



**ST 37 ÇELİĞİNİN MEKANİK VE TERMAL YÜZEY
İŞLEMLERİ UYGULAMALARI İLE MİKROYAPI
VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Hakan ÇAĞLAR

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Okan ÜNAL**

**ST 37 ÇELİĞİNİN MEKANİK VE TERMAL YÜZEY İŞLEMLERİ
UYGULAMALARI İLE MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Hakan ÇAĞLAR

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr.Okan ÜNAL**

**KARABÜK
Mayıs 2022**

Hakan ÇAĞLAR tarafından hazırlanan “ST 37 ÇELİĞİNİN MEKANİK VE TERMAL YÜZEY İŞLEMLERİ UYGULAMALARI İLE MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Okan ÜNAL

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 20/05/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Fuat KARTAL (KÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Okan ÜNAL (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Ü. A. Emrah ERDOĞDU (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Hakan ÇAĞLAR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ST 37 ÇELİĞİNİN MEKANİK VE TERMAL YÜZEY İŞLEMLERİ UYGULAMALARI İLE MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Hakan ÇAĞLAR

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Okan ÜNAL

Mayıs 2022, 70 sayfa

Aşınma kayıpları dünya makine endüstrisinde çok önemlidir ve her yıl milyonlarca dolarlık ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Malzemelerin aşınma kaybını en aza indirmek için yüzey işlemleri üzerine artan miktarda araştırma vardır.

Termokimyasal yüzey işlemi, düşük maliyeti ve kolay bulunabilirliği nedeniyle en çok tercih edilen yöntemdir. Bu çalışmada kullanılan termokimyasal yüzey işlemi, aşınma ve yorulma performansını artırmak için çok olumlu özellikler sağlayan bir borlama işlemidir.

Bu tezde, St 37 çeliğine öncelikle S780-2,5 mm çaplarında paslanmaz çelik bilyalarla fırlatma yöntemiyle bilyalı dövme işlemi yapılmıştır. Daha sonra paslanmaz çelik bir potada inert gaz ortamında 850-950-1050 °C sıcaklıklarda 4 saatlik bir süre boyunca

kutu borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama işleminden sonra iç yapısal analizler, sertlik, aşınma testleri uygulanmıştır. Otomotiv ve makine parçaları, imalat, konstrüksüyon, gemi vb. yerlerde kullanılan AISI 1020 (St 37) çeliği aşınmaya karşı yapmış olduğumuz bilyalı dövme ve borlama işlemleri sayesinde mevcut kullanım yerlerine oranla daha uzun ömürlü maliyet bakımından ise daha ucuz olmasından dolayı performansı yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Bilyalı dövme, Kutu borlama, Yorulma dayanımı, Aşınma dayanımı, Mikroyapı, St 37.

Bilim Kodu : 91421

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ST 37 STEEL ON MECHANICAL AND THERMAL SURFACE TREATMENTS AND THE EFFECTS OF MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES

Hakan AĐLAR

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Doç. Dr. Okan ÜNAL

May 2022, 70 pages

Wear losses are very important in the world machinery industry and cause economic losses of millions of dollars every year. There is an increasing amount of research on surface treatments to minimize the wear loss of materials.

Thermochemical surface treatment is the most preferred method due to its low cost and easy availability. The thermochemical surface treatment used in this study is a boronizing process that provides very positive properties to increase wear and fatigue performance. In this thesis, firstly, the St 37 steel was shot peened with S780-2.5 mm diameter stainless steel balls. Then, the can was borided in a stainless-steel crucible in an inert gas environment at temperatures of 850-950-1050 °C for a period of 4 hours. After boriding, internal structural analysis, hardness and wear tests were applied. Automotive and machine parts, manufacturing, construction, ships etc. It has

been observed that AISI 1020 (St 37) steel, which is used in places of use, has a higher performance due to its longer life and cheaper cost compared to existing places of use, thanks to the ball forging and boronizing processes we have done against wear.

Key Word : Ball forging, Box boriding, Fatigue resistance, Abrasion resistance, Microstructure, St 37

Science Code : 91421

TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Okan ÜNAL'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Çalıőmalarım boyunca her zaman yanımda olan, desteklerini hiç bir konuda esirgemeyen sevgili eőim Betül KUL AęLAR' a ve sevgili aileme manevi yardımı esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
YAPI ÇELİKLERİ.....	3
2.1. St 37 ÇELİĞİ.....	5
BÖLÜM 3	7
YÜZEY İŞLEMLERİ	7
3.1. TERMAL İŞLEM.....	7
3.2. TERMO KİMYASAL İŞLEM.....	7
3.2.1. Nitrüleme.....	9
3.2.1.1. Nitrüleme Yöntemleri.....	10
3.2.2. Karbürleme	16
3.2.2.1. Kutu Karbürleme	16
3.2.2.2. Sıvı Karbürleme	17
3.2.2.3 Gaz Karbürleme	17
3.2.3. Borlama.....	17
3.3. MEKANİK YÜZEY İŞLEM.....	17
3.3.1. Bilyalı Dövme İşlemi.....	18

	<u>Sayfa</u>
3.3.2. Aşırı Bilyalı Dövme İşlemi.....	19
3.3.3. Lazer Dövme İşlemi	19
3.3.4. Ultrasonik Bilyalı Dövme İşlemi.....	21
BÖLÜM 4	22
BORLAMA.....	22
4.2. BORLAMA YÖNTEMLERİ	23
4.2.1. Kutu Borlama.....	27
4.2.2. Sıvı Borlama	28
4.2.3. Gaz Borlama	29
4.2.4. Plazma Borlama.....	29
BÖLÜM 5	30
METALLERDE YORULMA	30
5.1. S-N EĞRİSİ.....	32
5.2.1. Ortalama Gerilme	35
5.2.2. İş parçası Tasarımı	36
5.2.3. Yüzey İşlemleri.....	36
5.2.4. Termal Yorulma.....	37
5.2.5. Yüzey Etkisi.....	37
BÖLÜM 6	38
DENEYSEL ÇALIŞMA	38
6.1. MALZEME	38
6.3. BORLAMA İŞLEMİ.....	39
6.5. X IŞINLARI DİFRAKSİYON (XRD) ANALİZİ.....	41
6.6. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMÜ	41
6.7. OPTİK GÖRÜNTÜ ANALİZİ	41
BÖLÜM 7	43
DENEY SONUÇLARI	43
7.1. İÇ YAPI İNCELEMELERİ.....	43
7.2. BORÜR TABAKASININ KALINLIKLARI	45

	<u>Sayfa</u>
7.3. X IŞINLARI DIFRAKSİYON (XRD) SONUÇLARI.....	52
7.4. MİKRO SERTLİK SONUÇLARI	54
BÖLÜM 8	62
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	62
KAYNAKLAR	64
ÖZGEÇMİŞ	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Tipik olarak değiştirilmiş alt yüzey alanları ile birlikte bir alaşım içindeki kimyasal element A'nın dağılımını gösteren termokimyasal işlem ilkeleri.	8
Şekil 3.2. Termokimyasal işlemlere göre sertlik-yüzey derinliği ilişkisi.....	10
Şekil 3.3. Modern ticari plazma nitrüleme hattı	13
Şekil 3.4. a) Ultra parlaklık işlemi sırasında bileşenlerin görünümü, b) Aktif ekran plazma nitrüleme kavramını gösteren şemalar.....	13
Şekil 3.5. Lazer nitrülemenin ilkeleri	15
Şekil 3.6. Bir dişilinin bilyalı dövülmesi işlemi.....	19
Şekil 3.7. Lazerle dövme işlemi şematik gösterimi	20
Şekil 4.1. Bor kristal görünümü.	22
Şekil 4.2. AISI 1018'in dış tabakası FeB ve iç tabakası Fe ₂ B olan borür tabakalarının testere dişi yapısı	25
Şekil 4.3. Fe-B ikili denge diyagramı	25
Şekil 4.4. Katı borlama işleminin şematik gösterimi	28
Şekil 5.1. Kayma bantlarının oluşumu ve çatlak başlangıcı	30
Şekil 5.2. Yorulma sınırı gösteren malzemeye Ait S-N eğrisi.....	34
Şekil 5.3. Yorulma sınırı göstermeyen malzemeye ait gerilme genliğinin logaritmik olarak hasar çevrim sayısına göre değişimi	34
Şekil 5.4. Ortalama gerilmenin (σ_m) S-N eğrisi üzerine etkisi.....	35
Şekil 5.5. Normal ve bilyalı çelik için şematik S–N yorulma eğrileri	37
Şekil 6.1. Borlama deney işleminde kullanılan St 37 numune malzemeleri.....	39
Şekil 6.2. Borlama deney işleminde kullanılan protherm PLF 120/5 marka ısıtma işlem fırını.	40
Şekil 6.3. Borlama deney işleminde kullanılan kova.....	40
Şekil 7.1. a, b İşlem görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin iç yapısı.....	44
Şekil 7.2. c, d AISI 1020 (St 37) çeliğinin A12 şiddeti dövme sonrası iç yapısı.....	44
Şekil 7.3. e, f AISI 1020 (St 37) çeliğinin A18 şiddeti dövme sonrası iç yapısı.	44
Şekil 7.4. g, h AISI 1020 (St 37) çeliğinin A24 şiddeti dövme sonrası iç yapısı.....	45
Şekil 7.5. Nono bor tozu ile 850,950,1050 °C'lerde 4 saat borlanmış St 37 (AISI 1020) çeliğinin kesit SEM Mikro yapısı.	48

Şekil 7.6. Nono bor tozu ile 12A şiddetinde bilyalı dövülmüş 850, 950, 1050 °C’lerde 4 saat borlanmış ve St37 (AISI 1020) çeliğinin kesit SEM mikro yapısı.....	49
Şekil 7.7. Nono bor tozu ile 18A şiddetinde bilyalı dövülmüş 850,950,1050 °C’lerde 4 saat borlanmış ve St 37 (AISI 1020) çeliğinin kesit SEM mikro yapısı.....	50
Şekil 7.8. Nono bor tozu ile 24A şiddetinde bilyalı dövülmüş 850,950,1050 °C’lerde 4 saat borlanmış ve St 37 (AISI 1020) çeliğinin kesit SEM mikro yapısı.	51
Şekil 7.9. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin XRD piklerinin incelenmesi.....	53
Şekil 7.10. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin mikro sertliğinin incelenmesi.	55
Şekil 7.11. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin yüzey pürüzsüzlüğünün incelenmesi.	57
Şekil 7.12. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin hacim kaybı ve borlama sıcaklığı incelenmesi.	59
Şekil 7.13. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin sürtünme katsayısının zamana göre incelenmesi.	60

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. ASTM standartlarında belirlenmiş yapı çelikleri.....	4
Çizelge 2.2. DIN 17100 uyarınca yapı çeliklerinin kimyasal bileşimi	4
Çizelge 2.3. St Çeliğinin kimyasal kompozisyonu	6
Çizelge 2.4. St 37 çeliğinin mekanik özellikleri	6
Çizelge 3.1. Termo kimyasal kaplama prosesleri	9
Çizelge 4.1. Bor yataklarına ait özellikler.....	23
Çizelge 4.2. Borlama sonrası oluşan çeşitli yüzeyler üzerindeki borid tabakalarının mikrosertliği ve yapısı	24
Çizelge 6.1. St 37 malzemesinin standartı.	38
Çizelge 6.2. St 37 malzemesinin kimyasal birleşimi.	38

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

x	: eş katman kalınlığı
k	: sıcaklığa bağlı sabit katsayısı
t	: borlama zamanı
N_f	: yorulma ömrü
N_i	: çatlak başlatma fazı
N_p	: çatlak ilerleme fazı
σ_m	: ortalama gerilme
σ_{max}	: maksimum gerilme
σ_{min}	: minimum gerilme
σ_r	: gerilme aralığı
σ_g	: gerilme genliği
σ	: termal gerilme
R	: gerilme oranı
α_1	: termal genleşme katsayısı
ΔT	: sıcaklık değişimi
E	: elastisite modülü
B	: Bor
C	: Karbon
Si	: Silisyum
Mn	: Mangan
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Cr	: Krom
H ₂	: Hidrojen
Ni	: Nikel
Mo	: Molibden

V : Vanadyum
Cu : Bakır
FeB : Demir borür
Fe₂B : Demir di borür
B₂O₃ : Bor oksit
°C : Derece
B₂H₆ : Diboran
Ar : Argon
kPa : Kilopascal
MnO : Mangan oksit
FeO : Demir Oksit
SiO₂ : Silis Oksit

KISALTMALAR

DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika
Deneme ve Malzeme Topluluğu)
AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
EN : European Norm (Avrupa Normu)
UNYM : Ultrasonik Nano Kristal Yüzey Modifikasyonu
XRD : X-Işını Difraksiyon Spektrometresi
SEM : Taramalı Elektron Mikroskop (Scanning Electron Microscope)
HV : Vickers sertliği

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüz şartlarında çeşitli endüstri çalışmaları ve uygulamalara sahip olan çelikler için ciddi yatırımlar yapılmaktadır. Ancak bu malzemelerin mekanik etkenlerle aşınması, oksitleyici ve korozyif çalışma ortamı koşulları nedeniyle kullanım ömürleri kısalmaktadır. Bu çeliklerin kullanım ömrünü yeterli sürede tutmak için çeliği bilmek doğru tasarlamak yeterli olmayıp bu çeliklere uygun bir kaplama işlemi uygulanmalıdır [1].

Sanayinin günümüzde özellikle makine sanayisinin hızlı gelişimi, çelik gibi temel malzeme üretim teknolojilerinin de gelişmesini teşvik etmektedir. Bu koşullar göz önüne alındığında mekanik özellikler kullanım ömrü arttırılabilir. Bunun üstesinden gelmek için bileşenler genellikle ısıl işleme tabi tutulur. Kimyasal bileşimi DIN 17100'e eşdeğer St 37 çeliği, çeşitli işleme bileşenlerinin üretimi için üretilen çeliklerden biridir.

Yüzey sertleştirme işlemi, daha fazla yüzey sertliği elde etmek içerisinde karbon (C) bulunan çelik yüzeyi arttırmayı amaçlayan katı karbürizasyondur. Katı karbonlama işlemi, aşağıdaki gibi işleme bileşenlerinin gelişmiş mekanik özellikleriyle sonuçlanabilmektedir:

- Artan yüzey sertliği
- Temas yüzeylerine karşı artan aşınma direnci

Alaşımli çelik, aşağıdakilere uygun olarak oluşturulmuş bir çeliktir.

Mekanik özelliklerini geliştirmek için amaçlanan çeliğin özelliklerine veya doğasına uygun olarak çeliğin temel elemanıdır. Alaşımli çelikler 2 türe ayrılır:

- Düşük alaşımlı çelik (özel alaşım elementi <%8.0)
- Yüksek alaşımlı çelik (özel alaşım>%8.0))

St 37 çelik %0,2 Karbon; % 1,4 Mangan; %0,05 Fosfor; %0,05 Kükürt ve %0,07 Azot elementlerin kimyasal bileşimi olan yumuşak çeliktir. Genellikle St 37 çeliği, özel kullanım gerekmedikçe doğrudan ısıtılma işlemi görmeden kullanılabilir [2].

Borlama, endüstriyel uygulamaların gerektirdiği mühendislik bileşenlerinde sertliklerini, aşınma ve korozyon dirençlerini artırmak amacıyla metal ve alaşımların yüzey doygunluğudur. Borlama işlemi, gaz ortamları ve macunların yanı sıra tozlar, tuzlar, erimiş oksit karışımları yoluyla yapılabilir [3].

Korozyon ve yorulma sorunlarının yanı sıra günümüzde endüstride karşılaştığımız bir diğer önemli sorun da aşınmadır. Aşınma ve yıpranma konusu, ekonomik koşullara etkisinin yanı sıra teknik olarak da ele alınmalıdır. Aşınma problemlerinden kaynaklanan maddi kayıp, ülkelerin yıllık gayri safi milli hasılasının %6 -7'sini oluşturmaktadır [4].

Yaptığımız bu çalışmada ST 37 kalitedeki malzemenin (alaşımsız yapısal çelik) farklı sıcaklık ve sürelerde kutu borlama işlemi uygulanmıştır. Bu deney sonrasında ST 37 çeliklerin yüksek sıcaklıkta yüzey pürüzlülüğü, mikro sertlik ve aşınma davranışlarına bakılmıştır. Kutu borlama ile mekanik özellikleri iyileştirilen yapısal çelik malzemeler aşınmaya karşı dirençlerini artırarak önemli ölçüde ST 37 kullanım yerlerinde fayda sağlayacaktır.

BÖLÜM 2

YAPI ÇELİKLERİ

Diğer elementlerden daha fazla demir içeren genellikle % 2 ‘den az karbon içeren (C) alaşımlara çelik denilmektedir. İçinde bulundurduğu elementlerin kimyasal bileşimi, iç yapısı çeliğe özel mekanik özellikler kazandırır ve bu elementlerde alaşım elementleri denilmektedir. Alaşım elementleri sayesinde çeliğe farklı oranlarda element ilavesi ile kimyasal bakımından aynı olmayan çelikler elde edilmektedir. Çeliğin iç yapısında bulunan elementler şu şekildedir [5] :

- Oksitler: Çelikte, alümin (Al_2O_3), manganoksit (MnO), demiroksit (FeO), silis oksitler (SiO_2) bulunmaktadır. Bu oksitler çeliğe zarar vermekte ve çeliğe zarar vererek oluşturdukları çatlak ve kırılmalara neden olmaktadır.
- Silisyum: Karbonlu çeliklerde %0,01’den %0,30’a kadar Si içermektedir. Çeliğin oluşturulması sırasında içinde oluşan gaz boşluklarını engellemesi ve çeliği deokside yapmak için kullanılmaktadır.
- Fosfor: Çeliklerde %0,05’e kadar fosfor bulunmaktadır. Fosfor çeliğin tane yapısının büyümesine neden olmaktadır. Bu yapısından dolayı fosforun fazla olması çeliğin kırılma olmasına neden olmaktadır.
- Magnezyum: Çeliklerde %0,30 %0,80 Mn bulunmaktadır. Manganez çelikte kükürtle birleşmesiyle MnS oluşmakta ve bu sayede kükürdün demirle birleşmesini önlemektedir. Magnezyumun fazla olması durumunda karbonla birleşerek Mn_2C (mangankarbürü) oluşturmakta ve çeliğin sertliğini, direnme gücünü arttırmaktadır. Ayrıca plastiklik oranını azalmasına neden olmaktadır.

- Kükürt: Çeliklerde %0,05'den düşük kükürt bulunmaktadır. Çeliğin içinde bulunan kükürt miktarının manganezyumla birleşmesi istenmektedir [6].

Çizelge 2.1. ASTM standartlarında belirlenmiş yapı çelikleri [6].

ASTM Gösterilişi	Mekanik Özellikler		Kimyasal Bileşenler(%)					
	Çekme Mukavemeti	Akma Sınır Gerilmesi	C	Mn	P	S	Si	Cu
LEVHA VE PROFİLLER	t/cm ²	t/cm ²						
A36	4.24-5.62	2.52 (min)	0.26-0.29	0.80-1.20	0.04	0.05	0.15-0.40	0.20 (min)
A242 HSLA	4.92 (min)	2.95; 3.23; 3.52	0.15	1.00	0.15	0.05		0.20
A441	4.22-4.92	2.81; 2.95; 3.23; 3.52	0.22	0.85-1.25	0.04	0.05	0.40	0.20
A514	7.03-9.14	6.33-7.03	0.10-0.21	0.45-1.50	0.035	0.04	0.20-0.80	0.50'ye kadar
A572	4.22-5.62	2.95; 3.52; 4.22; 4.57	0.21-0.26	1.35	0.04	0.05	0.15-0.40	
A588	4.43-4.92	2.95; 3.23; 3.52	0.10-0.19	0.50-1.35	0.04	0.05	0.15-0.90	0.20-0.50
A709	4.08-5.62 6.33-7.03 7.73-9.14	2.53-3.52 4.92-6.33	0.10-0.25	0.40-1.50	0.035	0.04	0.15-0.80	0-0.50

Çizelge 2.2. DIN 17100 uyarınca yapı çeliklerinin kimyasal bileşimi [6].

ÇELİK CİNSİ	Deoksidasyon Şekli	Kimyasal Bileşim(Kütleli Ağırlık %)							Azotu bağlayan elemanların katkısı
		C				P	S	N	
		mm cinsinden mamül et kalınlığı							
		≤ 16	> 16 ≤ 100	> 16 ≤ 100	>100				
St 37-2		0.17	0.20	0.20		0.05	0.05	0.009	-
Ust 37-2	U	0.17	0.20	0.20	*	0.05	0.05	0.007	-
RSt 37-2	R	0.17	0.17	0.20		0.05	0.05	0.009	-
St 37-3	RR	0.17	0.17	0.17		0.04	0.04	-	evet
St 44-2	R	0.21	0.21	0.22	*	0.05	0.05	0.009	-
St 44-3	RR	0.20	0.20	0.20		0.04	0.04	-	evet
St 52-3	RR	0.20	0.22	0.22	*	0.04	0.04	-	evet

U: dinlendirilmemiş (gazı giderilmemiş)

R: dinlendirilmiş (gazı giderilmiş)

RR: tam dinlendirilmiş (gazı tamamen giderilmiş)

2.1. St 37 ÇELİĞİ

Yapı çeliği olarak bilinen ve çelik kontrüksiyon, makina parçaları imalatında kullanılan DIN 17100 standartlarına göre belirtilmiş çekme kuvveti 37 kgf/mm² olan St 37 çeliğidir. 37 rakamının önünde bulunan “St” kelimesi Almanca çelik anlamına gelen “stahl” kelimesin kısaltmasıdır [7].

İçinde bulunan Magnezyum, Silisyum, Fosfor, Azot, Oksijen gibi belirli miktarlarda bulunan elementler sayesinde çelik üretimde demir karbon alaşımlarının oluşmasına olanak sağlamaktadır [8].

Sade karbonlu çelikler hem kolay şekillendirilebilmesi hemde ucuz olması yapı çeliklerinde önemli bir yere sahiptir. St 37 ‘nin yapısında bulunan karbon miktarı çelik üretim esnasında bağlı mekanik özelliklerin değişmesine neden olmaktadır. Demir çelik sanayisinde üretimi yapılan çeliklerin onda dokuzuna yakını karbonlu çelikler oluşturmaktadır. Sertleştirme yetenekleri zayıf olmamakla birlikte iş parçalarında çarpılma, çatlama ve iç gerilmeler oluşabilmektedir.

Kalın yapılı kesitli iş parçalarında istenilen düzeyde sertleştirilemezler çünkü korozyonlu ortamlarda dayanıksızdırlar. Sadece indüksiyon ve alevle yüzey sertleştirilmesi yapılabilmektedir. İç yapısında bulunan karbon miktarına göre sade karbonlu çelikler;

- Orta Karbonlu Çelikler (% 0,05-0,3 C)
- Düşük karbonlu Çelikler (% 0,3-0,8 C)
- Yüksek Karbonlu Çelikler (% 0,8-1,7 C) olmak üzere üç ana temel gruba ayrılmaktadır.

Az karbonlu çelikleri tek başına sertleştirmek mümkün değildir. Eğer gerekli uygun olan yöntemler yapılırsa sertleştirmek mümkün olabilmektedir. Orta karbonlu çeliklerde ise ısıl yapılı işlemlere yakındırlar. Çünkü dayanım oranları, az karbonlu çeliklere göre çok iyidir.

Demir Çelik Endüstrisinde sıcak haddeleme, kutu profil ve çubuk; köprü ve demir yollarında; gemi yapımında; elektrik kablolarını taşıyan direklerde vb. gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çelikleri kullanabilmesi için sıcak haddeleme sonrasında tüketici firmalara satılmaktadır. St 37 çeliğine ait mekanik ve kimyasal özellikler aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir [9].

Çizelge 2.3. St Çeliğinin kimyasal kompozisyonu [9].

Malzeme	Malzeme No	Kimyasal Kompozisyon % Ağırlık olarak					
		C	Si	Mn (en çok)	P (en çok)	S (en çok)	N (en çok)
St 37	1,0254	0,17	-	-	0,4	0,4	0,009-0,0014
St 44	1,0256	0,21	-	-	0,4	0,4	0,009-0,0014
St 52	1,0421	0,22	0,60	1,70	0,4	0,35	0,009-0,0014

Çizelge 2.4. St 37 çeliğinin mekanik özellikleri [9].

Malzeme	Malzeme No	Çekme Dayanımı (Mpa)	Akma Dayanımı (Mpa) En az	Uzama (%) En az
St 37	1,0254	350,0 - 480,0	235,0	25,0
St 44	1,0256	420,0 - 550,0	275,0	21,0
St 52	1,0421	500,0 - 650,0	355,0	21,0

BÖLÜM 3

YÜZEY İŞLEMLERİ

Malzemenin çalışma ömrünü ve performansını arttırmak daha dirençli bir yüzey özelliklerine ulaşmak için pek çok yüzey işlem teknolojileri geliştirilmiştir. Bu yüzey işlem teknolojileri 3 temel gruba ayrılarak anlatılması uygun olacaktır.

3.1. TERMAL İŞLEM

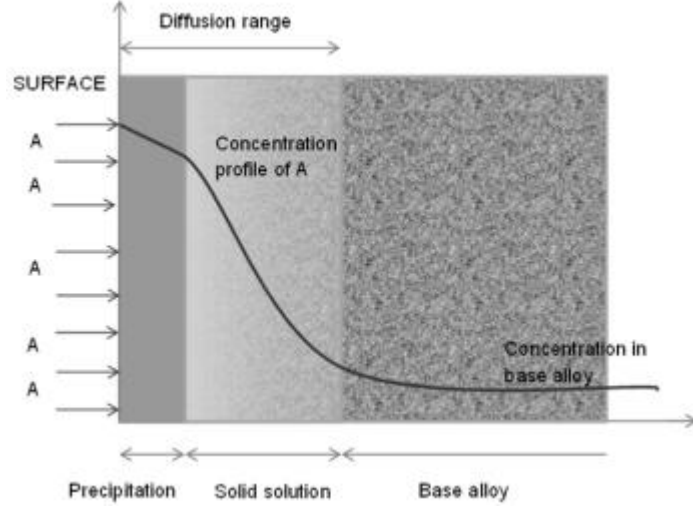
Kullanılan malzemenin sadece yüzeyi için işlem yapılmaktadır. Çeliğin yüzeyindeki bileşiminde herhangi bir değişiklik olmaz. Yüzey sadece faz dönüşümü ile sertleştirilmektedir. Malzemenin yüzey oksit sıcaklığına ısıldığında, östenit dönüşümü yüzeyde sağlandığında su verililerek martensit hale dönüşür. Burada malzemenin yapısı; yüzey sert, çekirdek ise yüzeye oranla nispeten yumuşak olmaktadır.

3.2. TERMO KİMYASAL İŞLEM

Termo kimyasal işlemde kullanılan malzemenin yüzey bileşimi değiştirilir ve aynı zamanda ısıl işlem uygulanmaktadır. Yapılan işlem neticesinde malzemenin yüzey yapısında kimyasal değişim olmaktadır. Bu değişimden öncesinde ve sonrasında ısıl işlem yapılmaktadır. Termo kimyasal işlemlerinde Karbürleme, Nitürleme, Nitro karbürleme (ferritik – östenitik) ve borlama yapılmaktadır. Biz burada termo kimyasal işlem olarak borlama işlemi üstünde duracağız [10].

Malzeme yüzeyi birçok uygulamada hizmet ömrünü kontrol ettiği için buradaki amaç fiziksel, kimyasal, elektrik, elektronik, manyetik veya mekanik dahil olmak üzere temel alt tabakadan farklı geniş bir işlevsel özellikler yelpazesi geliştirmektir. Termokimyasal işlem, kimyasını ve mikro yapısını değiştirmek için metal olmayan

veya metal atomları bir malzeme yüzeyine dahil etmek için termal difüzyon kullanır (Şekil 3.1.). İşlem, bir veya birkaç defa aynı anda aktif kimyasal element ile katı, sıvı veya gazlı ortamda gerçekleştirilir [11].



Şekil 3.1. Tipik olarak değiştirilmiş alt yüzey alanları ile birlikte bir alaşım içindeki kimyasal element A'nın dağılımını gösteren termokimyasal işlem ilkeleri [11].

Termokimyasal işlemlerin çoğu için mekanizma, katı, sıvı veya gaz halindeki türlerin ayrışmasını, gaz halindeki moleküllerin yeni oluşan atomları oluşturmak üzere bölünmesini, atomların emilmesini, bunların metalik bir kafese difüzyonunu ve mevcut yeni fazlar oluşturmak için substrat yapısı içindeki reaksiyonları içermektedir.

Endüstriyel ölçekli işlemlerde tüm parça yüksek sıcaklıklara maruz kaldığından, yüzey difüzyonu malzeme hacmindeki bazı işlemler için faz dönüşümlerini içerebilecek değişiklikler üzerine bildirmekte ve bu karmaşıklığı artırmaktadır [11].

Metal ve metal alaşımlarının imalatında kullanılan hammadde ihtiyaçların üretim taleplerinin giderek artması ve artan maliyetler kadar malzemedeki aşınma da büyük ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Artan ekonomik kayıpların çeşitli yüzey kaplama çeşitlerine yönelmeyi göstermektedir. Yüzey kaplama olan termokimyasal işlem hem maliyet bakımından düşüktür. Aynı zamanda da metallerin yüzey katmanını geliştirmeyi hedeflemektedir.

Karbürleme, vanadyumlama, dekarbürizasyon, niobyumlama, borlama, nitrürleme gibi farklı yöntemler termokimyasal işlemlerin temelini oluşturmaktadır. Bu yöntemlerin temel amacı yabancı element atomlarının yani kaplama metali atomlarının iş parçasına yani altlık malzemesine difüzyonu ile malzemenin yüzey özelliklerini değiştirmektedir. Karbürleme ve nitrürleme yöntemleri yüzey işlemin en çok kullanılan yöntemleridir. Bu yüzey işlemleri yapılarak ortaya çıkan tabakalar sayesinde iş parçalarının kullanım amacına uygun kullanılabilir yeni özelliklere sahip olmaktadır. Karbürleme ve nitrürleme yüzey işlemleri sayesinde iş parçalarının korozyon ve aşınma dirençleri arttırılmaktadır. Karbürleme işleminde arayer katı eriyik meydana gelirken, nitrürleme ve borlamada işlemlerinde ise yüzeyde yeni bir bileşik oluşmaktadır. Günümüzde kullanılan Termokimyasal prosesler Çizelge 2.2 'de gösterilmiştir [12].

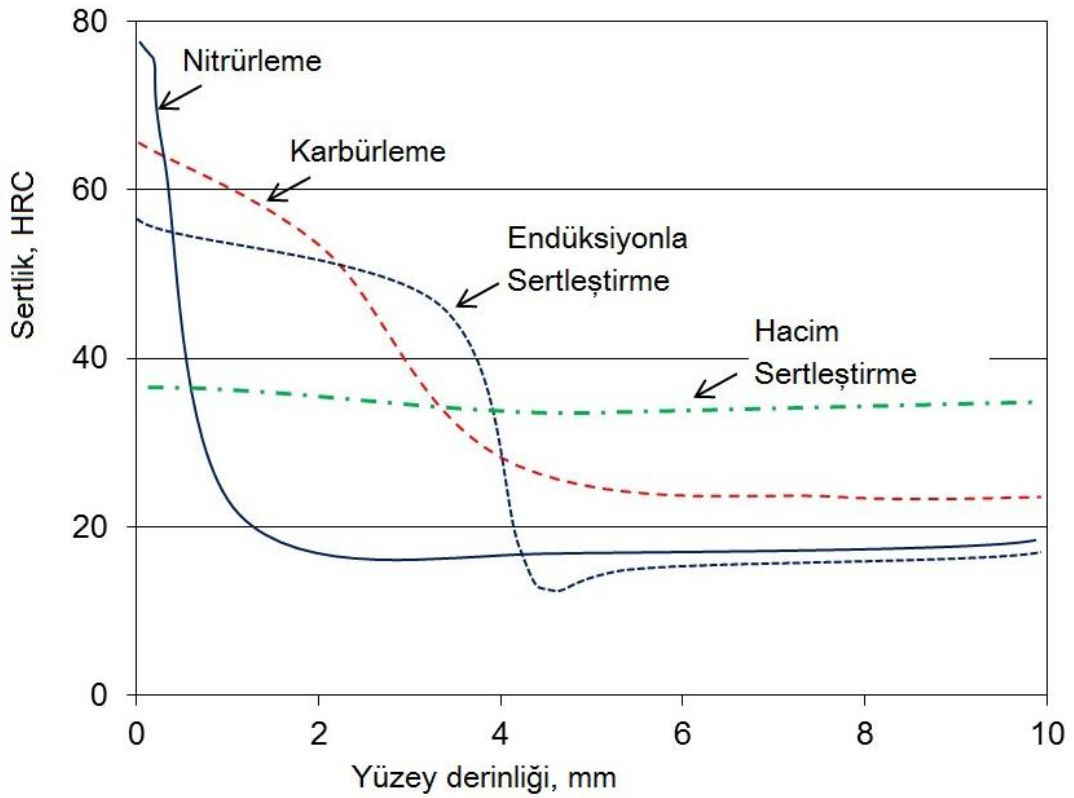
Çizelge 3.1. Termo kimyasal kaplama prosesleri [12].

Yöntem	Difüze Edilen Elementler	Kullanılan Madde				Kaplama Sıcaklığı °C	Altlık / Taban Malzeme						Sertlik	Kullanım Sahası
		Toz	Tuz Banyosu	Gas	Plazma		Düşük Alaşımlı Çelik	Cr 'lu Çelik	Cr-Ni Çeliği	Süper Alaşım (Ni ve Co)	Dökme Demir	Ti Malzeme		
Karbürleme	C	•	•	•	•	850-950	•	•					700-1000	
Nitrürleme	N	•	•	•	•	500-600	•	•				•	700-1500	
Karbonitrürleme	C+N		•	•	•	500-900	•	•					700-1500	
Borlama	B	•	•	•	•	800-1050	•	•	•	•			1500-2500	
Silisyumlama	Si	•		•	•	950-1000	•						-	
Alüminyumlama	Al	•				750-1200	•	•	•	•			200-1200	
Kromlama	Cr	•				900-1100	•	•	•	•			1400-2000	
Çinko Difüzyon Tabakası	Zn	•				400-450	•				•		300-400	

3.2.1. Nitrürleme

Nitrürleme, ferritik nitrokarbürleme ile birlikte endüstriyel yüzey modifikasyon teknolojilerinin baskın hacmini temsil eden başlıca termokimyasal işlemdir. Bu işlem, ferritik haldeyken çeliğin yüzeyine nitrojen eklenmesine yol açmaktadır.

Ticari uygulamalarda, tipik modifiye bölge 200-300 μm kalınlığa kadardır ve nadiren 600 μm 'yi aşmaktadır. Diğer ısı ve termokimyasal işlemlerle karşılaştırıldığında, maksimum değer ve penetrasyon derinliği açısından yüzey sertlik dağılımı üzerindeki etkisi Şekil 3.2. 'de gösterilmektedir [14]. Nitrürlenmenin ardından ilave ısıl işlem gerekmez ve bileşen yüzeyinde sertlik, aşınma direnci, iyileştirilmiş korozyon direnci ve yorulma ömrünü arttırmaktadır [13].



Şekil 3.2. Termokimyasal işlemlere göre sertlik-yüzey derinliği ilişkisi [14].

3.2.1.1. Nitrüleme Yöntemleri

Nitrüleme yöntemleri beş ana gruba ayrılmaktadır [15].

Bunlar;

- Gaz nitrüleme
- Sıvı tuz nitrüleme
- Plazma (iyon) nitrüleme

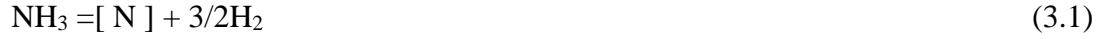
- Lazer nitrürleme

Gaz Nitrürleme

Gaz nitrürleme, 1913 ve 1921'de patentleşmiştir. Kısmen ayrılmış amonyak ile doldurulmuş bir atmosferde, bir kutu fırın veya akışkan yatakta genellikle 550-580 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmektedir [16].

Akışkan yatağın avantajları, tüm gaz partikül hacmi boyunca ideale yakın sıcaklık homojenliği ve hızlı ısıtma hızıdır [15].

Gaz nitrürleme için temel reaksiyon, amonyağın yeni oluşan (elementel) nitrojeni oluşturmak üzere katalitik bozunmasıdır:



Kontrol parametreleri zaman, sıcaklık ve gaz ayrışma oranını içermektedir. Üretim ortamında, ikincisi periyodik olarak ölçülmekte ve ayarlanmaktadır. Geleneksel gaz nitrürlemenin doğal özelliği, yüzeysel nitrojen konsantrasyonunun tam olarak izlenememesidir. Sonuç olarak nitrürlenmiş tabakanın yapısı tüm süreç boyunca öngörülebilirlik ve tekrarlanabilirlikten yoksundur. Kontrollü gaz nitrürleme, amonyak ve katkı gazından oluşan bir karışık gaz atmosferi kullanır [17]. Konvansiyonel gaz nitrürlemenin aksine, süreç ayrışma hızıyla değil, fırın atmosferinin nitrürleme potansiyeli adı verilen farklı bir parametreyle kontrol edilir. Nitrürleme potansiyeli, amonyak ve hidrojenin kısmi basınçlarının oranı olarak aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$K_n = \frac{p_{\text{NH}_3}}{\sqrt{(p_{\text{H}_2})^3}} \quad (3.2)$$

Burada p_{NH_3} amonyağın kısmi basıncı ve p_{H_2} ise hidrojenin kısmi basıncıdır.

Sıvı Nitrürleme

1940'larda geliştirilen sıvı nitrürleme, siyanür veya siyanat içeren erimiş tuz banyosunda gerçekleştirilir. Tipik bir ticari banyo, % 60-70 sodyum tuzları { % 96.5 NaCN, % 2.5 Na₂CO₃, % 0.5 NaCNO } ve %30-40 potasyum tuzlarının { % 96 KCN, %0.6 K₂CO₃, % 0.75 KCNO, % 0.5 KCl } karışımından oluşur [18].

Gaz ve plazma teknolojileri ile birlikte tuz nitrürlemenin en büyük avantajları, yoğun ısıtma ortamının yüksek reaktivitesi nedeniyle kısa döngü süresidir. Kükürt banyosu ilaveleri veya eriyik basınçlandırma gibi nitrürleme oranını daha da hızlandırmak için çeşitli yöntemler mevcuttur. Tipik olarak, düşük alaşımlı çelik için 565 °C'lik çalışma sıcaklığında 1,5 saat süren döngü süresi, 0,3 mm kalınlığında üretir.

Tuz banyosu teknolojisi, banyo toksisitesi ve nitrürlenmiş yüzeyin kalitesiz olması gibi bir takım olumsuz özelliklere de sahiptir.

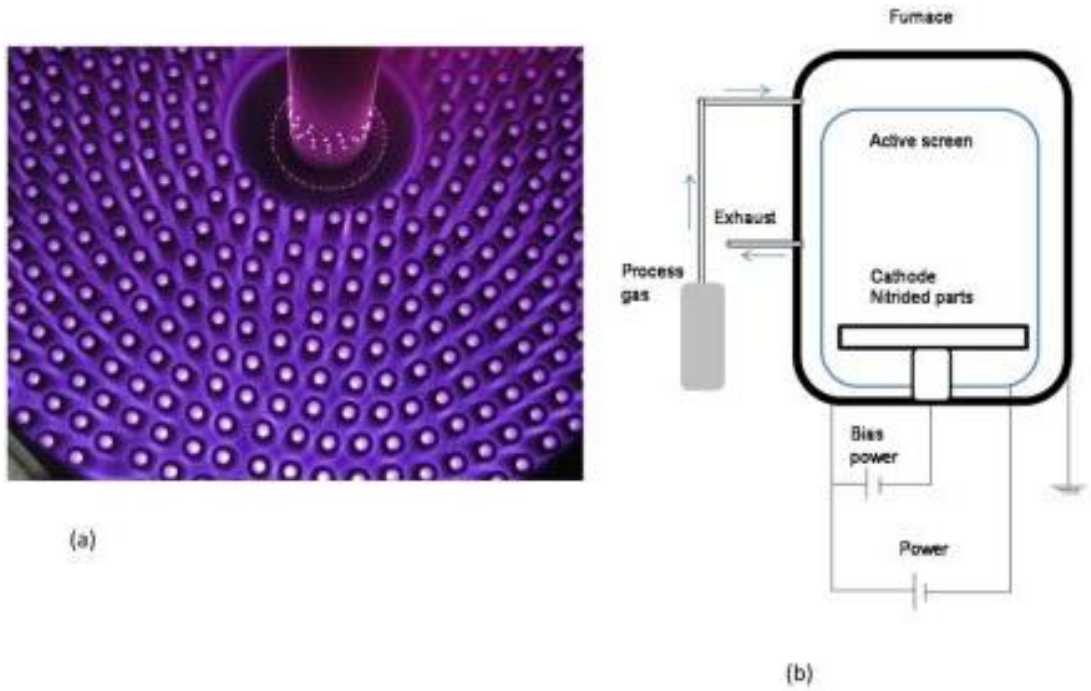
Plazma Nitrürleme

İyon nitrürleme olarak da adlandırılan plazma nitrürleme, 1932'de Wehnheldt ve Berghause tarafından icat edilmiştir. Ancak 1970'lerde ticari olarak uygulanabilir hale gelmiştir. Bir alaşımın yüzeyine yeni oluşan nitrojeni ve buna müteakip yüzey altı katmanlarına difüzyonunu sokmak için kızdırma deşarjı fenomenini kullanır [19]. Modern kurulumun bir örneği Şekil 3.3.'te gösterilmiştir. Plazma, alaşım yüzeyini bombardıman eden nitrojen iyonlarını hızlandırmak için yüksek voltajlı bir elektrik enerjisi kullanılarak bir vakumda oluşturulur [20] ve Şekil 3.4.a'da gösterilmiştir. İyon nitrürlemenin avantajları arasında düşük sıcaklık, kısa doyma süresi ve basit mekanik maskeleme yer almaktadır. En önmeli avantajı, yüzey aktivasyonlu püskürtmedir. Işıma deşarjındaki pozitif iyonların püskürtme etkisi nedeniyle, paslanmaz çelik, alüminyum veya titanyum alaşımlarının yüzeylerinde bulunan koruyucu oksit giderilmektedir. Böylece nitrojen atomları plazmadan malzeme alt yüzeyine taşınabilmektedir. Geleneksel doğru akım sisteminde, nitrürlenmiş bileşen, yüksek katot potansiyeline tabi tutulur ve doğrudan bileşen yüzeyinde plazma formları oluşur. Bu durum, aşırı ısınma olasılığı ile sıcaklık düzensizliği, parça

geometrisine duyarlılık, kenar etkisine neden olma ve ark nedeniyle yüzey hasarı olasılığı gibi dezavantajlar meydana gelmektedir.



Şekil 3.3. Modern ticari plazma nitrüleme hattı [19].



Şekil 3.4. a) Ultra parlaklık işlemi sırasında bileşenlerin görünümü, b) Aktif ekran plazma nitrüleme kavramını gösteren şemalar [19].

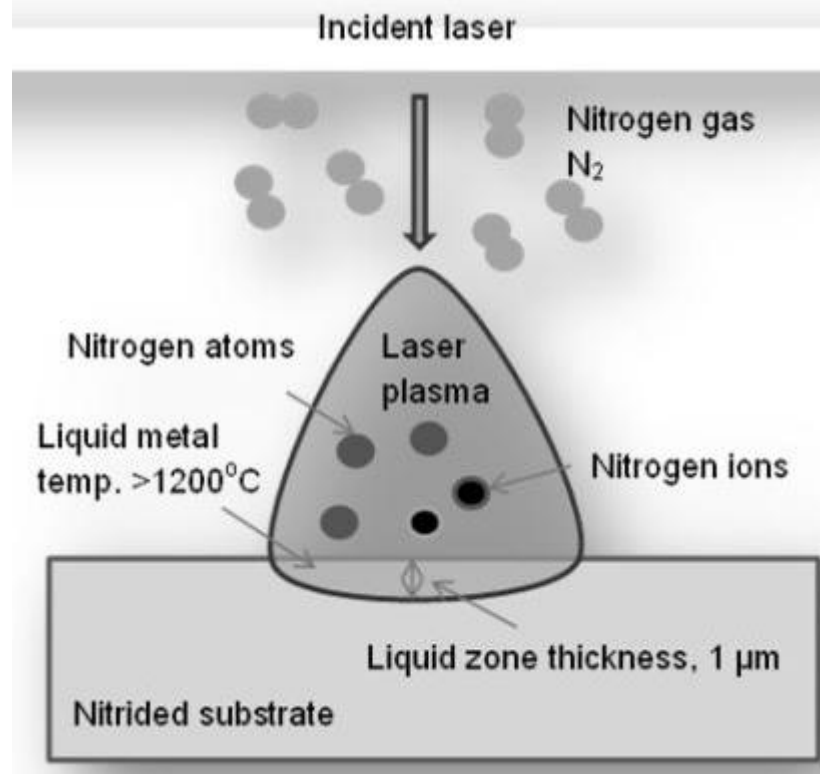
Elektriksel olarak yüklenmiş bir potansiyelde nitrürlenmiş parçanın harici bir ısıtıcı kullanılarak nitrüleme sıcaklığında tutulduğu ve deşarj sonrası nitrüleme şimdiye kadar endüstri tarafından benimsenmemiştir [21]. Aktif ekranlı plazma nitrüleme adı verilen başka bir teknik 1999'da icat edilmiştir [22].

Şekil 3.4.b' de gösterildiği gibi, yeni işlemin özü, yüksek katodik potansiyelin nitrürlenmiş kısmı çevreleyen ve bu rolde nitrürlenmiş kısmı değiştiren gerçek katot haline gelen bir ekrana uygulanmasıdır. Bu nedenle, aktif ekranda plazma oluşur ve onu ısıtır. Ardından, ekrandan gelen bir radyasyon nitrürlenmiş parçayı gerekli sıcaklığa kadar ısıtır [23].

Ekranda oluşan plazma, tasarlanan gaz sirkülasyonu ile nitrürlenmiş kısım üzerinden akmaya zorlanan iyonlar, elektronlar ve diğer aktif nitrüleme türlerinin bir karışımından oluşur. Böylece, karmaşık geometriler tek tip nitrürlenmiş tabaka elde eder ve kör delikler bile difüzyondan etkilenir ve etkili bir şekilde nitrülenir.

Lazer Nitrüleme

Son yirmi yılda, lazer nitrüleme alternatif bir nitrüleme yöntemi olarak araştırılmıştır [24]. Şekil 3.5. 'de açıklandığı gibi, doğrudan bir lazer sentezi sırasında reaktif gaz ortamına bir malzeme yerleştirilir ve lazer ışığı ile ışınlanır. Azot, bir uçtan eriyik havuzuna akış olmaktadır. Yüzlerce nanosaniyelik bir zaman ölçeğinde, $I \approx 108 \text{ W/cm}^2$ 'nin ortam nitrojen atmosferinin yüksek yoğunluklu darbe-lazer ışınlanması, 1-1.5 μm kalınlığında kalın nitrürlenmiş tabaka üretme yeteneğine sahiptir.



Şekil 3.5. Lazer nitrürlemenin ilkeleri [24].

Plazma nitrürlemenin tercih sebeplerinin neden olduğu etmenler şu şekildedir. Plazma nitrürlemenin;

- İşlemin kolay olması,
- Nitrürleme hızının yüksek oluşu,
- Beyaz tabakanın kontrolü,
- Yüksek aşınma direnci,
- Yüksek yorulma mukavemeti,
- Noktalı yüklere karşı yüksek mukavemet,
- Düşük gevreklik,
- Yüksek süneklilik,
- Üretim maliyetinin düşük olması,
- Çevreyi kirletmemesi gibi önemli etkenler önem arz etmektedir [25].

3.2.2. Karbürleme

Karbürlemenin amacı, çelik veya diğer alaşımların yüzey katmanlarını karbonla zenginleştirmektir. Yeterli karbon çözünürlüğünü ve malzemenin yüzey derinliğindeki karbon miktarını elde etmek için işlem, 900-950 °C gibi nispeten yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir. Sonuç olarak hacminde yeterli karbon içeriğine sahip olmayan çelikler sert yüzeyi elde eder. Azaltılmış karbon içeriği, çekirdek tokluğunu korumak için bilinçli olarak seçilmiştir.

Endotermik karbonlama atmosferleri, CO ve CH₄ gibi karbonlama bileşenlerinin ve CO₂ ve H₂O gibi karbonsuzlaştırma bileşenlerinin bir karışımından oluşur. Süreci kontrol etmek için fırın atmosferinin karbonlama potansiyeli, CO, CO₂, CH₄ ve H₂O'nun tüm gaz bileşenlerinin ölçülmesini gerektirir. Sementleme için itici güç, fırın atmosferindeki karbon potansiyelleri ile çelik yüzeyindeki karbon arasındaki gradyan tarafından belirlenir. Karbürlemenin temel reaksiyonları şunları içerir [26]:



3.2.2.1. Kutu Karbürleme

Adından da anlaşılacağı gibi, bu işlem, bileşenin uygun bir kutuda katı bir karbonlama bileşiği içinde paketlenmesini ve yaklaşık 900 ila 950 °C'lik bir sıcaklığa ulaşmak için bir fırında yavaşça ısıtılmasını içermektedir. Bu sıcaklıkta havadaki oksijen, karbon monoksit üretmek için karbonlama bileşiğinde bulunan karbon ile reaksiyona girer. Demir varlığında karbon monoksit aşağıdaki denklemde verildiği gibi ayrışır [27].



3.2.2.2. Sıvı Karbürleme

Sıvı karbürleme, daha yüksek aşınma direnci sağlamak için çeliğin yüzeyini sertleştirme yöntemidir. Bu, bileşenin erimiş bir siyanür banyosunda 880-930 °C sıcaklık aralığında ısıtılmasıyla yapılır, böylece atomik karbon az miktarda nitrojenle birlikte metalin yüzeyine yayılır. Erimiş siyanür banyosu, karbon emilim oranını arttırmak için katalizör görevi gören baryum klorür, kalsiyum klorür, stronsiyum klorür gibi sodyum siyanür ve alkali toprak klorürlerden oluşur. Sıvı karbürleme banyosunu sade bir sodyum siyanür banyosundan ayıran tek şey, düşük nitrojen içerikli yüksek karbonlu derin bir kasa üretmeye giden siyanür ve klorür karışımıdır [27].

3.2.2.3 Gaz Karbürleme

Gaz karbonlama, bileşenin yüzeyinin karbon içeren gazlı bir atmosferde karbon ile doyurulduğu bir işlemdir. Bunu gerçekleştirmek için önce bileşenler, nötr bir atmosferde gaz geçirmez bir fırında 900-950 °C aralığında önceden belirlenmiş bir sıcaklığa ısıtılır. Daha sonra fırın propan, bütan, gazyağı, benzen vb. gibi uygun bir gazla doldurulur. Son olarak, bileşenler kutuda karbon difüzyonuna izin vermek için bu sıcaklıkta tutulur. Sementasyon işlemi bittikten sonra, daha sert bir çekirdek tarafından desteklenen yüzeyde gerekli sertliği, aşınma direncini ve yorulma direncini elde etmek için bileşenlere su verilir [27].

3.2.3. Borlama

Tezimde borlama üstüne olduğundan gerekli açıklamaları dördüncü bölümde değineceğim.

3.3. MEKANİK YÜZEY İŞLEM

Mekanik arızaların bileşenlerin dış etmenlerden kaynaklandığı gerçeği göz önüne alındığında, bileşen yüzeyinde mekanik özellikleri iyileştirebilecek yaklaşımlar ve

işlemler uygulamak oldukça etkilidir. Plastik deformasyon süreçleriyle üretilen yüzey nanokristalizasyonu son yıllarda artan bir ilgi görmektedir. Önerilen tüm Plastik deformasyon teknikleri arasında, alternatif bilyalı dövme yöntemleri basitlikleri ve farklı malzeme sınıflarına, metal parçalara uygulanabilirlikleri nedeniyle çok umut verici görünmektedir. Bilyalı dövme genellikle yüzeye yakın artık gerilmeleri oluşturmayı ve hemen hemen aynı malzeme tabakasını işleyerek sertleştirmeyi amaçlayan mekanik bir yüzey işlemidir. Genellikle en çok kullanılan mekanik yüzey işlemleri aşağıdaki gibidir;

- Bilyalı dövme
- Aşırı Bilyalı dövme
- Lazer dövme
- Ultrasonik Bilyalı Dövme işlemleridir [28].

3.3.1. Bilyalı Dövme İşlemi

Bilyalı dövme çok sayıda oluşan bilya jetinden makina ekipmanı veya iş parçasının yüzeyine kontrollü bir şekilde uygulama işlemine denilmektedir. Bilya jetine maruz kalan iş parçasının yüzeyinde plastik deformasyon sonucu homojen olmayan, baskı gerilmeli bir tabaka oluşmaktadır. Bilyalı dövme işleminin asıl amacı metallerde oluşan makine parçası veya iş parçalarının yorulma, korozyonlu yorulma ve gerilmeli korozyon gibi hasar türlerine karşı dirençleri arttırmaktır [29].

Bir yüzey işleme prosesi olarak bilyalı dövme imalat endüstrisinde metalik bileşenlerin yorulma ömrünü artırmak için sıklıkla kullanılmaktadır. Çünkü yorulma gerilmesinin başlamasını geciktirmek için dövülmüş yüzey üzerinde basınç kalıntı gerilmeleri üretir ve yayılmasını geciktirmektedir. Bu yüzey işlemi ayrıca yüzey pürüzlülüğüne neden olmaktadır ve dövülmüş bileşenin soğuk çalışmasına neden olmaktadır. Bu iki etki, bileşenin yorulma ömrü için zararlıdır. Ayrıca bilyalı dövme işlemi süreci, belirleyici etkileri olan sürekli ve ayırık parametrelerden etkilenmektedir [30]. Bir dişilinin bilyalı dövülmesi şekil 3.6. 'de gösterilmiştir [31].



Şekil 3.6. Bir dişilin bilyalı dövülmesi işlemi [31].

3.3.2. Aşırı Bilyalı Dövme İşlemi

Bilyalı dövme işleminin çok yüksek Almen şiddeti ile uygulanmasına aşırı bilyalı dövme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Almen şiddeti mevcut bir parça üzerinde optimum olarak belirlenmiş bir dövme yoğunluğunu çoğaltmanın bir yolu olarak kullanılmaktadır. Parça aşırı bilyalı dövmeye maruz kaldığında eğilir ve daha yoğun dövme ile parçanın daha fazla eğilmesine neden olmaktadır. Bu işlem çok başarılı olup bir dizi farklı yoğunlukta bilyalı dövme ile yorulma testi yapılmasıyla bilinmektedir. Almen şiddeti uygulanacak bilyanın boyutu, kullanılan havanın basıncı ve dövme işlem süresi ile ortaya çıkmaktadır. Bu sayede dövme yapılan parçanın yüzeyinde ince ve nano taneli yapılar oluştuğu gözlemlenebilir. Bu yapıda olan parça yüzeyinde yorulma dayanımının artmasını sağlamaktadır [32].

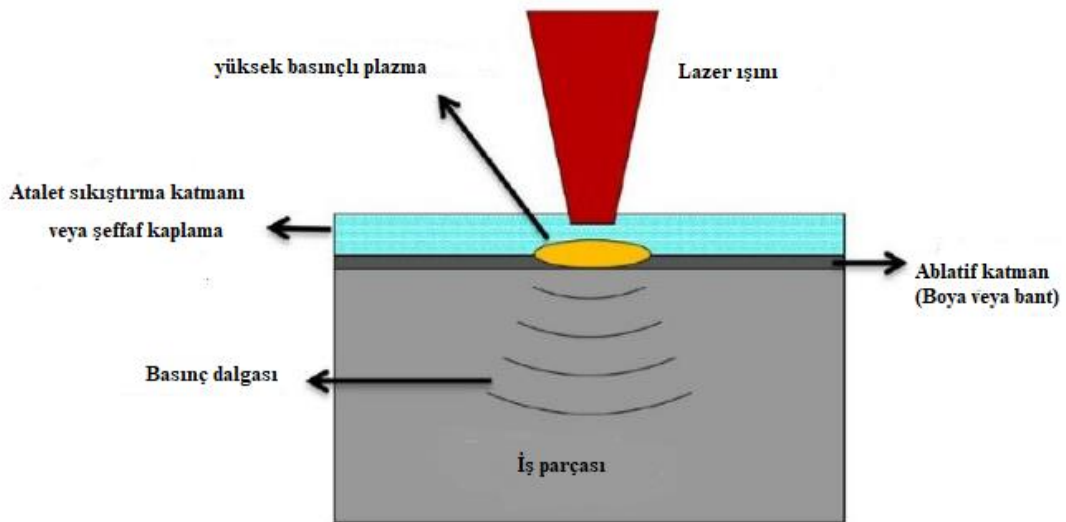
3.3.3. Lazer Dövme İşlemi

Lazer dövme işlemi, mekanik bilyalı dövmeye kıyasla temassız bir işlemdir. Bu tip yüzey işleme, sürekli dalga lazer ışını yerine yalnızca çok kısa aralıklarla malzeme yüzeyine yönlendirilen yoğun bir lazer darbesi kullanılarak gerçekleştirilebilir. Lazer dövme işlemi sertliği iyileştirerek ve yüzeye yakın bölgede faydalı artık gerilmeleri oluşturarak metalik malzemelerin yorulma performansını önemli ölçüde iyileştirebilir.

Lazer dövme işleminde yüksek enerjili darbeli bir lazerden gelen ışık, şeffaf hapsedme ortamından geçer ve ablatif kaplamayı ışınlar, etkilenen bölgeyi hızla yüksek bir sıcaklığa ısıtır ve yüksek basınçlı plazma üretir.

Plazmanın genişlemesi, hedef metalleri plastik olarak deforme edebilen bir şok dalgasına neden olmaktadır. Ayrıca parçanın sertleşmesine ve basma artık gerilmelerine neden olmakta ve şekil 3.7’de gösterilmiştir. Bilyalı dövme ile karşılaştırıldığında Lazer dövme işleminin aşağıdaki avantajlara sahiptir;

- Lazer dövme işlemi daha derin sıkıştırma artık gerilmeleri üretebilir.
- Lazer dövme işlemi 'deki proses parametreleri tam olarak kontrol edilebilir.
- Lazer dövme işlemi 'den sonra parçaların yüzey bütünlüğü, sonradan işleme gerek kalmadan iyileştirilir.
- Lazer dövme işlemi, karmaşık geometrili bileşenleri işlemek için kullanılabilir.
- Lazer dövme işlemi, yüksek bir işleme verimliliğine sahiptir ve temiz bir çalışma ortamı sağlar [33].



Şekil 3.7. Lazerle dövme işlemi şematik gösterimi [33].

3.3.4. Ultrasonik Bilyalı Dövme İşlemi

Ultrasonik bilyalı dövme yönteminde bir ultrasonik dönüştürücü, atışları oluşturan titreşimler üretir. Bir titreşim jeneratörü, içine yerleştirilmiş pürüzsüz bir yüzeye sahip birden fazla çelik bilyeyi titreştirerek, kapalı bir oda içinde ultrasonik titreşimler meydana gelmektedir. Odanın titreşim frekansı genellikle 50 Hz ile 20 kHz arasındadır. İş parçası, dövmeleri titreşime sokarak, kısa bir süre içinde çok sayıda birden fazla darbe alır. Dövmelerin iş parçasına çarpma yönleri oldukça rastgeledir. Bunun nedeni, titreşim odasının içindeki dövmelerin yanlışlıkla uçuş yönleri olmasıdır. Sonuç olarak, numune yüzeyine çok büyük gerinim oranlarında tekrarlanan çok yönlü darbeler, ciddi plastik deformasyonlar üretir. Bu da, iş parçasının yüzey katmanındaki nanometre rejimine kadar kademeli olarak tane boyutunu iyileştirir. Ultrasonik bilyalı dövme, tatmin edici sonuçlar veren çok çeşitli malzeme türleri üzerinde deneyimlenmiştir. Nano yapısı, yüzeyden 50 mm derinliğe kadar ölçülen saf çelikleri, alaşımları ve saf metalleri içerir. Malzemenin çok daha iyi performans göstermesini ve iyileştirilmiş mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır [34].

BÖLÜM 4

BORLAMA

4.1. BOR ELEMENTİ HAKKINDA BİLGİLER

Bor, B simgesi ve atom numarası 5, periyodik cetvelin 3A grubun birincisi olan kimyasal bir elementtir. Bor elementi farklı izotoplardan (^8B , ^{10}B , ^{11}B , ^{12}B , ^{13}B) oluşmaktadır. Ayrıca ^{10}B ve ^{11}B en kararlı izotoplarıdır.

Dünyada 230 adet bor mineralleri olduğu bilinmekte ve bunlardan en çok bilineni turmalindir. Ancak sanayi bakımından bakıldığında kullanılan bileşikler ise kernit ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), tinkal ($\text{Na}_4\text{B}_4\text{O}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), üleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)'dir. Çizelge 4.1.'de bor yataklarına ait özellikler özellikler gösterilmiştir [35]. Doğadaki bor kristallerinin görünüşleri Şekil 4.1 'de gösterilmiştir [36]. Kristal formunda kırılğan, koyu, parlak bir metaloiddir. Amorf formunda kahverengi bir tozdur. Bor grubunun en hafif elementi olarak bilinen borik asit, sodyum borat, bor karbür ve bor nitrürün ultra sert kristalleri gibi birçok bileşikle sonuçlanan kovalent bağlar oluşturmak için üç değerli elektronuna sahiptir [37].



Şekil 4.1. Bor kristal görünümü [36].

Çizelge 4.1. Bor yataklarına ait özellikler [35].

Mineraller	Kapasite (Milyon ton)	Minimum Tenor (B,0, %)	Maksimum Derinlik (m)
Tinkal	1.0-5.0	10	460
Kolemanit	0.5-2.0	15	460
Kompleks Göl Çamurlar	Çok büyük	1	460
Üleksit	0.5-1.0	20	460

4.2. BORLAMA YÖNTEMLERİ

Borlama, günümüzde iyi bilinen bir termo-kimyasal yüzey sertleştirme işlemidir. Metal alt tabakaya yayılan bor atomları, metal yüzey üzerinde metalik borür tabakası oluşturarak yüksek sertlik, korozyon direnci ve 3-10 kat arasında daha uzun çalışma ömrü sağlamaktadır [38]. Borlama, geleneksel ısı işlem ile kimyasal ve fiziksel buhar biriktirme arasındaki teknoloji boşluğunu tamamlayabilir. Bu nedenle karbonlama, nitrürleme ve karbonitrürlemedeki birçok uygulamanın yerini almak için kullanılmaktadır [39]. Ancak, birçok uygulamada sadece kutu ve macun borlama teknikleri işlenebilirken, sıvı ve gaz borlama teknikleri gibi diğer teknikler toksisite problemlerinden dolayı uygulanamamaktadır.

Borlama, bor atomlarının bir ana metale (çeliğe) difüze olduğu ve yüzeyde sert metalik borür tabakası oluşturduğu termo-kimyasal bir işlemdir. İşlem, iyi temizlenmiş malzemeleri 700 - 1000°C (1300 - 1830°F) sıcaklık aralığında birkaç saat ısıtmak suretiyle hem demirli hem de demirsiz malzemelere uygulanabilir. Yaklaşık 20-300 µm kalınlığında metalik borür tabakası sağlar. Ortaya çıkan metalik borür tabakası yüksek sertlik, iyi aşınma ve iyi korozyon direnci ve yüksek sıcaklıkta oksidasyon direnci gibi olağanüstü özellikler vermektedir. Birçok metal ve alaşım boromize edilebilmesine rağmen, alüminyum ve magnezyum alaşımları düşük ergime noktalarından dolayı boromize edilemezler. Ayrıca bakır alaşımı kararlı borür fazını oluşturamaz [40].

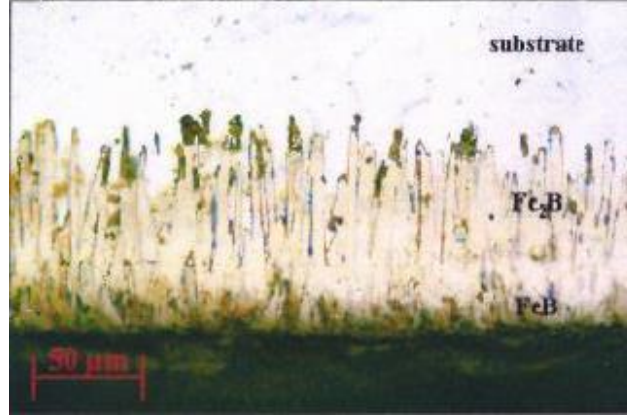
Borlama sırasında, bor atomları difüze olur ve ardından bileşen yüzeyinin metalik kafesine emilir. Sonuç olarak, ya tek fazlı borür ya da bir çok fazlı borür tabakası ile bir arayer bor bileşimi oluşturulur. Morfoloji, büyüme ve faz bileşimi dahil olmak üzere borür tabakasının çeşitli özellikleri, altlık malzemelerindeki elementlere bağlıdır ve çizelge 4.2. 'de gösterilmiştir [40].

Çizelge 4.2. Borlama sonrası oluşan çeşitli yüzeyler üzerindeki borid tabakalarının mikrosertliği ve yapısı [40].

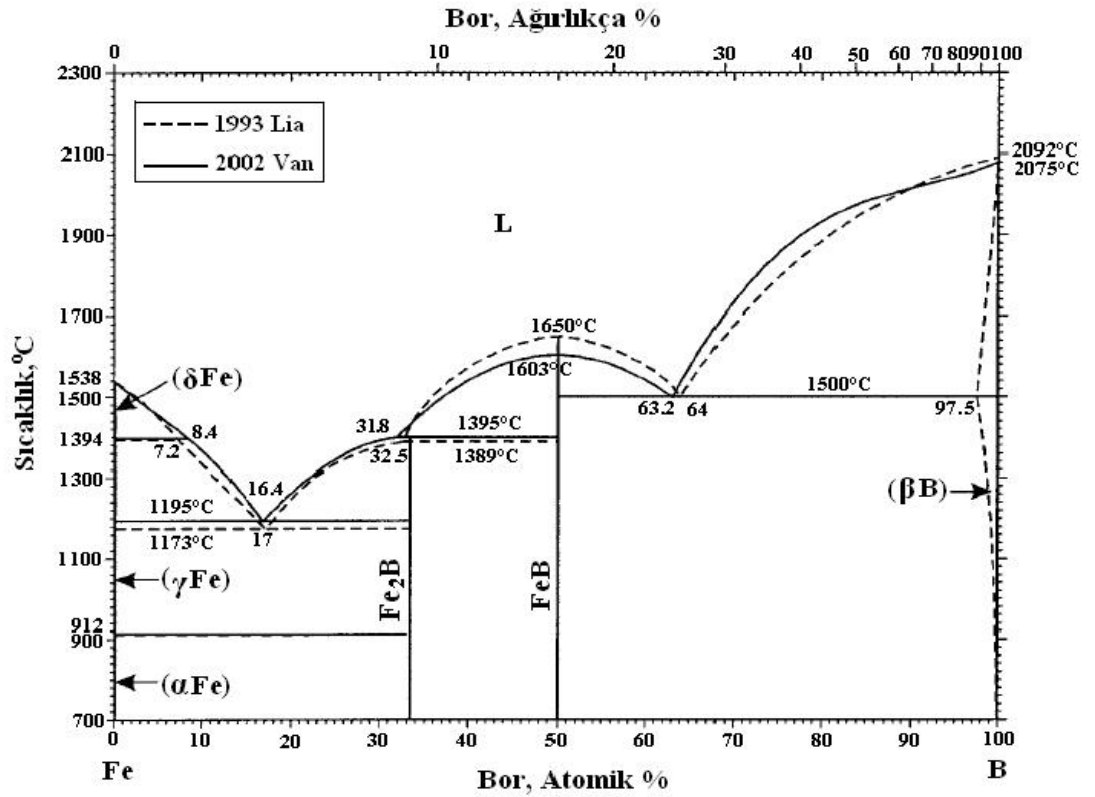
Madde	Borür Tabakasındaki Kurucu Fazlar	Tabakanın Mikro Sertliği HV kg/mm ²
Fe	FeB	1900-2100
	Fe ₂ B	1800-2000
Co	CoB	1850
	Co ₂ B	1500-1600
Co-27.5Cr	CoB	2200 (100 g)
	Co ₂ B	1550 (100 g)
Ni	Ni ₄ B ₃	1600
	Ni ₂ B	1500
	Ni ₃ B	900
İnco 100	-----	1700 (200 g)
Mo	Mo ₂ B	1660
	Mo ₂ B ₅	2400-2700
W	W ₂ B	~ 2700 (genel sertlik)
	WB	
	W ₂ B ₅	
Ti	TiB	2500
	TiB ₂	3370
Ti-6Al-4V	TiB	3000 (100 g)(genel sertlik)
	TiB ₂	
Nb	Nb ₂ B ₂	2600-3000 (genel sertlik)
	NbB ₄	
Ta	Ta ₂ B	3200-3500
	TaB ₂	2500
Zr	ZrB ₂	2300-2600 (genel sertlik)
	Zr ₂ B	
Re	ReB	2700-2900

Demir ve çelik üzerinde oluşan borür tabakası, Fe-B faz diyagramından Şekil 4.3. 'de belirli bir bileşime karşılık gelen tek fazlı veya çift fazlı olabilir.

Tek fazlı tabaka için Fe_2B elde edilirken, çift fazlı tabaka FeB 'nin bir dış fazı ve Fe_2B 'nin iç fazından oluşurken, borid tabakasının morfolojisi Şekil 4.2. 'de gösterildiği gibi testere dişi bir yapıdır. Testere dişi yapısı, Fe_2B alt tabaka arayüzlerinde mekanik yapışmayı iyileştirmeye yardımcı olur [41].



Şekil 4.2. AISI 1018'in dış tabakası FeB ve iç tabakası Fe_2B olan borür tabakalarının testere dişi yapısı [41].



Şekil 4.3. Fe-B ikili denge diyagramı [41].

FeB fazı , Fe₂B fazından daha kırılğan olduğu için Fe₂B fazının oluşumu FeB fazından daha fazla tercih edilir. Ayrıca çekme gerilmesi Fe₂B'nin yüksek basınç altında bir yüzey oluşturduğu, FeB'nin ise yüksek basınç altında bir yüzey oluşturmaktadır. Bununla birlikte, borlama işlemi, Fe₂B ve FeB fazlarının çakışmasını önler, bu da çift fazlı tabakanın FeB/Fe₂B ara yüzeyinde çatlak oluşumuna neden olmaktadır.

Çatlak oluşumu, uygulanan mekanik gerilim veya termal/mekanik şok altında parçalanmaya ve hatta çift fazlı tabakanın ayrılmasına yol açar. Neyse ki tavlama işlemi, borlama işleminden sonra FeB fazının oluşumunu azaltabilmektedir [38].

Fe₂B fazının özellikleri şunları içermektedir:

- Ağırlıkça bor içeren bileşim %8,83
- Gövde merkezli tetragonal kristal yapı (a = 5.078 Å , c = 4.249 Å)
- Yoğunluk 7,43 kg/cm³
- Yaklaşık mikrosertlik 18-20 GPa
- Young modülü 285-295 GPa
- Termal genişleme katsayısı 200-600 °C $7.65 \times 10^{-6} / ^\circ C$ ve 100-800 °C $9.2 \times 10^{-6} / ^\circ C$ aralığındadır [41].

FeB fazının özellikleri şunları içermektedir:

- Ağırlıkça bor içeren bileşim %16.23
- Ortorombik kristal yapı (a=4.053 Å, b=5.495 Å, c=2.946 Å) ,
- Yoğunluk 6,75 g/cm³
- Yaklaşık mikrosertlik 19-21 Gpa
- Young modülü 590 Gpa
- Termal genişleme katsayısı 200-600 °C $23 \times 10^{-6} / ^\circ C$ aralığındadır [41].

Borlama işlemi iki reaksiyondan oluşur. Başlangıç aşaması, bor ortamı ile bileşen yüzeyi arasında gerçekleşir. Çekirdekler, borlama sıcaklığının ve süresinin bir sonucu olarak oluşur ve bunu borid tabakasının büyümesi takip eder [41]. Demirli

malzemelerde ise önce Fe₂B çekirdekleri oluşur ve metal yüzeyindeki kusur noktalarında, makro kusurlarda (yüzey pürüzlülüğü, çizikler vb.) ve mikro kusurlara (tane altlıkları, çıkıklar vb.) bakılır. Aktif bor ortamı fazla ise, FeB gibi zengin bor ürünü fazı Fe₂B fazında oluşacak ve büyüyecektir.

İkinci aşama, eş tabakasının kalınlığının parabolik bir zaman yasasına göre oluşturulduğu difüzyon kontrollü bir süreçtir :

$$x^2 = k.t \quad (4.1)$$

Bu formülde x eş katman kalınlığı, k sıcaklığa bağlı sabit bir sayı ve t ise borlama zamanı anlamına gelmektedir [41].

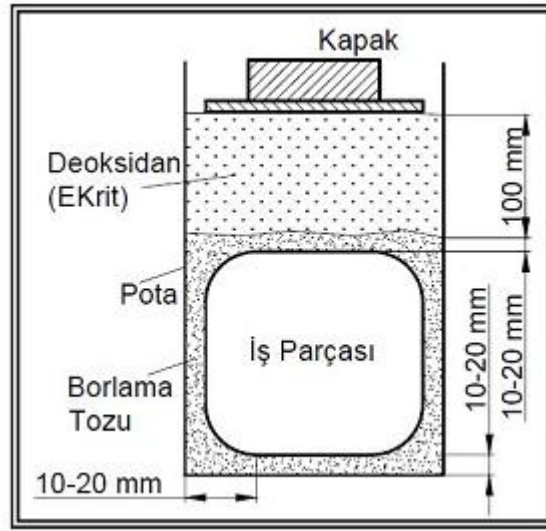
Demirli malzemeler söz konusu olduğunda, bor atomları kristalografik yönde yayılmayı ve bu yön boyunca maksimum atom yoğunluğunu elde etmek için Fe₂B'nin gövde merkezli tetragonal kafesini oluşturmayı tercih etmektedir [42]. Fe₂B'nin büyümesi, testere dişi morfolojisi sergileyen sütunlu kristal kümeleridir. Çift faz için FeB'nin sütun şeklindeki büyümesini kristalografik doğrultuda büyümeyi tercih etmektedir. FeB'nin testere dişi yapısı, Fe₂B'ninkinden daha düşüktür [43].

4.2.1. Kutu Borlama

Paket borlama veya katı hal borlama tekniği, basitliği ve ekonomik olması nedeniyle en çok tercih edilen tekniktir. Proses, metallerin ve metal alaşımlarının üç madde grubundan oluşan borlama tozu karışımına gömülmesini içerir ve aşağıdaki gibidir [40].

- Bor kaynağı: Bor karbür (B₄C), ferroboron ve amorf bor
- Aktivatör: NaBF₄, KBF₄, (NH₄)₃BF₄, NH₄Cl, Na₂CO₃, BaF₂ ve Na₂B₄O₇
- Seyreltici: SiC, Al₂O₃ dir.

Isıya dayanıklı, iyi temizlenmiş ve pürüzsüz kaptan 10-20 mm kalınlığında metaller ve metal alaşımlar, 50-100 mm derinliğinde borlama tozu karışımı kutuya konular ve kap kapatılır. Isıl işlem fırında işlenir. Borlama sıcaklığına ve süresine ulaştıktan sonra kap fırından alınır ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılır. Oksijenin borlama üzerindeki olumsuz etkisini önlemek için, borlama işlemi Ar , N₂, H₂ veya Ar-N₂-H₂ karışımı gibi koruyucu gaz atmosferinde yapılmalıdır. Koruyucu gaz, borlamadan sonra proses 300 °C'ye soğuyuncaya kadar muhafaza edilmelidir. Bu prosedür kullanarak, borlama tozu karışımı, yeni tozu karışımı ile % 20-50 oranında karıştırılarak yaklaşık 5-6 kez tekrar kullanılabilir ve şekil 4.4 'de gösterilmiştir [42].



Şekil 4.4. Katı borlama işleminin şematik gösterimi [42].

4.2.2. Sıvı Borlama

Sıvı borlama veya tuz banyosu borlama tekniği, 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda elektrolizli ve elektrolizsiz boraks bazlı tuz eriyiklerinde (Na₂B₄O₇) gerçekleştirilir [40]. Bileşenin deformasyonunu ve çatlamasını önlemek için bileşen, daldırma ve banyodan çıkarmanın termal şokuna dayanmalıdır. İşlemden sonra, fazla eriyen tuz fırından çıkarılmalıdır. Bileşen, yüksek maliyet ve zaman kaybına neden olur. Bakım maliyeti de yüksektir. Çünkü işlem, borlama reaksiyonunu uzatmak ve uygun viskozite için tuzun yeniden doldurulmasını gerektirir. Reaksiyondan kaynaklanan aşındırıcı duman, teknik için başka bir sorun oluşturmaktadır.

4.2.3. Gaz Borlama

Gaz borlama tekniği, diboran (B_2H_6) veya bor klorür (BCl_3) gibi bazı gaz ortamlarının bir difüzyon işlemidir. BCl_3-H_2 gaz karışımı daha önce çeliği borlaştırmaya çalışır, ancak yüksek BCl_3 konsantrasyonu alt tabaka üzerinde korozyona neden olduğundan zayıf yapışkan tabakalara neden olmaktadır. Tekniği geliştirmek için seyreltik 1/15 oranında BCl_3-H_2 gaz karışımı yaygın olarak 700-900 °C'de ve yaklaşık 67 kPa basınç altında kullanılır. Sonuç olarak $FeCl_3$ 'ü korozyon önler ve FeB oluşumunu azaltır. Ayrıca bu işlem titanyum ve alaşımları ile de kullanılabilir [44].

4.2.4. Plazma Borlama

Plazma borlama tekniği, gaz borlama tekniğinde meydana gelen aynı problemlerden dolayı ticari uygulamada henüz mevcut değildir. Bu teknikte $B_2H_6-H_2$ ve BCl_3-H_2-Ar gaz karışımları kullanılır. Ek olarak, BCl_3-H_2-Ar gaz karışımı, BCl_3 konsantrasyonunun bir miktarını kontrol etme konusunda iyi özellikler sergiler. Ortaya çıkan özellikler deşarj voltajını azaltır ve borür tabakasının mikrosertliğini artırır [45].

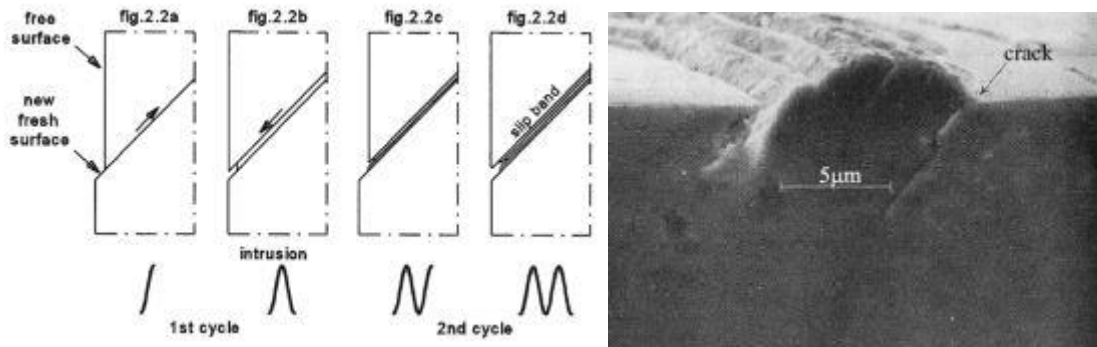
Çift fazlı borür tabakasının gözenekliliği gözlenmesine rağmen, BCl_3 konsantrasyonunun artırılması bunu en aza indirebilir. Bu teknik, borür tabakasının kutu borlama tekniğinden daha yüksek verimli birikmesinden dolayı refrakter metallere yaygın olarak uygulanır. Bu teknik de proses düşük sıcaklıkta yaklaşık 600 °C 'de ve kısa sürede çalıştırılabilir. Bu da enerji ve gaz tüketiminde tasarrufa yardımcı olmaktadır. Bununla birlikte, geleneksel kutu borlama tekniği bu kadar düşük sıcaklıkta çalışamaz.

BÖLÜM 5

METALLERDE YORULMA

Yorulma, belirli bir noktada veya noktalarda dalgalı gerilmeler, gerinimler oluşturan, yeterli sayıda dalgalanmadan sonra çatlaklar ve tam kırılma ile sonuçlanabilecek koşullara maruz kalan bir malzemede meydana gelen ilerleyici lokalize, kalıcı yapısal değişiklik süreci olarak tanımlanabilir [46].

Schij ve arkadaşları çatlak başlama sürecini şu şekilde açıklamaktadır; akma sınırının altındaki gerilmelerde, döngüsel kayma meydana gelebilir. Meydana gelen kayma yüzeyde oluşur. Şekil 5.1. 'de görüldüğü gibi, sünek malzemelerde kayma, maksimum kayma gerilmesi (45°) düzleminde meydana gelme eğilimindedir. Açıkta kalan taze malzeme yüzeyi bir oksit tabakası ile kaplandığından, gerinim sertleşmesi nedeniyle de kayma tersine çevrilemez. Daha sonra, döngüsel yükleme altında büyümeye devam edebilen bir mikro çatlak oluşur [47].



a) Şematik

b) Fotoğrafik

Şekil 5.1. Kayma bantlarının oluşumu ve çatlak başlangıcı [48].

Toplam yorulma ömrü N_f iki farklı aşamadan oluşur, bir çatlak başlatma fazı N_i ve çatlak ilerleme fazı N_p 'dir.

$$N_f = N_i + N_p \quad (5.1)$$

Başlama aşamasının uzunluğu, büyük ölçüde yüzey durumuna ve malzeme mukavemetine bağlıdır. Öte yandan, çatlak ilerleme aşamasında, yüzey durumu önemsizdir. Çatlak yayılma hızı, malzemenin elastik modülünde olduğu kadar malzeme mukavemetine çok fazla bağımlı değildir. Farklı mekanizmalar tarafından yönlendirildikleri için iki faz arasında ayırım yapmak önemlidir. Ne yazık ki, bir aşamanın ne zaman bitip diğerinin ne zaman başladığını açıklayan genel kabul görmüş bir nicel ölçü yoktur. Şekil 5.1.b 'de gösterildiği gibi mikroskobik bir çatlak oluşturmak için tek bir döngü yeterli olabilir. Ancak pratikte, başlangıç ve ilerleme fazını ayırt etmek için genellikle yaklaşık 0.1 – 1.0 mm'lik görünür ve ölçülebilir bir çatlak uzunluğu kullanılmaktadır.

Yorulma kırılmalarına, döngüsel gerilim, çekme gerilimi ve plastik gerinmenin eş zamanlı etkisi neden olmaktadır. Bu üçünden herhangi biri mevcut değilse, yorulma çatlama başlamaz ve yayılmaz. Döngüsel gerilim çatlama başlatır ve çekme gerilimi çatlak büyümesine (yayıma) neden olur.

Yorulma süreci üç aşamadan oluşur:

- Çatlak oluşumuna ve çatlak başlangıcına yol açan ilk yorulma hasarı
- Bir parçanın kalan çatlaksız enine kesiti çok zayıf hale gelene kadar bir çatlağın aşamalı döngüsel büyümesi (çatlak yayılması)
- Kalan kesitin nihai, ani kırılmasıdır.

Yorulma çatlama normalde malzemenin statik akma dayanımının çok altında olan döngüsel gerilimlerden kaynaklanır.

Yorulma testinin kesin sonuçlar alabilmesi için aşağıdaki maddelerin karşılanması gerekir. Bunlar şöyledir;

- İş parçasının özellikleri
 - İş parçasının cinsi

- Ergitme ve döküm koşulları
- Uygulanan mekanik işlemler ve ısı işlemler
- Kimyasal bileşimi
- İş parçasının yüzeyinin durumu ve kalitesi
- İş parçasının durumu (çubuk, levha vb.)
- Test numunesinin şekil ve boyutları
- Test cihazının tipi, çalışma prensibi ve test sırasında uygulanan stres ve frekans
- Test ortamının ortam sıcaklığı ve koşulları
- İş parçasının metalografik yapısı.

İş parçalarının yorulma performansı hakkında daha güvenilir sonuçlar elde etmek için son yıllarda standart test numuneleri kullanılmamaktadır. Ancak iş parçalarının çalışacakları ortam koşullarına benzer koşulları simülasyon eden özel kurulumlarda test edilmektedir [49].

Yüksek döngü yorulma için, yorulma mukavemeti genellikle bir SN eğrisi ile ifade edilir. SN eğrilerinin birçok benzer varyantı literatürde kullanılmaktadır. Örneğin doğrusal, çift doğrusal veya doğrusal olmayan gibi. Genellikle çift logaritmik eksenlerde çizilirler. Bazen de gerilim eksenini doğrusal olabilmektedir. Ayrıca gerilim eksenini ya aralıklarda ya da genliklerde verilebilir. Belirli bir stres genliğinde beklenen ömrün ne olduğunu tanımladıkları için kavramsal olarak ayırdıkları [49].

5.1. S-N EĞRİSİ

Test sırasında hasara kadar olan döngü sayısı kaydedilir. Hasar çevrim sayısının σ gerilme miktarına göre logaritmasını gösteren eğriye S-N eğrisi denir. S-N eğrisi, normal gerilme seviyesi ile hasarın oluştuğu çevrim sayısı arasında değer görünüm tablosu görevi görmektedir [50].

Yapılan testler neticesinde ortaya çıkan gerilme (σ) hasar döngü sayısının grafiği S-N eğrisini vermektedir. Gerilme σ , gerçek gerilme değeri ise σ_g olarak alınır [51].

Gerilim genliği, döngüdeki maksimum ve minimum gerilimlerin ortalaması olarak tanımlanan bir ortalama gerilim σ_m etrafında değişir;

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (5.2)$$

Gerilme aralığı (σ_r), σ_{maks} ile σ_{min} arasındaki farktır

$$\sigma_r = \sigma_{maks} - \sigma_{min} \quad (5.3)$$

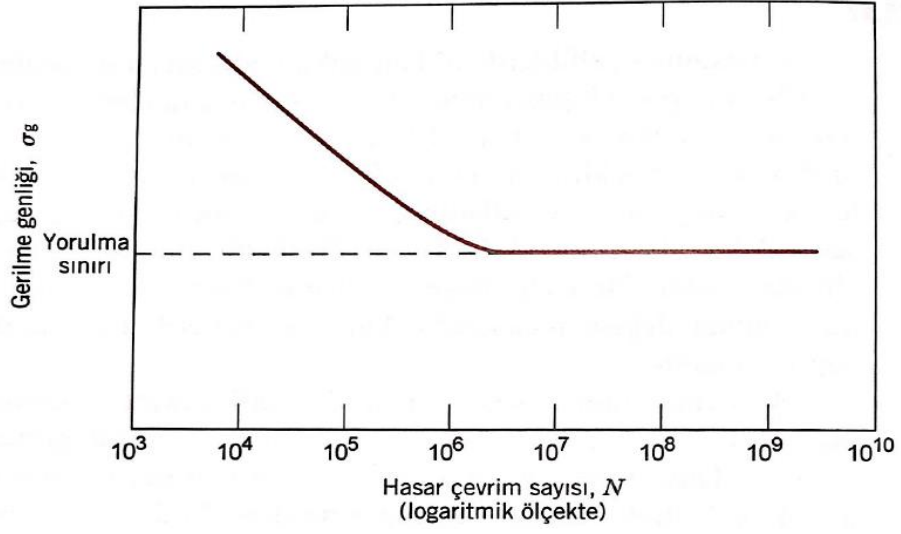
Gerilme genliği (σ_g) gerilme aralığının yarısı kadardır.

$$\sigma_g = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (5.4)$$

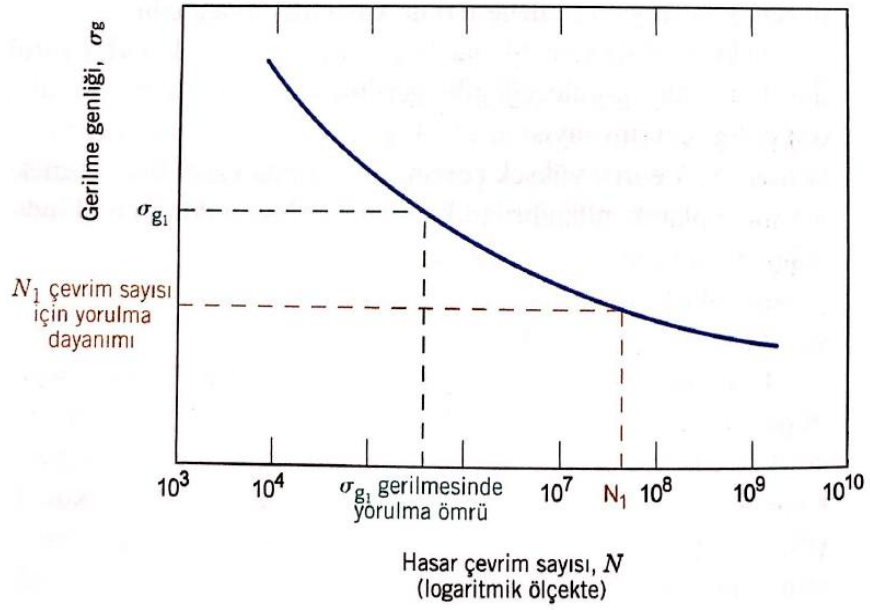
Son olarak gerilme oranı (R) minimum gerilmenin maksimum gerilimine oranıdır.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (5.5)$$

Şekil 5.2. ve Şekil 5.3. 'de şematik olarak gösterilen iki farklı S–N davranışı türü gözlemlenmiştir. Bu grafiklerin gösterdiği gibi, stresin büyüklüğü ne kadar yüksek olursa, malzemenin dayanabileceği döngü sayısı o kadar az olur. Bazı demir bazlı ve titanyum alaşımları için S–N eğrisi Şekil 5.2. 'de daha yüksek N değerlerinde yatay hale gelmektedir. Yorulma sınırı olarak adlandırılan ve altında yorulma hatasının oluşmayacağı bir sınırlayıcı stres seviyesi vardır. Bu yorulma limiti, esasen sonsuz sayıda çevrim için arızaya neden olmayacak en büyük dalgalı gerilim değerini temsil eder. Birçok çelik için yorulma limitleri, çekme mukavemetinin %35 ile %60'ı arasında değişir [52].



Şekil 5.2. Yorulma sınırı gösteren malzemeye ait S-N eğrisi [52].



Şekil 5.3. Yorulma sınırı göstermeyen malzemeye ait gerilme genliğinin logaritmik olarak hasar çevrim sayısına göre değişimi [52].

5.2. YORULMA ÖMRÜNÜ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Yorulma ömrünü etkileyen faktörler aşağıdaki gibidir;

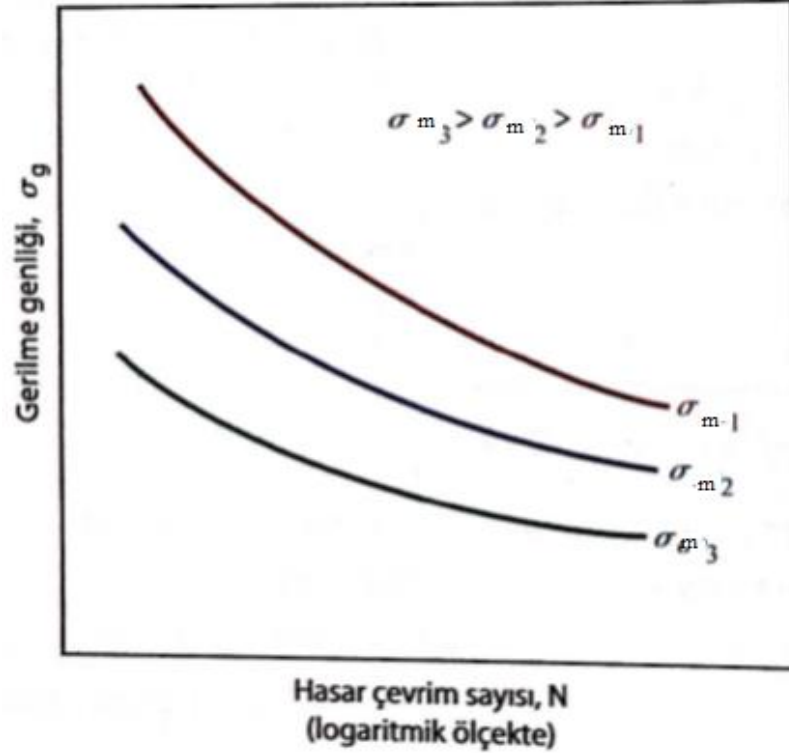
- Ortalama Gerilme
- İş parçası Tasarımı

- Yüzey İşlemleri
- Termal Yorulma
- Yüzey Etkisi

Mühendislik malzemelerinin yorulma davranışı bir dizi değişkene karşı oldukça hassastır. Bu faktörlerden bazıları ortalama gerilme seviyesi, geometrik tasarım, yüzey etkileri ve metalurjik değişkenlerin yanı sıra çevreyi içermektedir [53].

5.2.1. Ortalama Gerilme

Yorulma ömrünün gerilme genliğine bağımlılığı S–N grafiğinde temsil edilmektedir. Bu tür veriler sabit bir ortalama gerilme için alınır . Ortalama gerilme yorulma ömrünü de etkilemektedir. Bu etki, Şekil 5.4.'de şematik olarak gösterildiği gibi her biri farklı olarak ölçülen bir dizi S–N eğrisi ile temsil edilebilir. Ortalama stres seviyesinin artması, yorulma ömrünün azalmasına neden olmaktadır [54].



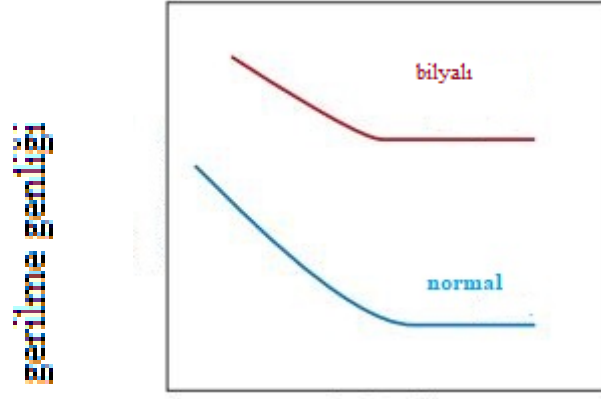
Şekil 5.4. Ortalama gerilmenin (σ_m) S-N eğrisi üzerine etkisi [53].

5.2.2. İş parçası Tasarımı

Bir bileşenin tasarımı, yorulma özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Herhangi bir çentik veya geometrik süreksizlik, gerilim yükseltici ve yorulma çatlağı başlama yeri olarak işlev görebilir; bu tasarım özellikleri arasında oluklar, delikler, kama yolları, dişler vb. bulunur. Süreksizlik ne kadar keskinse (yani eğrilik yarıçapı ne kadar küçükse), stres konsantrasyonu o kadar şiddetlidir. Yorulma hatası olasılığı tasarım değişiklikleri yapılarak bu yapısal düzensizliklerden mümkün olduğunca kaçınılabılır [54].

5.2.3. Yüzey İşlemleri

Yüzey işleme operasyonları sırasında, kesici takım hareketi ile iş parçası yüzeyinde her zaman küçük çizikler ve oluklar oluşur. Bu yüzey işaretleri yorulma ömrünü sınırlayabilir. Parlatma ile yüzey kalitesinin iyileştirilmesinin yorulma ömrünü önemli ölçüde artıracığı bilinmektedir. Yorulma performansını arttırmanın en etkili yöntemlerinden biri, ince bir dış yüzey tabakası içinde artık basınç gerilmeleri uygulamaktır. Böylece, dış kaynaklı bir yüzey çekme gerilimi, artık basınç gerilimi tarafından kısmen sıfırlanacak ve büyüklük olarak azaltılacaktır. Çatlak oluşumu ve dolayısıyla yorulma hatası olasılığının azalmasıdır. Artık basınç gerilmeleri, dış yüzey bölgesi içinde lokalize plastik deformasyon ile mekanik olarak sünek metallere yaygın olarak dahil edilir. Ticari olarak bu, genellikle bilyeli dövme olarak adlandırılan bir işlemle gerçekleştirilir. 0,1 ila 1,0 mm aralığında çaplara sahip küçük, sert parçacıklar işlenecek yüzey üzerine yüksek hızlarda yansıtılır. Ortaya çıkan deformasyon, bilye çapının dörtte biri ile yarısı arasında bir derinliğe kadar basınç gerilmelerine neden olur. Bilyalı dövme çeliğin yorulma davranışı üzerindeki etkisi Şekil 5.5. 'de şematik olarak gösterilmiştir [54].



Başarısızlık döngüler (logaritmik ölçek)

Şekil 5.5. Normal ve bilyalı çelik için şematik S–N yorulma eğrileri [54].

5.2.4. Termal Yorulma

Termal yorulma normal olarak yüksek sıcaklıklarda dalgalanan termal gerilmeler tarafından indüklenir, harici bir kaynaktan gelen mekanik gerilmelerin mevcut olması gerekmez. Termal gerilmelerin kaynağı, sıcaklıktaki değişimlerle birlikte bir yapısal elemanda normal olarak meydana gelecek olan boyutsal genişleme ve büzülmenin kısıtlanmasıdır. Termal gerilmenin büyüklüğü; sıcaklık değişimi ΔT , α_1 termal genişleme katsayısına ve E elastisite modülüne bağlıdır [54].

$$\sigma = \alpha_1 \cdot E \cdot \Delta T \quad (5.6)$$

5.2.5. Yüzey Etkisi

Yorulma hasarına neden olan kılcal çatlakların çoğu, özellikle gerilmelerin yoğunlaştığı alanlarda, malzemenin yüzeyinde oluşmaktadır. Bu nedenle, malzemenin yüzey kalitesi yorulma ömrü için çok etkilidir. Yorulma ömrünü olumsuz etkileyen yüzey kalitesini iyileştirmek için çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır [53].

BÖLÜM 6

DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1. MALZEME

Bu tezde otomotiv ekipmanlarında, makine parçalarında, karbon oranı düşük olduğundan kaynak kabiliyeti yüksek olan St 37 malzemesi kullanılarak farklı süre ve sıcaklıklarda borlanmış yorulma testleri yapılmıştır. Deney için kullanılan malzemenin kimyasal özellikleri Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.2 'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1. St 37 malzemesinin standartı.

MALZEMENİN STANDARTI	DIN	AISI/SAE/St	EN
	17100	St 37	S235JR

Çizelge 6.2. St 37 malzemesinin kimyasal birleşimi.

St 37	C	P	S	N	Mn	Si
	0.17	0.4	0.4	0.009-0,0014	-	-

6.2. BİLYALI DÖVME İŞLEMİ

Bilyalı dövme işlemi için 20 mm çapında 5,5 mm kalınlıkta hazırlanmış olan numuneler parça halinde farklı bilyalar ile uygulama yapılmıştır. Peenmatic 2000S bilyalı dövme cihazı kullanılarak A12, A18, A24 Almen şiddetine maruz bırakılmıştır. Numunelere uygulanmış farklı Almen şiddetleriyle yapılan ölçümlerde belirlenmiş yoğunluklarda bilyalı dövme çalışma sonuçlarına varılmıştır.

6.3. BORLAMA İŞLEMİ

Deneyde kullanılan şekil 6.2' de gösterilen numuneler kullanılmıştır. 850 °C, 950 °C ve 1050 °C 'lerde 4 saat fırın içerisinde bekletilerek katı borlama işlemi yapılmıştır. Borlama işleminde bor kaynağı olarak Karabük Üniversitesinde Doç. Dr. Okan Ünal tarafından temin edilen Ekabor 2 tozu kullanılmıştır. Borlama işlemi Bartın Üniveritesi Makine Atölyesinde bulunan Şekil 6.3. 'de görüldüğü gibi Protherm PLF 120/5 marka ısıtım fırını kullanılmıştır.



Şekil 6.1. Borlama deney işleminde kullanılan St 37 numune malzemeleri.

Katı borlama deneyinde çelik kutu kullanılmıştır. Ekabor 2 tozu kutunun içine yerleştirilmiştir. Borlanacak numunler birbirlerine çok yakın olmayacak şekilde kutu içerisine konulmuştur. Bu işlemden sonra numune üstlerine borlama tozu ilave edilmiştir. Borlama için kullanılan kutu kapağı kapatılmadan borlama tozunun fırına yerleştirildikten sonra havadan etkilenmemesi için SiC tozu ile kutu doldurulmuştur.



Şekil 6.2. Borlama deney işleminde kullanılan protherm PLF 120/5 marka ısıtma fırını.



Şekil 6.3. Borlama deney işleminde kullanılan kova.

6.4. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOP (SEM) ANALİZİ

Taramalı elektron mikroskopu (SEM), katı St 37 deney malzemelerimizin yüzeyinde çeşitli sinyaller üretmek için odaklanmış yüksek enerjili elektron demet gönderilmiştir. Elektron – numune etkileşimlerinden üretilen sinyaller numuneyi oluşturan malzemenin dış morfolojisi (doku), kimyasal bileşimi ve kristal yapısı hakkında bilgi vermektedir. Deney malzemesi olan St 37'nin seçmiş olduğumuz bir

yüzey alanında veriler toplandı. SEM testinin sayesinde uzamsal varyasyonları gösteren iki boyutlu görüntü oluşturmaktadır. Yapılan testte genişliği 20 kat ile yaklaşık 30.000 kat arasında değişen büyütme ve 50 ile 100 nm çözünürlük sayesinde numunenin yüzeyi görüntülenmiştir. SEM analizi tahribatsız olarak kabul edilmekte ve elektron etkileşimleri tarafından üretilen x ışınları numunenin hacim kaybına yol açmamaktadır. Bu nedenle aynı malzemeleri tekrar tekrar analiz etmek mümkündür.

6.5. X IŞINLARI DİFRAKSİYON (XRD) ANALİZİ

Genellikle XRD olarak kısaltılan X-Işını Kırınımı, kristal malzemelerin yapısını analiz etmek için kullanılan tahribatsız bir test yöntemidir. XRD analizi, kristal yapının incelenmesi yoluyla St 37 malzemesinde bulunan kristal fazları tanımlamak ve kimyasal bileşim bilgilerini ortaya çıkarmak için bu deneyimizde kullanılmıştır.

6.6. MİKRO SERTLİK ÖLÇÜMÜ

Yüzeyleri parlatılarak sertlik ölçümü için hazır hale getirilen numuneler Future-Tech FM-700 marka test cihazına yerleştirilmiştir. Yerleştirilen St 37 numuneleri 50 gf yük 8 sn süre ile sertlik ölçümü yapılmıştır. Yapılan sertlik ölçümü kaplamanın başlangıç noktasından numunenin kendisine doğru tek bir çizgi doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda bu işlem sonucunda hem kaplama kalınlığı hemde sertlik derinliği ölçülmüştür. Mikro serlik ölçüm bittikten sonrada gerekli olan uygun değer 850 °C 4 saat bekletilerek elde edilmiştir.

6.7. OPTİK GÖRÜNTÜ ANALİZİ

Optik görüntü analizi 850 °C, 950 °C ve 1050 °C de 4-6-8 saat süre ile kutu borlama yöntemiyle borla kaplanan St 37 yapı çeliğinin optik mikroskop görüntüleri LEICA DM750 marka optik mikroskopta 5 farklı bölgeden farklı yakınlara yaklaşımlar kullanılarak yapılmıştır.

6.8. Aşınma Testi

Numunelerin aşınma testleri, bir Ball-on-disk cihazında kuru kayma koşulları altında gerçekleştirilmiştir. WC aşındırıcı top olarak kullanılmıştır. Pistonlu test prosedüründe yapılan testlerde 20 N'luk bir yük uygulanmıştır. Testler, toplam kayma mesafesi 120 m olan 5.5 mm'lik bir hat üzerinde gerçekleştirilmiştir. Testler sonrasında en az 10 farklı noktadan aşınma izleri ölçülerek aşınma hacmi kayıpları belirlenmiştir. TESCAN MAIA3 XMU cihazında aşınmış yüzey görüntüleri ve EDS analizleri yapılmıştır.

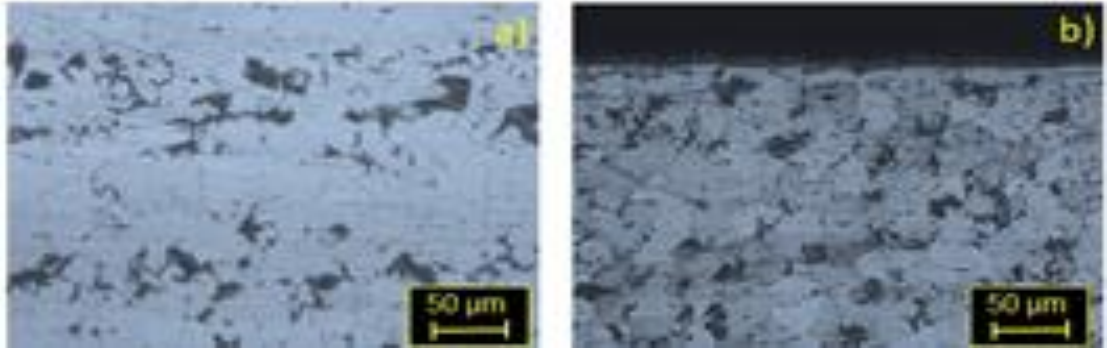
BÖLÜM 7

DENEY SONUÇLARI

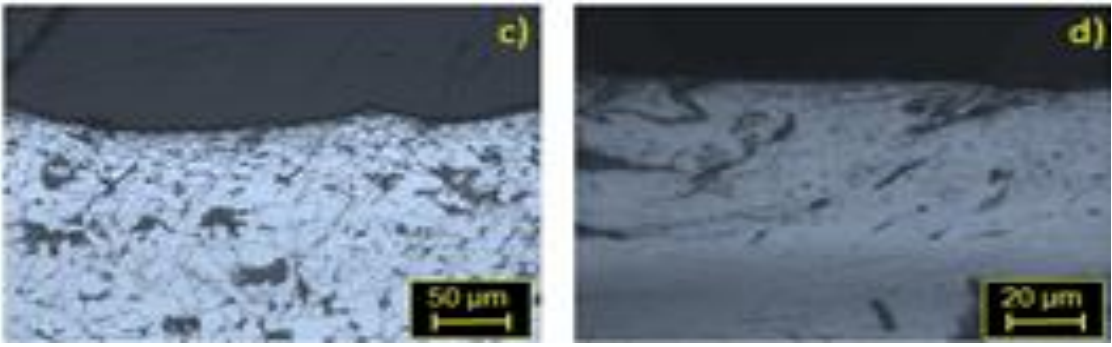
7.1. İÇ YAPI İNCELEMELERİ

Şekil 7.1.(a)' da AISI 1020 (St 37) çeliğinin iç yapısı görülmekte olup yapıda ferrit ve heterojen şekilde dağılmış perlit yapılarının varlığı dikkat çekmektedir. Şekil 7.1.(b)' de bilyalı dövme öncesi numunenin yüzey bölgesi mikroyapısı görülmektedir. Dövme öncesi yüzey bölgesinin düz bir yapıda olduğu, talaşlı işlem sonrası herhangi bir yüzey farklılığının görülmediği, yüzey sınırında bile perlit yapıların iç yapıya benzer şekilde görüldüğü dikkat çekmektedir. Şekil 7.2.(c) 'de A12 şiddeti ile dövülen numunede yüzey bölgesine yaklaşık 20-25 µm kalınlıktaki tabakada perlit tabakaların dağıldığı ve boyutlarının oldukça küçüldüğü belirtilen tabakanın altında orijinal yapıların varlığını sürdürdüğü deformasyonun belirli bir tabakadan sonra etkisini yitirdiği görülmektedir. Şekil 7.2.(d)' de yüksek büyütmelelerde yüzey bölgesine yakın perlit tabakaların deformasyon etkisi ile mevcut şekillerini tamamıyla kaybettiği deformasyon yönü ve dislokasyon hareketleri bağlamında şekillerinin modifiye olduğu ve özellikle boyut olarak küçüldüğü izlenmiştir. Şekil 7.3.(e)' de ise A18 şiddeti uygulanmış numunede şiddetin artması ile deformasyondan etkilenen tabakanın kalınlığı 40-50 µm kalınlığına ulaşmış özellikle Şekil 7.3.(f)' de derin bir tabakada perlit yapıların deformasyondan etkilenerek yassılaştığı ve deformasyon yönünde yönlendiği izlenmiştir. Yüzey bölgesinde perlit yapıların dikkat çekmesine karşın boyutlarının çok küçülmesi ile bir bulutsu siyah leke alanının oluştuğu dikkat çekmektedir. Şekil 7.4.(g)' de A24 şiddetinde dövme sonrası ortalama 50-60 µm kalınlığında deformasyonun izlendiği yüksek büyütmede çekilen Şekil 7.4.(h)' de yaklaşık 50 µm 'lik bölgeye kadar Şekil 7.1.(a)'da görüldüğü gibi orijinal perlit tanelerine rastlanmadığı çok ince plaka şeklinde ve tane boyutu çok küçük yapılara evrildiği görülmektedir. Deformasyon şiddetinin arttıkça mikroyapı tane boyutunun incelmesi, deformasyonun artmasıyla

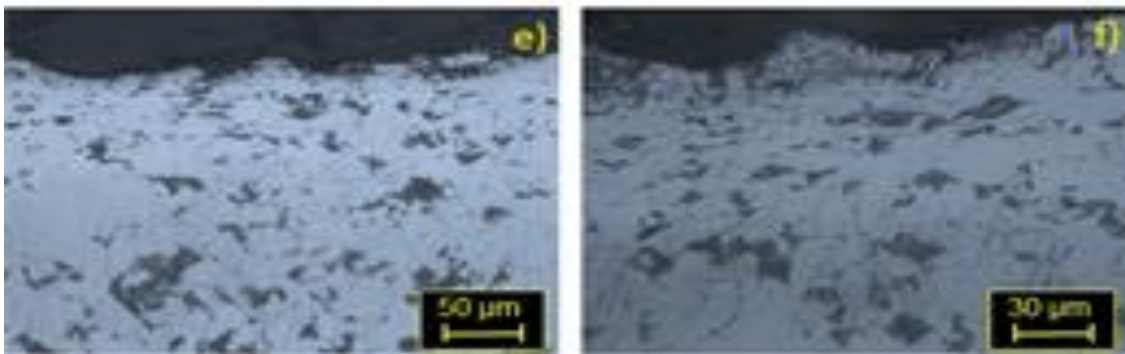
yüzeyde deformasyondan etkilenme durumunun arttığı ve bazı lokal çatlakların oluştuğu ve yüzeyin bozulduğu görülmüştür.



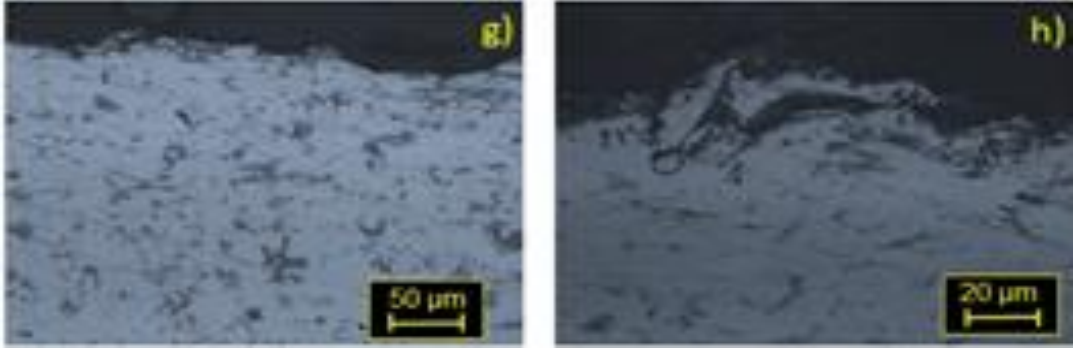
Şekil 7.1. a, b İşlem görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin iç yapısı.



Şekil 7.2. c, d AISI 1020 (St 37) çeliğinin A12 şiddeti dövme sonrası iç yapısı.



Şekil 7.3. e, f AISI 1020 (St 37) çeliğinin A18 şiddeti dövme sonrası iç yapısı.



Şekil 7.4. g, h AISI 1020 (St 37) çeliğinin A24 şiddeti dövme sonrası iç yapısı.

Avcu 2018, bilyalı dövme parametrelerinin AA7075 T6 Alüminyum alaşımının yüzey altı özelliklerine etkilerini incelemiştir. Yapmış olduğu bu çalışmada bilya boyutunun ve püskürtme basıncının parametre değerlerinin yüzeyin hemen altında bulunan bölgesinin mikroyapısı ve sertlik özelliklerinin değişimlerini araştırmıştır. Araştırma neticesinde püskürtme basıncının ve 0,1-0,3 mm chronital S10; 0,4-0,9 mm Chronital S60 bilyalarını kullanarak mikro yapı değişim sonrası oluşan derinlik ölçülerinin ve malzemedeki sertlik değerlerinin arttığını gözlemlenmiştir. Aynı zamanda parça numuneler üzerinden SEM görüntülerini almış ve dövülme sonucu oluşan çatlakları, çukurların tespitini yapmıştır [55].

Wang ve arkadaşları, Al (AA196) ve Al-Si (A356) malzemeler üzerinde yüzey mekanik aşınma işlemi için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmada, malzemelerin yüzey bölgelerinde bilyalı dövme sonucunda oluşan yapıları mikroskopik incelemişlerdir. Araştırmaları sonucunda, dövülmüş yüzeyden çekirdeğe kadar belirli bir kalınlık bölgesindeki tanelerin bilyalı dövme işlemi sonucu uzadığını tespit etmişlerdir. Bu bölgelerdeki tane yapının, işlem görmemiş ana malzemenin tane yapısından farklı olduğunu görmüşlerdir. Bu durum çelik bilyaların dövme sonucunda malzeme yüzeyinde nedenli etkili olduğunu gözler önüne sermektedir [56].

7.2. BORÜR TABAKASININ KALINLIKLARI

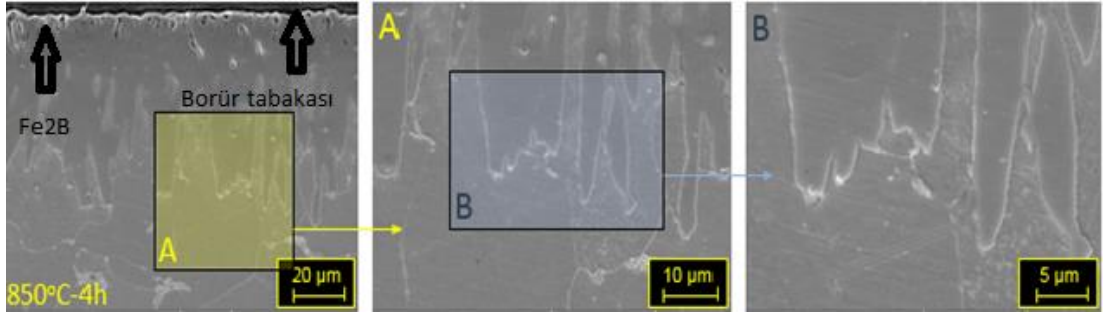
Bor atomları, malzemenin yüzeyinde bir borür tabakası oluşturmak için baz malzeme ile etkileşime girmektedir. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimine bağlı olarak

borür tabakası tek fazlı (Fe_2B) veya çift fazlı (FeB ve Fe_2B) olabilmektedir. Şekil 7.5.'de nanobor tozları ile 850, 950 ve 1050 °C'de 4 saat boyunca borlanmış St 37 malzemesinin numune SEM görüntüleri görüldüğü gibidir. Şekil 7.5. 'de borlama sıcaklığına bağlı olarak " Fe_2B -matris" ve " FeB - Fe_2B -difüzyon bölgesi-matris" katmanlarının oluştuğu görülmektedir. 850 °C (Şekil 7.5. (a))' da tek fazlı Fe_2B fazı oluşurken, 950 ve 1050 °C sıcaklıklarda (Şekil 7.5. (b) ve Şekil 7.5. (c)) çift fazlı Fe_2B ve FeB fazlarının oluştuğu görülmektedir. Sıcaklık artışına bağlı olarak bor difüzyonu arttıkça kaplamanın üst katmanlarında yüksek bor yoğunluğuna sahip FeB fazları oluşmaya başlamıştır. Şekil 7.5. (b) ve Şekil 7.5. (c) 'de yüzeye yakın yerlerde oluşan koyu tabakalar FeB fazını, daha açık olarak gösterilmiş tabakalar ise Fe_2B fazını temsil etmektedir. Ayrıca Şekil 7.5. (b) ve Şkil 7.5. (c) 'de görülen borür tabakasının hemen alt kısmında borlanmış yüzeyi baz malzmeden ayıran difüzyon bölgesi de görülmektedir. St 37 çeliğinin yüzeyinde borlama sonucu oluşan tabakanın 850 °C pürüzsüz ve düz, 950 ve 1050 °C sıcaklıklarında ise testere dişi bir yapıya sahip olduğu (Şekil 7.5. (b) ve Şekil 7.5. (c)) görülmektedir. Şekil 7.6. 'de belirtilen 12A şiddetinde bilyalı dövülmüş ve 850, 950 ,1050 °C 4 saat borlanmış St 37 malzemesinin SEM mikro yapıları görülmektedir. A12 şiddeti ile dövülen numunede yüzey bölgesine yaklaşık 20-25 µm kalınlıktaki tabakada perlit tabakaların dağıldığı ve boyutlarının oldukça küçüldüğü belirtilen tabakanın altında orijinal yapıların varlığını sürdürdüğü deformasyonun belirli bir tabakadan sonra etkisini yitirdiği görülmektedir. Şekil 7.7. 'de belirtilen 18A şiddetinde bilyalı dövülmüş ve 850, 950,1050 °C 4 saat borlanmış St 37 malzemesinin SEM mikro yapıları görülmektedir. A18 şiddeti uygulanmış numunede şiddetin artması ile deformasyondan etkilenen tabakanın kalınlığı 40-50 µm kalınlığına ulaşmış özellikle Şekil 7.7.' de derin bir tabakada perlit yapıların deformasyondan etkilenerek yassılaştığı ve deformasyon yönünde yönlendiği izlenmiştir. Yüzey bölgesinde perlit yapıların dikkat çekmesine karşın boyutlarının çok küçülmesi ile bir bulutsu siyah leke alanının oluştuğu dikkat çekmektedir.

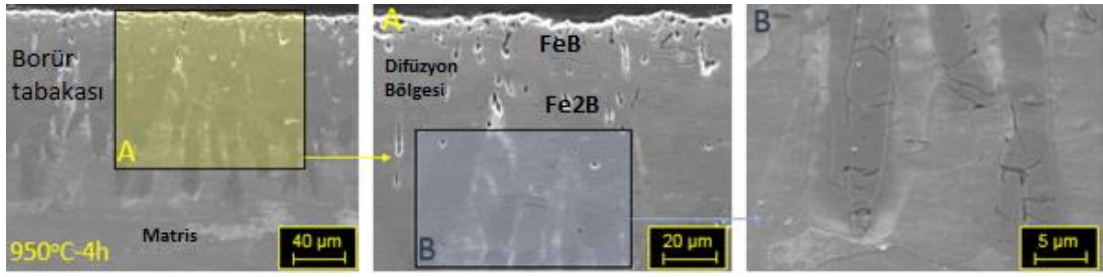
Şekil 7.8. 'da belirtilen 24A şiddetinde bilyalı dövülmüş ve 850, 950, 1050 °C 4 saat borlanmış St 37 malzemesinin SEM mikro yapıları görülmektedir. Şekil 7.8.' de A24 şiddetinde dövme sonrası ortalama 50-60 µm kalınlığında deformasyonun izlendiği yüksek büyütmede çekilen Şekil 7.8. (c)' de yaklaşık 50 µm 'lik bölgeye kadar Şekil

7.8.'da görüldüğü gibi orijinal perlit tanelerine rastlanmadığı çok ince plaka şeklinde ve tane boyutu çok küçük yapılara evrildiği görülmektedir. Deformasyon şiddetinin arttıkça mikroyapı tane boyutunun incelendiği, deformasyonun artmasıyla yüzeyde deformasyondan etkilenme durumunun arttığı ve bazı lokal çatlakların oluştuğu ve yüzeyin bozulduğu görülmüştür.

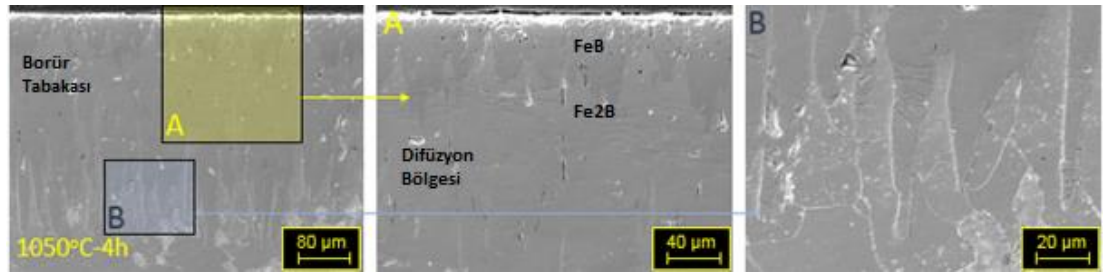
Bilyalı dövme şiddetinin artması ile kaplama kalınlıkları arasında belirgin bir değişiklik gözlenmesi de kaplama karakterinin değiştiği, kademe sayısının azaldığı, kaplama kademelerinin kalınlaştığı ve eş kalınlıkta kaplama yoğunluğunun önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bu durumun sertlik, korozyon aşınma, yorulma gibi malzemelerin önemli mekanik özelliklerinden sayılan davranışlarını değiştirebileceği borlama öncesi mekanik deformasyonun bu noktada potansiyel bir etki oluşturacağı düşünülmektedir. Hatta bu kaplama kalınlıkları dövme işlemi uygulanmamış numunelere kıyasla 1,5-2 katına kadar varan artışlar görüldüğü raporlanmıştır. 1050 °C 4 saat uygulama için sıcaklığın yüksek olması dolayısıyla hızlı bir rekristalizasyon ve toparlanma gerçekleşmesi nedeniyle borlama işlemi için kaplama kalınlığının birbirine yakın olması sonucunun ortaya çıktığı düşünülmektedir.



a)

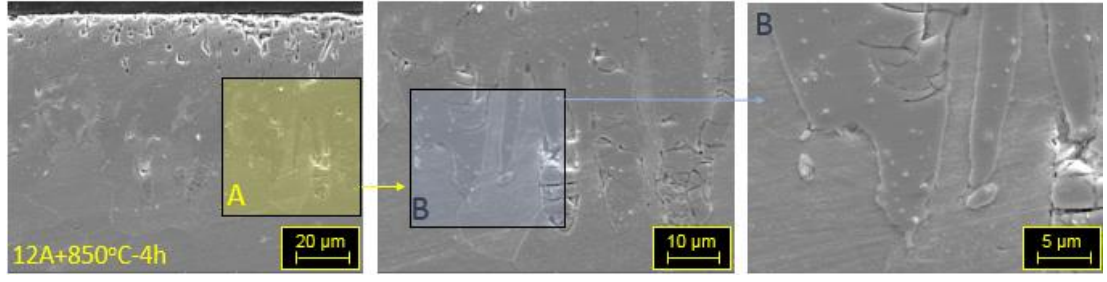


b)

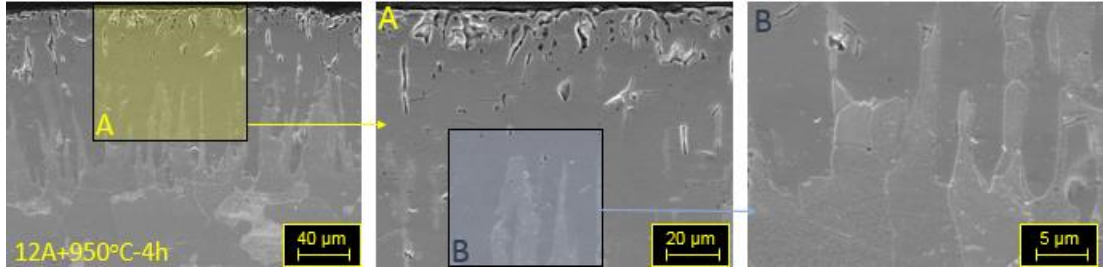


c)

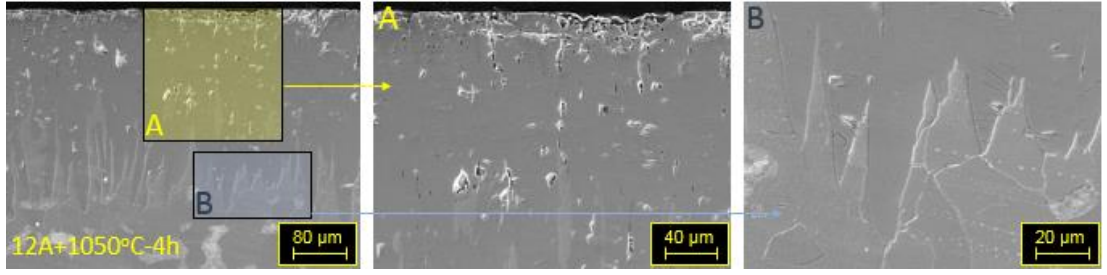
Şekil 7.5. Nono bor tozu ile 850,950,1050 °C’lerde 4 saat borlanmış St 37 (AISI 1020) çeliğinin kesit SEM Mikro yapısı.



a)

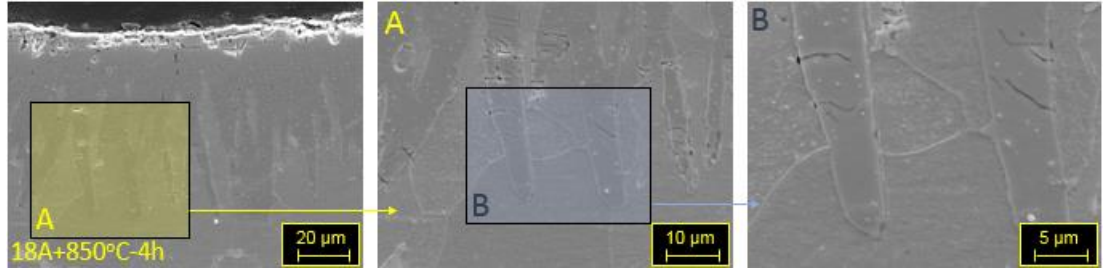


b)

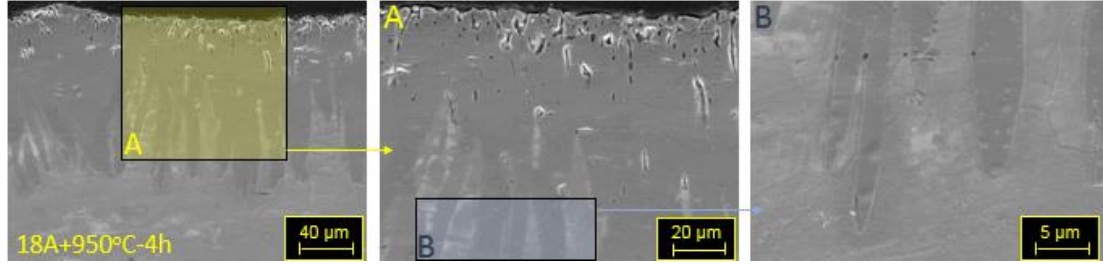


c)

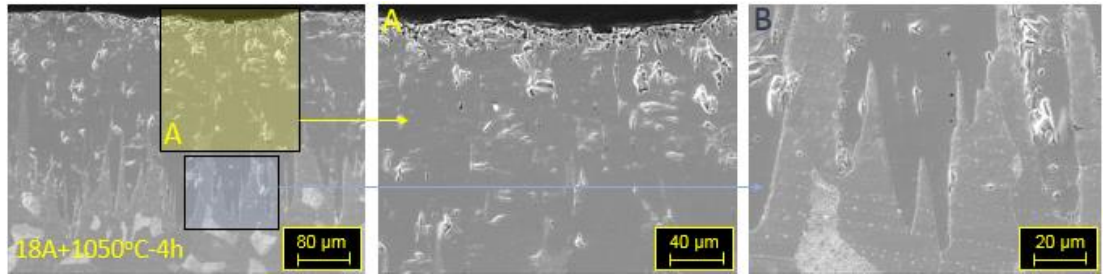
Şekil 7.6. Nono bor tozu ile 12A şiddetinde bıyalı dövülmüş 850,950,1050 °C'lerde 4 saat borlanmış ve St37 (AISI 1020) çeliğinin kesit SEM mikro yapısı.



a)

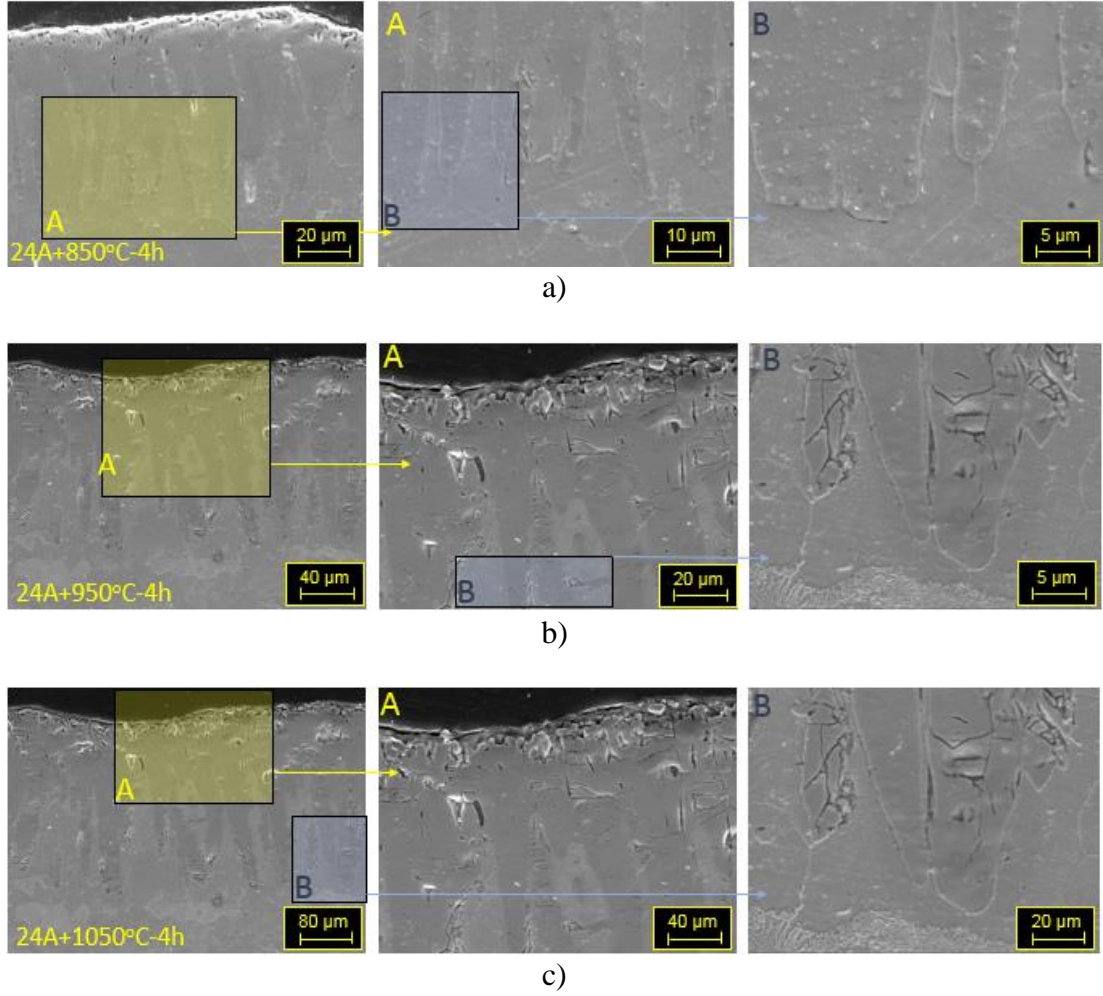


b)



c)

Şekil 7.7. Nono bor tozu ile 18A şiddetinde bilyalı dövülmüş 850,950,1050 °C'lerde 4 saat borlanmış ve St 37 (AISI 1020) çeliğinin kesit SEM mikro yapısı.



Şekil 7.8. Nono bor tozu ile 24A şiddetinde bilyalı dövülmüş 850,950,1050 °C’lerde 4 saat borlanmış ve St 37 (AISI 1020) çeliğinin kesit SEM mikro yapısı.

Yılmaz 2014 yılında Karbür Kesici Takımlarına yaptığı çalışmada 800-850-900 °C sıcaklıklarda 8 saat borlama işlemi neticesinde Sem testinden aldığı iç yapıya göre sıcaklık artışı ile borür tabaka kalınlığının arttığını gözlemlemiştir. Aynı zamanda sıcaklık artması ile borun difüzyon katsayısında artmış olduğunu ve bor atamonun yüksek sıcaklıkta derin yerlere kadar ilerlediğini ortaya koymuştur [57].

Döleker 2015 yılında Inconel – 718 alaşımını 6A ve 8A şiddetinde dövme işlemi yapmıştır. Buna bağlı olarak yapmış olduğu Sem test sonuçlarında baktığında bilyalı dövme sonucunda malzemenin üst tabakalarında plastik deformasyonun yoğun olduğunu gözlemlemiş ve homojen bir yapının işlem görmemiş malzemeye oranla gözenekli bir yapı elde ettiğini gözlemlemiştir [58].

Avcu 2019 yılında Ti6Al4V alaşımı için S10 bilya kullanarak yapmış olduğu çalışmada beş dakika ve 15 dakika dövme işlemi neticesinde SEM testine göre İşlem görmemiş malzemeye oranla yüzeyde oluşan derin çukurların analizini tespit etmiştir. Bunun sonucunda malzemenin yüzeyinde çatlaklarının oranlarını bulmuştur [59].

7.3. X IŞINLARI DIFRAKSİYON (XRD) SONUÇLARI

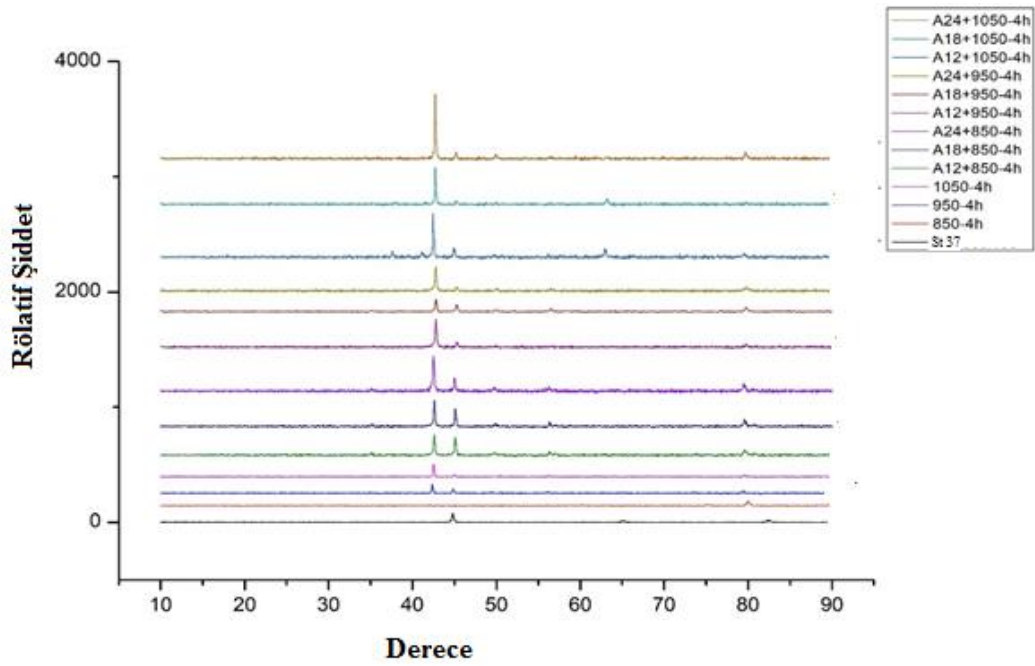
Şekil 7.9.'da AISI 1020 (St 37) malzemesinden alınmış numunelerin XRD piklerinin incelemesi gösterilmiştir. XRD piklerinin incelemesinde bilyalı dövülmüş St 37 numunesi için işlem görmemiş numunenin standart demir pikleri izlenimi yapılmıştır.

İşlem görmemiş deney numunesi St 37 malzemesi öncelikle 850-950-1050 °C 4 saat borlama ve ardından yine aynı sıcaklık ve sürede A12, A18 ve A24 Almen şiddetine maruz kalmıştır. Şekil 7.9. incelendiğinde 850 °C sıcaklıkta yapılan borlama işleminde pik değerinde orta bölge genişlik değerleri haricinde herhangi bir değişiklik göstermediği dikkat çekmiştir. Sıcakların artmasıyla beraber elde edilen değerlere göre pik artışları oluşmaya başlamıştır. 850 °C FeB fazı görülmezken, 950 °C sıcaklıkta az yoğunlukta Fe₂B piki meydana gelmeye başlamıştır. 1050 °C sıcaklıkta ise yoğun şekilde Fe₂B pikleri arttığı gözlemlenmiştir. Ancak daha sonra uygulanan bilyalı dövme işleminin şiddetinin artması sonucu oluşan FeB ve Fe₂B fazlarına etki ettiğini ortaya konulmuştur. 850 °C sıcaklık 4 saat borlama ön işlemi incelendiğinde daha sonra uygulan farklı Almen şiddetlerine maruz kalan yapı karşılaştırılma yapıldığında ise pik değerlerinde ve orta bölgeki farklılıkların dışında bazı piklerin kaybolduğu başka piklerin meydana geldiği izlenmiştir.

Almen şiddetinin artması ve bilyalı dövme işleminin uygulanması sonucu demir pikte artış işlem görmemiş St 37 numunesine göre daha fazla olduğu ayrıca orta bölgedeki genişliğin (FWHM) daha düşük olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmada bilyalı dövmenin pik şiddetinin daha düşük olduğu ama piklerin genişlediği ayrıca orta bölge genişliğinin (FWHM) arttığı gözlemlenmiştir. FWHM 'nin genişlemesi, plastik deformasyon nedeniyle tane yapısının azalması yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur. Yüzeyde yapılan bilyalı dövme işleminin kimyasal değişime neden

olmadan sadece tane boyutunu incelttiği yüzey ve mekanik yapısını değiştirdiğini gösterilmiştir.

Farklı sıcaklıklarda uygulanan borlama işleminden sonra sabit tutulan süre sonrası belirlenmiş Almen şiddetlerinde ve işlem görmemiş numunenin XRD piklerinin kıyaslaması yapıldığında yüzeyde meydana gelen kimyasal yapının oluştuğunu ortaya koymaktadır. Kimyasal yapılarındaki fazların incelenmesi neticesinde ortaya çıkan sonuç FeB ve Fe₂B fazlarının oluştuğu görülmüştür.



Şekil 7.9. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin XRD piklerinin incelenmesi.

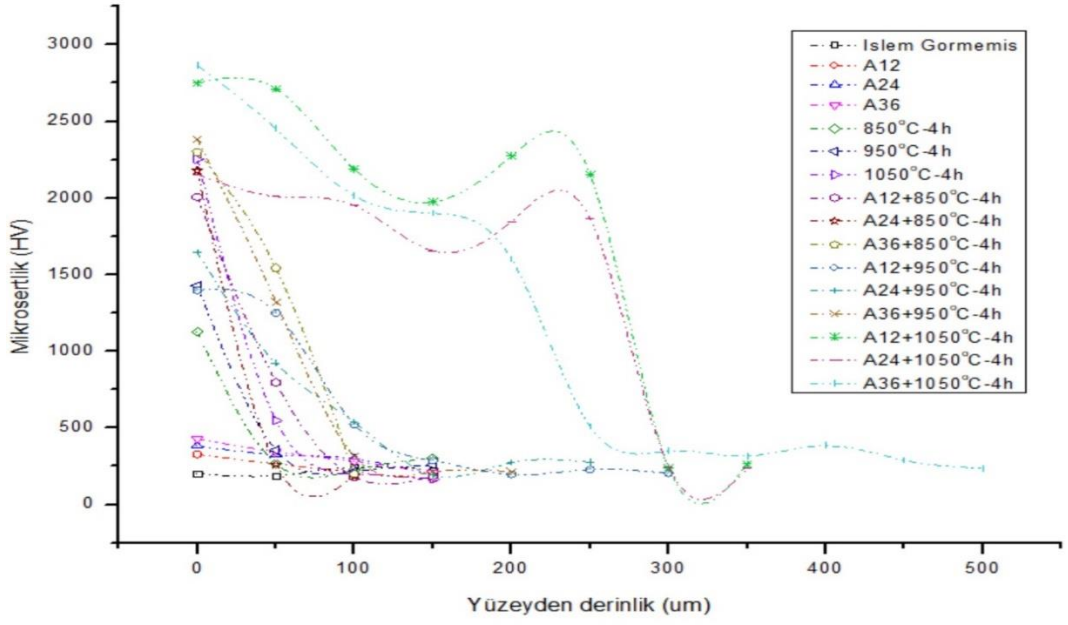
Ünal 2006 yılında AISI 1017 çeliğini aşırı bilyalı dövme sonucu ortaya çıkan sonuca göre oluşan tabakaların ince taneli deformasyona uğramış bir yapıyı elde etmiştir [60]. Bu durum yapılan çalışmada Almen şiddetinin artması ve buna bağlı olarak yüzeydeki deformasyonun arttığını göz önüne sermektedir.

Saygın 2006 yılında AISI 1020 çeliğini 900, 950, 1000 ve 1050 °C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat periyotlarda borlamıştır. 6 saat borlanan numunelerin tabaka kalınlıkları sıcaklık artışına göre sırasıyla 178,13 µm; 217,86 µm; 276,63 µm; 366,86 µm olarak ölçülmüştür [61].

Kondul 2020 yılında yaptığı çalışmada Fe₂B fazının sünek bir malzeme üzerinde büyüdüğünü, FeB fazının ise daha sert bir tabaka üzerinde büyüdüğünü belirtmiştir [62]. Bu nedenle artan sıcaklıkla FeB fazının oluşumu da bu yaklaşımla açıklanabilir. İki faz farklı sertlik özellikleri gösterdiğinden, kaplama karakterizasyonu için mikro sertlik ölçümü önemlidir.

7.4. MİKRO SERTLİK SONUÇLARI

Malzeme yüzeylerinde yapılan borlama işlemlerinde kaplama ve difüzyon bölgelerinin mekanik özelliklerini belirlemek için sertlik değerleri genel olarak incelenmesi uygun olacaktır. Bu nedenle yukarıda belirtilen AISI 1020 malzemesinin mikro sertlik değerleri ölçülmüş ve böyle bir grafik meydana gelmiştir. Şekil 7.10. da malzemenin sertlik değerleri borlama sıcaklığına bağlı olarak değişmiştir. İşlem görmemiş olan AISI 1020 (St 37) malzemesinin mikro sertlik değeri 240 HV iken 850-950-1050 °C 'de 4 saat borlama ile görülen sertlik değerleri 1100 HV,1400 HV ve 2250 HV 'ye çıkmıştır. Buradan çıkarılan sonuç ise borlama sıcaklığına bağlı olarak sertlik seğelinin arttığını işaret etmektedir. Bu durum ise artan sıcaklıkla birlikte daha sert bir FeB fazının oluşmasıyla açıklanabilir. FeB ve Fe₂B fazlarının varlığından dolayı borid tabakasının sertliği matris göre daha serttir ve daha önceki çalışmalara göre matris malzemesine doğru sertlik değeri giderek azalmaktadır [63].



Şekil 7.10. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin mikro sertliğinin incelenmesi.

Aynı zamanda yapılan çalışmada A36 1050 °C sıcaklığındaki AISI 1020 çeliğinin sertlik değerinin en yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca borlama sıcaklığının artması ve Almen şiddetinde artması sonucu malzemenin sertlik değerinin artırdığını ortaya koyulmuştur.

Doğan 2016 yılında, Ni-Ti Alaşımını 1000 °C 'de sıcaklığında 2, 4, 6 ve 8 saat borlama yapmıştır. Elde ettiği netice ise Ni-Ti alaşımının 1000 °C 'de sıcaklığında 8 saat borlama işleminin uygulanması sonucu normal işlem görmemiş malzemeye oranla beş kat daha fazla sertlik kazandığını gözlemlemiştir [64].

Ayrıca Yıldızlı 2002, AISI 1020, AISI 1390 ve AISI 3315 çeliklerine 950 °C sıcaklığında 1, 3, 5, 7 ve 9 saat sürelerle borlama işlemi yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda ise sıcaklığa oranla sıcaklık ve borlama sürelerine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini gözlemlenmiştir. Her üç çelik için en fazla sertlik değerinin 950 °C 'de 7 saat sürede bulmuştur [65].

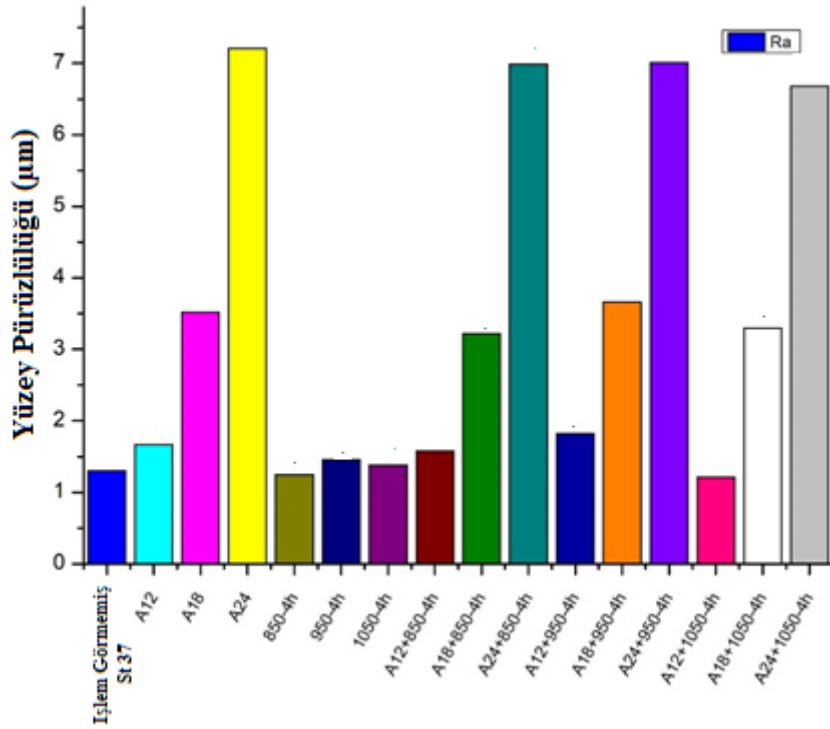
Çelik 2019, AISI 4140 çeliğini 16A, 20A, 24A şiddetiyle bilyalı dövme sonucu malzeme yüzeyinde plastik deformasyon sonucu bozulmalar tespit etmiş ayrıca

Uygulanan Almen şiddetine oranla yüzeyde sertlik değerinin arttığını gözlemlemiştir [66].

Balyalı 2015 yılında AISI 316 ve Ti6Al4V alaşımlarının 6A , 8A ve 10A bilyalı dövme işlemini uylamıştır. Uygulanan işlem sonrasında işlem görmemiş numunelerdeki sertlik oranına göre daha yüksek sertlik değerleri ölçümünü yapmıştır. AISI 316 paslanmaz çeliğin Ti6Al4V alaşımına göre sertlik değerlerinin daha fazla olduğunda gözlemlemiştir [67].

7.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN İNCELENMESİ

AISI 1020 (St 37) çeliği bilyalı dövme işlemi sonucu Şekil 7.11.'de incelendiğinde yüzey pürüzlülük değerinin arttığı görülmektedir. Almen şiddetinin artması neticesinde ise yüzey pürüzlük değeri en yüksek seviyelere çıkmıştır. Almen şiddeti artması ile yüzeydeki deformasyon miktarı artmış ve bilyaların yüzeye şiddetli çarpması sonucu yüzeyde beliren çukur ve tepecikler yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır. Dolayısıyla yapılan borlama işleminin yüzey pürüzlülüğüne çok fazla bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Uygulanmış olan bilyalı dövme işleminin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin borlamaya oranla daha yüksek olduğu raporlanması yapılmıştır. Mekanik ve termal yüzey işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünün bilyalı dövme işleminin yüzeyde bu denli etkili olması baskın bir yapıya sahip olduğunun bir göstergesidir. Yapılan bir çok sayıda çalışmada yüzey pürüzlülüğünün yorulma ve aşınma gibi yüzey kaynaklı hasarlara karşı etkili olduğu kanısına varılmıştır.



Şekil 7.11. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin yüzey pürüzsüzlüğünün incelenmesi.

Arslan 2017 yılında AISI 4140 çeliğini 950 °C’de 6 saat borlama sonucunda hassas işlenmiş yüzeylerin borlanma sonucunda yüzey pürüzlülük değerinin arttığını elde etmiştir [68]. Bu durumda yapılan bu çalışmada borlama işleminin sıcaklığa bağlı olarak yüzey pürüzlülüğüne olumlu etkisi olduğunu gösterilmiştir. Sonuç olarak bakıldığında ise borlama yüzey kalitesinin artmasına neden olduğundan Talaşlı imalat yapılan işlemlerde sürelerin kılmasına ve maliyetin azalmasına sebep olacaktır.

A. A. Ahmed ve arkadaşları, AISI 316L paslanmaz çeliğine farklı boyutlardaki seramik bilyalar ile gerçekleştirdiği bilyalı dövme işlemi sonucunda bilya boyut artışı ile malzemenin yüzeyindeki plastik deformasyonun arttığı ve derin ve geniş çukurcuk oluşumunun meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Dolayısıyla yüzey pürüzlülük değerlerini arttırdığı sonucuna varmışlardır [69].

Çubuk 2020, AA7075 alüminyum alaşımı için yapmış olduğu çalışmada deney numuneye; 30°-60° bilya çapma açılarında S10 bilyası, 75°-90° bilya çapma

açıklarında S60 bilyası kullanmış ve S10 bilyası ile gerçekleştirmiş olduğu dövme işleminde 60⁰ bilya çarpmasının yüzey pürüzlük değerinin daha yüksek olduğunu saptamıştır [70].

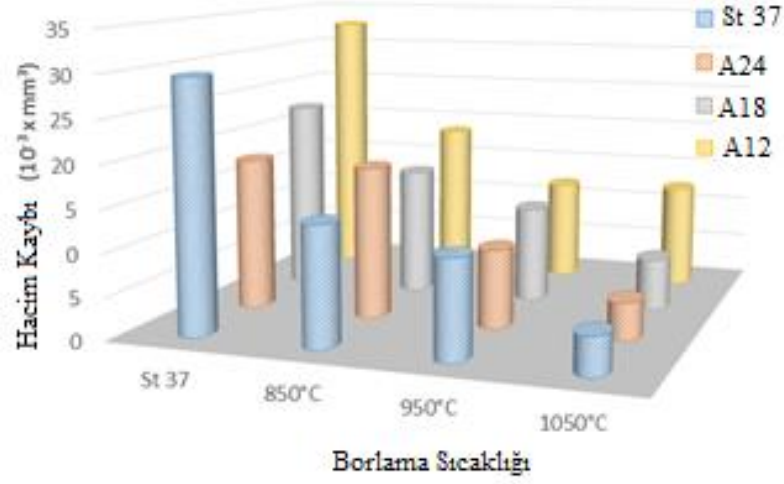
Mutlu 2021, 0,8 mm, 0,6 mm, 0,3 mm çaplarında bilyaları kullanarak AISI 304 paslanmaz çeliğin üzerinde bilyalı dövme işlemi uygulanmıştır. Uygulanan bu işlem neticesinde yüzey pürüzlük değerlerini ölçmüştür. Elde ettiği veriler incelendiğinde Bilyalı dövme işleminde yüzeyde homojen bir etki oluşturmuştur. Yaptığı çalışmada en yüksek yüzey pürüzlülük değerini 0,8 mm çapında uygulanmış bilyalama işlemi sırasında ölçüm yapmıştır [71].

7.6. AŞINMA TESTİ

Şekil 7.12 'de farklı tip işlem görmüş ve görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin hacim

kaybı ve borlama sıcaklığı incelenmesi yapılmıştır. Numunelerin 850 -950-1050 ⁰ C sıcaklıklarında 4 saat borlama A12, A18 ve A24 almen şiddetine maruz kalarak yapılan bu çalışmada ortaya çıkan grafiğe göre borlamanın ve artan sıcaklığa oranla işlem görmemiş malzemeye göre daha düşük hacim kaybı gözükmektedir. Aşınma sonuçlarına bakıldığında en fazla hacim kaybının olduğu St 37 malzemesine uygulanmış A12 şiddeti ile dövülmüş numune, en az hacim kaybının görüldüğü numune ise en yüksek borlama sıcaklığına maruz kalmış 1050 ⁰C' deki St 37 malzemesidir. Bu farklılığın yaşanmasının sebebi FeB tabakasının kalınlık oranıyla açıklamak mümkün olabilir. Bor tabakası artan sıcaklığa oranla oluşan FeB ve Fe₂B fazları neticesinde hacim kaybının azalmasını ortaya koymaktadır.

Aşınma testi sonucu kayma hızının yükselmesi ve uygulanan yükün etkisiyle iki temas eden yüzey arasında ısılının artması sonucu malzemedeki kusurların oluşturduğu ve bu kusurlar neticesinde bölgesel çatlakların meydana gelmesiyle hacim kabı izlenimi yapılmıştır. Yüzeyde borlama sonucu oluşan oksitlerin varlığı hacim kabına sebep olduğu bu grafiğe göre düşünülebilir. Dolayısıyla yapılan çalışmada borlama sıcaklığının etkisinin hacim kaybına oranının önemli ölçüde etkili olduğunu gözlemlenmiştir.

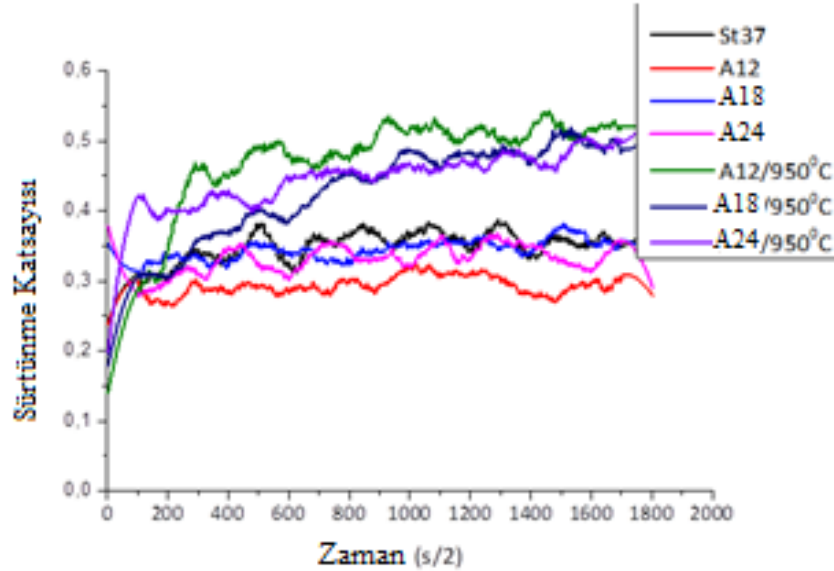


Şekil 7.12. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin hacim kaybı ve borlama sıcaklığı incelenmesi.

Şekil 7.13 'de farklı tip işlem görmüş ve görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin sürtünme katsayısının zamana göre incelenmesi yapılmıştır. Eğrilere bakıldığında bilyeli dövme sonrası en yüksek sürtünme katsayısının borlanmış numunelerde olduğu görülmektedir. Sürtünme katsayılarının sadece bilyeli numunelerin en düşük olduğu, yani St 37 çeliğine uygulanan bilyeli dövme işleminin sürtünme katsayısında hafif bir azalma sağladığı söylenebilir. Bilyalı dövme işleminden sonra yüzeyde oluşan mikro çukurlar zamanla düzgün bir sürtünme yüzeyi sağlayarak sürtünme katsayısının azalmasına yardımcı olur. Bununla birlikte, diğer faktörler sürtünme katsayısını azaltmaya yardımcı olmuş olabilir. Yüzeyle uygulanan ısı işlem veya bilyalı dövme gibi işlemlerin yüzey sertliğini arttırmak sürtünme direncini azaltabilir. Çünkü yüzey sertleştirme veya bilyalı dövme, artık gerilmeler ve farklı faz oluşumları oluşturarak soğuk kaynak olasılığını minimize edebilir. Böylece yüzeylerin yapışması azaltılır, bu da sürtünme direncini azaltabilir. Sürtünme ile ilgili ara yüzey bağlarının oluşması, temas alanındaki bağların kopması ve gerçek temas alanı gibi olguların yanı sıra deformasyon da etkili bir faktördür. Bilyalı dövülmüş yüzeylerdeki yüzey pürüzlülüğü elastik, plastik veya viskoelastik tepkiler gösterebilir. Sertlik ayrıca malzemenin deformasyonunu da etkiler, bu da daha belirgin plastik deformasyon anlamına gelir. Bununla birlikte, artık stres de dikkate

alınmalıdır. Yüzeydeki artık gerilim, plastik deformasyon etkisinin üstesinden gelerek sürtünme direncini azaltabilir.

Bildirilen tüm bu nedenlerin biliyeli dövülmüş numunelerde oluşan düşük sürtünme katsayısında etkili olduğu düşünülmektedir. Sürtünme katsayısı eğrilerinde dikkat çeken bir diğer durum da borlanmış numunelerde görülen yüksek sürtünme katsayısı profilidir. Borlama işlemi sürtünme katsayısının artmasına veya azalmasına neden olabilir. Genellikle artan sertlik ve yüzeylerde oluşan demir-borid-oksit yapıları sürtünme direncini azaltır. Sertlik artışının bir diğer etkisi de penetran ucun malzeme yüzeyindeki hareket alanının daha az olmasıdır. Daha küçük bir alanla temas eden delici uç daha kolay hareket ettiğinden sürtünme katsayısı düşebilir. Ayrıca, bahsedilen oksit tabakalarının oluşumu genellikle sürtünme katsayısını azaltır. Yüzeyde oluşan oksit tabakalarının kayganlaştırıcı etkiye sahip olduğu ve sürtünme direncini azalttığı daha önce birçok çalışmada görülmüştür. Ancak bu nedenlere rağmen borlanmış numunelerde gözlenen sürtünme katsayısındaki artış dikkat çekicidir.



Şekil 7.13. Farklı tip işlem görmüş ve görmemiş AISI 1020 (St 37) çeliğinin sürtünme katsayısının zamana göre incelenmesi.

Karataş 2016 yılında AISI 4140 çeliğini 700-750-850-950 °C sıcaklığında 2,4,6,8 saat borlama işlemine tabi tutmuştur. Yapmış olduğu bu deney sonucunda borlama

sıcaklığının artması deney numune üzerinde işlem görmeyen malzeme göre daha düşük olduğunun tespitini yapmıştır [72].

Sezer 2020 yılında Ti6A14V bilyalı dövme işlemine tabi tutmuş ve ana malzemedен almış olduğu numuneleri 2N ve 5N'luk sürtünme kuvveti uygulayarak deney yapmıştır. Aşınma testi sırasında uygulmuş olduğu kuvvetler ile birlikte sürtünme kuvvetinin oluştuğunu görmüştür. Sürtünme kuvvetinin uygulmuş olduğu kuvvetlere oranla kayma mesafesi boyunca lineer bir artış olduğunu saptamıştır. Aşınma testi sonucunu değerlendirdiğinde ise Ti6A14V numunelerine yapmış olduğu bilyalı dövme işlem neticesinde dövme şiddetinin artmasıyla birlikte numunlerdeki sertlik değerlerinin arttığını ve aşınma direncinin azaldığını belirtmiştir. Bu işlem sonucunda ise dövme almen şiddetinin numuneye uygulamasıyla hacim numunede hacim kayıplarının meydana geldiğini göstermiş oldu [73].

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında AISI 1020 (St 37) malzemesine borlama işlemi yapılmış ve uygun borlama parametresi belirlenmiştir. Uygun borlama parametresinin belirlenebilmesi için malzemeler farklı süre ve sıcaklıklarda borlama işlemine tabi tutulmuş ve ardından iç yapı incelemeleri ve mikrosertlik testleriyle optimum borlama parametrelerine ulaşılmıştır. Yapılan deney 1050 °C 4 saat borlama olarak belirlenmiştir. Bu parametrelerde üretilen malzemelere aşınma testleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda belirtilmiştir.

- A12 ve A24 Almen yoğunluğundaki aşınma kayıplarının azaltılmasında bilyalı dövme işlemi etkili olmuştur. Borlama işlemi ayrıca hem dövülmemiş hem de bilyalı dövülmüş numunelere uygulanarak aşınma kayıplarını azaltmıştır. Bu pürüzlülüğün olumsuz etkisinin bile borlama ile aşıldığını göstermektedir. Ayrıca artan borlama sıcaklığı aşınma kayıplarını daha da azaltmıştır.
- Bilyalı dövme işlemi ile sürtünme katsayısı değerlerinde azalma görülürken, borlanmış numunelerde sürtünme katsayısında artış tespit edilmiştir. Bilyalı dövülmüş numunelerdeki düşük sürtünme katsayısı, artık gerilmeye ve oksitlenmiş yüzeylere bağlandı. Borlanmış numunelerde gözlenen yüksek sürtünme katsayısı, aşınmış yüzeylerde gözlenen süreksizliklerle ilişkilendirilmiştir.
- AISI 1020 (St 37) malzemesinin mikro sertlik değeri 240 HV iken 850-950-1050 °C 'de 4 saat borlama ile görülen sertlik değerleri 1100 HV,1400 HV ve 2250 HV 'ye çıkmıştır. Buradan çıkarılan sonuç ise borlama sıcaklığına bağlı

olarak sertlik seğerinin arttığını işaret etmektedir. Bu durum ise artan sıcaklıkla birlikte daha sert bir FeB fazının oluşmasıyla açıklanabilir.

- Aşınmaya en dayanıklı malzeme borlanmış AISI 1020 olarak belirlenmiştir. Yüzeyinde meydana gelen kaplama sayesinde aşınma dayanımı %85'lere varan iyileşmeler kaydetmiştir.

KAYNAKLAR

1. Arslan, D., “Kutu Borlama İşlemi Uygulanmış Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Yorulma Dayanımlarının İncelenmesi”, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
2. Havuş, N., “Düşük Karbonlu St 37 Çeliğinin Sınırlandırılmış Yivli Presleme İle Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi”, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
3. Campos, I., “Study of microcracks morphology produced by Vickers indentation on AISI 1045 borided steels”, *Materials Science and Engineering A*, 13 (A): 285-282 (2008).
4. Gök, M. S. “Düşük Ve Orta Karbonlu Çeliklerin Yüzeyine Tig Kaynak Metoduyla Kaplanan Ostenitik Paslanmaz Çelik Tozunun Aşınma Direncine Karbür İçeriğinin Etkisinin Araştırılması”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2008).
5. ULU, D., “Kritik Sıcaklıklar Arasında Su Verilmiş Ve Temperlenmiş Yapı Çeliklerinin Mekanik Özellikleri İle Kırılma Tokluğuna (K_{1C}) Ferrit Morfolojisinin Ve Hacim Oranının Etkisi”, *Afyon KocaTepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2009).
6. Aytekin, H., “Yapı Çeliklerinin Kırılma Tokluğu Üzerine Bir Çalışma”, *Afyon KocaTepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2005).
7. Çalgül, E., “Kaynak Metalurjisi Ders Notları”, *Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü*, Elazığ (2015).
8. Pakdil, M., “Mühendislik Malzemeleri Ders Notları”, *Mustafa Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü*, Hatay (2021).
9. Gökdaş, M., “Optim 700 MC – ST 37 Çelik Malzemelerin Plazma Transfer Ark Yöntemleri İle Kaynak Edilebilirliği”, *Elazığ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).
10. Ertürk, Ş., “Termo-Kimyasal Yöntemle Kaplanmış Farklı Kesici Takım Malzemelerinin Talaşlı İşlem Kabiliyetinin İncelenmesi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2010).
11. Şimşek, B., “Aerodinamik Isınmanın ve Isıl Koruma Sistemlerinin Aerodinamik Isınmaya Bağlı Termo-Kimyasal Aşınmasının İncelenmesi”, *TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).

12. Yiğit, M., “Borlama İşleminin 34crni6 Çeliğinin Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi” , *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2021).
13. Topçu, R., “Nitrüleme ve akımsız Ni-P ile inconel 625 kaplamanın yüzey özelliklerinin geliştirilmesi” , *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
14. Karaman, Y., “Borlanmış AISI 316 L Paslanmaz Çeliğin Korozyon ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” , *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
15. Dayanç, A., “Çelik ve döküm kam millerinin plazma nitrüleme işlemi ile tribolojik özelliklerinin artırılması” , *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2017).
16. Korkmaz, K., “Gaz nitrüleme sonucu oluşan beyaz tabakanın nitrasyon çeliğinin aşınma davranışına etkisi” , *Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
17. Yılmaz, U., “Gaz ortamında nitrüleme ve nitrokarbürleme yüzey sertleştirme işlemlerinin AISI 4140, 1.7131 ve 1.8550 çeliklerinin aşınma, mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisinin incelenmesi” , *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2016).
18. Türker, B., “Dinamik karbotermal indirgeme-nitrüleme yöntemi ile titanyum nitrür seramik tozu üretimi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2013).
19. Yazıcı, M., “Eklemeli üretim yöntemi ile farklı orantasyon açılarında üretilmiş 316L paslanmaz çeliğinin plazma nitrüleme işleminden sonra, mekanik, tribolojik, elektrokimyasal ve manyetik özelliklerinin incelenmesi” , *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2022).
20. Yılan, F., “Çentikli parçaların yorulma özelliklerinin plazma nitrüleme ile iyileştirilmesi” , *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2022).
21. Şengül, A., “Plazma nitrüleme yapılmış çelik malzemenin değişken yük altındaki davranışı” , *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
22. Arat, M., “Paslanmaz çelik 310 ve 316 metalinin plazma borlama ve nitrüleme metodu ile mekanik özelliklerinin geliştirilmesi” , *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
23. Develi, F., “Plazma nitrüleme ve borlama ile çift yüzey işlem uygulanmış AISI 8620 çeliğinin aşınma davranışının incelenmesi” , *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2010).

24. Günay, H., “AISI 316L paslanmaz çeliğinin plazma nitrürleme davranışı” , *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1999).
25. Türkmen, İ., “Farklı Bor Türleri İle Alternatif Borlama Bileşimlerinin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu”, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
26. Çölova, Ö., “Karbürleme yapılan genel yapı çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2021).
27. Yılmaz, A., “Kutu sementasyonunda karbürleme süresi, karbürleme sıcaklığı ve aktivator oranının etkili sementasyon derinliğine etkileri”, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1985).
28. Dülek, E., “Ç 1020 malzemede bilyalı dövme ile oluşturulan yüzeydeki kalıcı gerilmelerin katman kaldırma (elektro kimyasal) yöntemiyle incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2002).
29. Varol, R., “Bilyalı dövmenin Fe + % 2 Cu + % 5 C toz metal çeliğin yorulma davranışına etkisi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1998).
30. Akyıldız, H., “2024 Alüminyum Alaşımının Yorulma Ömrü Üzerine Farklı Bilyalı Dövme Parametrelerinin Etkisi”, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1990).
31. Çeliker, Ö., “Bilyalı dövme ve kriyojenik işlem uygulanmış inconel 718 alaşımının aşınma davranışının incelenmesi”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).
32. Efe, Y., “AA7075 Alüminyum Alaşımının Farklı Tip Yüzey İşlemleri ile Yorulma Davranışlarının İyileştirilmesi”, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).
33. Çapar, A. “Dövme amaçlı üretilen mikroalaşım çeliklerinde dövme ve farklı soğuma şartlarının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi”, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2005).
34. Zhang, H., “Formation of nanostructured surface layer on AISI 304 stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment”, *Materials Science and Engineering* 7, 51 (7): 1871-1881 (2003).
35. Nair, F. “Koruyucu gaz atmosferinde macun borlama tekniği ile çelik yüzeylerinin sertleştirilmesi”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1996).
36. Toprak, D., “Katı Borlamanın Hardox 450 ve Hardox Hituf Çeliklerin Yüzey Özelliklerine Etkisi”, *Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
37. Bindal, C. “Az alaşımlı ve karbon çeliklerinde borlama ile yüzeye kaplanan borürlerin bazı özelliklerinin tesbiti”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1991).

38. Tezcan, R. “Borlama işlemi ve endüstriyel uygulamaları”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1996).
39. Türktekin, M. “H13 sıcaklık akım çeliklerine borlama ve nitrürleme işlemlerinin birlikte uygulanması”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1998).
40. Uslu, İ. “AISI 1040 ve AISI P20 kalıp çeliklerinin borlama kinetiği”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2004).
41. Şahin, S. “Katı borlama tekniği ile ferrobör üretimi ve özelliklerinin belirlenmesi”, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1999).
42. Palombarini, G., “On the morphology of thermochemically produced Fe₂₈/Fe interfaces”, *Materials Science and Engineering* **3**, 50 (3): 791-794 (1984).
43. Palombarini, G., “Growth of boride coatings on iron”, *Materials Science and Engineering* **6**, 40 (6): 415-416 (1987).
44. Skugorova, L. P., “Apparatus and technology of gas borating. Metalloved”, *Materials Science and Engineering* **5**, 60 (5): 61-62 (1972).
45. Raveh A., Inspektor A., Carpi, U. & Avni R. (1983). Boromzation of titanium and steels in a low pressure r.f. plasma. *Thin Solid Film*, 108, 39-45.
46. Yiğit, M. “Borlama işleminin 34CrNiMo6 çeliğinin bazı mekanik özellikleri üzerine etkisi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2021).
47. Koçaslan, A. “16MnCr5 çeliğinin borlama ve termal çevrimli borlama özelliklerinin araştırılması”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2016).
48. Sezgin, C. “Nitrasyon ve borlama yapılan yüksek manganlı çeliğin korozif ve aşınma özelliklerinin incelenmesi”, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2022).
49. Yamanel, B., “Farklı Sıcaklıklarda Menevişlenmiş Ve Borlama İşlemine Tabi Tutulmuş Sae 5140 Çeliğinin Mekanik Ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi” , *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).
50. Albayrak, S. “Düşük karbonlu yüksek mukavemetli çeliklerde borlama”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2021).
51. Güler, G. “ST52 çeliğinin tuz banyosu borlama yöntemi ile borlanabilirliğinin araştırılması”, *Nevşehir Hacı Bektaş Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2021).
52. Fırtına, Ö., “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borik Asit Esaslı Alternatif Borlama Karışımı ile Borlanması Ve Karakterizasyonu” , *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
53. Baytok, E., “Borlama işleminin karbür kesici takımların titanyum alaşımlarını işleme performansına etkisinin araştırılması”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2018).

54. Sarı, M., “Sementasyon Çeliğinin Kutu Borlama Yöntemiyle Kaplanması Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması” , *Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
55. Avcu, E., “Bilyalı Dövme Parametrelerinin AA7075T6 Alüminyum alaşımının Yüzey Altı özelliklerine Etkileri” , *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, (2018).
56. Wang, Z.B., “Effect of surface nanocrystallization on friction and wear properties in low carbon steel” , *Materials Science and Engineering* 5, 70 (5): 144-149 (2003).
57. Yılmaz, R., “Karbür Kesici Takımların Süper Alaşım Talaşlı İmalat Performanslarına Borlama İşleminin Etkisi” , *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2014).
58. Döleker, K. M., “Bilyalı Dövme İşleminin Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon Davranışı Üzerine Etkisi” , *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2015).
59. Avcu, Y., “Ti6Al4V Titanyum Alaşımın Bilyalı Dövme Sonrası Aşınma Davranışının İncelenmesi” , *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
60. Ünal, O., “Bilyalı Dövme İşleminin Tane Boyutuna Etkisinin Deneysel İncelenmesi” , *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2011).
61. Saygın, M., “AISI 1020 Çeliklerinde Borlamanın Yorulma Dayanımına Etkisi” , *Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2006).
62. Turhan, A., “Borlamanın paslanmaz çeliğin radyasyon zırlama özelliğine etkisinin araştırılması” , *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2008).
63. Kondul, B., “Borlama İle Yüzeyi Sertleştirilmiş Ray Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi” , *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
64. Doğan, Ş., “Ni-Ti Alaşımının Borlama Özelliklerinin İncelenmesi” , *Isparta Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2016).
65. Yıldızlı, K., “Borlamanın Çeliklerde eroziv Aşınma Davranışına Olan Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi” , *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2002).
66. Çelik, H., “Bilyalı Dövme, Plazma Nitrürleme ve Bilyalı dövme/Plazma Nitrürleme Dupleks Yüzey İşlemi Uygulanmış AISI 4140 Çeliğinin Manyetik Alan Altındaki Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi” , *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).
67. Balyalı, H. A., “Metalik Malzemelerin Bilyalı Dövme Uygulaması Sonrası Tribolojik Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi” , *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2015).

68. Arslan, D., “Kutu Borlama İşlemi Uygulanmış Çeliklerin Yüksek Sıcaklık Yorulma Dayanımlarının İncelenmesi”, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2017).
69. Ahmed A. A., Mhaede M., Basha M., Wollmann M., Wagner L., The Effect of Shot Peening Parameters and Hydroxyapatite Coating on Surface Properties and Corrosion Behavior of Medical Grade AISI 316L Stainless Steel, *Surface and Coatings Technology*, 2015, 280, 347-358.
70. Çubuk, A. B., “Bilyalı Dövme İşleminde Bilya Çarpma Açısı Ve Bilya boyutunun AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüzey Ve Yüzey Altı Özelliklerine Etkisi”, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).
71. [Mutlu, O., “AISI 304 Paslanmaz Çeliğinde Çok Adımlı Bilyalı Dövme Uygulamalarının Mikro Yapı Ve Malzeme Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi”, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2021).
72. Karataş, S., “FeB Toz Boyutunun AISI 4140 Çeliğinin Borlama Parametrelerine Etkisinin Araştırılması”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2016).
73. Sezer, O., “Havacılıkta Kullanılan Özel Alaşım Titanyum Malzemelere Uygulanan Bilyalı Dövme İşleminin Etkisinin İncelenmesi”, *İstanbul Gedik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2020).

ÖZGEÇMİŞ

Hakan ÇAĞLAR ilk ve orta öğrenimini Karabük'te tamamladı. Karabük Fevzi Çakmak Lisesi Fen Bölümü'nden mezun oldu. 2009 yılında Bartın Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2013 yılında mezun oldu. İş hayatına 2014 yılından 2020 yılına kadar sıcak ve soğuk haddeleme yapan firmalarda çalıştı. 2020 yılında işe başlamış olduğu KARDEMİR AŞ. firması Ray ve Profil Haddehanesi Müdürlüğü ünitesinde halen İşletme Mühendisi olarak görev yapmaktadır.