

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTROLİTİK SERT KROM KAPLANMIŞ 1010 VE 1040 ÇELİK YÜZEYLERİN
NİTRÜLENMESİ VE NİTROKARBÜLENMESİ**

MUSTAFA KOCABAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI MALZEME
PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. NURHAN CANSEVER**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTROLİTİK SERT KROM KAPLANMIŞ 1010 VE 1040 ÇELİK YÜZEYLERİN
NİTRÜRLENMESİ VE NİTROKARBÜRLENMESİ**

Mustafa KOCABAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 23.01.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Nurhan CANSEVER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Nurhan CANSEVER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ergün KELEŞOĞLU

Yıldız Teknik Üniversitesi



ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma boyunca her türlü yardım ve desteği ile beni destekleyen, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, danışmanım saygıdeğer hocam Sayın Prof. Dr. Nurhan CANSEVER'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çelik numunelerin krom kaplanması yapıldığı Huğlu Krom Kaplama San. Ltd. Şti. firmasına ve gaz nitrokarbürleme işleminin gerçekleştirildiği ASSAB Çelik ve Isıl İşlem A.Ş.' ne, ayrıca, plazma nitrüleme işlemleri sırasındaki özverisinden dolayı Afyon Kocatepe Üniversitesi' nde Öğretim Görevlisi olan Şükrü ÜLKER' e teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca hem öğrenci hem de akademik olarak bir parçası olup çok güzel dostluklar kazandığım, Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Öğretim Üye ve Elamanlarına, öğrenci ve idari personeline özellikle Arş. Gör. Fatih KILIÇ, Arş. Gör. Oğuz Kaan ÖZDEMİR, Teknisyen Mehmet ÇALIŞKAN ve Esil BOZTEPE' ye teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde büyük emekleri olan, maddi ve manevi olarak beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan annem ve babam başta olmak üzere, ablalarım, dostlarıma, hocalarıma ve tüm aileme, özellikle de nişanlıma çok teşekkür ederim.

Ocak, 2012

Mustafa KOCABAŞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ	xi
KISALTMA LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xvi
ÖZET	xvii
ABSTRACT	xix
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	4
1.2 Tezin Amacı	15
1.3 Orjinal Katkı.....	15
BÖLÜM 2	16
ÇELİK VE ÇELİK YÜZEY ÖZELLİKLERİNİ GELİŞTİRME	16
2.1 Çelik Malzemeler	16
2.1.1 Düşük Karbonlu Çelikler	16
2.1.2 Orta Karbonlu Çelikler	18
2.1.3 Yüksek Karbonlu Çelikler	19
2.2 Alaşım Elementlerinin Çeliğe Etkisi.....	19
2.3 Çeliklere Uygulanan Yüzey İşlemler	27
2.3.1 Lazerle Alaşım	29
2.3.2 Termo Reaktif Difüzyon Prosesi (TRD).....	30
2.3.3 Borlama	31
2.3.4 Kromlama	31
2.3.5 Karbürleme	32

2.3.6	Karbonitrürleme	33
2.3.7	Nitrürleme	33
2.3.8	Nitrokarbürleme	34
BÖLÜM 3	.....	35
DİFÜZYON	.....	35
3.1	Difüzyon ve Difüzyon Mekanizmaları	35
3.1.1	Arayer Difüzyonu Mekanizması	36
3.1.2	Yeralan Difüzyonu Mekanizması	37
3.2	Difüzyonu Etkileyen Faktörler	40
BÖLÜM 4	.....	42
NİTRÜRLEME	.....	42
4.1	Nitrürleme İşlemi	42
4.1.1	Nitrürlenebilirlik ve Kromlu Çeliklerin Nitrülenmesi	45
4.2	Nitrürleme Çeşitleri	48
4.2.1	Sıvı Nitrürleme	48
4.2.2	Gaz Nitrürleme	49
4.2.3	Plazma Nitrürleme	49
4.2.3.1	Plazmanın Tanımı ve Elemanları	51
4.2.3.2	Elektrik Boşalması Mekanizması	54
4.2.3.3	Plazma Nitrürleme İşlemi	55
4.2.3.4	Plazmanın Özellikleri	57
4.2.3.5	Plazma Çeşitleri	57
4.2.3.6	Plazma Nitrürleme Sonucu Yapı	58
4.2.3.7	Plazma Nitrürlemenin Avantajları ve Dezavantajları	60
BÖLÜM 5	.....	61
NİTROKARBÜRLEME	.....	61
5.1	Kaplama Bileşimi	62
5.2	Nitrokarbürleme Çeşitleri	63
5.2.1	Sıvı Nitrokarbürleme	63
5.2.2	Plazma Nitrokarbürleme	64
5.2.3	Gaz Nitrokarbürleme	65
BÖLÜM 6	.....	66
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	.....	66
6.1	Deneylerde Kullanılan Numuneler	66
6.1.1	Numunelerin Elektrolitik Sert Krom Kaplanması	67
6.1.2	Plazma Nitrürleme İşlemi	68
6.1.3	Gaz Nitrokarbürleme İşlemi	70
6.2	Karakterizasyon Deneyleri	71
6.2.1	Yüzey Görüntüleri	71
6.2.2	Enine Kesit Mikroyapı Görüntüleri	73

6.2.3	EDS ve Line Scan Analizleri	76
6.2.4	XRD Analizleri.....	83
6.2.5	Yapışma Deneyleri	86
6.2.6	Sertlik Ölçümleri	89
6.2.7	Korozyon Deneyleri	91
6.3	Elde Edilen Sonuçlar ve İrdelenmesi	96
BÖLÜM 7	.....	99
SONUÇ VE ÖNERİLER	.....	99
EK-A	.....	101
EDS GRAFİKLERİ	.....	101
KAYNAKLAR	.....	105
ÖZGEÇMİŞ	.....	109

SİMGE LİSTESİ

HV	Vickers Sertlik Değeri
HK	Knoop Sertlik Değeri
E_{kor}	Açık Devre Potansiyeli
ϵ	Hegzagonal Nitrür
α	Hacim Merkezli Kübik Nitrür
δ	Ortorombik Nitrür
γ'	Yüzey Merkezli Kübik Nitrür
D_0	Difüzyon Katsayısı
Q	Aktivasyon Enerjisi
R	Gaz Sabiti (8.314 J/mol.K)
ΔG	Gibbs Serbest Enerjisi
L_c	Kritik Yük

KISALTMA LİSTESİ

AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
EDS	Enerji Dağılımlı X-Işınları Spektroskopisi
ASPN	Aktif Bölmeli Plazma Nitrürleme
CPN	Geleneksel Plazma Nitrürleme
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
BT	Beyaz Tabaka
XRD	X Işını Kırınım Ölçer
TRD	Termo Reaktif Difüzyon Yöntemi
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
HMK	Hacim Merkezli Kübik Kafes Sistemi
SPH	Sıkı Paket Hegzagonal Kafes Sistemi
YMK	Yüzey Merkezli Kübik Kafes Sistemi
AFM	Atomik Güç Mikroskobu
VDI	Alman Mühendisler Birliği
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
CVD	Kimyasal Buhar Biriktirme
CE	Karşıt Elektrot
RE	Referans Elektrot
WE	Çalışma Elektrot

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1	Fe-C faz diyagramı	17
Şekil 2. 2	Fe-Cr denge diyagramı	23
Şekil 2. 3	Demir içindeki krom elementinin korozyon hızına etkisi.....	23
Şekil 2. 4	Lazerle alaşımlamanın şematik görüntüsü	29
Şekil 3. 1	Arayer difüzyonun oluşumunun şematik olarak gösterilmesi	37
Şekil 3. 2	Yeralan ve arayer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi (Q) değişimi	38
Şekil 3. 3	YMK Kafes içerisinde atomun boş bir konuma hareketi.....	39
Şekil 4. 1	Fe-N denge diyagramı	43
Şekil 4. 2	Amonyakın çelik yüzeyinde parçalanmasını ve azot atomlarının çelik yüzeyine yayınmasının şematik gösterimi.....	44
Şekil 4. 3	Alaşımlar elementlerinin çeliğin nitrürlemesi sonrası sertliğe etkisi	46
Şekil 4. 4	Alaşımlar elementlerinin nitrürleme derinliğine etkisi	46
Şekil 4. 5	Cr-N denge diyagramı	47
Şekil 4. 6	Nitrürlemeye uğramış çeliklerde azot oranının etkisi.....	50
Şekil 4. 7	Şematik olarak maddenin geçiş halleri	51
Şekil 4. 8	Plazma hali	52
Şekil 4. 9	Plazmanın kullanım alanları	53
Şekil 4. 10	Plazma nitrürleme işlemi sırasında çekilen kalıp görüntüsü.....	53
Şekil 4. 11	Elektrik arkı boşalmasının şematik akım – gerilim ilişkisi	54
Şekil 4. 12	Plazma nitrürleme işleminin fırın içerisindeki şematik gösterimi.....	56
Şekil 4. 13	Plazma nitrürleme işleminin demir esaslı malzemeler için mekanizması.....	56
Şekil 4. 14	Plazma nitrürleme sonrası oluşan içyapılar	58
Şekil 4. 15	Modifiye olmuş bölge ile mikro sertlik arasındaki ilişki	58
Şekil 6. 1	AISI 1010 (a) ve AISI 1040 (b) çeliklerinin mikroyapı görüntüsü.....	67
Şekil 6. 2	Sert krom kaplamanın gerçekleştirildiği banyonun görüntüsü	68
Şekil 6. 3	Krom kaplanmış AISI 1010 (a) ve 1040 (b) çelik numunelerinin mikroyapı görüntüleri.....	68
Şekil 6. 4	Plazma nitrürleme cihazının şematik görüntüsü.	69

Şekil 6. 5	Numunelerin yerleştirildiği tablanın, numunelerle beraber plazma nitrürlenme işleminden sonraki görüntüsü.....	69
Şekil 6. 6	Plazma nitrürlenme işleminin yapıldığı fırın ve güç kaynağının görüntüsü ...	70
Şekil 6. 7	Krom kaplanmış numunelerin yüzey görüntüleri a) 1010 b) 1040.....	71
Şekil 6. 8	Sert krom kaplanmış ve sonrasında değişik koşullarda işlem gören AISI 1010 çeliklerinin yüzey görüntüleri a) 560 °C' de nitrokarbürleşmiş numune b) 600 °C' de plazma nitrülenmiş numune c) 700 °C' de plazma nitrülenmiş numune d) 800 °C' de plazma nitrülenmiş numune	72
Şekil 6. 9	Sert krom kaplanmış ve sonrasında değişik koşullarda işlem gören AISI 1040 çeliklerinin yüzey görüntüleri a) 560 °C' de nitrokarbürleşmiş numune b) 600 °C' de plazma nitrülenmiş numune c) 700 °C' de plazma nitrülenmiş numune d) 800 °C' de plazma nitrülenmiş numune	73
Şekil 6. 10	Metkon Micracut 150 marka hassas kesme cihazı	74
Şekil 6. 11	600 °C' de plazma nitrürlenme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış çeliklerin enine kesit görüntüleri a) AISI 1010 b) AISI 1040	75
Şekil 6. 12	700 °C' de plazma nitrürlenme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış çeliklerin enine kesit görüntüleri a) AISI 1010 b) AISI 1040	75
Şekil 6. 13	800 °C' de plazma nitrürlenme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış çeliklerin enine kesit görüntüleri a) AISI 1010 b) AISI 1040.	76
Şekil 6. 14	560 °C' de gaz 8 saat gaz nitrokarbürleşme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış çeliklerin enine kesit görüntüleri a) AISI 1010 b) AISI 1040	76
Şekil 6. 15	600 °C' de plazma nitrürlenme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüsü ve Line Scan analizi	77
Şekil 6. 16	700 °C' de plazma nitrürlenme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüsü ve Line Scan analizi	78
Şekil 6. 17	800 °C' de plazma nitrürlenme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüsü ve Line Scan analizi	79
Şekil 6. 18	600 °C' de plazma nitrürlenme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin mikroyapı görüntüsü ve Line Scan analizi	80
Şekil 6. 19	700 °C' de plazma nitrürlenme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin mikroyapı görüntüsü ve Line Scan analizi	81
Şekil 6. 20	800 °C' de plazma nitrürlenme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin mikroyapı görüntüsü ve Line Scan analizi	82
Şekil 6. 21	560 °C' de gaz nitrokarbürleşme yapılan AISI 1010 çeliğinin X-Ray analizi ...	83
Şekil 6. 22	560 °C' de gaz nitrokarbürleşme yapılan AISI 1040 çeliğinin X-Ray analizi ...	83
Şekil 6. 23	600 °C sıcaklıkta plazma nitrürlenme yapılan AISI 1010 çeliğinin XRD analizi	84
Şekil 6. 24	700 °C sıcaklıkta plazma nitrürlenme yapılan AISI 1010 çeliğinin XRD analizi	84
Şekil 6. 25	800 °C sıcaklıkta plazma nitrürlenme yapılan AISI 1010 çeliğinin XRD analizi	84
Şekil 6. 26	600 °C sıcaklıkta plazma nitrürlenme yapılan AISI 1040 çeliğinin XRD analizi	85
Şekil 6. 27	700 °C sıcaklıkta plazma nitrürlenme yapılan AISI 1040 çeliğinin XRD analizi	85

Şekil 6. 28	800 °C sıcaklıkta plazma nitrüleme yapılan AISI 1040 çeliğinin XRD analizi.....	85
Şekil 6. 29	VDI 3198 Rockwell-C indentasyon testinin standart şekilleri.....	87
Şekil 6. 30	Krom kaplanmış çelik numunenin Rockwell-C yapışma testinden sonraki görüntüsü	87
Şekil 6. 31	Sert krom kaplanmış ve sonrasında değişik koşullarda işlem gören AISI 1010 çeliklerinin Rockwell-C yapışma testinden sonraki görüntüleri a) 560 °C' de nitrokarbürleşmiş numune b) 600 °C' de plazma nitrülenmiş numune c) 700 °C' de plazma nitrülenmiş numune d) 800 °C' de plazma nitrülenmiş numune.....	88
Şekil 6. 32	Sert krom kaplanmış ve sonrasında değişik koşullarda işlem gören AISI 1040 çeliklerinin Rockwell-C yapışma testinden sonraki görüntüleri a) 560 °C' de nitrokarbürleşmiş numune b) 600 °C' de plazma nitrülenmiş numune c) 700 °C' de plazma nitrülenmiş numune d) 800 °C' de plazma nitrülenmiş numune.....	89
Şekil 6. 33	Bulut Makine HVS-1000 marka mikrosertlik ölçüm cihazı.....	90
Şekil 6. 34	Gamry PCI4 Series G Family Instrument Potentiostats cihazı	91
Şekil 6. 35	Korozyon deney düzeneğinin görüntüsü	92
Şekil 6. 36	% 3.5' lik NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1010 çeliğine ait değişik koşullarda ki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	93
Şekil 6. 37	% 3.5' lik NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1040 çeliğine ait değişik koşullarda ki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	93
Şekil 6. 38	Korozyon deneyleri sonrası krom kaplanmış numunelerin yüzey görüntüleri.....	95
Şekil EK A-1	Sert krom kaplandıktan sonra 600 °C' de plazma nitrülenmiş AISI 1010 çeliğinin EDS analiz grafikleri a) 1. nokta b) 2. nokta c) 3. nokta.....	101
Şekil EK A-2	Sert krom kaplandıktan sonra 700 °C' de plazma nitrülenmiş AISI 1010 çeliğinin EDS analiz grafikleri a) 1. nokta b) 2. nokta c) 3. nokta.....	102
Şekil EK A-3	Sert krom kaplandıktan sonra 800 °C' de plazma nitrülenmiş AISI 1010 çeliğinin EDS analiz grafikleri a) 1. nokta b) 2. nokta c) 3. nokta.....	102
Şekil EK A-4	Sert krom kaplandıktan sonra 600 °C' de plazma nitrülenmiş AISI 1040 çeliğinin EDS analiz grafikleri a) 1. nokta b) 2. nokta c) 3. nokta.....	103
Şekil EK A-5	Sert krom kaplandıktan sonra 700 °C' de plazma nitrülenmiş AISI 1040 çeliğinin EDS analiz grafikleri a) 1. nokta b) 2. nokta c) 3. nokta.....	103
Şekil EK A-6	Sert krom kaplandıktan sonra 800 °C' de plazma nitrülenmiş AISI 1040 çeliğinin EDS analiz grafikleri a) 1. nokta b) 2. nokta c) 3. nokta d) 4. nokta	104

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1	AISI 1010 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekaniksel özellikleri 18
Çizelge 2. 2	AISI 1040 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekaniksel özellikleri 18
Çizelge 2. 3	Alaşım elementlerinin mekanik özelliklere olan etkileri 26
Çizelge 2. 4	Yüzey sertleştirme yöntemleri 28
Çizelge 6. 1	AISI 1010 ve AISI 1040 çeliğinin kimyasal analiz ve mikrosertlik değerleri..... 67
Çizelge 6. 2	600 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerinden alınmış elementel analizleri..... 77
Çizelge 6. 3	700 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerinden alınmış elementel analizleri..... 78
Çizelge 6. 4	800 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerinden alınmış elementel analizleri..... 79
Çizelge 6. 5	600 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerinden alınmış elementel analizleri..... 80
Çizelge 6. 6	700 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 1, 2 ve 3 numaralı bölgelerinden alınmış elementel analizleri..... 81
Çizelge 6. 7	800 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 1, 2, 3 ve 4 numaralı bölgelerinden alınmış elementel analizleri..... 82
Çizelge 6. 8	Sert krom kaplanmış ve kaplanmamış çelik numunelerin mikrosertlik değerleri..... 84
Çizelge 6. 9	Sert krom kaplanmış sonrasında çeşitli koşullarda işlem görmüş çelik numunelerin mikrosertlik değerleri..... 91
Çizelge 6. 10	% 3.5' lik NaCl çözeltisinde yapılan korozyon deneylerinde malzemelerin E_{kor} (mV) değerleri..... 94

ELEKTROLİTİK SERT KROM KAPLANMIŞ 1010 VE 1040 ÇELİK YÜZEYLERİN NİTRÜRLLENMESİ VE NİTROKARBÜRLLENMESİ

Mustafa KOCABAŞ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Nurhan CANSEVER

Çelikler, bazı üstün mekanik özelliklerinden dolayı yüzyıllardır en çok kullanılan malzeme olma özelliğini sürdürmektedirler. Günümüzde çelik malzemeler, kimyasal bileşiminin ve içyapılarının farklı olmasından dolayı birçok farklı türde bulunmaktadır. Çeliğe değişik oranlarda alaşım elementleri ilave edilerek ve/veya çeşitli işlemlerle içyapı kontrol edilerek kullanım amacına göre değişik özelliklerde çelikler elde edilir. Bu üstün özelliklerinin yanında çeliklerde bazı sınırlamalar söz konusudur. Bu sınırlamalar özellikle yüzey bölgesindeki malzeme özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bazı çelik türlerinin düşük korozyon direnci göstermesi çeliğin kullanım ömrünü kısaltmaktadır. Korozyona uğrayan çelikte gözle görülebilen olumsuz değişikliklerin yanında, mukavemet azalması ve tribolojik yönden kötüleşme gibi özellik kaybı da gerçekleşmektedir.

Aşınma ve korozyona karşı dirençsiz olan çelikler, yüzeylerindeki düşük olan özelliklerini geliştirmek amacıyla yüzey işlemlerine tabi tutulur. Yüzey işlemleri, malzeme yüzeyinde yeni bir tabaka oluşturacağı gibi yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirerek de yapılabilir.

Alaşım elementleri çeliğin tamamen içerisine katılmakla beraber üretimden sonra elik yüzeyinde biriktirme ve alaşımlama şeklinde de oluşturulabilir. Bölgesel olarak yapılan bu işlemler maliyetten kazanım ve farklı özelliklerin bir arada bulunması gibi avantajlar sağlamaktadır.

Çalışma toplam 7 bölümden oluşmaktadır. İlk Bölümde Giriş, Tezin Amacı ve Literatür İncelemesi bulunmaktadır. 2. Bölümde çeliklerden ve çeliklerin yüzey özelliklerini geliştirmekten bahsedilmiştir. 3. Bölümde difüzyon ve mekanizmalarından bahsedildikten sonra difüzyon yöntemlerinden olan nitrürleme ve nitrokarbürleme sırasıyla 4. ve 5. Bölümlerde anlatılmıştır. 6. Bölüm deneysel çalışmalardan oluşmuştur. 7. Bölümde ise genel olarak sonuçlar özetlenmiştir.

Bu alışmada, AISI 1010 ve AISI 1040 elik yüzeyler elektrolitik olarak sert krom kaplanmış ve 3 farklı sıcaklıkta (600, 700 ve 800  C), % 60 N₂ + % 40 H₂ atmosfer ortamında, 5 saat süreyle plazma nitrürleme işlemine tabi tutulmuştur. Ayrıca, yine sert krom kaplanmış bu numuneler % 45 CO₂ + % 29 NH₃ + % 26 N₂ gaz karışımında 560  C' de 8 saat süreyle gaz nitrokarbürleme işlemleri uygulanmıştır. Yüzey işlemlerine tabi tutulan elik numuneler, XRD analizleriyle karakterize edildikten sonra taramalı elektron mikroskobunda mikroyapısal incelemeleri gerçekleştirilmiş, EDS ve Line Scan analizleri yapılmıştır. Daha sonra yapışma ve sertlik testleri uygulanmış ve % 3.5' lik NaCl zeltisi içerisinde korozyon testleri yapılmıştır. Elde edilen bulgularla, farklı koşul ve malzeme açısından numuneler karşılaştırılmıştır.

Sonuçta, elektrolitik sert krom kaplanmış ve nitrokarbürlenmiş elik numunelerde gaz nitrokarbürleme işlemindeki seçilen deney koşullarının uygun olmadığı tespit edilmiştir. Plazma nitrürlemede ise, en iyi koşulların, korozyon direnci ve yapışma özellikleri değerlendirilerek hem AISI 1010 hem de AISI 1040 elikleri için 600  C sıcaklıkta 5 saat süreyle yapılan deneylerde, sertlik değerleri göz önüne alınarak ise 800  C sıcaklıkta 5 saat süreyle yapılan deneylerde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrolitik krom kaplamalar, plazma nitrürleme, gaz nitrokarbürleme, korozyon

ABSTRACT

NITRIDING AND CARBONITRIDING OF 1010 AND 1040 STEEL SURFACE WITH ELECTROPLATED HARD CHROMIUM

Mustafa KOCABAŞ

Department of Metallurgical and Materials Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Nurhan CANSEVER

Steels maintain the features of being the most used material for centuries because of their some superior mechanic properties. Nowadays steels are in many different forms since their chemical compounds and internal structures are different. Steels, in different features according to the usage aim, are acquired by adding alloy elements in different rates and/or by controlling the internal structure with various treatments. In spite of their superior features, there are some limitations of steels. These limitations arise from the material features of surface zone. Some kinds of steels show low corrosion resistance and this situation shorten the steels' bench life. Besides the visible negative changes in steels which are corroded, losses of features occur such as decreasing in strength and worsening tribological aspects.

Steels which have low resistance against wear and corrosion are subjected to surface treatments with the aim of improving the low surface properties. Surface treatments are performed by both creating new layer on the material surface and changing the chemical compounds of the surface.

Alloy elements can be occurred by deposition on the steel surface and alloying after the production, besides by adding in the steel structure. These treatments which are performed locally provide advantages such as cost saving and containing of different properties.

This study consists of 7 parts. In the first part, there are introduction, the aim of the dissertation and literature. In the second part steels and improving the properties of steels are mentioned. After mentioned diffusion and its mechanisms in the third part, nitriding and nitrocarburising which are two of the diffusion methods is mentioned in the fourth and fifth parts respectively. Sixth part consists of experimental studies. Conclusions are summarized generally in the seventh part.

In this study, AISI 1010 and AISI 1040 steel surfaces which electrolytically plated hard chromium and are exposed to plasma nitriding process at 3 different temperatures (600, 700 and 800 °C), with a gas mixture of % 60 N₂ + % 40 H₂ for 5 hours. Also, gas nitrocarburizing process is performed to electroplated hard chromium steels at 560 °C with a gas mixture of % 45 CO₂ + % 29 NH₃ + % 26 N₂ for 8 hours. Steel samples subjected to surface treatments are characterized with XRD analyses. Then microstructural analyses are completed with the scanning electron microscope and then EDS and Line Scan analysis are done. After that, experiments of adhesion and hardness are implemented and corrosion tests are carried out with % 3.5 NaCl solution. With the findings, samples are compared in terms of different conditions and materials.

In conclusion, in steel samples are electroplated hard chromium and exposed to nitrocarburizing experiment conditions which are selected in the process of nitrocarburizing are inappropriate. In plasma nitriding process, the best conditions are obtained in experiments done with 600 °C temperature for 5 hours considering corrosion resistance and adhesion property for both AISI 1010 and AISI 1040 steels and 800 °C temperature for 5 hours considering hardness for AISI 1010 steel.

Key words: Electroplated hard chromium, plasma nitriding, gas nitrocarburizing, corrosion

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Makina elemanlarının kullanım sürelerini, mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini artırarak daha verimli kullanılması için yüzey mühendislik teknikleri 20. yüzyılın ikinci yarısından sonra yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu amaçla yüzey mühendisliği, aşınma ve korozyon gibi yüzey problemlerine çözüm üretmek için günümüzde endüstriyel alanda geniş bir uygulama alanı bulmuştur. Bu problemler yüzey kaplama ve termokimyasal işlemler gibi yüzey teknikleri kullanılarak önemli derecede azaltılmıştır.

Makina elemanları kendilerinden beklenen fonksiyonları yerine getirirken, parçaların yüzeyleri iç kısımlarına nazaran daha yüksek gerilme ve daha yüksek aşındırıcı kuvvetlere maruz kalır. Bu gerilme ve kuvvetler malzemenin yüzey dayanım sınırını aşınca malzeme yüzeyinde kırılmalar başlar ve böylece aşınma ve korozyon oluşur. Bu nedenle daha uzun bir ömür için bu tür etkilere maruz kalan malzemelerin yüzey dayanımları arttırılmalıdır. Plazma nitrürleme yöntemi bu amaçla kullanılan bir yöntemdir. Özellikle otomotiv sanayinde, metalürji sektöründe ve takım imalat sanayinde uygulama alanı bulan plazma nitrürleme yöntemi, çeliklerin yüzey sertleştirilmesinde yaygınca kullanılmaktadır. Kullanım amaçlarına bağlı olarak; yüzeyi sert ve aşınmaya dayanıklı, buna karşılık içyapılarının sünek olması arzu edilen çelik malzemelerde yüzey sertleştirme yöntemi uygulanır. Bunun için, malzeme yüzeyinde istenilen derinliğe kadar sertleşme sağlayan, sünek içyapıyı etkilemeyen değişik yüzey sertleştirme yöntemleri geliştirilmiştir (Çolak [1]).

Endüstride yaygın olarak kullanılan malzemelerin başında dökme demirler ve çelik gelmektedir. Bu malzemelerden yapılan parçalar, gerek korozyon ve aşınma dayanımlarının artırılması ve gerekse dış görünümünün güzelleştirilmesi için, dış etkenlere dayanıklı, parlak ve sert metallerle kaplanırlar. Kaplama; elektrolitik, sıcak daldırma, sıvı metal püskürtme, metal giydirmeye ve iyon aşılama yöntemleriyle yapılmaktadır. Endüstride kullanılan parçalar başta krom olmak üzere alüminyum, bakır, kobalt, nikel, çinko, kadmiyum, kalay ve kurşun gibi saf metallerle ya da bunların alaşımları ile kaplanır. Krom kaplanan parçalar daha çok makina endüstrisinde kullanılır. Mühendislik ve dekoratif amaçlı olmak üzere ikiye ayrılan krom kaplama; kromun korozyon ve aşınma direnci ile sertliğinin yüksek, sürtünme katsayısının düşük olması nedenleriyle tercih edilmektedir [2].

Yapılan araştırmalara göre, aşınma ve korozyondan dolayı dünya da her yıl önemli malzeme kayıpları olmaktadır. Bazı tahminlere göre, korozyonun bir ulusa maliyeti gayri safi milli hasılanın % 3.5-5.0' ine ulaşmaktadır. Türkiye için bu değerin % 4.5' dan daha az olmadığına ilişkin tahminler vardır [3]. Bu nedenle korozyon ile yapılacak mücadelenin, korozyon maliyetini azaltmasının yanı sıra ulusal ekonomi üzerinde de etkisi vardır. Çevre kirliliği ve emniyet ile ilgili endişelerin giderek arttığı günümüzde, bilim adamları ve mühendislere düşen görev, korozyonun etkin kontrolünü sağlayacak teknikleri geliştirip uygulamaktır.

Yüzey sertleştirme yöntemleri incelendiğinde sertleştirilen malzeme özellikleri, arzu edilen sertlik değeri ve derinliği, uygulanabilirlik, malzemenin kullanım şartları ve gelişen teknolojiye bağlı olarak çeşitli yüzey sertleştirme yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir.

Plazma nitrüleme işlemi çeliklerin korozyona ve aşınmaya karşı davranışlarını artırmak için kullanılan en etkili yöntemlerden birisidir. Plazma ya da iyon nitrüleme adı verilen yüzey sertleştirme yönteminde, malzemenin metal yüzeyine yayındırmak için gönderilen elementsel azotun eldesinde glow deşarj tekniği kullanılır. Vakum ortamında, plazmayı oluşturmak için yüksek gerilimli elektrik enerjisi kullanılır ve azot iyonları iş parçasına nüfuz etmesi için hızlandırılır. Bu iyon bombardımanı iş parçasını ısıtır, yüzeyi temizler ve aktif azot sağlar.

Kullanılan gaz karışımı ağırlıklı olarak hidrojen ve azotun çeşitli oranlardaki karışımı olup bazı durumlarda argon gazı da ilave edilebilir. Plazma nitrürleme günümüzde, özellikle motor pistonlarında, krank millerinde, valflerde, kam milinde, dişlilerde, matkap, zimba gibi kesici takımlarda, derin çekilebilen malzemelerde, dönme ve eğilmeye maruz kalan tüm makina parçalarında kullanılmaktadır. Bu işlemin ekonomik ve kolay uygulanabilmesi endüstrideki kullanım alanını arttırmıştır (Ülker [4]). Modern bir yüzey sertleştirme yöntemi olan plazma nitrürleme, günümüzde çelik, dökme demir, titanyum ve sinterlenmiş ürünlerde geniş ölçüde kullanılmaktadır.

Malzemenin özellikleri ve mikro yapısı arasında yakın ilişki olduğundan değişen proses parametreleri yapıyı etkileyebilmekte; bileşim ve bununla birlikte nitrürlenmiş tabakada özellikler değişmektedir. Plazma nitrürleme ile orijinal bileşimin yüzeyine önemli etki olmaktadır. Yüzey nitrürleme sırasında ve nitrürlemeden sonraki özelliklerinde yüksek oranda azot gazının kullanılması yüksek yüzey sertliğinin ve derinliğinin oluşumunu sağlar.

Plazma nitrürleme metallerin yüzeyini sertleştirmek, aşınmayı, sürtünmeyi ve korozyon dayanımını arttırmak amacıyla oluşturulmuş bir yöntemdir. Bu termokimyasal bir proses olup hedef malzeme yüzeyinin içine azot atomu difüzyonu ile bu yüzeyde sert nitrür oluşturma esasına dayanmaktadır. Plazma nitrürleme prosesinde geleneksel nitrürlemenin aksine hedef malzeme içerisine sürekli olarak elektriksel boşalmada nötr iyon akısı gerçekleşmektedir. Azot iyon aşılması ve plazma nitrürleme prosesi nedeniyle sertlik, aşınma dayanımı ve gücü iyileşmektedir [1].

Endüstrideki plazma nitrürleme, yüzey mühendisliği tekniklerinin en yaygın kullanılan yöntemlerindendir. Plazma nitrürleme işlemlerinde nitrürleme reaksiyonu sadece malzeme yüzeyinde gerçekleşmez, aynı zamanda azotun yüzeyden malzeme merkezine doğru uzun mesafeli difüzyonundan dolayı yüzey altında da gerçekleşir. Yüzeyde oluşan iyon nitrürleme tabakasının yanında yüzey altında daha kalın ve sert bir tabaka meydana gelmektedir. Bu kalın tabaka numune merkezine inildikçe azotça fakirleşmekte ve sertliği düşmektedir. Bu sadece malzemenin yorulma mukavemeti ve aşınma dayanımını iyileştirmekle kalmaz aynı zamanda yük taşıma kapasitesini de artırır [2].

Plazma nitrüleme yöntemi özellikle Amerika ve Avrupa sanayilerinde sahip olduğu avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu avantajlar içerisinde en ön plana çıkanları; enerji ve i şilik maliyetlerinin düşük olu u, istenilen özelliklerde nitrür tabakalarının elde edilebilirliği ve çevresel kirliliğe neden olmamasıdır [5].

Nitrüleme ve nitrokarbürleme birçok geli mi  ülkede endüstriyel anlamda kullanılan bir termokimyasal işlemlerdir. Otomobillerde di li kutuları, basınçlı döküm parçaları, pres parçaları, hidrolik parçalar, plastik üreten ve işleyen parçalar, kamera ve projektör parçaları gibi küçük parçaların aşınmaya korunmasında kullanılmaktadırlar [6].

Difüzyonla sertleştirme yöntemlerinden birisi olan nitrokarbürleme işlemi; katı, sıvı, gaz ve plazma ortamlarında gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde azotun yanında y zeve karbonda yayındırılmaktadır.

Plazma ortamında yapılan nitrokarbürleme işleminin; gaz karışımı ve işlem şartlarının kontrolünün iyi olması, işlem süresinin kısalığı, enerji ve gaz tüketiminin az olması ve ayrıca patlama riski içermemesi gibi birçok avantajları vardır [7]. Hem nitrüleme hem de nitrokarbürleme yöntemleri ülkemizin de aralarında bulunduğu birçok ülke tarafından günümüzde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

1.1 Literatür  zeti

Plazma nitrüleme ve gaz nitrokarbürleme gibi yüzey modifikasyonları yöntemleriyle çalışan araştırmacıların sayısında son yıllarda bir artış görülmektedir. Plazma nitrüleme yöntemi 20. yüzyılda kullanılmaya ba lanmış, ilk kez Almanya'da Bernand Berghaus isimli bir bilim adamı tarafından bulunmuştur. Ancak endüstriye kazandırılması 1973 yılından sonrasına dayanmaktadır [8].

Bu bölümde yaptığımız çalışmaya ışık tutması amacıyla, daha önce yapılan çalışmalar ve bu çalışmaların sonuçlarından bahsedilmiştir.

 olak [1] de, yaptığı çalışmasında AISI 5140  eliğini 400, 450 ve 500  C sıcaklıklarda % 50 N₂ + % 50 H₂ gaz karışımında 1, 4 ve 8 saat süre ile nitr lemi tir. Numunelerin korozyon deneyleri % 3.5 NaCl   zeltisinde N₂ gazı verilerek ya da aynı çözelti içerisinde N₂ gazı verilmeden potansiyostat cihazıyla yapmış malzemenin yapısal ve mekanik özelliklerini, XRD, SEM ve mikrosertlik cihazıyla belirlemiştir.

Sonuçta malzemenin sertliğinin ve korozyon direncinin arttığını tespit etmiştir. En yüksek sertlik ve korozyon dayanımını ise 500°C’ de 8 saat işlem görmüş numunede olduğunu ve korozyon dayanımının % 3.5 NaCl çözeltisine N₂ gazı verilerek arttırıldığını tespit etmiştir.

Korkmaz [9] da, yaptığı çalışmada 1.2379 ve 1.2436 soğuk iş takım çeliklerinin plazma nitrürleme ve iyon aşılama işlemleri neticesinde yüzey bölgelerini incelemiştir. Numuneler, ıslah işlemine tabi tutulmuş ve sertleştirildikten sonra işlemler uygulanmıştır. Plazma nitrürleme işlemi 500 °C’ de sabit sıcaklıkta, 3 farklı basınç değerlerinde ve 4, 7, 10 saat olmak üzere 3 farklı sürede uygulanmıştır. 4,5 mbar ve 7 saat şartlarındaki plazma nitrürlenmiş numunelere Mo iyonları aşılanmıştır. Yüzey sertlikleri alınıp ball-on-disk yöntemiyle aşınma testlerine tabi tutulan numunelerin XRD ve SEM incelemeleri yapılmıştır.

Molibden aşılamaının her iki grup malzemenin de sürtünme özelliklerini iyileştirdiği, ayrıca aşılama sonrası yapılan plazma nitrürleme neticesinde sürtünme katsayısı değişimlerinin diğer işlemlere göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Her iki grup numunede de Cr oranının % 11 civarında olması ve kromun azota afinitesi nedeniyle demir-nitrür fazları oluşumunun sınırlı kalması beklenmiştir [9].

Topçu [10], çalışmasında nitrürleme işlemleri için östenitik AISI 304, martenzitik AISI 420, ferritik AISI 430 paslanmaz çelikler kullanmıştır. AISI 304, AISI 420 ve AISI 430 paslanmaz çelik numuneleri tekil olarak 570 °C’ de 1.5 saat tuz nitrürleme, 570 °C’ de 13 saat gaz nitrürleme, 450 ve 520 °C sıcaklıklarda 8 saat süreyle plazma nitrürleme işlemine tabi tutulmuştur. Korozyon davranışları tuzlu sis kabini içinde incelenmiştir. En yüksek korozyon dayanıma 450 °C’ de 8 saat plazma nitrürlenmiş AISI 304 numunesinde ulaşılmıştır.

Ülker [4] de, yaptığı çalışmasında AISI 52100 yatak çeliğini, % 50 H₂ ve % 50 N₂ gaz karışımında 500 °C sıcaklıkta, 4 saat süreyle 0-20 kHz frekans aralığında, 490-650 voltta darbeli (pulsu) plazma nitrürlemiştir. Numuneler alkolle temizlendikten sonra plazma haznesine yerleştirilmiş ve haznenin havası 2,5x10⁻² mbar basınçla boşaltılmıştır. Deney süresince sıcaklık, numuneye temas halinde olan bir termokupl vasıtasıyla ölçülmüş ve enine kesitten alınan numuneler metalografik işlemlerden geçirilerek incelenmiştir.

X-ışınları difraksiyonu ile tabakanın Fe_2N ve Fe_3N fazlarında oluştuğunu göstermiştir. Plazma esnasında uygulanan frekans aşınma hızında önemli bir etkidir.

Güneş [8] de yaptığı çalışmada, AISI 8620 ve AISI 52100 çelikleri termo-reaktif difüzyon yöntemi (TRD) ile % 55 Al_2O_3 + % 35 ferro-krom + % 10 NH_4Cl içeren bir paslanmaz çelik kutu içerisinde krom karbür kaplamıştır. Kaplama işlemi 800 ve 1000 $^{\circ}\text{C}$ ' lerde 5 saat süreyle elektrik rezistanslı bir fırın içerisinde gerçekleştirilmiştir. İkinci olarak kromlanmış ve kromlanmamış AISI 52100 çelikleri plazma iyon yöntemi ile % 50 H_2 + % 50 N_2 atmosfer ortamında 500 $^{\circ}\text{C}$ ' de 2 saat süreyle nitrürlenmiştir. Numuneler alkolle temizlendikten sonra plazma haznesine yerleştirilmiş ve haznenin havası 0,025 mbar basınca boşaltılmıştır. Deney süresince sıcaklık, numuneye temas halinde olan bir termokupl vasıtasıyla ölçülmüştür ve plazma 500-600 V gerilimlerde oluşturulmuştur. X-ışınları analizi, çelikler üzerinde TRD işlemi için Cr_3C_2 ve Cr_7C_3 fazları, plazma nitrürleme için Fe_2N ve Fe_3N fazları ve çift işlem için CrN ve Cr_2N fazları belirlenmiştir. Tabakalardaki aşınma hızı ve sürtünme katsayısı sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklığın artmasıyla hem aşınma hızının hem de sürtünme katsayısının arttığı tespit edilmiştir.

Develi [5] de, yaptığı çalışmada plazma nitrürleme ve ardından borlama yüzey işlemlerini AISI 8620 çeliği üzerine uygulamıştır. Numuneler alkolle temizlenerek plazma haznesine yerleştirilmiş ve hazne havası 2.5×10^{-2} mbar basınca boşaltılmıştır. Nitrürleme işlemi başlamadan önce numuneler 5^{-2} mbar basınç altında 30 dakika H_2 gazı plazmasına tabi tutulmuştur. Plazma nitrürleme 500 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 5 mbar vakumda % 50 H_2 + % 50 N_2 gaz karışımında 5 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Plazma nitrürlenmiş numunelerin bir kısmı beyaz tabaka kaldırıldıktan sonra diğer kısmı ise beyaz tabaka kaldırılmadan borlama işlemine tabi tutulmuştur.

Alsaran [11] da yaptığı çalışmada AISI 5140 çeliğine 400, 450, 500 ve 550 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda 1, 4, 8 ve 12 saat sürelerde gaz karışım oranı 0.05, 0.33, 1 ve 3 N_2/H_2 atmosfer ortamlarında plazma nitrürleme işlemi uygulamıştır. Maksimum yorulma dayanımı, maksimum yüzey sertliği ve minimum beyaz tabaka kalınlığı ve maksimum difüzyon tabaka kalınlığı dikkate alındığında en optimum sonuçlar 450 $^{\circ}\text{C}$ de 0.05 N_2/H_2 atmosfer ortamındaki 12 saat işlem görmüş numunede tespit edilmiştir.

Karaoğlu [12] de yaptığı çalışmada AISI 5140 çeliğini 1-12 saat işlem sürelerinde 450-550 °C işlem sıcaklıklarında plazma nitrürleme işlemi uygulamıştır. Nitrürleme işlemi 10 mbar basınç altında ve % 10' dan % 60' a kadar değişen azot gazının hacimsel oranlarında uygulanmıştır. En yüksek yüzey sertliği % 20 N₂ içeren nitrürleme ortamında 500 °C' de 4 saat süreyle işlem gören numunelerde elde edilmiştir. Daha düşük sıcaklıklarda ve/veya daha kısa işlemlerde düşük azot girişi ve düşük çökelti yoğunluğu sebebiyle yüzey sertliğinin azaldığı görülmüştür. Uzun nitrürleme sürelerinde ise çökeltilerin aşırı büyümesi ile sertliğin azaldığı tespit edilmiştir. XRD çalışmaları sonucunda yüzeydeki tabakanın γ' ve ϵ nitrür karışımı olduğu tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık, uzun işlem süresi ve düşük azot yüzdelerinin ise γ' nitrürünün yapıdaki ağırlığını arttırdığı belirlenmiştir. Yine artan işlem süresi ve sıcaklığının difüzyon tabakası kalınlığında artışa neden olduğu buna karşın azot yüzdesindeki artış sonucu tabaka kalınlığında artış difüzyon tabakası kalınlığında ise bir miktar düşüş tespit edilmiştir.

Arslan [13] de yaptığı çalışmada AISI 4140 çeliğinden hazırlanan numunelere 500 °C' de 6-24 saat zaman aralığında NH₃ gazı ile plazma nitrürleme ısı işlemi uygulamıştır. Yaptığı deney sonuçlarında plazma nitrürlemenin sertlik özelliklerine etkisi hususunda nitrürleme sıcaklığının artması ile difüzyon tabakası derinliğinin arttığı fakat buna karşın, yüzey sertliğinde azalma meydana geldiğini tespit etmiştir. H₂SO₄ ve NaCl korozyon ortamlarında yapılan korozyon deneylerinde nitrürleme sıcaklığında ve süresindeki artışa bağlı olarak korozyon direncinin azaldığı tespit edilmiştir.

Pınarbaşı [14] de yaptığı çalışmada DIN 1.2378, 1.2379 ve 1.2344 çelik numunelerini 480, 520 ve 550 °C sıcaklıklarda 2, 4 ve 16 saat zaman aralıklarında NH₃ gazı ile plazma nitrürleme işlemi uygulamıştır. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak artan difüzyon sert nitrür içeren elemanların da çözünmesine neden olmuştur. Yine sıcaklığın artmasıyla sertliğin de arttığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak malzemede oluşan temperleme etkisi ve nitrürlerin aşırı büyümesi gösterilmiştir. Sertlikteki artış işlem süresinin artmasıyla da doğru orantılıdır. Buna karşın çökelen alaşım nitrürlerinin toplanmasının sertliği düşürdüğü tespit edilmiştir.

Bayrak [15] de yaptığı çalışmada, ortopedik implant yapımında kullanılan malzemelerden biri olan CoCrMo alaşımını 600 °C ile 800 °C arasındaki sıcaklıklarda % 75 N₂ + % 25 Ar gaz karışımında 1, 2 ve 4 saat süre ile nitrürlemiştir. Nitrürlenen malzemenin yapısal özellikleri XRD, SEM ve AFM analizleriyle; mekanik özellikleri mikrosertlik ölçümleriyle; ve tribolojik özellikleri ise aşınma testleri kullanılarak tespit edilmiştir. Elde edilen veriler sertlik, aşınma oranı ve nitrür fazları yoğunluğu açısından en iyi sonuca 800 °C' de 4 saatlik nitrürleme işlemi ile ulaşıldığını göstermiştir.

Lunarska vd. [16] da Armco demiri¹ altlık malzemesi üzerine galvanik olarak krom kapladıktan sonra aynı numunelere farklı sıcaklık ve atmosferlerde plazma nitrürleme işlemi uygulamışlardır. Krom tabakasının kalınlığı 50 mikron civarındadır. Bu çalışmadaki amaç değişik hidrojen yüzdesinin numuneler üzerindeki davranışlarını incelemektir. Plazma nitrürleme işlemleri iki farklı sıcaklıkta 600 ve 700 °C' lerde değişik hidrojen atmosferlerinde (% 0, 25, 50) ve iki farklı işlem sürelerinde yapılmıştır. Sonuç olarak bütün numunelerde 7-10 mikron kalınlığında kompakt nitrür tabakası CrN ve Cr₂N elde edilmiştir. En yüksek hidrojen kaçışına karşı korunmanın olduğu sonuçlar, % 75 H₂ + % 25 N₂ gaz karışımında 700 °C' de 1 saat plazma nitrürleme işleminden sonra elde edilmiştir.

Hedayati vd. [17] de ASPN (aktif bölmeli plazma nitrürleme) ve CPN (geleneksel plazma nitrürleme) işlemleri ile yapılan elektrolitik sert krom kaplanmış numunelerin nitrürleme davranışlarını incelemişlerdir. Plazma nitrürleme işlemi süresinin 5 saatten 10 saate artmasıyla sertlik ölçümlerinde % 30 azalma gözlemlenmiştir.

Cr ve N arasındaki reaksiyonun sonucu olarak, krom oksit, krom ve çelik altlık malzemelerindeki ısı genleşme katsayısı farkından dolayı oksit film tabakasında kısmi olarak bir bozunma olduğu saptanmıştır. ASPN işleminde yüzeydeki mikro çatlakların kapanması sonucu olarak anodik çözünmenin azaldığı gözlemlenmiştir.

¹ Armco demiri: % 0,1 den daha az alaşım elementi içeren ve üretimi gerçekleştirilen demirdir [18].

Elektrolitik kaplamaların yüksek sertlik ve aşınma dirençlerine rağmen korozif etkenlerin geçişine izin veren mikro çatlaklar içerdiğinden dolayı korozyon dirençleri nispeten daha düşük çıkmıştır [17].

500 °C' nin üzerinde kullanılan elektrolitik sert krom kaplamanın sertliği 800 HV' den 400 HV' ye düştüğünden; bu sıcaklıklarda kullanımı sınırlanmıştır. Yapılan birçok çalışmada bu problemin olası çözümlerinden biriside, bu kaplamaların plazma nitrürleme işlemine tabi tutulması olduğunu söylemektedirler [16], [17], [19], [20], [21], [22], [23].

Bu proseste azot, kaplamanın yüzeyine yayılarak CrN ve Cr₂N gibi krom nitrür fazlarını oluşturmaktadır. Plazma nitrürlenmiş sert krom tabakanın korozyon direncindeki artış hem krom nitrür fazları tarafından yüzeydeki mikro çatlakların kapatılmasına hem de krom nitrürün korozyon direncine bağlanmaktadır [17].

Nitrür fazlar, yüksek sıcaklıklarda bile korunan yaklaşık 900-1200 HV arası sertliklere sahiptir. Sertlik değeri plazma nitrürlemenin sıcaklık ve süresine bağlıdır. Sıcaklığı ve süreyi artırarak daha yüksek sertlik ve daha kalın nitrür tabakalarına ulaşılabilir. CPN' de bazı sınırlandırmalar vardır. Bunların en önemlileri, köşe etkisi ve oyuk katot' dur (Gallo [24]). Bu iki etki, işlem görmüş yüzeyde mekanik özelliklerin heterojen dağılmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte karmaşık şekilli parçaların nitrürlenmesini sınırlamaktadır. Bu bahsedilen kısıtlamalar yeni bir yöntem olan ASPN' de gözlenmemektedir. Ayrıca bu yöntemle seramik, polimer gibi iletken olmayan numunelerin de nitrürlenmesi mümkündür. ASPN' de numuneler silindirik bir çelik bölme içerisine yerleştirilir. Bu bölmeye uygulanan katodik potansiyel, plazma oluşumunun numune yüzeyinde değil de bölmenin tamamında meydana gelmesine neden olur.

Bu çalışmanın amacı, sert krom kaplanmış numuneler üzerine ASPN ve CPN uygulayarak bunların sertliğini, korozyon dayanımını ve morfolojilerini incelemektedir. Plazma nitrürleme işlemi 550 °C' de % 25 H₂ ve %75' lik N₂ atmosferlerde 5 ve 10 saat sürelerde yapılmıştır.

5 saat süreyle yapılan ASPN ve CPN elektrolitik sert krom kaplamanın sertliğe etki etmemesine rağmen, 10 saatlik işlem süresi her iki yöntemde de krom kaplamanın yüksek sıcaklıklarda kullanımından doğan sertlik düşüşlerini % 30 oranında iyileştirildiği gözlemlenmiştir. Krom kaplamanın plazma nitrülenmesi korozyon mekanizmasının bölgesel korozyondan homojen korozyona döndürülmüştür. Elektrolitik sert krom kaplama yüzeyinde yüksek sayılarda mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Bu çatlakların yapılan nitrüleme işlemleri sonucunda yüzeyde oluşan partiküllerle kapatılmış olduğu tespit edilmiştir. Elektrolitik sert krom kaplamalarda korozyonun çatlak çevresinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir [17].

Wang vd. [19] da elektrolitik krom kaplanmış 720 °C' de 20 saatlik sürede yapılan plazma nitrülenmenin yüzey ve arayüzey mikroyapıları üzerine etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada altlık malzemesinden kaplama yüzeyine doğru olan yapı değişimi ve altlık çeliğin arayüzey yapışma etkisi TEM' de incelenmiştir ve yüzeyde oluşan nitrür tabakası XRD yöntemiyle analiz edilmiştir. Krom ve krom-karbür ve nitrür kaplamalar, çeliği ve çeşitli alaşımları kimyasal saldırılardan korumak ve aşınma direncini arttırmak için kullanılır.

Menthe ve Rie [21] de plazma nitrüleme ve plazma nitrokarbürleme işlemlerinin elektrolitik krom kaplamanın mikroyapısı ve özelliklerine olan etkisini incelemişlerdir. 15-100 mikron kalınlığındaki sert krom kaplanmış numunelere uygulanan plazma nitrüleme ve plazma nitrokarbürlemenin korozyon direnci ve aşınma dayanımı ölçmüşlerdir. Yapıda plazma nitrüleme sonrası maksimum 1100 HK sertlik veren CrN ve Cr₂N fazları, plazma nitrokarbürleme sonrası ise maksimum 2200 HK sertlik veren Cr₃C₂ ve Cr₇C₃ fazları gözlemlenmiştir.

Elektrolitik krom kaplamanın, yüksek sertlik ve korozyon dayanımı, düşük sürtünme katsayısı ve adezyon eğilimi gibi özellikleri iyi bilinmektedir. Bununla beraber bu kaplamalarda hala çeşitli sınırlamalar vardır. Kullanım sıcaklığının yükselmesiyle bu kaplamanın sertliğinin düştüğü bundan dolayı da aşınma direncinin azaldığı bilinmektedir. Elektrolitik krom kaplamadaki bu dezavantajların üstesinden gelmek amacıyla yüzey iyon aşılama veya plazma nitrüleme ile modifiye edilmektedir.

PVD yöntemiyle biriktirilen CrN' ün birçok endüstriyel uygulamada aşınma ve korozyon dayanımlarını arttırmada etkin rol oynadığı bildirilmiştir.

Krom kaplama işleminin yapıldığı çözelti 300 g/l kromoksit içermektedir. Kaplama 57-60 °C' de ve 30-50 A/dm² akım yoğunluğunda gerçekleştirilmiştir. Plazma nitrürleme işlemi 560-700 °C arasında yapılırken, plazma nitrokarbüleme işlemi 450-900 °C' deki sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Her iki işlemde de nitrürleme süreleri 5-20 saat arasında değişmektedir. Plazma nitrürleme için atmosfer ortamı % 80 N₂ + % 20 H₂ iken plazma nitrokarbülemede % 80 N₂ + % 18 H₂ + % 2 CH₄ ve % 40 N₂ + % 40 H₂ + % 20 CH₄ bileşimlerine sahiptir. Bütün numuneler işlemlerden sonra vakum ortamında soğutulmuştur.

Korozyon testleri tuz püskürtme yöntemiyle ve 0.5 M H₂SO₄ çözeltisi içeren (pH: 0.3) standart bir elektrokimyasal hücrede yapılmıştır. 560 °C' de 20 saatlik plazma nitrürleme işleminden sonra 1-4 mikron kalınlığında başlıca CrN ve Cr₂N içeren bir kompakt yüzey tabakası elde edilmiştir. Plazma gücünün değişmesiyle bu kompakt tabakadaki CrN miktarı değişmektedir.

Plazma nitrürleme sonrasında sertlik değeri işlem görmemiş numuneyle aynı kaldığı saptanmıştır. Bu durum nitrürlemeden dolayı oluşan yüzey sertliğindeki artışın işlem sıcaklığından kaynaklanan sertlik düşüşünü dengelemesi sonucu ortaya çıkar.

Aşınma deneyleri sonrası plazma nitrürlenmiş krom tabakasındaki ağırlık kaybı işlem görmemiş krom tabakanın yarısı kadar olduğu saptanmıştır. Plazma nitrokarbülemede, 900 °C' ye kadar olan işlem sıcaklığındaki artış sebebiyle kaplamada 1-2 mikron kalınlığında Cr₃C₂ ve Cr₇C₃ fazlarının takip ettiği karbonca zengin (yaklaşık % 95) bir dış tabaka olduğu yapılan XRD analizi sonucu gözlemlenmiştir. Bu işlem sonucu maksimum sertlik değeri 2200 HK olarak ölçülmüştür. Bu durum krom-karbür oluşumunun işlem sıcaklığına kuvvetli bir şekilde bağlı olduğunu gösterir. Termodinamik hesaplamalar krom-karbür oluşumunun 575 °C' de başladığını söylemektedir. Bu deneysel araştırmada krom karbür oluşumu 560-700 °C arasında gözlemlenmiştir.

Plazma nitrürleme sonrasında başlıca CrN ve Cr₂N içeren yaklaşık 1-4 mikron arasındaki dış tabakada işleme uğramamış krom partikülleri de gözlemlenmiştir. Plazma nitrürlenmiş numunelerdeki sertlik aynı sıcaklıkta sadece ısı işlem gören numunelerin sertliğinden yüksekken herhangi bir işlem görmemiş numuneyle yaklaşık aynı değerlerdedir. 900 °C' de uygulanan plazma nitrokarbürleme işlemi ise sertlikte şiddetli bir artışa neden olmuştur. Krom nitrürlerin ve karbürlerin oluşumuyla, korozyon nedeniyle meydana gelen yüzey tabakasındaki çözünme engellenmiştir [21].

Wang vd. [23] plazma nitrürlemenin sert krom kaplanmış C45 çelik malzemesindeki korozyon direncine etkisi incelenmiştir. Numuneler değişik sürelerde 550-750 °C arasında plazma nitrürleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Bu sıcaklıklar yüzeyde krom-karbür oluşturmak için karbon difüzyonuna yetecek yüksekliklerdedir. XRD analizlerinde 650 °C' de Cr₂N gözlemlenirken 700 °C' de yapıda CrN fazları da tespit edilmiştir.

Plazma nitrürleme işlemi, sert krom kaplanmış malzemelerde bir nitrür tabakası oluşturmak için ümit verici bir tekniktir. Polarizasyon eğri sonuçları plazma nitrürlenmiş numuneler nitrülenmemiş altlık malzemelerle kıyaslandığında daha pozitif korozyon potansiyeli göstermektedir. Bu durum korozyon direncinin plazma nitrürleme sonrasında arttığı anlamına gelmektedir. Sert krom kaplamalardaki büyük ölçüdeki çatlak miktarları korozyon direncini düşüren sebeplerdendir. Bu çatlaklar saldırgan korozyon ortamlarının çelik altlık malzemesine ulaşmasında aktif rol oynamaktadır [23].

Nitrokarbürleme çalışmaları incelendiğinde; Seçmen [25] de, yaptığı çalışmasında DIN 1.2344 çeliğine iki farklı sıcaklıkta temperleme yapmış ve ardından ise farklı parametrelerde 580 °C' de nitrokarbürleme işlemi uygulamıştır. Yaptığı deneyler sonucunda aynı işlem süreleri için belli bir değere kadar amonyak oranındaki düşüş ve buna bağlı olarak propan oranındaki artış sertlikte artışa daha sonra düşüşe sebep olmaktadır. Sabit propan ve amonyak yüzdeleri için işlem süresindeki artışa bağlı olarak sertlik artmakta, daha sonra bir miktar düşüş göstermektedir. Açık olarak tespit edilen bir durumda nitrokarbürleme uygulanmış numunelerin nitrokarbürleme işlemi uygulanmamış numunelere göre yüzey sertliğindeki artıştır.

Wang vd. [20] de yaptıkları çalışmada SM45C çelik altlık malzemesi üzerine elektrolitik sert krom kaplanmış numuneyi plazma nitrokarbürleme işlemine tabi tutmuşlardır. 720 °C' de 20 saatlik işlemden sonra numune yüzeyinde sertliği 950-1100 HV olup, Cr₂N ve CrN nitrür fazları içeren 6-7 mikron kalınlığında bir tabaka elde etmişlerdir.

Yüzeydeki nitrür katmanı haricinde krom kaplama ve altlık çelik arayüzeyinde meydana gelen krom karbürden oluşan sürekli bir reaksiyon bölgesi gözlemlenmiştir. Bu durum krom kaplama içerisine yayılan ve krom atomları ile tercihli olarak reaksiyona giren çelik altlık içerisindeki karbon atomları sebebiyle oluşur. Sert krom kaplamayla kıyaslandığında nitrülenmiş numunenin yüzey sertliğinde çok az bir artış gözlemlenmiştir [20].

Karakan [26] da yaptığı çalışmasında AISI 4140 ve 1020 çeliklerini farklı işlem sürelerinde (1-12 saat) ve karışımlarında (N₂, H₂, CO₂), ferritik ve östenitik plazma nitrokarbürleme yapmıştır. Ayrıca elde edilen sonuçlar, plazma nitrülemeyle de karşılaştırılmıştır. İşlemler sonrasında XRD, SEM, mikrosertlik, pin-on-disk aşınma cihazları kullanılarak; yapısal, mekanik, tribolojik özellikleri araştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda, nitrokarbürleme işlemi sonrasında yüzeyde baskın ϵ fazı içeren 9-20 μ m kalınlığında beyaz tabaka elde edilirken, bu tabaka kalınlığının sıcaklık ve zamanla arttığı ve gözenekli bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. İşlem parametrelerine bağlı olarak her iki malzemede de yüzey sertliğinin yaklaşık olarak 2-3 kat arttığı ve sertlik değerinin en yüksek değerini 4 saat işlem süresi içinde alırken, uzun işlem sürelerinde sertlikte düşüş gözlemlenmiştir. Artan işlem süresiyle birlikte difüzyon ve östenit tabaka kalınlıkları artmıştır. En yüksek sertlik, östenitik işlemde östenit tabakasında gözlemlenmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünün işlem süresi ve sıcaklıkla arttığı saptanmıştır.

Denktaş [7] deki çalışmasında, AISI 4140 çeliğin ilk önce 570 °C ve 700 °C' de 4 saat süreyle % 60 N₂ + % 37 H₂ + % 3 CO₂ gaz karışımında plazma nitrokarbürleme işlemine tabi tutmuştur. Nitrokarbürleme sonrası, 450 °C' de 1 saat süreyle % 50 H₂ + % 50 CO₂ gaz karışımı ve saf oksijen ortamında post-oksidasyon işlemi gerçekleştirilmiştir.

Nitrokarbürleme ve post-oksidasyon işlemleri sonrasında XRD, SEM, mikrosertlik, pin-on-disk aşınma cihazı ve elektrokimyasal polarizasyon test cihazları kullanılarak; yapısal, mekanik, tribolojik ve korozyon özellikleri araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, beyaz tabakanın üzerinde hematit ve magnetit fazlarından oluşan oksit tabakası meydana geldiğini göstermiştir. Daha iyi tribolojik ve korozyon özelliklerine nitrokarbürleme sonrası yapılan post-oksidasyon işlemi ile ulaşılmıştır.

Korozyon özelliklerine ferritik nitrokarbürleme sonrası yapılan post-oksidasyon işlemi östenitik şartlarda elde edilen numunelere göre daha iyi olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, daha iyi korozyon özelliklerine oksidasyon işleminde hidrojen gazı kullanılarak ulaşılmıştır [7].

Çimen [27] de, yaptığı çalışmada deney malzemesi olarak DIN 1.2344 sıcak iş takım çeliğini kullanarak nitrokarbürlemede propanın etkisini incelemiştir. Propan oranı arttıkça, yayınma beyaz tabakanın altındaki nitrür bölgesinde, tane sınırları nitrürü oluşumu da artmaktadır. Bu durum, ortama atomik olarak gelen karbonun, azot atomlarının daha iç bölgelere ilerlemesini engellemesiyle azot potansiyelini arttırdığı tespit edilmiştir. Propan, dolayısıyla karbon miktarı arttıkça yayınma derinliğine bağlı olarak sertlik derinliğinde azalma görülmektedir. Bu durum yine artan karbon ilavesiyle atomik azot yayınmasının daha iç bölgelere ilerlemesini yavaşlatmaktadır. Sertlik değerlerinin artan propan oranıyla azalmasının nedeni bu şekilde açıklanmaktadır. Yüzey sertliği değerlerinde de aynı şekilde nitrokarbürizasyon süresi arttıkça düşmeler görülmüştür. Nitrokarbürizasyon süresine ve propan oranına bağlı olarak görülen bu sertlik düşüşleri yüzeyde oluşan γ' -Fe₄N yerine ϵ -Fe₃N nitrürlerinden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada en uygun işlem süresinin 2 saat ve en uygun propan oranının da % 2 olduğu saptanmıştır. Bu durum % 2 propan miktarı ve 2 saat nitrokarbürizasyon işlemine tabi tutulmuş sıcak iş takım çeliklerinin hem zaman hem de mali açıdan diğer örneklerle göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, saldırgan ortamlara ve aşındırıcı koşullara dayanıksız AISI 1010 ve AISI 1040 çelik yüzeylerine plazma nitrürleme ve gaz nitrokarbürleme işlemleri ile azot ve azot/karbon yayındırılarak yüzey özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Yüzey özelliklerine katkı sağlaması amacıyla çelik numuneler önce elektrolitik sert krom kaplanmış daha sonrasında plazma nitrürleme ve gaz nitrokarbürleme işlemleri uygulanarak, düşük olan mekanik ve tribolojik özelliklerin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

1.3 Orjinal Katkı

Birçok araştırmacı tarafından korozyon direncini arttırmak için yapılan plazma nitrürleme veya yüzeye azot/karbon aşılama neticesinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu işlemlerin korozyon ve aşınma direncindeki artışa sebep olarak yüzey bölgesinde karbür ve nitrürlerin oluşması gösterilmiştir [23].

Sert krom kaplamaların doğal yapısında bulunan mikro çatlakların içerisine giren azotla beraber krom nitrür oluşumuyla artan hacim sayesinde mikro çatlaklar kaybolup korozyon direnci artar. Günümüz elektrolitik kaplama koşullarında önlenemeyen mikro çatlaklar, koroziyon etkenlerin altlık malzemesine kolaylıkla ulaşmasına imkan sağladıklarından dolayı korozyon direncine olumsuz etkide bulunurlar. Bu problemi çözmek amacıyla elektrolitik kaplamayla plazma destekli nitrürleme / karbürleme işlemleri uygulanır [20].

Elektrolitik sert krom kaplamalar ve difüzyonla yüzey sertleştirme işlemleri günümüzde en çok kullanılan yüzey işlemleri yöntemlerindendir. Kromun atom olarak azot ve karbona olan düşük afinitesi sebebiyle elektrolitik sert krom kaplanmış numunelere plazma nitrürleme ve gaz nitrokarbürleme işlemlerinin yapılmasını zorlaştırmıştır. Bu çalışmada hem teorik hem de pratik olarak zor gözüken bu işlemler, düşük mekanik ve tribolojik özelliklere sahip çelik yüzeyler üzerine uygulanarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

ÇELİK VE ÇELİK YÜZEY ÖZELLİKLERİNİ GELİŞTİRME

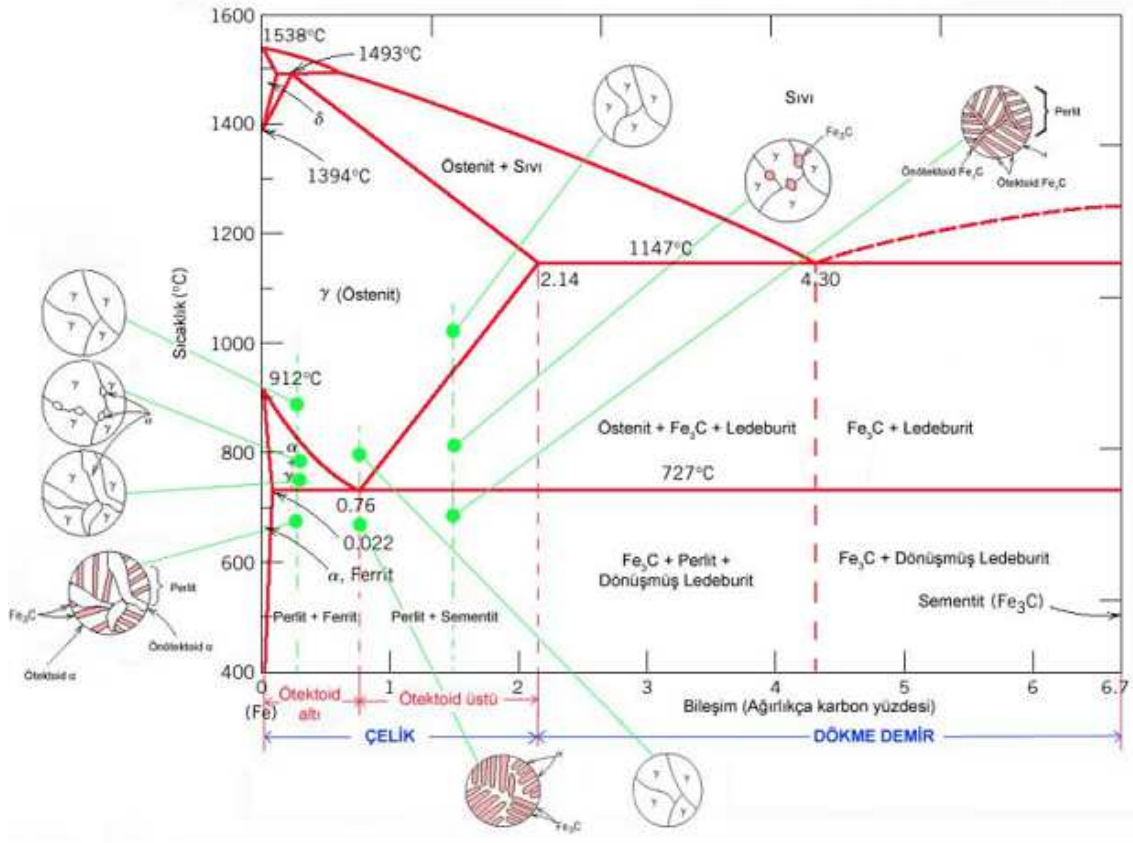
2.1 Çelik Malzemeler

Çelik, demir elementi ile genellikle % 0,2-2,1 oranlarında değişen karbon miktarının bileşiminden meydana gelen bir alaşımdır. Çelik alaşımındaki karbon miktarları çeliğin sınıflandırılmasında etkin rol oynar. Demir-karbon denge diyagramı Şekil 2.1' de verilmiştir. Karbon genel olarak demirin alaşımlayıcı maddesi olsa da demir elementini alaşımlamada magnezyum, krom, vanadyum ve volfram gibi farklı elementler de kullanılabilir. Karbon ve diğer elementler, demir atomundaki kristal kafeslerin kayarak birbirlerine geçmesini engelleyerek sertleşme aracı rolü üstlenirler. Alaşımlayıcı elementlerin, çelik içerisinde değişen miktarları ve mevcut bulundukları formlar (çözünen elementler, çökelti evresi) oluşan çelikte sertlik, süneklik ve gerilme noktası gibi özellikleri kontrol eder. Karbon miktarı yüksek olan çelikler demirden daha sert ve güçlü olmasına rağmen daha gevrekler. Çelikler içerdikleri karbon miktarlarına göre düşük, orta ve yüksek karbonlu çelikler olmak üzere üçe ayrılmaktadır [29].

2.1.1 Düşük Karbonlu Çelikler

Bu gruba % 0,20' ye kadar karbon içeren çelikler dahil edilebilirler. Mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak yumuşak çelikler olarak da tanınırlar. Düşük karbonlu çelikler dünya çelik üretiminin en büyük miktarını kapsarlar. Özellikle, yassı mamuller ile inşaat sektörü ve temel yapılarda kullanılan çelik çubuk ve profiller düşük karbonlu çelikler sınıfındadırlar. Düşük karbonlu çelikler, düşük karbon içeriklerinden dolayı, ısıt

işlem ile kütsel olarak yeterince sertleştirilemezler. Ancak sementasyon, nitrürleme v.b. yüzey sertleştirme işlemleri ile yüzeyleri sertleştirilebilir [30].



Şekil 2.1 Fe-C faz diyagramı [31]

AISI 1010 çeliği içerdği % 0,1 karbon oranıyla düşük karbonlu çelik sınıfına girmektedir. Bu çelik, düşük dayanımlı çelikler arasındadır ancak su verme ve temperleme işlemleri ile dayanımı arttırılabilir. AISI 1010 gibi düşük karbonlu çelikler, soğuk başlı tutturaç ve civata yapımında kullanılırlar. AISI 1010 çeliklerinin işlenebilirlikleri, özellikle soğuk çekme ve soğuk işlenmiş durumlarda oldukça iyidir. AISI 1112 çeliği referans alındığında (% 100 işlenebilir olarak farz edilir), AISI 1010 çeliği % 55 işlenebilirlik oranına sahiptir. AISI 1010 çeliği bütün standart kaynak yöntemleriyle kaynaklanabilir. Bu çelikler genelde tavllanmış ya da yüzeyi sertleştirilmiş hallerinde kullanılırlar [32]. AISI 1010 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekaniksel özellikleri Çizelge 2.1' de verilmiştir.

Çizelge 2.1 AISI 1010 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekaniksel özellikleri [32]

Poisson Oranı	Elastik Modül	Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı	Uzama (%)
0.27-0.30	190-210 GPa	365 MPa	305 MPa	20

2.1.2 Orta Karbonlu Çelikler

Bu gruptaki çelikler % 0.20-0.60 arasında karbon ihtiva eden çeliklerdir. Karbon miktarına bağlı olarak orta derecede mekanik özelliklere sahiptirler. Bu grupta ki çeliklerin en büyük özellikleri, ısıl işlemle yeteri derecede sertleştirilebilmeleridir. Bu bakımdan orta karbonlu çeliklerin kullanım sahaları özellik arz eder. Özellikle makina imalat sanayinin tercih ettiği çeliklerdir. İşlenebilme ve şekil alabilme kabiliyetleri düşük karbonlu çeliklere nazaran daha düşüktür. Bu gruptaki çeliklerin kaynak kabiliyetleri de az karbonlu çeliklere nazaran düşüktür. Zira kaynak esnasında meydana gelen kontrolsüz ısıl etkiler çeliğin yapısal değişiminin de kontrolsüz olmasına sebebiyet verir. Bunun neticesinde malzemelerde hatalara sebep olabilir. Bu sebepten dolayı orta karbonlu çeliklerin bilhassa alaşım elementi ihtiva edenlerinin kaynak işlemlerinde özel itina göstermek gerekir [30].

AISI 1040 çeliği düşük karbonlu çeliklere göre daha yüksek karbon (% 0.40) içerdiğinden dolayı orta karbonlu çelik sınıfına girmektedir. Bu çelikler yüksek dayanıma sahiptirler. Krank mili yapımında, kavrama ve soğuk başlı parçaların yapımında kullanılır. İşlenebilirliği iyidir, AISI 1112 çeliği referans alındığında (% 100 işlenebilir olarak farz edilir), AISI 1010 çeliği % 60 işlenebilirlik oranına sahiptir.

AISI 1040 çeliği bütün kaynak yöntemleriyle kaynaklanabilir. Bu çelikler 850-950 °C sıcaklıklarda ısıl işlemi takiben su verme ve temperlemeyle sertleştirilebilirler [32]. AISI 1040 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekaniksel özellikleri Çizelge 2.2' de verilmiştir.

Çizelge 2.2 AISI 1040 çeliğinin oda sıcaklığındaki mekaniksel özellikleri [32]

Poisson Oranı	Elastik Modül	Çekme Dayanımı	Akma Dayanımı	Uzama (%)
0.27-0.30	190-210 GPa	518 MPa	353 MPa	30.2

2.1.3 Yüksek Karbonlu Çelikler

% 0.60' dan daha fazla karbon ihtiva eden çeliklerdir. Normal halde yüksek mukavemetli ve sünekliği az olan çeliklerdir. Isıl işlemlerle sertleştirilebilmeleri sayesinde yüksek sertlik kazanırlar. Bu bakımdan aşınmaya dayanıklı ve kesici özelliğe sahiptirler. İşlenme ve şekil alabilme kabiliyetleri, düşük ve orta karbonlu çeliklere göre daha düşüktür. Kaynak kabiliyetleri de düşük olup daha özel tekniklerle kaynakları yapılabilir. Bu gruptaki çelikler daha ziyade takım üretiminde kullanılırlar. Yüksek karbonlu çeliklerin bileşiminde bulunan karbon miktarının sınırı, demir-karbon denge diyagramı gereğince % 2'ye kadar çıkabilse de, tatbikatta bu değer % 1,2-1,4 ile sınırlıdır. Özellikle yüksek karbonlu çelikler, düşük ve orta karbonlu çeliklere göre daha kolay su alabilirler ve elde edilen martenzitik yapının sertliği de daha fazladır [30].

2.2 Alaşım Elementlerinin Çeliğe Etkisi

Çelik içerisine üretimi sırasında giren veya yeni özellikler kazandırmak için sonradan katılan karbon, silisyum, mangan, fosfor, kükürt, oksijen, bakır, krom, nikel, volfram, molibden, vanadyum, kobalt ve alüminyum gibi elementlere alaşım elementleri denir. Çeliklere alaşım elementlerinin katılmasının sebepleri genel olarak şunlardır:

- Çekme, basma, vurma, kopma vb. dayanımlarını arttırmak
- Sertleştirmeyi sağlamak veya kolaylaştırmak
- Elektrik direncini arttırmak
- Isıya karşı dayanımını arttırmak veya düzenli bir ısıl genleşmeyi sağlamak
- Kristal kafes yapısını değiştirmek
- Manyetik özelliklerini değiştirmek
- Oksitlenmeyi azaltmak
- Korozyona ve aşınmaya karşı direnci arttırmak
- Kimyasal maddelere karşı dayanımı arttırmak
- Talaş kaldırma, sıcak soğuk biçimlendirme, kaynak etme gibi imalat işlemlerini kolaylaştırmak veya bu işlemlere uygun hale getirmek.

İlave edilmeleriyle çeliğin yapısında ve özelliklerinde değişikliğe neden olan alaşım elementleri ve yaptıkları etkiler aşağıda verilmiştir.

- Karbon

Karbon, çeliğin meydana gelmesini sağlayan demirden sonraki ana alaşım elementidir. Ayrıca çeliğe sertlik ve dayanım sağlayan en önemli katkı elemanı karbondur. Karbon, çeliğin ergime derecesini düşürür, oksitlenmeyi azaltır, korozyon ve aşınma dayanımı sağlar, elektrik direnci ve ısı dayanımını artırır [32].

Çeliklerin temel alaşım elementi olan karbon, çeliklerin üretim işlemleri sırasında yapıdaki yerini alır. İşlenebilirliğin ön planda olduğu çeliklerde karbon miktarı düşük tutulmalı, dayanım değerlerinin yüksek olması gerektiği durumlarda ise karbon içeriği yüksek olmalıdır [33]. Ancak karbon, çeliğin talaş kaldırabilme, kaynak edilebilme, elastikiyet, eğme, dövme ve derin çekme gibi sıcak veya soğuk olarak biçimlendirilebilme kabiliyetlerini azaltır [32].

- Kükürt

Çelik içerisinde doğal olarak demir filizinden veya üretim aşamaları sırasında giren kükürt, fosfor gibi olması istenmeyen bir katkı elemanıdır. Çünkü çeliğe aşırı derecede kırılganlık sağlar ve düşük sıcaklıklarda da çatlaklar oluşur [32].

Akma ve çekme mukavemetine etkisi yok denecek kadar azdır. Fakat malzemenin yüzde uzamasına ve tokluğuna etkisi çok fazladır. Kükürt malzemenin tokluğunu ve sünekliğini önemli ölçüde azaltır. Ayrıca kaynaklanabilirliği kötü yönde etkiler. Kükürt demirle birleşerek FeS fazını oluşturur. Bu faz düşük ergime sıcaklığına sahip olduğu için haddeleme sıcaklığında eriyerek sıcak kırılganlığa sebep olur. Bu olumsuz etki kükürdün manganla birleşmesi sağlanarak önlenir.

Sadece talaşlı şekillendirilmeye uygun otamat çeliklerinde kükürt miktarı yüksek tutulur. Kaliteli ıslah çeliklerinde maksimum kükürt miktarı % 0.045, asal ıslah çeliklerinde ise % 0,035' dir [33].

- Silisyum

Silisyum çeliğin akma sınırı ve çekme dayanımını artırır, sertleşme sıcaklığını düşürür ve martenzit yapı oluşturulabilmesi için zaman kazandırarak sertleşmenin çekirdeğe kadar olmasını sağlar, kimyasal maddelere karşı dayanımı artırır. Ayrıca silisyum, çeliğe manyetik özellikler kazandırır [32]. Silisyum oksijen giderici olarak kullanıldığı için çelik içinde yer alır. Çelik yapısındaki silisyum miktarı azaldıkça tufal¹ yapma oranı artar. Silisyum ucuz bir alaşım elementidir, yaygın olarak yüksek elastikiyet gerektiren yay çeliklerinde kullanılır.

Ancak silisyum çeliğin dokusunu kabalaştırarak darbe dayanımını azaltır. Fazla oranda silisyum katılması sonucu da çeliğin kaynak edilebilme, talaş kaldırılabilme, dövülerek biçimlendirilebilme kabiliyetlerini azaltır.

- Mangan

Mangan, çeliğin kaynak edilebilme kabiliyetini oldukça yükseltir, istenmeyen oksijen ile bileşik yaparak dışarı atar, sertleştirme derinliğini ve aşınma dayanımını artırır, ısı genleşmeyi azaltır. Manganın en önemli özelliği kükürtle MnS bileşiği yapması ve demir kükürt FeS bileşiği oluşumunu engellemesidir [33].

Mangan çeliğin faz dönüşüm hızını yavaşlatarak, sertleşmenin çekirdeğe kadar olmasını sağlar. Ayrıca mangan çelik içerisindeki kükürt ile birleşerek haddeleme sırasında düzenli bir lifli yapı oluşmasını sağlar. Bu sayede çelikler, lif yönünde yüksek çekme dayanımı ve sünekliğe sahip olurlar [32].

- Oksijen

Oksijen, çelik için çok fazla zararı olmasına karşın, üretimi sırasında çeliğin içerisine girmesi engellenememektedir. Oksijen, demir ile birleşerek demir oksit yaparak korozyon oluşmasını sağlar, bu da çeliğin kırılganlık ve yaşlanma özelliklerini arttırmaktadır.

¹ Tufal: Sıcak şekil verme esnasında metal üzerinde meydana gelen oksit tabakası.

- Fosfor

Fosfor çeliğin akma ve çekme dayanımını arttırır, yüzde uzamayı ve eğme özelliklerini çok fazla kötüleştirir, soğuk kırılmalık meydana getirir, talaşlı şekillendirme kabiliyetini arttırır. Fosfor çelik içinde üretim işlemlerinden kalan bir elementtir ve az oranda çekme ve korozyon dayanımını yükseltse de istenmeyen özellikleri nedeniyle mümkün mertebe yapıdan uzaklaştırılır. Kaliteli ıslah çeliklerinde maksimum fosfor miktarı % 0.045, asal ıslah çeliklerinde ise % 0,035' dir [33].

Fosfor, çeliklerin kırılmalık özelliğini arttırmakta, elektrik direnci, biçimlendirilme, kaynak edilebilme ve talaş kaldırılabilme kabiliyetlerini de oldukça azaltmaktadır.

- Bakır

Bakır, hurda malzemelerin geri dönüşümü sırasında çeliklerin içerisine girer. Bakır, çeliklerin korozyon direncini ve az da olsa dayanımını arttırır.

- Volfram

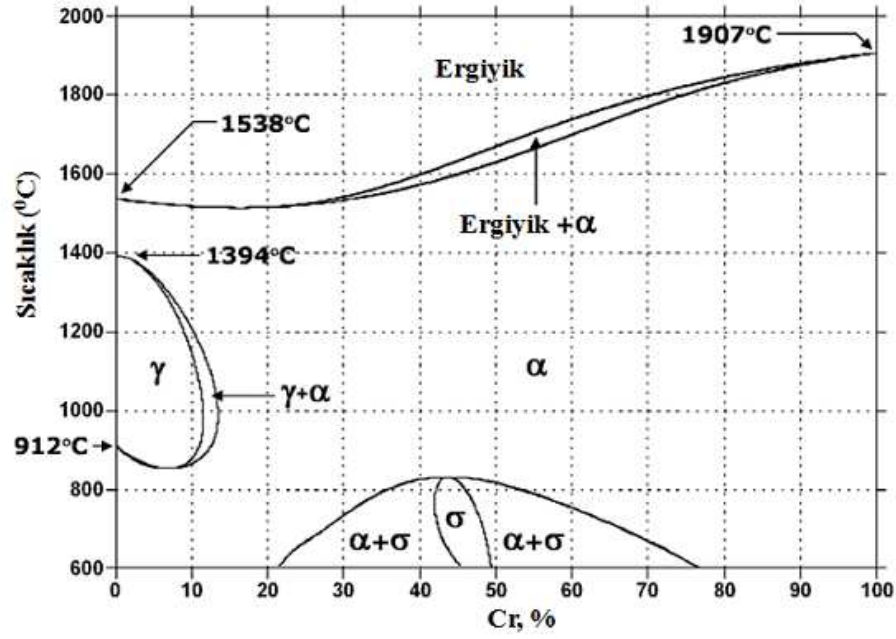
Volfram, çeliğin yüksek sıcaklıklara karşı dayanımını ve karbon ile karbür oluşturarak sertliğini çok fazla artırır. Ayrıca volfram, çeliğin doku dönüşüm hızını düşürdüğünden çekirdeğine kadar sertleşmesini sağlar.

Volfram oranı yüksek olan çelikler kesici takımlarda, az oranda olan çelikler ise sıcak iş kalıplarında ve çeliğe manyetik özellikler de kazandırdığından mıknatıs yapımında kullanılırlar.

- Krom

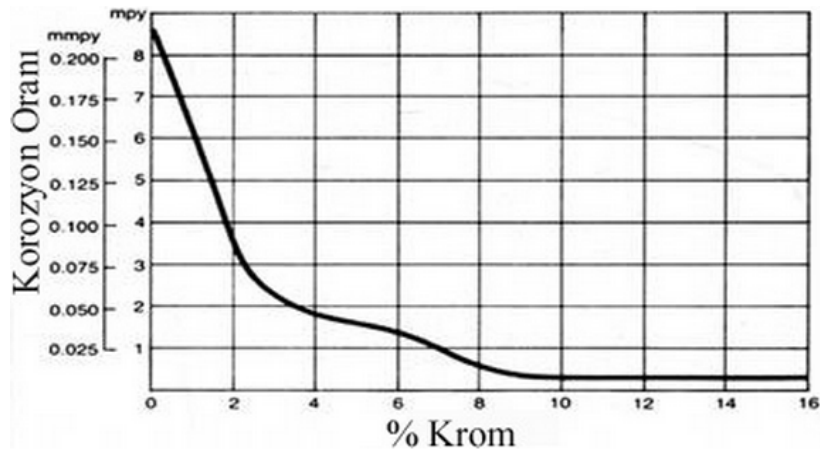
Krom, katkı elemanlarından en önemlilerinden birisidir. Krom, çeliğin akma sınırı ve çekme dayanımını, aşınma, ısı ve korozyon direncini yükseltir, faz dönüşümlerini yavaşlatarak çekirdeğe kadar sertleşmesini sağlar ve ince taneli bir yapı oluşturur. Bu özelliklerinden dolayı kesici takım yapımında krom katkılı çelikler kullanılır.

Ayrıca % 3 oranında krom içeren çelikler, manyetik özellikler kazandıklarından dolayı, mıknatıs yapımında kullanılmaktadır. Şekil 2.2' de Fe-Cr denge diyagramı verilmiştir. Ancak kromlu çeliklerin sertlikleri fazla olduğundan darbelere karşı dayanıksızdır ve soğuk şekillendirilebilme kabiliyetleri düşüktür [32].



Şekil 2.2 Fe-Cr denge diyagramı [32]

Krom, paslanmaz çeliklerin temel alaşım elementidir. Bu alaşım elementi, korozyon ve oksidasyon direnci sağlar, sertleşebilme kabiliyetini artırır. Yüksek karbonlu çeliklerde aşınma direncini yükseltir. Krom, karbon ile tane sınırlarında biriken Cr_{23}C_6 bileşiğini oluşturur. Oluşan bu bileşik paslanmaz çeliklerde tane sınırlarındaki krom miktarını paslanmazlık sınırı olan % 12' nin altına çeker. Bu bileşik yüksek sıcaklıklarda karbon yayılımının hızlanması ile kolayca meydana gelir ve kaynaklı paslanmaz çeliklerde, kaynak dikişi yakınlarında kaynak bozulmalarına neden olur [33]. Krom elementi Şekil 2.3' te görüldüğü üzere çeliği korozyona karşı koruyan temel bileşendir.



Şekil 2.3 Demir içindeki krom elementinin korozyon hızına etkisi [34]

- Nikel

Genellikle krom ile birlikte kullanılan nikel, çeliğin doku dönüşüm hızını düşürerek çekirdeğe kadar sertleşmesini, paslanmaya, korozyona, kimyasal maddelere, yüksek ısıya ve darbelere karşı dayanımı, elastikiyet özelliğinin artmasını sağlar [32].

Nikel, östenitik paslanmaz çeliklerin kromdan sonra ikinci en önemli alaşım elementidir. Östenitik paslanmaz çeliklerde ki nikel miktarı % 7-20 arasındadır. Nikel östenit kararlaştırıcı bir elementtir ve kafes yapısı KYM' dir. KYM kafes yapısı östenitik paslanmaz çeliklere yüksek şekillendirilebilme özelliği kazandırır [33].

Birçok mekanik parçanın yapımında kullanılan nikel katkılı çelikler, yüksek ısı dayanımlarından dolayı ısı genleşme dayanımları da fazla olduğundan, elektrik direnç tellerinin yapımında kullanılmaktadırlar [32].

- Molibden

Molibden ilavesi çelikte tane büyümesini önler, sertleşebilme kabiliyetini artırır ve meneviş gevrekliğini giderir. Meneviş sıcaklığından yavaş soğumalarda bazı alaşımların tane sınırlarında karbür çökmesi meydana gelir, bu da kırılma eğilimine neden olur. Molibden bu olumsuz etkiyi ortadan kaldırır. Ayrıca molibden çeliklerin sürünme dayanımını ve aşınma direncini yükseltir. Alaşımli takım çeliklerinde önemli bir alaşım elementidir. Paslanmaz çeliklerde özellikle oyuklanma korozyonunu engellediği için korozyon direncini önemli ölçüde artırır.

- Vanadyum

Vanadyum, tane küçültme etkisi yaparak çeliklerin akma ve çekme dayanımlarını oldukça artırır. Bu sayede darbelere ve yüklere karşı yüksek dayanım gösteren vanadyumlu çelikler, kesici takım ve vuruntulu çalışan mekanik parçaları yapımında kullanılırlar. Ayrıca sertleşebilme kabiliyetini artırır, menevişleme ve ikinci sertleşmede olumlu etkileri vardır. Alaşımli takım çeliklerinde kullanım yeri olan bir alaşım elementidir. Ancak vanadyum, çeliklerin doku dönüşüm sıcaklıklarını yükselttiğinden uygulanacak ısı işlemlerinde yüksek sıcaklıklarda yapılmalarını gerektirmektedir [32,33].

- Alüminyum

Alüminyum, çelik içerisindeki oksitlenmeyi ve pullanmayı önler. Ancak % 0.5 oranından fazla çeliğe alüminyum katılırsa, karbon ayrılarak grafit haline gelir ve kaba taneli bir yapı oluşur. Akma dayanımını ve darbe tokluğunu arttırıcı etki gösterir. Yüksek alüminyum miktarı sürekli dökümlerde nozul tıkanmalarına sebep olur [33].

Ayrıca alüminyum, azota karşı yüksek ilgi gösterdiğinden, nitrasyon çelikleri için faydalı bir katkı elemanıdır [32].

- Titanyum

Titanyumun, vanadyum gibi tane küçültücü etkisi vardır. Ancak bu etkisi vanadyumun etkisinden daha yüksektir. Mikro alaşımlı çeliklerde, mikro alaşım elementi olarak kullanılır. Ayrıca paslanmaz çeliklerde krom karbürün olumsuz etkisini giderebilmek için karbür oluşturuç alaşım elementi olarak kullanılır.

- Niyobyum

Mikro alaşımlı çeliklerde tane küçültme etkisi en yüksek olan mikro alaşım elementidir. Paslanmaz çeliklerde titanyumun yaptığı etkiyi yapar ve titanyumla birlikte veya tek başına kullanılır.

- Kalay

Akma ve çekme dayanımlarını pek etkilemez, fakat sıcak haddelemelerde sorun oluşturur. Kalay düşük ergime sıcaklığına sahip bileşikler yaparak haddeleme sırasında kopmalara neden olur.

- Kurşun

Haddelenebilirliği azaltır. Haddeleme esnasında kopmalara neden olur, yüzey kalitesini olumsuz yönde etkiler. Sürekli dökümlerde sorunlara sebebiyet verir. Kurşun, çeliklerin talaşlı şekillendirme kabiliyetine artırır, bu yüzden otomat çeliklerinde alaşım elementi olarak kullanılır [33].

- Kobalt

Alaşımli takım çeliklerinde kullanılan bir alaşım elementidir. Takım çeliklerinin sıcakta sertliğini muhafaza etmesi için kullanılır [33]. Kobalt çeliğin sertliğini, yüklere ve ısıya karşı dayanımını artırarak, ince taneli bir yapı oluşmasını sağlar [32].

Anlatılan alaşım elementlerinin mekanik özelliklere olan etkileri, Çizelge 2.3' de özet bir şekilde gösterilmiştir.

Çizelge 2.3 Alaşım elementlerinin mekanik özelliklere olan etkileri [35]

Alaşım Elementi	Sertlik	Mukavemet	Akma Noktası	Uzama	Kesit Daralması	Darbe Direnci	Elastisite	Yüksek Sıcaklığa Dayanım	Soguma Hızı	Karbür Oluşumu	Aşınma Direnci	Dövülebilirlik	İşlenebilirlik	Oksitlenme Eğilimi	Korozyon Dayanımı
Si	↑	↑	↑↑	↓	~	↓	↑↑↑	↑	↓	↓	↓↓↓	↓	↓	↓	-
Mn*	↑	↑	↑	~	~	~	↑	~	↓	~	↓↓	↑	↓	~	-
Mn**	↓↓↓	↑	↓	↑↑↑	~	-	-	-	↓↓	-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	-
Cr	↑↑	↑↑	↑↑	↓	↓	↓	↑	↑	↓↓↓	↑↑	↑	↓	-	↓↓↓	↑↑↑
Ni	↑	↑	↑	~	~	~	-	↑	↓↓	-	↓↓	↓	↓	↓	-
Al	-	-	-	-	↓	↓	-	-	-	-	-	↓↓	-	↓↓	-
W	↑	↑	↑	↓	↓	~	-	↑↑↑	↓↓	↑↑	↑↑↑	↓↓	↓↓	↓↓	-
V	↑	↑	↑	~	~	↑	↑	↑↑	↓	↑↑	↑↑	↑	-	↓	↑
Co	↑	↑	↑	↓	↓	↓	-	↑↑	↑↑	-	↑↑↑	↓	~	↓	-
Mo	↑	↑	↑	↓	↓	↓	-	↑↑	↓↓	↑↑↑	↑↑	↓	↓	↑↑	-
S				↓	↓	↓	-	-	-	-	-	↓↓↓	↑↑↑	-	↓
P	↑	↑	↑	↓	↓	↓↓↓	-	-	-	-	-	↓↓↓	↓↓↓	↓↓	↑↑
* perlitik çeliklerde ** östenitik çeliklerde															
↑ artırır ↓ azaltır ~ değiştirmez - önemsiz															

2.3 Çeliklere Uygulanan Yüzey İşlemler

Gelişen modern teknolojide metal yüzeylerinin dış ortamlardan korunması, maruz kaldığı aşınma, yorulma ve sürtünmeleri ortadan kaldırmak veya minimuma indirmek amacıyla, çeşitli yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Son yıllarda triboloji ile uğraşan bilim adamları sürtünme ve aşınmaya karşı yüzey işlemleri uygulamalarını arttırmışlardır. Bu da, yüzey mühendisliği adı verilen bilim dalının gelişmesine yol açmış ve değişik yüzey işlemlerinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Günümüzde kullanılan yüzey modifikasyon teknikleri; yüzey sertliği, aşınma direnci, korozyon direnci ve yorulma dayanımını arttırmak amacıyla kullanılır [7].

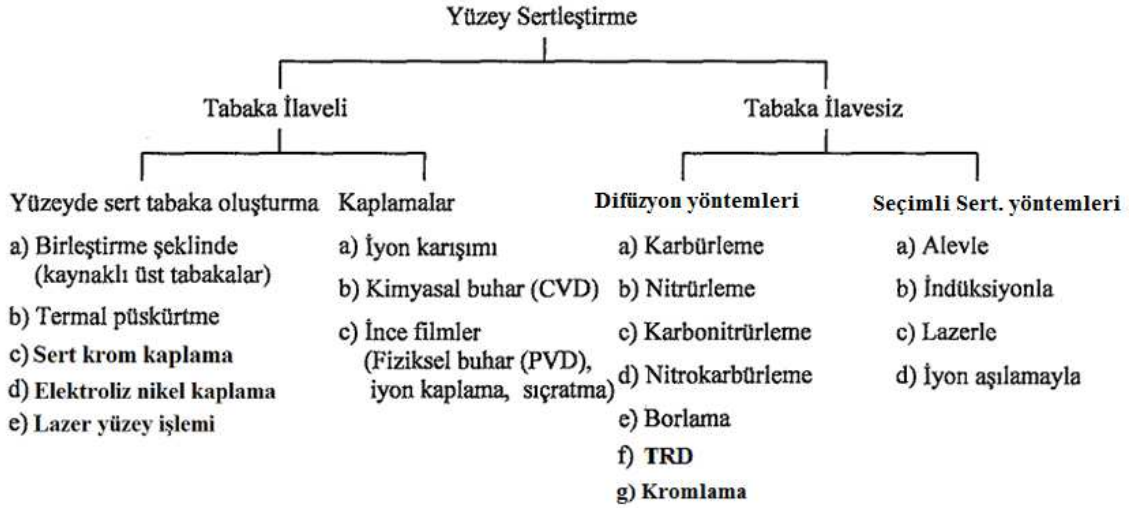
Yüzey işlemleriyle malzemenin yorulma, süneklik ve sertlik gibi mekanik özellikleriyle, aşınma direnci ve korozyon özellikleri iyileştirilmektedir. Malzeme yüzeyinin mekanik özelliklerini iyileştirmenin en basit ve ekonomik yolu yüzey sertleştirme işlemleridir. Malzemenin yüzey sertliğini arttırmak için yapılan sertleştirme işlemleri uzun yıllardır uygulanmaktadır. En yaygın olarak kullanılan nitrürleme, sementasyon, borlama bunlardan birkaç tanesidir. Ancak özellikle sanayileşmiş ülkelerde son yıllarda iyon nitrürleme (glow discharge) metodu yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [1].

Yüzey sertleştirme işlemleri, ana malzemenin sertliğini değiştirmeksizin parçaların yüzeyden içeriye doğru sertleştirilerek aşınma dirençlerini artırmada kullanılırlar. Kam mili ve dişli çarklarda olduğu gibi sert yüzey ve çarpmaya karşı mukavemetin istendiği durumlarda faydalıdır. Bu tür makina parçalarında aşınmaya karşı çok sert bir yüzey istenirken, aynı zamanda da çalışma esnasında çarpmaya karşı mukavemetli olması zorunludur. Malzeme çekirdeğinin yumuşak ve tok olması parçanın bütün olarak yüksek darbe mukavemeti göstermesini sağlar. Yüzey sertleştirme esnasında oluşan bası gerilmesi artışı ile malzemenin yorulma mukavemeti de artmaktadır.

Yüzey sertleştirme işlemlerinde iki farklı yaklaşım vardır (Çizelge 2.4):

1. Yeni bir tabaka ilavesi veya inşasını içeren metotlar.
2. Parça boyutunda herhangi bir değişiklik veya tabaka ilavesi olmaksızın malzemelerin yüzey ve yüzey altı modifikasyonunu içeren metotlar.

Çizelge 2.4 Yüzey sertleştirme yöntemleri [22]



Yüzey sertleştirmenin bir avantajı da, daha ucuz olan düşük ve orta karbonlu çeliklerde dış kısımların sertleştirilmesi esnasında ortaya çıkan çatlama ve distorsiyon problemini azaltmasıdır.

Yüzey sertleştirme işlemlerinden tabaka ilavesinin olduğu ilk gruba, ince filmler, kaplamalar veya kaynaklı üst tabakalar girmektedir. Bu yöntemler, iş parçasının tüm yüzeyinin sertleştirilmesine ihtiyaç duyulduğu durumlarda genellikle daha az maliyetle ürün kalitesini artırmayı amaçlamaktadır. Filmler, kaplamalar ve üst tabakaların yorulma performansı, ana malzeme ile ilave edilen tabaka arasında yapışma mukavemetine bağlı olabilir. Bununla birlikte kaplamalar veya üst tabakalar bazı uygulamalar için oldukça etkili olabilir. Örneğin, TiN ve Al₂O₃ kaplamalar sadece sertliklerinden dolayı değil aynı zamanda takımlarda talaşlara ve bazı aşınmalara karşı kimyasal olarak ilgiyi de azaltır. Üst tabakalar, büyük alanların seçimli yüzey sertleştirilmesi gerektiği zaman uygun bir işlem olabilir [22].

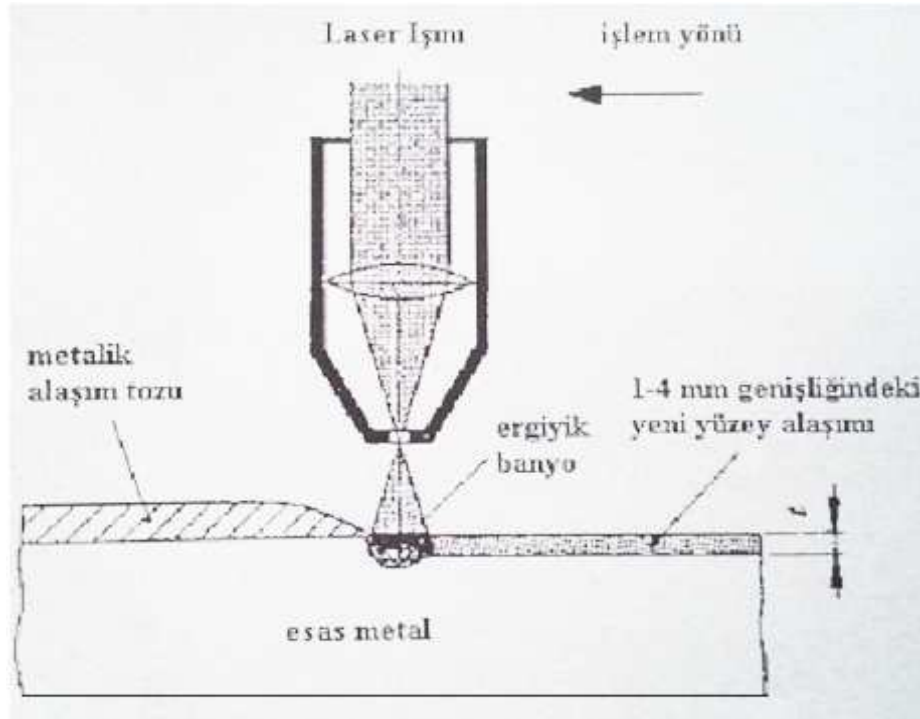
Yüzey sertleştirme işlemlerinde, yüzeyde tabaka oluşturmaksızın modifikasyonu içeren ikinci grubu difüzyon yöntemleri ve seçimli sertleştirme teknikleri oluşturmaktadır. Difüzyon metotları, karbon, azot ve bor gibi sertleştirici elementleri kullanarak yüzeylerin kimyasal kompozisyonunun değiştirilmesini içerir. Bir parçanın yüzeyden içeriye doğru etkili bir şekilde sertliğini arttırmak için çok sık olarak difüzyon teknikleri tercih edilmektedir. Buna karşılık seçimli sertleştirme metotları bir parçanın lokal olarak sadece istenilen kısımlarının sertleştirilmesine olanak sağlar.

Aşağıda yüzey bileşimini değiştirerek yapılan yüzey işlemlerinden olan lazerle alaşımlama, TRD, borlama, kromlama, karbürleme, karbonitrürleme, nitrürleme ve nitrokarbürleme anlatılmıştır. Difüzyonla yapılan işlemler hakkında bu bölümde bilgi verilmiştir. Difüzyon tanımı ve mekanizmaları ise ayrıntılı bir şekilde Bölüm 3' de anlatılmıştır.

2.3.1 Lazerle Alaşımlama

Bu yöntemde lazer ışını ile malzeme yüzeyinde ergitme yapılırken yüzeyde istenen özellikleri sağlamak amacıyla aynı zamanda ilave edilen alaşım elementleriyle, yüzeyden belli bir derinliğe kadar kimyasal bileşim de değiştirilmektedir.

Alaşımlama ile esas metalin ergiyen bölgesine ilave edilen alaşım elementlerinin mümkün olduğunca eş dağılımı sağlanmalıdır. Esas metalin altına ve üzerine serilen alaşım elementinin tozu esas metal ile birlikte lazer ışının etkisi altında ergimektedir. Katılma sonrası esas malzemenin yüzeyinde, ince bir tabaka halinde ve farklı bir kimyasal bileşime ve özelliklere sahip yeni bir yüzey elde edilmektedir [36]. Şekil 2.4' te lazerle alaşımlamanın şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.4 Lazerle alaşımlamanın şematik görüntüsü [36]

Lazer ışını, iş parçası yüzeyinde çok şiddetli enerji yoğunluğu meydana getirmektedir. Lazer ışını bir ışın demeti olup iş parçasından bağımsız olarak kolay kontrol edilir, vakum gerektirmez ve hiç bir yanma ürünü meydana getirmez. Lazer ışını sertleştirilecek olan malzeme yüzeyine çarptığı zaman, enerjisinin bir kısmı ısı şeklinde absorbe edilir. Lazer ışınının iş parçasının yüzeyindeki hareketi ile ışının yolu üzerindeki bir nokta hızlıca ısıtılmaktadır. Lazer ile yüzey sertleştirme işleminin olumsuz yönü olarak ilk yatırım maliyeti söylenebilir [36]. 1018 çeliğine krom elementi alaşımlanarak, yüzeyde Fe-Cr alaşımı elde edilir, aşınma ve korozyon direnci artırılır [37].

2.3.2 Termo Reaktif Difüzyon Prosesi (TRD)

Termo reaktif difüzyon prosesi, karbür, nitrür ve karbo nitrür gibi sert ve aşınma direnci yüksek olan tabakaların, çelik malzemelerin yüzeyinde oluşturulduğu bir metottur. TRD prosesinde çelik ve altlık malzemedeki karbon ve azot, vanadyum, niyobyum, tantalum, krom, molibden veya tungsten gibi karbür veya nitrür oluşturmaya elverişli elementlerle, biriken bir tabaka oluşturmak için yayılır. Yayınan karbon ve azot, karbür ve nitrür oluşturmaya elverişli elementlerle altlık malzeme yüzeyinde metalurjik olarak bağlanmış olan karbür ve nitrür kaplamaları oluşturacak şekilde yoğun bir biçimde reaksiyona girer [26].

TRD prosesi geleneksel yüzey sertleştirme metotlarına benzemez. Çünkü geleneksel yüzey sertleştirme metotlarında karbon ve azot, altlık malzemenin yüzeyini sertleştirmek amacıyla dışarıdan yayındırılmaktadır. TRD Prosesi geleneksel difüzyon metoduna benzememesine rağmen, TRD prosesinde de altlık malzemenin yüzeyinde kaplama tabakasının oluşumu gerçekleşmektedir. TRD prosesinde elde edilen kaplama tabaka kalınlıklarına CVD veya PVD teknikleri kullanılarak ulaşılabilmektedir [38].

Basit donanım, düşük maliyet, kolay operasyon, seçici karbür kaplama, girintili çıkıntılı bölgelerde üniform kaplama, uzun banyo ve kalıp ömrü, malzemeye yapışan tozun kolay temizlenmesi, koruyucu atmosfer gerektirmemesi, atık ve zehirli gaz olmaması TRD prosesinin üstünlükleri arasında sayılabilir [39].

2.3.3 Borlama

Borlama, iş parçasının yüzeyine bor atomlarının yayındırılarak yüzeyde borür fazı oluşturmak suretiyle sertliği, aşınma ve korozyon direncini arttırmak amacıyla yapılan difüzyon kontrollü bir termokimyasal yöntemdir.

Bor atomları altlık malzemenin yüzeyine kolayca difüze olarak; proses sıcaklığı, altlık malzemesinin kimyasal kompozisyonu ve borlama süresi gibi parametrelere bağlı olarak yüzeyde FeB, FeB₂ gibi borürler oluştururlar. Proses sıcaklığı 700-1000 °C arasındadır. Borlanmış çeliklerin sertlikleri 1650-2000 HV arasında, işlem süresi ise 1-12 saat arasında değişir. Borlama, düşük alaşımlı çeliklere, takım çeliklerine, paslanmaz çeliklere ve nikel bazlı alaşımlara uygulanabilir [32].

2.3.4 Kromlama

Kromlama, bileşenlerin performansını ekonomik olarak arttırmak için uygulanan bir yüzey kaplama teknolojisidir. Bir metal veya alaşımın yüzeyinin kromla doyurulması prosesi olan kromlama yüksek sıcaklıkta yüzey korunması için kullanılan bir kaplama türüdür. Çelik parçaların yüzeyinin kromla doyurulması 800 °C' ye kadar olan sıcaklıklardaki korozyona yüksek bir direnç sağladığı gibi deniz suyu ve nitrik asit gibi ortamlara karşı anti-korozif özellikler kazandırır [6].

Demir alaşımları yüzeylerinde kromlama vasıtasıyla; yüzey sertliğini, aşınma ve korozyon direncini geliştiren krom, demir ve karbondan oluşan alaşımlı bir yüzey elde edilir. Kutu sementasyon, erimiş tuz tekniği ve vakum kromlama gibi değişik kromlama prosesleri geliştirilmiştir. Fakat yüksek sıcaklık uygulaması olması sebebiyle, altlık malzemesinin mekanik özelliklerine zarar verici etki yapan tane büyümesine neden olduğu için işlem sıcaklığının düşürülmesi gerekmektedir [32,40].

Kromlama prosesinde parça 950-1050 °C arasında kromdiklorür CrCl₂ ve kromtriklorür CrCl₃, krom veya ferrokrom üzerinden hidrojen buharının geçirilmesiyle elde edilir. Kromlama işlemi sırasında difüzyon sıcaklığındaki CrCl₂ veya CrCl₃ buharları iş parçası yüzeyi ile temas eder. Bu, atomik kromun demire yayınmasına yol açacak şekilde serbest kalmasına neden olan bir yer değiştirme reaksiyonu meydana getirir.

Düşük karbonlu (% 0.1 C) çelikte, difüzyon tabakası α demirde çözünen bir krom katı çözültisi şeklindedir. Yüksek karbonlu çelikte ise tabaka tamamen $(Fe,Cr)_7C_3$ krom karbür tabakasından ibarettir. Karbür tabakasının oluşması için tabakanın altlığının karbonu ile birleşmesi gerekmektedir.

Karbon içeren çeliklerin kromlama uygulamalarında, karbür tabakaları üretebilmeleri için tabakanın en az % 0.2-0.4 C içermesi gerekmektedir. Karbür tabakasının faz bileşimi altlık malzemesinin karbon içeriğine ve kullanılan toz karışımına bağlıdır. Düşük karbon içeriklerinde $M_{23}C_6$ tipi karbürler, yüksek karbon içeriklerinde M_3C ve uzun tutma sürelerinde ise M_7C_3 tipinde karbür tabakaları meydana gelmektedir [6].

2.3.5 Karbürleme

Karbürleme sağladığı üstün mekanik özellikler nedeniyle çeliklere uygulanan ısıtma işlem tekniklerinden biridir. Yüzey sertleştirme prensipleri yüzyıllar önce sementasyon prosesiyle işlenmiş demirin çeliğe dönüşümünde kullanılmıştır. Genelde karbürleme prosesinde % 0,10-0,25 C içeren düşük karbonlu çelikler 900-1100 °C arasında değişen yüksek sıcaklıklara ısıtılırlar. Demirin 910 °C üzerinde yüzey merkezli kübik (YMK) kafes yapısına sahip olması karbon atomlarının demire yayınmasını sağlar. Yeterli derinlikte karbonca zenginleştirilmiş tabaka meydana gelinceye kadar bu sıcaklıkta tutulur. Sonuçta demir yüzeyinde karbürlenmiş tabaka oluşturulur. Karbonca zengin tabaka daha sonra tekrar ısıtma ve su verme ya da karbürleme sıcaklığından direkt su verme ile sertleştirilebilir [32].

Karbürleme yöntemleri, çeliğin östenit sıcaklığına kadar ısıtılması ve bu sıcaklıkta karbon verici bir ortamda tutulması ve sonradan da esas sertleştirme işleminin uygulanmasından meydana gelmektedir. 5 çeşit karbürleme yöntemi vardır:

- a) Kutu karbürleme
- b) Sıvı karbürleme
- c) Gaz karbürleme
- d) Plazma karbürleme
- e) Vakum karbürleme

Bu yöntemler karbonu, gazın (gaz karbürleme, plazma ve vakum karbürleme), sıvıların (tuz banyosu karbürleme), veya katı bileşiklerin (kutu karbürleme) kullanılmasıyla açığa çıkarır. Bütün bu yöntemlerin avantajları ve kısıtlamaları vardır fakat gaz karbürleme doğru olarak kontrol edilebildiği ve az sayıda özel işlem içerdiğinden geniş ölçekte üretim için en çok kullanılan yöntemdir [32,41].

2.3.6 Karbonitrürleme

Karbonitrürleme kazandırdığı üstün mekanik özellikler nedeniyle çelikler için yaygın olarak kullanılan yüzey sertleştirme yöntemlerindendir. Karbonitrürleme östenit fazında çeliğe azot ve karbon yayındırılmasına dayanan bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Östenit kompozisyonunun değiştirilmesi ve su verme işlemiyle martenzit oluşturularak yüksek yüzey sertliği elde edilmesi yönleriyle karbürlemeyle benzerlik gösterir [40].

Karbonitrürleme prosesi gaz atmosferlerinde veya tuz banyolarında uygulanabilmesine rağmen karbonitrürleme terimi daha çok gaz atmosferi altında yapılan bir işlem olarak bilinir. Temel olarak tuz banyosunda karbonitrürleme siyanür banyosunda yüzey sertleştirme ile aynıdır. Her iki proseste, azot sertleşebilirliği ve yüzey sertliğini geliştirirken karbonun difüzyonunu engellemektedirler.

2.3.7 Nitrürleme

Nitrürleme, malzeme yüzeyine azot yayındırarak sert nitrür fazı oluşturmak suretiyle sertliği, aşınma ve korozyon direncini arttırmak için genelde 500-550 °C sıcakları arasında yapılan bir termokimyasal yöntemdir [32].

Nitrürleme sıcaklığında çelikler ferritik yapıdadır. Nitrürleme yüzeye bir element yayındırılması bakımından karbürlemeye benzerdir. Nitrürleme de karbon yerine azot, östenit bölgesinde değil ferrit bölgesinde yayındırılır. Nitrürleme östenit fazına ısıtılıp, ardından su vermek suretiyle martenzit oluşumunu içermediği için minimum çarpılma ve mükemmel boyutsal kontrol ile gerçekleştirilebilir.

Nitrülenmiş  elikler genelde orta karbonlu çeliklerdir ve alüminyum, krom, vanadyum ve molibden gibi güçlü nitrür yapıcı elementler i erirler. Nitrürleme işlemi daha ayrıntılı bir şekilde Bölüm 4' te açıklanmıştır.

2.3.8 Nitrokarbürleme

Nitrokarbürleme ilk olarak 1950' li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Nitrokarbürleme alaşım çeliklerine, takım çeliklerine ve paslanmaz çeliklere; sertliği, aşınma ve korozyon direncini arttırmak için uygulanan; azot ve karbonun metalik alaşımlar içerisinde yüksek sıcaklıklarda difüzyonuna dayanan bir termokimyasal işlemdir.

Karbon ve azotun ferrit fazında difüze olmasıyla yüzeyde nitrokarbürlemeden oluşan ince bir beyaz tabaka meydana gelir. Çeliklerin mekanik özelliklerini geliştirmek için yapılan ferritik nitrokarbürleme gaz veya plazma (iyon) yöntemleriyle uygulanabilir [32,40]. Nitrokarbürleme işlemi daha ayrıntılı bir şekilde Bölüm 5' te açıklanmıştır.

BÖLÜM 3

DİFÜZYON

3.1 Difüzyon ve Difüzyon Mekanizmaları

Yüksek konsantrasyonlu ya da yüksek kimyasal potansiyelli (molar serbest enerjili =serbest enerji/mol) bölgeden, düşük konsantrasyonlu ya da düşük kimyasal potansiyelli bölgeye atom veya partikül göçüne difüzyon denir [42]. Tanımı yapılan difüzyon, yüzey işlemlerinde kullanılan en önemli mekanizmalarındandır.

Difüzyon sertleştirme yöntemleri, sertleştirici atomların (karbon, azot, bor gibi) parça yüzeyine taşınması ve kullanımı için seçilen tekniğe göre birkaç farklılık içerir. Uygulanan işlem yöntemleri; sıvı, gaz veya iyon gibi formlarda sertleştirme ortamlarının kullanımını kapsar. Bu işlem çeşitliliği, doğal olarak tabaka derinliği ve sertlikte farklılıklara neden olmaktadır.

Difüzyonla yüzey sertleştirme işlemi, bir yüzeyin kimyasal değişimini içerir. Kullanılan temel işlem termokimyasaldır. Çünkü bir parçanın yüzey ve yüzey altı bölgesine sertleştirme elementlerinin difüzyonunu artırmak için ısı gereklidir. Difüzyon derinliği zaman ve sıcaklığa bağlıdır.

$$\text{Difüzyon derinliği} = K \cdot \text{Zaman}^{1/2} \quad (3.1)$$

Burada K difüzyon sabitidir. Bu değer; sıcaklığa, çeliklerin kimyasal bileşimine ve verilen sertleştirme türlerinin konsantrasyon eğilimine bağlıdır. Difüzyon sabiti sıcaklığın bir fonksiyonu olarak etkili bir şekilde artmaktadır. Konsantrasyon eğilimi yüzey kinetikleri ve uygulanan işlemin reaksiyonuna bağlıdır [7].

Sıcaklık yükseldikçe atomların ısı titreşimleri artar ve bir kısmı içinde bulunduğu yapıda bir konumdan diğer konuma atlayarak yer değiştirir. Atomsal yayılım veya difüzyon denen bu olayda önce atomun çevresi ile bağları kopar, sonra atomlar arası boşluklardan geçer ve yeni konumunda tekrar çevresi ile bağ kurar. Malzemelerin işlemlerinde önemli rol oynayan birçok reaksiyon ve proses, belirli katı veya sıvıdan gazı veya diğer bir katı faza kütle transferine dayanır. Bu difüzyon yoluyla gerçekleştirilir. Difüzyon en hızlı gazlarda en yavaş katılarda meydana gelir. En yavaş katılarda meydana gelmesine rağmen, katı durum difüzyonu mühendislik malzemeleri için oldukça önemli bir yere sahiptir.

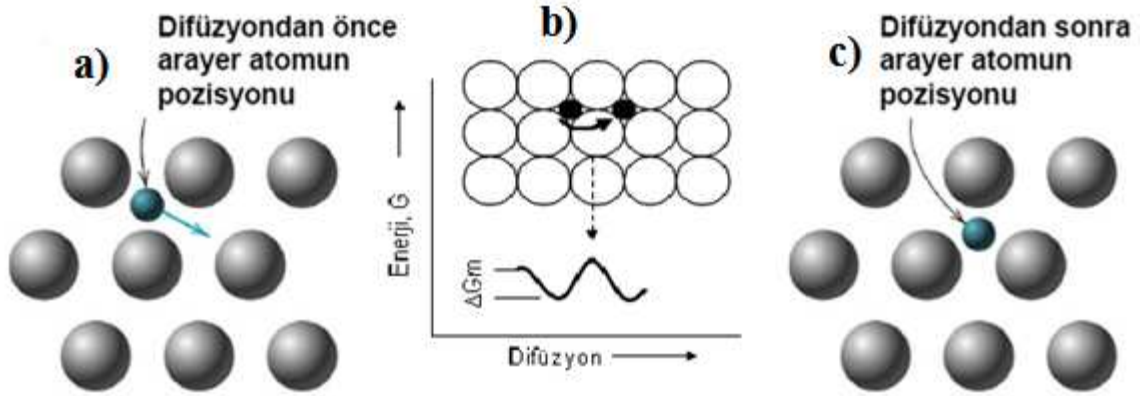
Atomik bakış açısından difüzyon, atomların bir kafes yerinden diğer kafes yerine basamaklı göçüdür. Gerçekte, katı malzemedeki atomlar kararlı harekettedirler, süratle yerlerini değiştirirler. Bir atomun böyle bir hareket yapması için iki duruma değinilmek zorundadır. Bu durumlardan birincisi, boş bitişik bir yer olmak zorundadır. İkincisi ise, atom, komşu atomlarla arasındaki bağları kırarak kadar yeterli enerjiye sahip olmalıdır ve ayrıca yer değiştirme boyunca kafes çarpılmasına neden olur.

Belirli bir sıcaklıkta çok az oranda atom, titreşimsel enerjilerinin büyüklüklerinin avantajından dolayı yayınabilmektedirler. Bu oran sıcaklığın artmasıyla artar. Bu atomik hareket için birkaç model ileri sürülmüş, metalik difüzyon için bu modellerden iki tanesi en önemli yeri tutmaktadır. Bu iki mekanizma (arayer ve yer alan) ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Diğer önemli difüzyon mekanizmaları ise, halka, karşılıklı yer değiştirme ve boşluk mekanizması olarak bilinmektedir.

3.1.1 Arayer Difüzyonu Mekanizması

Arayer difüzyonu mekanizmasında, kristal yapıda küçük bir arayer atomu varsa, atom bir arayerden diğerine hareket eder. Arayer atomlarının yoğunluğu genellikle düşüktür. Arayer difüzyonu mekanizmasında çözünen malzemenin atomlarının çapı (yaklaşık % 40), çözündüğü malzemenin atomlarının çapından küçükse, çözündüğü atomların arasındaki mevcut boşluklardan birisine geçerek boşluğu doldurur [32]. Şekil 3.1' de arayer difüzyonunun oluşumu şematik olarak görülmektedir.

Arayer atomlarının denge pozisyonları en az potansiyel enerjiye sahip oldukları (a) pozisyonudur. Bir arayer atomunu komşu bir arayere hareket ettirmek için, komşu kafesin atomları arasından geçmeye zorlanması gerekir. Neticede (b) pozisyonunda olduğu gibi bir durum oluşur ve en yüksek enerji seviyesine ulaşır. Bu olayın gerçekleşmesi için verilen iş, sistemin serbest enerjisindeki değişimi oluşturur ve (c)' de ki gibi ΔG_m kadar arttırır. ΔG Gibbs Enerjisi olarak bilinir.



Şekil 3.1 Arayer difüzyonunun oluşumunun şematik olarak gösterilmesi [43,44]

Bir arayer atomu boşluklarla kuşatılmış olup, ısı enerjisinin deformasyon enerjisi engelini aşması ile başka bir arayere atlar. İşte arayer atomlarının kafes yapısı içerisindeki başka bir arayer noktasına göçü şeklinde oluşan difüzyona "arayer difüzyonu" denilmektedir.

Fe, Cr, Ni, Mn, W, Ti gibi geçiş elementleri B, C, H, N gibi atom yarıçapı küçük elementlerle arayer katı çözeltisi oluştururlar. Malzemelerde arayer noktaları, kübik kafesin köşeleri arasındaki mesafenin ortasıdır. Bunlar oktahedral noktalar olarak bilinir.

3.1.2 Yeralan Difüzyonu Mekanizması

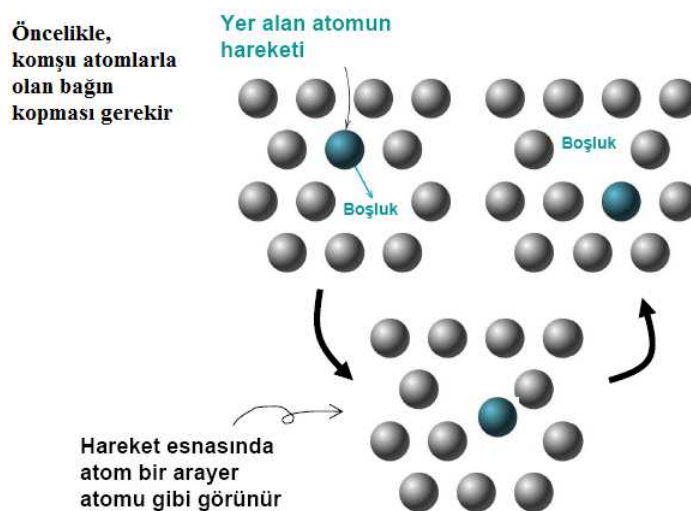
Bu difüzyon mekanizmasında, kafes içerisinde mevcut bir boşluğun olması gerekir. Bu yüzden yeralan difüzyonunun oluşması arayer difüzyonuna göre daha zordur. Arayer difüzyonu yeterli enerjiye sahip olduğunda atom yayınabilir.

Yeralan difüzyonu mekanizmasında, boş yerler yardımı ile yer değiştirme çok küçük bir aktivasyon enerjisini gerektirir. Artan sıcaklıkla birlikte atomların titreşim ve boş yer yoğunluğu artar, dolayısıyla yayınma kolaylaşır.

Normal olarak bir yeralan atomunun hareketi bitişik komşu atomlar tarafından sınırlandırılmıştır ve atom başka kafes noktasına geçemez. Bununla birlikte komşu nokta boş ise Şekil 3.2' de görüldüğü gibi mavi renkli olan atom bu boşluğa atlayabilir. Atlamanın meydana gelebilmesi koyu renkli atomun komşu atomların arasından geçmesini sağlayacak yeterli titreşim enerjisini elde etme ihtimaline bağlıdır. Bir atomun katı içerisinde göç edebilme oranı boşluk bileşimine bağlıdır. Boşluğa sıçrama ihtimali ve boşluk bileşimi sıcaklıkla yakından ilişkilidir. Şekil 3.2 göz önüne alındığında, boşluğun yanındaki atomun yerinden ayrılabilmesi için aşması gereken aktivasyon enerjisi engelini yenecek temel enerjiye sahip olması şartıyla bir sıçrama yapabilir. Yeralan difüzyonuna örnek olarak Cu-Ni, Au-Ag, Fe-Cr vb. alaşımlar gösterilebilir [32].

Yeralan difüzyonunun olabilmesi için;

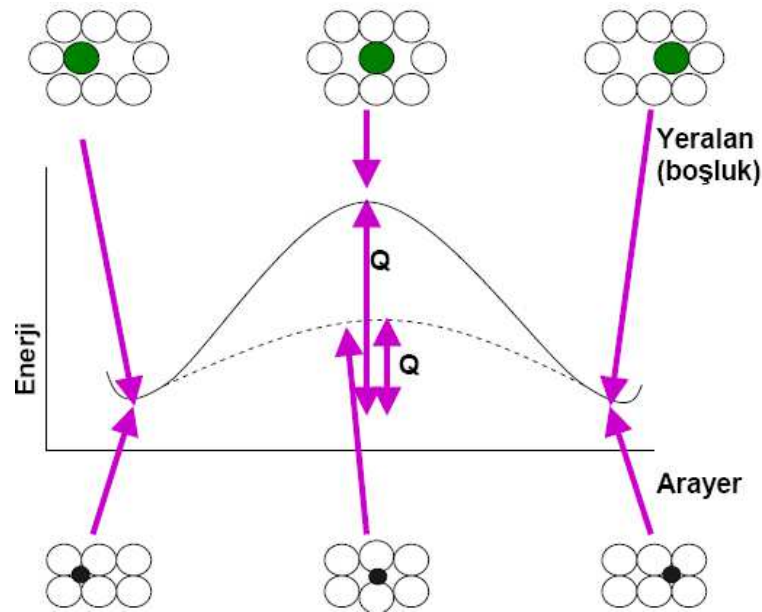
- Atomal çapları farkının % 15' ten küçük olması ($r_A - r_B \leq \% 15$)
- Malzemelerin aynı kristal kafes yapısına sahip olması,
- Elektronegativite farkının küçük olması,
- Valans elektronların eşit olması gerekir.



Şekil 3.2 YMK Kafes içerisinde atomun boş bir konuma hareketi [44]

Difüze eden bir atom yeni yerine ulaşmak için komşu atomlarını sıkıştırıp geçmek zorundadır. Bunun gerçekleşebilmesi için atomların yeni yerine geçmesini sağlayacak enerjiye ihtiyaç vardır. Bu durum Şekil 3.3' de yeralan ve arayer difüzyonu için şematik olarak gösterilmiştir. Burada atom, orijinal olarak nispeten kararlı konumda ve düşük enerjili haldedir. Yeni bir noktaya hareket etmek için, enerji engelini aşmak zorundadır. Bu gerekli olan enerjiye "aktivasyon enerjisi" denir ve " Q " ile gösterilir. Bu enerji engeli sınırını aşması için atomun ısıtılması gerekir.

Normal olarak bir arayer atomunun, komşu atomları geçmek için sıkıştırması daha az enerji gerektirir. Bunun sonucu olarak da, arayer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi, yeralan difüzyonu için gerekli olandan daha azdır. Düşük bir aktivasyon enerjisi daha kolay bir difüzyon gerçekleştiğini gösterir [32,43]. Ergime sıcaklığının yüksek olması difüzyon katsayısını olumsuz etkilemektedir [42]. Örneğin kromun ergime derecesi 1857°C olduğundan krom içersindeki azot difüzyonu çeliklere nispeten düşük seviyededir.



Şekil 3.3 Yeralan ve arayer difüzyonu için gerekli olan aktivasyon enerjisi (Q) değişimi

[44]

3.2 Difüzyonu Etkileyen Faktörler

Sıcaklık difüzyonu etkileyen en önemli parametredir. Mesela α -Fe' sinde Fe' nin difüzyonu için (kendi kendine) 500 °C' den 900 °C' ye sıcaklık arttırıldığında yaklaşık olarak difüzyon miktarı 106 kat artar. Aşağıdaki formüle göre difüzyon miktarı ilişkilendirilirse,

$$D=D_0\exp(-Q/RT) \quad (3.2)$$

Burada; D_0 ; Yayınan atomların titreşim frekansına bağlı olarak difüzyon katsayısı (cm^2/s), Q: Aktivasyon enerjisi (J/mol, Kcal/mol), R: Gaz sabiti, (8.314 J/mol.K), T: Mutlak sıcaklık (K).

Bir malzemenin sıcaklığı arttırıldığı zaman, difüzyon katsayısı ve atomların akısı (J) artar. Yüksek sıcaklıklarda atomların difüzyonu için sağlanan enerji, atomların aktivasyon enerjisi engelini aşmasını ve daha kolaylıkla yeni kafes yerlerine hareket etmesini sağlamaktadır.

Düşük sıcaklıklarda, genellikle mutlak ergime sıcaklığının yaklaşık 0,4 katı altında difüzyon çok yavaştır ve etkili olmayabilir. Bu nedenle seramiklerin ve metallerin ısıtılması işlemi, yüksek sıcaklıklarda yapılır. Bu sıcaklıklarda, atomlar reaksiyonlarını tamamlamak veya denge şartlarına ulaşmak için daha hızlı hareket ederler. Difüzyon sabitinin her 20 °C' lik sıcaklık artışı ile iki kat büyüdüğü düşünüldüğünde, sıcaklığın difüzyon da ne kadar etkili olduğu daha iyi anlaşılmaktadır.

Bileşim, malzeme kompozisyonunun mesafeye bağlı olarak nasıl değiştiğini gösterir. Fakat genel olarak bileşimin değişmesi ile difüzyon katsayısının değerinde değişimler olur. Bileşimin etkisi arayer katı eriyiklerinde daha kolay incelenebilir. Çünkü bu durumda ergiten atomların yayınmasının tesiri ihmal edilebilir. Karbonun östenit içerisinde söz konusu sıcaklıkta eriyebilmesinin sınırı olan % 1,3 karbona kadar difüzyon katsayısında az bir değişme olduğu bilinmektedir. D'nin büyük ölçüde bileşimine bağlı olduğu sistemlerde bile, difüzyonun küçük bir bileşim alanı içerisinde olmak şartı ile D değerinin sabit kabul edilmesi yanlış olur.

Metallerde alaşım elementleri ya da empüriteler, difüzyon katsayısını çok fazla etkiler. Demir alaşımlarının ısıı işlemleri, diğler metallere nazaran daha fazla alaşım elementlerinden etkilenmektedir. Demir atomlarının yer değıştirme kabiliyetine, alaşım elementlerinin etkisi oldukça önemlidir ve karbon çok kuvvetli etki yapar. Östenitte karbon miktarı yükseldiğinde, Q ve D_0 değerlerinin azalması ile difüzyon artar. Krom ve vanadyum gibi alaşım elementleri de difüzyon katsayısını belirgin olarak iyileştirirler. Farklı bir yer değıştirme mekanizmasına sahip arayer atomu olarak bor, hidrojen, karbon, azot ve oksijenin demirdeki difüzyon kabiliyetleri oldukça iyidir. Hidrojenin küçük atom çapı, kafeste büyük bir hareketliliğe imkan sağlar [32].

Kuvvetli karbür teşekköl ettiren elementler, Q değerini önemli ölçüde arttırlar ve bundan dolayı, karbonun östenit içerisinde difüzyonunu yavaşlatırlar. En önemli etkiyi krom ve volfram oluşturur. Silisyum, alüminyum ve manganın önemli bir etkisi yoktur. Nikel ve kobalt ise, karbonun östenit içerisindeki difüzyonunu iyileştirirler [32,43].

Tane sınırı difüzyonu, tane iği difüzyonundan daha hızlı olduğundan küçük tane yapısına sahip malzemelerde, difüzyon hızının artması beklenir. Bununla birlikte, difüzyon hesaplamaları yapılırken tane boyutu hesaba katılmamaktadır.

Tane sınırı çevrelerinde, metal kafesin içerisinde düzensizlikler mevcuttur. Bu nedenle tane sınırları, belirli bir boş hacim iğerirler ve difüzyon için ayrıca enerjiye gerek yoktur. Tane sınırı boşlukları daha büyük olduğu için, aktifleştirme enerjisi hacim difüzyonuna nazaran yaklaşık yan değerdedir. Tane sınırı difüzyonunun etkin olabildiği durumlarda, düşük sıcaklıklarda difüzyon hızlı olabilir. Tane sınırı için belirtilen esaslar, benzer şekilde dislokasyonlar için de geçerlidir [32].

Dislokasyonlarda da tane sınırlarına benzer olarak etkinliğin artmasıyla, gerekli aktifleştirme enerjisi yan değerine düşer. Bu nedenle, dislokasyonların da özellikle düşük sıcaklıklarda, difüzyon reaksiyonları için önemi fazladır. Ayrıca plastik deformasyon sonrası dislokasyon yoğunluğunun artması difüzyonu kolaylaştırır. Bu açıklamalardan da anlaşılabileceği gibi, difüzyon katsayısı D' nin kullanılmasında, malzemenin hangi aşamalardan geğtiğine dikkat etmek gerekir [32,43].

BÖLÜM 4

NİTRÜRLEME

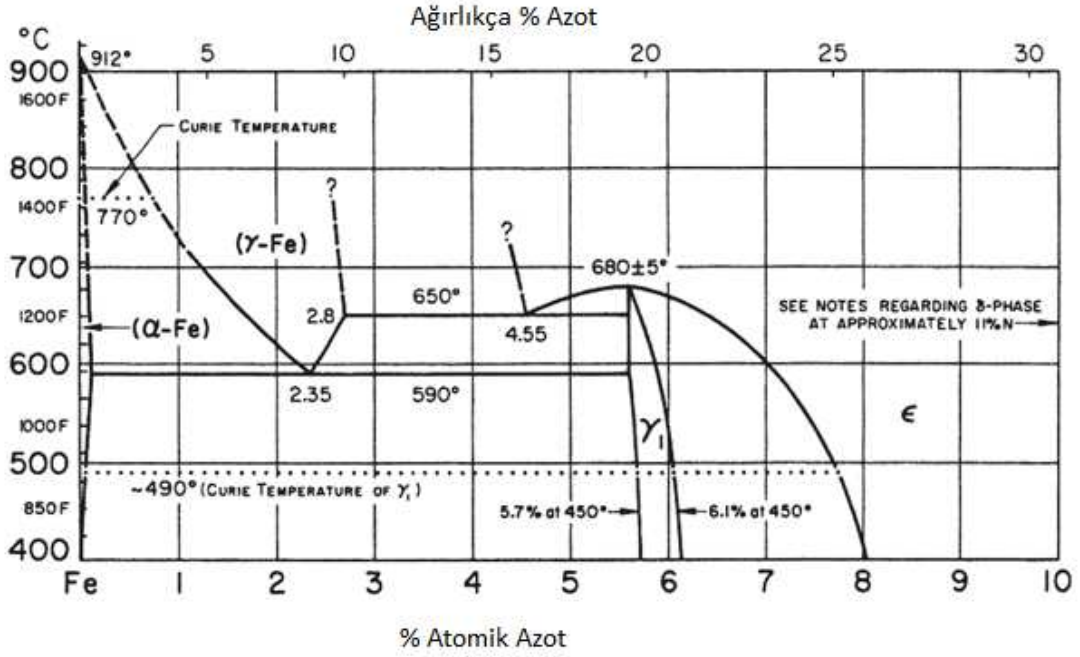
Nitrürleme, çelik malzemenin yüzey özelliklerini geliştirmek ve çalışma ömürlerini arttırmak amacıyla uygulanan en eski termokimyasal proseslerden biridir. Bu teknolojiyen endüstriyel anlamda faydalanma ilk kez 19. yüzyılın başlarında gerçekleşmiştir. Nitrürleme ilgili ilk çalışma 1921’ de “çelik alaşımlarının azotlama ile sertleştirilmesi yöntemi” isimli bir patentin alınmasıyla başlamıştır. Daha sonra 1929’ da ilk kez makina elamanları siyanür içeren eriyiklerde işlem görmüştür [6].

4.1 Nitrürleme İşlemi

İmalat sanayi, otomotiv parçaları, tekstil, makina ve türbin sistem bileşenleri gibi alanlarda geniş bir uygulama sahası bulan nitrürleme işlemi, atomik azotun yüzeyden içeriye doğru termokimyasal yayınıdır [9]. Ferrit fazında gerçekleşen yayılım, azotun demir içerisindeki, Fe-N denge diyagramında (Şekil 4.1) gösterilen, çözünürlüğüne göre gerçekleşir.

Nitrürlemenin gerçekleşmesinde şu parametreler etkin rol oynamaktadır.

1. Azot kaynağı
2. Zaman
3. Sıcaklık
4. Çelik bileşimi



Şekil 4.1 Fe-N denge diyagramı [45]

Gaz nitrürlemede nitrojen kaynağı olarak amonyanın ayrıştırılması hemen hemen bütün proseslerde kullanılır. Gaz nitrürlemede amonyak 500-570 °C arasında termodinamik olarak kararsız hale geçer ve aşağıdaki reaksiyon gerçekleşir:

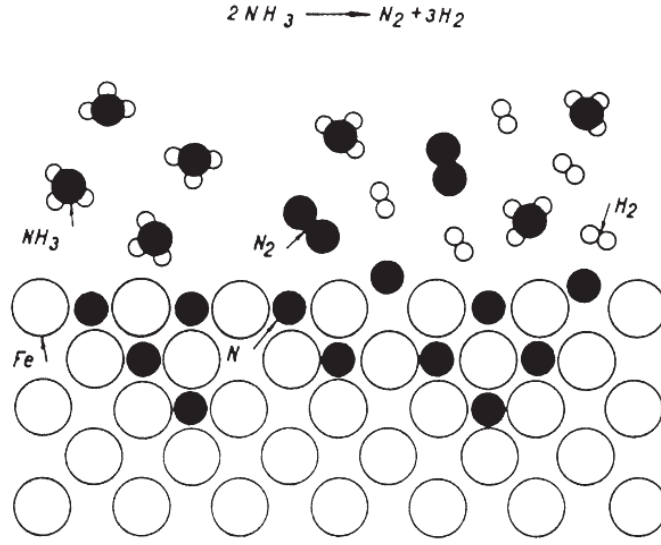


Çelik yüzeyinde proses sıcaklığına ulaşıldığı zaman tipik olarak şu üç reaksiyon gerçekleşir [28].



Azotun atomik çapı 0,142 nm' dir ve demir matris içerisinde arayer atomu olarak bulunur. Ortam sıcaklığında α-demirde azotun çözünürlüğü ağırlıkça % 0,001 iken 590 °C' de % 0,115' dir. İşlem sıcaklığında YMK (Yüzey Merkezli Kübik) γ' -nitrür (Fe₄N) oluşur. Bu yapı içerisinde azot % 5,7-6,1 oranında çözünür. Hegzagonal ε-nitrür (Fe₂₋₃N) ise % 8-11 oranında çözünürlük sağlar. 500 °C' nin altında oluşan ortorombik δ - nitrür (Fe₂N)'de ise azot içeriği % 11' i geçer.

Demir kristali içerisinde geçen küçük azot atomlarının hareketi arayer yayınımları olarak adlandırılır. Şekil 4.2' de şematik olarak gösterilmektedir [45].



Şekil 4.2 Amonyakın çelik yüzeyinde parçalanmasını ve azot atomlarının çelik yüzeyine yayınmasının şematik gösterimi [45].

Nitrürlenmiş çelik bir yayılım tabakası içerir. Yüzeyde bir bileşen tabakası (beyaz tabaka) oluşabilir. Bileşen tabakası; ϵ -Fe₂₋₃N ve γ' -Fe₄N intermetaliklerinin olduğu bölgedir ve çeliklerin bileşimi ile işlem parametrelerine bağlı olarak 15-20 μm kalınlığı geçmez. Fe-N denge diyagramında belirtildiği şekilde 450 $^{\circ}\text{C}$ ' de γ' -nitrür fazı % 5.7-6.1 azot barındırır. Bu oran üzerine çıktığında yüzeyde ϵ -nitrür fazı baskın olarak meydana gelir. Bu durum çeliğin karbon içeriğine bağlıdır ve artan karbon miktarı ile ϵ -nitrür fazı oluşumu tetiklenmektedir [45].

ϵ tabakası aşınma ve yorulma dayanımı için tercih edilebilir. Ayrıca şok yüklemelerden ve yüksek yerel gerilmelerden etkilenir. γ' tabakası daha yumuşak ve düşük aşınma dayanımlı, ancak daha dayanıklı ve şiddetli yüklemelere daha toleranslıdır. Beyaz tabaka yağlama özelliğini arttırmasına rağmen fazlar arası (ϵ ve γ') zayıf yapışma ve her iki fazın ısı genleşme katsayılarının farklı olması nedeni ile kırılgan bir özellik gösterir. Beyaz tabakanın kalın olması bu eğilimi artırır. Demir esaslı malzemelerin nitrürlenmesinde işlem sırasında faz değişimi yoktur [9,39].

Nitrürleme işleminin ferritik bölgede yapılmasının iki tane temel nedeni vardır. Bunlar;

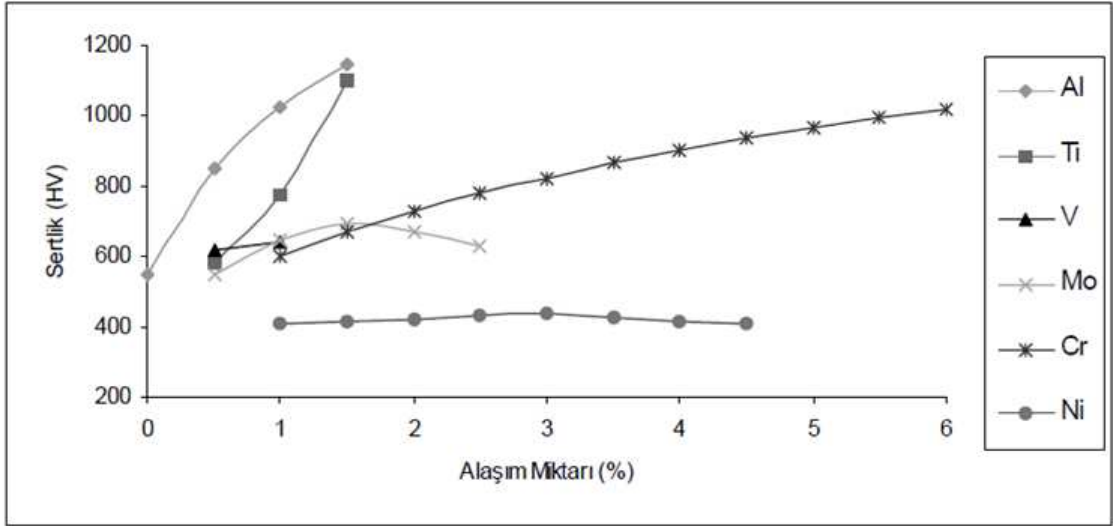
1) Azotun atom çapı karbona göre daha küçük olduğundan demir matrise yayılması daha hızlı olur ve daha yüksek sıcaklığa çıkılırsa nitrür tabakaları dış yüzeyde yığılma göstereceğinden kırılğan bir yapının oluşmasına neden olur.

2) Östenit-ferrit dönüşümünden dolayı hacim değişmesi meydana gelir buda tabakanın pul pul dökülmesine neden olur. (Özdemir ve Erten [46]).

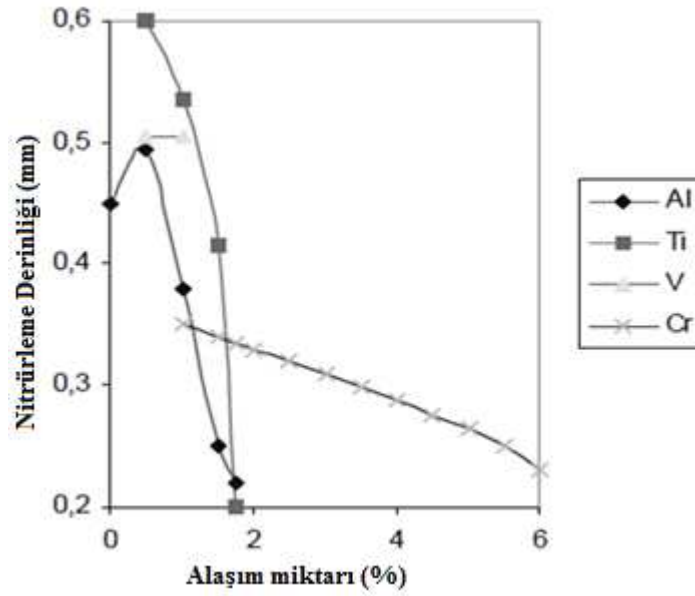
Endüstriyel uygulamalarda, başta çelik olmak üzere birçok metalik makina parçasının aşınma ve yorulma dirençlerini artırmak amacı ile yüzeylerinin sertleştirilmesi amacıyla nitrürleme işlemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Nitrürleme işlemi başlangıçta amonyak atmosferinde demir kafesi içerisinde azotun çözündürülmesi amacı ile yapılmış iken, zamanla azot sağlayıcı ortam olarak siyanür içerikli tuz banyoları kullanılarak ve daha yeni bir teknik olan plazma nitrürleme ile de gerçekleştirilmektedir (Polat vd. [47]).

4.1.1 Nitrürlenebilirlik ve Kromlu Çeliklerin Nitrülenmesi

Nitrürlenebilirlik; çeliğin azotu sönümleyebilme kabiliyeti ve diğer taraftan azotun sağladığı sertlik artışı olarak ifade edilir [13]. Alaşım elementlerinin çeliğin nitrürlemesi sonrası sertliğine etkisi Şekil 4.3' te verilmiştir. Yüksek yüzey sertliği istenen nitrürlenecek bir çeliğin bileşimi üzerinde karar verileceği zaman, seçim genellikle alüminyum, krom ve molibden gibi nitrür oluşturan elementler üzerinde yapılır. Şekil 4.3' deki diyagramdan da görüleceği gibi; yüzey sertliği üzerinde en büyük etkiye sahip alüminyumdur. Bunu sırasıyla Ti, Cr, Mo ve V takip eder. Nikelin etkisi sade karbonlu çeliklerde oluşan yüzey sertliği kadardır. Nitrürleme derinliği Şekil 4.4' de görüleceği gibi alaşım elementi miktarının artmasıyla azalır. Sertlik artışında en büyük etkiye sahip olan alüminyum ve titanyum aynı zamanda azotun difüzyonuna en fazla geciktirici etkiyi gösterir. Bu elementlerin miktarı arttıkça, azotun çeliğin bünyesine alınması zorlaşır. Optimum sertlik ve nitrürleme derinliğinin sağlanması için tavsiye edilen alüminyum oranı % 1 civarındadır. Karbonun da benzer şekilde azot difüzyonuna karşı kuvvetli bir engelleyici özelliği vardır. Alaşım elementlerinin difüzyona karşı etki göstermelerinin nedeni, azotla beraber nitrürler oluşturmalarıdır [46].



Şekil 4.3 Alaşım elementlerinin çeliğin nitrürlenmesi sonrası sertliğe etkisi [46]

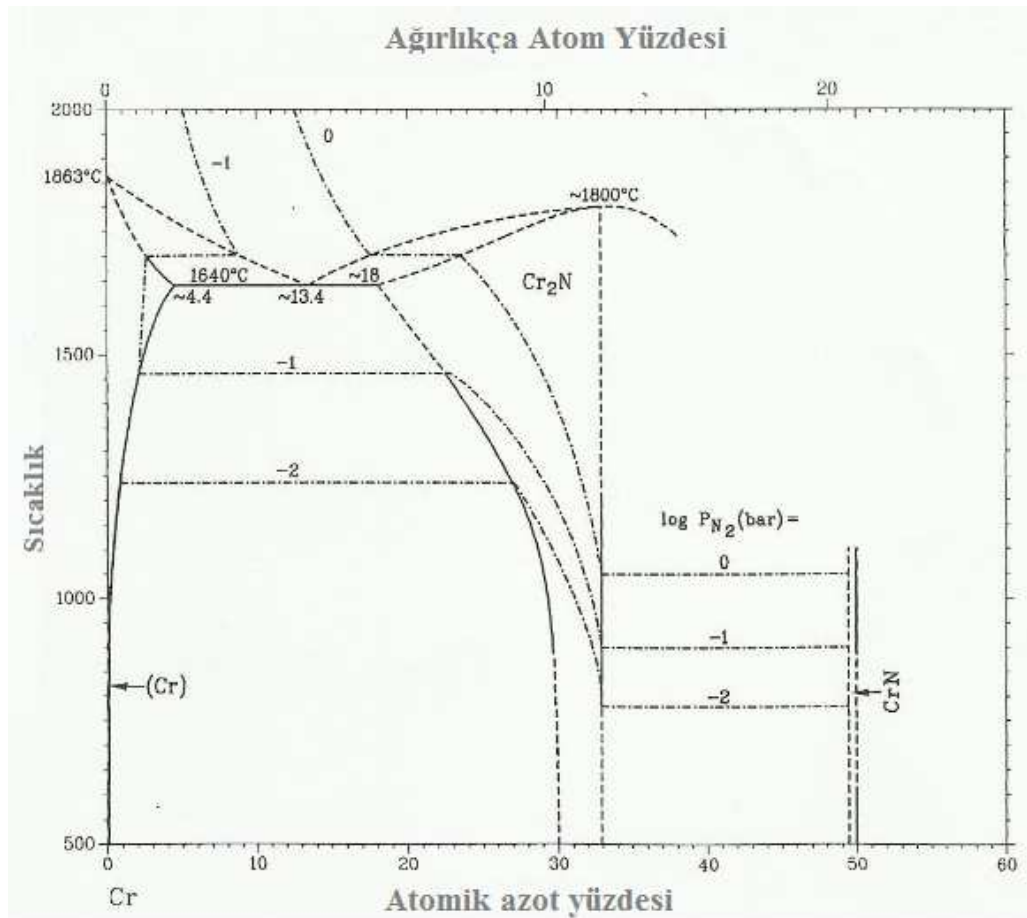


Şekil 4.4 Alaşım elementlerinin nitrürleme derinliğine etkisi [46]

Nitrürlenmiş alaşımlı çeliklerin yüzeylerinde demir nitrürlerin oluşturduğu bileşik bölgesi bulunmaktadır. Alaşım elementlerinin etkin olduğu bölge ise bileşik bölgesi altındaki nitrür bölgesidir. Sıcaklığa bağlı olarak yer alan alaşım elementlerinin α -Fe matristeki N ile nitrür bölgesindeki etkileşimleri, yüksek ve düşük sıcaklık aralığında değişmektedir. Yüksek sıcaklıklarda yeralan krom atomları, demir matrisin içinde kolayca hareket edebildiğinden metal nitrürleri oluşturacak şekilde atomik azot ile birleşerek çökelirler.

Düşük sıcaklıklarda yeralan alaşım elementlerinin matris içinde hareketi zor olduğundan yalnızca aşırı doymuş yapıdaki metal nitrürler çökmektedir. Krom içeren çeliklerde serbest Cr_2N ve CrN gibi nitrürler, 575-865 °C sıcaklık aralığında oluşmaktadır. 865 °C' de düşük krom oranlarında CrN çökeler. Cr_2N ise kromun % 14' ü aşması ve sıcaklığın yüksek olması halinde çökmektedir. 575 °C' de çökelen CrN , Cr_2N ' den daha kararlı ve sürekliidir.

Birçok Metal-Nitrür sistemlerinde nitrür yapıları, alaşım elementi oranına göre değiştiğinden Cr-N sisteminde de değişen krom oranları farklı kristal yapıları bileşimler oluşturmaktadır [27]. Şekil 4.5' de Cr-N denge diyagramı verilmiştir (Okamoto, [48]).



Şekil 4.5 Cr-N denge diyagramı [48]

Yüksek sıcaklıkta krom oranının % 14' ü aşması halinde SPH (sıkı paket hegzagonal) yapıları Cr_2N çökelerken daha düşük sıcaklık ve bileşim oranlarında YMK (yüzey merkezli kübik) yapıları CrN çökmektedir. Fe-Cr alaşımında oluşan nitrürler krom oranının yanında azot oranına da bağlıdır [27].

4.2 Nitrürleme Çeşitleri

Nitrürleme işlemi genellikle sıvı, gaz ve plazma olmak üzere 3 farklı yöntemle yapılır. Bu yöntemler aşağıda ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

4.2.1 Sıvı Nitrürleme

Tuz banyosunda nitrürleme veya sıvı nitrürleme işlemi, yaklaşık olarak 570 °C sıcaklığındaki siyanür (CN) banyosunda gerçekleşir. Sıvı nitrürlemede azotla birlikte siyanürün bileşimindeki karbonun bir kısmı azda olsa çeliğe yayılır. Isınmanın hızlı oluşu işlem süresini kısaltır (1-10 saat). İç kısımlarında belirli bir ıslah durumunun korunması gereken takımlar ve parçalar için genellikle sıvı nitrürleme kullanılır [6].

Çeliğin tuz banyosunda nitrürlenmesi, orijinal gaz nitrürleme yöntemi kadar eskidir. Bu yöntemde kullanılan gaz karışımı genellikle % 60-70 NaCN ve % 30-40 KCN içermektedir. İlave olarak karbonatlar (Na_2CO_3) ve siyanatlar (NaCNO) mevcuttur. Banyo kompozisyonu bunlarla sınırlı değildir. Farklı kompozisyonlarda tuzlar da kullanılabilir [5].

Katkı maddeleri kullanılarak yapılan tuz nitrürleme çeşitli avantajlar sağlar. Bunları şöyle sıralayabiliriz: oldukça yüksek akıcılık ve düşük tuz tüketimi, aktif çözelti kullanımı ve yeniden canlandırıcı tuz kompozisyonları ile çok yüksek nitrürleme potansiyeli, azot difüzyonun kinetiğinde artış, homojen ϵ (Fe_{2-3}N) tabakasının oluşmasına yardım ederek aşınmaya karşı direnci artırır.

Ayrıca, tuz nitrürleme tesisinin hazırlanması, uygulanması kolay ve ucuzdur, kirliliğe neden olmaz. Sıvı nitrürlemede gaz nitrürlemede görülen aşırı temperleme tehlikesi yoktur. Sıvı nitrürleme yapılan malzemelere örnek olarak; krank ve kam milleri, aks mafsalları, vites kutuları, su ve yağ pompaları için dişli çarklar, direksiyon takımları, silindir yuvaları, silindir başları, hidrolik direksiyon parçaları gösterilebilir [2].

4.2.2 Gaz Nitrürleme

Gaz nitrürleme ya NH_3 içeren bir gaz atmosferinde ya da NH_3 ve endotermik üretilmiş CO , N_2 , ve H_2 den oluşan bir gaz karışımı içerisinde yapılır. Gaz nitrürlemede amonyak gazı 500-600 °C sıcaklıkları arasında hidrojen ve azota ayrışır, açığa çıkan azotun çelik yüzeyine yayınmasıyla nitrürleme gerçekleşir [6]. Gaz nitrürleme süresi 50 -100 saat arasında değişebilir. Bakır kaplama veya özel dayanıklı malzemeler kullanarak nitrürleme yapılmak istenmeyen bölgeler maskelenebilir [10].

Gaz nitrürleme işlemi, nem içermeyen susuz amonyak gazı kullanılarak tek veya çift kademede gerçekleştirilmektedir. Tek kademeli işlemde 495-525 °C işlem sıcaklığı kullanılmakta ve % 15-30 oranlarında amonyak gazının ayrışma oranı elde edilmektedir. Çift kademeli işlemin ilk kademesinde, ilk önce tek kademeli işlemde yapılanın aynısı tekrar edilir. Çift kademeli işlemin ikinci kademesinde ise, ilk kademedeki nitrürleme sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda (550-565 °C) nitrürleme işlemi gerçekleştirilmektedir. Aynı zamanda, gazın ayrışma oranı da % 65-80 seviyesine artmaktadır. Çift kademeli işlemin amacı, beyaz nitrür tabakasının kalınlığını azaltmaktır [2].

Bu yöntemde, martenzitten çok daha sert olan ve kaygan sürtünmeler sonucu aşınmayan bir tabaka meydana gelmesi, su vermeye gerek olmadığı için içyapı dönüşümlerinde gerçekleşmemesi gaz nitrürlemenin avantajları arasındadır. Bu yöntemin dezavantajlarına örnek olarak; işlemin çok uzun zaman gerektirmesi dolayısıyla maliyetin artması, yüzey üzerinde meydana gelen gevrek beyaz tabakanın pul pul dökülebilir olması verilebilir [5].

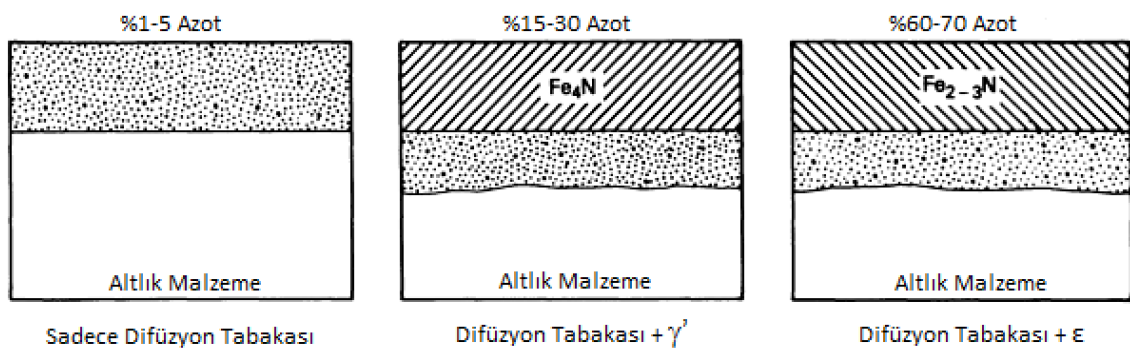
4.2.3 Plazma Nitrürleme

Çeliklerin yüzeylerine azot verilerek uygulanan nitrürleme işleminde uygulama süresinin çok uzun olması nedeniyle, bu sürenin kısaltılması, araştırmacıları sürekli olarak meşgul etmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, 1960' lı yıllardan itibaren endüstriyel anlamda kullanım alanı bulan plazma nitrürleme ya da diğer ismiyle iyon nitrürleme yöntemi geliştirilmiştir.

Plazma nitrüleme yönteminde azot difüzyonu, metal yüzeyinde ve yüzeye çok yakın bölgede termokimyasal reaksiyonlarla gerçekleştirilir. Azot difüzyonuyla teşekkül eden nitrürler ve malzemenin özelliklerine etkisi, alışılmış diğer nitrüleme yöntemlerinde olduğu gibidir. Termo-kimyasal reaksiyonların oluşması için gerekli azot, azot gazının ya da azot içeren bir gaz veya gaz karışımının yüksek gerilimli doğru akım ile iyonlara ayrıştırılması ile elde edilmektedir. Bu yöntemde gaz olarak genellikle azot ya da amonyak kullanılmaktadır. Nitrür partiküllerinin oluşması için gerekli olan aktifleşme enerjisi ise, fırın cidarı ile parça arasında oluşturulan yüksek gerilim ile azot verilecek parçaya doğru ivmelendirilen iyonların parça yüzeyini bombardımanı sonucunda açığa çıkmaktadır [46].

Plazma Nitrüleme, ısıtılı boşalma (glow discharge) teknolojisi kullanılarak azotun malzeme yüzeyine yayınımlı yöntemidir. Plazma ise toplamda nötr olan ve rastgele yönlerde serbestçe hareket eden yüklü parçacıkların toplamıdır. Vakum altında yüksek voltajlı elektrik enerjisi ile plazma oluşturulur. Azot iyonları plazma içinde hızlanarak parça yüzeyine çarpar. Bu iyon bombardımanı yüzeyi ısıtır, temizler ve aktif azot sağlar. Plazma nitrülemeye azot gazı kullanıldığından nitrüleme potansiyeli azot miktarının miktarı ile hassas bir şekilde kontrol edilebilir.

Bu kontrol, Şekil 4.6' de gösterildiği gibi, monofaz tabaka ϵ veya γ' fazlarının birlikte oluşturulmasına ya da bileşen tabakasının hiç oluşturulmamasına olanak verir [26].



Şekil 4.6 Nitrülemeye uğramış çeliklerde azot oranının etkisi [39]

4.2.3.1 Plazmanın Tanımı ve Elemanları

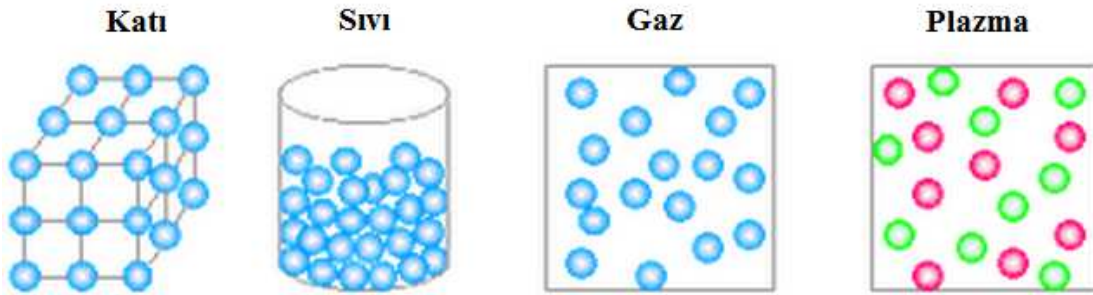
Maddenin kendine has özellikleri olan; katı, sıvı, gaz ve plazma hali olmak üzere dört hali vardır. Bu haller arasındaki esas fark sahip oldukları enerjidir. Yani maddenin herhangi bir konumundaki (hal olarak) enerjisini değiştirmek suretiyle maddeyi diğer bir konuma geçirmek mümkündür. Örneğin katı haldeki bir maddeye belirli bir enerji vermek suretiyle sıvı, sıvı hale de belirli bir enerji vererek gaz ve gaz hale de belirli bir enerji vererek plazma haline geçmek mümkündür. Bu işlemin tersi yapılarak, yani verilen bu enerjileri geri alarak tekrar plazma halinden gaz, sıvı ve katı hale geçmek mümkündür [2].

Katı + E_1 = Sıvı (Ergitme)

Sıvı + E_2 = Gaz (Buharlaştırma)

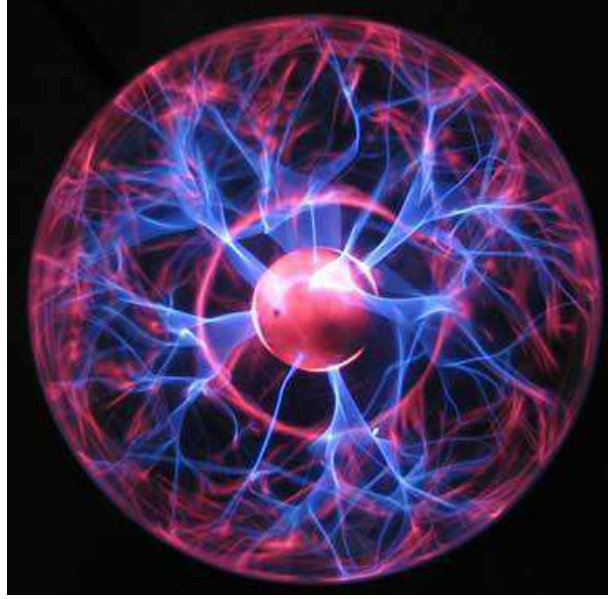
Gaz + E_3 = Plazma (İyonize etme)

Yukarıdaki işlemlerden de anlaşılacağı üzere bu hallerden en küçük enerji konumunda olan katı ve en büyük enerji konumunda olanı da plazma halidir. Plazma yakın bir geçmişe sahiptir. Plazmanın kendine has özelliklerinin oluşu onun maddenin “dördüncü hali” adını almasına neden olmuştur. Maddenin halleri arasında ki geçişler Şekil 4.7’ de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.7 Şematik olarak maddenin geçiş halleri [5]

Plazma, içerisinde iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom veya molekül içeren bir karışımdır. Plazma floresan lambası tüpleriyle de üretilmektedir. Uzayda ise formasyonunu tamamlayabileceği bir ortam mevcuttur, bu yüzden tüm evren plazma fazında olabilir. Örneğin Güneş tamamen plazmadan meydana gelmiştir. Sürekli tüm gezegenlerin etrafını saran dalgalar yayar. Yıldızların içindeki madde, yıldırım ve elektrik boşalmaları da plazma fazındadır. Şekil 4.8’ de plazma örneği verilmiştir [5].

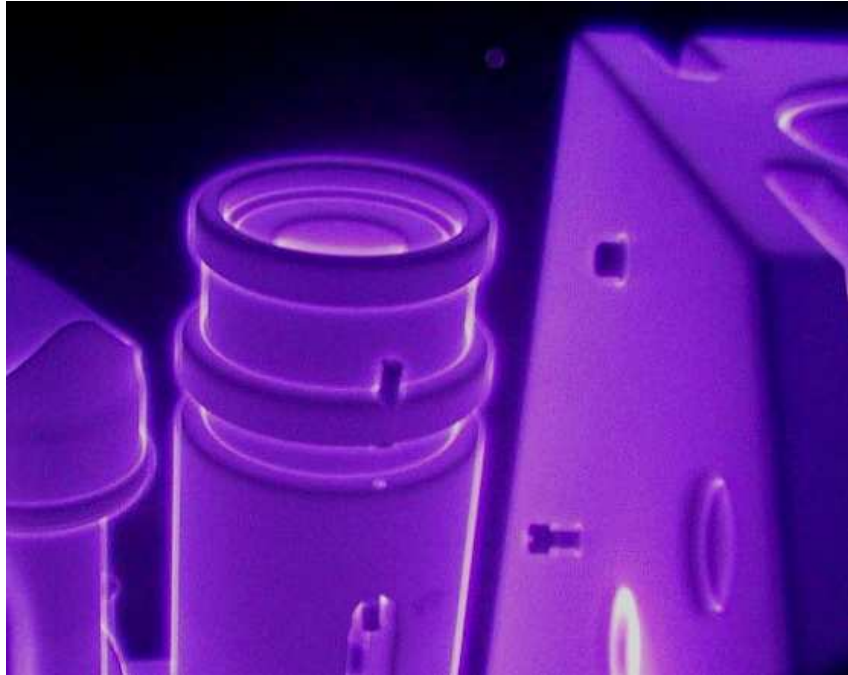


Şekil 4.8 Plazma hali [5]

Malzemeler üzerine yapılan plazma işlemleri, dünyadaki en büyük üretim sanayilerinin bir kaçında çok büyük öneme sahip bir teknolojidir. Bu endüstriler arasında en önde geleni elektronik sanayisidir. Plazma esaslı işlemler, çok büyük ölçekli entegre mikroelektronik devreler (ya da çiplerde) için vazgeçilmez bir yöntemdir. Plazma işlemi Şekil 4.9’ da gösterildiği gibi, biyoloji ve biyomedikalde, kağıt endüstrisinde, uzay sanayisinde, materyal aşındırma veya sertleştirme teknolojisinde, tekstil endüstrisinde, elmas film ve süper iletken film büyütmede, yarıiletken teknolojisinde, elektronik çip yapımında, iletişim teknolojisinde, kaplama ve dekorasyon teknolojisinde, sterilizasyon ve su arıtma sistemlerinde, tehlikeli ve zararlı atık arıtmada, güneş enerjisi ve optik sanayisinde, otomobil ve uçak endüstrisinde, savunma sanayinde, kristal büyütmede, radar ve füzyon araştırmalarında kullanılmaktadır [5]. Şekil 4.10’ da yüzey sertleştirme amacıyla yapılan plazma nitrürleme sırasında çekilmiş kalıbın görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.9 Plazmanın kullanım alanları [5]

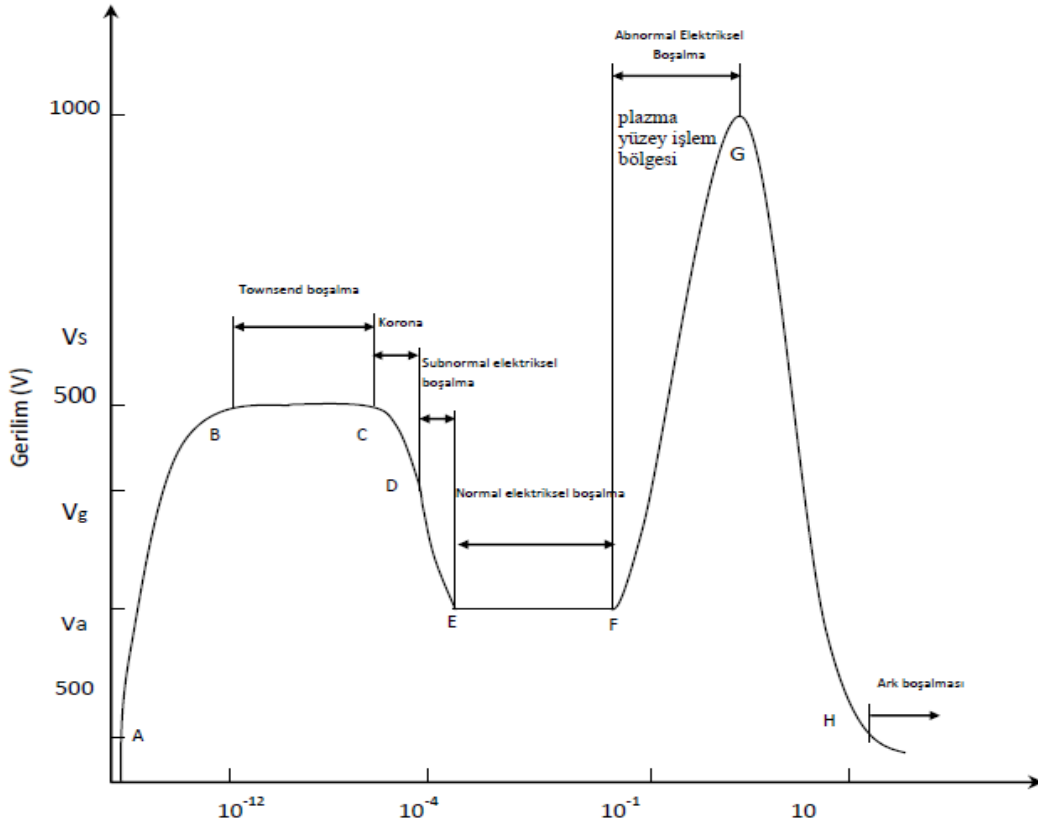


Şekil 4.10 Plazma nitrüleme işlemi sırasında çekilen kalıp görüntüsü [49]

4.2.3.2 Elektrik Boşalması Mekanizması

Bir elektrik gerilim kaynağı gaz içinde bulunan iki iletken plaka arasına bağlanırsa, belirli şartlar gerçekleştirdiği takdirde, tatbik edilen gerilim plakalar arasındaki gazın delinme geriliminin üzerinde ise, bu iki plaka arasında bir elektrik boşalması olur ve bu iki iletken plaka arasında elektrik akımı akar.

Burada akan akımın büyüklüğüne göre ortaya çıkan elektrik boşalması sistemleri sınıflandırılmıştır. Eğer bu akımın şiddeti 10 amperden büyük ise elde edilen sistem elektrik arkı adını alır. Şekil 4.11’ de tüm gaz boşalma bölgeleri ve elektrik arkı boşalma karakteristikleri görülmektedir [4].



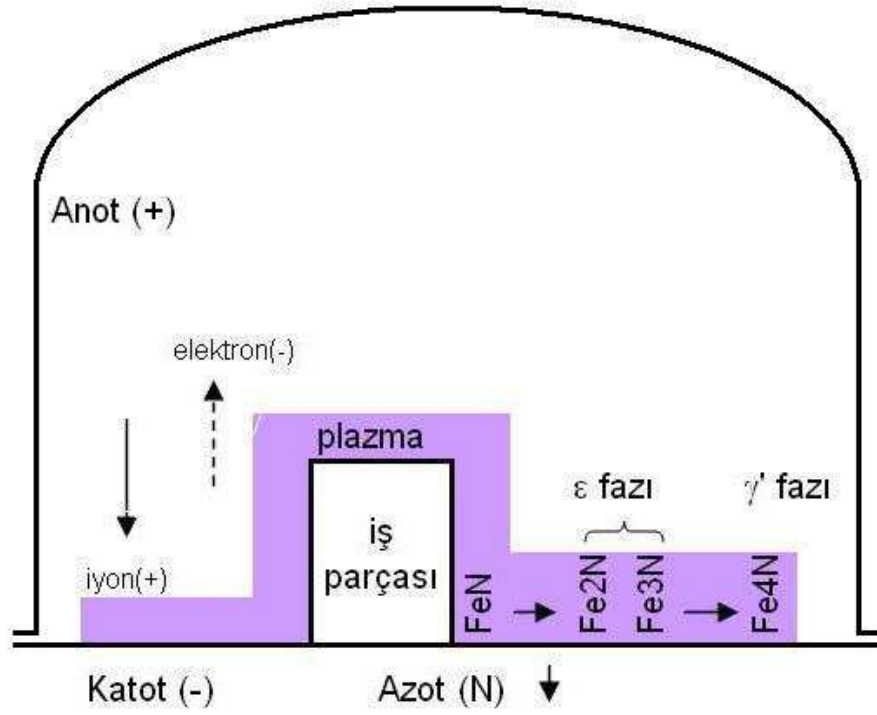
Şekil 4.11 Elektrik arkı boşalmasının şematik akım – gerilim ilişkisi [7]

Normal halde gazlar yalıtkandır. Ancak gaz iyonize edilirse (plazma) iletken olur. Elektrik arkında da iki kutup arasındaki gaz iyonize olduktan sonra akım akar ve ark ortaya çıkar. Bir atomun iyonize olması demek; çekirdeğinin etrafındaki elektronlardan en az birini kaybedip pozitif yüklü hale gelmesi demektir. Bunun için atoma o atomun iyonizasyon enerjisinden daha büyük bir enerji vermek gerekir [4].

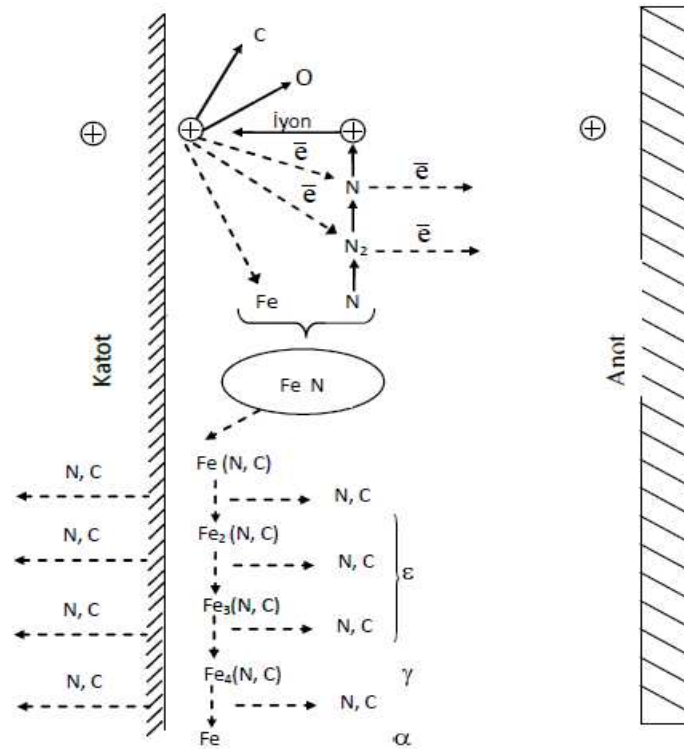
4.2.3.3 Plazma Nitrürleme İşlemi

Plazma nitrürleme sistemi; vakum fırını, gaz dağıtım sistemi ve elektrik güç kaynağı olmak üzere üç ana donanımdan meydana gelmektedir. Güç kaynağının kapasitesi, nitrürleme yapılacak yüzey alanına bağlıdır. 400-800 V arasında doğru akım alınabilen transformatörlerde akım yoğunluğu 1 mA/cm^2 seviyesindedir. Gaz jeneratöründe üretilen gazda N_2/H_2 oranı değişkenlik gösterilebilmektedir. Vakum pompası 1-10 torr basınç aralığında çalışabilmektedir. Nitrürleme işlemi sırasında yüzeyin sıcaklığı ölçülmektedir. Nitrürleme yapılacak parçanın yüzeyi yağ ve kirlerden temizlendikten sonra, vakum fırınına katot (negatif) olacak şekilde yerleştirilir. Fırın duvarları anot (pozitif) görevi yapar. Fırın bir rotasyon pompası ile vakuma alınır. Şekil 4.12' de plazma nitrürleme işleminin fırın içerisindeki şematik gösterimi verilmiştir. Fırın duvarları ile iş parçası arasında 100-1500 V arasında bir doğru akım uygulandıktan sonra, fırın içerisine azot ya da amonyak gazı, fırın basıncı 1-10 mbar düzeyine gelene kadar yavaş yavaş verilir. Başlangıçta 1000 V değerine kadar yükselen gerilim farkı, artan gaz miktarı ile azalarak 600-700 V civarında istenilen basınç ve sıcaklık sağlandığında sabit duruma gelir. Bu sırada, iyonlaşmış gazın akkor ışını, katodik pozisyonunda olan iş parçasını tamamen sarmış ve pırıltılı boşalım adı verilen ayrılmış gaza ait iyonların parça yüzeyine bombardımanı başlamıştır (Şekil 4.13). Bu iyon bombardımanı ile iş parçasında mükemmel bir yüzey temizliği sağlanır. Nitrürleme için gerekli azot difüzyonu ise, difüzyon için gerekli sıcaklığa ulaşıldığında başlar. Şekil 4.13' de plazma nitrürleme işleminin demir esaslı malzemeler için mekanizması gösterilmektedir [15].

Plazma nitrürleme uygulanan yüzeylerde elde edilen sertlik profili, diğer nitrürleme yöntemlerine benzer. Ancak gerek yüzeyde gerekse yüzeye yakın bölgelerde, işlem daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği için daha yüksek yüzey sertlikleri elde edilebilir. Benzer nedenden dolayı, ölçü değişimi ve deformasyon en az plazma nitrürleme yönteminde meydana gelir [46].



Şekil 4.12 Plazma nitrüleme işleminin fırın içersindeki şematik gösterimi [9]



Şekil 4.13 Plazma nitrüleme işleminin demir esaslı malzemeler için mekanizması [15]

4.2.3.4 Plazmanın Özellikleri

- Plazma dış ortama karşı elektrik olarak nötrdür. Yani plazma içerisindeki pozitif yüklerin (iyonların yükleri) sayısı, negatif yüklerin (elektronlar) sayısına eşittir.
- Plazma içerisinde disosyasyon, iyonizasyon ve bu olayların tersi olan rekombinasyon olayları sürekli meydana gelir. Adı geçen bu olaylar kendi aralarında plazma içerisinde bir dinamik denge halinde bulunurlar.
- Plazma iyi bir elektrik ve ısı iletkenidir. Plazma içerisindeki parçacıklar bir enerji taşıyıcısıdır. Dolayısıyla elektrik ve ısı enerjisini de iletirler (taşırlar). Plazma içerisindeki hızlarının yüksek oluşu nedeniyle özellikle elektronlar elektrik ve ısı iletiminde esas rolü oynarlar.
- Plazma yüksek sıcaklık ve enerji yoğunluğuna sahiptir. Plazmanın sıcaklığı, enerji yoğunluğu, iyonizasyon derecesi (iyonize olmuş atom sayısının toplam atom sayısına oranı) ve plazma çıkış hızı (elektron hızı) plazma ekseninde maksimum olup, radyal yönde dışa doğru bu değerler azalır.
- Plazmaya elektrik ve manyetik alanla tesir edilebilir. Plazmayı magnetik ve termik olarak sıkıştırmak, dolayısıyla enerji yoğunluğunu ve sıcaklığını sınırsız bir şekilde yükseltmek mümkündür.

4.2.3.5 Plazma Çeşitleri

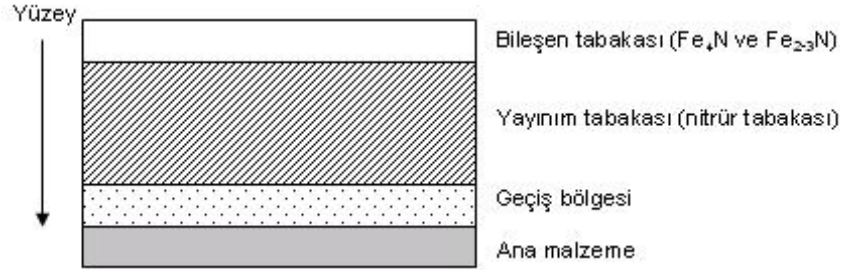
Plazmayı amacı yönünden en iyi sınıflandırma, plazma içinde hüküm süren basınca göre sınıflandırmadır. Buna göre plazma üç gruba ayrılır:

- a) Düşük basınç plazmaları ($P < 1,3 \times 10^2$ Pa)
- b) Orta basınç plazmaları ($1,3 \times 10^2$ Pa $< P < 1,33 \times 10^4$ Pa)
- c) Yüksek basınç plazmaları ($P > 1,33 \times 10^4$ Pa)

Plazma içerisindeki yüksek basınç, yüksek elektrik alanı ve yüksek yüklü parçacık yoğunluğuna neden olur. Yüklü parçacık yoğunluğu, atomlarla elektronların elastik olmayan çarpışması neticesi ortaya çıkan iyonizasyon ihtimaline bağlıdır. Plazmadaki yüksek basınç, yüksek parçacık yoğunluğuna neden olur [2].

4.2.3.6 Plazma Nitrürleme Sonucu Yapı

Nitrürlenmiş yüzey bölgesi dış tarafta Fe_4N ve/veya Fe_{2-3}N fazlarından oluşan sıkı ve çok ince bir bileşen tabakası, bu bölgenin altında ise azot atomlarının kısmen eridiği daha kalın yayılım tabakası şeklinde iki katmandan oluşur (Şekil 4.14).

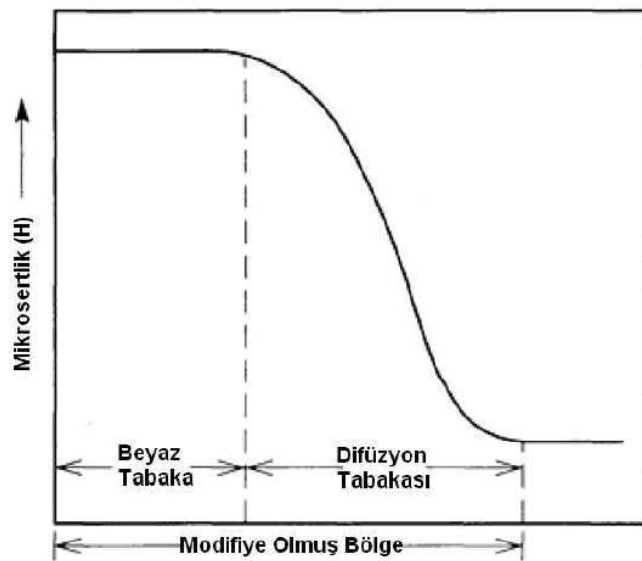


Şekil 4.14 Plazma nitrürleme sonrası oluşan içyapılar [10].

Sıcaklık, zaman ve gaz karışım oranı gibi parametrelerin değişimine bağlı olarak plazma nitrürleme sonrasında bir difüzyon tabakası oluşur. Beyaz tabaka adı verilen diğer bir tabaka ise her zaman olmamakla birlikte oluşabilir [10].

Yüksek krom içerikli, yüksek alaşımlı ve paslanmaz çeliklerin yüzeylerinde çoğu kez pasif bir oksit tabakası teşekkül eder. Bu ise etkili nitrürlemeyi önlediği gibi rastgele bir derinlik elde edilmesine sebep olur. Bunun üstesinden gelebilmek için fosfat ya da halojen gibi asidik olmayan aşındırıcılar bu oksit tabakasını gidermede kullanılır. Ayrıca, çok uzun işlem zamanlarında uygulanan klasik nitrürleme tekniğinde parça yüzeylerinde "Bileşik Tabaka (BT)" veya "Beyaz Tabaka" adı verilen, kırılgan ve gevrek tabaka teşekkül eder. Bu tabaka γ' - Fe_4N ve ϵ - Fe_{2-3}N karışık fazlarından oluşan bir yapıdadır. Kolay ufalanabilen ve kırılgan bu çok fazlı BT, iki kafes yapısı arasındaki geçiş bölgesinde yüksek gerilmelerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu tabaka kalınlığı, zaman ve sıcaklığa bağlı olarak çok artabilmektedir. Ancak bu BT' lı parçalar, kullanılmadan önce kimyasal, mekanik veya buna benzer yöntemlerle yüzeyden kaldırılır. Kullanım esnasında bunlar mekanik veya termal şok şartları altında kolay ufalanıp dökülmekte dolayısıyla parçanın erken hasara uğramasına sebep olmaktadır.

Difüzyon tabakası diye adlandırılan tabaka beyaz tabaka altındaki bölgede çok ufak ve sık dağılmış sert nitrür fazları ihtiva eder. Geleneksel nitrürleme yöntemlerinde azot atomları daha yüksek enerjili bölgeler olan tane sınırlarında yayınırlar ve buralarda karbür fazları bulunması halinde bu fazlar ile birleşerek çok gevrek olan karbonitrürleri oluştururlar. Bunun neticesinde difüzyon tabakasının gerilmelere olan hassasiyeti büyük ölçüde artmış olur. Diğer taraftan plazma nitrürlemede, karbonsuz nitrürleme gazı kullanılarak ve karbon saçılması uygulayarak yüzey ve yüzeye yakın yerlerde karbon azalması sağlamak mümkündür. Bunun sonunda gevrek karbonitrür fazları iç kısımlara doğru itilerek yüzeyin aşınmaya ve yorulmaya dayanımı artar. Difüzyon tabakası oluşumu da zamanın ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Sıcaklık ve zamanın artışına bağlı olarak tabaka kalınlığı artmaktadır. Bu bölge yüzeyden çekirdek malzemeye bir geçiş sağlar. Nitrürlemeyle ulaşılabilecek sertlik değeri alaşım elementlerinin cinsi ve miktarına bağlı olmak üzere martenzitik yapıdaki sertlikten daha yüksek olabilmektedir [8]. Şekil 4.15’ de modifiye olmuş bölge ile mikrosertlik arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 4.15 Modifiye olmuş bölge ile mikrosertlik arasındaki ilişki [39]

4.2.3.7 Plazma Nitrürlemenin Avantajları ve Dezavantajları

Plazma nitrürleme yönteminin, diğer nitrürleme yöntemlerine göre sağladığı üstünlükler şöyle sıralanabilir:

- Nitrürleme yapılmak istenilmeyen yüzeylerin mekanik olarak izolasyonu mümkündür.
- Gaz veya diğer atıklarla çevreyi kirletmez, insan sağlığı açısından zararlı değildir.
- Otomasyona uyumludur. Sistem değişkenlerin kontrol altında tutulması kolaydır.
- İş parçası üzerindeki tüm girinti, çıkıntı ve delikler üzerinde homojen bir azot difüzyonu sağlanabilir.
- Reaksiyonun gerçekleştiği fırında hareketli parçalar söz konusu olmadığından fırın bakım masrafları daha düşüktür.
- Nitrürlenecek parçanın büyüklüğü ve ağırlığı önemli değildir.

Plazma nitrürleme yönteminin avantajları olmasına rağmen birtakım dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajlar şöyle sıralanabilir:

- İlk yatırım maliyetleri yüksektir. Bu nedenle sadece seri üretimde ekonomiktir.
- Nitrürlenecek parçanın hacmine, dolayısıyla reaksiyon fırınının hacmine bağlı olarak 40 kW ila 1000 kW arasında enerji gereksinimine ihtiyaç vardır. Yani işletim masrafları fazladır.
- Aynı şarjda; sadece aynı boyut ve kesitteki parçalara nitrürleme uygulanabilir.

NİTROKARBÜRLEME

Nitrokarbürleme işlemi, mühendislik çeliklerinin yorulma mukavemetini, aşınma ve korozyon direncini iyileştirmek için kullanılan bir termokimyasal işlemdir. İşlem malzeme yüzeyine azot ve karbon atomlarının eş zamanlı difüzyonunu içerir. Nitrokarbürleme işlemi sonrası malzeme yüzeyinde, 10-20 µm kalınlıkta $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}(\text{N}, \text{C})$ ve $\text{-Fe}_4(\text{N}, \text{C})$ karbonitrürler içeren beyaz tabaka ve altında da difüzyon tabakası oluşur. Yüzey yapılarına ait bu fazlar erimiş tuz banyosu ve gaz teknikleriyle geleneksel olarak elde edilebilmektedir. Eskiden beri zehirli tuzların kullanımından dolayı ciddi çevresel problemler ürettiği bilinmektedir. Uzun zamandır geniş bir şekilde kullanılan gaz teknikleri, çevreye daha az zararlı olmasına rağmen egzoz gazı ve dumanından önemli miktarda üretmekte ve işlem için tutuşabilir bir atmosfer kullanıldığından eğer güvenlik önlemleri takip edilmezse patlama riski taşımaktadır [7].

Nitrokarbürlemenin çelik üzerindeki etkileri, sıvı nitrürlemeye benzer. Ancak sıvı nitrürlemenin siyanürlü atıklar vermesi sorunu yüzünden, nitrokarbürleme işlemi tercih edilir olmuştur. Kaplama karakteristiklerinde nitrokarbürleme, karbürleme ve nitrürlemeye göre farklar gösterir. Normalde karbürlemeyle, kaplanmış yüzey azot içermez, nitrürlemede ise yüzey esasta azot içerir, nitrokarbürleme ise her ikisini de içermektedir.

Nitrokarbürlenmiş bir kaplama, karbürlenmiş kaplamaya göre daha iyi sertleşebilirliğe sahiptir. (Azot çeliğin sertleştirilebilirliğini yükseltir; aynı zamanda bir östenit dengeleyicisidir ve yüksek azot seviyesi, alaşım çeliklerinde artık östenite yol açabilir).

Sonuç olarak, nitrokarbürleme ve tavlama ile sertleştirilmiş bir kaplama daha az masrafla üretilir. Tam sertlik, daha az deformasyonla beraber, yağ tavlama ile ya da örneğin gaz tavlama ile, tavlama ortamında koruyucu bir atmosfer sağlanarak artırılabilir [38].

Nitrokarbürleme işlemleri ilk olarak 1950' li yıllarda uygulanmaya başlandı. O günden bu yana, oldukça geniş bir yelpazedeki makina parçalarında uygulanmaktadır. Ferritik nitrokarbürleme işlemleri, alaşımlı çeliklere, paslanmaz çeliklere, demir esaslı malzemelere başarıyla uygulanmaktadır. Ancak, abrasiv aşınma ve yorulma özelliklerinde işlem görmemiş malzemeye göre en önemli iyileşme düşük karbonlu çeliklerde görülmüştür. 1960' ların sonuna kadar, mevcut nitrokarbürleme işlemlerinde gerekli iyileştirmeleri sağlayabilmek için ortam olarak erimiş siyanür bazlı tuzlar kullanılıyordu. Ancak o zamandan beri siyanür bazlı tuzlarla yapılan ısı işlemlerin çevreye olan etkisi üzerinde durulmaya başlanmıştır. Bunun sonucu olarak, siyanür bazlı ısı işlemlere teknik ve ekonomik açıdan alternatif olabilecek siyanür içermeyen nitrokarbürleme işlemlerinin geliştirilmesine çalışılmıştır.

5.1 Kaplama Bileşimi

Nitrokarbürlenmiş kaplamanın içeriği; çeliğin tipine, işlemdeki sıcaklık değişimlerine, süreye ve atmosfer bileşenlerine bağlıdır. Çeliğin tipi, verilen bir nitrokarbürleme işlemi boyunca, kaplama derinliği, yüksek miktarlarda kuvvetli nitrür oluşturuca alüminyum ve titan içeren çeliklerle daha az olacaktır. Nitrokarbürleme işlemi için gerekli amonyak sistemi, genel bir dağıtım borusuna bağlı olan sıvı amonyak silindirleri grubundan ibarettir. Genelde, amonyağın sadece bir kısmı kaynak olarak kullanılır, kalan yedekte tutulur. Her silindirden akış, yetecek kadar az olmalıdır, böylece donma olayının önlenmesi hedeflenmektedir.

İşlemdeki değişiklikler için ise, daha yüksek nitrokarbürleme sıcaklığı, atmosfere azot kaynağı olarak amonyak eklenmesinde etkilidir, çünkü amonyağın kendiliğinden moleküler azot ve hidrojene ayrışma oranı sıcaklığın yükselmesiyle artar. Verilen bir sıcaklıkta, eklenen amonyağın kendiliğinden parçalanma oranı, fırının içindeki atmosferin kalış süresine bağlıdır.

Atmosfer gazının daha yüksek toplam akışı, daha az amonyak ayrışması oranını getirir. Bir karbürleme atmosferine amonyak ilavesi, takip eden reaksiyonla seyreltme etkisine sahip olur [7].

Azotun difüzyon oranı ve bileşimi oluşturan yapıların oranı, 705 °C 'nin altında çok yavaştır, bunun için sığ kaplamalarda sadece ekonomik olarak uygulanabilir, eğer daha yüksek sıcaklıklar uygulanırsa, bu sıcaklığın uygulandığı kısımların bakımı zor olacaktır. Sıcaklıklar, östenitik seviyelerin altına düşerse bu işlem, ferritik nitrokarbürleme olarak adlandırılır. Ferritik nitrokarbürleme ve bununla beraber östenitik nitrokarbürleme işlemlerinden plazma nitrokarbürlemede kısaca bahsedilmiştir.

5.2 Nitrokarbürleme Çeşitleri

Nitrokarbürleme, katı, sıvı, gaz ve plazma şartlarında gerçekleştirilir. Günümüzde bu işlem sıvı ve gaz atmosferinde çok sık olarak yapılmaktadır. Burada amaç istenen şartlara uygun tek fazlı-nitrür tabakasının oluşturulmasıdır. Ancak bu işlem yapılırken istenen şartların oluşmasında birçok zorluklar ortaya çıkmaktadır. Çünkü işlem esnasında yüzeyden saçılan karbon, nitrürleme için seçilen gaz karışımına katılabilir. Eğer çok fazla miktarda karbon bu gaz karışımına katılırsa beyaz tabakanın içerisinde sementit oluşabilir. Bu durum ise bu tabakanın işlevini tam olarak görmesini engelleyebilir. Sementitin oluşması azot ve karbon atomlarının difüzyonunu geciktirir.

5.2.1 Sıvı Nitrokarbürleme

Tuz banyosu olarak da adlandırılan sıvı nitrokarbürleme eski tekniklerden biridir. Sıvı nitrokarbürleme oldukça küçük parçalar ve yüzeyde ince tabaka oluşturmak için kullanılır. Tabaka sertleştirme ortamı, sıvı azot ve siyanür içeren eriyik tuz banyosudur. Patentli tuz banyoları, % 60-61 NaCN, % 15-15.5 K₂CO₃ ve % 23-24 KCl, ilave olarak çok az miktarda karbonat (Na₂CO₃) (yaklaşık % 2.5) ve % 0.5 siyanat (NaNCO) içerir. Bazı tescilli banyolarda sülfidler (Na₂S) banyoya ilave edilir. Çünkü kükürt ve bazı sülfidler iyi yağlayıcılık özelliğine sahiptirler. Tuz banyosuna ilave edilen kükürt hem aşınma mukavemetini artırır, hem de azot hareketini hızlandırır. Sıvı nitrokarbürlemenin tercih edildiği uygulama alanlarından bazıları; pompalar, pistonlar, vanalar, dişliler, civatalar, somunlar, silindir başları vs. olarak sıralanabilir [7].

5.2.2 Plazma Nitrokarbürleme

Plazma nitrokarbürleme, işlem sıcaklığına göre ferritik ve östenitik plazma nitrokarbürleme olarak ikiye ayrılmaktadır. Fe-N faz diyagramında (Şekil 4.1) östenitik dönüşüm sıcaklığı olan 592 °C' nin altında yapılan nitrokarbürleme işlemlerine ferritik, bu sıcaklığın üzerinde yapılan nitrokarbürlemeye ise östenitik nitrokarbürleme adı verilir. Genel olarak ötektik sıcaklığın altında 450-590 °C sıcaklıkları arasında N₂, H₂ gazları ile CH₄, CO₂ ve CO gibi karbon içeren gazların karışımında gerçekleştirilmektedir. Ferritik nitrokarbürleme işlemi daha çok yorulma ve korozyon özelliklerini iyileştirmek için tercih edilir. Deneyler, baskın ϵ yapılı kalın bir beyaz tabaka üretmek için yüksek azot konsantrasyonu içeren ortamların gerekli olduğunu göstermektedir. Atmosfere küçük miktarlarda CH₄ (% 1-2) ilavesi, karbon içeren sünek ϵ fazının üretimi için yeterli karbon aktivitesini sağlayabilir. Bununla birlikte, CH₄ aşırı miktarda atmosfere ilave edildiğinde mekanik özelliklere zararlı olan iki fazlı yapıya sahip beyaz tabakada sementit oluşumunu desteklemektedir. Karbon aktivitesinin kontrolü ve sementit oluşumunun engellenmesi için CH₄'den ziyade CO₂ ve CO gibi karbon içeren gazları kullanmak daha elverişlidir. Çünkü oksijenin karbona karşı ilgisi nedeniyle, plazma ortamına, oksijenin (veya oksijen içeren gazların) küçük miktarda girişiyle zararlı fazının oluşumu durdurulabilir.

Östenitik nitrokarbürleme (592-723 °C) sıcaklıkları aralığında olup, bu işlem özellikle sade karbonlu çeliklerin nitrokarbürleme sonrası yeterli miktarda sertleştirilememesi gibi dezavantajlarını gidermek için tercih edilir. Ferritik nitrokarbürlemeden farklı olarak ϵ fazı ve difüzyon tabakası arasında bir östenit tabakası vardır. Yüzey tabakalarının faz bileşeni ve karakteristikleri taban malzemesinin kimyasal bileşimine de bağlıdır. Östenitik plazma nitrokarbürleme aşınma mukavemetinin, ferritik plazma nitrokarbürlemeden daha iyi olduğu bilinmektedir [7,39].

Plazma nitrokarbürlemede işlem mekanizması olarak iyon nitrürlemede ki mekanizmaların kullanılabileceği belirtilmiştir. Bu bağlamda, Nitrokarbürleme olayını açıklayan modellerin biride Edenhofer'ın Modelidir.

Bu modele göre; yüzeye çarpan iyonlar yüzeyde yüksek sıcaklıklar oluşturarak buharlaşmaya yol açarlar. Bunun sonucunda parça yüzeyindeki Fe ve diğer alaşım elemanları atomları, metalik olmayan element atomları (C, O, N) ile elektronlar yüzeyden uzaklaşır (saçılma). Yüzeye çarpan iyonlar iş parçasının içine doğru nüfuz ederken, çok az bir kısmı iş parçasına yayınır. Bu iyonların büyük bir kısmı saçılma olayını sağlar. Saçılan demir atomları ile yüksek enerjili azot atomları, FeN şeklinde birleşip metal yüzeyinde birikirler (yoğunlaşma). FeN sıcak metal yüzeyinde kararsızdır, bundan dolayı kararlı diğer nitrürlere (Fe_2N , Fe_3N ve Fe_4N) dönüşür. Dönüşme esnasında serbest kalan azot atomları ya metale yayınır veya plazmaya döner. Saçılma ve yoğunlaşma işlemleri büyük ölçüde kullanılan gaza bağlıdır. Ayrıca basınç ve gerilim gibi diğer parametrelerin değiştirilmesiyle de etkilenir [7].

Ferritik nitrokarbürleme işlemleri, azot ve karbonun demir esaslı malzemelerin yüzeyine tamamen nüfuz ettikleri (ferrit faz alanı sıcaklıklarında) termokimyasal işlemlerdir. Bu tür işlemlerin temel amacı, yüzeyde iyi tribolojik özelliklere sahip bir bileşik tabaka oluşturarak malzemelerin abrasiv aşınma özelliklerini iyileştirmektir. Buna ek olarak, özellikle azot bileşik tabakanın altındaki yayınma bölgesinde katı çözelti halinde tutulduğunda, malzemenin yorulma karakteristikleri önemli ölçüde iyileştirilebilir [27].

5.2.3 Gaz Nitrokarbürleme

Gaz halinde ferritik nitrokarbürlemede, azot ve karbonun çelik yüzeyinde ince bir demir nitrür tabakası (beyaz tabaka veya bileşik tabakası olarak tanımlanan) ve onun hemen altında atomik azotun oluşturduğu, demir ve alaşım elementleri içeren bir nitrür bölgesi meydana gelir. Gaz halinde nitrokarbürleme işlemi Fe-N sistemlerinin östenit bölgesinin hemen altında 580 °C civarında yapılmaktadır. İşlem genellikle 1 ila 3 saat sürmektedir. Tüm gaz halindeki nitrokarbürleme işlemlerinin arkasındaki temel amaç; karbon ve azotun demir malzemelerin yüzeylerine eşzamanlı olarak eklenmesi ve arzu edilen fazı oluşturmaktır [7,27]. Gaz halinde nitrokarbürleme işleminde, baskın olarak ϵ - $Fe_{2-3}(N, C)$ fazının elde edilmesi amaçlanır [7].

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, saldırgan ortamlara ve aşındırıcı koşullara dayanıksız AISI 1010 ve AISI 1040 çelik yüzeylerine, önce krom kaplama daha sonra plazma nitrürleme ve gaz nitrokarbürleme işlemleri yapılarak yüzey özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Kromun, yüzey özelliklerinde bilinen pozitif etkileri nedeniyle, çelik numuneler önce elektrolitik sert krom kaplanmış ardından plazma nitrürleme ve gaz nitrokarbürleme işlemleri uygulanarak azot ve azot/ karbon yayındırılması sağlanmıştır.

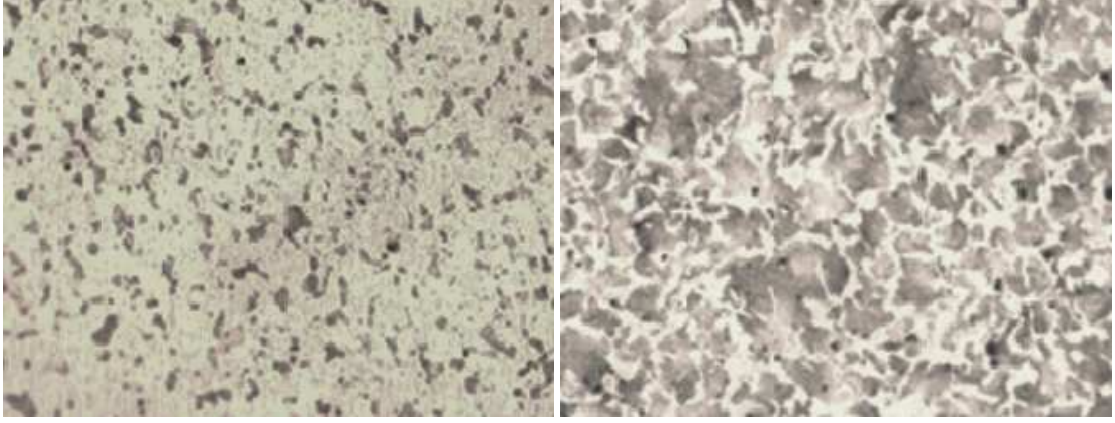
Elektrolitik sert krom kaplama işlemi; Huğlu Krom Kaplama San. Ltd. Şti. firmasında yapılmıştır. Plazma nitrürleme işlemleri Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü' ndeki plazma nitrürleme cihazında 3 farklı sıcaklıkta (600, 700 ve 800 °C), % 60 N₂ + % 40 H₂ atmosfer ortamında, 5 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Gaz nitrokarbürleme işlemi ise ASSAB Çelik ve Isıl İşlem A.Ş. İzmir Şubesi' ndeki gaz nitrokarbürleme cihazında 560 °C sıcaklıkta % 45 CO₂ + % 29 NH₃ + % 26 N₂ gaz karışımında 8 saat süreyle gerçekleştirilmiştir.

6.1 Deneylerde Kullanılan Numuneler

Deneylerde kullanılan 1010 ve 1040 çelikleri piyasadan çubuk şeklinde temin edilmiştir. Yapılan kimyasal analiz ve mikrosertlik değerleri Çizelge 6.1' de, mikroyapıları ise Şekil 6.1' de verilmiştir.

Çizelge 6.1 AISI 1010 ve AISI 1040 çeliğinin kimyasal analiz ve mikrosertlik değerleri.

	AISI 1010 ve AISI 1040 Çeliğinin Kimyasal Analiz Sonuçları (%)						Sertlik Değeri
	Fe	C	Si	Mn	P	S	
AISI 1010	98.28	0.122	0.257	0.877	0.0132	0.0314	172 HV
AISI 1040	97.82	0.427	0.252	1.01	0.0257	0.0205	198 HV



(a)

(b)

Şekil 6.1 AISI 1010 (a) ve AISI 1040 (b) çeliklerinin mikroyapı görüntüsü

Çelik numuneler 30 mm çap ve 8 mm yüksekliğinde kesilip sırasıyla tüm yüzeyleri 60-120 - 180 - 220 - 400 - 600 - 800 - 1000 - 1200 numaralı SiC zımpara kağıtlarıyla zımparalanmıştır. Zımparalanan numuneler sırasıyla alümina ve elmas pastayla parlatıldıktan sonra metalografik olarak hazırlanıp yüzeyleri krom kaplanmıştır.

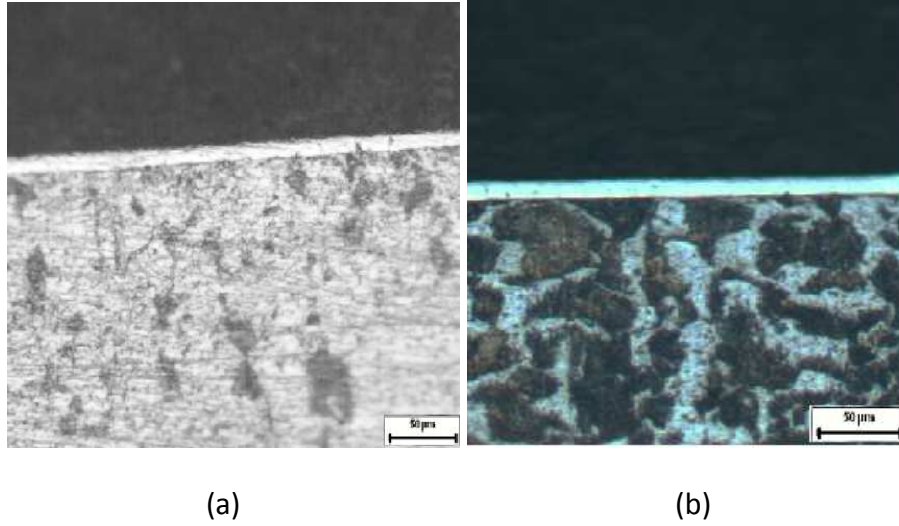
6.1.1 Numunelerin Elektrolitik Sert Krom Kaplanması

Numunelerin elektrolitik sert krom kaplamaları, Huğlu Krom Kaplama San. Ltd. Şti. tarafından gerçekleştirilmiştir. Metalografik olarak hazırlanan numunelerin, yüzeyleri uygun çözücülerle temizlendikten sonra 240 g/l kromoksit içeren çözeltideki banyo içerisine daldırılmıştır (Şekil 6.2). Kaplama 60 °C' de ve 50 A/dm² akım yoğunluğunda 20 dakika süreyle yapılmıştır. Kaplama işleminden sonra yüzeydeki fazlalıklar giderilmiştir.



Şekil 6.2 Sert krom kaplamanın gerçekleştirildiği banyonun görüntüsü

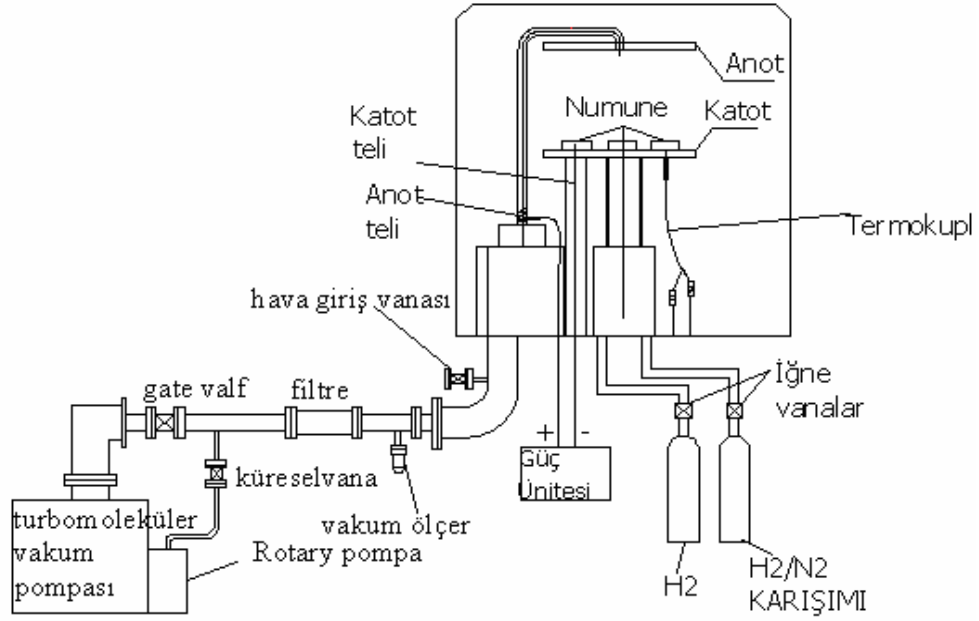
Elektrolitik sert krom kaplama sonucunda çelik yüzeyinde 5-15 μm kalınlığında krom tabakası oluşmuştur. Şekil 6.3’ de krom kaplanmış AISI 1010 ve AISI 1040 numunelerinin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Ayrıca, krom kaplanmış numunelerin mikrosertlikleri alınıp korozyon deneylerine tabi tutulmuştur.



Şekil 6.3 Krom kaplanmış AISI 1010 (a) ve AISI 1040 (b) çelik numunelerinin mikroyapı görüntüleri

6.1.2 Plazma Nitrürleme İşlemi

Elektrolitik sert krom kaplanmış numunelere plazma nitrürleme işlemi Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü’ ndeki plazma nitrürleme cihazında gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.4’ de plazma nitrürleme cihazının şematik görüntüsü verilmiştir. Numuneler alkolle temizlenerek plazma haznesine yerleştirilmiş ve hazne havası 2.5×10^{-2} mbar basınca boşaltılmıştır.



Şekil 6.4 Plazma nitrürleme cihazının şematik görüntüsü [4]

Nitrürleme işlemi başlamadan önce numuneler üzerinde bulunabilecek kirlilikleri gidermek amacıyla 30 dakika H_2 gazı plazmasına tabi tutularak ön bir saçılma yapılmıştır. Numunelerin tablaya yerleştirme şekli Şekil 6.5’ de verilmiştir.



Şekil 6.5 Numunelerin yerleştirildiği tablanın, numunelerle beraber plazma nitrürleme işleminden sonraki görüntüsü

Deney, elektriksel boşalma güç ünitesinin açılmasıyla başlamıştır. Uygulanan gerilim artırılarak sıcaklık istenilen değere getirilmiştir. Sıcaklık ölçümü alttan parçaya temas eden termokupl vasıtasıyla ölçülmüştür.

İstenilen işlem sıcaklığına ulaşınca nitrürleme zamanı başlatılmıştır. Deney sonunda vakum ortamında numuneler oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Plazma nitrürleme 600, 700 ve 800 °C sıcaklıkta 5 mbar basınçtaki % 60 N₂ + % 40 H₂ gaz karışımında ve 5 saat süreyle gerçekleştirilmiştir. Plazma nitrürleme işleminin yapıldığı düzenek Şekil 6.6' da verilmiştir.



Şekil 6.6 Plazma nitrürleme işleminin yapıldığı fırın ve güç kaynağının görüntüsü

6.1.3 Gaz Nitrokarbürleme İşlemi

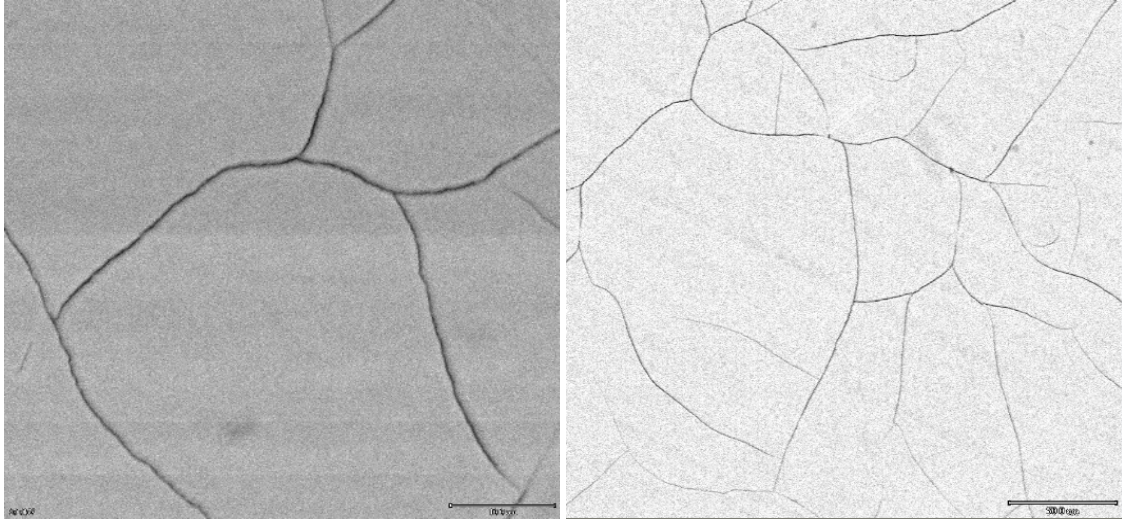
Elektrolitik sert krom kaplanmış numunelere gaz nitrokarbürleme işlemi ASSAB Çelik ve Isıl İşlem A.Ş. İzmir Şubesi' ndeki gaz nitrokarbürleme fırınında gerçekleştirilmiştir. Fırın öncelikle, içerisine NH₃ gazı gönderilerek 400 °C' de 30 dakika kadar ısıtılmıştır. Daha sonra nitrokarbürleme sıcaklığına (560 °C) gelince % 45 CO₂ + % 29 NH₃ + % 26 N₂ gaz karışımı fırın içerisine verilmiştir. Gaz nitrokarbürleme işleminde numuneler, işlem sıcaklığına geldikten itibaren 8 saat süreyle nitrokarbürleme işlemine tabi tutulmuştur. Fırın hacminin 4-5 katı kadar fırın içerisine gaz alınmıştır. Numuneler işlem sonunda fırın içerisinde soğutulmuştur.

6.2 Karakterizasyon Deneyleri

6.2.1 Yüzey Görüntüleri

Yüzeyi krom kaplanmış ve nitrürlenmiş/nitrokarbürlenmiş numunelerin işlem sonrasında optik mikroskopta ve SEM’ de yüzeydeki değişimleri incelenmiştir. Bu incelemeler, kademeli olarak sert krom kaplanmış numunelerin plazma nitrürleme ve gaz karbonitrürleme işlemleri öncesinde ve sonrasında yüzey görüntülerini alarak yapılmıştır. İnceleme öncesinde yüzeyler, sadece alkolle temizlenmiş başka bir işlem uygulanmamıştır.

Elektrolitik sert krom kaplanmış numuneler, yüzeyden incelendiğinde kaplama yüzeyinde çok sayıda mikro çatlaklar belirlenmiştir. Şekil 6.7’ de krom kaplanmış AISI 1010 ve 1040 numunelerinin yüzey görüntüleri verilmiştir.

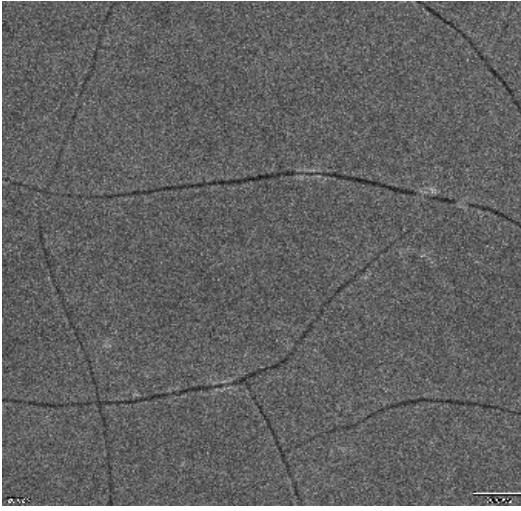


(a)

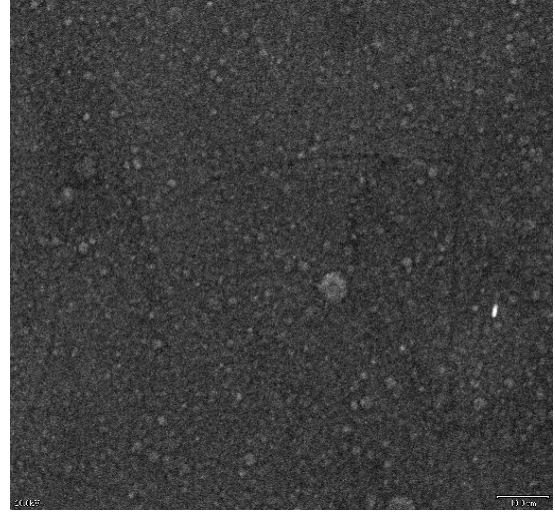
(b)

Şekil 6.7 Krom kaplanmış numunelerin yüzey görüntüleri a) 1010 b) 1040

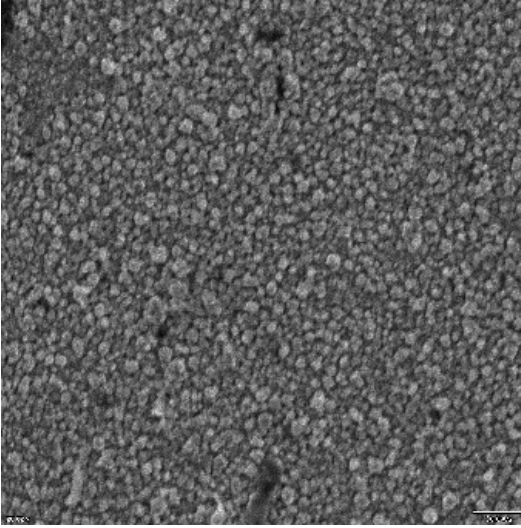
Sert krom kaplanmış ve nitrürlenmiş/nitrokarbürlenmiş AISI 1010 çelik numunelerin yüzey görüntüleri Şekil 6.8’ de, AISI 1040 çelik numunelerinin ise Şekil 6.9’ da verilmiştir.



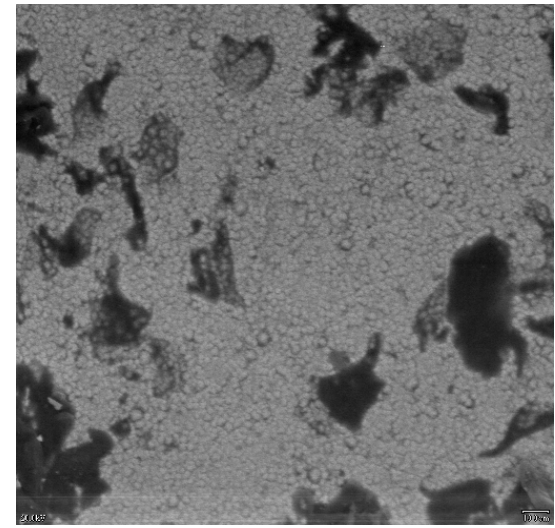
(a)



(b)

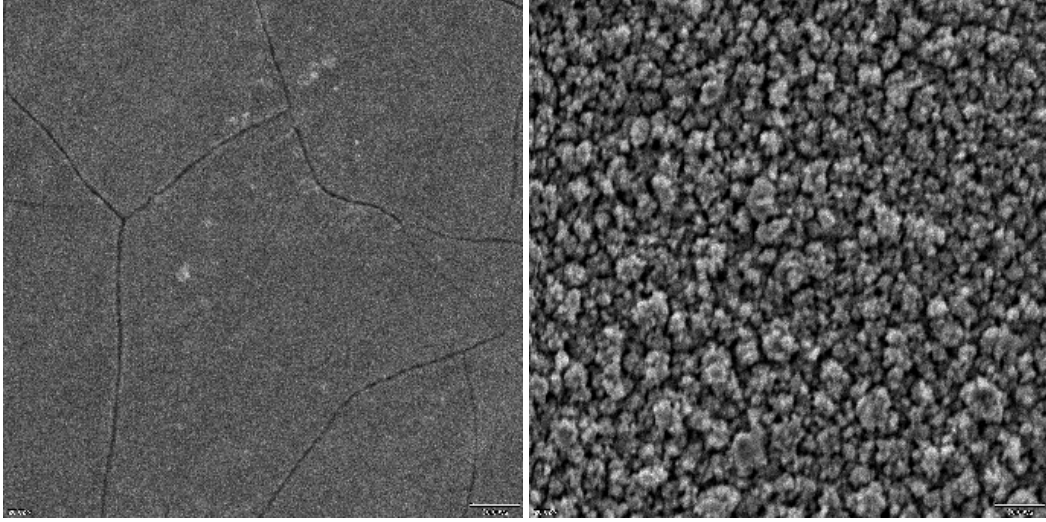


(c)



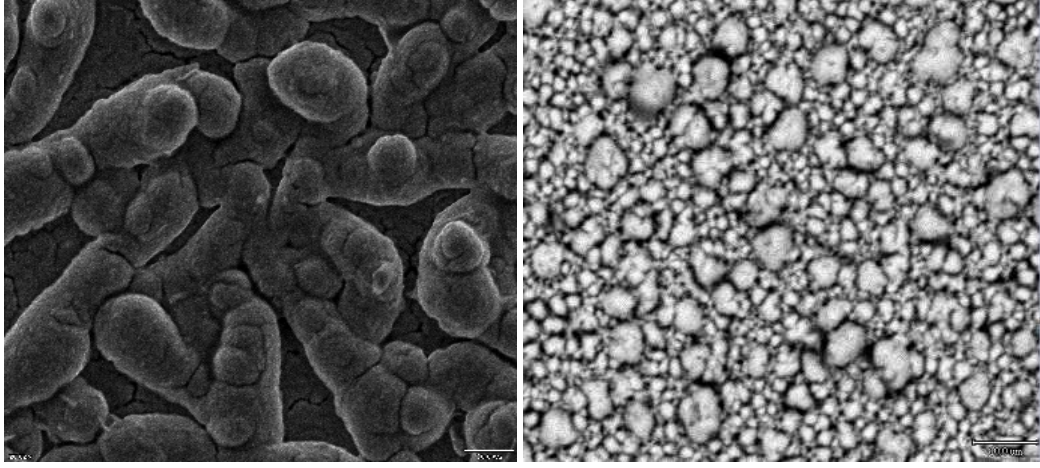
(d)

Şekil 6.8 Sert krom kaplanmış ve sonrasında değişik koşullarda işlem gören AISI 1010 çeliklerinin yüzey görüntüleri a) 560 °C' de nitrokarbürleşmiş numune b) 600 °C' de plazma nitrürlenmiş numune c) 700 °C' de plazma nitrürlenmiş numune d) 800 °C' de plazma nitrürlenmiş numune



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 6.9 Sert krom kaplanmış ve sonrasında değişik koşullarda işlem gören AISI 1040 çeliklerinin yüzey görüntüleri a) 560 °C' de nitrokarbürleşmiş numune b) 600 °C' de plazma nitrürlenmiş numune c) 700 °C' de plazma nitrürlenmiş numune d) 800 °C' de plazma nitrürlenmiş numune

6.2.2 Enine Kesit Mikroyapı Görüntüleri

Yüzey işlemlerine tabi tutulan numunelerin metalografik olarak inceleme yapılabilmesi için numuneler Şekil 6.10' da verilen Metkon Micracut 150 marka hassas kesme cihazıyla kesilmiştir. Kesilen numuneler bakalite alınıp 800, 1000 ve 1200 nolu zımparalarla zımparalanmış, alümina ve elmasla parlatılmıştır.

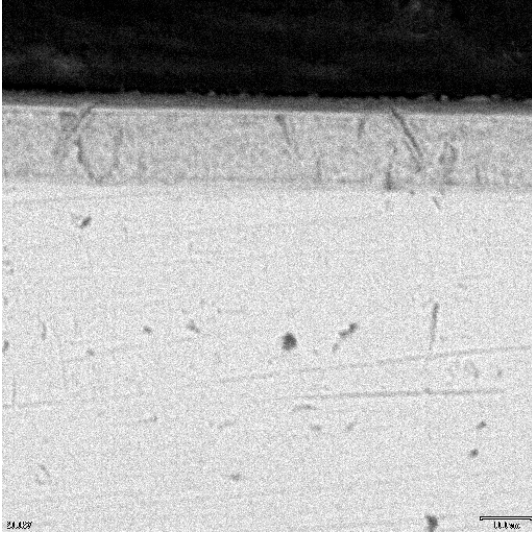


Şekil 6.10 Metkon Micracut 150 marka hassas kesme cihazı

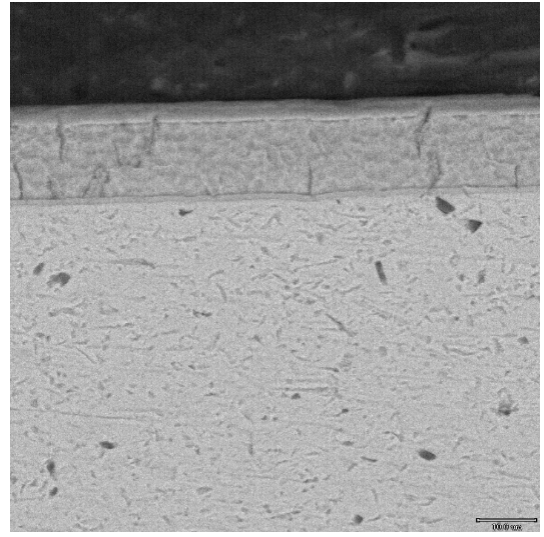
Daha sonra numuneler hem çelik yapısını hem de krom yapısını açığa çıkarmak için iki farklı dağlayıcı ile dağlanmıştır. Yaklaşık 30 sn. kadar Nital 5 ile dağlandıktan sonra, krom ve krom alaşımları için kullanılan, 30 ml HCl, 45 ml $C_3H_8O_3$ (gliserol) ve 15 ml HNO_3 içeren dağlayıcıyla yaklaşık 1 dk. kadar dağlanmıştır.

Hazırlanan numuneler öncelikle optik mikroskopta incelenmiştir. Enine kesit ve yüzey görüntüleri, YTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bünyesinde bulunan Jeol-5410 LV marka taramalı elektron mikroskobundan alınmıştır. Görüntüler 20 kV enerjide ikincil elektronlardan ve geri saçılmış elektronlardan faydalanarak elde edilmiştir. Verilen mikroyapı görüntülerinin tamamı 1000 büyütmede alınmıştır.

Krom kaplanmış ve sonrasında nitrürlenmiş/nitrokarbürleşmiş çelik numunelerin enine kesit görüntüleri Şekil 6.11-14' de verilmiştir. 600 °C de plazma nitrürlenmiş AISI 1010 ve 1040 çeliklerinin enine kesitten alınan görüntüleri Şekil 6.11' de, 700 °C plazma nitrürlenmiş numunelerin enine kesit görüntüleri Şekil 6.12' de, 800 °C plazma nitrürlenmiş numunelerin enine kesit görüntüleri ise Şekil 6.13' de verilmiştir. Sert krom kaplanıp, 560 °C' de nitrokarbürleşen AISI 1010 ve 1040 çeliklerinin enine kesitten alınan görüntüleri ise Şekil 6.14' de gösterilmiştir.

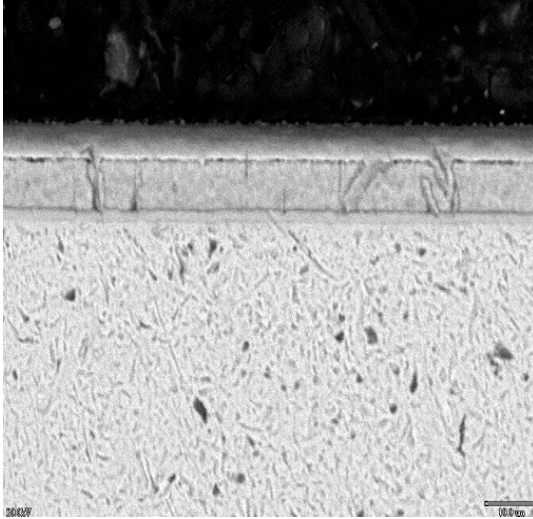


(a)

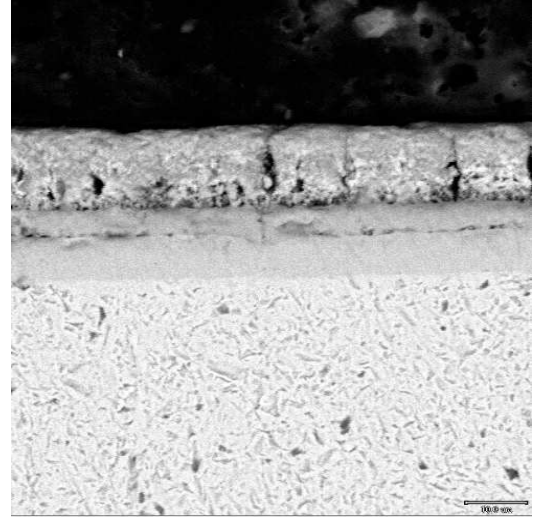


(b)

Şekil 6.11 600 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış çeliklerin enine kesit görüntüleri a) AISI 1010 b) AISI 1040

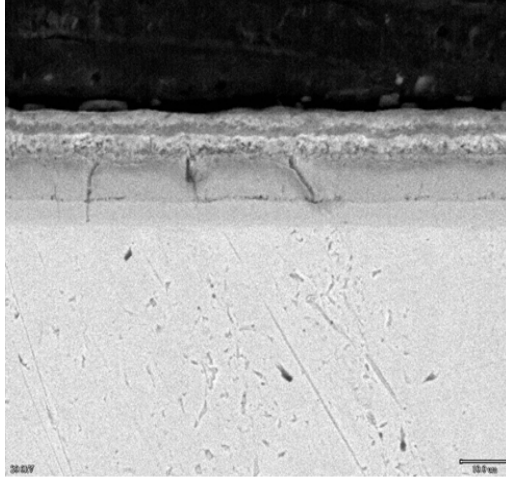


(a)

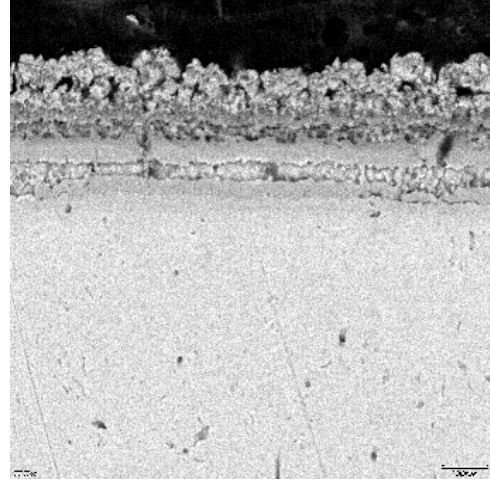


(b)

Şekil 6.12 700 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış çeliklerin enine kesit görüntüleri a) AISI 1010 b) AISI 1040

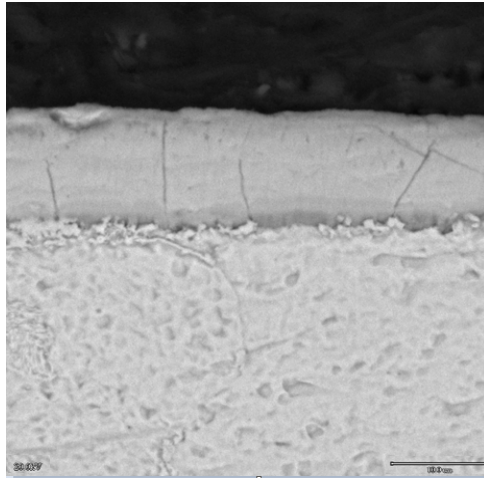


(a)

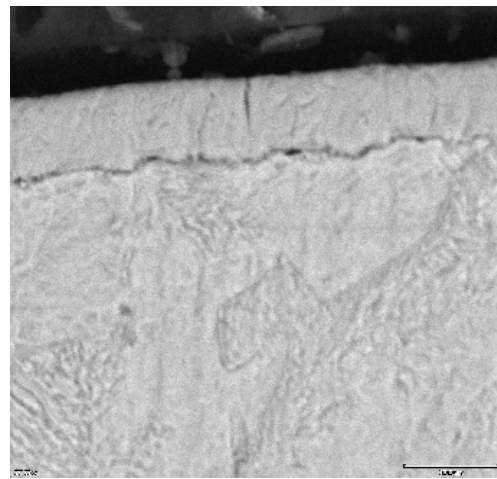


(b)

Şekil 6.13 800 °C' de plazma nitrüleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış çeliklerin enine kesit görüntüleri a) AISI 1010 b) AISI 1040



(a)

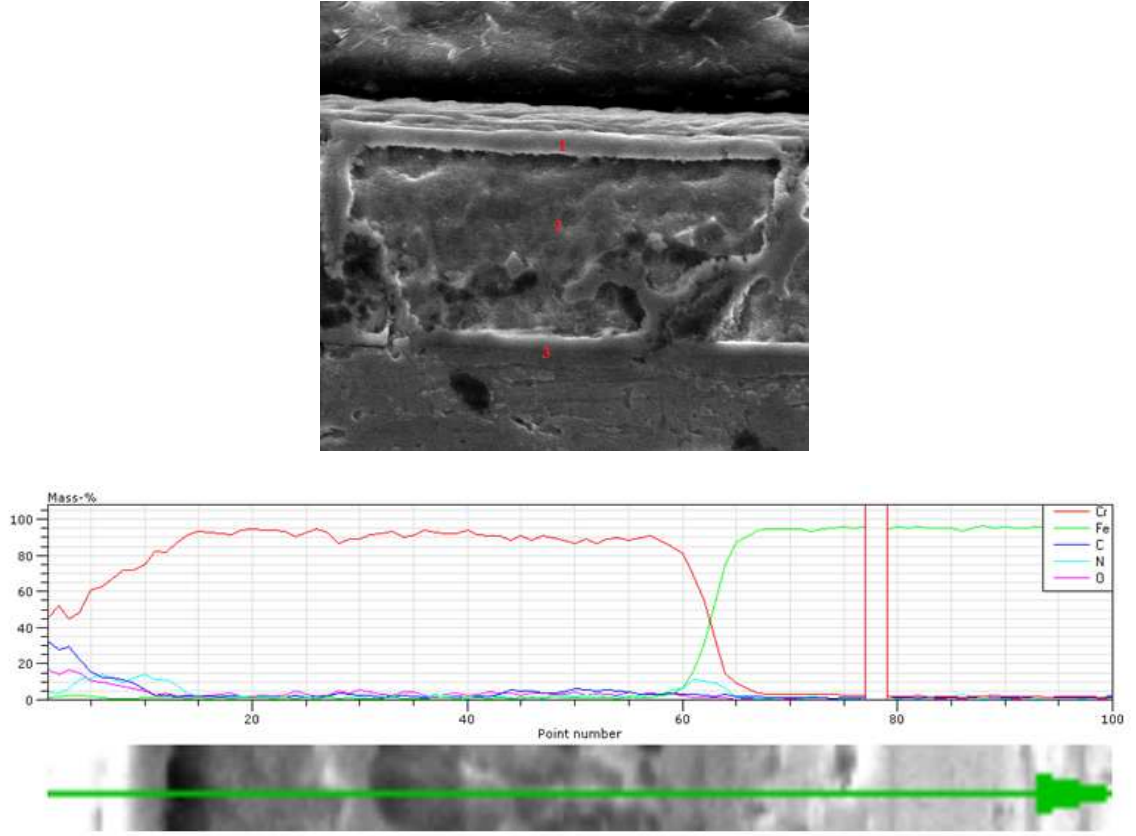


(b)

Şekil 6.14 560 °C' de 8 saat gaz nitrokarbürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış çeliklerin enine kesit görüntüleri a) AISI 1010 b) AISI 1040

6.2.3 EDS ve Line Scan Analizleri

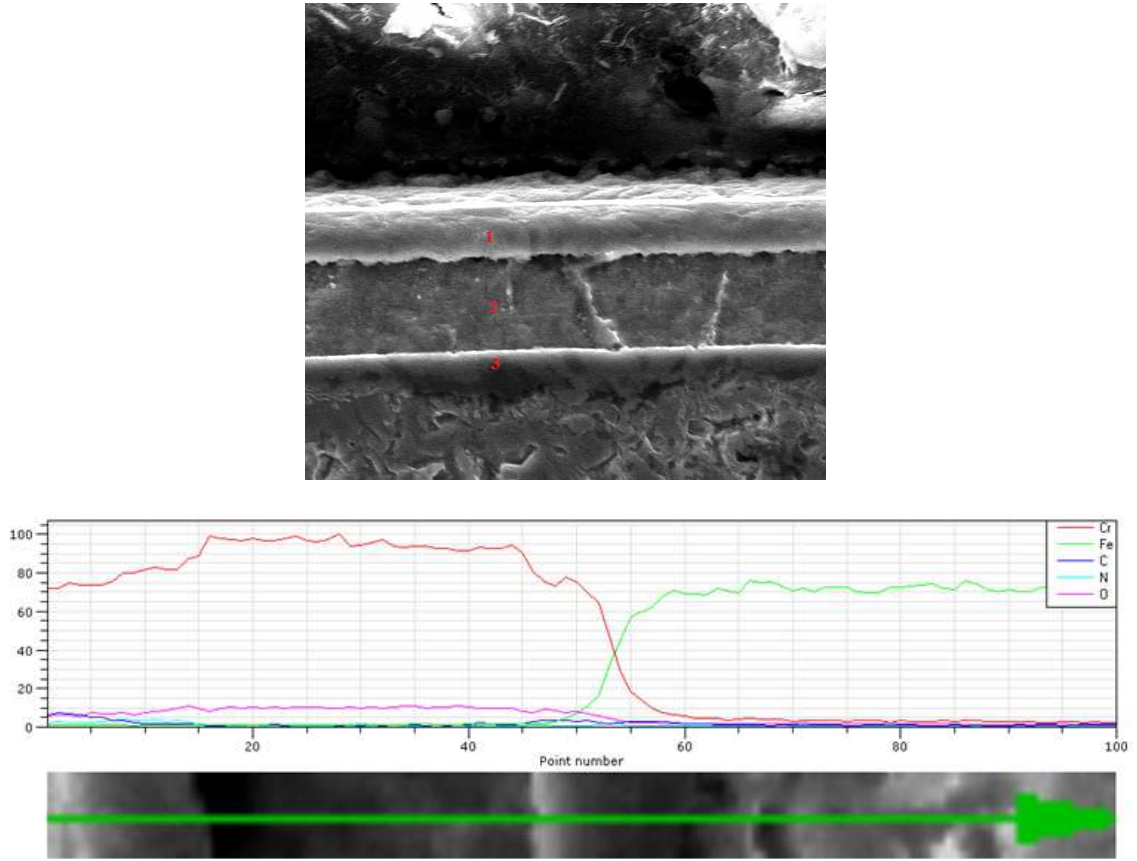
Sert krom kaplanıp farklı sıcaklıklarda plazma nitrüleme işlemine tabi tutulan çeliklerin EDS ve Çizgi Tarama (Line Scan) analizleri AISI 1010 çelik numuneleri için Şekil 6.15-17' de, AISI 1040 çelik numuneler için de 6.18-20' de verilmiştir. Numunelerin elementel analizleri Çizelge 6.4-9' da, EDS Grafikleri ise EK-A' da verilmiştir. EDS ve Çizgi Tarama (Line Scan) analizleri, Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi bünyesindeki ZEISS LS10 markalı SEM' de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.15 600 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüsü ve Çizgi Tarama (Line Scan) analizi

Çizelge 6.2 600 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 1,2 ve 3 bölgelerinden alınmış elementel analizleri

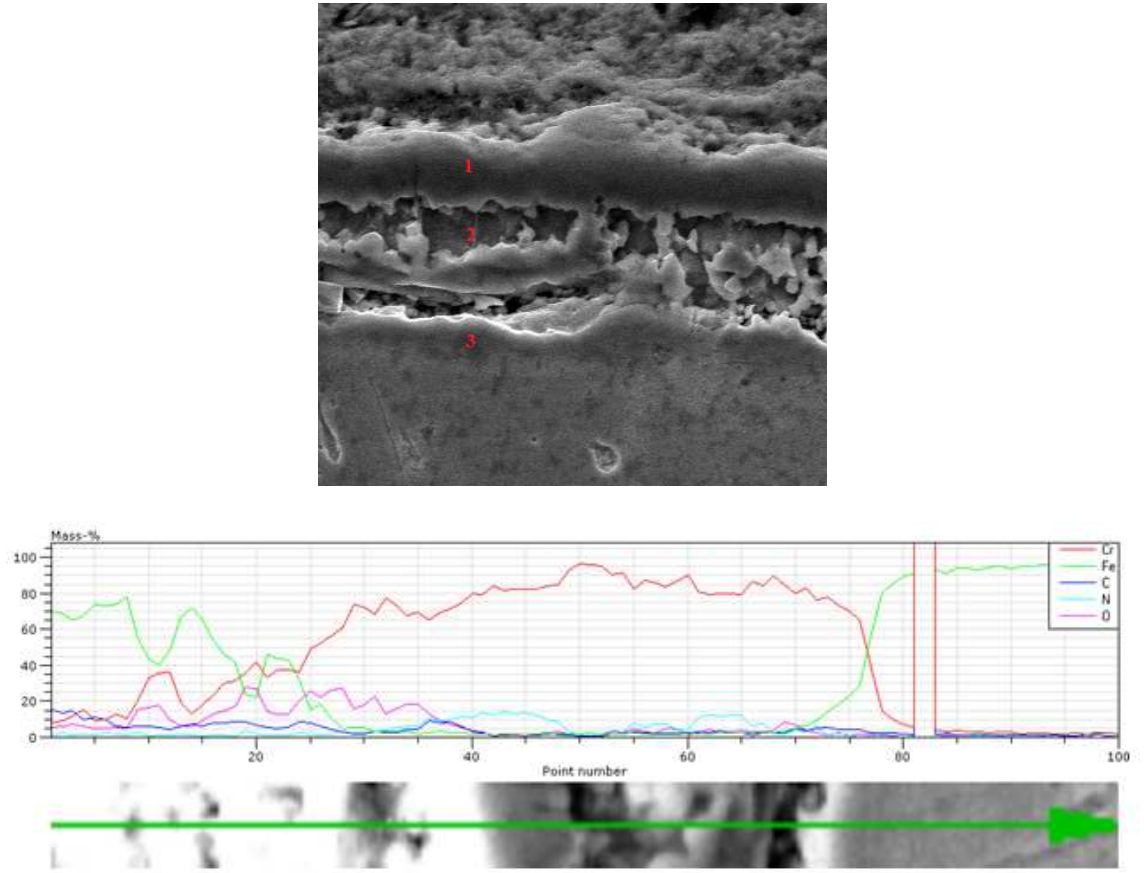
	1 numaralı nokta(%)	2 numaralı nokta(%)	3 numaralı nokta (%)
Cr	29.54	80.57	93.7
Fe	1.5	-	1.21
N	11.09	5.89	-
C	38.54	5.79	5.08
O	18.45	7.75	-



Şekil 6.16 700 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüsü ve Çizgi Tarama (Line Scan) analizi

Çizelge 6.3 700 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 1,2 ve 3 bölgelerinden alınmış elementel analizleri

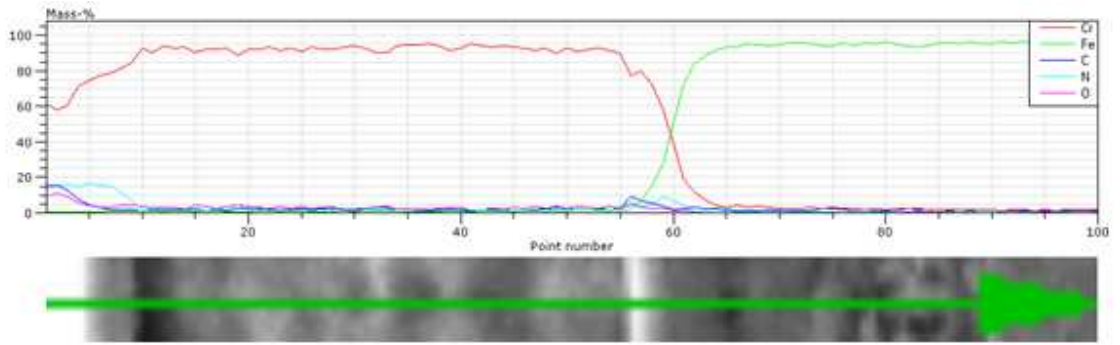
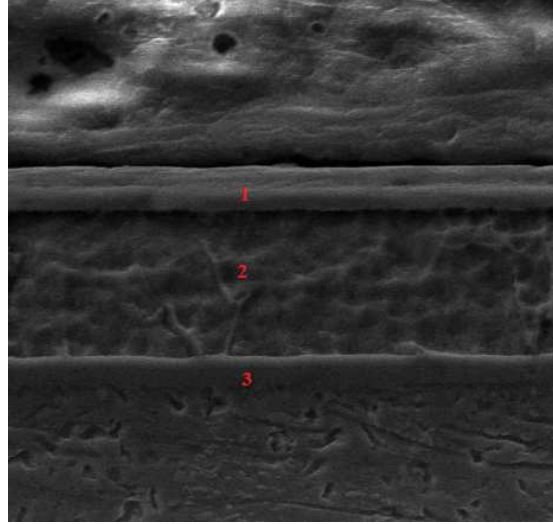
	1 numaralı nokta(%)	2 numaralı nokta(%)	3 numaralı nokta (%)
Cr	47.22	86.9	66.15
Fe	-	-	10.92
N	29.56	7.92	7.63
C	14.16	5.15	15
O	9.07	-	-



Şekil 6.17 800 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin mikroyapı görüntüsü ve Çizgi Tarama (Line Scan) analizi

Çizelge 6.4 800 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinin 1,2 ve 3 numaralı bölgelerinden alınmış elementel analizleri

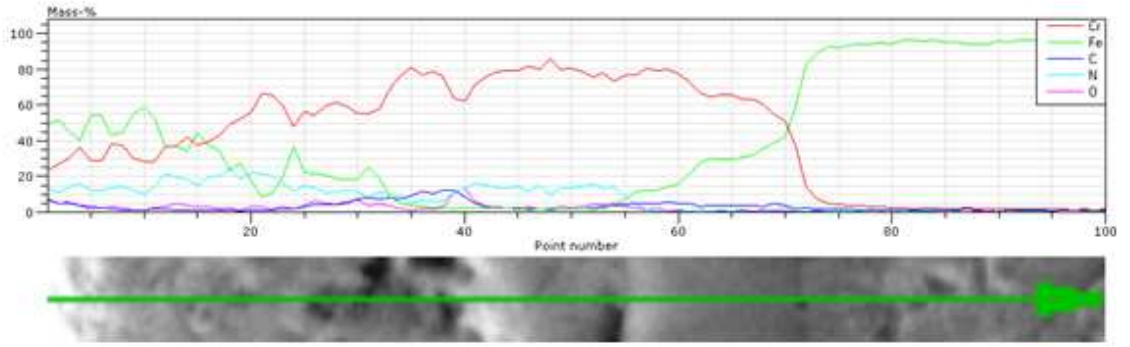
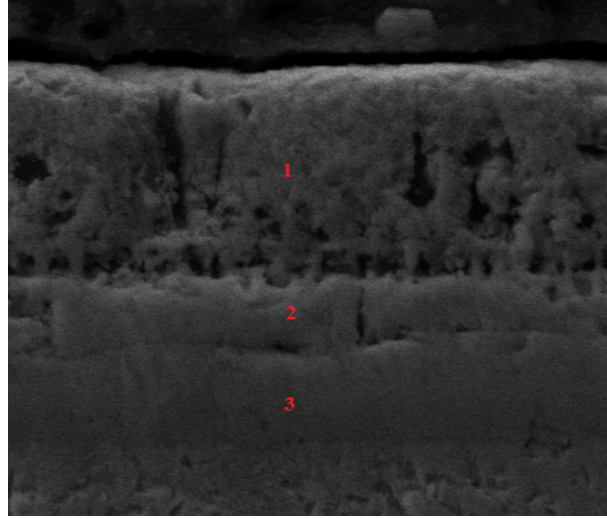
	1 numaralı nokta(%)	2 numaralı nokta(%)	3 numaralı nokta (%)
Cr	53.86	49.94	53.06
Fe	-	-	30.37
N	35.05	36.83	1.49
C	5.74	6.35	11.82
O	5.35	6.88	3.26



Şekil 6.18 600 °C’ de plazma nitrüleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin mikroyapı görüntüsü ve Çizgi Tarama (Line Scan) analizi

Çizelge 6.5 600 °C’ de plazma nitrüleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 1,2 ve 3 numaralı bölgelerinden alınmış elementel analizleri

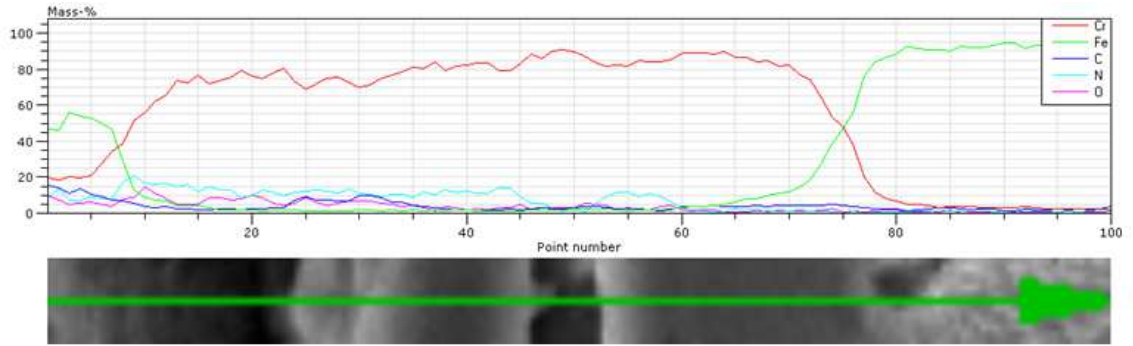
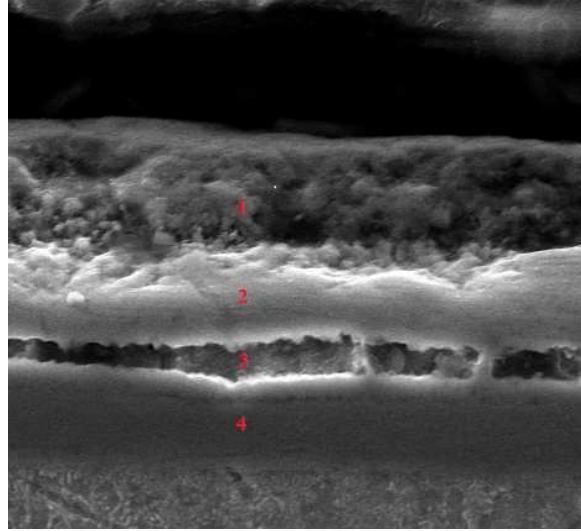
	1 numaralı nokta(%)	2 numaralı nokta(%)	3 numaralı nokta (%)
Cr	29.05	83.14	46.37
Fe	5.46	-	22.39
N	28.43	5.92	15.23
C	19.67	4.55	12.2
O	17.32	2.24	3.81



Şekil 6.19 700 °C' de plazma nitrüleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin mikroyapı görüntüsü ve Çizgi Tarama (Line Scan) analizi

Çizelge 6.6 700 °C' de plazma nitrüleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 1,2 ve 3 numaralı bölgelerinden alınmış elementel analizleri

	1 numaralı nokta(%)	2 numaralı nokta(%)	3 numaralı nokta (%)
Cr	25.25	57.13	61.25
Fe	22.95	-	19.51
N	42.58	33.34	2.73
C	3.81	5.30	13.89
O	5.41	4.23	2.62



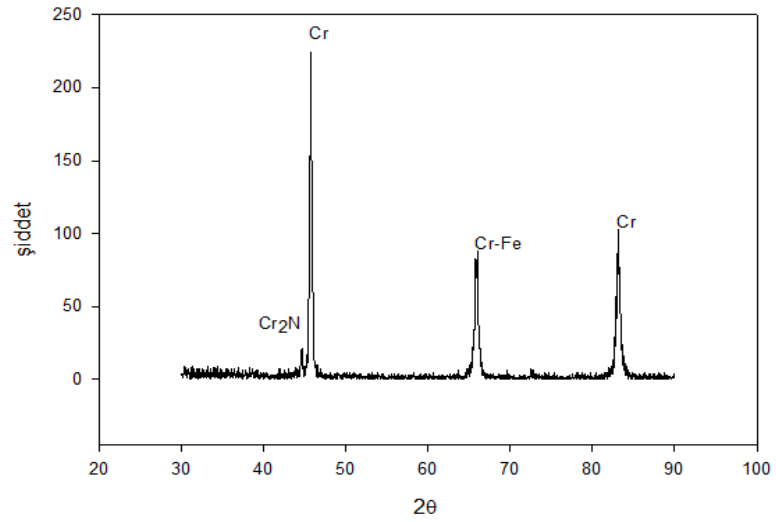
Şekil 6.20 800 °C' de plazma nitrüleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin mikroyapı görüntüsü ve Çizgi Tarama (Line Scan) analizi

Çizelge 6.7 800 °C' de plazma nitrüleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinin 1, 2, 3 ve 4 numaralı bölgelerinden alınmış elementel analizleri

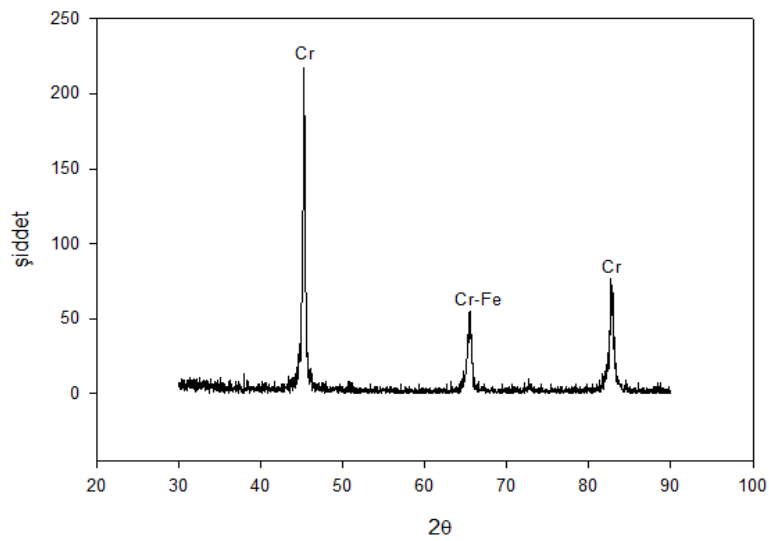
	1 numaralı nokta(%)	2 numaralı nokta(%)	3 numaralı nokta (%)	4 numaralı nokta (%)
Cr	24.28	47.64	85.07	72.47
Fe	9.79	-	-	3.44
N	37.25	38.31	8.09	3.77
C	15.26	14.05	6.84	16.4
O	18.8	-	-	3.92

6.2.4 XRD Analizleri

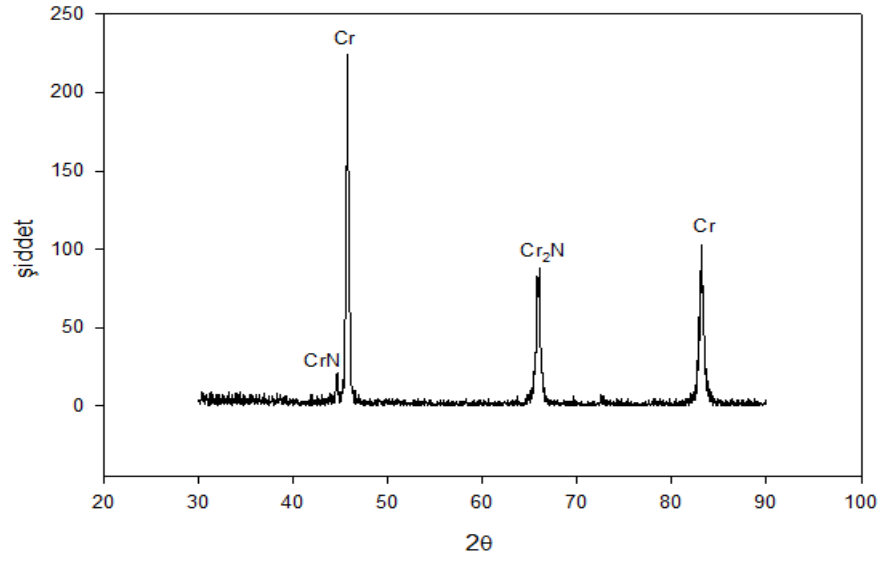
Yüzey işlemleri neticesinde oluşan tabakaların faz analizleri ve X-ışınları difraksiyon analizleri Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesinde XRD analiz laboratuvarındaki cihazla gerçekleştirilmiştir. Analizler 0-90° pozisyon aralığında alınmıştır. Yapılan analiz sonuçlarında, krom kaplanıp 560 °C' de nitrokarbürleşmiş AISI 1010 ve 1040 çelik numunelerinin analizleri Şekil 6.21-22' de verilmiştir. Şekil 6.23-25' de AISI 1010 çeliği üzerine krom kaplanmış ve 600, 700 ve 800 °C' de plazma nitrürlenmiş numunenin XRD analizleri görülmektedir. Şekil 6.26-28' de ise aynı koşullardaki AISI 1040 çelik numunelerinin XRD analizleri verilmiştir.



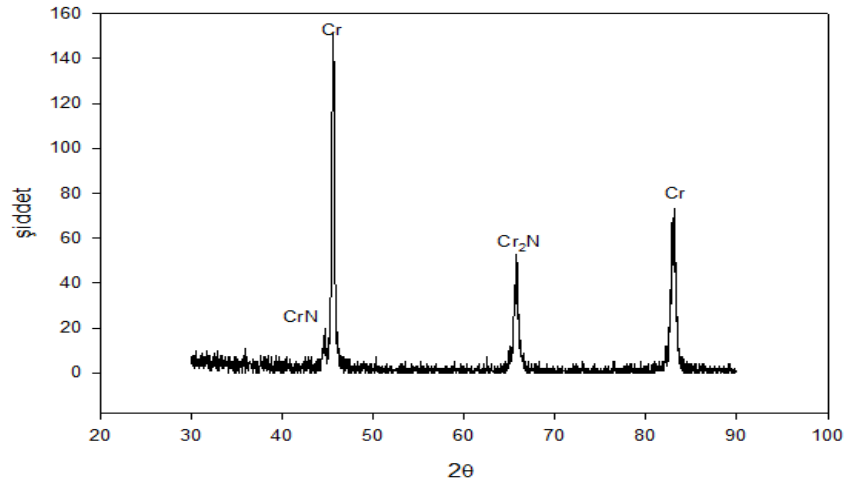
Şekil 6.21 560 °C' de gaz nitrokarbürleme yapılan AISI 1010 çeliğinin XRD analizi



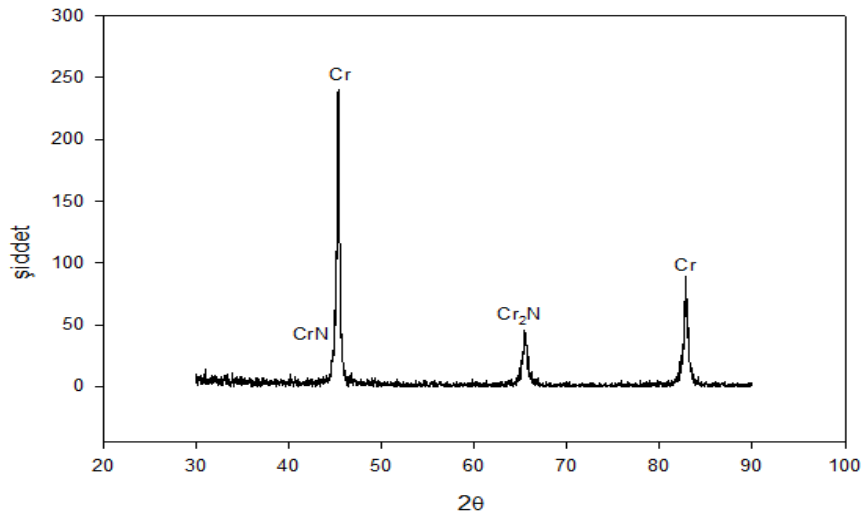
Şekil 6.22 560 °C' de gaz nitrokarbürleme yapılan AISI 1040 çeliğinin XRD analizi



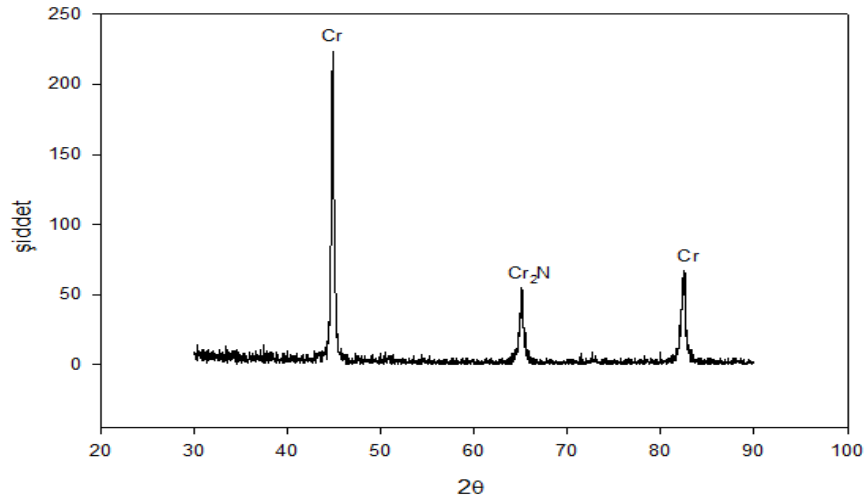
Şekil 6.23 600 °C sıcaklıkta plazma nitürleme yapılan AISI 1010 çeliğinin XRD analizi



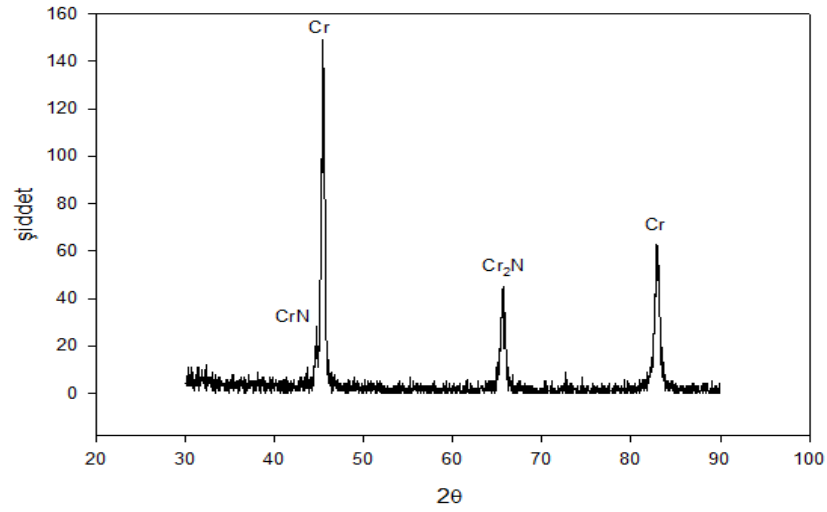
Şekil 6.24 700 °C sıcaklıkta plazma nitürleme yapılan AISI 1010 çeliğinin XRD analizi



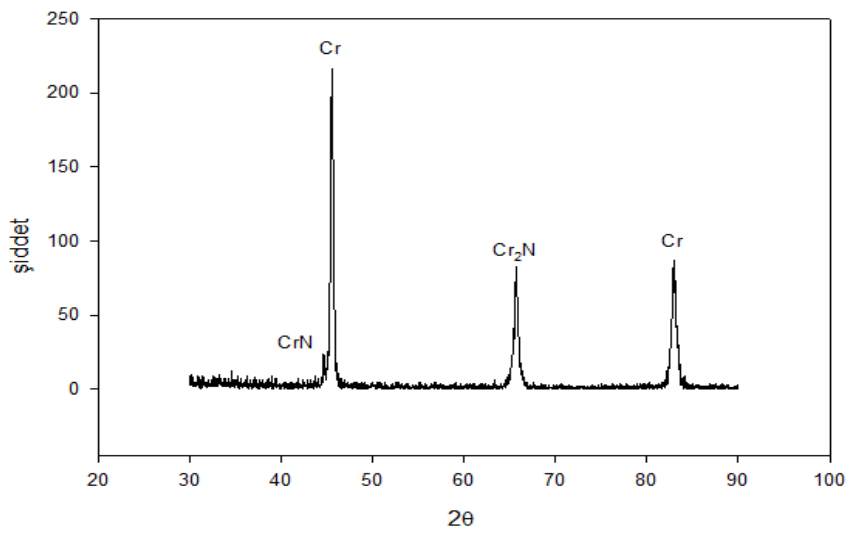
Şekil 6.25 800 °C sıcaklıkta plazma nitürleme yapılan AISI 1010 çeliğinin XRD analizi



Şekil 6.26 600 °C sıcaklıkta plazma nitrürleme yapılan AISI 1040 çeliğinin XRD analizi



Şekil 6.27 700 °C sıcaklıkta plazma nitrürleme yapılan AISI 1040 çeliğinin XRD analizi



Şekil 6.28 800 °C sıcaklıkta plazma nitrürleme yapılan AISI 1040 çeliğinin XRD analizi

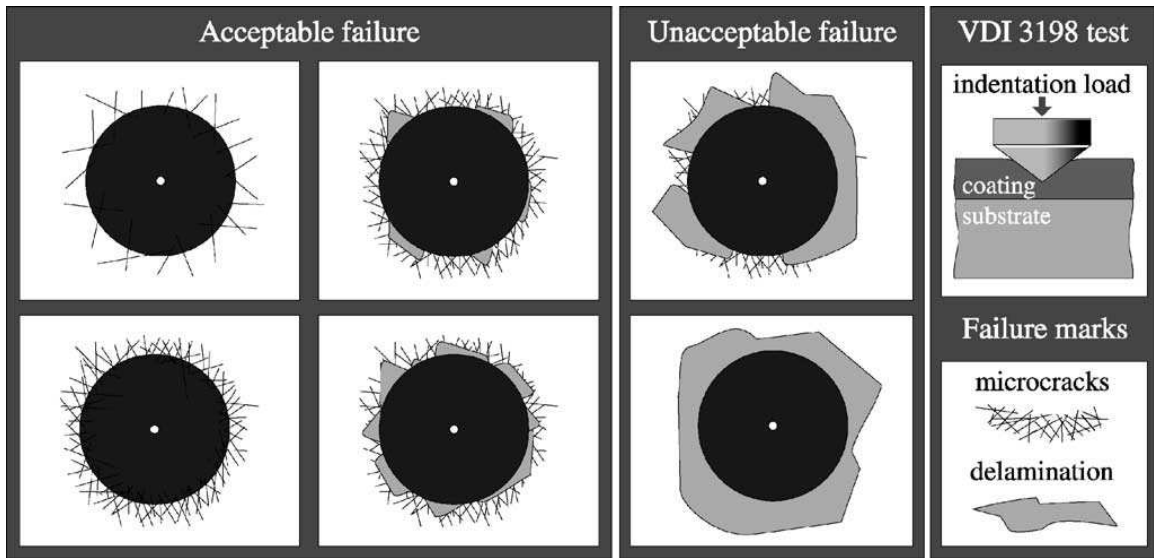
6.2.5 Yapışma Deneyleri

Bazı özel kaplamaların üstün özellikleri olarak bilinen aşınmaya ve korozyona karşı dirençlerinin tam olarak sağlanabilmesi için ilk şart kaplama ve alt malzemenin birbirine iyi ve kuvvetli şekilde yapışmasıdır. Yapışma özellikleri alt malzeme, kaplama cinsi, kaplama yöntemi ve kaplama parametrelerine bağlı olarak değişebilmektedir. Kaplamaların alt malzeme yüzeyinden kalkması durumunda ise kaplamada önemli ölçüde sorunlar meydana gelmektedir. Kaplama bünyesindeki iç gerilme miktarının artması yapışmayı olumsuz yönde etkileyen faktörlerdendir. Kaplama yapısındaki iç gerilmeyi arttıran sebepler dolayısıyla yapışma mukavemetini de azaltır. Alt malzemenin sertliğinin artmasıyla yapışma mukavemeti artmaktadır. Bunun nedeni alt malzeme sertliğinin artmasıyla plastik deformasyon direncinin yükselmesidir. Yine alt malzemenin yüzey temizliği de iyi yapışma özelliğinin elde edilmesinde kilit olgulardandır.

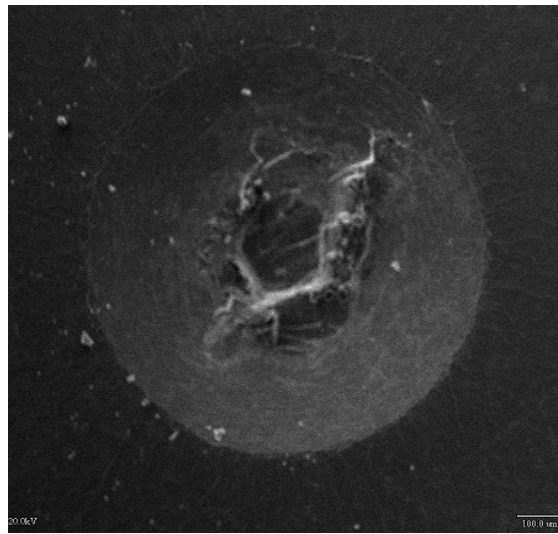
Yapışma mukavemetinin değerlendirilmesinde değişik yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan en fazla uygulananlar Rockwell-C indentasyon testi ve çizik testidir. Rockwell-C indentasyon yönteminde geleneksel Rockwell-C elmas uç malzeme yüzeyine batırılır ve oluşan izlerin durumu incelenir. Kaplama sertliğine ve film kalınlığına bağlı olarak oluşan izler değerlendirilir. Çizik testi ise bir kritik yük değerinin hesaplanmasına dayalıdır. Yine Rockwell-C elmas uç, malzeme yüzeyinde belli doğrultuda hareket ederek sürekli veya kademeli olarak arttırılan bir yük miktarı ile iz oluşturur. Belli bir yük miktarına ulaşıldığı veya aşıldığı zaman kaplamanın yüzeyden kalkmaya başladığı görülür. Bu kaplamanın kalkmaya başladığı anda okunan yük değeri, kritik yük (L_c) olarak adlandırılır. İz daha sonra tarama elektron mikroskopunda incelenerek filmin yüzeyden ayrılma karakteri değerlendirilebilir [51].

Bu çalışmada Rockwell-C indentasyon yöntemi kullanılarak kaplamaların yapışma özelliklerinin değerlendirilmesi yapılmıştır. VDI 3198 Alman standartına (1991) göre elde edilen izler incelenmiştir. Rockwell-C elmas uç ile 1471 N yükün uygulanması ile oluşturulan izlerin daha sonra tarama elektron mikroskopunda görüntüler alınmıştır.

VDI standardına göre kraterin çevresinde oluşan izlerin çok fazla bir önemi yoktur. Kaplama türü ve şartlarına, uygulanan iz oluşturma kuvvetine, alt malzeme ve kaplama cinsine göre bu izlerin yoğunluğu ve kalınlığı artabilmektedir. Bu oluşan izlerin yanında kaplamanın krater bölgesinde sökölmesi ve kalkması gibi durumların tespiti çok önemlidir. Kaplama ve alt malzemenin uyumsuzluğunun bir sonucu olarak kaplamada kalkma ve sökölme bölgeleri görülmektedir. Şekil 6.29' da VDI 3198 Rockwell-C indentasyon testinin standart şekilleri gösterilmiştir. Şekil 6.30' da ise krom kaplanmış çelik numunenin Rockwell-C yapışma testinden sonraki görüntüsü verilmiştir.

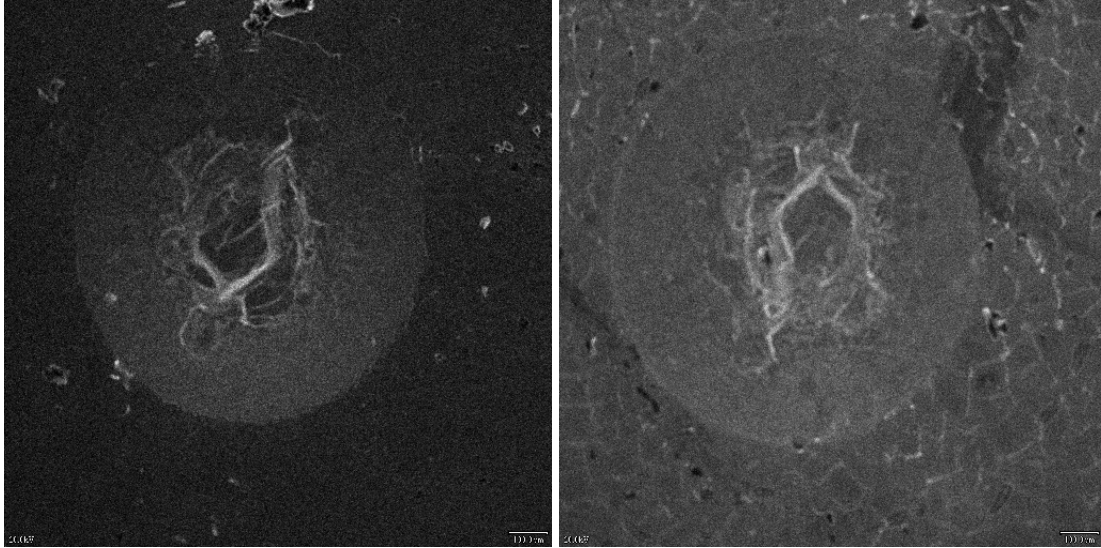


Şekil 6.29 VDI 3198 Rockwell-C indentasyon testinin standart şekilleri [52].



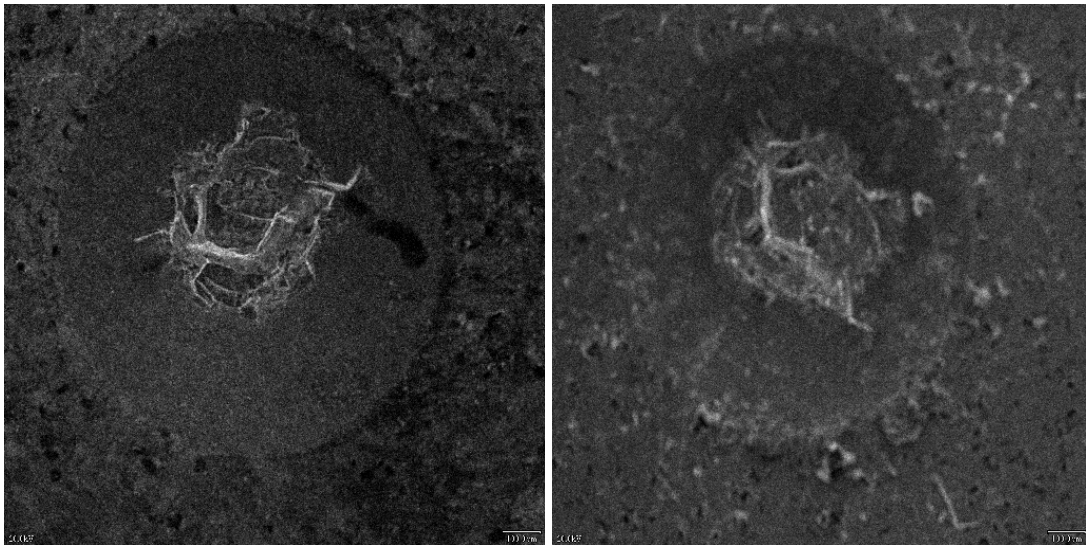
Şekil 6.30 Krom kaplanmış çelik numunenin Rockwell-C yapışma testinden sonraki görüntüsü

Krom kaplanıp nitrürlenen/nitrokarb rlenen AISI 1010  elik numunelerin Rockwell-C yapışma testinden sonraki görüntüleri Şekil 6.31' de verilmiştir. Şekil 6.32' de ise aynı koşullarda işleme tabi tutulan AISI 1040  elik numunelerinin Rockwell-C yapışma testinden sonraki görüntüleri gösterilmiştir.



(a)

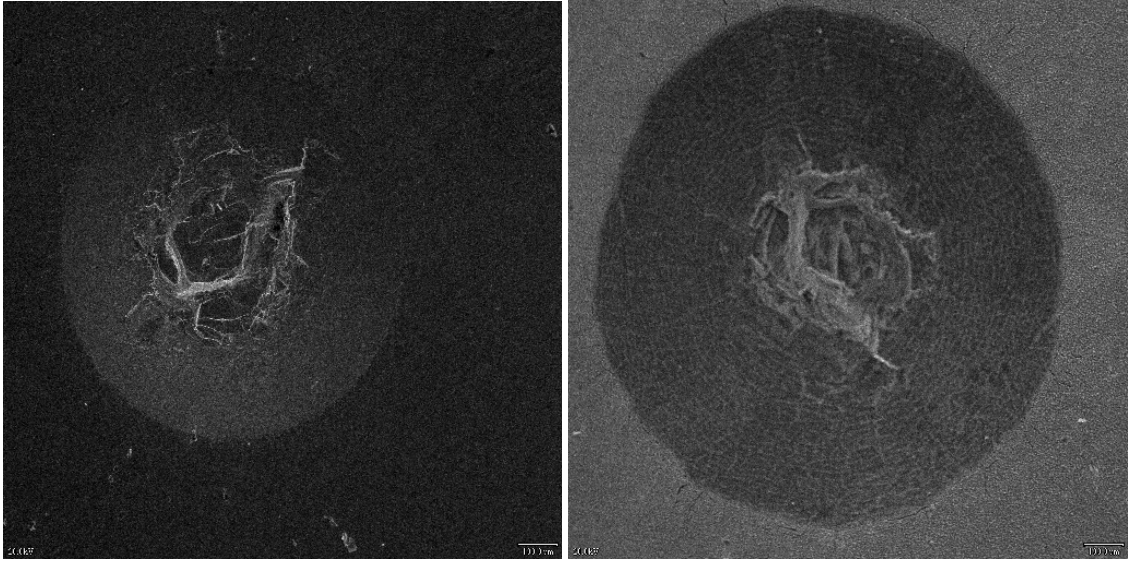
(b)



(c)

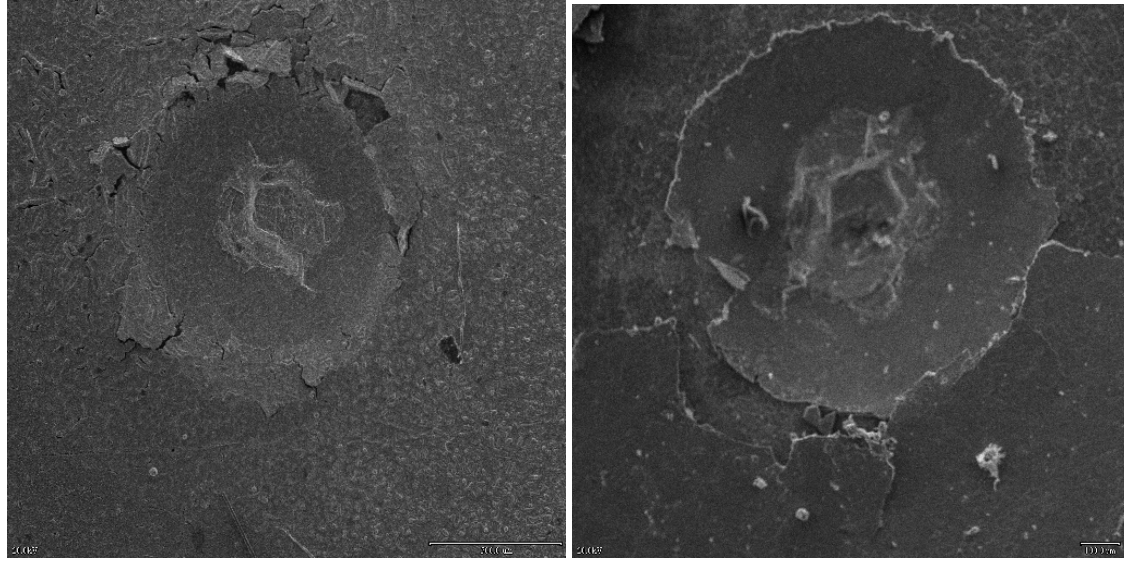
(d)

Şekil 6.31 Sert krom kaplanmış ve sonrasında değişik koşullarda işlem gören AISI 1010  eliklerinin Rockwell-C yapışma testinden sonraki görüntüleri a) 560  C' de nitrokarbürlenmiş numune b) 600  C' de plazma nitrürlenmiş numune c) 700  C' de plazma nitrürlenmiş numune d) 800  C' de plazma nitrürlenmiş numune



(a)

(b)



(c)

(d)

Şekil 6.32 Sert krom kaplanmış ve sonrasında değişik koşullarda işlem gören AISI 1040 çeliklerinin Rockwell-C yapışma testinden sonraki görüntüleri a) 560 °C' de nitrokarbürleşmiş numune b) 600 °C' de plazma nitrülenmiş numune c) 700 °C' de plazma nitrülenmiş numune d) 800 °C' de plazma nitrülenmiş numune

6.2.6 Sertlik Ölçümleri

Numunelerin mikrosertlik ölçümleri Şekil 6.33' de gösterilen Bulut Makine HVS-1000 marka mikrosertlik ölçüm cihazıyla 50 gr yük altında yapılmıştır. Her bir numune için yüzeyden 3 farklı noktadan alınan sertlik değerlerinin aritmetik ortalaması değerlendirilmeye alınmıştır.



Şekil 6.33 Bulut Makine HVS-1000 marka mikrosertlik ölçüm cihazı

Çizelge 6.10’ da krom kaplanmış ve kaplanmamış çelik numunelerin mikrosertlik değerleri verilmiştir. Elektrolitik sert krom kaplanmış çeliklere uygulanan nitrürleme ve nitrokarbürleme işlemleri sonucundaki sertlik değerleri de Çizelge 6.11’ de gösterilmiştir.

Çizelge 6.8 Sert krom kaplanmış ve kaplanmamış çelik numunelerin mikrosertlik değerleri

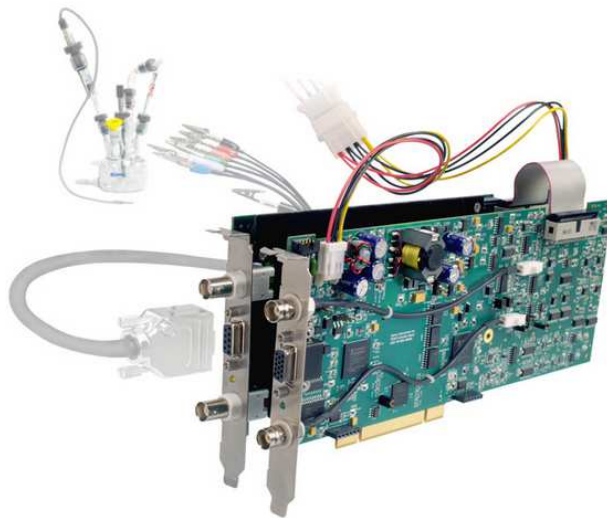
MALZEME	SERTLİK (HV)
AISI 1010 çeliği	172 HV
AISI 1040 çeliği	198 HV
Elektrolitik sert krom kaplanmış AISI 1010	516 HV
Elektrolitik sert krom kaplanmış AISI 1040	595 HV

Çizelge 6.9 Sert krom kaplanmış sonrasında çeşitli koşullarda işlem görmüş çelik numunelerin mikrosertlik değerleri

MALZEME	SERTLİK (HV)
560 °C' de gaz nitrokarbürleşmiş elektrolitik sert krom kaplı 1010 çeliğı	470 HV
600 °C' de plazma nitrürleşmiş elektrolitik sert krom kaplı 1010 çeliğı	524 HV
700 °C' de plazma nitrürleşmiş elektrolitik sert krom kaplı 1010 çeliğı	701 HV
800 °C' de plazma nitrürleşmiş elektrolitik sert krom kaplı 1010 çeliğı	912 HV
560 °C' de gaz nitrokarbürleşmiş elektrolitik sert krom kaplı 1040 çeliğı	528 HV
600 °C' de plazma nitrürleşmiş elektrolitik sert krom kaplı 1040 çeliğı	629 HV
700 °C' de plazma nitrürleşmiş elektrolitik sert krom kaplı 1040 çeliğı	Ölçülemedi
800 °C' de plazma nitrürleşmiş elektrolitik sert krom kaplı 1040 çeliğı	Ölçülemedi

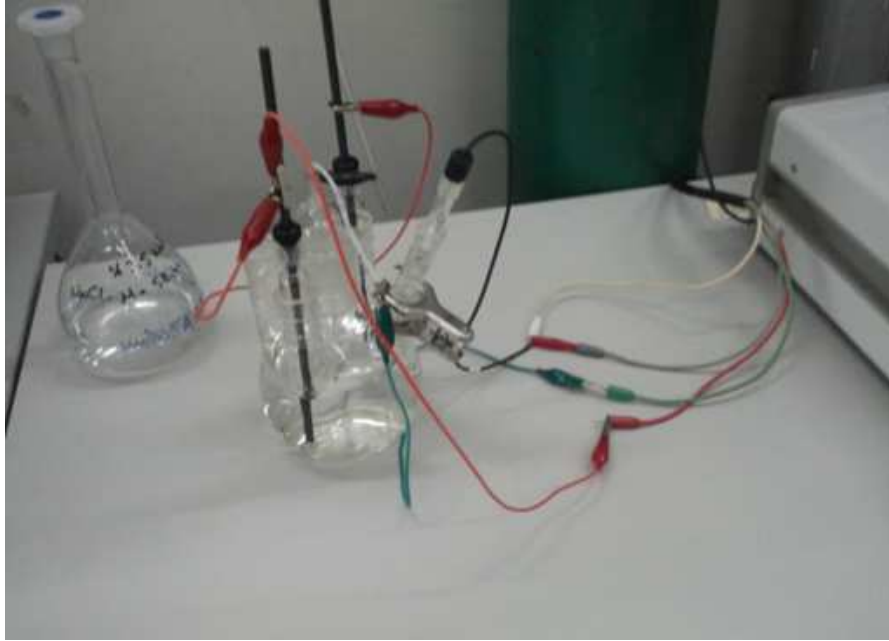
6.2.7 Korozyon Deneyleri

Korozyon deneylerinden önce, numune yüzeyine iletkenlik katsayısı yüksek bakır teller monte edildikten sonra 1 cm²' lik alan boş bırakılmış ve geriye kalan kısım silikonlanmıştır. Daha sonra açık kalan yüzey aseton yardımıyla temizlenmiştir. Korozyon deneyleri % 3.5' lik NaCl çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. Korozyon deneyleri, hazırlanan çözelti içerisinde normal atmosfer şartlarında Şekil 6.34' de görüntüsü verilen Gamry PCI4 Series G Family Instrument Potentiostats cihazında yapılmıştır.



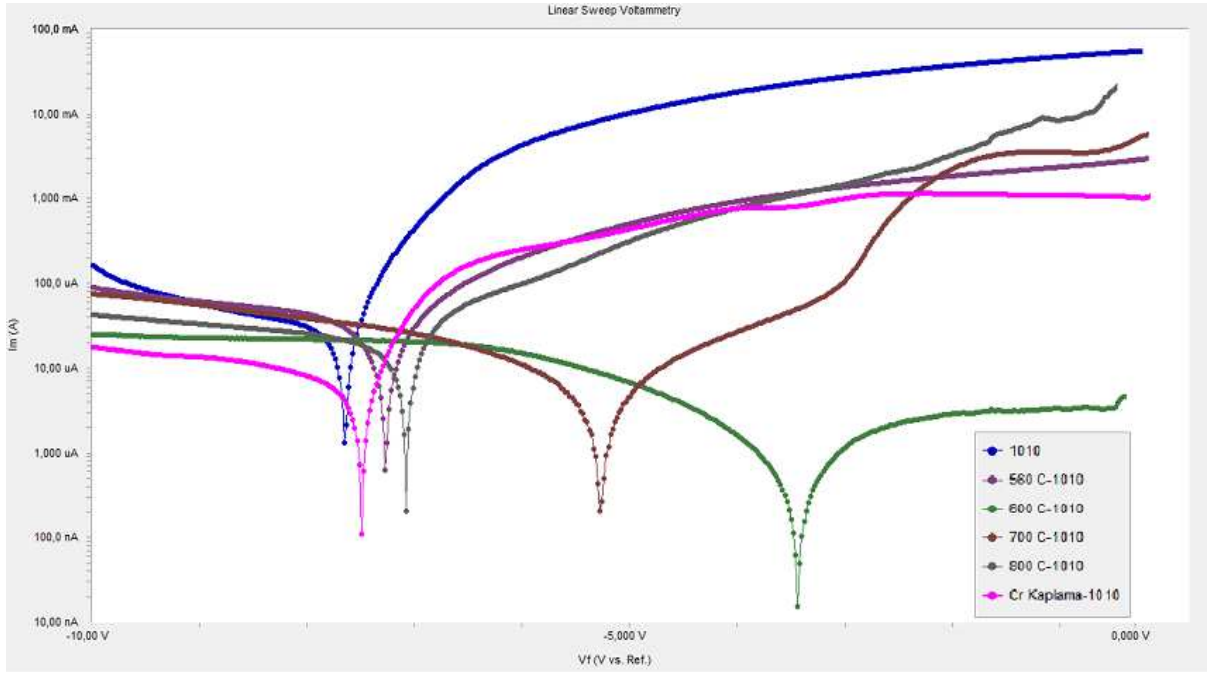
Şekil 6.34 Gamry PCI4 Series G Family Instrument Potentiostats cihazı

Daha sonra, çözelti içerisinde bekletilen numuneler, -1 ile 0 mV potansiyel aralığı içinde 2 ve 100 mV/sn' lik tarama hızlarında potansiyodinamik olarak polarize edilmiştir. Polarizasyon ölçümleri, referans elektrot (RE) olarak doymuş kalomel elektrot, karşıt elektrot (CE) olarak grafit ve çalışma elektrot (WE) olarak da deney numunesi kullanılarak üç elektrot tekniğine göre yapılmıştır. Deney düzeneğinin görüntüsü Şekil 6.35' de verilmiştir.

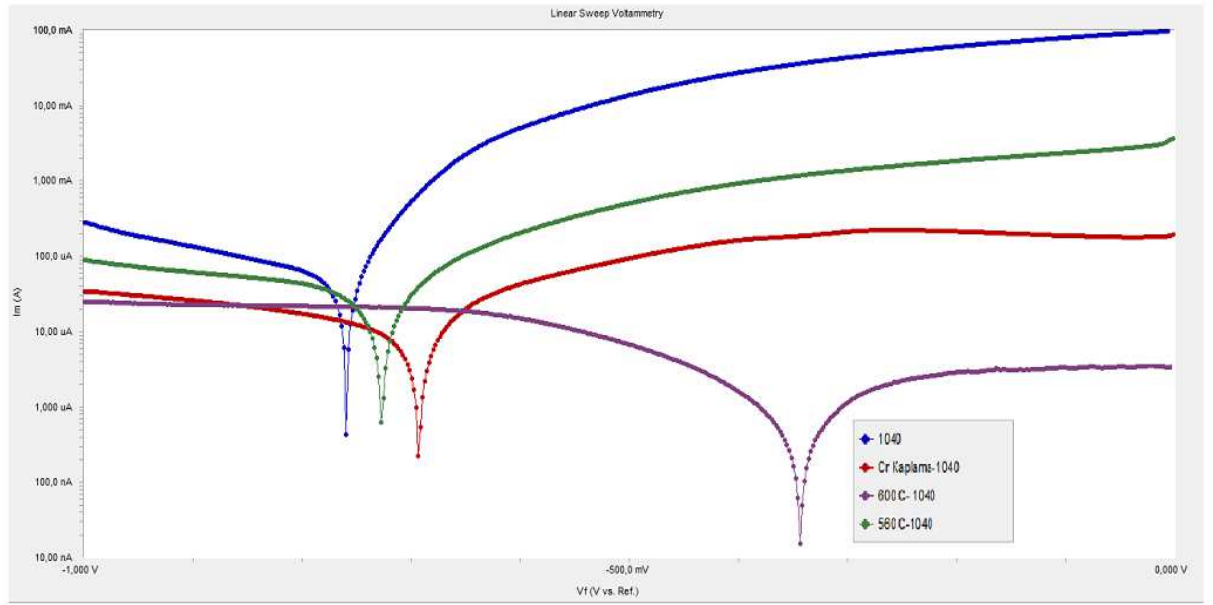


Şekil 6.35 Korozyon deney düzeneğinin görüntüsü

Şekil 6.36 'da % 3.5' lik NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1010 çeliğine ait değişik koşullarda ki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri verilmiştir. Şekil 6.37' de ise % 3.5' lik NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1040 çeliğine ait değişik koşullarda ki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri gösterilmiştir. Krom kaplanmış ve sonrasında 700 ve 800 °C sıcaklıklarda plazma nitrürlenmiş AISI 1040 çelik numunelerde korozyon deneyleri yüzeyde homojen bir yapının olmaması nedeniyle yapılamamıştır. Çizelge 6.12' de % 3.5' lik NaCl çözeltisinde yapılan korozyon deneylerinde, farklı koşullarda işlem gören malzemelerin E_{kor} (mV) değerleri görülmektedir.



Şekil 6.36 % 3.5' lik NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1010 çeliğine ait değişik koşullarda ki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

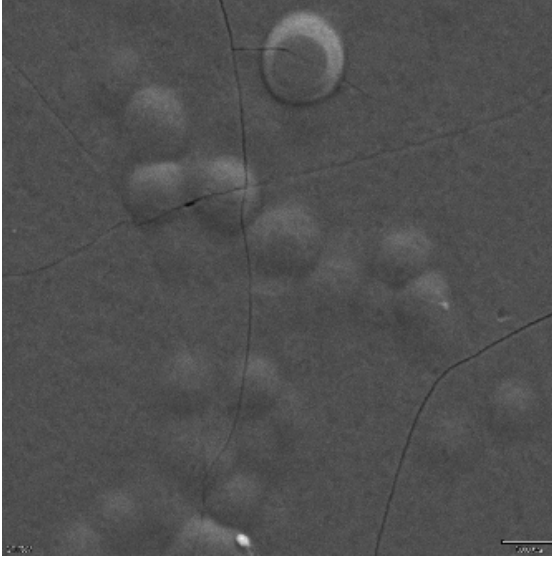


Şekil 6.37 % 3.5' lik NaCl çözeltisinde yapılan AISI 1040 çeliğine ait değişik koşullarda ki potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

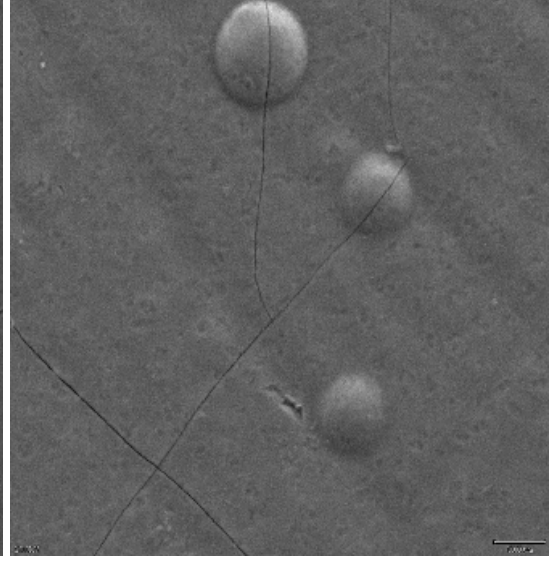
Çizelge 6.10 % 3.5' lik NaCl çözeltisinde yapılan korozyon deneylerinde malzemelerin E_{kor} (mV) değerleri

MALZEME	E_{kor} (mV)
AISI 1010 çeliği	-765
AISI 1040 çeliği	-759
Elektrolitik sert krom kaplanmış AISI 1010	-749
Elektrolitik sert krom kaplanmış AISI 1040	-693
600 °C' de plazma nitrülenmiş elektrolitik sert krom kaplı 1010 çeliği	-342
600 °C' de plazma nitrülenmiş elektrolitik sert krom kaplı 1040 çeliği	-344
700 °C' de plazma nitrülenmiş elektrolitik sert krom kaplı 1010 çeliği	-526
700 °C' de plazma nitrülenmiş elektrolitik sert krom kaplı 1040 çeliği	---
800 °C' de plazma nitrülenmiş elektrolitik sert krom kaplı 1010 çeliği	-708
800 °C' de plazma nitrülenmiş elektrolitik sert krom kaplı 1040 çeliği	---
560 °C' de gaz nitrokarbürülenmiş elektrolitik sert krom kaplı 1010 çeliği	-728
560 °C' de gaz nitrokarbürülenmiş elektrolitik sert krom kaplı 1040 çeliği	-730

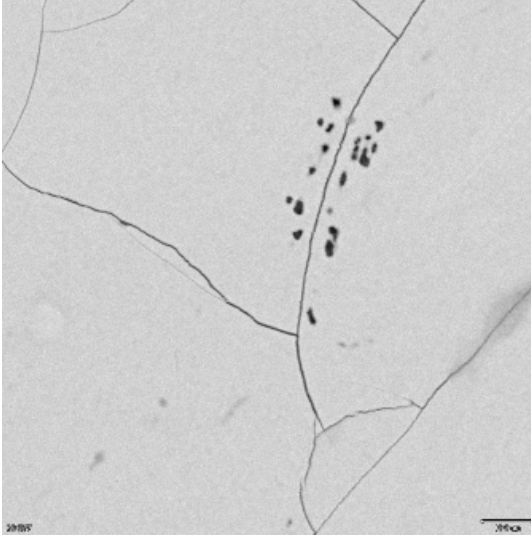
Krom kaplanmış numunelerin korozyon deneylerinden sonraki yüzey görüntüleri incelenmiştir. Krom kaplamanın doğasında bulunan mikro çatlaklar etrafında Şekil 6.38' de görüleceği gibi korozyon deneyleri sonrasında kaplamada kalkma ve kabarmalar oluşmuştur. Yapılan nitrüleme ve nitrokarbürleme işlemleriyle mikro çatlakların neden olduğu korozyon hasarları mikro çatlakların doldurulması neticesinde azalma eğilimi içerisine girmişlerdir. Numunelerin E_{kor} değerleri de bunu desteklemektedir.



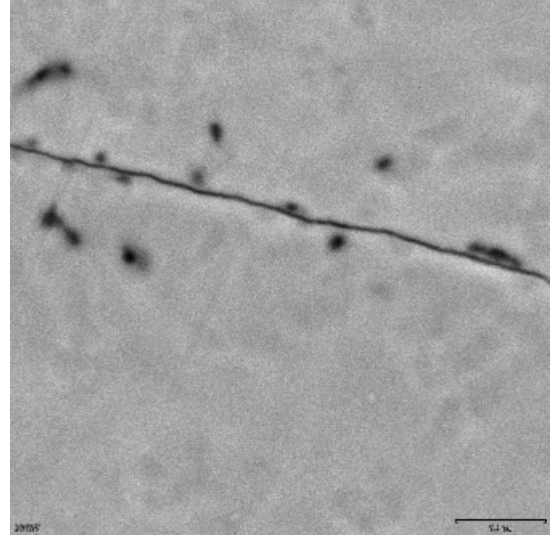
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 6.38 (a-d) Korozyon deneyleri sonrası krom kaplanmış numunelerin yüzey görüntüleri

6.3 Elde Edilen Sonuçlar ve İrdelenmesi

Yüzeyleri sert krom kaplandıktan sonra plazma nitrürleme ve gaz nitrokarbürleme işlemlerine tabi tutulan AISI 1010 ve AISI 1040 çelik yüzeylerin karakterizasyonu sonucunda aşağıdaki bulgular tespit edilmiştir.

Çelik yüzeylerdeki krom kaplama, birçok araştırmacının da [16], [17], [21], [23], [50] tespit ettiği gibi, çatlaklı bir yapıda oluşmuştur. Nitrürleme sonrasında bu çatlakların kapandığı hem enine kesit hem de yüzey görüntülerinden anlaşılabilmektedir. Mikro çatlakların kapanmasının nedeni, krom kaplama içerisine yayınan azot nedeniyle oluşan nitrürlerdir. Ayrıca, plazmanın etkisiyle yüzey pürüzlülüğünün arttığı da tespit edilmiştir.

XRD, EDS ve Çizgi Tarama (Line Scan) analizleri plazma nitrürlemede 600, 700 ve 800 °C' de azot yayınının gerçekleştiğini göstermektedir. XRD analizlerinde CrN ve Cr₂N bileşikler tespit edilmiştir. 560 °C' de yapılan gaz nitrokarbürlemede ise herhangi bir nitrür/karbür fazı tespit edilmemiştir.

Enine kesit mikroyapı analizleri, plazma nitrürlemede artan sıcaklık ile CrN ve Cr₂N' den oluşan nitrür tabakasının kalınlığının arttığını göstermiştir. En iyi sonuçlar, AISI 1010 çelik yüzeylerindeki krom kaplama tabakasında belirlenmiştir. Çelik yüzeylerde belirtilen sıcaklıklarda azotun krom tabakası boyunca yayılması için 5 saat plazma nitrürleme süresi yetersiz kalmıştır. Bu nedenle her koşulda artık krom mevcuttur. Bu artık krom yapısını Lunarska [16] ve Wang [20] yaptıkları çalışmalarda da tespit etmişlerdir.

AISI 1040 çelik yüzeylerde EDS ve Çizgi Tarama (Line Scan) analizlerinde yayınma tabakasında oksijen tespit edildiğinden yüzeydeki dantelimsi tabakanın kromoksit olması muhtemeldir. Bu tabaka krom nitrür tabakasının hemen üstünde yer almaktadır. Plazma nitrürlemede gaz karışımının içerisindeki safsızlıkların 700 ve 800 °C' de oksit tabakasına neden olduğu düşünülmektedir. 560 °C' de yapılan gaz nitrokarbürlemede ise koşulların azot ve karbonun krom içerisine yayılması için uygun olmadığı tespit edilmiştir.

Enine kesit görüntüleri incelendiğinde, yapılan plazma nitrürleme işleminde, tüm işlem sıcaklıklarında kromun çelik altlık malzeme içerisine girerek burada yayılım tabakası oluşturduğu tespit edilmiştir. Gaz nitrokarbürleme işleminde ise, bir miktar kromun çelik altlık malzemesi içerisine girerek yayılım tabakası oluşturduğu tespit edilmiştir.

Sert krom kaplamanın yapışma deney sonuçları VDI 3198 Rockwell-C indentasyon testine göre iyi çıkmıştır. Krom kaplı AISI 1010 çeliklerine plazma nitrürleme işlemi uygulandıktan sonra yapışma testi yapılmıştır. Her bir sıcaklık koşulu için yapışmanın iyi olduğu belirlenmiştir. AISI 1040 çeliğinde ise 600 °C' de yapışmanın iyi 700 ve 800 °C' de yapışmanın VDI 3198 standartına göre kabul edilemez grubuna girdiği tespit edilmiştir.

Sertlik ölçümleri incelendiğinde, elektrolitik sert krom kaplama işlemi çelik yüzeylerinde sertlik artışına neden olmuştur. En yüksek sertlik değeri 800 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış AISI 1010 çeliğinde gözlemlenmiştir. Bu çelik türlerinde, artan plazma nitrürleme sıcaklığıyla beraber sertliklerin arttığı da tespit edilmiştir.

Krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinde ise 600 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış numunede sertliğin arttığı tespit edilmiştir. Ancak 700 ve 800 °C' de plazma nitrürleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış numunelerde sertlik deneyleri tabakanın kalkmış olmasından dolayı ölçülememiştir.

Nitrürlemeyle tespit edilen bu sertlik artışını, Hedeyati [17] çalışmasında da tespit etmiştir. Buna karşın Menthe [21] de yaptığı çalışmada plazma nitrürleme işlemi sonrasında, sertliğin aynı kaldığını ileri sürmüştü ve bunu da nitrürlemeden kaynaklanan sertlik artışının, işlem sıcaklığına bağlı olarak sertlikteki düşüşle dengelendiğine bağlamıştır.

560 °C' de yapılan gaz nitrokarbürlemede ise her iki numunede, işlem sıcaklığına ve nitrür/karbür tabakasının oluşmamasına bağlı olarak sertlikte bir miktar düşüş gözlemlenmiştir.

Korozyon deneyleri sonuçları incelendiğinde, korozyon direncinin krom kaplanmış numunelerde kaplanmamışlara nazaran arttığı tespit edilmiştir.

Sert krom kaplanmış ve farklı sıcaklıklarda plazma nitrülenmiş AISI 1010 çelik numunelerinde % 3.5' lik NaCl çözeltisinde korozyona dirençleri artmıştır. 600 °C' de plazma nitrülenmiş krom kaplı AISI 1010 çelik numune, korozyon potansiyeli en pozitif değere sahiptir.

AISI 1010 krom kaplanmış çelik numuneler için plazma nitrülenmiş ve gaz nitrokarbürülenmiş numuneler için her sıcaklık değerinde işlem görmemiş krom kaplı numunelere göre korozyon direncinin arttığı gözlemlenmiştir.

Krom kaplanmış AISI 1040 çeliğinde ise, 600 °C' de plazma nitrüleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış numunede korozyon direncinin işlem görmemiş krom kaplamaya nazaran arttığı tespit edilmiştir. Ancak 700 ve 800 °C' de plazma nitrüleme işlemine tabi tutulan krom kaplanmış numunelerde korozyon deneyleri, tabakadaki homojen olmayan yapı nedeniyle ölçülememiştir.

560 °C' de yapılan gaz nitrokarbürülenmiş krom kaplı AISI 1010 ve 1040 çelik numunelerde nitrokarbürleme gerçekleşmediğinden değerler krom kaplı numunelere yakın çıkmıştır.

Elektrolitik sert krom kaplamalardaki korozyon sonrası görüntüler incelendiğinde, Hedayati [17] ninde tespit ettiği gibi korozyonun çatlak çevresinde kalkma ve kabarmalara neden olduğu görülmektedir. Bu mikro çatlakların kapanmasıyla korozyon direncinin arttığını birçok araştırmacı çalışmalarında belirlemiştir [16], [17], [21], [23]. Bu durum, krom kaplamanın doğasında olan çatlaklı yapının nitrür fazlarıyla kapanmış olmasına ve krom nitrürün korozyon direncine bağlıdır.

Plazma nitrüleme sırasında nitrür fazlar eş zamanlı olarak hem krom kaplamanın içerisinde hem de dışarısında büyürler. Bu reaksiyonlarla beraber mikro çatlakların kapanmasına sebep olan bir hacim değişikliği meydana gelmektedir. Hacim genişlemesi olarak, kromdan CrN oluşumuna değişen bu oran % 148 iken yine kromdan Cr₂N oluşmasında değişen bu oran % 250' dir [23,28]. Bu hacim oranlarında büyüyen fazlar kaplamadaki mikro çatlakları kapatmış ve istenilen iyileştirmelerin yapılmasını sağlamıştır.

SONUÇ VE ÖNERİLER

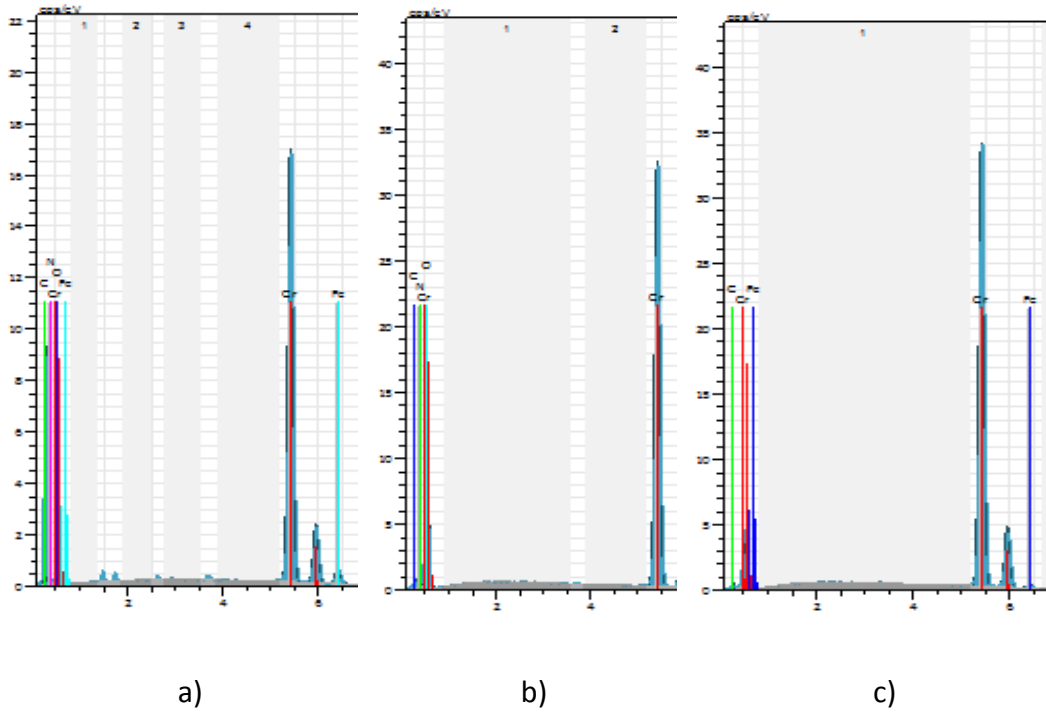
- Sert krom kaplanmış AISI 1010 ve 1040 çeliklerinde 600, 700 ve 800 °C sıcaklıklarında 5 saat süre ile yapılan plazma nitrürleme işlemleri sonucunda krom tabakasına azot yayınmıştır.
- Krom tabakasına azot yayınımlı sonunda, CrN ve Cr₂N fazları oluşmuş, bu tabakanın altında azotun yayınlmadığı artık krom tabakasının kaldığı görülmüştür. Krom bir miktar çelik içerisine yayınlmıştır.
- Krom kaplamadaki çatlaklı yapı, plazma nitrürleme işlemleri sonrasında ortadan kalkmıştır.
- Yapışma deney sonuçları, VDI 3198 Rockwell-C indentasyon testinin standartlarına göre kabul edilebilir sınırlar içerisindedir. Sadece AISI 1040 çeliği için 700 ve 800 °C' de plazma nitrürleme işlemleri sonunda oluşan tabakalarda iyi bir yapışma olmamıştır.
- Sertlik değerlerinde artış tespit edilmiştir. 516 HV olan krom kaplama sertliği plazma nitrürleme sonunda en yüksek 912 HV olmuştur. Bu değer krom kaplanmış ve 800 °C' de 5 saat plazma nitrürleme deney koşullarındaki AISI 1010 çelik numunede elde edilmiştir.
- Sert krom kaplama ve nitrürleme işlemi sonucunda, korozyon direnci artmıştır. En iyi değerler krom kaplanan ve sonrasında 600 °C' de plazma nitrürlenmiş AISI 1010 çelik numunede tespit edilmiştir.

- Gaz nitrokarbürleme işleminde bu çalışmada seçilen 560 °C işlem sıcaklığı % 45 CO₂ + % 29 NH₃ + % 26 N₂ gaz karışımı ve 8 saat işlem süresi parametrelerinin deney amaçlarına göre uygun olmadığı tespit edilmiştir.

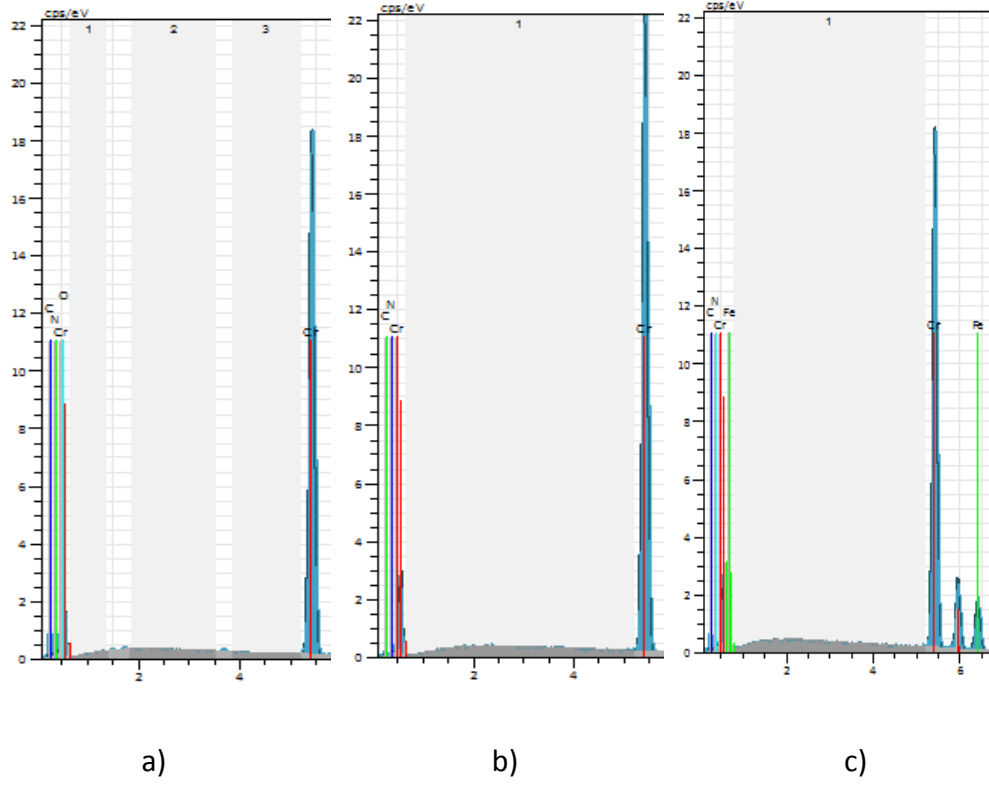
Öneriler:

- En iyi nitrürleme koşulu için azot yayınma tabakası boyutunda krom kaplama yapılarak azotun bütün krom kaplama boyunca yayınması sağlanarak, artık krom ortadan kaldırılabilir. AISI 1010 ve AISI 1040 çelik yüzeylerinde sadece CrN ve Cr₂N' den oluşan nitrür tabakası elde edilebilir. Böyle bir yapının aşınma direnci de ölçülebilir.
- Belirli deney ve hesaplarla, azotun krom kaplama içindeki difüzyon katsayısı hesaplanabilir.
- Plazma nitrürleme deney parametreleri değiştirilerek deneyler tekrarlanabilir.

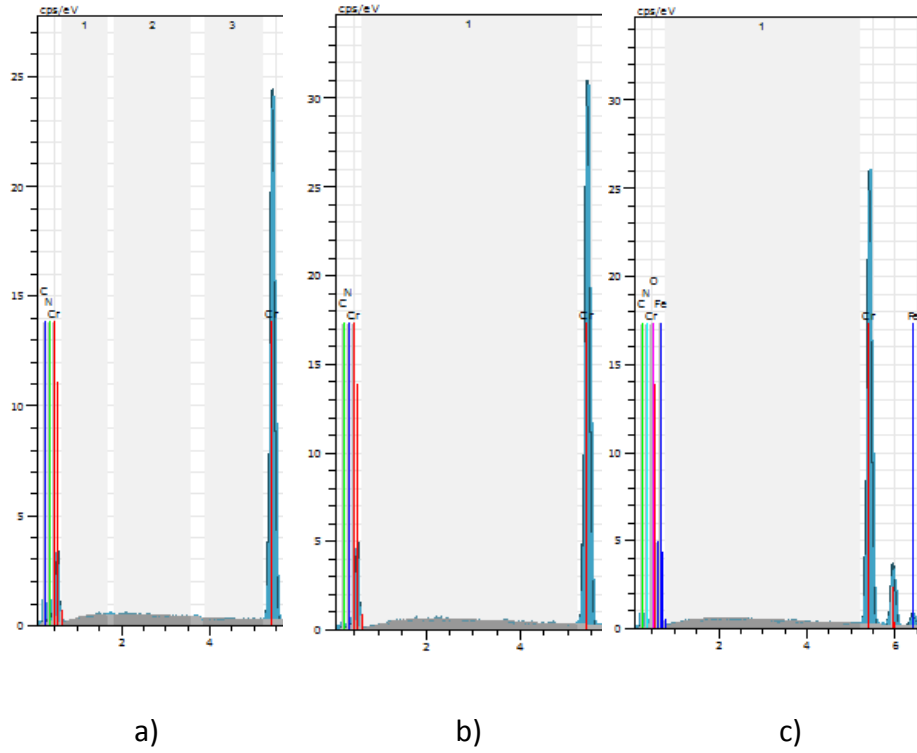
EDS GRAFİKLERİ



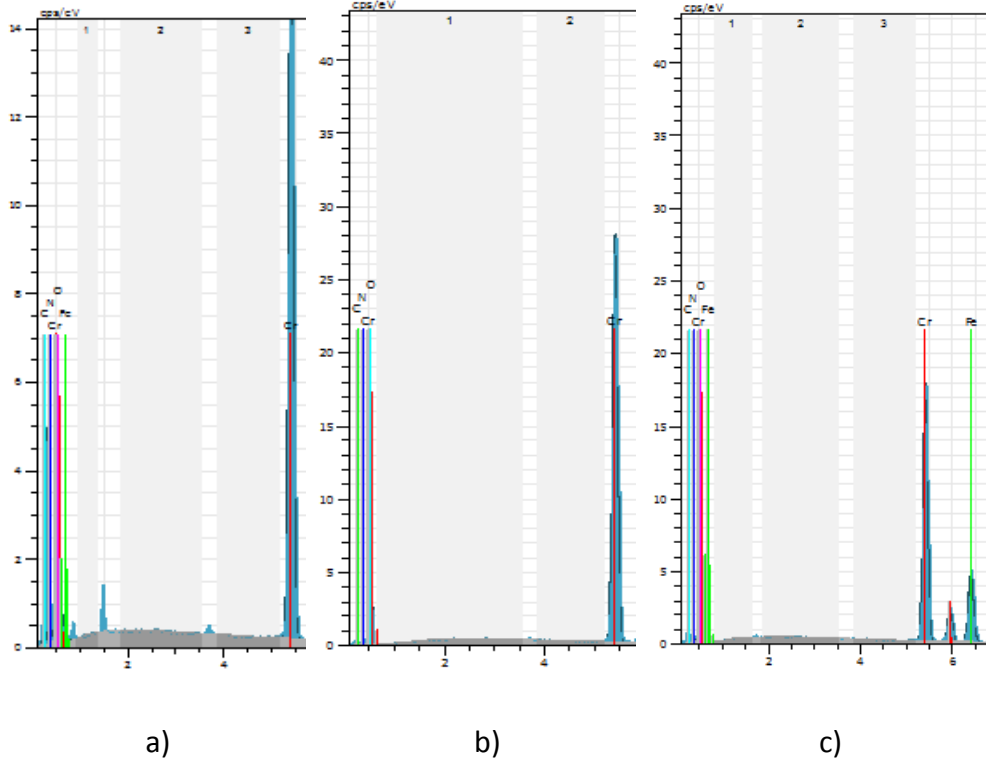
Şekil EK A-1 Sert krom kaplandıktan sonra 600 °C' de plazma nitrülenmiş AISI 1010 çeliğinin EDS analiz grafikleri a) 1. nokta b) 2. nokta c) 3. nokta



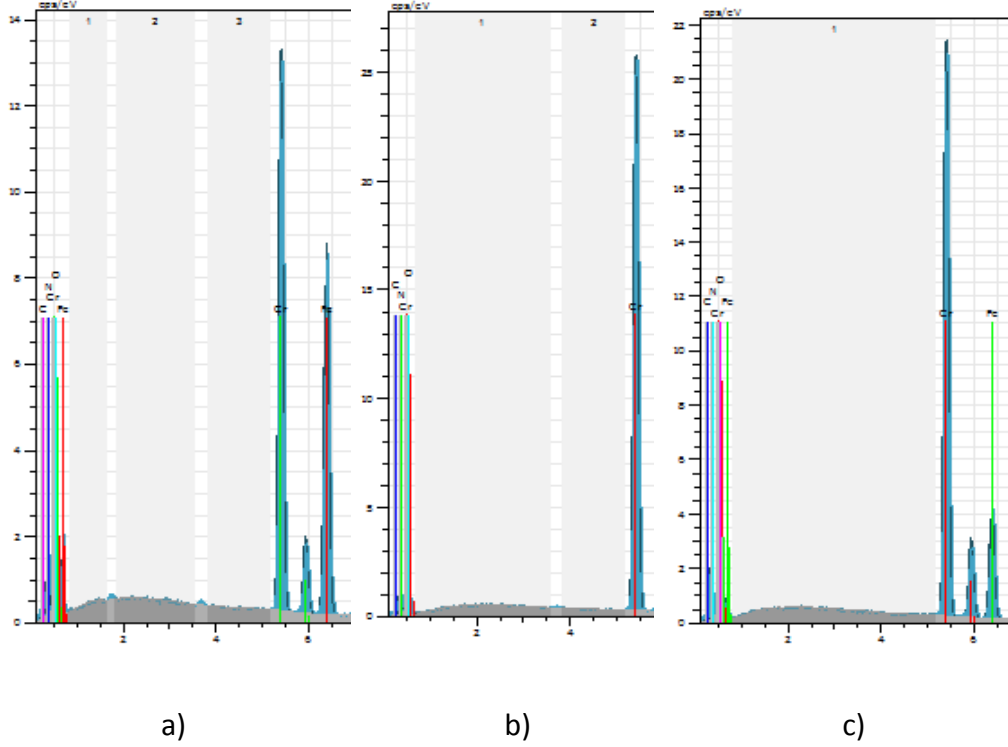
Şekil EK A-2 Sert krom kaplandıktan sonra 700 °C' de plazma nitrülenmiş AISI 1010 çeliğinin EDS analiz grafikleri a) 1. nokta b) 2. nokta c) 3. nokta



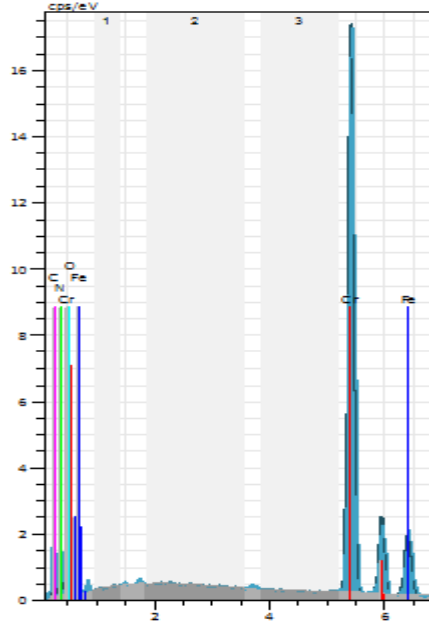
Şekil EK A-3 Sert krom kaplandıktan sonra 800 °C' de plazma nitrülenmiş AISI 1010 çeliğinin EDS analiz grafikleri a) 1. nokta b) 2. nokta c) 3. nokta



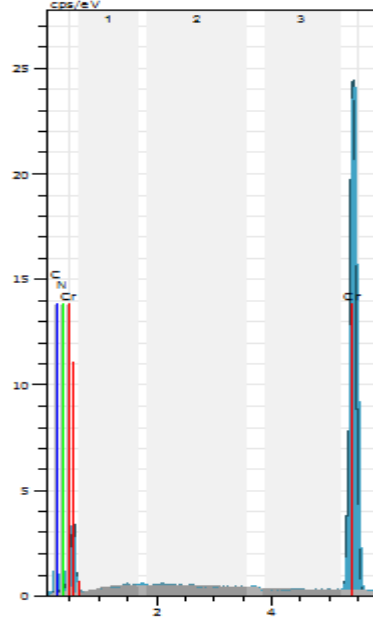
Şekil EK A-4 Sert krom kaplandıktan sonra 600 °C' de plazma nitrülenmiş AISI 1040 çeliğinin EDS analiz grafikleri a) 1.nokta b) 2. nokta c) 3. nokta



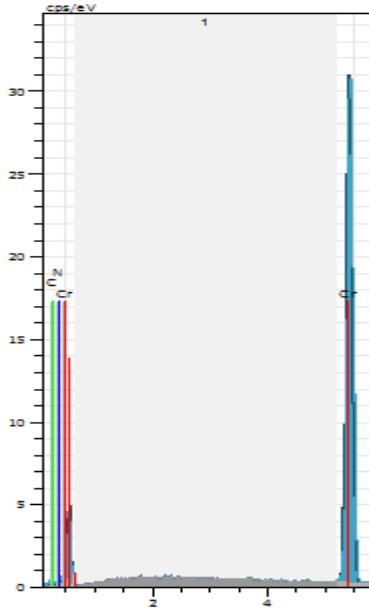
Şekil EK A-5 Sert krom kaplandıktan sonra 700 °C' de plazma nitrülenmiş AISI 1040 çeliğinin EDS analiz grafikleri a) 1. nokta b) 2. nokta c) 3. nokta



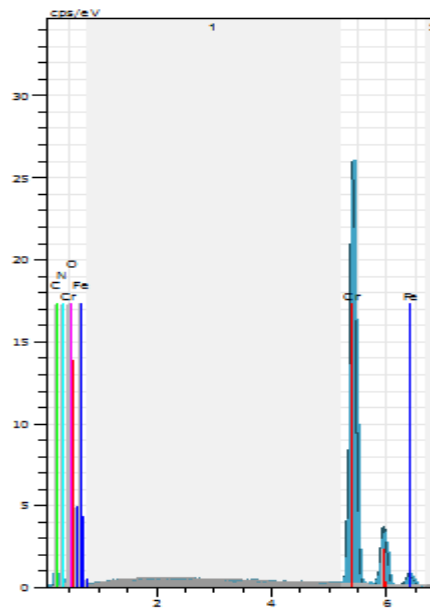
a)



b)



c)



d)

Şekil EK A-6 Sert krom kaplandıktan sonra 800 °C' de plazma nitrürlenmiş AISI 1040 çeliğinin EDS analiz grafikleri a) 1. nokta b) 2. nokta c) 3. nokta d) 4. nokta

KAYNAKLAR

-
- [1] Çolak, E., (2010). İyon Nitrürlenmiş AISI 5140 Çeliğinin Korozyon Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
 - [2] Güneş, İ., (2006). Plazma Nitrürlenme ile Çelikler Üzerinde Kompleks Kaplamaların Oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, AKÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
 - [3] Korozyon Derneği, Korozyon ve Önemi, www.korozyondernegi.org.tr, 24 Mayıs 2011.
 - [4] Ülker, Ş., (2006). Puls Nitrürlenme Cihazının Tasarımı ve AISI 52100 Çeliğinin Plazma Nitrürlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, AKÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
 - [5] Develi, F., (2010). Plazma Nitrürlenme ve Borlama ile Çift Yüzey İşlem Uygulanmış AISI 8620 Çeliğinin Aşınma Davranışının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, AKÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
 - [6] Üstel, F., (2006). Çelik Yüzeylerin Kaplanması, Bölüm IV, Termokimyasal Kaplama Yöntemleri, Erdemir Bilim ve Teknoloji Serisi, K.Ereğli.
 - [7] Denктаş, Ö., (2009). Plazma Nitrokarbürlenen AISI 4140 Çeliğinin Tribolojik ve Korozyon Davranışı Üzerine Post-Oksidasyon İşleminin Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
 - [8] Gerçekcioğlu, E., (1998). Plazma Nitrürlenmiş Ve Beyaz Tabakası Kaldırılmış AISI H13 ve 722M24 Çeliklerinin Farklı Sıcaklıklarda Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
 - [9] Korkmaz, E.E., (2009). İyon İmplantasyonu ve Plazma Nitrürlenme Yöntemi ile Yüzeyi Sertleştirilmiş Soğuk İş Takım Çeliklerinin İç Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
 - [10] Topçu, Ş., (2010). Farklı Şartlarda Plazma Nitrürlenmiş Çeliklerin Aşınma Davranışının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

- [11] Alsaran, A., (2001). Dupleks Yüzey İşlemi Uygulanmış AISI 5140 Çeliğin Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum
- [12] Karaoğlu, S., (1998). Plasma Nitriding Behavior of AISI 5140 Steel, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [13] Arslan, O., (2001). Plazma Nitrürleme Isıl İşleminin Makina Parçalarının İçyapı Mukavemet Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [14] Pınarbaşı, Z.A., (2004). Islah Edilmiş Çeliklerde Nitrasyonla Yüzey Sertleştirme Sonrasında Mekanik ve Dokusal Özelliklerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] Bayrak, Ö., (2007). Plazma ile Nitrülenmiş CoCrMo İmplant Malzemenin Yapısal ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [16] Lunarska, E., Nikiforow, K., Wierzchon, T. ve Pokorska, I.U., (2001). "Effect of Plasma Nitriding on Hydrogen Behavior in Electroplated Chromium Coating", Surface and Coatings Technology, 145:139-145
- [17] Hedayati, M.K., Mahboubi, F. ve Nickchi, T., (2009). "Comparison of Conventional and Active Screen Plasma Nitriding of Hard Chromium Electroplated Steel", Vacuum, 83:1123-1128.
- [18] ASM Handbook Committee., (1998). Desk Edition, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [19] Wang, L., Nam, K.S. ve Kwon, S.C., (2003). "Transmission Electron Microscopy Study of Plasma Nitriding of Electroplated Chromium Coating", Applied Surface Science, 207:372-377.
- [20] Wang, L., Kim, D.S., Nam, K.S., Kim, M. ve Kwon, S.C., (2005). "Microstructure of Electroplated Hard Chromium Coatings After Plasma Nitrocarburizing", Surface & Coatings Technology, 190:151-154.
- [21] Menche, E. ve Rie, K.T., (1999). "Plasma Nitriding and Plasma Nitrocarburizing of Electroplated Hard Chromium to Increase The Wear and The Corrosion Properties", Surface and Coatings Technology, 112:217-220.
- [22] Karakan, M., (2004). Plazma Nitrokarbürlenen AISI 4140 ve 1020 Çeliklerinin Yapısal, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- [23] Wang, L., Nam, K.S. ve Kwon, S.C., (2007). "Effect of Plasma Nitriding of Electroplated Chromium Coatings on The Corrosion Protection C45 Mild Steel", Surface & Coatings Technology, 202:203-207.
- [24] Gallo, S.C., (2009). Active Screen Plasma Surface Engineering of Austenitic Stainless Steel for Enhanced Tribological and Corrosion Properties, Doktora Tezi, University of Birmingham, Birmingham.

- [25] Seçmen, P., (1999). Nitrokarbürasyon, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [26] Karslı, M.A., (2005). AISI 440C ve 52100 Yatak Çelikleri Üzerinde Oluşturulan Karbür ve Borürlerin Yüksek Sıcaklıklarda Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, AKÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- [27] Çimen, Ö., (2000). Sıcak İş Takım Çeliklerinin Nitrokarbürizasyon İşlemine Propanın Etkisi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [28] Buijnsters, J.G., Shankar, P., Sietsma, J. ve Meulen, J.J., (2003). "Effect Gas Nitriding of Chromium in $\text{NH}_3\text{-H}_2$ Atmosphere", Materials Science and Engineering, A341:289-295.
- [29] Wikipedia, Steel, www.wikipedia.org, 15 Kasım 2011.
- [30] Cömert Çelik, Çelik Türleri, www.comertcelik.com, 04 Aralık 2011.
- [31] Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Öğrencileri, Demir-Karbon Denge Diyagramı, www.kocaelimakine.com, 16 Ekim 2011
- [32] Altakan, C., (2011). AISI 1010 ve 1040 Çeliklerine Nikel ve Krom Yayındırılarak Yüzey Özelliklerin Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [33] Teknik Bilgi, Mühendislik ve Bilim Dalları İçin Vazgeçilmez Bilgiler, Alaşım Elementlerinin Çeliğin Yapısına Etkisi, www.teknikbilgi.wordpress.com, 01 Nisan 2011.
- [34] Ekomaxi Modüler Su Depolama Sistemleri, Demir İçindeki Krom Elementinin Korozyon Oranı Üzerindeki Etkisi, www.ekomaxi.com, 09 Aralık 2011.
- [35] ParkTek Grup İnşaat Çelik Peyzaj ve Park Tasarım, Alaşım Elementlerinin Çeliğin Yapısına Etkisi, www.parktekgrup.com.tr, 01 Kasım 2011.
- [36] Karaaslan, A., (2009). Laser ile Malzeme İşlemleri, Literatür Ders Kitapları, İstanbul.
- [37] Cansever, N., (2011) , Yüzey İşlemlerinde İleri Teknolojiler Ders Notları, YTÜ, İstanbul.
- [38] Grube, W.L. and Verhoff, S., (1991). Plasma Ion Carburizing, ASM Handbook 4, ASM International, Materials Park, Ohio, pp.803-827.
- [39] ASM Handbook Committee., (1991). Heat Treating, ASM Handbook 4, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [40] Wang, L., Lu, J. ve Lu, K., (2005). "Chromizing Behaviors of a Low Carbon Steel Processed by Means of Surface Mechanical Attrition Treatment", Acta Materialia, 53:2081–2089
- [41] ASM Handbook Committee., (1994). Surface Engineering, ASM Handbook 5, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [42] Fırat Üniversitesi, Katılarda Difüzyon, www.firat.edu.tr, 14 Aralık 2011.

- [43] Fidan L., (2006). Saf Alüminyum ve Saf Bakırın Difüzyon Kaynağında Arafazların Oluşumu ve Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
- [44] Akbulut, H., (2006). Difüzyon (Yayınma) Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- [45] Pye, D., (2003). Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [46] Özdemir, U. ve Erten M., (2003). “Plazma (iyon) Nitrürleme ve Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi”, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 1/2:41-48.
- [47] Polat, Ş., Atapek, Ş.H. ve Topaç, H., (2011). “Gaz Nitrasyon ile Yüzeyleri Sertleştirilmiş AISI 4140 ve DIN 1.2344 Çeliklerinde Mikroyapısal Karakterizasyon”, 6th International Advanced Technologies Symposium, 16-18 Mayıs 2011, Elazığ.
- [48] Okamoto, H., (1990). Phase Diagrams for Binary Alloys, Cr-N Phase Diagram, ASM International.
- [49] İstanbul Isıl İşlem, Plazma Nitrürleme Görüntüsü, www.istanbulisil.com, 06 Aralık 2011.
- [50] ASM Handbook Committee., (1987). Corrosion, ASM Handbook Volume 13, ASM International, Materials Park, Ohio.
- [51] Çalışkan, M., (2005). Katodik Ark PVD Yöntemiyle ZrN ve Zr/ZrN Kaplamaların Biriktirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [52] Vidakis, N., Antoniadis, A. ve Bilalis, N., (2003). “The VDI 3198 Indentation Test Evaluation of a Reliable Qualitative Control for Layered Compounds ”, Journal of Materials Processing Technology, 143-144: 481-485.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mustafa KOCABAŞ
Doğum Tarihi ve Yeri : 11. 08. 1986 / BEYŞEHİR
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mustafakocabas11@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan/Bölüm	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Metalurji ve Malzeme	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lisans	Metalurji ve Malzeme	Kocaeli Üniversitesi	2009
Lise	Sayısal	Beyşehir A. A. Anadolu Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2010	Selçuk Üniversitesi	Araştırma Görevlisi