,565
TANTAL	180,9479	2996	16,65	2,09	3,615	1,565
NİYOBYUM	92,90638	2468	8,57	2,08	3,615	1,565
TUNGSTEN	183,85	3407	19,35	2,02	3,615	1,565
Molibden	95,34	2617	10,22	2,01	3,615	1,565
Titanyum	47,88	1660	4,54	2	3,615	1,565
RENYUM	186,207	3180	21,04	1,97	3,615	1,565
TEKNESYUM	98	2200	11,5	1,95	3,615	1,565
VANADYUM	50,9415	1902	6,11	1,92	3,615	1,565
OSMİYUM	190,2	3027	22.Haz	1,92	3,615	1,565
RUTENYUM	101,07	2250	12,37	1,89	3,615	1,565
İRİDYUM	192,22	2443	22,4	1,87	3,615	1,565
KROM	51,9961	1857	7,19	1,85	3,615	1,565
RODYUM	102,9055	1966	12,41	1,83	3,615	1,565
PLATİN	195,08	1772	21,45	1,83	3,615	1,565
Altın	196,9665	1064	19,32	1,79	3,615	1,565
PALLADYUM	106,42	1552	12,02	1,79	3,615	1,565
CIVA	200,59	-38,72	13,546	1,76	3,615	1,565
Gümüş	107,86	961	10,5	1,75	3,615	1,565
Demir	55,847	1535	7,874	1,72	3,615	1,565
KADMİYUM	112,411	321,18	8,65	1,69	3,615	1,565
Kobalt	58,93	1495	8,9	1,67	3,615	1,565
Nikel	58,6934	1453	8,9	1,62	3,615	1,565
Bakır	63,546	1084	8,96	1,57	3,615	1,565
ÇİNKO	65,39	419,73	7,13	1,53	3,615	1,565
MANGANEZ	54,93805	1244	7,2	1,35	3,615	1,565

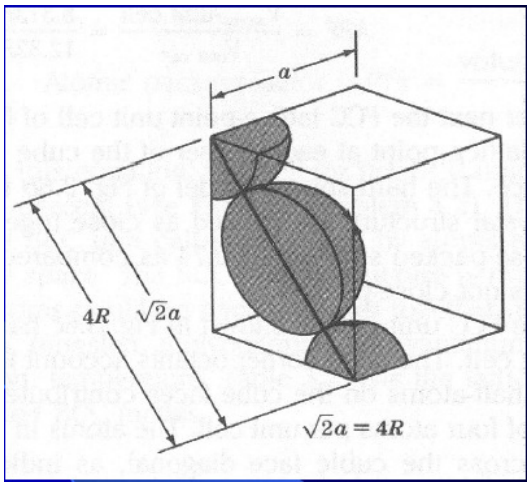
Çeliklerin borlanması istenmeyen yüzeyleri veya bölgeleri SiC, Al2O3, asbest, bakır, veya benzeri ticari ürünlerle kaplanarak kısmi borlama yapılabilir [12]. Permyakov ve Loskutov, iş parçasının borlanması istenmeyen yüzeylerinin, en azından 0.1 mm kalınlığında bakır veya 4g amorf bor tozu, 4 ml sentetik reçine ve 14 ml trikloroetilen karışımı ile kaplanmasını önermişlerdir [36].

Bu çalışmada plazma borlama işlemi ve plazma nitrürleme işlemi aynı numuneler üzerine sırayla uygulanacağından dolayı cBN kafes parametreleri referans alınmış ve bu parametreye uygun metal kafesleri incelenmiştir. cBN kafes parametreleri ve metallerin özelliklerine göre borlamaya ve nitrürlemeye uygun olan metaller Çizelge2.3'de listelenmiştir.

cBN atom özelliği olarak kübik bir yapıya sahip olması sebebiyle çalışmada hacim merkezli kübik ve yüzey merkezli kübik olam metaller araştırılmıştır. Uygun olan metal listesi çıkarılabilmesi için cBN yapısının B-N bond lenght olan 1.57A değerine

yakın ya da daha büyük olan metalerin uygunluğu referans alınmıştır.

2.2.3.1 Yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip metaller için uygun çap hesaplanması;



Şekil 2.7: Yüzey merkezli kübik atom yapısı gösterimi

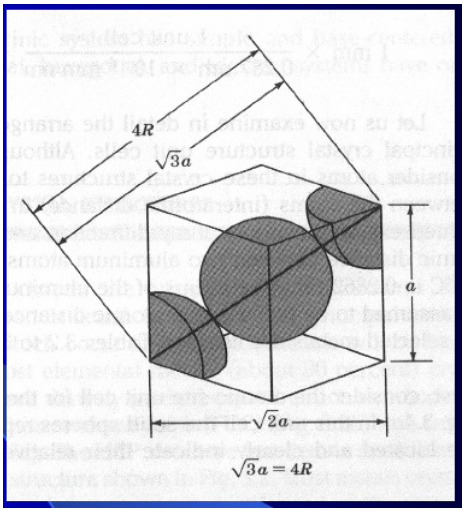
Yüzey merkezli kübik kristal yapıda bir köşegene gelen toplam atom yarıçapı miktarı 4R boyutunda olacaktır, cBN yapılabilmesi için gereken a parametresinin hesaplanabilmesi için 4R/√2 değerine ihtiyacımız olacaktır. cBN kafes yapısındaki a parametre değeri olan 3.65 A değeri için uygun olan metal atom yarıçap değeri ise tam olarak 1.79A= 0.179nm ya da bu değerden daha yüksek bir değer olması gerekmektedir.

Çizelge 2.4: Oda sıcaklığında (20 ^{o}C) YMK kristal yapısına sahip bazı metallerin kafes sabiteleri ve atom yarıçapları

Metal	Kafes sabitesi, a	Atom Yarıçapı R_f ,nm
Altın	0,408	0,144
Aluminyum	0,405	0,143
Bakır	0,361	0,128
Gümüş	0,409	0,144
Kurşun	0,495	0,175
Nikel	0,352	0,125
Platin	0,353	0,139

Bu durumda cBN için en uygun YMK kafes yapısındaki metaller Çizelge 2.2'de belirtilmiştir.

2.2.3.2 Hacim merkezli kübik(HMK) yapıya sahip metaller için uygun çap hesaplanması;



Şekil 2.8: Hacim merkezli kübik atom yapısı gösterimi

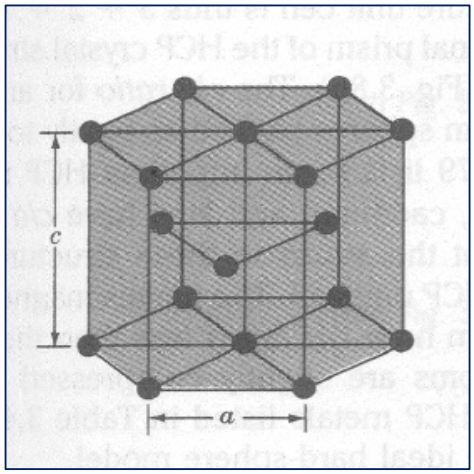
Yüzey merkezli kübik kristal yapıda bir köşegene gelen toplam atom yarıçapı miktarı 4R boyutunda olacaktır, cBN yapılabilmesi için gereken a parametresinin hesaplanabilmesi için 4R/√3 değerine ihtiyacımız olacaktır. cBN kafes yapısındaki a parametre değeri olan 3.65 A değeri için uygun olan metal atom yarıçap değeri ise tam olarak 1.56A=0.156 nm ya da bu değere yakın bir değer olması gerekmektedir.

Çizelge 2.5: Oda sıcaklığında (20 ^{o}C) HMK kristal yapısına sahip bazı metallerin kafes sabiteleri ve atom yarıçapları

Metal	**Kafes sabitesi, a**	**Atom Yarıçapı R_f ,nm**
Demir	0,287	0,124
Krom	0,289	0,125
Molibden	0,315	0,136
Potasyum	0,533	0,231
Sodyum	0,429	0,186
Volfram	0,316	0,137
Vanadyum	0,304	0,132

Bu durumda cBN kaplama yapılabilmesi en uygun hacim merkezli kübik kafes yapısındaki metaller Çizelge 2.3'te belirtilmiştir.

2.2.3.3 Hekzagonal sıkı düzen kafes yapısına (HSD_HCP) sahip metaller için uygun çap hesaplanması;



Şekil 2.9: Hekzagonal sıkı düzen (HSD-HCP) atom yapısı gösterimi

Çizelge 2.6: Oda sıcaklığında (20 ^{o}C) HSD kristal yapısına sahip bazı metallerin kafes sabiteleri ve atom yarıçapları

Metal	**Kafes sabitesi, a**	**Kafes sabitesi, c**	**Atom Yarıçapı R_f ,nm**
Kadmiyum	0,297	0,562	0,149
Çinko	0,266	0,494	0,133
Magnezyum	0,321	0,521	0,160
Kobalt	0,251	0,407	0,125
Zirkonyum	0,323	0,515	0,160
Titanyum	0,295	0,468	0,147
Berilyum	0,227	0,359	0,113

Hekzagonal sıkı düzen (HSD) kristal yapıda bir atomun cBN prosesi yapılabilmesi için gereken değer için sadece a parametresiyeterli olmayacaktır. HSD düzendeki kristal yapıdaki diğer kafes parametresi olan c değerininde önemi vardır.; cBN kafes yapısındaki a parametre değeri olan 3.65 A değerine yakın bir değer olması gereken kafes parametreleri a,c parametrelerinin arasında bulunması gerekmektedir.

Bu durumda cBN kaplama yapılabilmesi en uygun hacim merkezli kübik kafes yapısındaki metaller Çizelge 2.4'te belirtilmiştir.

Sonuç olarak kafes yapılarına göre cBN kaplamasına uygun olan metallerin çap hesaplaması için gereken değerleri özetlersek;

HMK yapı için cBN coating yapılması için gereken geçiş metalinin çapı=1,56 A ya da bu değere yakın bir değer olmalıdır

YMK yapıda ise cBN coating yapılması için gereken geçiş metalinin çapı=1,79 A ya da bu değere yakın bir değer olmalıdır

HSD yapıda ise cBN kaplama yapılabilmesi için metalin a ve c boyutunun cBN için gereken 3,65 ydeğerini kapsamaları gerekmektedir. 3.65A değeri a ve c parametrelerinin arasında bulunduğu sürece kafes yapısı itibariyle bu metallerde kaplanabilir.

CBN yapısı kübik yapıya sahip olması sebebiyle proses uygulanmaya çalışılan metallerinde kübik bir kristal yapıya sahip olması prosedürü kolaylaştırıcı bir etken olacaktır. bu sebeple çalışmamız esnasında HSD düzen yapıya sahip olmayan bir metal ile çalışma tercih edilmiştir.

Bu çalışmada plazma borlama ve plazma nitrürleme prosesi uygulanmak üzere paslanmaz çelik 310 ve 316L metalleri seçilmiştir.

2.3 Paslanmaz Çelik 310 ve 316L Metallerinin Özellikleri ve Kullanım Alanları

2.3.1 Paslanmaz çelik 310 metalinin özellikleri ve kullanım alanları

Paslanmaz Çelik 310 Metalinin isimlendirilmesi şekil 2.10'da belirtilmiştir.

ASTM Standardı	**310**
EN Standardı	1.4841
UNS Standardı	S31000
Sınıfı	Ostenitik

Şekil 2.10: 310 Paslanmaz çelik isim ve sınıflandırılması[37]

310 paslanmaz çeliğin kimyasal bileşim tablosu Şekil 2.11'de gösterilmiştir.

Kimyasal Bileşim	**C**	**Cr**	**Ni**	
En çok	0,25	26	22	
En az	0	24	19	

Şekil 2.11: 310 Paslanmaz çelik kimyasal bileşimi[37]

310 paslanmaz çeliğin fiziksel özelliklerinin belirtildiği tablo Şekil 2.12'de

belirtilmiştir.

Fiziksel Özellikler	
Elastiklik Modülü (GPa)	200
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	7,9
Isıl Genleşme Katsayısı (1/K)	17
Elektrik Direnci (Ωmm^2/m)	0,9
Özgül Isı (J/kg.K)	500
Isı İletkenliği (W/m.K)	14
Manyetiklik	Yok

Şekil 2.12: 310 Paslanmaz çelik fiziksel özellikleri[37]

310 paslanmaz çeliğin mekanik özelliklerinin belirtildiği tablo Şekil 2.13'de belirtilmiştir.

Mekanik Özellikler					
	%0.2 Akma Dayanımı (MPa)		**Çekme Dayanımı (Mpa**	**Kopma Uzaması (%)**	**Sertlik (Brinell)**
Tavlanmış Durumda	en az 230		550-800	en az 30	165-205
Yüksek Sıcaklık Özellikleri					
Sıcaklık (°C)	600	700	800	900	1000
Sürünme sınırı R_{p1} t=1000h/MPa	150	53	23	10	4
Sürünme Kopma Day. R_m t=10000h/MPa	160	40	18	8,5	
Isıl Genleşme Kat. (1/K)	17,5		18		19

Sürünme sınırı (**R_{p1}**): 1000 saatte %1 plastik şekil değişimine neden olan gerilme seviyesi
Sürünme Kopma Dayanımı (**R_m**): 10000saatte kopmaya neden olan gerilme seviyesi

Şekil 2.13: 310 Paslanmaz çelik mekanik özellikleri[37]

310 Paslanmaz çeliğin imalat özelliklerinin belirtildiği tablo Şekil 2.13'te belirtilmiştir. Deneyin yapılacağı sıcaklıklar şekil verme sıcaklığının altında olması sebebiyle parçalarda fiziksel ve kimyasal bir deformasyon olmaksızın deneylerin yapılabileceği görülmüşür.

İmalat Özellikleri	
Tavlama Sıcaklığı	1050-1100 (°C)
Şekil Verme Sıcaklığı	1150-800 (°C)
Kaynaklanabilirlik	İyi. Gaz eritme kaynağı hariç tüm yöntemler.

Şekil 2.14: 310 paslanmaz çelik imalat özellikleri[37]

2.3.1.1 310 Paslanmaz çeliğin kullanım alanları

310 paslanmaz çeliği yüksek sıcaklıkta kullanıma uygun metallerden biridir. Bu sebeple mekanik zorlama altındaki fırın ve fırın aparatlarında, diğer yüksek sıcaklık uygulamalarında, ısıtıcı askıları, ısıtıcı iletkenler, tavlama kalıpları ve ısıya dayanıklılığın gerektiği alanlarda kullanılmaktadır.

2.3.2 Paslanmaz çelik 316L metalinin özellikleri ve kullanım alanları

Paslanmaz Çelik 316L Metalinin isimlendirilmesi Şekil 2.15'te belirtilmiştir.

ASTM Standardı	316L
EN Standardı	1.4404
UNS Standardı	S31603
Sınıfı	Ostenitik
Ürün Türleri	Sıcak ve soğuk haddelenmiş sac, şerit, levha, çubuk vb

Şekil 2.15: 316L Paslanmaz çelik isim ve sınıflandırılması[37]

316L paslanmaz çeliğinin kimyasal özelliklerinin belirtildiği tablo şekil 2.16'da gösterilmiştir.

Kimyasal Bileşim	C	Cr	Ni	Mo
En çok	0,03	18	14	3
En az	0	16	10	2

Şekil 2.16: 316L Paslanmaz çelik kimyasal bileşimi[37]

316L paslanmaz çeliğinin fiziksel özelliklerinin belirtildiği tablo Şekil 2.17'de gösterilmiştir.

Fiziksel Özellikler	
Elastiklik Modülü (GPa)	200
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	7,98
Isıl Genleşme Katsayısı (1/K)	16,5
Elektrik Direnci (Ωmm^2/m)	0,75
Özgül Isı (J/kg.K)	500
Isı İletkenliği (W/m.K)	15
Manyetiklik	Yok

Şekil 2.17: 316L Paslanmaz çelik fiziksel özellikleri[37]

316L Paslanmaz çeliğinin mekanik özelliklerinin belirtildiği tablo Şekil 2.18'de

belirtilmiştir.

Mekanik Özellikler					
	%0.2 Akma Dayanımı (MPa)	%1 Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (Mpa	Kopma Uzaması (%)	Sertlik (Brinell)
Tavlanmış Durumda	en az 200	en az 270	540-700		160-200
Soğuk İşlenmiş	450'e kadar		700'e kadar		200'e kadar
Yüksek Sıcaklık Özellikleri					
Sıcaklık (°C)	100	200	300	400	500
Elastiklik Modülü (GPa)	194	186	180	172	165
%0.2 Akma Dayanımı (MPa)	166	137	118	108	100
Isıl Genleşme Kat. (1/K)	199	167	145	135	128
	16,5	17,5	17,5	18,5	18,5

Şekil 2.18: 316L Paslanmaz çelik mekanik özellikleri[37]

316L paslanmaz çeliğinin imalat özelliklerini Şekil 2.19'da belirtilmiştir.

İmalat Özellikleri	
Tavlama	1030-1120 °C sıcaklık aralığında, her mm kalınlık için 5 dakika tutulur. Tavlama sonrası malzeme kalınlığına göre su veya havada soğutulur. İşlem sonrası yüzeyde oluşan renk değişimleri veya tufal oluşumları kimyasal veya mekanik olarak giderilmez ise korozyon dayanımı olumsuz etkilenir.
Soğuk Şekillendirme	Şekillendirme özelliği çok iyidir. %15'ten daha fazla şekil vermede tavlama ısıl işlemi gerekli olur.
Sıcak Şekillendirme	1150-850 °C sıcaklık aralığında şekillendirildikten sonra malzeme havada soğutulur. Şekil verme sonrası yüzeyde oluşan renk değişimleri veya tufal oluşumları kimyasal veya mekanik olarak giderilmez ise korozyon dayanımı olumsuz etkilenir.
Talaşlı İmalat	Talaşlı imalat için iyi kalite yüksek hız çeliği veya karbür takımlar kullanılmalıdır. İşleme sırasında iyi bir soğutma gereklidir
Kaynak Kabiliyeti	Mükemmel. Gaz eritme kaynağı hariç bütün yöntemler uygulanabilir. Ara pasolarda sıcaklığın 200°C 'a düşmesi beklenmelidir. Kaynak sonrası ısıl işlem genellikle gerekli değildir. İşlem sonrası yüzeyde oluşan renk değişimleri veya tufal oluşumları kimyasal veya mekanik olarak giderilmez ise korozyon dayanımı olumsuz etkilenir.

Şekil 2.19: 316L Paslanmaz çelik imalat özellikleri[37]

2.3.2.1 316L Paslanmaz çeliğin kullanım alanları

316 paslanmaz çeliği kaliteye benzer uygulamalarda kullanılır. Kaynak işlerinden sonra tavlama işlemi yapılması mümkün olmayan parçalara içinde kullanılabilir. Çok agresif korozif ortamlarda çalışmaya uygun korozyon özelliklerine sahiptir ve bu sebeple korozif ortamlardaki uygulamalarda daha fazla tercih edilir. Yüksek sıcaklık altında kuvvet taşıyan parçalarda kullanılabilir. Yüksek sıcaklıklara kadar dayanımın gerektiği alanlarda 300°C'ye kadar sürekli çalışma ortamlarında tanelerarası

korozyona karşı dayanıklıdır. Bu özelliği kimya sanayisinde petrokimyasal uygulamalardaki kullanımını arttırmaktadır. Sıcaklığa mukavim ısı değiştiricilerinde, buhar kazanlarında, endüstriyel mutfaklarda, boru ve ısı değiştirgeçlerinde, gıda sektöründe, likör ve meyvasuyu üretimi le et işleme tesislerinde, nakil ve stok depolarında tercih edilir. Mimaride ise dış alan kaplamalarında kullanım alanı bulur.

2.3.2 Malzemelerin plazma borlama ve nitrürlemeye uygunluğu

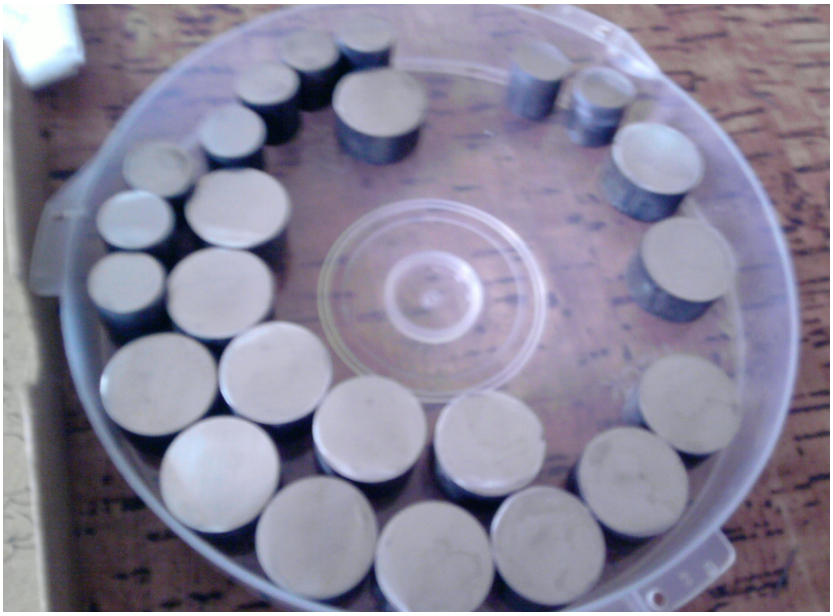
Genelde nitrürlemeye malzemenin tepkisi güçlü nitrür oluşturma elemanlarının varlığına bağlıdır. Sade karbon çelikleri nitrürlenebilir ancak yüzey, çekirdekten kayda değer biçimde sert değildir. En güçlü nitrür oluşturucular; aliminyumi krom, molibden, vanadyum ve tungstendir. Çünkü beyaz katmanın öğeleri sadece demir ve nitrojen bileşikleridir. Bu katmanların sertliği esasında alaşım muhteviyatından bağımsızdır.

Başlangıçtaki nitrürleme çelikleri Nitrallo(nitrür-alaşım) serisidir. Bunlar ağırlıkça yaklaşık olarak %1 Al, %1-1.5Cr içerir. Mükemmel yüzeyler oluşturan diğer alaşımlar 4100, 4300, 5100, 6100, 8600, 8700, 9300 ve 9800 serileri gibi krom esaslı alaşımlardır. Diğer iyi nitrürleme malzemeleri alet ve metal kalıp çeliklerinin pek çoğu, paslanmaz çelikler ve çökelme sertleştirme alaşımlardır.

Karbon çeliği veya döküm demirlerde difüzyon bölgesinde kayda değer bir sertleşme elde edilemez bununla birlikte bir bileşik bölgesi oluşturulabilir ve genellikle bu bileşik bölgesi hafif yüklenen parçalarda aşınma direnci açısından mükemmeldir.

3. PLAZMA BORLAMA DENEYİ

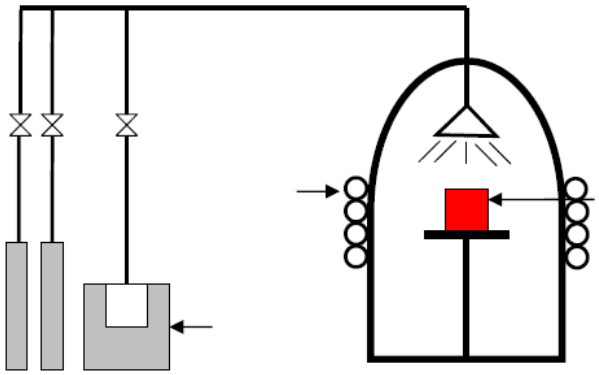
Plazma borlama deneyi için seçilen 2 çeşit paslanmaz çelik tipi olan 310 ve 316L metalleri kullanılmıştır. Renk ve görünüm olarak aynı olması sebebiyle 310 paslanmaz çelik numuneleri 18mm çap ve 10mm boy olarak, 316L paslanmaz çelik metal numuneleri ise 12mm çap ve 10mm boy olarak tercih edilmiştir. Bu sayede metal tiplerinin deney esnasında karıştırılması engellenmiştir. 310 ve 316L deney numuneleri Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : 310 ve 316L paslanmaz çelik deney numuneleri

Plazma borlama işleminin yapılabilmesi amacıyla yapılan araştırma sonucunda borlayıcı ortam olarak BF_3 gazının kullanılmasına karar verilmiştir. Bu gazın kullanılmasında, alternatifi olan BCl_3 gazının yüksek korozif etkiye sahip olması da rol almıştır. BF_3 gazı İTÜ makine iyon nitürleme laboratuvarına bir firma aracılığı ile İngiltere'den getirtilmiştir. BF3 gazı, %99.5 safiyette, 10 lt su hacminde ve 100 bar basınçta paslanmaz çelik bir tüp içerisinde temin edilmiş ve daha önceki çalışmalar içinde kullanılmıştır [38].

Şekil 3.2'de plazma borlama deney düzeneğinin şematik resmi verilmektedir.



Şekil 3.2 : Plazma borlama deney düzeneğinin şematik resmi[39]

Deneyin yapılacağı deney odası CEMAŞ Makine San. Tic. A.Ş. Firmasına imal ettirilmiştir. Deney odası paslanmaz çelik malzemeden ve yaklaşık olarak 60cm çapında, 60 cm yüksekliğinde, alt kapak, orta gövde, üst kapaktan oluşan üç parça olacak şekilde yapılmıştır. Deney odası içerisinde bir adet 2 kW / 10V / 200A değerlerinde Kantal Fibrothal rezistans bulunmaktadır. Deney odasının alt ve üst kapakları, orta gövde ve gövdenin alt ve üstünde bulunan flanşlar ayrı ayrı su soğutma sistemine sahiptir. Deney odasına gaz girişinin sağlayan bir giriş vanası ve gaz çıkışını sağlayan bir de çıkış vanası mevcuttur. Güç kaynağı bağlantıları deney odasının alt ve üst tarafında bulunan ve gövdeden yalıtılmış elemanlar vasıtasıyla yapılmıştır. Vakum (Basınç) ölçümü gaz giriş vanasına paralel olarak bağlanan U tipi bir civalı manometre ile yapılmaktadır. Gaz çıkış vanası ise korozyona dayanıklı vakum pompasına bağlanmakta ve böylece deney odasının vakuma alınması sağlanmıştır. Sıcaklık ölçmek amacıyla K tipi bir termoeleman(thermocouple) kullanılmakta ve termoelemanlar alt kapak üzerinde bulunan iki adet çıkış bağlantısı vasıtasıyla dışarı aktarılmakta ve dijital ölçüm aleti ile anlık sıcaklık ölçümü sağlanmaktadır.

Sisteme gönderilecek gazların debilerinin ölçmek maksadıyla rotametre tipi debimetreler sisteme bağlanmıştır. BF3 gazının debisi 30-240 ml/dk kapasiteli bir debimetre ile, Ar gazının debisi 50-500ml/dk kapasiteli bir debimetre ile ve H2 gazının debisi de 100-1000ml/dk kapasiteli bir debimetre ile ölçülmüştür. Bu üç gaz debimetrelerden geçtikten sonra bir karışım hücresinde karıştırılmakta ve sonrasında

deney odasına gönderilmektedir.

Güç kaynağı olarak İTÜ iyon nitrürleme laboratuvarında bulunan 20kV / 10A kapasiteli güç kaynağı kullanılmıştır.

Şekil 3.3'te imal ettirilen plazma borlama deney odasının kapalı haldeki resmi görülmektedir. Deney odasına malzeme yüklenmesi ve çıkarılması sadece üst kapağın veya orta gövde ile birlikte üst kapağın deney odasına bağlı bir caraskal ile açılması suretiyle yapılmaktadır.

Şekil 3.3 : Plazma borlama deney odası

Deney odasına numune yerleştirilebilmesi için açılmış hali Şekil 3.4'te görülmektedir.

Şekil 3.4 : Deney odasının açılmış hali

Deney odasının çeperlerinin soğutulması amacıyla kullanılan su soğutma sistemi Şekil 3.5'de görülmektedir. Alt rezistansın açılmadığı sıcaklıklarda bu sisteme gerek olmaksızın deney odası dış çeperi yüksek derecede ısınmamıştır.

Şekil 3.5 : Su soğutma sistemi

Basınç(vakum) ölçümünde kullanılan U tipi civalı manometre Şekil 3.6'da görülmektedir.

Şekil 3.6 : U Tipi civalı manometre

Deney sisteminde kullanılan BF3, Ar ve H2 gazlarının bulunduğu tüplere ait resimler Şekil 3.7'de görülmektedir.

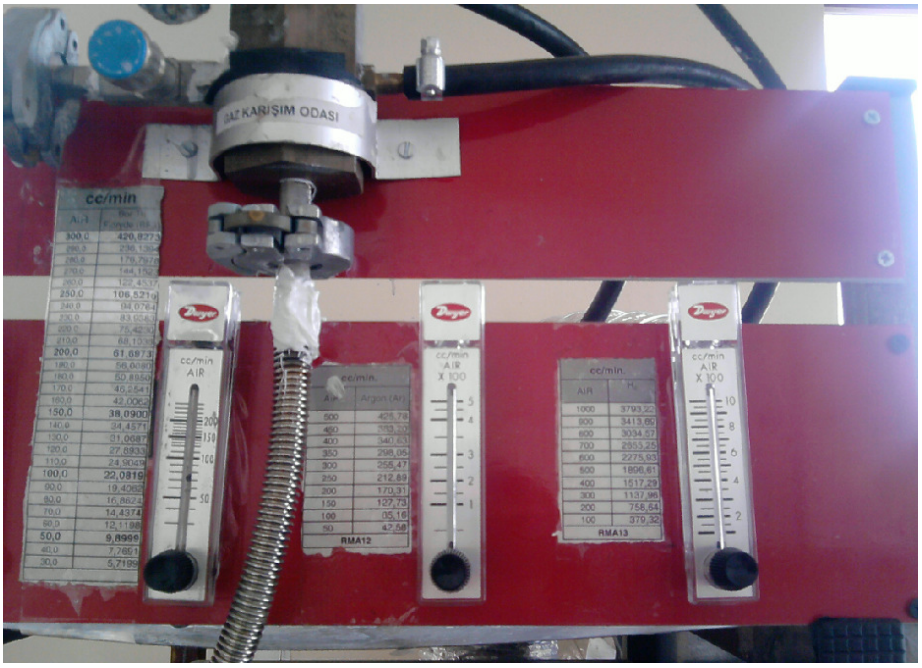
a) BF_3

b) H_2

c) Ar

Şekil 3.7 : a. BF3 **b.** H2 **c.** Ar gazlarının bulunduğu tüpler

Gazların debilerinin ayarlandığı debimetre'ler ve gaz karışım odası şekil 3.8'de görülmektedir.



Şekil 3.8 : Gaz akış kontrol sistemi

Sistemdeki gaz akışı ile deney odasının vakuma alınmasını sağlayan vakum pompası Şekil 3.9'da görülmektedir.

Şekil 3.9 : Vakum pompası

Plazma borlama ve plazma nitrürleme işleminde kullanılan güç kaynağı Şekil 3.10'da görülmektedir.

Şekil 3.10 : Güç kaynağı

Numuneler ve deney odası deneye başlamadan önce trikloretilen ile iyice temizlenmekte ve ardından deney odasına alt tabla üzerine yerleştirilmektedir.

Plazma borlama deneyleri için oluşturulan deney planı aşağıda verilen Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1: Plazma borlama deney planı

Numune Numarası	Sıcaklık (^oC)	Paslanmaz Çelik numarası	Süre(Saat)	Gaz Karışım Oranı
1-2-3-4-...-18	650	310	2	%10 BF_3, %40 Ar, %50 H_2
1-2-3-4-...-12	650	316L	2	
1-2-3-4-...-18	750	310	2	
1-2-3-4-...-12	750	316L	2	

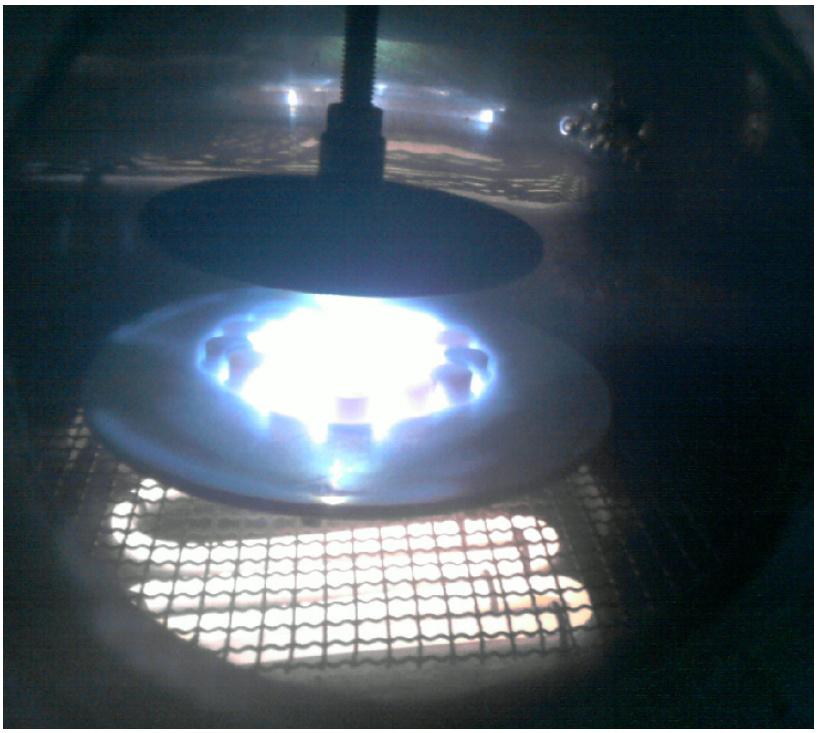
Bu plandan da görüleceği üzere, 650 ve 750^oC olmak üzere iki farklı sıcaklık ve iki metal tipi üzerinden %10 BF_3, %40 Ar, %50 H_2 gaz karışım oranında 2 saat süreyle plazma borlama işlemi yapılmıştır.

Deney planının bu şekilde seçilmesinde Bölüm1'de ayrıntılı olarak belirtilen literatür çalışmaları referans alınmıştır. Deney sıcaklıkları ve süre açısından temini zor ve pahalı olan BF_3 gazı miktarı etkili olmuştur. Literatürde belirtilen minimum başlangıç sıcaklıkları ve minimum sürede paslanmaz çelik 310 ve 316L metalleri yüzeylerindeki değişim mikrosertlik cinsinden kıyaslanmaya çalışılmıştır. Deneye başlamadan önce her metal tipinden rastgele seçilen üçer adet numuneden yüzeyde dört farklı noktadan alınan sertlik ölçümlerinin ortalaması ile borlama işlemi yapılmayan 310 ve 316L paslanmaz çeliklerin yüzey sertlikleri belirlenmiştir. Deney odasına toplam debisi 1000ml/dk olacak şekilde %10 BF_3, %40 Ar, %50 H2 oranlarında üç gaz karışımı gönderilmiştir.

310 ve 316L paslanmaz çelik numuneler deney odasına yerleştirildikten sonra deney odası kapatılmakta ve vakum pompası çalıştırılarak deney odasının vakuma alınması sağlanmaktadır. Deney odası yaklaşık 3-5mmHg (Torr) basınca geldikten sonra rezistans açılarak proses sıcaklığına yaklaşıncaya kadar ısıtılmaktadır. Daha sonra doğru akım güç kaynağı açılmakta ve Şekil 3.11'de görülen plazma (glow discharge) oluşması sağlanmaktadır.

Şekil 3.11 : Plazma oluşumu

Şekil 3.12'de alt rezistans açık durumda plazma proses görüntüsü görülebilir.



Şekil 3.12 : Alt rezistans açık durumda 750°C'de plazma oluşumu

Plazma oluşumu sağlandıktan sonra sisteme Ar ve H_2 gazları verilerek hem

numunelerin sıcaklıklarının artması hem de yüzeylerin temizlenmesi sağlanmaktadır. Numunelerin sıcaklığı proses sıcaklığına geldiğinde sisteme BF_3 gazı verilerek plazma borlama işlemi başlatılmaktadır. BF_3 gazı verilmeye başladıktan sonra sıcaklık ve basınç sabit tutulmaya çalışılarak 2 saat süre boyunca numunelerin borlama işlemi tamamlanmıştır. Gazların debisi şekil 3.8'de gösterilen debimetrelerle yapılmaktadır. Deney yapıldığı süre zarfında sürekli olarak sıcaklık, vakum kontrol edilerek sabit ve homojen borlama prosesi yapılmaya çalışılmıştır. Ayrıca deney odasının gözlem yapılmasını sağlayan cam bölmesi sayesinde proses boyunca ark oluşumunun doğruluğu ve parçaların tamamının vakumlanıp vakumlanmadığı kontrol edilmiştir. Alt tablanın merkezinden uzaklaştıkça oluşan ark ve vakum ortamı azalması sebebiyle bu bölgedeki numunelerdeki vakumun kontrolü açısından deney boyunca gözlem yapılması önem arz eder.deney planında belirlenen süre tamamlandğında güç kaynağı ile BF_3 ve H_2 gazları kesilerek sadece soygaz olan Ar gazı verilerek parçaların argon ortamında soğuması sağlanır. Parçalar oda sıcaklığına kadar soğutulduğunda argon gazıda kapatılarak deney odasının basıncının oda ortamına açık bir valfin yardımı ile yavaş yavaş atmosfer basıncına gelmesi sağlanır. Daha sonra deney odası şekil 3.4'te gösterildiği gibi açılarak parçalar deney odasından alınmaktadır. Böylece çalışmanın ilk kısmı olan borlama prosesi tamamlanmış olur. Daha sonra aynı prosesi 750°C olan numuneler içinde tekrarlandıktan sonra toplam 40 adet numune için borlama işlemi tamamlanmış olur.

Plazma borlama işlemi tamamlanmış 310 ve 316L paslanmaz çeliklerin görünümü Şekil 3.13'de belirtilmiştir.

Şekil 3.13 : Plazma borlanmış 310 ve 316L numuneleri

3.1 Plazma Borlama Deney Sertlik Sonuçları

Plazma borlama deneyleri sonucunda çıkan numuneler 4 farklı noktadan mikrosertlik ölçümleri yapılarak bu dört değerin ortalama değeri hesaplanmıştır. Borlama deney sonuçlarının belirtilmesinden önce herhangi bir termokimyasal işlem görmeyen 310 ve 316L paslanmaz çelik malzemelerin yüzey sertlik değerleri hesaplanmıştır. Borlanmamış numunelerde iki farklı metal tipi içinde dört farklı noktadan sertlik ölçümü yapılmış ve ortalama değer çıkartılmıştır. Borlama yapılmamış numunelerin sertlik değerleri Çizelge 3.2'de belirtilmiştir.

Çizelge 3.2: Borlanmamış 310 ve 316L paslanmaz çelik yüzey sertlik değerleri

Metal Tipi	**Numune Numarası**	**Ortalama Sertlik (numune sertliği)**	**Ortalama Sertlik(Metal tipine göre)**
310	1	255	234
310	2	218	
310	3	230	
316L	1	230	229
316L	2	230	
316L	3	227	

Çizelge 3.2'de belirtildiği üzere herhangi bir temokimyasal işlem uygulanmamış metallerin yüzey sertlik değerleri 310 için 234HV iken 316L için ise 229HV seviyesindedir. Plazma borlama işlemi uygulanan metallerin yüzey sertlik değerleri ile kıyaslanması açısından referans alınan yüzey sertlik değerleri bunlardır.

Çizelge 3.3'te plazma borlama işlemi uygulanmış 310 ve 316L paslanmaz çeliklerinin elde edilen yüzey sertlik değerleri görülmektedir.Çizelge 3.3’te borlama yapılan ilk deney numunelerin sertlik değerlerine göre bazı gruplarda borlama işlemi tekrar edilmiştir.

Çizelge 3.3 : Borlanmış 310 ve 316L paslanmaz çelik yüzey sertlik değerleri

Sıcaklık	Metal tipi	Numune numarası	Ortalama Sertlik Değeri (HV)
750	316	1	**589**
750	316	2	**907**
750	316	3	**563**
750	316	4	**1014**
750	316	5	**1006**
750	316	6	**561**
750	316	7	**514**
750	316	8	**869**
750	316	9	**463**
750	316	10	**867**
750	316	11	**631**
750	316	12	**447**
650	316	1	**500**
650	316	2	**549**
650	316	3	**511**
650	316	4	**486**
650	316	5	**525**
650	316	6	**443**
650	316	7	**509**
650	316	8	**557**
650	316	9	**539**
650	316	10	**588**
650	316	11	**612**
650	316	12	**600**
650	310	1	**542**
650	310	2	**439**
650	310	3	**463**
650	310	4	**416**
650	310	5	**369**
650	310	6	**452**
650	310	7	**435**
650	310	8	**505**
650	310	9	**462**
650	310	10	**517**
650	310	11	**419**
650	310	12	**413**
650	310	13	**486**
650	310	14	**504**
650	310	15	**507**
650	310	16	**386**
650	310	17	**509**
650	310	18	**487**
750	310	1	**607**

Çizelge 3.3 (devam): Borlanmış 310 ve 316L paslanmaz çelik yüzey sertlik değerleri			
750	310	2	**457**
750	310	3	**424**
750	310	4	**467**
750	310	5	**463**
750	310	6	**458**
750	310	7	**498**
750	310	8	**453**
750	310	9	**534**
750	310	10	**399**
750	310	11	**428**
750	310	12	**386**
750	310	13	**632**
750	310	14	**396**
750	310	15	**432**
750	310	16	**457**
750	310	17	**444**
750	310	18	**435**

Plazma borlama yapılan ilk deney sonucundaki sonuçlar itibariyle 750°C'de yapılan 310 paslanmaz çelik metallerinde vakum ortamının yetersiz olmasından dolayı yeterli seviyede sertlik sonuçları elde edilememiştir. Bu sebepten dolayı bu grupta yapılan borlama deneyi tekrar edilmiştir. 310 Paslanmaz çelik metallerine yapılan 2.borlama deneylerinin sonuçları Çizelge 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.4 : Borlanmış 310 paslanmaz çelik yüzey sertlik değerleri(2.deney)

Sıcaklık	Metal tipi	Numune numarası	Ortalama Sertlik Değeri (HV)
750	310	1	**448**
750	310	2	**1317**
750	310	3	**857**
750	310	4	**596**
750	310	5	**695**
750	310	6	**611**
750	310	7	**610**
750	310	8	**616**
750	310	9	**617**
750	310	10	**646**
750	310	11	**572**
750	310	12	**627**
750	310	13	**655**
750	310	14	**700**
750	310	15	**617**
750	310	16	**625**
750	310	17	**642**
750	310	18	**623**

2. Deney yapılmadan önce 310 paslanmaz çelik numunelerine tekrar yüzey parlatma işlemi uygulanmış, tekrar yüzey parlatma işlemi uygulanırken 1200 seviyesinde zımpara kağıdı kullanılmış ve metaller ilk yüzey sertlik değerlerine geri döndürülmüştür.

Yapılan 2.deney itibariyle ilk deneyde elde edilen ortalama 400HV seviyesindeki yüzey sertlikleri ortalama 600HV sertlik seviyesine getirilmiştir.

İlk deney sonucunda elde edilen yüzey sertlikleri itibariyle 650 °C'de oluşan yüzey sertlik değerleri beklenen seviyenin altında olması itibariyle 650°C'de yapılan plazma borlama deneylerinin tamamı tekrarlanmıştır. İlk deneyde istenen seviyede sertlik elde edilememesinin sebebi ise numune sayısının fazla olması sebebiyle alt tabla boyutunun büyük olması, bu sebeple merkezden uzak olan numunelerde yeterli seviyede vakum ve ark oluşturulamamasından kaynaklı sertlik seviyesinde düşüş görülmüştür. Bu sonuçlar itibariyle deney odasındaki alt tabla boyutu udaltılmış, bu sayede daha iyi bir ark oluşumu sağlanmıştır. Şekil 3.12 dikkatli incelendiğinde alt tabla boyutunun büyük olması durumunda merkezden uzak olan numuneerde yeterli seviyede vakum ve ark oluşturulamadığı görülmektedir.

Çizelge 3.5 : Borlanmış 310 paslanmaz çelik yüzey sertlik değerleri (2.deney)

Sıcaklık	Metal tipi	Numune numarası	Ortalama Sertlik Değeri (HV)
650	310	1	**468**
650	310	2	**705**
650	310	3	**670**
650	310	4	**619**
650	310	5	**554**
650	310	6	**697**
650	310	7	**636**
650	310	8	**639**
650	310	9	**617**
650	310	10	**654**
650	310	11	**582**
650	310	12	**530**
650	310	13	**528**
650	310	14	**544**
650	310	15	**593**
650	310	16	**692**
650	310	17	**677**
650	310	18	**624**

Şekil 3.11'de gösterilen ark oluşumu resminde ise daha küçük boyutlarda bir alt tabla kullanılması ile nispeten daha iyi bir ark oluşumu sağlanmış ve deney odasının

vakum seviyesi bütün numunelere nispeten daha homojen bir ark ve plazma ortamı oluşmasına yardımcı olmuştur.

Çizelge 3,5'te plazma borlama işlemi tekrar uygulanmış 310paslanmaz çeliklerinin 2. Deney sonucunda elde edilen yüzey sertlik değerleri HV derecesine göre belirtilmiştir. 2. Deney yapılmadan önce tekrar 1200 seviyesindeki zımpara ile yüzey temizleme ve çuhalama ile parlatma işlemi uygulanarak numuneler ilk yüzey sertlik seviyelerine getirilmiştir. 2.deney sonuçları itibariyle ilk deneyde elde edilen ortalama 500HV seviyesindeki sertlik ortalama olarak 600-650HV sertlik derecesine ilerleme görülmüştür. Bu ilerlemedeki temel ilerlemenin sebebi daha iyi bir vakum ve ark ortamı sağlanmış olmasıdır.

650°C'de yapılan ilk deney itibariyle beklenen seviyelerde yüzey sertliğine ulaşılamayan 316L paslanmaz çelik metalleri içinde plazma borlama deneyi tekrar edilmiş, yüzey sertliklerindeki iyileşme seviyesi incelenmiştir. Çizelge 3,6'da plazma borlama deneyi tekrar edilmiş 316L paslanmaz çeliklerin yüzey sertlik değerleri belirtilmiştir.

Çizelge 3.6 : Borlanmış 316L paslanmaz çelik yüzey sertlik değerleri (2.deney)

Sıcaklık	Metal tipi	Numune numarası	Ortalama Sertlik Değeri (HV)
650	316	1	**696**
650	316	2	**620**
650	316	3	**673**
650	316	4	**1029**
650	316	5	**1108**
650	316	6	**1200**
650	316	7	**1112**
650	316	8	**996**
650	316	9	**1048**
650	316	10	**925**
650	316	11	**1049**

2.deney itibariyle 316L paslanmaz çeliklerinde yüksek seviyelerde yüzey sertliği değerlerine ulaşılmıştır. Diğer deneylere oranla bu deneydeki değerlerin daha yüksek çıkmasının sebeplerinden biri vakum ortamının diğer deneylere oranla daha iyi seviyede tutulmasıdır. Bunun temel sebebi ise BF3 gazı ile çalışılmasına daha uygun olan silikon esaslı yağ kullanılarak vakum pompasının verminin arttırılmış olmasıdır.

4. PLAZMA NİTRÜRLEME DENEYİ

Plazma nitrürleme deneyi temel mantık olarak plazma borlama deneyi ile aynı olması sebebiyle deney prosedürü konusunda fazla detaya inilmemiş sadece plazma borlama deneyinden farklı olan kısımları belirtilmiştir. Deney odası plazma nitrürleme için İTÜ Makina fakültesi iyon nitrürleme laboratuvarında bulunan plazma borlamaya oranla daha ufak olan, dış çeperi deney esnasında prosesi gözlemlemeye imkan sunacak şekilde şeffaf plastik olan, dış çeperler arasında su dolu hazne sayesinde deney odasının dış haznesinin ısınarak deforme olmasını engelleyecek şekilde su dolaştırılarak çeperlerin soğuması sağlanmaktadır. Deney odasının vakum(basınç) sıcaklık ölçümü için kullanılan sistem plazma borlama deneyi ile aynıdır. Vakum(basınç) ölçümü için U tipi manometre kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümü için ise termoeleman(thermocouple) vasıtasıyla digital göstergeli termometre kullanılmıştır.

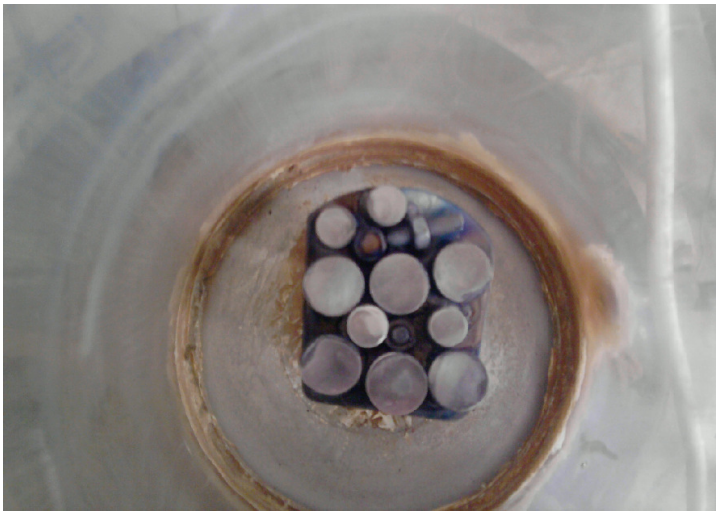
Sisteme gönderilecek gazların debilerinin ölçmek maksadıyla rotametre tipi debimetreler sisteme bağlanmıştır. N_2 gazının debisi 30-240 ml/dk kapasiteli bir debimetre ile, H_2 gazının debisi 0-50 ml/dk kapasiteli bir debimetre ile kontrol edilerek deney odasına gönderilmiştir.

Güç kaynağı olarak İTÜ iyon nitrürleme laboratuvarında bulunan 20kV / 10A kapasiteli güç kaynağı kullanılmıştır. Şekil 3,10'da üç kaynağı gösterilmiştir.

Şekil 4,1'de plazma nitrürleme deneyi için kullanılan deney odasının proses esnasındaki görünümü görülmektedir. Deney odasına malzeme yüklenebilmesi için deney odası vakumsuz iken üst kapağın manuel olarak kaldırılarak numuneler alt tabla üzerine yerleştirilir.

Şekil 4.1 : Plazma nitrürleme deney odası

Plazma nitrürleme deneyi için numunelerin alt tablaya yerleştirilmiş hali Şekil 4,2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Plazma nitrürleme deney odasına numunelerin yerleştirilmesi

Numunelerin sırasının ve daha önce uygulanan borlama işlem sıcaklıklarının karıştırılmaması sebebiyle Şekil 4,2'de gösterilen dizilim için üst sırada kullanılan 5 adet numunenin 650°C'de alt sırada kullanılan 5 numunenin ise 750°C'de olması ve numune sıralarının soldan sağa ilerleyecek şekilde dizilmiştir. Bu sayede numunelerin sertlik seviyelerinin kıyaslanması esnasında karışıklık engellenmiştir.

Plazma nitrürleme deneyi için kullanılan U tipi civalı manometre Şekil 4,3'te gösterilmiştir.

Şekil 4.3 : U Tipi civalı manometre

Uygun vakum ortamı sağlanabilmesi için minimum 10mm-Hg(torr) yada daha düşük

bir değerde vakum ortamı sağlanması gerekmektedir.

Plazma nitrürleme deneyi için kullanılan Azot gazının bulunduğu tüp Şekil 4,4'te gösterilmiştir.

Şekil 4.4 : Azot gazının bulunduğu tüp

Plazma nitrürleme deneyinde ve plazma borlama deneyinde alt tabla ve numunelerin sıcaklıklarının ölçümlerinin alınabilmesi için kullanılan dijital göstergeli termometre Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

Şekil 4.5 : Dijital göstergeli termometre

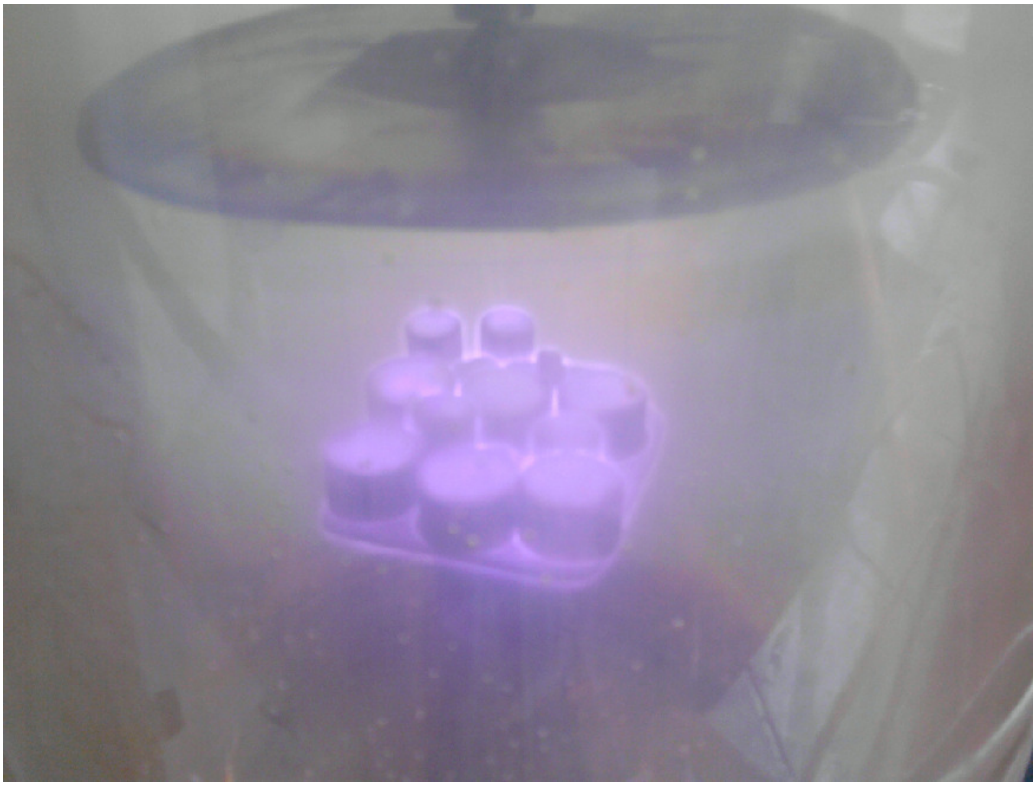
Plazma nitrürleme deneyleri için oluşturulan deney planı aşağıda verilen Çizelge4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4,1 : Plazma nitrürleme deney planı

Borlama Sıcaklık	Metal tipi	Numune numarası	Nitrürleme Sıcaklık (°C)	Süre
650	316L	**1**	**500**	2saat
650	316L	**2**	**500**	2saat
650	310	**1**	**500**	2saat
650	310	**2**	**500**	2saat
650	310	**3**	**500**	2saat
750	316L	**1**	**500**	2saat
750	316L	**2**	**500**	2saat
750	310	**1**	**500**	2saat
750	310	**2**	**500**	2saat
750	310	**3**	**500**	2saat
650	316L	**3**	**500**	8saat
650	316L	**4**	**500**	8saat
650	310	**4**	**500**	8saat
650	310	**5**	**500**	8saat
650	310	**6**	**500**	8saat
750	316L	**3**	**500**	8saat
750	316L	**4**	**500**	8saat
750	310	**4**	**500**	8saat
750	310	**5**	**500**	8saat
750	310	**6**	**500**	8saat

Çizelge 4.1'de de belirtildiği üzere 500°C'de 2 saat ve 8 saat olmak üzere iki farklı süre uygulanarak; daha önce 650°C ve 750°C'de plazma borlama işlemi uygulanan 310 ve 316L paslanmaz çeliklerine plazma nitrürleme işlemi uygulanmış ve yüzey sertlik değerlerinde olan iyileşmeler incelenmiştir.

Plazma nitrürleme deneylerinin yapılması için 310 ve 316L paslanmaz çelik numuneler deney odasına yerleştirildikten sonra deney odası kapatılmakta ve vakum pompası çalıştırılarak deney odasının vakuma alınması sağlanmaktadır. Deney odası yaklaşık 3-5mmHg (Torr) basınca geldikten sonra rezistans açılarak proses sıcaklığına yaklaşıncaya kadar ısıtılmaktadır. Daha sonra doğru akım güç kaynağı açılmakta ve Şekil 4.6'da görülen plazma (glow discharge) oluşması sağlanmaktadır.



Şekil 4.6 : Plazma nitrürleme deneyi ark oluşumu

Plazma oluşumu sağlandıktan sonra sisteme H_2 gazı verilerek hem numunelerin sıcaklıklarının artması hem de yüzeylerin temizlenmesi sağlanmaktadır. Numunelerin sıcaklığı proses sıcaklığına geldiğinde sisteme N_2 gazı verilerek plazma nitrürleme işlemi başlatılmaktadır. N_2 gazı verilmeye başladıktan sonra sıcaklık ve basınç sabit tutulmaya çalışılarak 2 saat süre boyunca numunelerin nitrürleme işlemi tamamlanmıştır. Aynı proses daha sonra 8 saat boyunca ikinci seriye de uygulanmış

ve plazma nitrürleme deneyleri tamamlanmıştır. Gazların debisi Şekil 4.7'de gösterilen debimetrelerle yapılmaktadır. Deney yapıldığı süre zarfında sürekli olarak sıcaklık, vakum kontrol edilerek sabit ve homojen nitrürleme prosesi yapılmaya çalışılmıştır. Ayrıca deney odasının gözlem yapılmasına olanak sağlayan şeffaf yapısı sayesinde proses boyunca ark oluşumunun doğruluğu ve parçaların tamamının vakumlanıp vakumlanmadığı kontrol edilmiştir.

Şekil 4.7 : Plazma nitrürleme deneyi gaz debi kontrol ünitesi

Solda bulunan debimetre ile Azot gazı ortadaki dbimetre ile hidrojen gazının debisi kontrol edilmiş ve deney odasına % 50H_2 + %50 N_2 gazı verilerek plazma nitrürleme deneyleri yapılmıştır.

4.1 Plazma Nitrürleme Deney Sonuçları

Plazma nitrürleme deney sonuçlarının belirlenebilmesi için çıkan numunelerin yüzeyinden rastgele 4 farklı noktadan ölçüm alınmış ve ortalama değer çıkarılmıştır. Karşılaştırılabilmesi için numunelerin borlama prosesinden sonrasındaki sertlik değeride çizelgelere eklenmiş ve iyileşme miktarları incelenmiştir. Literatürde belirtildiği üzere plazma borlama ve nitrürleme prosesi için süre uzadıkça parçalara emdirilebilen bor ve ya azot miktarındaki artışa bağlı olarak daha yüksek sertlik değerleri elde edilebilmektedir. Plazma nitrürleme deneyleri için 2 saat ve 8 saat süreyle uygulanan nitrürleme deneyi ile sertlik seviyeleri kıyaslanmış sonuç olarak sürenin sertlik seviyesindeki artışa etkisi gösterilmeye çalışılmıştır.

Çizelge 4.2'de plazma nitrürleme prosesi 2 saat sürele uygulanan numunelerin yüzey sertlik değerleri ve bu numunelerin daha önce plazma borlama prosesi uygulandıktan sonraki yüzey sertlik değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 : Plazma nitrürleme deney sonuçları (2 saat)

Borlama Sıcaklık	Metal tipi	Numune numarası	Nitrürleme Sıcaklık (°C)	Süre	Ortalama (HV)	Bor sonrası Sertlik (HV)
650	316L	**1**	**500**	2saat	**960**	**696**
650	316L	**2**	**500**	2saat	**936**	**620**
650	310	**1**	**500**	2saat	**1055**	**468**
650	310	**2**	**500**	2saat	**1734**	**705**
650	310	**3**	**500**	2saat	**1545**	**670**
750	316L	**1**	**500**	2saat	**1175**	**589**
750	316L	**2**	**500**	2saat	**1454**	**907**
750	310	**1**	**500**	2saat	**2025**	**607**
750	310	**2**	**500**	2saat	**2404**	**457**
750	310	**3**	**500**	2saat	**1596**	**424**

Plazma nitrürleme deneyi 2 saat süreyle uygulandığında önceki sertliklerine oranla parçalarda ortalama olarak 2 kat sertlik artışı gözlemlenmiştir. Nitrürleme deneyi 2 saat süreyle uygulandığında 310 paslanmaz çelikte 316L paslanmaz çeliğe oranla daha fazla sertlik değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.3'te plazma nitrürleme prosesi 8 saat süreyle uygulanmış numunelerin yüzey sertlik değerleri ve daha önce borlama prosesi sonrasındaki sertlik değerleri karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Plazma nitrürleme deney sonuçları (8 saat)

Borlama Sıcaklık	Metal tipi	Numune numarası	Nitrürleme Sıcaklık (°C)	Süre	Ortalama (HV)	Bor sonrası Sertlik (HV)
650	316L	3	500	8saat	2609	673
650	316L	4	500	8saat	2594	1078
650	310	4	500	8saat	1778	670
650	310	5	500	8saat	1458	619
650	310	6	500	8saat	2169	554
750	316L	3	500	8saat	1813	563
750	316L	4	500	8saat	2315	1014
750	310	4	500	8saat	1880	857
750	310	5	500	8saat	2316	596
750	310	6	500	8saat	2502	695

Plazma nitrürleme deneyi 8 saat süreyle uygulandığında ise yüzey sertliğinde ulaşılan değerler 2 saate oranla çok daha yüksek çıkmıştır. İlk sertlik değerlerine oranla 3 kat yada daha fazla oranda sertlik elde edilmiş ve literatürde belirtilen

sadece plazma borlama prosesi ile elde edilebilecek sertlik değeri olan 1800-2100HV değerinden ve sadece plazma nitrürleme prosesi ile elde edilebilecek 1300-1500HV sertlik seviyelerinden daha yüksek değerlere ulaşılabilmiştir.

Plazma nitrürleme deneyi ile elde edilen sonuçlar itibariyle yüksek sertliklere ulaşılmıştır. Ancak karşılaştırma yapılabilmesi için sadece plazma nitrürleme prosesi 316L paslanmaz çeliğe 2 saat süre ile uygulanmış ve yüzey sertliğinde olan değişim incelenmiştir.

Plazma nitrürleme prosesi uygulanmayan 316L paslanmaz çeliğinin sertliği 230 HV seviyesinde iken 2 saat süre ile 500°C 'de plazma nitrürleme prosesi uygulanan 316L paslanmaz çeliğin Sertliği 441HV seviyesine yükselmiştir. Bu sonuç kısa süreli işlemleri kıyasladığımızda plazma borlama prosesi ile ulaşılabilen sertlik seviyelerinin plazma nitrürleme işlemine oranla daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.4 : 316L Paslanmaz çelik plazma nitrürleme deney sonucu (2 saat)

Plazma Nitrürleme Deney Sonucu								
Metal tipi	Nitrürleme Sıcaklık	Nitrürleme Süre	Numune numarası	Sertlik_1.ölçüm	2. ölçüm	3. ölçüm	4. ölçüm	Ortalama
316L	500	2	-	483	381	450	450	441

Bu deneyin sonucu olarak plazma nitrürleme prosesinin tek başına sadece 2 saat uygulanması durumunda yeterli sertlik seviyelerine ulaşılamayacağı tespit edilmiştir.

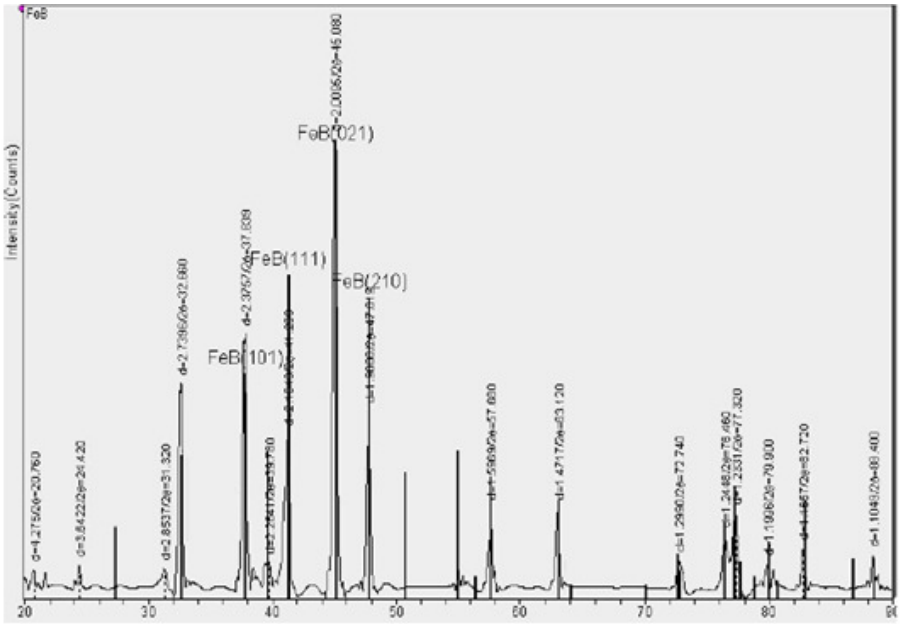
Yüksek sertlik seviyelerine ulaşılabilmesi için iki prosesinde paslanmaz çeliğe uygulanması gerekitği tespit edilmiştir.

Plazma borlama ve plazma nitrürleme prosesleri sonrasında yüksek sertlik seviyelerine ulaştırılan paslanmaz çelik numunelerine yüzeyde bulunan bor ve azot'un cBN şeklinde çökelmesine zorlanması için ısıl işlem uygulanmış ve bu işlem sayesinde plazma borlama ve plazma nitrürleme prosesinin paslanmaz çeliğe hangi sıra ile uygulandığında daha yüksek değerlere ulaşılacağı tespit edilmeye çalışılmıştır.

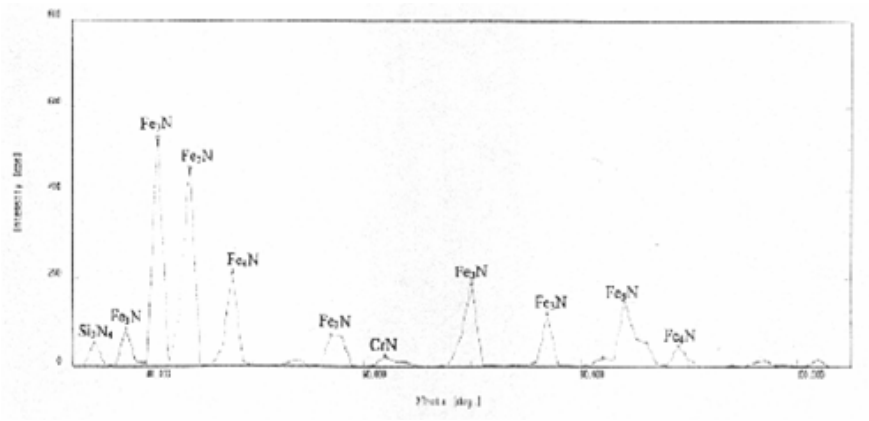
5. XRD ANALİZİ

5.1 XRD Analizi için Uygun Açının Belirlenmesi

Plazma borlama ve plazma nitrürleme işlemleri uygulanmış malzemelerin hangi açılarda tarama yapılması gerektiğinin tespit edilmesi için literatürce plazma borlama ve plazma nitrürleme yapılan deneylerde kullanılan açılar tespit edilmiştir.



Şekil 5.1 : Paslanmaz çelik plazma borlama XRD grafiği [40]

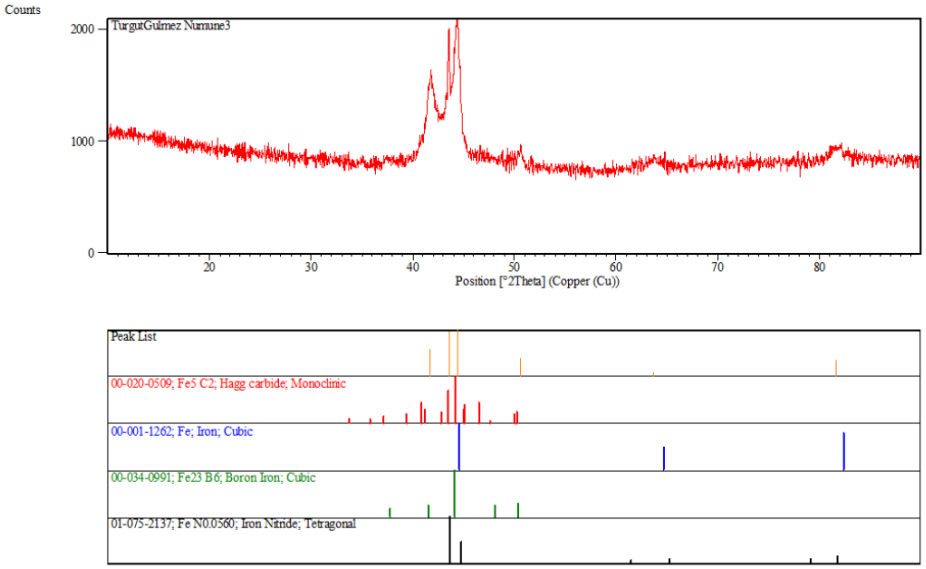


Şekil 5.2 : Paslanmaz çelik plazma nitrürleme XRD grafiği [41]

Plazma borlama prosesi için 30-90 derece aralığında demir-borür gözlemlenmiş, plazma nitrürleme prosesi için ise 10-100 derece aralığı tercih edilmiştir. Bu sebeple plazma borlama ve bu numunelerin üzerine plazma nitrürleme prosesi uygulanan numuneler için 0-100 derece aralığı tercih edilmiştir.

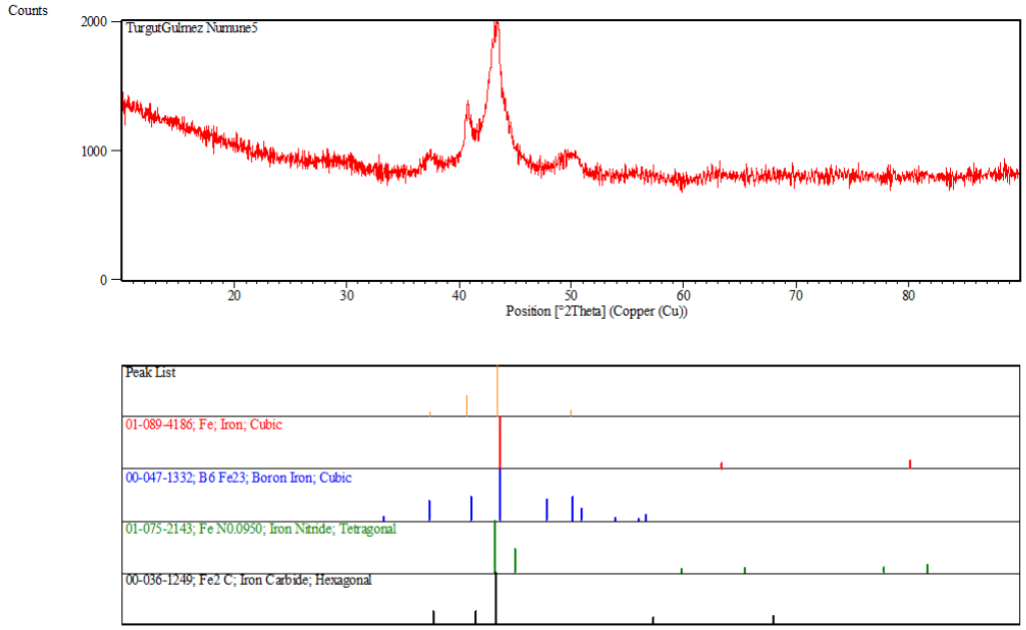
5.2 XRD Analiz Sonuçları

2400 HV seviyelerinde olan numuneler XRD analizine gönderilmi ve sonuçları incelenmiştir.



Şekil 5.3 : XRD Grafiği (3 numaralı numune)

Yapılan XRD analizleri itibariyle numunelerin içinde FeB, Fe_2B, FeN görülmüştür. Bu sonuç yapılan plazma borlama ve plazma nitrürleme prosesleri itibariyle elde edilmeye çalışılan yapının paslanmaz çelik 310 ve 316L metalinde elde edilebildiğini göstermektedir.



Şekil 5.4 : XRD Grafiği (5 numaralı numune)

5 numaralı numunede de aynı şekilde FeB, Fe_2B, FeN görülmüş ve sertlik artışındaki temel unsur olan bor ve azot'un başarılı bir biçimde paslanmaz çeliğin içine difüz edilebildiği görülmüştür. XRD deneyleri yapılıken kullanılan bakır katot sebebiyle elde edilebilen K(alpha) boyutu olan 1,54060 A değeri, demirborür ve demir nitrür için çok yakın olası sebebiyle hassas ölçüm yapmaya müsade etmemektedir.

XRD sonuçları itibariyle parçalarda FeB, Fe_2B, FeN bulunduğunu doğrulamış fakat cBN yapının elde edilip edilemediğini ispatlayamamıştır. Bunu ispatlayabilmek için bakır katot yerine demir yada molibden katot'a sahip olan bir XRD makinesi ile XRD analizlerinin yapılması gerekmektedir.

6. DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI VE ÖNERİLER

Plazma borlama ve plazma nitrürleme prosesi uygulanan 310 ve 316L paslanmaz çeliklerinin yüzey sertlik değerleri ilgili bölümlerde çizlege'lerde belirtilmiştir. Bu sonuçlar itibariyle herhangi bir termokimyasal yüzey sertleştirme prosesi uygulanmamış 310 ve316L paslanmaz çeliği yüzey sertlik değerleri 230Hv seviyelerinde iken bu yüzey sertliği 2600HV seviyelerine kadar iyileştirilebildiği görülmüştür. Bu kısımda her numunede bu sertlik seviyesine ulaşılamamsının sebepleri ve prosesin daha iyi hale getirilebilmesi için öneriler belitilecektir.

6.1 Vakum Pompası Seçimi ve Kullanımı

Plazma borlama ve nitrürleme prosedürü için en önemli unsurlardan biri deney odasının vakum(basınç) seviyesinin proses boyunca sabit kalabilmesi ve 3-5mm-Hg(torr) seviyesinden daha aşağıya inmemesidir. Bu proses için vakum pompası seçimi yüksek önem teşkil etmektedir. Özellikle borlama prosesi sırasında karşılaşılan en önemli problemlerden biri daha önce denenen yeterli güce sahip olmaya vakum pompalarındaki yağın buharlaşarak deney odasına sızması ve deney ortamının vakum seviyesini yükselterek deney verimini düşürmesidir. Bu temel itibariyle iki sebepten kaynaklanmıştır. Birinci sebep seçilen vakum pompalarının motor gücü ve vakumlayabileceği maksimum debinin nispeten daha büyük olan borlama tankının hacmini vakumlayabilecek seviyede olmamasıdır. Deney esnasında çıkılan sıcaklıkların yüksek olması sebebiyle ortamdan vakumlanmaya çalışılan havanın sıcaklığının yüksek olacağı bu sebeple vakum pompasının bu sıcaklıktaki gazlarda herhangi bir sorun oluşturmayacak şekilde vakumlama yeteneğine sahip olması gerekmektedir. İkinci nokta ise özellikle borlama prosesi için kullanılan BF_3 gazı ile çalışmaya uygun yağ seçimidir. İlk deneylerde kullanılan sentetik esaslı vakum pompası yağının BF_3 gazının sentetik yağ ile etkileşime girerek yağın özelliğini kaybetmesine sebep olmasıdır. İlk deneylerde elde edilen değerlerdeki düşüklüğün temel sebeplerinden biri vakum pompasındaki verim kaybından kaynaklı olan basınç düşümü ve yeterli seviyede vakum oluşturulamamsından dolayı özellikle

alt plaka merkezinden nispeten uzak konumda olan numunelerin işleme yeterli seviyede maruz kalamamasıdır. Bu yüzden merkezden uzak olan numunelerde sertlik sevie 500HV seviyelerindde kalmış ve daha fazla arttırılamamıştır. Yapılan araştırmalar itibariyle BF3 gazı ile çalışmaya en uygun olan vakum pompası yağının silikon esaslı yağ olduğu anlaşılmış ve deneyler tekrar edilirken yağ silikon esaslı yağ ile değiştirilerek deneyler tekrar edilmiştir. Bu değişim vakum pompası verimini arttırdığı gibi yapın buharlaşarak deney doasına geri gitmesini engellemiş ve vakum düşmeden prosesin tamamlanabilmesine olanak sağlamıştır. Denemeler boyunca birçok vakum pompası denenmiş fakat verim alınamamıştır. Yapın buharlaşmadan tanka geri dönüşünü engelleyen yoğuşma haznesine sahip olan 1952 model leybold D2 modeli ile deneyler başarılı şekilde tamamlanabilmiştir. Daha sonraki çalışmalar için vakum pompası ve yağ seçiminde kullanılan gaza uygun yağ seçimi ile çok daha verimli bir proses elde etmek mümkündür.

6.2 Uygun Matrisli Metal Seçimi

Plazma borlama ve nitrürleme prosesi üst üste aynı numunelere uygulanacağından doalyı cBN prosesine uygun metal matrisinin seçimi bu proses için önemlidir. cBN kafes yapısının a parametresi olan 3,65A değerine uygun metal matrislerin seçimi ayrıntılı biçimde önceki bölümlerde açıklanmıştır. Kübik yapıya sahip cBN için hacim merkezli yada yüzey merkezli kübik yapıya sahip metal seçimi ile daha verimli bir proses elde edilebileceği gözlemlenmiş, literatürde tavsiye edilen sıcaklık ve süre değerlerinden daha düşük değerler denenmesine rağmen yüksek sertlik değerlerine ulaşılabilmiştir. Metal seçimi esnasında içinde barındırdığı diğer metallerin borlama ve nitrürlemeye uygun olması da prosesin verimini arttırıcı etkilerdendir. Kısa süreli bolama ya da nitrürleme esnasında demir atomlarına tutunmaya çalışan bor ve azot'unda diğer metallerede tutunabilmesi açısından verimi arttıracak,içeride bulunan azot ver bor miktarını arttırmada yardımcı olacaktır, bu sebeple içerik olarak zengin miktarda krom barındıran metaller tercih edilmiştir.

6.3 Ark Oluşumunun İyileştirilmesi

Plazma borlama ve nitrürleme prosesi için düzgün ark oluşumu önemlidir. Düzgün ark oluşumu için alt ve üst tablanın yüzeylerinin, aynı şekilde proses uygulanacak olan metallerin yüzeylerininde temiz olması elektrik iletimini iyi yönde etkileyecek

şekilde temizlenmesi esastır. Trikloretilen ile her deney öncesi tank ve tablaların temizlenmesi, numunelerin tekrardan temizlenerek deneye başlanması ark oluşumunu engelleyici unsurların iki tabla arasından uzaklaştırılamasına yardımcı olan unsurlardır. Ark oluşumu için anot ve katot arasındaki yük transferi sayesinde olacağından dolayı elektronlar en kısa mesafeyi kullanmaya çalışacaklardır, bu sebepten dolayı iki tabla arasında ark oluşumunu engelleyici unsurlar bulunmamalıdır. Borlama deneyi esnasında sızdırmazlık elemanı olarak kullanılan teflonun civata ile sıkılması sebebiyle ark oluşumun civata ile tankın dış çeperei arasında oluşmuş ve deney başarısız olmuştur, anot ile katotun birbirinden fazla uzak olmamasıda verimi arttırıcı unsurlardandır. Ark oluşumunda bir diğer faktörde oluşturulan ark'ın yoğunluğudur. Alt tabla ve üst tabla arasındaki boyut farkı yoğun ark oluşumunu engelleyici olmamalıdır. Alt tablanın büyük kullanılması durumunda merkezden uzak durumda olan numunelerin yeterli seviyede ark oluşturulamadığı be sebeplede yeterli seviyede bor atomlarının yüzeye emdirilemediği gözlemlenmiştir. Bu sebeple tekrarlanan deneylerde alt tabla boyutu ufaltılmış, ark daha yoğun bir şekilde bütün numunelere nispeten daha hoojen bir şekilde oluşturulması sağlanmıştır. Borlama deneylerinin tekrar edildiği süreçte daha ufak ebatta alt tabla kullanımı, ark oluşumunu iyileştirmiş ve numunelerin merkezden uzak olmaksızın borlanabilmesi sağlanmıştır.

6.4 Sıcaklık Ölçümünün İyileştirilmesi

Sıcaklık ölçümü alt tablaya bağlı termoeleman yardımıyla yapılmasından dolayı alt tabla boyutu ve numune yüzeylerinin temizliği bu açıdan önem arz etmektedir. Termoeleman'ın alt tabladaki sıcaklık ölçümünün bütün numunelerde aynı olduğu varsayımı üzerine deneyler yapılmasından dolayı, alttabla boyutunun sıcaklık ölçümü açısından daha verimli olması gerekliliği ile birlikte, mümkün olduğu kadar ufak ebatta bir alt tabla kullanımı, proses esnasındaki sıcaklık ölçüm değerlerinin daha hassas ve yakın ölçülmesine katkısı bulunacaktır. Deney esnasında uzaktan lazer ile ölçüm yapmaya yarayan sıcaklık ölçer cihazlar vasıtası ile sıcaklıklar kontrol edilmiş, göstergede okunan değere yakın değerlerde bormlama ve nitrürleme prosesi yapıldığı kontrol edilmiştir.

6.5 Sızdırmazlık Özelliğinin Önemi ve Sonuçlara Etkileri

Plazma borlama ve nitrürleme prosesi belli basınç ve sıcaklık altında, belirli sürelerde uygulanması gereken bir prosestir. Bu sebeple deney esnasında deney odalarının sızdırmazlığı yüksek önem teşkil eder. Deney odasında oluşacak olan herhangi bir sızdırma problemi deney odasının vakumunu düşürecek ve deneyin başarısızlığına sebep olacaktır, ayrıca yüksek sıcaklıklarda yapılan deneyler olması sebebiyle bu sıcaklıkta dış atmosferden sızacak olan havanın içindeki oksijen, oksitlenmeye ve korozyona sebep olacak numunelerin kimyasal yapısı ve sertlik değerleri açısındanda kötü anlamda değerlerini etkileyecektir. Deney odalarının sızdırmazlığı bu sebeplerden dolayı yüksek önem teşkil eder. Deney odalarının birçok parçanın montajı ile oluşan ekipmanlar olması sebebiyle parçaların bağlantılarının yapıldığı kısımlardaki sızdırmazlık önemlidir, genel olarak en fazla sızdırmazlık yaratan kısımlar bu bölgelerdir. Bu bölgelerin sızdırmazlık özelliklerinin iyileştirilmesi için sızdırmazlık ekipmanlarının seçimi önemlidir.

Diğer dış atmosfere bağlantılarının sağlandığı noktalardaki sızdırmazlık özelliklerinin iyileştirilmesi prosesin verimini arttırıcı özellikleridir. Manometre bağlantışarı, gaz giriş ve çıkış vanaları, vakum pompası bağlantılarının sızdırmazlık ekipmanları ile iyileştirilmesi, özellikle gaz giriş bölgelerinde dış atmosfer gazlarının sızmaması açısından önem arz eder. Bu bölgelerin her deney öncesinde ve esnasında kontrolü deneyin verimini arttırıcı unsurlardır.

Sadece deney odasının mükemmel sızdırmazlık özelliğine sahip olması, plazma borlama ve nitrürleme prosesi açısından yeterli değildir. Vakum pompasınında aynı şekilde sızdırmazlık özelliklerinin prosese önemli etkisi bulunmaktadır. Vakum pompaları 5 adet döküm parçanın montajı ile oluşan bir makine olması sebebiyle bu bölgelerdeki sızdırmazlık problemi vakumun verimini düşürecek ve aynı şekilde deney odasındaki vakum değerinde düşüşe sebep olacaktır. Vakum pompası levhalarının arasındaki geçişler ve vakum pompasının bağlantı elemanlarının temizliği ve sızdırmazlığı proses açısından önem arz eder.

6.6 Sıcaklığın Deney Sonuçlarına Etkisi

Plazma borlama ve nitürleme prosesi termokimyasal yüzey işlemleri olması sebebiyle seçilen sıcaklığın önemi büyüktür. Literatürde paslanmaz çelik için 850-

1050°C aralığında ortalama 8 saat süreyle uygulanması tavsiye edilmektedir. Bor gazının zehirli ve pahalı olması sebebiyle, ayrıca sıcaklığı yüksek seviyede sabit tutmak ta prosesin zorluk seviyesini ve maliyetini arttırması sebebiyle bu çalışmada daha düşük sıcaklık va zamanlarda yüzey sertliğindeki iyileşme miktarı tespit edilmiştir. Literatürde tavsiye edilen sıcaklık ve süreler uygulandığında makisimum seviye olarak 1800-2100HV seviyelerine ulaşılabileceği belirtilmiştir. Bu çalışmada 650 ve 750°C seviyelerinde sadece 2 saat borlama prosesi uygulanarak 1000HV bunun üzerine 2 saat 500°C'de nispeten daha basit ve zararsız olan nitrürleme prosesi uygulanarak 2000HV seviyelerine çıkılabileceği görülmüştür. Borlama ve nitrürleme deneylerinde sıcaklık artışının deneye olumlu yönde etkisi olduğu 750°C'de elde edilen sertlik değerlerinin daha yüksek olması sayesinde anlaşılabilir. Proses için kullanılan metalin eşik değerinden yüksek bir değerde bu işlemin uygulanması gerekmektedir, aksi takdirde sertlik seviyesindeki artış belli bir seviyenin üzzerine çıkılamayacaktır.

Çizelge 6.1 : Deney sonuçları itibariyle en yüksek ulaşılabilen sertlik değerleri

Borlama Sıcaklık	Metal tipi	Numune numarası	Nitrürleme Sıcaklık (°C)	Süre	Ortalama (HV)	Bor sonrası Sertlik (HV)
650	316L	**1**	**500**	2saat	**960**	**696**
650	316L	**2**	**500**	2saat	**936**	**620**
650	310	**1**	**500**	2saat	**1055**	**468**
650	310	**2**	**500**	2saat	**1734**	**705**
650	310	**3**	**500**	2saat	**1545**	**670**
750	316L	**1**	**500**	2saat	**1175**	**589**
750	316L	**2**	**500**	2saat	**1454**	**907**
750	310	**1**	**500**	2saat	**2025**	**607**
750	310	**2**	**500**	2saat	**2404**	**457**
750	310	**3**	**500**	2saat	**1596**	**424**

Çizelge 6.1'de en yüksek seviyede sertlik elde edilen numuneler listelenmiştir ve bu numunelere uygulanan sıcaklıklar gösterilmiştir.

Çizelge 6.1'de yeşil olarak işaretlenen ilk numunelerde 750°C'de borlanan 310 paslanmaz çeliklerinde daha yüksek seviyelerde yüzey sertliği görülmüştür. 650°C'de borlanan numunelere oranla daha yüksek seviyede sertlik elde edilmiş olması da sıcaklığın borlama prosesinde önemli olduğunu sıcaklık yükseldikçe elde edilen sertlik değerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

6.7 Sürenin Deney Sonuçlarına Etkisi

Plazma borlama ve nitrürleme deneyleri termokimyasal işlemler olması sebebiyle, işlem uygulama süresi uzadıkça olumlu yönde sertlik artışına sebep olur. İşlem süresi artması ile birlikte yüzeye emdirilen azot mikarının artışı ile bor ve azot atomlarının birlikte cBN yapısında çökmeye zorlanması sertlikte yüksek seviyelerde artışa sebep olmaktadır.

Çizelge 6.2 : Plazma nitrürleme sonrası sürenin sertliğe etkisi

Borlama Sıcaklık	Metal tipi	Numune numarası	Nitrürleme Sıcaklık (°C)	Süre	Ortalama (HV)	Bor sonrası Sertlik (HV)
650	316L	**1**	**500**	2saat	**960**	**696**
650	316L	**2**	**500**	2saat	**936**	**620**
650	310	**1**	**500**	2saat	**1055**	**468**
650	310	**2**	**500**	2saat	**1734**	**705**
650	310	**3**	**500**	2saat	**1545**	**670**
650	316L	**3**	**500**	8saat	**2609**	**673**
650	316L	**4**	**500**	8saat	**2594**	**1078**
650	310	**4**	**500**	8saat	**1778**	**670**
650	310	**5**	**500**	8saat	**1458**	**619**
650	310	**6**	**500**	8saat	**2169**	**554**
750	316L	**1**	**500**	2saat	**1175**	**589**
750	316L	**2**	**500**	2saat	**1454**	**907**
750	310	**1**	**500**	2saat	**2025**	**607**
750	310	**2**	**500**	2saat	**2404**	**457**
750	310	**3**	**500**	2saat	**1596**	**424**
750	316L	**3**	**500**	8saat	**1813**	**563**
750	316L	**4**	**500**	8saat	**2315**	**1014**
750	310	**4**	**500**	8saat	**1880**	**857**
750	310	**5**	**500**	8saat	**2316**	**596**
750	310	**6**	**500**	8saat	**2502**	**695**

Borlama deneyi için yapılan deneylerde sürenin minimum seviyede tutularak sürenin etkisi, nitrürleme deneyi için sie minimum sıcaklıkta süre varyasyonu incelenmiştir.

Çizelge 6.2'de nitrürleme deneyleri sonrasında elde edilen sonuçlarda sürenin etkisi gösterilmeye çalışılmıştır. Çizelge 6.2'de görüldüğü üzere 2 saat ile 8 sat yapılan nitrürleme deneyleri sonrasında aynı metal tipleri için kıyaslandığında 8 saat sonuçlarında daha yüksek değerlere ulaşılabildiği görülmektedir. Örnek olarak; 650°C'de borlanan ve 2 saat için nitrürlenen 310 paslanmaz çelikteki metalindeki yüzey sertliği değeri 1545HV iken 650 °C'de borlanan ve 8 saat için nitrürlenen 310 paslanmaz çelik için bu değer 2169HV seviyesinde değer elde edilmiştir. Sürenin artışı sertlik seviyesinde artış göstermiştir, süre uzadıkça yüzeye emdirilebilen aot

seviyesindeki artış sertliği de iyi yönde geliştirmiştir.

6.8 Plazma Borlama ve Nitrürleme İçin Optimum Süre ve Sıcaklık

Plazma borlama ve nitrürleme prosesi uygulanan 310 ve 316L paslanmaz çelik metalleri için 750°C'de 2 saat borlama işlemi uygulandığında ve 500°C'de 8 sat nitrürleme prosesi uygulandığında 2500HV seviyelerinde sertlik elde edilebileceği tespit edilmiştir. Sadece borlama prosesi uygulanarak elde edilbilen sertlik seviyesi 2100HV iken nispeten daha tehlikesiz ve daha ucuz şekilde 2100HV seviyesine ulaşılabilmesi için 650°C'de 2 saat borlama ve 500°C seviyesinde 2 saat nitrürleme uygulanabileceği bu çalışma itibariyle tespit edilmiştir. Nitrürleme prosesi borlama prosesine oranla kullanılan gazların zehirsiz olması itibariyle ve çıkılan sıcaklık seviylerinin literatürde borlama için tavsiye edilen 850-1050°C aralığında 8 saat süresine oranla çok daha ucuz ve kolay olmasına sebep olacaktır. Bu çalışma itibariyle borlama prosesinin üzerine nitrürleme prosesi uygulanarak metal matrisin içine bor ve azor atomları emdirilerek cBN çökelmeye zorlanması yüzey sertliğinde önemli yükselmelere, herhangi bir işlem görmeyen 230HV seviyesindeki metalin 2600HV seviyelerine çıkarılabileceği gösterilmiştir. Plazma borlama ve nitrürleme prosesi ilerleyen teknoloji ile birlikte; sızdırmazlık ekipmanlarındaki gelişme; vakum pompası teknolojisinin ilerlemesi ile birlikte daha güvenli bir şekilde uygulanabilir hale getirilmiş, 1980'lerde başlayan araştırmalar, günümüzde bu konu ile lgili birçok bilimadamını ve akademisyeni bu konu ile ilgilenmeye itmiş ve plazma borlama ve nitrürleme porsesinin önemli temokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden biri olduklarını göstermiştir.

KAYNAKLAR

[1] **Khoee, S M M ,** 1992: Ergimiş Boraks Banyosunda Çeliklere Vanadyum Karbür Kaplama, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, si 12, Istanbul.

[2] **Bozkurt,N.,** 1984: Bor Yayınımıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Enst., İstanbul.

[3] **Göy Z.,** 1984: Borlama Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Enst., İstanbul.

[4] **Pengxun,Y.,** 1992: Gaseous Boronizing with solid- boron-yielding agents Thin Solid Films., Vol 214,44-47p., N-1 Jun30 .

[5] **Şahin S.,** 1999: Katı Borlama Yöntemiyle Ferrobor Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora tezi, Celal Bayar Üni. , Fen Bilimleri Enstitüsü.

[6] **Kunst, H., and Schaaber, O.,** 1972: Beobachtungen Beim Oberflachen Borieren. Von Stahl III HTM.22 Heft Vol 4 275 – 292p.

[7] **Fichtl, W.,** 1981: Boronizing and its Practical Applications Materials in Engineering. 2:276-286.

[8] **Selçuk, B.,** 1994: Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, E. Ü. Fen Bil. Enst. Kayseri.

[9] **Geller Y.,** 1978: Tool Steels. (Trans. Afanasyev, V. V.) Mir Publishers,666p., Moscow.

[10] **Sinha, A. K.,** 1991: Heat Treating. ASM Handbook, Vol4, pp 437-447.

[11] **Krzyminski, h., and Kunst, H. T.,** 1973: Borieren refracter metalle, Harterei Tecnische Mittelungen, Vol28 100-112p.

[12] **Matuschka, A. G.,** 1980: Boronizing. Carl Hanser Verlag München.

[13] **Özsoy, A.,** 1996: Çeliğin Borlanmasında borür tabakası, geçiş zonu ve ana matrisin özelliklerinin iyileştirilmesi. Doktora Tezi, Anadolu Üni., Fen Bil. Enst. Eskişehir.

[14] **Rile, M.,** 1974: Reasons for the Formation of Cracks in Boride Coatings on Steel. Met.Sci.Heat Treat., 16 836-839.

[15] **Babushkin, B. V., Polyakov, B. Z.,** 1973: Residual stresses in Steel After Boriding From melts. Met. Sci. Heat Treat, Vol 15, 577-580p.

[16] **Budinski, K. G.,** 1993: The Wear to Difusion Treated surfaces. Wear 162-164, 757-762.

[17] **Bindal, C.,** 1991: Az Alaşımlı Karbon çeliklerinde Borlama ile Yüzeye kaplanan Borürlerin Bazı Özelliklerinin Tespiti. Doktora Tezi, İTÜ.

[18] **Hunger H. J. and True G.,** 1994: Boronizing to Produce Wear- resistant Surface Layers. Heat treatment of Metals, 2 31-39.

[19] **Genel K., Özbek İ. And Bindal C.,** 2003: Kinetics of Boriding of AISI W1 steel" Materials Science and Engineering A 347, 311-314.

[20] **Nam K.S. Lee K.H. Lee S.R. Kwon S.C.,** 1998: A study on plasma assisted boriding of steels. Surface and coatings technology 98, 886-890.

[21] **Wilbur, P.J., Davis, J.A., Williamson, D.L., Vajo, J.J. And Wei R.,** 1997: High current Density broad beam boro iyon implantation. Surface and Coatings technology 96, 52-57.

[22] **Iakovou, R., Bourithis, L., Papadimitriou, G.,** 2002: Synthesis of boride coatings on steel using plasma sintering (SPS) technique. Surface coatings technology 157, 226-230.

[23] **Uluköy, A. , Can A. Ç.,** 2005 **:** Çeliklerin Borlanması. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü.

[24] **Uzun H.A.,** 2002: Borlama ile Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları. Yüksek Lisans Tezi, SDÜ Fen Bil. Enst.

[25] **Mal K.K., Tarkan S.E.,.** 1973 : Diffused Boron ups Hardness, Wear Resistance of Metals. Metarials Engineering. 77, 70-71.

[26] **Matuschka A.G.,** 1980: Boronizing. Carl Hanser Verlag,100s, München.

[27] **Lu M.J.,** 1983: Die Bildungs Und Wachstums Kinetik Monophsiger Boridschichten. HTM, 38, 156-168.

[28] **Xu, C. H., Gao, W., Yang, Y. L.,** 2000: Superplastic Boronizing of a Low Alloy Steel- Microstructural Aspects. Journal of Materials Processing Technology, 108 , 349-355.

[29] **Massalski Th. B.,** 1986: Binary Alloy Phase Diyagrams. ASM, Metals Park, Ohio.

[30] **Hallemans B., Wollants P., Roos J.R.,** 1994: Thermodynamic Reassessment and Calculation of The Fe-B Phase Diagram. Z. Metalkd., 85, 676-682.

[31] **Badini C., Mazza D.,** 1988: The Texture of Borided Layers Grown of Fe-Ni and Fe-Cr Alloy. J. Mater. Sci. Let., 7, 661-662.

[32] **Soydan Y.,** 1996: Katı Ortamda Bor Yayınımı İle Sertleştirilen Çelik Yüzeylerinin Kuru Kayma Halinde Sürtünme ve Aşınma Davranışları. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 149s, İstanbul.

[33] **Bozkurt N.,** 1984: Bor Yayınımıyla Çeliklerde Yüzey Sertleştirme. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 113s, İstanbul.

[34] **Hunger H., True G.,** 1994: Boronizing to Produce Wear-resistant Surface Layers. Heat Treatment of Metals, 2, 31-39.

[35] **Fichtl W.,** 1981: Boronizing and its Pratical Applications. Materials in Engineering, 2, 276-286.

[36] **Özsoy A.,** 1991: Çeliğin Borlanmasında Borür Tabakası, Geçiş Zonu ve Ana Matriksin Özelliklerinin İyileştirilmesi. Anadolu Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 101s, Eskişehir.

[37] **Sarıtaş Çelik** Paslanmaz Çelik Mekanik ve Kimyasal Özellikleri tablosu.

[38] **Baştürk S.,** 2009: İyon Borürlenmiş Kesme Kalıplarında Performans Araştırılması. İTÜ Fen Bil. Enst. Doktora Tezi.

[39] **Şahin S., Bayça S.U.,** 2002: Borlama. Makale.

[40] **Çelikkan H., Öztürk M.K., Aydin H., Aksu M. L.,** 2007: Boriding titanium alloys at lower temperatures using electrochemical methods. Turkish Mineral Research and Exploration Institute.

[41] **Taktak Ş.,** 2006 : A study on the difusion kinetics of borides on boronized Cr-Based steels, Volume 41, Number 22, 7590-7596.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad	**:** Mustafa Arat
Doğum Yeri ve Tarihi	**:** İzmit 21.10.1985
Adres	**:** İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Gümüşsuyu-TAKSİM
Lisans Üniversite	**:** İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü