

766673

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLAZMA NİTRÜRLENMİŞ SERT METAL
PLAKETLERDE PERFORMANS ARAŞTIRMASI**

**DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Ufuk ÖZDEMİR
(503982013)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 Ocak 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Aralık 2004**

**Tez Danışmanı :
Diğer Jüri Üyeleri**

Yrd.Doç.Dr. Muzaffer ERTEN

Prof.Dr. Barlas ERYÜREK (İ.T.Ü.)

Prof. Necati TAHRALI (Y.T.Ü.)

Yrd.Doç.Dr. Haydar LİVATYALI (İ.T.Ü.)

Yrd.Doç.Dr. İsmail LAZOĞLU (K.Ü.)

OCAK 2005

ÖNSÖZ

Bu çalışmada; talaş kaldırmada kullanılan sinterlenmiş karbür plaketer değişik nitrürleme şartları altında plazma nitrürlenmişler ve belli talaş kaldırma şartları altında kullanılarak talaş kaldırma performansları araştırılmış, diğer bir ifadeyle plazma nitrürlemenin sinterlenmiş karbür plaketerin performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla; sinterlenmiş karbür takımlar sistematik olarak değiştirilen nitrürleme parametreleri (nitrürleme süresi, nitrürleme sıcaklığı ve gaz karışım oranı) altında plazma nitrürlenmiş, nitrürleme sonrasında değişen yüzey özellikleri (yüzey sertliği, sürtünme katsayısı, yüzeyde meydana gelen tabaka kalınlıkları) tespit edilmiş ve belli kesme şartları altında talaş kaldırma deneylerine tabii tutularak plaketerde meydana gelen aşınma ve ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda elde edilen bütün verilerin istatistiksel analizi yapılmıştır. Böylece sistematik olarak değiştirilen plazma nitrürleme parametrelerinin sinterlenmiş karbür takımın talaş kaldırma performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Bu çalışma sırasında; gerekli imkanı sağlayan İTÜ Makina Fakültesi Malzeme ve İmalat Teknolojileri ABD Bölüm Başkanlığına, ihtiyaç duyduğum plaketeri sağlayan BÖHLER Sert Maden ve Takım Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye, laboratuvarlarını kullanma imkanı bulduğum Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölümüne, talaş kaldırma deneylerinin gerçekleştirilmesini sağlayan 7 nci Bakım Merkezi Komutanlığına, çalışmam için gerekli imkanı sağlayan Hava Kuvvetleri Komutanlığı, Hava Harp Okulu Komutanlığı ve Hava Harp Okulu Dekanlığı Planlama Değerlendirme ve Geliştirme Şube Müdürlüğüne teşekkürlerimi arz ederim. Ayrıca çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen tez danışmanın Yrd.Doç.Dr.Muzaffer ERTEN'e, görüş ve önerileriyle çalışmama yön vermemi sağlayan Yrd.Doç.Dr.Haydar LİVATYALI'ya, özellikle iyon nitrürleme deneyleri sırasında yardımını esirgemeyen Yrd.Doç.Dr.Turgut GÜLMEZ'e, her zaman yakın ilgisini ve desteğini gördüğüm Prof.Necati TAHRALI'ya ve burada ismini sayamadığım bana emeği geçmiş tüm hocalarıma saygılarımı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

OCAK 2005

Ufuk ÖZDEMİR

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	vi
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
2. YÜZEY SERTLEŞTİRME VE NİTRÜRASYON	8
2.1. Isıl İşlemler	8
2.2. Yüzey Sertleştirme	8
2.3. Nitrürleme	11
2.3.1. Nitrürlenebilirlik	12
2.3.1.1. Nitrürleme Hızı ve Derinliği	12
2.3.1.2. Sertlik	15
2.3.1.3. Yorulma Dayanımı	16
2.3.1.4. Tribolojik Özellikler	17
2.3.2. Nitrürleme Yönteminin Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi	17
2.3.3. Nitrürleme Yöntemleri	19
2.3.3.1. Gaz Nitrürleme	19
2.3.3.2. Banyo (Sıvı) Nitrürleme	20
2.3.3.3. Toz Nitrürleme	21
2.3.3.4. Plazma (İyon) Nitrürleme	21
2.3.4. Plazma Nitrürleme İle Oluşan Yüzeyin Genel Yapısı	25
2.3.4.1. Beyaz Tabaka	25
2.3.4.2. Difüzyon Tabakası	27
2.3.5. Plazma Nitrürleme Konusunda Yapılmış Çalışmalar	29
2.3.5.1. Plazma Nitrürleme Parametrelerinin Malzeme Yüzey Özellikleri Üzerindeki Etkisi	29
2.3.5.2. Plazma Nitrürlemenin Diğer Yüzey Sertleştirme Yöntemleriyle İlişkisi	35
2.3.5.3. Plazma Nitrürleme Mekanizmasının İncelenmesi	36
2.3.5.4. Plazma Nitrürleme Sonrasında Değişen Tribolojik Özelliklerin İncelenmesi	38
2.3.5.5. Plazma Nitrürleme Konusunda Yapılmış Diğer Çalışmalar	41
3. TAKIM ÖMRÜ VE AŞINMA MEKANİZMALARI	43
3.1. Giriş	43
3.2. Takım Malzemeleri	45
3.3. Sinterlenmiş Karbür Plaketler	48
3.4. WC+TiC+TaC-Co Esaslı Sinterlenmiş Karbür Plaketler	49

3.5. Sinterlenmiş Karbür Plaketlerde Meydana Gelen Hasar Tipleri	51
3.5.1. Serbest Yüzey Aşınması ve Krater Aşınması	56
3.5.2. Yenme Aşınması (Notch Wear)	60
3.5.3. Burun Aşınması (Nose Wear)	61
3.5.4. Mekanik ve Termal Çatlaklar	61
3.5.5. Ağız Birikintisi (Built-up Edge-BUE) Oluşumu	61
3.5.6. Plastik Deformasyon	62
3.5.7. Kenar Çentiklenmesi (Chipping veya Fritting)	62
3.5.8. Plaketin Kırılması	63
3.5.9. Yıpranma Aşınması (Attrition Wear)	63
3.5.10. Abrazyon Aşınması	64
3.6. Kaplanmış Sinterlenmiş Karbür Plaketlerin Talaş Kaldırma Performansı	64
3.7. Sinterlenmiş Karbür Plaketlerde Meydana Gelen Aşınma	66
4. PLAZMA NİTRÜRLEME DENEYLERİ	68
4.1. Plazma Nitrüleme Mekanizması	68
4.2. Deney Planı	71
4.3. Plazma Nitrüleme Deneyleri	74
4.3.1. Plazma Nitrüleme Deney Tertibatı	74
4.3.2. Plazma Nitrüleme Deney Şartları	77
4.3.3. Plazma Nitrülenecek Plaketin Seçimi	79
4.3.4. Plazma Nitrüleme Deneylerinin Yapılması	80
4.4. Yüzey Sertliğinin Ölçülmesi	82
4.5. Beyaz Tabaka ve Difüzyon Tabakası Kalınlıklarının Ölçülmesi	85
5. TALAŞ KALDIRMA DENEYLERİ	92
5.1. Giriş	92
5.2. Talaş Kaldırma Şartları	92
5.3. Ağırlık Kaybının Ölçülmesi	96
5.4. Takımlarda Oluşan Aşınmanın Ölçülmesi	98
5.5. Serbest Yüzey Aşınmasının Ölçülmesi	106
5.6. Sürtünme Katsayısının Ölçülmesi	112
6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRMESİ	116
6.1. Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi	116
6.1.1. Korelasyon Analizi	116
6.1.2. Ortalama Değer Analizi	119
6.1.3. Hata Analizi	126
6.2. Plazma Nitrüleme Şartlarına Bağlı Olarak Yüzey Sertliğindeki Değişim	128
6.3. Plazma Nitrüleme Şartlarına Bağlı Olarak Sürtünme Katsayısındaki Değişim	136
6.4. Plazma Nitrüleme Şartlarına Bağlı Olarak Beyaz Tabaka ve Difüzyon Tabakası Kalınlıklarındaki Değişim	139
6.5. Plazma Nitrüleme ve Talaş Kaldırma Şartlarına Bağlı Olarak Plaketlerde Meydana Gelen Serbest Yüzey Aşınması Değişimleri	144
6.6. Plazma Nitrüleme ve Talaş Kaldırma Şartlarına Bağlı Olarak Plaketlerde Meydana Gelen Ağırlık Azalmaları	148
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	153
7.1. Sonuçlar	153
7.2. Öneriler	158

KAYNAKLAR

160

ÖZGEÇMİŞ

170



KISALTMALAR

BL	: Krater Genişliği
BUE	: Ağız Birikintisi
CNC	: Bilgisayar Kontrollü Takım Tezgahı
CVD	: Kimyasal Buhar Çökeltme
HB	: Brinell Sertliği
HSS	: Yüksek Hız Çelikleri
HV	: Vickers Sertliği
KT	: Krater Derinliği
PVD	: Fiziksel Buhar Yoğuşturma
SDH	: Sıkı Dizilmiş Hekzagonal
VB	: Serbest Yüzey Aşınması
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Takım malzemelerinin bazı özelliklerinin karşılaştırılması	47
Tablo 3.2. WC+TiC+TaC-Co esaslı sinterlenmiş karbür plakelerin özellikleri	50
Tablo 4.1. Plazma nitrürleme parametreleri	78
Tablo 4.2. Plakete ait geometrik ve kimyasal özellikler	79
Tablo 4.3. Plazma nitrürlenmiş plakelerin yüzey sertlik değerleri	83
Tablo 4.4. Nitrürlenmiş plaketlerdeki bileşim ve difüzyon tabakası kalınlıkları	90
Tablo 5.1. Talaş kaldırma kullanılan malzemeye ait özellikler	94
Tablo 5.2. Talaş kaldırma deneyleri boyunca sabit tutulan kesme şartları	95
Tablo 5.3. Plaketin kesme kenarına bağlı olarak seçilen kesme süreleri	95
Tablo 5.4. Talaş kaldırma sonrasında nitrürlenmiş plaketlerde oluşan ağırlık kayıpları	96
Tablo 5.5. Talaş kaldırma sonrasında nitrülenmemiş plaketlerde oluşan ağırlık kayıpları	98
Tablo 5.6. Talaş kaldırma nedeniyle nitrülenmiş plaketlerin serbest yüzeyinde meydana gelen aşınma miktarları	109
Tablo 5.7. Talaş kaldırma nedeniyle nitrülenmemiş plaketlerin serbest yüzeyinde meydana gelen aşınma miktarları	110
Tablo 5.8. Nitrülenmiş ve nitrülenmemiş plaketlerin sürtünme katsayıları	115
Tablo 6.1. Değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları	118
Tablo 6.2. Deney sonuçları	121
Tablo 6.3. Değişim analizinin sonuçları	122

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Isıl işlem yöntemleri	9
Şekil 2.2 : Nitrürleme derinliğinin nitrürleme zamanına göre değişimi	12
Şekil 2.3 : Çelik esaslı malzemeler için nitrürleme zamanına göre nitrürleme derinliğinin değişimi	13
Şekil 2.4 : Nitrürleme sıcaklığının bir fonksiyonu olarak bileşim tabakası kalınlığının değişimi	13
Şekil 2.5 : Alaşım elementlerinin nitrürleme derinliğine etkisi	14
Şekil 2.6 : Alaşım elementlerinin yüzey sertliğe etkisi	15
Şekil 2.7 : En40B (32CrMo12) çeliğinin 10 saat NH ₃ atmosferinde nitrürlenmesi sonucunda elde edilen yüzey sertliğinin nitrürleme sıcaklığına göre değişimi	16
Şekil 2.8 : Nitrürlenmiş bir malzemenin bileşim tabakası ve difüzyon tabakası boyunca aşınma dayanımının genel yapısı	17
Şekil 2.9 : Plazma nitrürleme sistemi	23
Şekil 2.10 : En40B çeliğinin 500 ⁰ C sıcaklıkta NH ₃ atmosferinde plazma nitrürlenmesi durumunda nitrürleme süresine göre difüzyon tabakası derinliğinin değişimi	29
Şekil 3.1 : Takım malzemelerinin sertlik ve tokluk özelliklerinin karşılaştırılması	47
Şekil 3.2 : Sinterlenmiş karbür plakette yüksek sıcaklıklardaki sertlik profilleri	49
Şekil 3.3 : WC+TiC+TaC-Co plakette %0,4 C'lu çeliğin işlenmesi sırasında, kesme şartlarına bağlı olarak plakette görülen aşınma tipleri	50
Şekil 3.4 : Plaketlerde meydana gelen aşınma ve hasar tipleri	55
Şekil 3.5 : Karbür takımlarda meydana gelen krater aşınması ve serbest yüzey aşınması	56
Şekil 3.6 : %0,4 C'lu çeliğin 183 m/dak'lık kesme hızında işlenmesi durumunda plakette talaş yüzeyindeki sıcaklık profili	57
Şekil 3.7 : WC-Co esaslı karbür plakette %0,4 C'lu çeliğin frezelenmesi sırasında, kesme şartlarına bağlı olarak plakette görülen aşınma tipleri	57
Şekil 3.8 : WC-Co esaslı karbür plakette çelik esaslı malzemenin işlenmesi sırasında difüzyon esaslı aşınma mekanizmasının, kesme hızı ve kesme süresine bağlı olarak plakette serbest yüzeyinde meydana getirdiği aşınma miktarı değişimi	59
Şekil 3.9 : %0,45 karbonlu çeliğin P 10 sinterlenmiş karbür plakette frezelenmesi durumunda serbest yüzey ve krater aşınmasının kesme hızına göre değişimi (kesme derinliği 1 mm, ilerleme hızı 0,2 mm/dev)	60

Şekil 3.10	: Değişik özellikteki sinterlenmiş karbür plakelerin serbest yüzey aşınma dayanımlarının karşılaştırılması	65
Şekil 3.11	: Plakette meydana gelen ölçülebilir aşınma bölgeleri	67
Şekil 3.12	: Plaketin talaş yüzeyi üzerinde ölçülebilen aşınma mesafeleri	67
Şekil 4.1	: %75 H ₂ +%25 N ₂ gaz karışım oranında 700 ⁰ C’de 2 saat süreyle plazma nitrülenmiş plaketin X-Ray difraksiyonu	70
Şekil 4.2	: Plazma nitrüleme deney tesisatının ana bileşenleri	75
Şekil 4.3	: Plazma nitrüleme deney tesisatı	75
Şekil 4.4	: TPKN 2204 PD-R SBF plaket	80
Şekil 4.5	: Plaketlerin iyon nitrülenmesi sırasında oluşan mor renkli ışınım (glow-discharge)	81
Şekil 4.6	: Zwick Materialprüfung D-7900 mikrosertlik ölçüm cihazı	83
Şekil 4.7	: %75 H ₂ +%25 N ₂ gaz karışım oranında 700 ⁰ C’de 1,2,4 ve 8 saat süreyle yapılan plazma nitrüleme sonrasında plakette elde edilen sertlik profili değişimi	85
Şekil 4.8	: İyon nitrüleme sonrasında malzeme yüzeyinde oluşan tabakalar	85
Şekil 4.9	: Plaketlerin yan yüzeylerinin taşlandığı taşlama tezgahı	88
Şekil 4.10	: Metkin Dıgıpress otomatik numune kalıplama cihazı	88
Şekil 4.11	: Struers-Dap-u tipi zımparalama cihazı	89
Şekil 4.12	: 6 numaralı plakette plazma nitrüleme sonrasında meydana gelen difüzyon tabakasının optik mikroskop altında 150 büyütmedeki görüntüsü	90
Şekil 4.13	: %75 H ₂ +%25 N ₂ gaz karışım oranında, sabit nitrüleme sıcaklığı için artan sıcaklıkla birlikte difüzyon tabakası kalınlığının değişimi	91
Şekil 4.14	: %50 H ₂ +%50 N ₂ gaz karışım oranında, sabit nitrüleme sıcaklığı için artan sıcaklıkla birlikte difüzyon tabakası kalınlığının değişimi	91
Şekil 5.1	: CINCINATI MILACRON (USA) 10H-1500 18 kW yatay işleme merkezi	93
Şekil 5.2	: İş parçasının alın frezelenmesi	93
Şekil 5.3	: Plaketlere ait kesme açıları	94
Şekil 5.4	: Chyo JL-180 ağırlık ölçüm cihazı	98
Şekil 5.5	: Plaketlerde meydana gelen aşınma durumu	107
Şekil 5.6	: Serbest yüzey aşınmasının ölçümünde kullanılan optik mikroskop	107
Şekil 5.7	: Serbest yüzey aşınmasının ölçülmesi sırasında kullanılan aparat	108
Şekil 5.8	: Plaketlerin serbest yüzeylerinde meydana gelen aşınma durumu	111
Şekil 5.9	: Genel amaçlı pin-on-disk tipi sürtünme katsayısı ölçüm cihazı ...	114
Şekil 5.10	: Sürtünme katsayısının ölçülebilmesi maksadıyla imal edilen ve plakete yapıştırılan “sap”	114
Şekil 6.1	: Plazma nitrüleme parametreleri ile malzeme özelliklerinin değişimi	123
Şekil 6.2	: 700 ⁰ C sıcaklıkta plazma nitrülenmiş plakelerin yüzey sertliği değişimleri	129
Şekil 6.3	: 650 ⁰ C sıcaklıkta plazma nitrülenmiş plakelerin yüzey sertliği değişimleri	129

Şekil 6.4	: 600 ⁰ C sıcaklıkta plazma nitrülenmiş plakelerin yüzey sertliği değişimleri	130
Şekil 6.5	: 550 ⁰ C sıcaklıkta plazma nitrülenmiş plakelerin yüzey sertliği değişimleri	130
Şekil 6.6	: 500 ⁰ C sıcaklıkta plazma nitrülenmiş plakelerin yüzey sertliği değişimleri	131
Şekil 6.7	: %75H ₂ +%25N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme süresine bağlı olarak yüzey sertliğinin değişimi	131
Şekil 6.8	: %50H ₂ +%50N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme süresine bağlı olarak yüzey sertliğinin değişimi	132
Şekil 6.9	: %75H ₂ +%25N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme sıcaklığına bağlı olarak yüzey sertliğinin değişimi	132
Şekil 6.10	: %50H ₂ +%50N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme sıcaklığına bağlı olarak yüzey sertliğinin değişimi	133
Şekil 6.11	: Gaz karışım oranına bağlı olarak yüzey sertliğinin değişimi	133
Şekil 6.12	: %75H ₂ +%25N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme süresine bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi	137
Şekil 6.13	: %50H ₂ +%50N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme süresine bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi	137
Şekil 6.14	: %75H ₂ +%25N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme sıcaklığına bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi	138
Şekil 6.15	: %50H ₂ +%50N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme sıcaklığına bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi	138
Şekil 6.16	: %75H ₂ +%25N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme süresine bağlı olarak difüzyon tabakası kalınlıklarındaki değişim	140
Şekil 6.17	: %50H ₂ +%50N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme süresine bağlı olarak difüzyon tabakası kalınlıklarındaki değişim	140
Şekil 6.18	: %75H ₂ +%25N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme süresinin kareköküne bağlı olarak difüzyon tabakası kalınlıklarındaki değişim	141
Şekil 6.19	: %50H ₂ +%50N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme süresinin kareköküne bağlı olarak difüzyon tabakası kalınlıklarındaki değişim	141
Şekil 6.20	: %75H ₂ +%25N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme sıcaklığına bağlı olarak difüzyon tabakası kalınlıklarındaki değişim	142
Şekil 6.21	: %50H ₂ +%50N ₂ gaz karışım oranında nitrüleme sıcaklığına bağlı olarak difüzyon tabakası kalınlıklarındaki değişim	142
Şekil 6.22	: Nitrüleme parametrelerine bağlı olarak plakelerde elde edilen beyaz tabaka kalınlığı değişimleri	143
Şekil 6.23	: Nitrülenmiş plakelerde, plazma nitrüleme ve talaş kaldırma şartlarına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınma miktarları	145
Şekil 6.24	: Nitrülenmemiş plakelerde talaş kaldırma sonrasında meydana gelen serbest yüzey aşınma miktarları	147
Şekil 6.25	: Plazma nitrülenmiş plakelerde talaş kaldırma sonrasında oluşan ağırlık kayıpları	150
Şekil 6.26	: Nitrülenmemiş plakelerde oluşan ağırlık kayıpları	152

SEMBOL LİSTESİ

μ	: Sürtünme Katsayısı
μ_h	: Sürtünme Katsayısı Ölçümünde Yapılan Hata
D	: Nitrürleme Derinliği
db_h	: Tabaka Kalınlıkları Ölçümünde Yapılan Hata
F	: Kuvvet
F_n	: Normal Kuvvet
F_s	: Sürtünme Kuvveti
k_h	: Gaz Karışım Oranına Bağlı Hata
N	: Burun Aşınması
n	: Değişken Sayısı
r	: Korelasyon Katsayısı
t	: Zaman
t_h	: Nitrürleme Süresine Bağlı Hata
T_h	: Sıcaklık Ölçümünden Kaynaklanan Hata
w	: Hata
w_{ch}	: Mikrosertlik Ölçüm Cihazından Kaynaklanan Hata
w_h	: Yüzey Sertliği Ölçümünde Yapılan Hata
$w_{derinlik}$	: Kesme Derinliğinden Kaynaklanan Hata
$w_{ilerleme}$	: İlerlemeden Kaynaklanan Hata
w_{kesme}	: Kesme Hızından Kaynaklanan Hata
w_{oh}	: Okumadan Kaynaklanan Hata
$w_{serbest}$	: Serbest Yüzey Aşınması Ölçümünde Yapılan Hata
x, y	: Değişkenler

PLAZMA NİTRÜRLENMİŞ SERT METAL PLAKETLERDE PERFORMANS ARAŞTIRMASI

ÖZET

Bu çalışmada talaş kaldırmada kullanılan sinterlenmiş karbür plaketer değişik nitrürleme şartları altında plazma nitrürlenmiş ve belli talaş kaldırma şartları altında kullanılarak talaş kaldırma performansları araştırılmış, diğer bir ifadeyle plazma nitrürlemenin sinterlenmiş karbür plaketen talaş kaldırma performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Takım ömrü, takımın müsaade edilen aşınma değerine ulaşınca kadar geçen talaş kaldırma süresi olarak ifade edilebilir. Bu tanımdan anlaşılacağı üzere takım ömrü aşınma olayına bağlıdır. Aşınmanın mümkün olduğu kadar yavaşlatılması, takımın müsaade edilen aşınma değerine ulaşınca kadar geçen talaş kaldırma zamanını arttıracığından, takım ömrü arttırılmış olacaktır. Takım aşınmasının azaltılabilmesi için uygulanacak yöntemlerden birisi takım yüzeyinin sertleştirilmesidir. Yapılan çalışmanın ana fikrini bu yaklaşım oluşturmaktadır. Yapılan çalışma esas itibariyle plazma nitrürleme ve talaş kaldırma olmak üzere iki farklı alandan meydana gelmektedir.

Birçok değişik yüzey sertleştirme yöntemi bulunmakla birlikte, özellikle son yıllarda geniş bir uygulama alanı bulan plazma nitrürleme oldukça önemli avantajlara sahiptir. Bu avantajlar arasında ekonomik olması, düşük sıcaklıklarda difüzyon hızının yüksek olması, işlem süresinin diğer nitrürleme yöntemlerine göre daha kısa olması ve daha düşük gaz tüketimi sayılabilir. Plazma nitrürleme deneylerine başlamadan önce nitrürlenecek takım olarak sinterlenmiş karbür plakete seçilmiştir. Plazma nitrürleme sonucunda elde edilen yüzey tabakası özelliklerini etkileyen bir çok değişken söz konusudur. İşlem parametreleri adı verilen bu değişkenlerin etkisinin araştırılması amacıyla, nitrürleme süresi, nitrürleme sıcaklığı ve gaz karışım oranı sistematik olarak değiştirilmiştir. Böylece, 49 farklı deney şartı tespit edilmiştir.

Plazma nitrürleme işlemi öncesinde ve sonrasında plaketerin yüzey sertlikleri ölçülmüştür. Nitrürlenmemiş plaketerin yüzey sertlikleri de ölçülmüş, böylelikle plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak plaketerde elde edilen yüzey sertliği artışı izlenebilmiştir.

Plazma nitrürleme deneyleri sonrasında talaş kaldırma deneylerine başlanmıştır. Talaş kaldırma deneyleri yatay işleme merkezinde alın frezeleme yapılarak gerçekleştirilmiştir. Talaş kaldırma işleminde, kesme süresi değişken olmak üzere diğer tüm kesme şartlarının sabit tutulması prensibi esas alınmıştır. Ayrıca nitrürlenmemiş plaketerin talaş kaldırma performansları da izlenmiştir.

Plazma nitrürlenmiş ve nitrürlenmemiş plaketerin talaş kaldırma performanslarının belirlenebilmesi için talaş kaldırma sonrasında plaketerde meydana gelen aşınma ölçülmüştür. Ayrıca aşınmanın izlenebilmesi amacıyla plaketerde meydana gelen ağırlık kayıpları da ölçülmüştür. Nitrürleme konusunda yapılan çalışmalarda,

nitrürleme şartlarına bağlı olarak sürtünme katsayısının değiştiği belirtilmektedir. Bu nedenle nitrürleme sonrasında plakelerin sürtünme katsayısı da ölçülmüştür.

Plazma nitrürleme sonrasında malzeme yüzeylerinde beyaz tabaka ve difüzyon tabakası olmak üzere iki farklı tabakanın oluştuğu ve bu tabakaların takımın özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Bu nedenle, plazma nitrürlenmiş plakelerin beyaz tabaka ve difüzyon tabakası kalınlıkları da ölçülmüş ve plazma nitrürleme parametreleriyle ilişkilendirilmiştir.

Deneyler sonucunda elde edilen verilerin tasnif edilmesi, analizi ve yorumlanması için istatistiksel analiz yapılmıştır. Bu amaçla istatistik araçlarından korelasyon, ortalama değer ve hata analizi kullanılmıştır.

Özet olarak, sinterlenmiş karbür plakeler, sistematik olarak değiştirilmiş nitrürleme parametreleri (nitrürleme süresi, nitrürleme sıcaklığı ve gaz karışım oranı) altında plazma nitrürlenmişler ve belli kesme şartları altında talaş kaldırma deneylerine tabii tutulmuşlardır. Bu süreç içerisinde uygun zamanlarda plakelerin yüzey sertlikleri, ağırlık kayıpları, belli şartlardaki sürtünme katsayıları, serbest yüzey aşınma miktarları, beyaz tabaka kalınlıkları ve difüzyon tabakası kalınlıkları ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel analizi yapılmıştır. Böylece sistematik olarak değiştirilen plazma nitrürleme parametrelerinin sinterlenmiş karbür takımların talaş kaldırma performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda iyon nitrürleme ile sinterlenmiş sert metal plakelerin talaş kaldırma performanslarının artırılabilceği, plakelerin talaş kaldırma performansındaki artış miktarının iyon nitrürleme parametrelerine (nitrürleme süresi, nitrürleme sıcaklığı ve gaz karışım oranı) bağlı olarak değiştiği, uygun seçilecek iyon nitrürleme parametreleri ile kaplamasız sinterlenmiş karbür takımdan maksimum talaş kaldırma performansının elde edilebileceği, iyon nitrürleme parametrelerine bağlı olarak plakelerin yüzey sertliği, sürtünme katsayısı, aşınma dayanımı, yüzeyde meydana gelen tabaka özelliklerinin değiştiği, değişik uygulamalar için farklı özellikte (örneğin değişik yüzey sertliği-difüzyon tabakası kalınlığı) bir yüzey istenildiğinde, nitrürleme parametrelerini değiştirerek istenilen özellikte yüzey tabakasının oluşturulabildiği anlaşılmıştır.

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF PLASMA NITRIDED CEMENTED CARBIDE TOOL INSERTS

SUMMARY

In this study, inserts used in cutting operations, ion nitrided (plasma nitriding) in various conditions, are used in certain cutting conditions in order to investigate cutting performances. In other words, the effects of ion nitriding on the cutting performance of tool inserts are investigated.

Tool life is defined as the time to reach the predetermined threshold value of cutting tool wear. Tool life is related to wear. By shortening wear time, tool life is increased. One of the methods to reduce tool wear is surface modification. This concept is the main theme of the project. This study consists of two sections namely plasma nitriding and cutting process.

Ion nitriding is one of the most widely used advanced surface modification techniques applied to materials. Comparing this method to other commercial surface modification methods, it can be said that this method is more economical, faster at lower temperature, have shorter treatment times and lower gas consumption. Cemented carbide hard metal insert is selected as nitriding specimen. Cemented carbide inserts are ion nitrided in various conditions. Nitriding parameters such as nitriding time, nitriding temperature and nitrogen-hydrogen gas mixture ratio were changed systematically to investigate the effects of different parameters on the surface properties. Therefore, 49 different experimental conditions were formed and tested.

Each insert surface hardnesses were measured before and after plasma nitriding experiments. At the same time untreated insert surface hardnesses were also measured. Therefore, increases on the surface hardnesses which change according to nitriding parameters were observed.

Cutting process experiment has been started after nitriding experiments. Cutting process is done at a horizontal spindle machining center. During the cutting experiments, cutting time was variable and the other cutting parameters were kept constant. Untreated inserts were also used in the same cutting operations.

Nitrided and untreated inserts were cleaned and weighed before and after cutting operations. Flank wear of nitrided and untreated inserts were also measured. It is known that plasma nitriding has been particularly effective in improving tribology properties and wear resistances. Therefore, friction coefficient of nitrided and untreated inserts were measured.

After nitriding, it is known that a compound layer and a diffusion layer are formed on the surface and these layers affect material properties. Therefore, compound layer thickness and diffusion layer thickness of nitrided inserts were measured and related to the nitriding parameters.

Statistics analysis were performed for classification, analysis and evaluation of the experimental conclusions. Therefore, correlation, interaction analysis and error analysis were used.

Finally, cemented carbide inserts were nitrided in sistematically changed nitriding conditions (nitriding time, nitriding temperature and gas mixture ratio) and experimented under certain cutting processing conditions. At the same time, surface hardness, loss of weight, friction coefficient, flank wear, thickness of compound layer and thickness of diffusion layers were measured at a suitable time. Statistics analysis of experiment conclusions were performed. Moreover, the effects of ion nitriding parameters on cemented carbide tool inserts are investigated.



1. GİRİŞ

Talaş kaldırma sırasında meydana gelen sürtünme ve sıcaklık artışı kesici takımın aşınmasına neden olur. Takımın aşınması takım malzemesi, işlenen parçanın malzemesi, takım ve talaş geometrisi, kesme hızı, ilerleme hızı, kesme derinliği, sıcaklık ve kesme sıvısı gibi birçok faktöre bağlıdır. Takım ömrü ise takımın müsaade edilen aşınma değerine ulaşınca kadar geçen talaş kaldırma süresi olarak ifade edilebilir. Bu tanımdan anlaşılacağı üzere takım ömrü, aşınma olayına bağlıdır. Aşınmanın mümkün olduğu kadar yavaşlatılması, takımın müsaade edilen aşınma değerine ulaşınca kadar geçen talaş kaldırma zamanını arttıracığından, beraberinde takım ömrü de arttırılmış olacaktır. Yapılan doktora çalışmasının ana fikrini bu yaklaşım oluşturmaktadır.

Takımların yüzeyleri iç bölgelerine göre çoğu zaman daha yüksek zorlanmaların etkisi altında olup, ayrıca sürtünme ve korozyon gibi bozucu etkilere maruz kalırlar. Yüzeydeki etkili gerilmelerin, kritik sınırı aşması halinde yüzeyden başlayan bir hasarın oluşumu kaçınılmazdır. Takım, bu hasar sonucu kendinden beklenen fonksiyonu yerine getiremez duruma gelir. Bu nedenle, malzemeden, maksimum çalışma performansının elde edebilmesi için değişik yöntemler kullanılarak yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi veya malzeme yüzeyinin bozucu etkilere izole edilmesi yoluna gidilir. Bu amaçla yüzey sertleştirme yöntemleri kullanılabilir veya malzeme yüzeyi koruyucu bir tabaka ile kaplanabilir.

Yüzey sertleştirme, sadece malzeme yüzey özelliklerinin değiştirilmesine ihtiyaç duyulduğunda başvurulacak bir ısıl işlemdir. Diğer bir ifadeyle, özellikle malzeme yüzeyinin sert ve aşınmaya dayanıklı, buna karşılık iç yapının sünek olması arzu edildiğinde sadece yüzeyin sertleştirilmesine gidilir. Bunun için, yüzeyde belli bir derinliğe kadar sertleşme sağlayan yöntemler geliştirilmiştir. Kimyasal-ısı yöntemleri adı verilen indüksiyon, sementasyon, nitritleme, karbonitritleme, metal olan veya olmayan element yada bileşiklerin difüzyonu gibi yöntemlerle malzemenin iç kısmında bir değişim olmadığı halde yüzeyinde istenilen sertliği oluşturabilmek mümkündür. Yüzey sertleştirme yöntemi; malzeme yüzey özelliklerini iyileştirerek, yüzeyden başlayacak bir hasarı önlemeyi veya geciktirmeyi amaçlayan bir tekniktir.

Ayrıca çalışma şartlarına bağılı olarak; sert ancak darbe dayanımı yüksek bir yapı arzu edildiğinde de tercih edilen bir yöntemdir. Çünkü yüzey sertleştirmeyle sadece yüzeyde sert bir tabaka oluşturulmakta, iç yapının sünek özelliklerinde herhangi bir değişim meydana gelmemektedir. Böylece aşınmaya karşı yüzeyi sert ve darbelere karşı dayanımı yüksek tok bir iç yapı oluşmaktadır.

Yüzey sertleştirme yöntemlerinin birbiriyle mukayesesi yapılacak olursa, her bir yöntemin birbirine göre avantajları ve dezavantajları olduğu görülür. Bu nedenle; yüzeyi sertleştirilecek malzeme özellikleri, malzemenin kullanılacağı uygulama, maliyet ve eldeki mevcut şartlar dikkate alınarak uygun olan yüzey sertleştirme yöntemi seçilmelidir. Özellikle sanayileşmiş ülkelerde nitrürleme yöntemlerinden biri olan plazma (iyon) nitrürleme yöntemi son yıllarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Plazma nitrürleme yönteminin giderek daha geniş bir uygulama alanı bulmasının temel nedeni, diğer nitrürleme yöntemlerine göre sağlamış olduğu enerji tasarrufu ve ısı veriminin yüksek olması, işlem süresinin daha kısa olması, düşük işlem sıcaklıkları nedeniyle ölçü değişimi ve deformasyonun minimum olması, insan ve çevre sağlığı açısından problemsiz bir yöntem olması, otomasyona uyumlu olması, karmaşık parçalarda homojen bir nitrürlemenin sağlanması ve işlemin parça büyüklüğünden bağımsız olması gibi üstünlüklerdir.

Plazma nitrürleme yönteminin diğer nitrürleme tekniklerine göre yeni bir yöntem olması, incelemeye ve geliştirmeye açık bir yüzey sertleştirme yöntemi olmasını sağlamaktadır. Diğer nitrürleme yöntemlerinde olduğu gibi, plazma nitrürleme yöntemi sonucunda elde edilen yüzey tabakası özelliklerini etkileyen bir çok değişken söz konusudur. Bu konuda yapılan araştırmaların büyük çoğunluğunu işlem parametreleri adı verilen bu değişkenlerin yüzey tabakası özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi ve elde edilen yüzey tabakasının malzemenin cinsine ve çalışma koşullarına bağılı olarak performansının araştırılması oluşturmaktadır.

Plazma nitrürleme konusunda yapılan çalışmalar, nitrürleme parametrelerindeki (nitürleme süresi, nitürleme süresi, gaz karışım oranı) değişimin malzeme yüzey özellikleri üzerindeki etkisinin araştırılması, belli bir malzeme için yüzey performansının artırılmasına yönelik optimum nitürleme şartlarının belirlenmesi, plazma nitürlemenin PVD ve CVD gibi yüzey iyileştirme yöntemlerine katkısının incelenmesi, plazma nitürleme mekanizmasının araştırılması, belli malzeme çiftlerinin belli plazma nitürleme şartları altında nitürlenmesi ve elde edilen fiziksel özelliklerin karşılaştırılması, plazma nitürleme sonrasında elde edilen difüzyon tabakası ve bileşim tabakasının malzemenin özellikleriyle ilişkilendirilmesi, özellikle

sıcak iş takım çeliklerinin iyon nitrürlemesi sonrasında oluşan malzeme özelliklerindeki değişimin incelenmesi, plazma nitrüleme sonrasında değişen tribolojik özelliklerin belirlenmesi, aynı malzeme özelliklerinin daha düşük sıcaklık ve sürede elde edilebilmesi için iyon nitrüleme yönteminin modifikasyonu ana başlıklarından meydana gelmektedir. Bu araştırmaların büyük çoğunluğunda demir esaslı malzemelerin plazma nitrürlendiği ve nitrüleme sonrasında değişen yüzey özelliklerinin incelendiği görülmüştür. Literatür incelenmesi sonucunda; sinterlenmiş karbür plakelerin plazma nitrülenmesi ve plazma nitrülenmiş sinterlenmiş karbür plakelerin talaş kaldırma performanslarının incelenmesine yönelik çalışma yapılmadığı tespit edilmiştir.

Talaş kaldırmada kullanılan pek çok farklı tip (farklı geometri ve geometriye bağlı özellikler) ve özellikle (farklı kimyasal bileşimler, kaplamalı, kaplamasız) sinterlenmiş karbür plaket mevcuttur. Bunlar arasında kaplamasız plakelerin talaş kaldırma performansları kaplamalı plakelere göre daha kötüdür. Bu çalışmada, kaplamasız belli bir geometrideki sinterlenmiş karbür plaket takımlar değişik plazma nitrüleme şartları altında nitrülenmişler ve belli talaş kaldırma şartları altında kullanılarak talaş kaldırma performansları araştırılmıştır. Kaplamasız plakelerin iyon nitrüleme ile performanslarının artırılması amaçlanmış ve plaket performansındaki değişim iyon nitrüleme parametreleri ile ilişkilendirilmiştir. Çalışmanın başlangıcında yapılan pilot deneyler sonrasında, plazma nitrüleme ile sinterlenmiş karbür plakelerin yüzey sertliklerinin artırılabilirdiği ve böylece plakelerin talaş kaldırma performanslarının iyileştiği görülmüştür. Yapılan çalışma esas itibarıyla plazma nitrüleme ve talaş kaldırma olmak üzere birbiriyle doğrudan ilgili olmayan iki farklı alandan meydana gelmektedir.

Plazma nitrülenecek plaketin belirlenmesi ve temin edilmesinden sonra plazma nitrüleme deneylerine başlanmıştır. Plazma nitrüleme sonucunda oluşan yüzey tabakası özelliklerini etkileyen bir çok değişken söz konusudur. İşlem parametreleri adı verilen bu değişkenlerin yüzey tabakası özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi ve elde edilen özelliklere bağlı olarak talaş kaldırma performansının araştırılması için nitrüleme süresi, nitrüleme sıcaklığı ve gaz karışım oranı sistematik olarak değiştirilmiştir. Her bir nitrüleme parametresinin alt ve üst sınırlarının belirlenmesinde; bu konuda daha önceden yapılmış çalışmalar sonrasında elde edilen veriler, literatür taraması sonrasında elde edilen bilgiler ve bu konuda daha önceden çalışmış kişilerle yapılan görüşmeler etkili olmuştur. Nitrüleme parametrelerinin, plakelerin talaş kaldırma performansı üzerindeki

etkisini inceleyebilmek için; nitrürleme parametreleri, deney tertibatının izin verdiği en dar aralıklarda sistematik olarak değiştirilmiştir. Herhangi bir nitrürleme parametresinin plaketin talaş kaldırma performansı üzerindeki bağımsız etkisini görebilmek için; diğer tüm parametreler sabit tutularak, sadece ilgili parametre sistematik olarak değiştirilmiştir. Bu kriterler dikkate alınarak 49 farklı deney kombinasyonu tespit edilmiştir.

Plazma nitrürleme deneyleri sonrasında plakelerin yüzey sertliklerinde meydana gelen değişimin tespit edilebilmesi amacıyla, plakelerin yüzey sertlikleri ölçülmüştür. Bu amaçla mikrosertlik cihazı kullanılarak 1000 gr.lık yük altında, her bir plaket için 4 farklı noktadan yüzey sertlikleri ölçülmüştür. Aynı zamanda nitrürlenmemiş plakelerin yüzey sertliği de ölçülmüştür. Böylelikle plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak plakelerde elde edilen yüzey sertliği değişimleri izlenebilmiştir.

Plazma nitrürleme deneylerinin ve yüzey sertliği ölçümlerinin tamamlanmasıyla birlikte talaş kaldırma deneylerine başlanmıştır. Bu amaçla nitrürlenmiş plaketerle yatay işleme merkezinde alın frezeleme yapılmıştır. Bu tezgahın seçiminde deneylerin yapıldığı fabrikanın mevcut imkan ve şartları etkili olduğu kadar, iş parçasını sökme-bağlama, plaketi sökme-bağlama ve ayar olanaklarının basit ve hızlı olması ve aynı anda birden fazla plaketin bağlanabilme imkanının olması gibi özellikleri de dikkate alınmıştır. İşlenecek malzeme olarak SAE/AISI 1020 (DIN Ck 22) seçilmiştir. İşlenecek malzeme seçiminde; daha önceden tespit edilmiş plaketin tipi, malzemenin kolay temin edilebilirliği, talaş kaldırmanın sürekliliğini ve homojenliğini bozmayacak ılımlı bir malzeme olması ve talaş kaldırmanın gerçekleştirildiği fabrika şartları dikkate alınmıştır. Talaş kaldırma şartlarının belirlenmesinde ilgili plakelerin temin edildiği firma kataloglarında ve değişik kaynaklarda tavsiye edilen değerler ile talaş kaldırmanın yapıldığı tezgahın özellikleri dikkate alınmıştır. Kesme şartlarının belirlenmesinde kesme süresi değişken olmak üzere diğer tüm kesme şartlarının sabit tutulması prensibi esas alınmıştır. Böylelikle belli bir kesme süresi sonucunda plakelerde meydana gelen aşınmanın tespit edilmesi, aynı kesme sürelerinde kullanılmış değişik plazma nitrürleme şartlarında nitrürlenmiş plakelerde oluşan aşınmanın karşılaştırılması suretiyle plaketin talaş kaldırma performanslarının belirlenebilmesi ve belli kesme şartları altında herhangi bir plaket ömrünün belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Seçilen plakelerin üç kesme kenarına sahip olması nedeniyle her bir kesme kenarının farklı kesme sürelerinde kullanılabilmesi ve talaş kaldırma sonrasında hasara uğramamış bir ucun tekrar talaş kaldırmada kullanılabilmesi imkanını ortaya çıkmıştır.

Nitr rl nmiş plaketin talaş kaldırma performansının, nitr rl nmemiş plaketin talaş kaldırma performansı ile karşılaştırılabilmesi için nitr rl nmemiş plaketin talaş kaldırma performansının tespit edilme ihtiya ı ortaya çıkmıştır. Bu nedenle nitr rl nmemiş 10 plaket, nitr rl nmiş numunelerle birlikte talaş kaldırma deneylerine tabii tutulmuş ve talaş kaldırma performansları izlenmiştir.

Talaş kaldırma sırasında, plakelerde meydana gelen aşınma nedeniyle plakelerde bir miktar ağırlık kaybı meydana gelecektir. Bu ağırlık kaybı; sadece serbest yüzey aşınmasından kaynaklanan bir kayıp olmamakla birlikte, bu kaybın oldukça büyük bir bölümünü serbest yüzey aşınması oluşturmaktadır. Bu nedenle her bir talaş kaldırma deneyi öncesinde ve sonrasında plakelerin ağırlıkları ölçülmüş ve başlangıç durumuna göre plakelerdeki ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Böylece; talaş kaldırma sonrasında plakelerde oluşan aşınma miktarı konusunda hızlıca bir fikir sahibi olunabilmemiştir ve daha sonradan yapılacak serbest yüzey aşınma miktarı ölçümlerine yönelik bir ön hazırlık sağlanabilmemiştir. Bu amaçla talaş kaldırma deneylerine başlamadan önce ve her bir talaş kaldırma işlemi sonunda plakelerin ağırlıkları ölçülmüş, ağırlık kayıpları izlenmiştir.

Talaş kaldırma sırasında, kesme şartlarına bağlı olarak plakette değişik aşınma tipleri meydana gelir. Plazma nitr rl nmiş plakelerin kullanıldığı kesme şartları incelendiğinde, plaket ömrünün belirlenmesinde etkili olan aşınma tipinin serbest yüzey aşınması olduğu görülecektir. Bu nedenle gerek plazma nitr rl nmiş, gerekse nitr rl nmemiş plakelerin talaş kaldırma performansının belirlenebilmesi için talaş kaldırma sonrasında meydana gelen serbest yüzey aşınması  l  lm ştir.

Nitrürleme konusunda yapılan çalışmalarda sürtünme katsayısının nitrürleme şartlarına bağlı olarak değiştiği belirtilmektedir. Bu nedenle nitrürleme şartlarının plakelerdeki sürtünme katsayısını ne derecede ve nasıl değiştirdiğini görebilmek amacıyla, nitrürleme sonrasında plakelerin sürtünme katsayısı da  l  lm ştir. Sürtünme katsayısı yüzeyler arasındaki izafi hız, yüzey pürüzlülüğü, yağlama şartları, normal kuvvet, sıcaklık, malzeme çifti ve ortam şartları gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Yapılan bu çalışmada tezin amacı gereği, sürtünme katsayısını etkileyen tüm bu faktörlerin değişimine göre nitr rl nmiş plakelerdeki sürtünme katsayısının durumu incelenmemiş, sadece belli bir sürtünme şartı altında nitr rl nmiş ve nitr rl nmemiş plakelerin sürtünme katsayıları arasındaki farklar incelenmiştir. Kuvvet sensörleri yardımıyla oda sıcaklığında, kuru sürtünme şartlarında,  elik ile sinterlenmiş karbür malzeme arasında, 45 N'luk normal kuvvet ve 600 d/d'lık dönme hızı altında tüm numunelerdeki sürtünme kuvveti  l  lm ştir.

Cihaz üzerinden dijital olarak okunan sürtünme kuvveti kullanılarak sürtünme katsayısı hesaplanmıştır.

Plazma nitrüleme alanında yapılan çalışmalarda plazma nitrüleme sonrasında malzeme yüzeyinde farklı özelliklerde tabakaların oluştuğu ve bu tabaka özelliklerinin nitrüleme şartlarına bağlı olarak değiştiği belirtilmektedir. Bu nedenle plazma nitrülenmiş plakelerin yüzeylerinde meydana gelen tabakalar incelenmiştir. Bu amaçla nitrülenmiş plakelere bir dizi işlem uygulanmıştır. Bunlar plakelerin yüzeylerinden birinin taşlanarak sert tabakanın soyulması, mikroskop altında incelenebilmeleri için bakalite alınmaları, yüzeylerin zımparalanması, parlatılması ve dağlanmasıdır. Böylece, plazma nitrüleme sonrasında plakelerin yüzeyinde meydana gelen beyaz tabaka ve difüzyon tabakası kalınlıkları incelenebilmiştir.

Deneyler ve ölçümler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak istatistiksel analiz yapılmıştır. Bu amaçla istatistik araçlarından korelasyon, ortalama değer ve hata analizi teknikleri kullanılmıştır.

Yapılan çalışma 7 bölüm halinde hazırlanmıştır. Bölüm 2’de yüzey sertleştirme, nitrüleme, nitrüleme yöntemlerinin çeşitleri, plazma nitrüleme yönteminin temel karakteristikleri ve plazma nitrülemenin malzeme özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bölüm 3’te takım ömrü, takım malzemeleri, sinterlenmiş karbür takımların temel özellikleri, sinterlenmiş karbür plakelerde meydana gelebilecek aşınma tipleri açıklanmış ve bu aşınma tipleri kesme şartları ile ilişkilendirilmiştir. Bölüm 4’te deneylerin yapıldığı plazma nitrüleme deney tertibatı, plazma nitrüleme deney şartları, nitrülen plakelerin özellikleri, nitrüleme deneylerinin yapılması, plazma nitrüleme mekanizması, plazma nitrüleme sonrasında plakelerin değişen yüzey sertlikleri ve tabaka kalınlıkları açıklanmıştır. Bölüm 5’te talaş kaldırma şartları, talaş kaldırma deneylerinin yapılması, plakelerde meydana gelen serbest yüzey aşınması ve ağırlık kayıplarının tespit edilmesi, plazma nitrüleme şartlarına bağlı olarak değişen sürtünme katsayısının ölçülme esasları anlatılmıştır. Bölüm 6’da ölçümler sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel analizi yapılarak plazma nitrüleme sonrasında plakelerin değişen yüzey özellikleri ile plazma nitrüleme parametreleri ilişkilendirilmiş ve gerek deneyler gerekse ölçümler sonucunda elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Bölüm 7’de yapılan çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar ve bu konuda yapılması muhtemel çalışmalara yönelik öneriler verilmiştir.

Özet olarak; sinterlenmiş karbür plakeler, sistematik olarak değiştirilen nitrüleme parametreleri (nitrüleme süresi, nitrüleme sıcaklığı ve gaz karışım oranı) altında

plazma nitr lenmişler ve belli kesme şartları altında talaş kaldırma deneylerine tabii tutulmuşlardır. Bu süreç içerisinde uygun zamanlarda plakelerin yüzey sertlikleri, ağırlıkları, belli şartlardaki sürtünme katsayıları, serbest yüzey aşınma miktarları, beyaz tabaka kalınlıkları ve difüzyon tabakası kalınlıkları ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel analizi yapılmıştır. Böylece sistematik olarak değiştirilen plazma nitrüleme parametrelerinin plaketin talaş kaldırma performansı üzerindeki etkisi tespit edilmiştir.



2. YÜZEY SERTLEŞTİRME VE NİTRÜRASYON

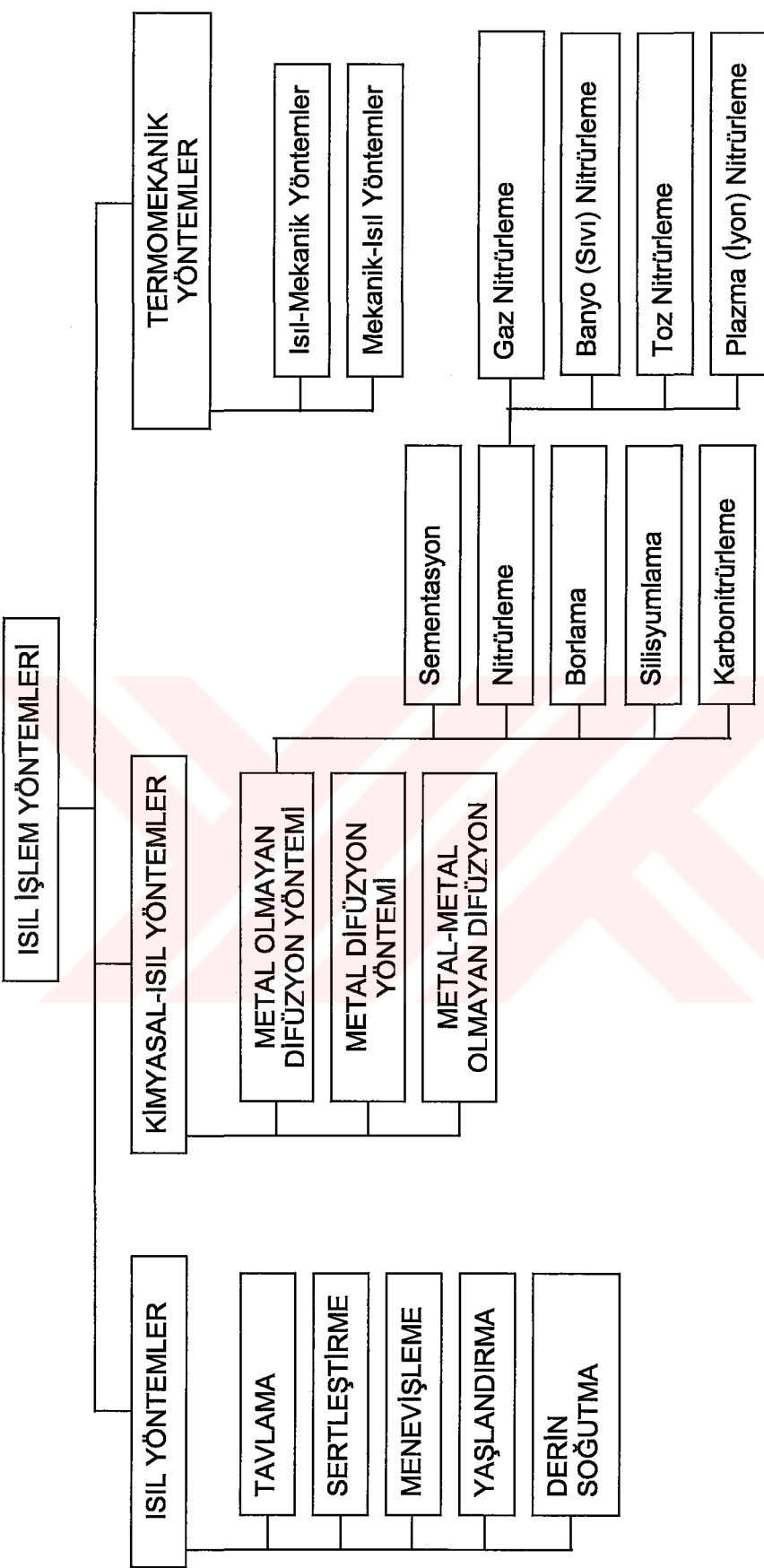
2.1 Isıl İşlemler

Isıl işlem; metal malzemelerde katı halde sıcaklık değişimleri ile bir yada birbirine bağlı birkaç işlemle, amaca uygun özellik değişimleri şeklinde tanımlanabilir (Topbaş, 1993). Diğer bir tanımlamaya göre metal ve alaşımlarının özelliklerini değiştirmek için katı halde iken uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleridir (Baydur, 1979). Bu tanımlamalardan da anlaşılacağı üzere ısıtma işlem parçaların belli bir sıcaklığa kadar ısıtılması, bu sıcaklıkta uygun bir süre bekletilmesi ve belli bir programa uygun olarak sıcaklığın oda sıcaklığına düşürülmesi şeklinde üç kademede gerçekleştirilir.

Özellikle değişen ve çoğalan ihtiyaçlar ve gelişen teknoloji paralelinde çok değişik ısıtma işlem yöntemleri ortaya çıkmıştır. Tavlama, sertleştirme, menevişleme, yaşlandırma ve yüzey sertleştirme yöntemi bunlardan bazılarıdır. Şekil 2.1’de ısıtma işlem yöntemleri verilmiştir (Topbaş, 1993). Yüzey sertleştirme sadece malzeme yüzey özelliklerinin değiştirilmesine ihtiyaç duyulduğunda başvurulacak bir ısıtma işlemidir. Özellikle yüzeyin sert ve aşınmaya dayanıklı, buna karşılık iç yapının sünek olması istenildiğinde sadece yüzey sertleştirilir. Bunun için, yüzeyde belli bir derinliğe kadar sertleşme sağlayan yöntemler geliştirilmiştir. Kimyasal-ısıtma yöntemleri adı verilen sementasyon, nitritleme, karbonitritleme, metal ve metal-dışı element yada bileşiklerin difüzyonu gibi yöntemlerle malzemenin iç yapısında bir değişim olmadığı halde yüzeyinde istenilen sertliği oluşturabilmek mümkündür.

2.2 Yüzey Sertleştirme

Malzemelerin yüzeyleri iç bölgelerine göre çalışma şartlarına bağlı olarak çoğu zaman daha yüksek gerilmelerin etkisi altında olup, ayrıca sürtünme ve korozyon gibi bozucu kimyasal etkilere maruz kalırlar. Malzeme yüzeyinde etkili olan gerilmelerin, yüzeyin dayanım sınırını aşması halinde hasar oluşumu kaçınılmazdır. Malzeme, bu durumda yüzeyinden başlayan bir hasar oluşumu ile kendinden



Şekil 2.1 Isıl işlem yöntemleri (Topbaş, 1993)

beklenen fonksiyonu yerine getiremez duruma gelir. Bu nedenle malzemeden maksimum çalışma performansı elde edebilmek için değişik yöntemler kullanılarak malzeme yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi (yüzey modifikasyonu) veya malzeme yüzeyinin bozucu etkilerden izole edilmesi yoluna gidilir. Bu amaçla yüzey sertleştirme yöntemleri kullanılabilir veya malzeme yüzeyi koruyucu bir tabaka ile kaplanarak izole edilir.

Yüzey işlemleriyle malzemeye kazandırılmak istenilen özellikler çok çeşitlidir. Genellikle yüzey işlemleriyle malzemelerin aşınma, sürtünme, darbe, ezilme, korozyon, yorulma, yüzey pürüzlülüğü, ısı ve elektriksel iletkenlik ve görünüm gibi özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Ancak asıl amaç, malzeme yüzey özelliklerini iyileştirerek, yüzeyden başlayacak bir hasarı önlemek veya geciktirmektir. Ayrıca çalışma şartlarına bağlı olarak, sert ancak darbe dayanımı yüksek bir yapı arzu edildiğinde de tercih edilen bir yöntemdir. Çünkü yüzey sertleştirmeyle sadece yüzeyde sert bir tabaka oluşturulmakta, iç yapının sünek özelliklerinde herhangi bir değişim meydana gelmemektedir. Böylece aşınmaya karşı yüzeyi sert ve darbelere karşı dayanımı yüksek tok ikili bir yapı oluşmaktadır.

Yüzey sertleştirme yöntemleri yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirerek (sementasyon, nitrüleme, borlama vb.) ve değiştirmeden (alevle yüzey sertleştirme, indüksiyonla yüzey sertleştirme, bilya püskürterek yüzey sertleştirme, özel haddeme yöntemleri vb.) yapılan yüzey sertleştirme yöntemleri olarak iki grup altında incelenebilir (Baydur, 1979).

Yüzey sertleştirmede, malzeme yüzeyine karbon verilerek sertleştirme yapılabilir (sementasyonla yüzey sertleştirme) yada yüzeye sertlik artırıcı element atomları nüfuz ettirilebilir (nitrüleme ile yüzey sertleştirme). Ayrıca, iyi sertleşme kabiliyeti olan çeliklerin yüzeyinde, arzu edilen sertleşme derinliğine kadar olan kısmı ostenitleştirme sıcaklığına kadar ısıtılarak ve ardından ani soğutma ile sadece bu bölgenin sertleştirilmesi de sağlanabilir (alevle yada indüksiyonla yüzey sertleştirme). Bu yöntemlerin dışında yüzeye çelik bilyalar püskürterek, özel haddeme yöntemleri uygulayarak soğuk şekil değiştirmeye, kaynakla, püskürtme yada galvanik kaplama (kromlama) yöntemleriyle yüzeyde sert bir tabaka da oluşturmak mümkündür. Ayrıca yine yüzeyin kimyasını tamamen değiştiren geleneksel yüzey kaplama işlemleri alanında kimyasal buhar yoğunlaşması (CVD-Chemical Vapor Deposition) ve fiziksel buhar yoğunlaşması (PVD-Physical Vapor Deposition) teknikleri ile takım çeliklerinin yüzeylerinde sert alaşım nitrürleri ile karbürlerin kaplanması teknikleri de mevcuttur.

2.3 Nitrürleme

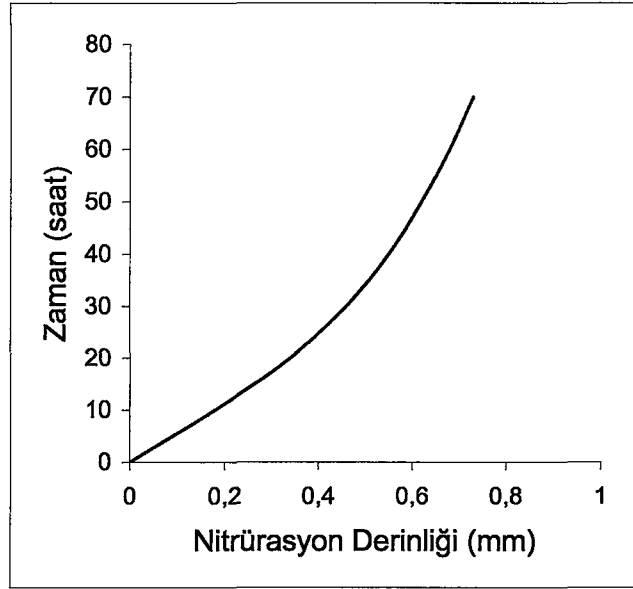
İlk kez 1960'lı yıllarda Adolp Fry tarafından kullanılan nitrürleme ile yüzey sertleştirme işleminde, çeliğin yüzeyine difüzyon ile azot verilerek, malzemenin yüzeyindeki özellikler değiştirilir (Gülmez, 1998). Azotun atom çapı karbona göre daha küçük olduğundan demir kafesine nüfuz etmesi daha kolay olur. Azotun alınması, özellikle yüksek sıcaklıklardaki ostenitik katı çözeltisinde çok hızlı olur. Ancak azot bağlantılarının (nitrür) dış cidarda yığılması, yüzeyde kırılğan bir yapının oluşmasına neden olabilir. Ayrıca ostenit-ferrit dönüşümünden dolayı hacim değişmesi de meydana gelebilir ve bu tabaka parçalanarak pul pul dökülür. Bu nedenlerden dolayı, azot yüksek alaşımlı çelikler hariç ostenitik yapıya değil, ferritik yapıya nüfuz ettirilir. Bu esnada, oldukça ince ve kırılğan bir yapı oluşur ve azot içeren bölgede nitrürler çökelir. Çökelmede oluşan alaşım nitrürleri, martenzit sertliğinden de fazla sertliği olan bir tabaka meydana getirir.

Nitrürleme yöntemi, sementasyon yöntemine göre nispeten düşük sıcaklıklarda yapıldığından, sementasyonla ulaşılan nüfuziyet derinliklerine ulaşmak mümkün değildir. Nitrür tabakasının kalınlığına etki eden en önemli faktörler; nitrürleme süresi, nitrürleme sıcaklığı, azot aktivasyonu ve malzemenin kimyasal bileşimidir. Şekil 2.2'de nitrürleme derinliğinin nitrürleme zamanına bağlı olarak genel bir değişimi verilmiştir (Topbaş, 1993). Aynı sıcaklık değeri için, nitrürleme süresinin artırılmasıyla birlikte daha yüksek nüfuziyet derinliklerine ulaşılabilir. Ancak bu durumda yüzey sertliği değerinde bir miktar düşüş olabilir. Belirli bir sürede maksimum nüfuziyet derinliğine ulaşmak yada belirli bir nüfuziyet derinliğine minimum sürede ulaşmak, nitrürleme konusunda yapılan araştırmalarda çok önemli bir yer tutar.

Genel olarak nitrürlemeyle malzemenin mekanik özellikleri, sürtünme ve korozyon dayanımı bakımından iyileştirilme sağlanır. Bu iyileşme malzeme yüzeyindeki iç yapısal değişimlerden kaynaklanır.

Nitrürlenmiş malzeme yüzeyi, genellikle bileşim tabakası (beyaz tabaka) olarak adlandırılan oldukça ince (30 μm 'den küçük) bir tabaka ile bu tabakanın altında yer alan difüzyon bölgesi (nitrürleme şartlarına bağlı olmakla birlikte ortalama 0,6 mm kalınlığında) olmak üzere iki tabakadan meydana gelir. Bileşim tabakası sürtünme ve korozyon özelliklerini belirler. Difüzyon bölgesi ise sertlik ve derinliğiyle malzemenin mekanik özelliklerini belirler. Nitrürleme şartlarına bağlı olarak bu iki

tabaka aynı anda oluşabileceği gibi, sadece difüzyon tabakasının oluşturulduğu uygulamalar da mevcuttur.



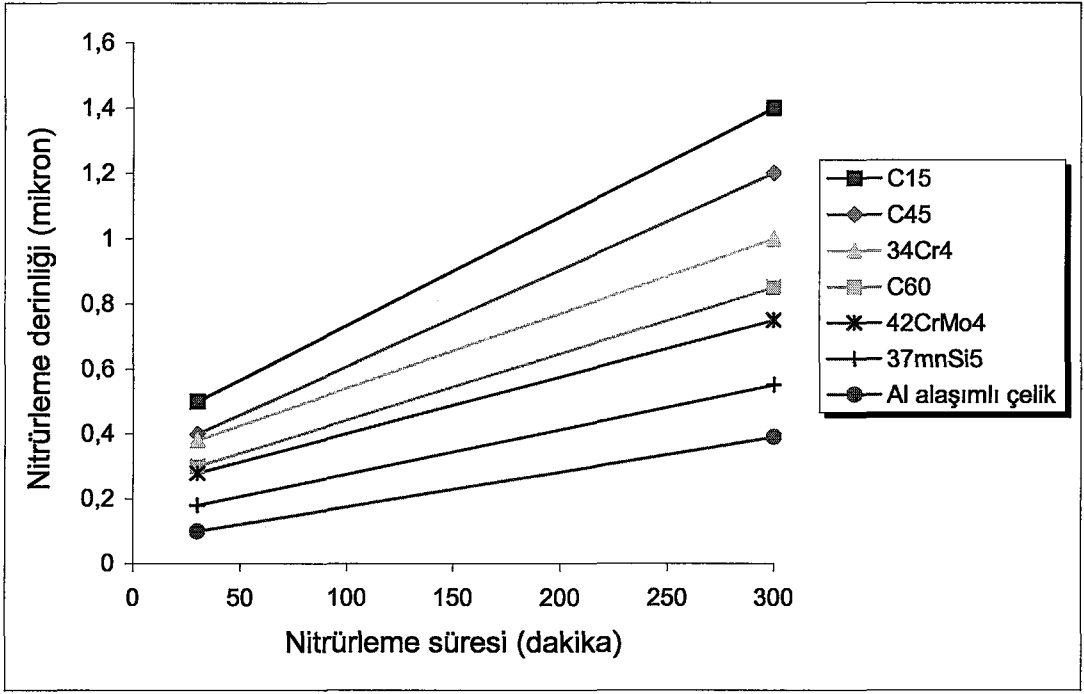
Şekil 2.2 Nitrüleme derinliğinin nitrüleme zamanına göre değişimi (Topbaş, 1993)

2.3.1 Nitrülenebilirlik

Nitrülenebilirlik; malzemenin azotu absorbe edebilme kabiliyeti ve azotun sağladığı sertlik artışı olarak ifade edilebilir. Malzemenin azotu absorbe etme kabiliyeti ise değişik faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Bu faktörlerin nitrüleme hızı ve malzemenin mekanik ve tribolojik özellikleri üzerindeki etkileri maddeler halinde sıralanmıştır.

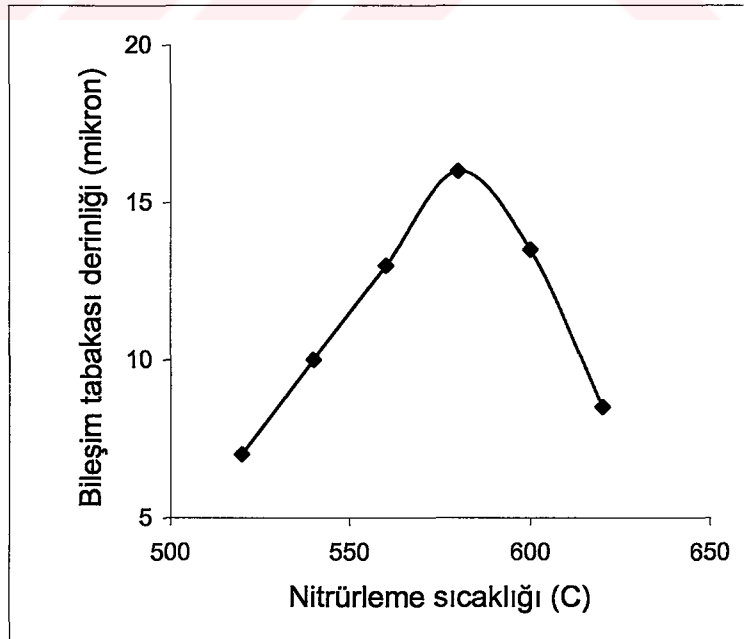
2.3.1.1 Nitrüleme Hızı ve Derinliği

Gerek bileşim, gerekse difüzyon tabakasının kalınlık ve yapısını belirleyen ana faktörler azot aktivasyonu, işlem sıcaklığı, işlem süresi ve malzemenin kimyasal bileşimidir. Nitrüleme difüzyon esaslı bir işlem olduğu için, nitrüleme kalınlığını önemli ölçüde işlem süresi ve sıcaklığı belirler. Çelik esaslı malzemelerde karbon ve alaşım miktarının düşük olması durumunda en büyük nitrülenmiş bölge derinliği elde edilir. Şekil 2.3'te bazı çelikler için nitrüleme zamanına göre nitrüleme derinliğinin değişimi verilmiştir (Leppanen, 1999). Şekil 2.3'ten de görülebileceği gibi aynı sıcaklık için alaşım miktarının artmasıyla birlikte nitrüleme derinliği azalmaktadır.



Şekil 2.3  elik esaslı malzemeler için nitrüleme zamanına göre nitrüleme derinliğinin değişimi

Şekil 2.4'te  elik malzemeler için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bileşim tabakası derinliğinin değişimi verilmiştir (Leppanen, 1999). Şekil 2.4'ten de görülebileceği gibi sıcaklığın artmasıyla birlikte bileşim tabakası kalınlığı artar, belli bir sıcaklık değerinde maksimum değere ulaŐır ve sıcaklığın artmasıyla birlikte düŐmeye başlar.

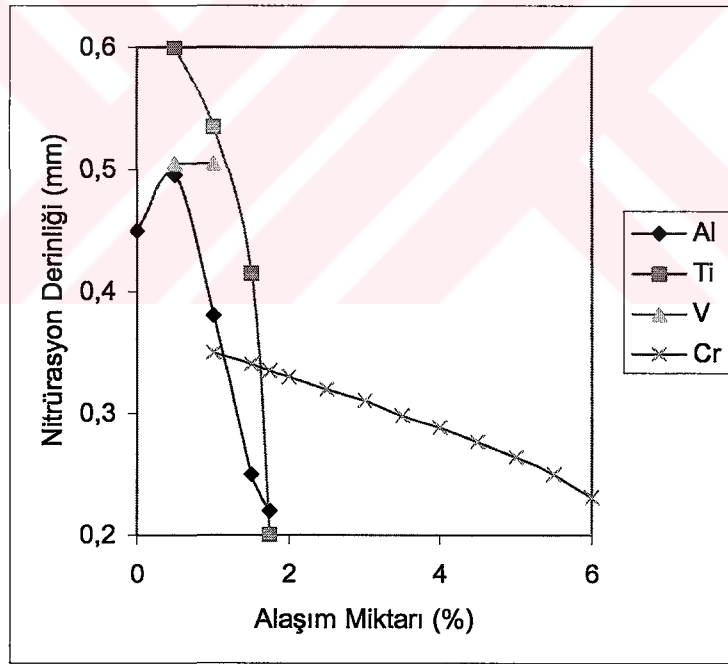


Şekil 2.4 Nitrüleme sıcaklığının bir fonksiyonu olarak bileşim tabakası kalınlığının değişimi

Nitrüleme derinliği, Şekil 2.5'te görüleceği gibi alaşım elementi miktarının artmasıyla azalır (Tekin, 1984). Alaşım elementlerinin, azotun difüzyonunu engelleyici etki göstermelerinin nedeni, azotla beraber nitrürler oluşturmalarıdır. Bu elementlerin miktarı arttıkça, azotun çeliğin bünyesine alınması zorlaşır. Sertlik artışında en büyük etkiye sahip olan Al ve Ti aynı zamanda azotun difüzyonuna karşı en fazla geciktirici etkiyi gösterirler. Optimum sertlik ve nitrüleme derinliğinin sağlanması için tavsiye edilen Al oranı %1 civarındadır. Karbonun da benzer şekilde azot difüzyonuna karşı kuvvetli bir engelleyici özelliği vardır.

Genel olarak nitrüleme derinliği Denklem (2.1)'de gösterildiği gibi zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir (Tekin, 1984). Bu denklemde t saat olarak nitrüleme süresi, D mm olarak nitrüleme derinliği ve k ise malzemeye bağlı ampirik bir sabittir.

$$D = k\sqrt{t} \quad (2.1)$$



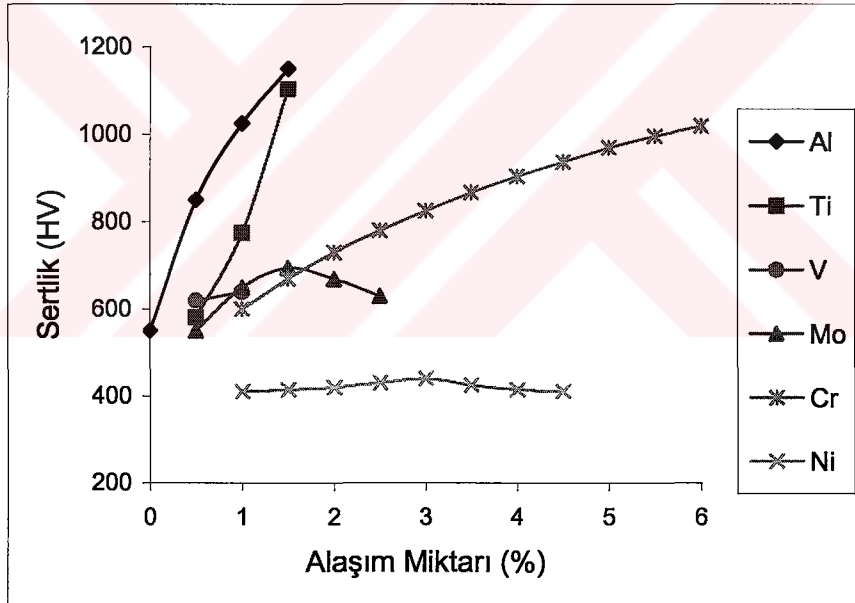
Şekil 2.5 Alaşım elementlerinin nitrüleme derinliğine etkisi
(Nitrüleme işlemi 520°C'de 8 saat süreyle yapılmıştır)

Nitrüleme sırasında, nitrülemeyi kontrol eden önemli bir parametre de azot aktivasyonudur. Difüzyon kanunlarına göre, yüzeyin altına nüfuz eden azot miktarı, sıcaklık ve malzemenin en dış tabakasında oluşturulan azot miktarı ile kontrol edilir (Tekin, 1984).

2.3.1.2 Sertlik

Nitr rl nmiş malzemenin sertliği malzeme bileşimindeki karbon miktarının artmasıyla azalırken, malzeme bünyesindeki nitrür oluşturucu elementlerin artmasıyla yükselir. Diğer taraftan bu elementlerin miktarlarındaki artış sertleşme derinliğini sınırlandırır. Alaşım elementlerinin malzemenin nitrürleme sonrası sertliğine etkisi şekil 2.6'da verilmiştir (Tekin, 1984). Yüksek yüzey sertliği istenen nitrürlenecek bir malzemenin bileşimi üzerinde karar verileceği zaman, seçim, genellikle Al, Ti, Cr, Mo ve V gibi güçlü nitrür oluşturan elementler üzerinde yapılır. şekil 2.6'daki diyagramdan da görüleceği gibi; yüzey sertliği üzerinde en büyük etkiye sahip Al'dur. Bunu sırasıyla Ti, Cr, Mo ve V takip eder. Nikelin etkisi sade karbonlu çeliklerde oluşan yüzey sertliği kadardır.

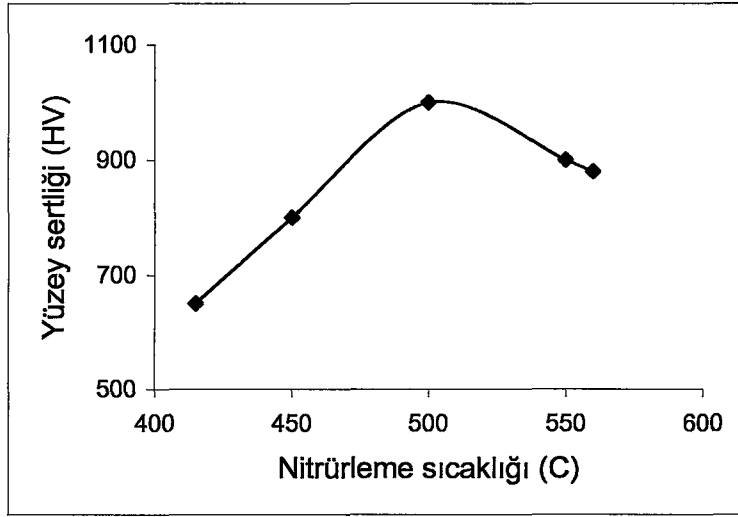
Kuvvetli nitrür yapıcı bu elementler nitr rl r oluşturarak sertliği arttırmalarına rağmen, azotun malzeme içinde yayınmasını önemli ölçüde engellerler.



şekil 2.6 Alaşım elementlerinin yüzey sertliğe etkisi

Yüzey sertliği, nitrürleme sıcaklığından önemli ölçüde etkilenir. şekil 2.7'de En40B (32CrMo12) eliğinin 10 saat NH₃ atmosferinde plazma nitr rl nmesi sonucunda elde edilen yüzey sertliğinin nitrürleme sıcaklığına göre değişimi verilmiştir (Leppanen, 1999). Belli bir nitrürleme süresi için artan sıcaklıkla birlikte yüzey sertliği artarak belli bir maksimum değere ulaştıktan sonra düşüş eğilimi göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda parça yüzeyine nüfuz eden azot miktarı düşük olduğundan nitr rl nmiş tabaka kalınlığı ve yüzey sertliği düşüktür. Bu nedenle, maksimum

yüzey sertliğini elde edilebilmek için her malzemeye ait farklı optimum sıcaklık aralığı tanımlanabilir.



Şekil 2.7 En40B (32CrMo12) çeliğinin 10 saat NH_3 atmosferinde nitrürlenmesi sonucunda elde edilen yüzey sertliğinin nitrürleme sıcaklığına göre değişimi

Yüzey sertliği üzerinde nitrürleme atmosferindeki gaz cinsleri ve bu gazların karışım oranları da etkilidir. Yüksek yüzey sertliği ve kalın difüzyon tabakası elde edilebilmesi için en uygun gaz karışımı $\text{N}_2\text{-H}_2$ çiftidir (Gülmez, 1998). Malzeme yüzeyinde beyaz tabaka oluşturmaksızın sadece difüzyon tabakasının oluşması gaz karışım oranındaki azot miktarına bağlıdır. Gaz karışım oranında azot miktarının %5'ten az olması durumunda yüzeyde beyaz tabaka oluşmamakta, azot miktarının %5-30 arasında olması durumunda tek fazlı $\gamma\text{'-Fe}_4\text{N}$ tabakası oluşurken, azot miktarının bu oranı aşarak daha yüksek değerlere ulaşması durumunda (%60-70) tek fazlı $\epsilon\text{-Fe}_{2.3}\text{N}$ tabakası oluşmaktadır (Gülmez, 1998). ϵ türü beyaz tabaka özellikle aşınmaya karşı çalışacak parça yüzeyleri için arzu edilen bir tabakadır.

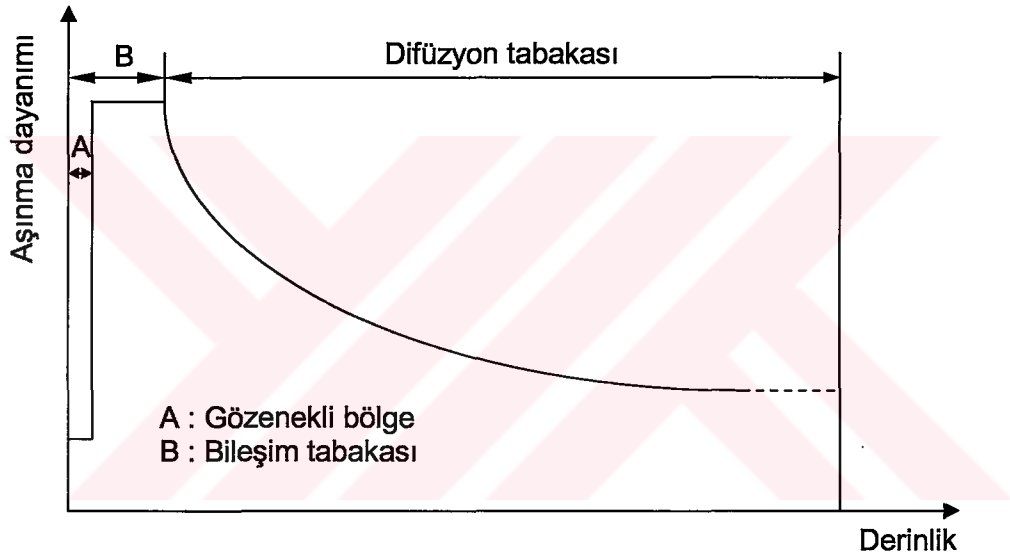
2.3.1.3 Yorulma Dayanımı

Nitrürleme yöntemiyle malzeme yüzey sertliğinde önemli bir artış sağlamakla birlikte, yüzeydeki artık basma gerilmeleri nedeniyle malzemenin yorulma dayanımında da bir iyileşme sağlanır. Yapılan deneyler nitrülenmemiş numuneye göre plazma nitrülenmiş düz numunenin yorulma dayanımında yaklaşık %53, çentikli numunenin yorulma dayanımında ise yaklaşık %115'lik bir iyileşme olduğunu göstermiştir (Leppanen, 1999). Gürel ve diğ. (2000) yaptıkları çalışma sonucunda; AISI 4140 çeliğinin yorulma dayanımında nitrürleme şartlarına bağlı olarak %50'lere varan bir iyileşme sağlanabildiğini ve aynı şartlar altında yapılan plazma nitrürlenmeyle sıvı

nitrülemeye göre yorulma dayanımında yaklaşık %12'lik bir iyileşme görüldüğünü belirtmişlerdir.

2.3.1.4 Tribolojik Özellikler

Nitrüleme sonrasında oluşan bileşim tabakasının dış yüzeyi gözenekli bir yapıya sahiptir. Bu bölge, genellikle kötü mekanik özellikleri nedeniyle nispeten düşük aşınma dayanımı sergiler. Gözeneksiz tabakanın aşınma dayanımı, metalik karakterde olmayan sert nitrürler ve karbonyürler nedeniyle oldukça iyidir. Difüzyon bölgesindeki aşınma dayanımı ise yüzey derinliğinin artmasıyla birlikte azalır. Şekil 2.8'de nitrülenmiş bir malzemenin bileşim tabakası ve difüzyon bölgesi derinliği boyunca aşınma dayanımının genel davranışı verilmiştir (Leppanen, 1999).



Şekil 2.8 Nitrülenmiş bir malzemenin bileşim tabakası ve difüzyon tabakası boyunca aşınma dayanımının genel yapısı

Nitrülenmiş yüzeyin en dışındaki gözenekli tabaka bir yağ deposu gibi davranır. Böylece özellikle oksidasyon aşınmasına karşı dayanımda önemli ölçüde iyileşme sağlanabilir. Bu gözeneklerin miktarı nitrüleme süresi ve azot aktivasyonunun artırılmasıyla yada alaşım miktarının düşürülmesiyle azaltılabilir.

2.3.2 Nitrüleme Yönteminin Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Nitrüleme işlemi ile malzemeye kazandırılacak özellikler şöyle sıralanabilir:

- Yüksek Bir Yüzey Sertliği ve Aşınma Mukavemeti:** Nitrüleme işleminin sağladığı üstünlüklerden birisi yüzey sertliğinin artması ve sürtünme katsayısının azalmasıdır. Böylece sürtünmeyle oluşan aşınmaya karşı

önemli bir direnç artışı sağlanmış olur. Nitrürlenmiş malzemeler, belli koşullar altında yağlamaya gerek kalmadan çalışabilirler. Bu konuda, aşınarak parçalanma eğilimi gösteren yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış çelik parçalarda deneyler yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda; nitrürlenmemiş bir hadde çemberi 400 d/d'lık hızla 7 dakikalık dönme sonucunda aşınmaya başlarken, aynı malzeme nitrürlendikten sonra aynı çalışma şartlarında aşınma olmaksızın 120 dakika çalışabilmiştir (Tekin,1984). Bunun temel nedeninin, yüzey sertliğindeki artışa bağlı olarak sağlanan sürtünme katsayısındaki azalma olduğu belirtilmiştir.

- b. Temperlenmeye Karşı Yüksek Direnç ve Yüksek Sıcaklıkta Yüksek Sertlik:** Temperlenmeye karşı yüksek direnç ve yüksek sıcaklıkta yüksek sertlik özelliklerini koruyabilme, nitrürasyon çeliklerinin önemli özelliklerindendir. Malzemeler, nitrürlenme sonrası herhangi bir sertlik kaybı söz konusu olmaksızın nitrürlenme yapılan sıcaklığa ve bazı hallerde daha yüksek sıcaklığa kadar ısıtılabilirler. Mükemmel aşınma direnci ve yüksek sıcaklıklarda sertlik kombinasyonu gösteren nitrürlenmiş çelikler, özellikle sıcak iş kalıpları olarak kullanıldıklarında iyi sonuçlar alınmaktadır.
- c. Yüksek Yorulma Mukavemeti ve Düşük Çentik Hassasiyeti:** Yorulma mukavemetindeki artış az karbonlu çelik ve düşük alaşımlı çelikler için çok yüksektir ve bu özellik nitrürlenme süresinin artmasıyla birlikte daha da iyileşir. Yorulma mukavemeti üzerinde çentiğin önemli bir etkisi vardır. Bu etki nitrürlenme sırasında malzemede oluşturulan basma gerilmeleriyle azaltılabilir. Bu nedenle çentik etkisi nedeniyle yorulma dayanımı önemli ölçüde düşen malzemelerin nitrürlenerek yorulma dayanımlarının artırılması yoluna gidilebilir.
- d. Çelikler için korozyon direnci:** Nitrürlenme sonrasında, paslanmaz olmayan çeliklerin korozyon dirençlerinde artış görülür. Nitrürlenmiş paslanmaz çeliklerin korozyon direnci, kromun nitrürler halinde bağlı olmasından dolayı azalma eğilimi gösterir.
- e. Yüksek boyutsal kararlılık:** Nitrürlenme en az boyutsal değişime neden olan ve en yüksek sertliği sağlayan ısıtılma işlemi yöntemidir. Nitrürlenme sıcaklıkları nispeten düşük olduğundan ana malzemede hiç bir faz dönüşümü görülmez. Yüzeyde azotun absorpsiyonu genellikle yüzeyin şişmesi şeklinde oluşan hacimsel bir artışı ve bunun yanında yüzey tabakası ile çekirdek arasında

gerilme oluşturur. Bu şişme miktarı büyük ölçüde nitrürleme süresinin uzunluğuna bağlıdır ve yapılan deneyler 60 saati açan nitrürleme s relerinden sonra oluşan yüzey şişmesinin anlamlı (0,01 mm.'den büyük), bundan daha az sürelerde yapılan nitrürlemede oluşan yüzey şişmelerinin çok küçük (0,01 mm.'den küçük) olduğunu göstermiştir (Tekin, 1984).

2.3.3 Nitrürleme Yöntemleri

Gaz nitrürleme, tuz banyosunda nitrürleme, toz nitrürleme ve plazma (iyon) nitrürleme olmak üzere dört farklı nitrürleme yöntemi mevcuttur.

2.3.3.1 Gaz Nitrürleme

Gaz nitrürleme yöntemiyle çok sert nitrür tabakaları oluşturmak mümkündür.  elik esaslı malzemeler için çok sert nitrürler; alüminyum, titanyum, molibden, vanadyum ve kromla çok yüksek olmayan sıcaklıklarda (yaklaşık 510-550 C) elde edilebilir (Genel, 2002). Ancak bu sıcaklıklar difüzyonu olumsuz yönde etkilediğinden, çok derin nüfuziyete ulaşmak zordur. Difüzyon hızı düşük olduğundan, işlem için gereken süre oldukça fazladır. Böyle bir nitrürleme işleminde sonra, kırılğan ve kolayca parçalanabilen bir yüzey tabakasının oluşumu da söz konusu değildir.  elik malzemelerde 500 C'nin üzerindeki sıcaklıklara çıkılmasıyla ferit kristalleri içine daha yüksek miktarda azot yerleşmesi söz konusu olduğu için difüzyon hızı artar, ancak sertlik düşer. Böyle bir durumda daha düşük sertliğe rağmen, aşınmaya karşı daha dayanıklı bir yüzey elde edilir.

Gaz nitrürlemede, azot içeren gaz olarak genellikle amonyak (NH_3) kullanılmakla birlikte azot ve hidrojen gaz karışımı da kullanılabilir. Parçalar, hassas sıcaklık kontrollü, gaz sızdırmaz elektrikli fırın içerisinde istenilen sıcaklığa kadar yavaş yavaş ısıtılır. Nitrürlenecek numuneleri içinde bulunduran fırının, kullanılan gazla reaksiyona girmeyecek malzemeden yapılmış olması gereklidir. Aksi takdirde nitrürleme gazıyla reaksiyona giren malzeme gaz tüketiminin artmasına neden olacak ve gaz nitrürlemenin kontrolü zorlaşacaktır. Bu nedenle Inkonel ve benzer alaşımların kullanılması uygundur (Tekin, 1984). Kullanılacak gazda daima su buharı bulunacağından ve bu buhar nitrürlenmiş numunenin oksidasyonuna neden olacağından, gazdaki su buharı nitrürleme öncesinde alınmalıdır. Nitrürleme  ncesi, parçaların yüzeyleri çok iyi temizlenmeli ve yağdan arındırılmalıdır. Eğer parçanın belli bölümlerinin nitrürlenmesi istenmiyorsa, bu kısımlar izole edilerek azotun parçaya girmesi engellenebilir. Gaz nitrürleme genellikle 0,2-0,7 mm arasında

değişen sertleşme derinlikleri arzu edildiğinde tercih edilen bir yöntemdir (Tekin, 1984).

2.3.3.2 Banyo (Sıvı) Nitrürleme

1950'lilerin ortalarına kadar, nitrürleyici tuz banyoları sınırlı bir ölçüde uygulanmıştır. Özellikle matkapların 10-30 dakika gibi kısa süren nitrülenmesinde tercih edilmiştir (Tekin, 1984). Günümüzde banyo nitrürleme, yüksek miktarda siyanat içeren siyanürlü tuz banyolarında yapılır. Bu ortamda, yüksek sıcaklıklarda siyanürden (CN) karbon ayrışmasına benzer olarak, düşük sıcaklıklarda azot ayrıştırılarak çeliğe verilir. Banyo nitrürlemenin gaz nitrürlemeye göre üstün tarafı, banyo nitrürlemede 500°C gibi düşük sıcaklıklarda daha yüksek sertliğe ulaşılabilmesi ve küçük nüfuz derinliklerinde, eşit derinliğe daha kısa sürede ulaşılabilmesidir. Parçaların tuz banyolarına daldırılıp alınması da, gaz fırınlarındaki nitrürlemeye nazaran daha kolaydır. Ayrıca koruyucu kaplama yapılmaksızın, bölgesel olarak kısmi daldırma yapılarak, bölgesel nitrürleme de yapılabilir. Ancak bu yöntemin dezavantajı, hızlı ısınma nedeniyle daha çok deformasyon tehlikesi oluşma ihtimalinin olmasıdır. Hız çeliklerinin dışında, banyo nitrürleme daha az kullanılır. Daha çok, yüksek aşınma dayanımlı yüzey elde etmek veya değişken zorlanma hallerinde yüksek sürekli mukavemet sınırı oluşturmak için tercih edilir. Ancak sıvı nitrürleme süresinin artmasıyla parça yüzeyinde kendini gösteren boşluk oluşumu, işlem süresinin sınırlanmasını zorunlu hale getirir. Son yıllarda banyoya oksijen veya hava enjekte edilerek siyanat miktarının homojenliği sağlanmakta ve böylece malzeme yüzeyinde boşluk oluşma eğilimi daha iyi kontrol edilebilmektedir (Genel, 2002). Bu işlem İngilizce "Tuffride" veya Almanca "Tenifer" olarak adlandırılmaktadır.

Nitrürleme sırasında çeliğe nüfuz ederek ferrit kafesine yerleşen azot, sertlikte önemli bir artış sağlamamasına rağmen, yüzeyin aşınma direncini oldukça artırır.

Banyo nitrürleme %25-50 siyanür ve %50 siyanat içeren siyanür banyolarında yapılır. Banyo sıcaklığı genellikle 500-580°C arasındadır. Nitrürleme süresi, normal olarak 2 saattir. Nitrürleme sonrası parçalar suda ani olarak soğutulurlar. Büyük gerilmelerin oluşmasını engellemek için 80°C'ye kadar ısıtılmış banyolar da kullanılabilir. Bazı durumlarda havada soğutma da uygulanabilir.

Bu nitrürleme yöntemi özellikle aşınmaya karşı dayanımın yüksek olması istenilen yerlerde tercih edilen bir yöntemdir. Ayrıca değişken eğilme ve burulma zorlanmalarına maruz kalan parçaların sürekli mukavemet sınırında da artışı

sağlayan bir yöntemdir. Aynı malzeme için gaz nitrürleme ile 12-120 saatlik nitrürleme sonrasında elde edilen özellikler, tuz banyosunda 1-4 saatlik nitrürleme sonrasında elde edilebilmektedir. Özellikle çelik malzemelerin nitrürlenmesinde, gaz nitrürleme gevrek bir yapıya neden olduğu halde banyo nitrürleme de böyle bir durum söz konusu değildir. Tüm bu özellikler, banyo nitrürleme yönteminin gaz nitrürleme yöntemine göre avantajları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanı sıra banyo nitrürleme yönteminin de dezavantajları vardır. Bunlar; banyo nitrürlemede kullanılan siyanürün zehirli olması nedeniyle sağlık açısından tehlike oluşturması ve nitrürleme sonrası iş parçalarının temizlenme gerekliliğidir.

Nitrürleme sırasında siyanür bileşimindeki karbonun bir kısmı çeliğe nüfuz etmekte, böylece azot ve karbon atomları beraberce karbo-nitrürleri oluşturmaktadır. Nitrürleme sonucunda malzeme yüzeyinde γ -Fe₄N ve ϵ -Fe₂₋₃N fazları birlikte bulunabilmektedir. Farklı fazlara ait farklı kafes yapısının neden olduğu iç gerilmeler mekanik zorlanma karşısında nitrür tabakasının, diğer tek fazlı yapılara göre daha zayıf davranmasına ve özellikle yüzeyin çekme gerilmesi taşıma kabiliyetinin düşmesine yol açmaktadır (Genel, 2002).

2.3.3.3 Toz Nitrürleme

Toz nitrürleme ile nitrürlenecek parçalar, tabanında ağırlıkça %15 oranında nitrürlenmeyi hızlandırıcı malzeme bulunan bir kutu içerisine yerleştirilir. Daha sonra nitrürlenecek yüzeyler, nitrür oluşturu tozla bir tabaka halinde kaplanır. Nitrürlenecek malzemelerin küçük ve çok sayıda olması durumunda; nitrürleme kutusuna uygun miktarda nitrür oluşturu toz koyulması şartıyla, kutu içerisine çok sayıda parça yerleştirilebilir. Parçaların kutu içine uygun bir şekilde yerleştirilmesinden sonra, kutu kapatılarak nitrürlenecek malzemenin cinsine bağlı olarak uygun bir sıcaklıkta nitrürleme süresi kadar bekletilir. Bu işlem için uygulanan nitrürleme sıcaklığı 520-570°C aralığında değişmektedir. Malzeme yüzeyinde oluşan kabarma ve pul pul dökülme tehlikesi nedeniyle, nitrürleme süresinin 12 saati aşmaması gerekir (Genel, 2002).

2.3.3.4 Plazma (İyon) Nitrürleme

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

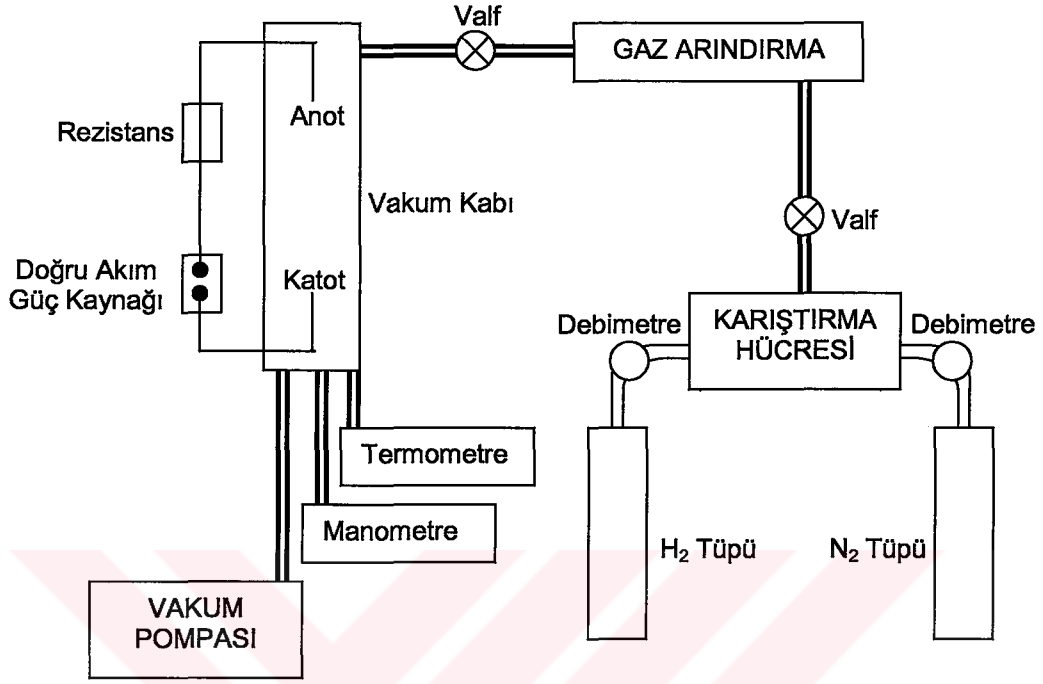
nitrüleme yöntemi geliştirilmiştir. İyon nitrüleme yöntemiyle daha kısa sürede malzeme yüzeyinin mekanik ve tribolojik özellikleri geliştirilebildiğinden, günümüzde bir çok makina parçasının yüzeyi bu yöntem kullanılarak sertleştirilmektedir. Dişli çarklar, krank milleri, miller, sıcak ve soğuk şekillendirme kalıpları bunlardan bazılarıdır. Günümüzde dünya çapında 1500'den fazla iyon nitrüleme tesisinin bulunduğu tahmin edilmektedir (Gülmez, 1998).

Plazma nitrüleme yönteminde azot difüzyonu, metal yüzeyinde ve yüzeye çok yakın bölgede termo-kimyasal reaksiyonlarla gerçekleştirilir. Azot difüzyonuyla oluşan nitrürler ve bu nitrürlerin malzeme özelliklerine etkisi, alışılmış diğer nitrüleme yöntemlerinde olduğu gibidir. Termo-kimyasal reaksiyonların oluşması için gerekli olan azot, azot gazının yada azot içeren bir gaz veya gaz karışımının yüksek gerilimli doğru akım (DC) ile iyonlara ayrıştırması ile elde edilmektedir. Bu yöntemde gaz olarak genellikle azot yada amonyak kullanılmaktadır. Nitrür partiküllerinin oluşması için gerekli olan aktifleşme enerjisi ise, fırın cidarı ile parça arasında oluşturulan yüksek gerilim ile nitrülenecek parçaya doğru ivmelendirilen iyonların parça yüzeyini bombardımanı sonucunda açığa çıkmaktadır.

Şekil 2.9'da plazma nitrüleme yönteminde kullanılan sistemin şematik resmi verilmiştir. Şekil 2.9'dan da görülebileceği gibi sistem; vakum fırını, gaz dağıtım sistemi ve elektrik güç kaynağı olmak üzere üç ana donanımdan meydana gelmektedir. Güç kaynağının kapasitesi, nitrüleme yapılacak yüzey alanına bağlıdır. 400-800 V arasında doğru akım alınabilen transformatörlerde akım yoğunluğu 1 mA/cm² seviyesindedir. Gaz jeneratöründe üretilen gazda N₂/H₂ oranı genellikle %2 ile %25 aralığında değişmektedir. Vakum pompası 1-10 torr basınç aralığında çalışabilmektedir. Nitrüleme işlemi sırasında yüzeyin sıcaklığı sürekli olarak ölçülmektedir.

Nitrüleme yapılacak parçanın yüzeyi yağ ve kirlerden temizlendikten sonra, vakum fırınına katot (negatif kutup) olacak şekilde yerleştirilir. Fırın duvarları anot (pozitif kutup) görevi yapar. Fırın 0,01 mbar basıncına kadar bir rotasyon vakum pompası ile vakuma alınır. Fırın duvarları ile iş parçası arasında 100-1500 V arasında bir doğru akım uygulandıktan sonra, fırın içerisine azot yada 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, katotik pozisyonda olan iş parçasını tamamen sarmış ve parıltılı boşalım adı verilen ayrılmış gaza ait iyonların parça yüzeyine bombardımanı

başlamıştır. Bu iyon bombardımanı ile iş parçasında mükemmel bir yüzey temizliği sağlanır. Nitrüleme için gerekli azot difüzyonu ise, difüzyon için gerekli sıcaklığa ulaşıldığında başlar.



Şekil 2.9 Plazma nitrüleme sistemi

Birçok ülkede yaygın olarak kullanılan bu nitrüleme yöntemi; pompalar, hidrolik makina parçaları, haddeler, dişli çarklar, motor, otomotiv endüstrisi, sıcak ve soğuk iş takım endüstrisi gibi alanlarda kullanılmaktadır.

Plazma nitrülenen yüzeylerde elde edilen sertlik profili, diğer nitrüleme yöntemlerine elde edilen sertlik profiline benzer. Ancak gerek yüzeyde gerekse yüzeye yakın bölgelerde, işlem daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği için aynı sıcaklık için daha yüksek yüzey sertlikleri elde edilebilir. Benzer nedenden dolayı, ölçü değişimi ve deformasyon en az iyon nitrüleme yönteminde meydana gelir. Ayrıca nitrürlenmiş yüzeyde geçiş bölgesinin çok ince olması yorulma dayanımının artmasına katkıda bulunur.

Plazma nitrüleme yönteminin, diğer nitrüleme yöntemlerine göre sağladığı üstünlükler şöyle sıralanabilir (Génel, 2002):

- a- Sadece iş parçasının ısıtılması nedeniyle enerji tasarrufu sağlanır ve ısı verim yüksektir. Diğer nitrüleme yöntemlerinde olduğu gibi fırın yada potanın ısıtılması gibi bir problem söz konusu değildir.

- b- Diğer nitrürleme yöntemlerine göre aynı sıcaklık ve derinlik için işlem süresi yaklaşık %50-70 daha kısadır.
- c- Klasik nitrürleme yöntemlerinde sıcaklığın pratik açıdan çok fazla düşürülememesi, boyutsal kararlılığın önemli olduğu parçalarda çarpılma riskine neden olmaktadır. Plazma nitrürleme sırasında sıcaklık daha düşük olduğu için ölçü değişimi ve deformasyon riski minimum düzeydedir.
- d- Nitrürleme yöntemiyle sertleştirme yapılması durumunda; çekirdek sertliği, tabaka kalınlığı ve yüzey sertliği üçlüsünün en iyi kompozisyonu iyon nitrürleme ile sağlanır.
- e- Düşük basınçlarda çalışıldığından gaz tasarrufu sağlanır.
- f- Klasik nitrürleme yöntemlerinde beyaz tabaka oluşumu ve kalınlığının kontrolü oldukça zordur. Böyle bir durumda yüzeyde oluşan istenilmeyen beyaz tabakanın giderilmesi için ek işlemlere gerek vardır. Oysa ki iyon nitrürleme yönteminde beyaz tabaka oluşumu ve kalınlığının kontrolü oldukça kolaydır. Bu nedenle; iyon nitrürleme sonrasında yüzey bitirme işlemlerine daha az gereksinim duyulur.
- g- Sertleştirilmesi istenilmeyen yüzeylerin mekanik olarak izolasyonu mümkündür.
- h- Gaz ve sıvı nitrürleme sonrasında arta kalan atıkların zehirli olması çevre temizliği ve sağlığı açısından problemler ortaya çıkarmaktadır. İyon nitrürlemede ise gaz veya diğer atıklarla çevre kirletilmez ve insan sağlığı açısından tehlikeli bir durum söz konusu değildir.
- i- Otomasyona uyumludur. Sistem değişkenlerin (nitrürleme parametrelerinin) kontrol altında tutulması daha kolaydır.
- j- İş parçası üzerindeki tüm girinti, çıkıntı ve delikler üzerinde homojen bir azot difüzyonu sağlanabilir.
- k- Reaksiyonun gerçekleştiği fırında hareketli parçalar söz konusu olmadığından fırın bakım masrafları daha düşüktür.
- l- Nitrürlenecek parçanın büyüklüğü ve ağırlığı önemli değildir.

Plazma nitrürlenme yönteminin yukarıda sayılan pek çok önemli avantajları olmasına rağmen birtakım dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajlar şöyle sıralanabilir:

- a- İlk yatırım maliyetleri yüksektir. Bu nedenle sadece seri üretimde ekonomiktir.
- b- Nitrürlenecek parçanın hacmine, dolayısıyla reaksiyon fırının hacmine bağlı olarak 1 kW ila 1000 kW arasında enerji gereksinimine ihtiyaç vardır.
- c- Nitrürlenecek numuneler, nitrürlenme fırınına yerleştirilmeden önce çok iyi temizlenmelidir.
- d- Aynı şarjda; sadece aynı boyut ve kesitteki parçalara nitrürlenme uygulanabilir.

2.3.4 Plazma Nitrürlenme İle Oluşan Yüzeyin Genel Yapısı

Plazma nitrürlenme sonrasında, nitrürlenme şartlarına bağlı olarak malzeme yüzeyinde birbirinden farklı özellikte iki tabaka meydana gelir. En dış yüzeyde oluşan tabaka bileşim (compound) tabakası veya beyaz (white) tabaka olarak adlandırılır. Bu tabakanın altında yer alan diğer tabaka da difüzyon (yayınma) bölgesi olarak adlandırılır.

2.3.4.1 Beyaz Tabaka

Beyaz tabakaya, yapısı itibarıyla nitrür tabakası adı da verilir. Oldukça sert ve kırılgan bir yapıda olan beyaz tabaka, Fe_{2-3}N ve/veya Fe_4N fazlarının birleşiminden meydana gelmiştir. Beyaz tabakayı oluşturan fazların cinsi, sayısı ve kalınlığı beyaz tabakanın mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Heterojen bir karışıma sahip olan beyaz tabakayı oluşturan Fe_{2-3}N (SDH) ve Fe_4N (YMK) farklı kristal yapıya sahip olduklarından geçiş bölgesinde iç gerilmeler meydana getirirler ve mikroçatlaklar bu bölgede oluşur. Bu nedenle beyaz tabakanın tek fazdan oluşması ve bu problemlerin meydana gelmemesi arzu edilir. Beyaz tabaka kalınlığı nitrürlenme süresi, sıcaklığı ve gaz karışımındaki azotun artmasıyla birlikte artar. Yapılan çalışmalar beyaz tabaka kalınlığındaki artışın, malzemenin aşınma miktarını arttırdığını göstermiştir. Ayrıca Fe_{2-3}N yapısının gözenekli olması, sürtünme sırasında abrazif partiküllerin oluşmasına neden olarak aşınmanın daha da artmasına neden olur. Ayrıca son yıllarda uygulanan dubleks yüzey işlemleri adı

verilen iyon nitrürlenmiş malzeme üzerine sert kaplamaların uygulanması durumunda, beyaz tabakanın kaplama ile altlık malzemesi arasındaki adhezyon bağını azalttığı belirtilmiştir. Bu nedenle optimum özelliklerin sağlanabilmesi amacıyla beyaz tabakanın minimum kalınlıkta ve tek fazlı Fe₄N'ten oluşması arzu edilir (Alsaran ve diğ., 2000).

İyon nitrürlemede kullanılan gazın bileşimi, beyaz tabakayı oluşturan faz türü yada türlerini belirleyici ana değişkendir. Yüzeyde beyaz tabaka oluşturmadan nitrürleme yapılması yada beyaz tabakanın sadece tek fazdan oluşmasının sağlanması, gaz karışımındaki azot miktarıyla yakından ilişkilidir. Eşik nitrürleme potansiyeli adı verilen kritik azot miktarının altında nitrür tabakası oluşmaz. Nitrür tabakasının oluşmadığı nitrürlemeye parlak (bright) nitrürleme adı verilir. Nitrür tabakasının oluşumunu; nitrürleme potansiyeli, nitrürleme süresi, nitrürleme sıcaklığı ve plazma ortamındaki karbon miktarı belirler. Nitrürleme sırasında, nitrürleme süresinin artmasıyla birlikte yüzeydeki azot konsantrasyonu artar. Nitrürleme potansiyeli eşik değerin üzerine çıktığında, malzeme yüzeyinde γ' -Fe₄N ve/veya ϵ -Fe₂₋₃N fazından oluşan bir bileşim tabakası meydana gelir. Çok sert olan ϵ fazı aşınmanın önemli olduğu uygulamalarda tercih edilirken, daha yumuşak ve sünek olan γ' fazının aşınma dayanımı düşük ancak darbelere karşı dayanımı daha yüksek olduğundan bu tür özellik gerektiren uygulamalarda tercih edilir (Gülmez, 1998). Nitrürleme sıcaklığı çok yüksek olduğunda yada nitrürleme potansiyeli yeterince düşük olduğunda tek fazlı (γ) nitrür tabakası oluşur. Nitrürleme sıcaklığı ve süresi azaltıldığında yada nitrürleme potansiyeli yükseltildiğinde bileşim tabakasında oluşan ϵ fazının miktarı artar. Bu durum azot miktarı ve plazma nitrürleme sırasında nitrür tabakasındaki karbonun yeniden yapılanması ile açıklanabilir. Nitrürleme atmosferindeki N₂/H₂ oranının azalmasıyla nitrürleme potansiyeli azalacağından, nitrür tabakasının kalınlığında önemli bir azalma olur. Nitrür tabakasının nitrürleme süresine göre değişimi ise; nitrürlemenin başlangıcından itibaren bileşim tabakası belli bir kalınlığa ulaşıncaya kadar, zamana göre paraboliktir. Nitrür tabakası belli bir kalınlığa ulaştıktan sonra; nitrürleme süresi artsa dahi nitrür tabakası kalınlığında önemli bir değişim olmamaktadır. Nitrürlenen malzeme bünyesindeki karbon miktarının, bileşim tabakasının faz kompozisyonu üzerinde önemli bir etkisi vardır. Bileşim tabakasındaki ϵ/γ fazı oranı, malzeme bünyesindeki karbon bileşiminin artmasıyla yükselir. Benzer şekilde; nitrürleme atmosferinden karbon içeren gazların bulunması bileşim tabakasının büyük ölçüde ϵ fazından oluşmasını sağlar. Tek fazlı γ nitrür tabakasının üstün özellikleri nedeniyle tek fazlı bileşim tabakasının

oluşturulabilmesi için, plazma içindeki karbon bileşiminin çok dikkatli bir şekilde kontrol edilmesi gerekir (Sun ve Bell, 1991).

İyon nitrürlemede atom bombardımanının nitrür oluşumundaki rolü büyüktür. Bu yüzden nitrürleme başlangıcından çok kısa bir süre sonra beyaz tabaka oluşmaktadır. Artan nitrürleme süresi ile birlikte hızlı bir artış eğilimi gösteren beyaz tabaka kalınlığı belli bir süreden sonra yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Bunun temel nedeni nitrürlemenin başlangıcında malzeme yüzeyindeki yüksek azot yoğunluğunun artan işlem süresi ve bombardımanın etkisiyle azalmasıdır. Sadece azot gazı kullanılarak yapılan iyon nitrürleme sonrasında oluşan beyaz tabaka kalınlığının, N_2-H_2 karışımı kullanılarak yapılan iyon nitrürleme sonrasında oluşan beyaz tabakadan daha kalın olduğu bilinmektedir (Genel, 2002). İyon nitrürleme sonucunda elde edilen beyaz tabaka kalınlığı plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak 5-10 μm arasında değişmektedir.

İyon nitrürleme sonrasında oluşan beyaz tabaka kalınlığını azaltmak için “Çift Kademeli Nitrürleme” adı verilen bir yöntem uygulanabilir. Bu yöntemin asıl amacı nitrürleme süresini azaltmak olmakla birlikte, aynı zamanda beyaz tabaka kalınlığında da azalma meydana gelir. Bunun için; normal nitrürleme sonrasında, gaz karışımındaki azot miktarı azaltılarak yada sadece asal gaz kullanılarak, sıcaklık ve sürenin etkisiyle beyaz tabaka içindeki azotun malzeme içine doğru nüfuz etmesi sağlanır (Genel, 2002).

2.3.4.2 Difüzyon Tabakası

Beyaz tabakanın altında yer alan diğer tabaka difüzyon tabakası (nitrided case) olarak adlandırılır. Difüzyon tabakası malzeme bünyesinde bulunan alaşım elementleriyle azotun birleşerek meydana getirdiği nitrür çökeltilerinden ve azot ile α -Fe fazının doymasından meydana gelir. Difüzyon tabakası kalınlığı, nitrürleme sıcaklığı ve süresiyle artarken gaz karışım oranındaki azot miktarının artmasıyla azalmaktadır. Nitrürleme sonrası, nitrürleme parametrelerine bağlı olarak dış yüzeyden içeri doğru yaklaşık 700 μm 'lik mesafede yüzey sertliği artmaktadır. Ancak nitrürlenmiş malzemenin cinsine bağlı olarak belirli bir nitrürleme süresi sonrasında malzemenin temperlenmesi ve yapıdaki nitrürlerin yeniden dağılması nedeniyle yüzey sertliği azalmaktadır (Alsaran ve diğ., 2000).

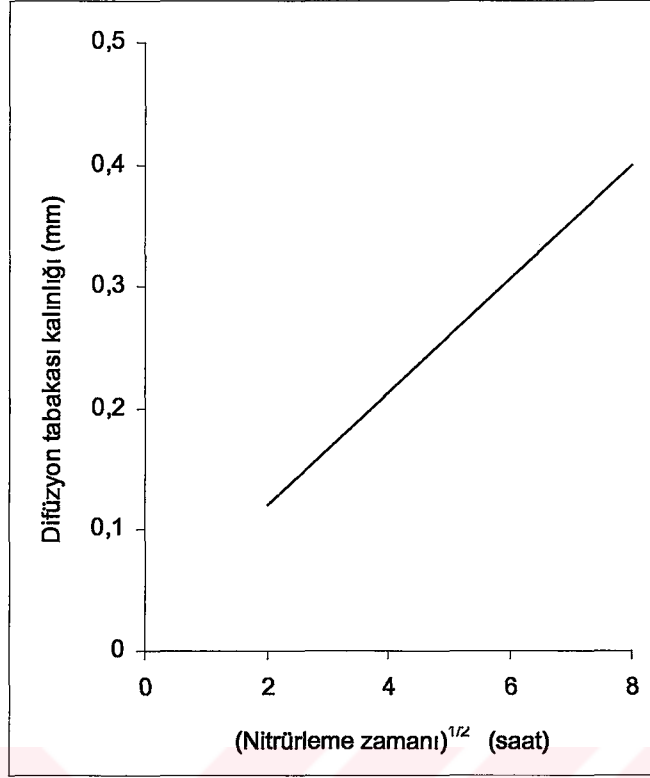
Azotun malzeme yüzeyine difüzyonu sırasında, difüzyon bölgesinde eş zamanlı olarak bir kaç reaksiyon meydana gelir. Bunlar; metal nitrürlerin çökeltisi, α -Fe

kafesinin azota doyması, artık gerilmelerin oluşumu, karbonların yeniden yapılanması ve tane sınırı fazı oluşumudur. Difüzyon bölgesinde artık basma gerilmelerinin oluşma nedeni, α -Fe kafesinin azota doyması ve metal nitrürlerin çökmesidir. Difüzyon bölgesine nüfuz eden azot ve artık basma gerilmesi, karbonun yeniden yapılanmasına neden olur. Karbon atomları başlangıçta gerilmenin olmadığı yüzeye yakın bölgelere ve nitrürlerin önüne nüfuz ederek, nitrürlerin önünde karbonca zengin bölgelerin ve yüzeye paralel tane sınırı fazının oluşumuna neden olurlar (Sun ve Bell, 1991).

Difüzyon tabakasının oluşumu, difüzyon kontrollü bir mekanizmasıdır. Difüzyon tabakasının derinliği, nitrürleme süresinin karekökünün bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Şekil 2.10'da En40B çeliğinin, 500°C sıcaklıkta NH_3 atmosferinde plazma nitrürlenmesi durumunda nitrürleme süresine göre difüzyon tabaka derinliğinin değişimi verilmiştir (Sun ve Bell, 1991). Ancak nitrürleme sıcaklığı temperleme sıcaklığına yakın yada yüksekse; difüzyon tabakası kalınlığının nitrürleme süresine göre değişimi, nitrürleme süresinin kareköküyle lineer bir ilişki göstermemektedir. Özellikle uzun nitrürleme sürelerinde bu durum daha çok görülmektedir.

Plazma nitrürleme sırasında, difüzyon tabakası malzemenin çekirdeğine doğru genişleme eğilimindedir. Bunun sonucunda; yüzey yakınında artık basma gerilmeleri oluşur. Artık gerilmelerin seviyesi sadece plazma nitrürleme parametrelerine bağlı olmayıp, aynı zamanda malzemenin kimyasal bileşimine de bağlıdır. Örneğin; alaşımsız karbon çeliklerinde nitrürleme sonrasında nispeten küçük artık basma gerilmeleri oluşurken, yüksek alaşımlı çeliklerde daha yüksek artık basma gerilmeleri oluşmaktadır. Difüzyon bölgesindeki artık basma gerilmeleri karbon bileşiminin artmasıyla azalır. Karbon bileşimindeki artış sertleşme kabiliyetini azaltmakla birlikte mikrosertlikle artık gerilme seviyesi arasında doğrudan bir ilişki yoktur.

Yapılan deneyler; difüzyon bölgesinin, yorulma dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Eşik nitrürleme potansiyeli altında yapılan parlak nitrürleme sonucunda elde edilen nispeten sığ difüzyon tabakasının, yorulma dayanımında önemli bir düşüşe neden olduğu bilinmektedir. Bileşim tabakasının yorulma davranışı üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Bunun temel nedeni yorulma hasarını oluşturan çatlak başlangıcının difüzyon bölgesi-çekirdek geçiş bölgesinde başlamasıdır (Sun ve Bell, 1991).



Şekil 2.10 En40B çeliğinin, 500°C sıcaklıkta NH₃ atmosferinde plazma nitrülenmesi durumunda nitrürleme süresine göre difüzyon tabakası derinliğinin değişimi

2.3.5 Plazma Nitrürleme Konusunda Yapılmış Çalışmalar

Plazma nitrürleme yönteminin diğer nitrürleme tekniklerine göre yeni bir yöntem olması, incelemeye ve geliştirmeye açık bir yüzey sertleştirme yöntemi olmasını sağlamaktadır. Diğer nitrürleme yöntemlerinde olduğu gibi, plazma nitrürleme yöntemi sonucunda elde edilen yüzey özelliklerini etkileyen bir çok değişken söz konusudur. Bu konuda yapılan araştırmaların büyük çoğunluğunu işlem parametreleri adı verilen bu değişkenlerin yüzey özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi ve elde edilen yüzey tabakasının malzemenin cinsine ve çalışma koşullarına bağlı olarak performansının araştırılması oluşturmaktadır. Aşağıdaki plazma nitrürleme konusunda yapılmış olan çalışmalar özetlenmiştir.

2.3.5.1 Plazma Nitrürleme Parametrelerinin Malzeme Yüzey Özellikleri Üzerindeki Etkisi

Stappen ve diğ. (1991), AISI 304 paslanmaz çelik ve ASP 23 takım çeliklerinin yüzey özellikleri üzerinde plazma nitrürleme şartlarının etkisini incelemişlerdir. Numuneleri 1 sat süreyle 400°C ve 500°C sıcaklıklarda %10 N₂+%90 Ar ve %60 N₂+%40 Ar gaz karışım oranlarında plazma nitrürlemişlerdir. Nitrürlemeden

sonra numune yüzeyleri 2 μm kalınlığında TiN 'le kaplanmıştır. Yaptıkları çalışma sonucunda; ostenit matris içine oldukça yavaş olan nitrojen difüzyonu sonucunda AISI 304 paslanmaz çelik yüzeyinde çok ince bir bileşim tabakasının oluştuğu, bileşim tabakasındaki yüksek iç gerilmeler nedeniyle AISI 304 numunenin TiN kaplamayla adhezyonunun oldukça kötü olduğu ve AISI ASP 23 numunede daha kalın bir difüzyon tabakasının oluşması nedeniyle TiN kaplamayla adhezyonunun nispeten daha iyi olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada plazma nitrüleme sonrasında değişen yüzey özellikleri incelenmiş, ancak bu özellik değişimleri nitrüleme parametreleri ile ilişkilendirilmediği gibi, nitrülenen malzemelerin çalışma performansları hakkında bir inceleme de yapılmamıştır.

Lee ve Shih (1994), AISI 304 ve AISI 410 paslanmaz çelikleri ve AISI 4140 düşük alaşımlı çeliği 560°C sıcaklıkta 50 saat süreyle plazma nitrüledikten sonra elde ettikleri nitrürlenmiş tabakanın bileşimini ve mikroyapıyı incelemişlerdir. Nitrülemenden önce aşınma hızı ve sürtünme katsayısı değerinin büyükten küçüğe doğru sırasıyla AISI 4140, AISI 410 ve AISI 304 şeklinde olurken, nitrüleme sonucundaki sıralamanın AISI 304, AISI 410 ve AISI 4140 şeklinde değiştiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca; plazma nitrülemenin AISI 4140 malzemenin korozyon aşınma direnci üzerinde olumlu etki gösterdiği, diğer malzemeler için ise olumsuz bir etki oluşturduğu, bunun temel nedeninin nitrülemeyle yüzeyde oluşan kimyasal değişim olduğu belirtilmiştir. Ancak ilgili kaynak incelendiğinde, yapılan çalışmanın sonuçlarına ilişkin doyurucu bir açıklamanın yapılmadığı, sadece sonuçların verildiği değerlendirilmektedir.

Menthe ve diğ. (1995), AISI 304 paslanmaz çeliğini 400-600°C sıcaklık aralığında 5 saat süreyle %80 N₂+%20 H₂ gaz karışım oranında plazma nitrülemişler, oluşan yüzeyin yapısını ve kimyasal bileşimini incelemişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda; bileşim tabakası kalınlığının nitrüleme sıcaklığıyla birlikte arttığını, plazma nitrüleme sonrasında yüzey sertliğinin yaklaşık 5 kat arttığını, nitrürlenmiş tabaka kalınlığının işlem parametrelerine bağlı olarak değişmekle birlikte maksimum değerinin 34 μm olduğunu ve nitrürlenmiş tabakanın lokal korozyona karşı direncinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada da sadece değişen yüzey özellikleri incelenmiş, elde edilen sonuçlar nitrüleme parametreleri ile ilişkilendirilmemiş ve plazma nitrüleme sonrasında sağlanan iyileşme gerçek çalışma koşullarında test edilmemiştir.

Fancey ve diğ. (1995), argon, neon ve hidrojen gaz karakteristiklerinin plazma nitrürlenmiş AISI M2 çeliğinin özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu

amaçla numune; %92 Ar+%8 N₂, %92 Ne+%8 N₂, %50 H₂+%50 N₂ ve %100 N₂ olmak üzere 4 farklı gaz karışım oranında 550°C’lıkta nitrürlenmiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda; tüm gaz karışım oranları için dikkate değer bir beyaz tabaka oluşmadığını, en yüksek yüzey sertliğinin %100 N₂ gaz karakteristiğinde sağlandığını, diğer gaz karışım oranlarında elde edilen yüzey sertlikleri arasında önemli bir fark olmadığını, en büyük difüzyon tabakası derinliğinin %100 N₂ ve %50 H₂+%50 N₂ gaz karakteristiklerinde sağlandığını, nitrürlemeden sonra %100 N₂ gaz karakteristiğindeki nitrürlemede siyah bir yüzey oluştuğunu, bunun dışındaki diğer tüm numunelerin yüzeylerinin temiz olduğunu açıklamışlardır. Böylece gaz karakteristiklerinin malzeme yüzey özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiş, ancak malzemenin çalışma şartları üzerindeki etkisi incelenmemiştir.

Çelik ve Karadeniz (1996), %50 N₂+%50 H₂ gaz karışım oranında AISI 4140 çeliğini değişik sıcaklıklarda plazma nitrürlemişler ve elde ettikleri bileşim tabakasının özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; 500-550-600°C’lerde yapılan plazma nitrürleme değerlendirildiğinde en kalın bileşim tabakasının 550°C’de elde edilebildiğini, yüksek nitrürleme sıcaklıklarının bileşim tabakası kalınlığını azalttığını, yüksek sıcaklık ve uzun işlem sürelerinde çok ince bir beyaz tabaka elde edilebildiğini, ancak yüksek sıcaklık ve uzun işlem sürelerinin yüzey sertliğinin düşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca deneye tabi tuttıkları malzeme için en yüksek yüzey sertliğinin 500°C’de 10 saat plazma nitrürleme şartlarında elde edilebildiğini de açıklamışlardır. Bu çalışmada da gaz karakteristiklerinin malzeme yüzey özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiş, ancak malzemenin çalışma şartları üzerindeki etkisi incelenmemiştir.

Alsaran ve Çelik (1998), AISI 5140 çeliğini değişik nitrürleme şartları (nitrürleme zamanları 1-4-8-12 saat, nitrürleme sıcaklıkları 400-450-500-550°C, gaz karışım oranı 0,05-0,33-1-3 N₂/H₂) altında plazma nitrürlemişler ve nitrürleme sonrasında elde edilen faz kompozisyonu, sertlik profili ve tabaka kalınlığını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; bileşim tabakası kalınlığının nitrürleme zamanı, sıcaklığı ve gaz karışım oranının artmasıyla arttığını, difüzyon tabakası derinliğinin nitrürleme zamanı ve sıcaklığındaki artış, gaz karışım oranındaki azalmayla arttığını, nitrürleme sonrasında elde edilen yüzey sertliğinin büyük ölçüde nitrürleme sıcaklığına bağlı olduğunu, uzun nitrürleme sürelerinde temperleme ve çökelti büyümesi nedeniyle sertliğin azaldığını, nitrürleme zamanı, sıcaklığı ve gaz karışım oranındaki artışın Fe₄N fazının yoğunluğunu arttırıp Fe₂₋₃N nitrat fazının yoğunluğunu azalttığını belirtmişlerdir. Gavgalı ve diğ. (2002)’de, AISI 5140

malzemeyi farklı sıcaklık (400, 450, 500 ve 550°C), farklı süre (1, 4, 8 ve 12 saat) ve farklı gaz karışım oranlarında (0.11, 0.33, 1 ve 3 N₂/H₂) plazma nitrülemişlerdir. Nitrürlenmiş her bir numunenin sertlik profili, burulma dayanımı, beyaz tabaka kalınlığı ve faz kompozisyonu incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda; beyaz tabaka kalınlığının nitrüleme süresi, nitrüleme sıcaklığı ve gaz karışım oranının artmasıyla büyüdüğünü, beyaz tabaka kalınlığının artmasıyla burulma açısının azaldığını, en yüksek burulma açısının nitrülenmemiş numunede gözlemlendiğini, burulma momentinin belli bir beyaz tabaka kalınlığına kadar artıp daha sonra azalma eğilimi gösterdiğini, difüzyon bölgesinin nitrüleme süresinin ve sıcaklığın artmasıyla büyüdüğünü ve gaz karışım oranının artmasıyla azaldığını belirtmişlerdir. Ancak istenilen herhangi bir özellikte yüzey tabakasının oluşturulabilmesi için plazma nitrüleme parametrelerinin nasıl değiştirilmesi konusunda açıklayıcı bilgi vermemişler, farklı malzemelerde aynı plazma nitrüleme şartları altında oluşan farklı özelliklerin nedenlerini belirtmemişlerdir. Ayrıca, nitrüledikleri malzemeyi gerçek çalışma koşullarında kullanarak, malzemenin çalışma performansı ile nitrüleme parametrelerini ilişkilendirmemişlerdir.

Rocha ve diğ. (1999), plazma nitrüleme parametrelerinin bileşim tabakası ve difüzyon bölgesi üzerindeki etkisini araştırmak için, M2 takım çeliği değişik nitrüleme şartları altında plazma nitrülenmiştir. Nitrüleme sırasında, nitrüleme sıcaklığı ve gaz karışım oranı sistematik olarak değiştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda; bileşim tabakası oluşumunun gaz karışım oranındaki nitrojen miktarına bağlı olduğu, 300-500°C sıcaklık aralığında %5 nitrojen+%95 hidrojen gaz karışım oranında bileşim tabakasının oluşmadığı, nitrojen oranının %76'ya çıkması durumunda bileşim tabakasının meydana geldiğini, sıcaklığın artmasıyla birlikte difüzyon bölgesindeki basma gerilmelerinin arttığını, bileşim tabakası kalınlığının artmasıyla birlikte artık gerilmelerin basmadan çekmeye doğru değişim gösterdiğini açıklamışlardır. Ancak, nitrüledikleri malzemeyi gerçek çalışma koşullarında kullanarak, plazma nitrüleme ile sağlanan iyileşmeyi ortaya koymamışlardır.

Çelik ve diğ. (1999), AISI 8620 malzemeyi 600°C'de 1 ve 4 saat süreyle %70 H₂+%30 N₂ gaz karışım oranında plazma nitrülemişlerdir. Daha sonra aynı numuneler argon gazı atmosferinde 900°C 0,5 saat süreyle ısıtılma tabi tutulduktan sonra havada soğutulmuştur. Plazma nitrüleme ve ısıtılma sonrası yüzey sertliği, difüzyon tabakası ve tane yapısı incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda; 4 saat süreyle nitrülenmiş numunenin yüzey sertliğinin 1 saat nitrülenmiş numunenin yüzey sertliğine göre daha yüksek olduğunu, difüzyon

bölgesi kalınlığının da benzer bir yapıda olup daha uzun süre nitrürlenmiş numunede daha yüksek olduğunu ve iki numune içinde nitrüleme sonrasında uygulanan ısıl işlemin yüzey sertliklerinde düşüşe neden olduğunu belirtmişlerdir. Ancak, nitrüleme parametreleri dar bir aralıkta değiştirildiği için, parametrelerdeki değişimin malzeme özellikleri üzerindeki etkisi tam olarak gösterilememiştir. Ayrıca malzemenin çalışma performansı ile nitrüleme parametrelerini ilişkilendirmemiştir.

Çelik ve diğ. (2000), AISI 8620 çeliğini farklı gaz karışım oranları altında sertleştirerek difüzyon ve beyaz tabaka kalınlıklarındaki değişimleri incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; gaz karışım oranındaki hidrojen miktarının artmasıyla birlikte yüzey sertliği ile difüzyon derinliğinin arttığını ve beyaz tabaka kalınlığının azaldığını, argon gazının yüzey sertliği üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu, difüzyon tabakası kalınlığının nitrüleme süresinin artmasıyla birlikte arttığını belirtmişlerdir. Ancak farklı gaz karakteristiklerinin malzemenin tribolojik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmemiş ve nitrülenen malzemenin gerçek çalışma performansı incelenmemiştir.

Tamaki ve diğ. (2000), iki farklı N_2+H_2 gaz karışım oranında iyon nitrüleme yaparak, titanyum nitrür tabakasındaki hidrojenin davranışını incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda; iyon nitrüleme sırasında numune tarafından absorbe edilen hidrojen miktarının hidrojenin artan kısmı basıncıyla birlikte arttığını, nitrüleme sırasında büyük miktarda hidrojen gazı verilmesine rağmen nitrür tabakasında çok az hidrojene rastlandığını, bu nedenle yüksek hidrojen kısmı basıncında nitrülemeye görülen iyileşmenin hidrojen miktarıyla açıklanamayacağını, yüksek hidrojen basıncında nitrülenen yüzeyler üzerinde bir çeşit katalitik reaksiyonun ortaya çıkardığı ürünlerin bu iyileşmeyi sağladığı açıklanmıştır. Bu çalışmada ortaya konan sonuçların oldukça teorik olduğu ve pratik olarak kanıtlanmasına yönelik herhangi bir çalışma yapılmadığı değerlendirilmektedir.

Alsaran ve diğ. (2000), iyon nitrüleme ile yüzey sertleştirme işleminde optimum çalışma şartlarını belirleyebilmek için AISI 5140 düşük alaşımlı çelik malzemeyi değişik sıcaklık, zaman ve gaz karışım oranlarında iyon nitrülemişler ve elde ettikleri sonuçları değerlendirerek optimum çalışma şartlarını belirlemişlerdir. Yaptıkları değerlendirme sonucunda; yüzey sertliğini etkileyen en önemli parametrenin sıcaklık olduğunu, düşük sıcaklıklarda azotun malzemeye nüfuziyetinin yetersizliği ve yüksek sıcaklıklarda temperleme ve alaşım nitrürlerinin büyümesi nedeniyle yüzey sertliklerinin düşük olduğunu, bu nedenle belli bir ara sıcaklık değerinde maksimum yüzey sertliğinin elde edilebildiğini, beyaz tabaka

(bileşim tabakası) kalınlığını minimum yapan parametrenin sıcaklık olduğunu, difüzyon tabakası kalınlığında etkili olan en önemli parametrenin nitrürleme süresi olduğunu, nitrürleme süresinin artmasıyla difüzyon tabakası kalınlığının arttığını, gaz karışım oranındaki hidrojen miktarının difüzyonu hızlandırdığı ve difüzyon tabakası kalınlığını arttırdığı belirtilmiştir. Ancak plazma nitrürleme parametrelerinin elde edilen optimum çalışma şartları üzerindeki etkisi tam olarak açıklanmamıştır.

Berg ve diğ. (2000), nitrürleme parametrelerinin optimizasyonu için nitrürleme şartlarını sistematik olarak değiştirerek 4 farklı çeliği (yapı çeliği, paslanmaz çelik, nitrür çeliği ve sinterlenmiş takım çeliği) plazma nitrürlemişlerdir. Nitrürlemeden sonra her bir numunenin bileşim tabakası ve difüzyon bölgesinin mikroyapısını ve sertlik profillerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; tüm nitrürleme şartları için yapı çeliğinde bileşim tabakasının oluşmadığı, paslanmaz çelikte ise difüzyon bölgesi ile bileşim tabakası arasında belirgin bir fark olmadığı, nitrür çeliği ile sinterlenmiş takım çeliği için nitrürleme şartlarına bağlı olarak bileşim tabakasının oluştuğu, numunelerdeki sertlik derinliği profilinin alaşım elementi miktarına doğrudan bağlı olduğunu, numunelerdeki alaşım elementi konsantrasyonunun artmasıyla sertliğin azaldığını, sertlik derinliğinin nitrürleme zamanının kareköküne göre değiştiğini belirtmişlerdir. Ayrıca nitrürleme zamanı ve sıcaklığına bağlı olarak elde edilen sertlik profilinden, etkili difüzyon sabitini ve buna karşılık gelen aktivasyon entalpisini de hesaplamışlardır. Ancak farklı özelliklerdeki malzemelerin plazma nitrürlenmesi sonucunda ortaya çıkan farklı özelliklerin nedenleri ve plazma nitrürlenen her bir malzeme için optimum nitrürleme parametreleri verilmemiştir.

Baycık ve Çapa (2001), plazma nitrürlenmiş H13 sıcak iş takım çeliğinin ortam sıcaklığı ve zamanla yüzey sertliğinin değişimini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; azot miktarının yüksek olduğu yüzeyde sertliğin yüksek olduğunu, malzemenin dış yüzeyinden iç kısmına doğru azot miktarının azaldığını ve buna bağlı olarak da sertliğin düştüğünü, su verme+temperleme+plazma nitrürleme yapılmış çeliğin sertliğinin sadece su verme+temperleme yapılmış çeliğin sertliğine göre iki kat daha fazla olduğunu ve H13 sıcak iş takım çeliğine plazma nitrürleme ile kazandırılan üstün özellikler nedeniyle ekonomik açıdan büyük faydalar sağlanabileceğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada plazma nitrürleme ile malzeme yüzeyinde değişen özelliklerin incelenmesinden daha ziyade, plazma nitrürleme sonrasında değişen çalışma koşullarına bağlı olarak malzemenin yüzey performansı incelenmiştir.

Çelik ve diğ. (2001), AISI 8620 çeliğini değişik çalışma koşulları altında plazma nitrülemişler ve nitrüleme sonrasında elde edilen özellikleri incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; en yüksek yüzey sertliğinin 500°C'de 8 saat süreyle yapılan nitrüleme sonrasında elde edilebildiğini, en büyük difüzyon tabakasının ise 600°C'de 8 saat süreyle yapılan nitrüleme sonrasında elde edilebildiğini, kısa işlem süreleri ve düşük sıcaklıklarda bileşim tabakasının oldukça ince olduğunu, sıcaklık ve zamanın artmasıyla bileşim tabakası kalınlığının arttığını, ancak 600°C'den yüksek sıcaklıklarda nitrüleme süresinin artmasıyla birlikte bileşim tabakası kalınlığının azaldığını belirtmişlerdir. Ancak plazma nitrüledikleri malzemenin gerçek çalışma performansının incelenmesine yönelik bir çalışma yapmamışlardır.

2.3.5.2 Plazma Nitrülemenin Diğer Yüzey Sertleştirme Yöntemleriyle İlişkisi

Peng (1989), nitrokarbürleme ve plazma nitrüleme gibi yüzey sertleştirme yöntemlerinin, DIN 5CrMnMo sıcak iş kalıp çeliğinin abrazyon aşınma direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. Yaptığı çalışma sonucunda geleneksel yüzey sertleştirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında plazma nitrülemenin abrazif aşınma direncinde dikkate değer bir artış sağladığını, aynı zamanda plazma nitrülemeyle düşük bir sürtünme katsayısı ve plastik deformasyona karşı yüksek bir direnç sağlandığını, plazma nitrüleme sonrasında elde edilen nitrürlerin yayılımı ve büyüklüğünün gaz nitrülemeye göre daha homojen olduğunu, nitrokarbürlemeyle elde edilen yüzey özelliklerinin de geleneksel yüzey işlemlerine göre daha iyi olduğunu, ancak plazma nitrülemeyle elde edilen özellikler kadar iyi olmadığını belirtmiştir. Bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, diğer çalışmalarda belirtilen sonuçlar ile büyük benzerlik göstermektedir.

Höck ve diğ. (1996), farklı özelliklerdeki çelik esaslı malzemeleri (31CrMoV9 düşük alaşımlı çelik, S 6-5-2 yüksek alaşımlı takım çeliği ve X155CrMoV121 takım çeliği) 510°C sıcaklıkta 2 saat süreyle nitrüledikten sonra yüzeylerine PVD yöntemiyle sert kaplama uygulamışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; nitrür tabakasının yapısı ve özellikleri ile PVD işlemine ait parametrelerin malzeme özellikleri üzerinde etkili olduğunu, nitrüleme sayesinde sert kaplamanın ana malzemeye olan yapışma kabiliyetinin iyileştiğini, sert kaplamanın aşınmaya karşı dayanımı arttırdığını ve nitrür tabakasının yorulma dayanımını arttırdığını belirtmişlerdir. Ancak en iyi yüzey özelliklerini sağlayacak nitrüleme parametrelerini kombinasyonunu ve farklı nitrüleme parametreleri etkisi altında sağlanabilecek iyileşmeyi incelememişlerdir.

Nikel ve diğ. (2000), yüksek hız çeliğinden yapılmış matkabı plazma nitrüledikten sonra PVD yöntemiyle TiN kaplamışlar ve plazma nitrüledikten sonra TiN kaplanmış matkabın, ticari olarak kullanılan TiN kaplanmış matkapla mukayesesini yapmışlardır. Yaptıkları mukayesede performans kriteri olarak; serbest yüzey aşınmasının belirlediği takım ömrü ve aşınma özelliklerini esas almışlardır. Nitrüleme parametreleri olarak; %80 N₂+%20 H₂ gaz karışım oranı, 2 saat işlem süresi ve 510-580°C nitrüleme sıcaklığı esas alınmış olup, işlem parametreleri bileşim tabakası oluşumuna izin vermeyecek şekilde seçilmiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda; ön nitrüleme yapıldıktan sonra TiN kaplanmış takımın, sadece TiN kaplanmış takıma göre daha yüksek bir ömre sahip olduğunu, bunun nedeninin iki farklı özellikteki takımda görülen farklı aşınma mekanizmalarının olduğunu, ön nitrülenmiş numunenin ömür artışını serbest yüzeyde meydana gelen aşınma miktarındaki azalmanın sağladığını ve ön nitrülemenin kaplama ile asıl malzeme arasındaki bağı güçlendirdiğini belirtmişlerdir. Ancak kaplama ile plazma nitrülenmiş yüzey arasındaki bağı güçlendiren mekanizma ile ilgili inceleme yapılmadığı gibi, plazma nitrüleme parametreleri çok dar bir aralıkta değiştirilmiştir.

Batista ve diğ. (2002), plazma nitrülenmiş ve nitrülenmemiş iki ayrı AISI H13 malzemeden yapılmış numuneye PVD (Physical Vapour Deposition- Fiziksel Buhar Yoğuşma) yöntemiyle TiN kaplayarak mikro-abrazyon aşınma testleri yapmışlar ve iki farklı numunenin aşınma dayanımını değerlendirmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; plazma nitrülenmiş yüzey üzerine yapılan TiN kaplamanın aşınma direncinin daha iyi olduğu ve aşınma direncindeki iyileşme nedeninin nitrülenmiş alt tabakanın varlığı olduğu belirtilmiştir. Ancak ortaya çıkan sonuçları plazma nitrüleme parametreleriyle ilişkilendirmedikleri gibi, sadece sonuçları vermişler, sonuçlara neden olan mekanizmaları açıklamamışlardır.

2.3.5.3 Plazma Nitrüleme Mekanizmasının İncelenmesi

Metin ve İnal (1987), iyon nitrüleme sırasında meydana gelen demir nitrürlerin (Fe₂N, Fe₂₋₃N ve Fe₄N) oluşumu ve büyüme kinetiği ile bunların iyon nitrülemeye etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla %99.85 saflık değerindeki demir malzemeyi, 500-600°C sıcaklıklarında saf nitrojen ve %20 nitrojen+%80 hidrojen gaz karışımı altında iyon nitrülemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; nitrüleme işleminin başlangıcında Fe₂N fazının meydana geldiğini, nitrüleme süresinin artmasıyla birlikte sıcaklığa bağlı olarak Fe₂₋₃N veya Fe₄N fazının oluştuğunu, saf nitrojen plazma altında elde edilen bileşim tabakası kalınlığının diğer gaz karışım oranında elde edilen tabakadan biraz büyük olduğunu, bileşim tabakası kalınlığının gaz

nitrürlemede olduğu gibi zamana göre parabolik olarak artmadığını, nitrojen+hidrojen gaz karışım oranında saf nitrojene göre daha fazla difüzyon derinliği elde edilebildiğini, difüzyon derinliğinin zamana göre parabolik olarak arttığını, difüzyon tabakasının oluşumu için gereken aktivasyon enerjisinin nitrojenin α demiri içine nüfuz etmesi için gereken aktivasyon enerjisinden düşük olduğunu ve bunun temel nedeninin parabolik olmayan nitrür tabakası büyümesi olduğu belirtmişlerdir. Bu çalışma, nitrürleme sonrasında elde edilen yüzey özellikleri incelenmekle birlikte, elde edilen sonuçlarla nitrürleme parametreleri ilişkilendirilmediği gibi, malzemenin çalışma performansı hakkında da bir inceleme yapılmamıştır.

Alves ve diğ. (2000), Fe-Cr alaşımlarında nitrür tabakasının oluşumunu incelemişlerdir. Bu amaçla üç farklı oranda Cr (ağırlık olarak %5, %10 ve %20) içeren Fe-Cr alaşımını %20 N₂+%80 H₂ gaz karışım oranında değişik nitrürleme sürelerinde plazma nitrürlemişler ve nitrürlenen tabakanın mikroyapısı ile birlikte sertlik profilini incelemişlerdir. Yaptıkları değerlendirme sonucunda; nitrürleme derinliğinin Cr bileşimine bağlı olduğunu, ancak nitrürleme derinliği ile Cr bileşimi arasında direk bir ilişki olmadığını, nitrürleme sonrasında elde edilen yüzey sertliğinin Cr miktarından önemli ölçüde etkilenmediğini, nitrürleme süresinin artmasıyla birlikte nitrür tabakası derinliğinin arttığını belirtmişlerdir. Ancak elde ettileri sonuçlara ait mekanizmaların açıklaması yapılmamıştır.

Alves ve diğ. (2001), farklı bir geometriye sahip iş parçası üzerinde plazma nitrürleme sırasında oluşan tabakaların büyüme davranışını sistematik olarak incelemişlerdir. Bu amaçla; AISI 316 paslanmaz çelik malzemedan yapılmış değişik yükseklikteki silindir çubukları, %20 N₂+%80 H₂ gaz karışım oranında, farklı nitrürleme sıcaklıklarında (400, 500 ve 570°C) ve basınçlarında (100 ve 500 kPa) nitrürlenmişlerdir. Yaptıkları inceleme sonucunda; elde edilen değişik sertlik ve farklı tabaka kalınlıklarının nitrürleme parametrelerinin bir fonksiyonu olduğunu, nitrür tabakası kalınlığının numunenin yüksekliğinin artmasıyla arttığını aşınma halkası çapının nitrürlenmiş numunenin yüksekliğinin artmasıyla büyüdüğünü belirtmişlerdir. Ancak yapılan çalışmada, sonuçların ortaya çıkmasına neden olan mekanizmalar hakkında açıklayıcı bilgi verilmemiştir.

Pranevicius ve diğ. (2001), AISI 304 paslanmaz çeliğin 270-550°C sıcaklık aralığında plazma nitrürlenmesi sırasında meydana gelen tabaka büyüme mekanizması ile birlikte oluşan nitrojenle zenginleştirilmiş değişim tabakasının oluşma kinetiği incelemişlerdir. Bu amaçla nitrojen dağılım profili ve yüzey

pürüzlülüğü incelenmiştir. Yaptıkları deneyler ve incelemeler sonucunda; nitrürleme sonucunda yüzeyde birkaç μm kalınlığında oldukça yüksek nitrojen içeriğine sahip bir katı çözelti fazının oluştuğunu, plazma nitrürlemeyle yüzey sertliğinin yaklaşık 5 kat arttığını, sürtünme direncinde ise iki kattan daha fazla bir artışın sağlandığını, nitrojen zengin değişim tabakasının büyümesinin termal difüzyondan daha ziyade yüzeydeki atomların yer değişimi mekanizmasıyla kontrol edildiğini, plazma nitrürlemenin başlangıcında sürekli yüzey boşlukları ve adatomlarının oluşumu nedeniyle yüzey pürüzlülüğünün arttığını ve nitrojen derinlik profilinin yüzey şartlarına bağlı olduğu belirtmişlerdir. Ancak ortaya çıkan sonuçları plazma nitrürleme parametreleri ile ilişkilendirmemişlerdir.

2.3.5.4 Plazma Nitrürleme Sonrasında Değişen Tribolojik Özelliklerin İncelenmesi

Özbaysal ve diğ. (1986), AISI H13 sıcak iş takım çeliği, AISI D2 ve D3 soğuk iş takım çeliği ve AISI M2 yüksek hız takım çeliğini değişik zaman (2-12 saat) ve sıcaklıklarda ($400-520^{\circ}\text{C}$) plazma nitrürlemişler ve nitrürleme parametrelerine bağlı olarak mikrosertlik-derinlik ilişkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; nitrürleme sıcaklığı ve zamanının artmasıyla birlikte yüzey sertliğinin azaldığı ancak derinliğin arttığını, en yüksek yüzey sertliğinin M2 ve H13 takım çeliklerinde görülürken en düşük yüzey sertliğinin D2 ve D3 takım çeliklerinde oluştuğunu, bunun nedeninin malzeme bünyesindeki C miktarı olduğu, C miktarının artmasıyla birlikte yüzey sertliğinin azaldığını ve nitrürleme derinliğinin zamanla birlikte parabolik olarak değiştiğini belirtmişlerdir. Yüzey sertliği ile nitrürleme derinliği, zaman ve nitrojenin hacimsel oranının bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Ancak nitrürleme sonrasında elde edilen yüzey özelliklerini incelememişler ve nitrürlenmiş takımları gerçek kullanma şartlarında kullanarak performanslarını test etmemişlerdir. Ayrıca elde edilen sonuçlar nitrürleme parametreleri ile ilişkilendirilmemiştir.

Karamış (1991a), AISI H13 sıcak iş takım çeliğini değişik nitrürleme sıcaklıklarında (530°C ve 550°C) farklı sürelerde (4 ve 10 saat) plazma nitrürlemiş ve nitrürlenmiş numunelerin aşınma davranışını ve mikroyapısal özelliklerini incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda; nitrürleme sonucunda oluşan tabaka özelliklerinin gaz karışım oranı, nitrürleme sıcaklığı ve nitrürleme süresine bağlı olduğu, nitrürleme süresinin artmasıyla birlikte bileşim tabakası kalınlığının arttığı, bileşim tabakası oluşumunda en etkili parametrenin nitrojen miktarı olduğu, nitrojen miktarının azalmasıyla birlikte belli nitrojen miktarında bileşim tabakasının oluşmadığı ve sadece difüzyon

bölgesinin oluştuğu, kısa süre nitrürlenmiş numunenin aşınmasının lineer olduğu, uzun süre nitrürlenmiş numunenin aşınmasının ise başlangıçta parabolik, sonra lineer ve hasar öncesinde tekrar parabolik olarak değiştiği, kalın bileşim tabakasının gevrek olmasından kaynaklanan pul pul dökülme nedeniyle aşınmanın hızlı olduğu ve ince bileşim tabakasının nispeten daha sünek olması nedeniyle aşınma dayanımının daha iyi olduğu belirtilmiştir. Böylece, plazma nitrürlenmenin AISI H13 sıcak iş takım çeliğine de uygulanabileceğini ve bu yöntemle yüzey özelliklerinin iyileştirilebileceğini göstermiş, ancak elde edilen yüzey özellikleri ile plazma nitrürlenme parametreleri ilişkilendirilmemiştir.

Karamış (1991b), farklı sıcaklık ve sürelerde plazma nitrürlenmiş AISI 722M24 (En40B) çeliğinin kuru sürtünme şartları altındaki tribolojik davranışını incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda; nitrürlenmiş numunenin aşınma direncindeki artışın nitrürlenme süresi ve sıcaklığına göre farklılık gösterdiği, aşınma hızının yüzey sertliği ve difüzyon tabakası kalınlığının bir fonksiyonu olduğu, ancak yüzey sertliğinin aşınma hızı üzerindeki etkisinin daha büyük olduğu, yağlayıcının bulunduğu ortamlarda beyaz tabakanın gözenekli yapısının yağ deposu olarak görev yapması nedeniyle tribolojik özellikleri iyileştirdiği, ancak kuru sürtünme koşullarında beyaz tabakanın parçalanarak abrazif aşınmaya katkıda bulunduğu ve bu nedenle kuru sürtünme koşulları altında oluşmasının istenmediği belirtilmiştir. Böylece; bu konuda yapılmış çalışmalara paralel olarak plazma nitrürlenme ile AISI 722M24 (En40B) malzemenin tribolojik özelliklerinin iyileştirilebileceği gösterilmiş, ancak nitrürlenme sonrasında değişen yüzey özellikleri hakkında inceleme yapılmamıştır.

Karamış (1993), 100 saat süreyle üç farklı sıcaklıkta nitrürlenmiş (550-570-590°C) AISI 722M24 (En40B) çeliğinin yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışını incelemiştir. Yapılan çalışma sonucunda; plazma nitrürlenmeyle numunenin aşınma direncinin artırılabilirdiği, nitrürlenmiş parçanın kimyasal bileşiminin yüzey sertliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu, nitrür oluşturma kabiliyeti yüksek alaşım elementleri içeren malzemelerde daha yüksek yüzey sertliği elde edilebildiği, bileşim tabakası kalınlığının artmasıyla aşınma hızının arttığı, yüksek yüzey sertliği ve ince bir bileşim tabakasının aşınma davranışının daha iyi olduğu, nitrürlerin sadece yüksek yüzey sertliği değil aynı zamanda düşük bir dinamik sürtünme katsayısı sağladığı açıklanmıştır. Bu çalışmada da nitrürlenme sonrasında değişen tribolojik özellikler incelenmiş, ancak değişen tribolojik özellikler ile nitrürlenme şartları ilişkilendirilmemiştir.

Lei ve diğ. (1997), DIN 9SiCr düşük alaşımlı çeliği 250°C'de 4 saat süreyle plazma nitrürlenmişler ve kuru abrazyon sürtünme koşullarında değişik yükler altında aşınma dayanımını incelemişlerdir. Yaptıkları deneyler sonucunda; yüzey sertliğinin yaklaşık 2 kat arttığını, nitrülenmemiş numuneye göre nitrülenmiş numunenin abrazyon aşınma direncinin arttığını, aşınma direncindeki bu artışın nitrür ve nitrojen içeren katı çözeltilerin oluşumundan kaynaklandığını, ancak yüksek yükler altında (>55 N) nitrüllemenin önemli bir fayda sağlamadığını belirtmişlerdir. Ancak farklı nitrüleme parametreleri altında tribolojik özelliklerde sağlanabilecek iyileşmeyi ortaya koymadıkları için maksimum yüzey performansı için optimum nitrüleme parametrelerini tespit edememişlerdir.

Devi ve diğ. (1999), AISI H13 sıcak iş takım çeliği, AISI D2 soğuk iş takım çeliği ve AISI L7 patentli özel takım çeliklerini plazma nitrürlenmişler ve laboratuvar ortamında aşınma deneylerine tabi tutmuşlardır. Yapılan deneyler sonucunda; H13 ve D2 takım çeliklerinin aşınma dayanımında 3 kata varan bir iyileşme sağlanırken, L7 çeliğinin aşınma dayanımında kötüleşme gözlemlendiğini, aşınma dayanımındaki kötüleşme nedeninin nitrüleme sıcaklığında alt tabakada meydana gelen yumuşama olduğunu, aşınma yüzeylerinin incelenmesi sonucunda aşınmada etkili olan mekanizmaların adhezyon, abrazyon ve tribokimyasal (oksidasyon) mekanizmalar olduğunu, plazma nitrülemeyle sağlanabilecek maksimum ömürün malzeme yapısı ve nitrüleme sıcaklığına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Ancak aşınma dayanımındaki değişim ile nitrüleme parametrelerini ilişkilendirmemişlerdir.

Karamış ve Gerçekcioğlu (2000), AISI H13 sıcak iş takım çeliği ve 722M24 takım çeliğini değişik nitrüleme sıcaklıklarında farklı sürelerde plazma nitrürlenmişlerdir. Daha sonra nitrüledikleri numunelerin oda sıcaklığındaki ve yüksek sıcaklıklardaki aşınma davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; artan sıcaklıkla birlikte beyaz tabakanın soyulma hızı ve aşınma hızının arttığını, plazma nitrüleme sonrasında yüzey pürüzlülüğünün azalmasına rağmen sürtünme katsayısının artan sıcaklıkla birlikte yükseldiğini, nitrüleme parametrelerine bağlı olarak beyaz tabaka oluşturmadan sadece difüzyon bölgesinin elde edilebileceğini, beyaz tabakanın parçalanmasından sonra aşınma hızını arttığını, uzun işlem süreleri sonucunda elde edilen nitrür tabakasının kısa işlem süresinde elde edilmiş tabakalara göre daha uzun süre daha düşük aşınma hızına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ancak bu çalışmada da farklı özelliklerdeki malzemelerin plazma nitrülenmesi sonucunda ortaya çıkan farklı özelliklerin nedenleri ve plazma nitrülen her bir malzeme için optimum nitrüleme parametreleri verilmemiştir.

2.3.5.5 Plazma Nitrürlenme Konusunda Yapılmış Diğer Çalışmalar

Sun ve Bell (1991), DIN 32CrMo12 (En40B) düşük alaşımlı çelik malzemenin yüzey özelliklerini ve yorulma davranışını iyileştirmek amacıyla plazma nitrüledikten sonra TiN kaplamışlardır. Nitrürlenme sonrasında elde edilen faz kompozisyonu, tabaka kalınlığı, sertlik profili, artık gerilmeler, nitrojen ve karbon dağılımları değerlendirilmiştir. Ayrıca numunenin aşınma ve yorulma karakteristikleri incelenmiş, nitrür tabakası kalınlık ve dayanımının yorulma dayanımı ile yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini tanımlamak için basit bir model oluşturulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda; dubleks yöntem adı verilen bu işlemle sadece çok iyi bir aşınma direnci değil aynı zamanda çok iyi bir yük taşıma kapasitesinin elde edilebildiğini, plazmadaki karbon içeriğinin kontrolüyle aşınmaya ve yorulmaya karşı oldukça dayanıklı tek fazlı demir nitrür (ϵ)'den oluşan bileşim tabakasının oluşturulabileceğini, malzeme bünyesindeki karbon miktarının bileşim tabakası kalınlığını arttıracaklarını, malzeme bünyesindeki karbon miktarının artmasıyla artık basma gerilmelerinin azaldığını, karbon miktarının artmasıyla sertleşme kabiliyetinin kötüleştiğini, ancak mikrosertlik ile artık gerilme seviyesi arasında direk bir ilişki bulunmadığını, bileşim tabakasının yorulma davranışı üzerinde hakim bir etkisinin olmadığını, difüzyon tabakası kalınlığının artmasıyla yorulma dayanımının arttığını, plazma nitrürlenmenin aşınma direncini arttırdığı, aşınma direncindeki iyileşme derecesinin nitrürlenme sıcaklığı ve zamanına bağlı olduğunu, ön nitrürlenmenin TiN kaplamanın adhezyonunu arttırdığı ve böylece ön nitrürlenme yapılmamış TiN kaplamaya göre daha iyi bir performans sağlanabildiğini belirtmişlerdir.

Sun ve Bell (1997), düşük alaşımlı çeliğin plazma nitrürlenme işlemini simüle etmek için; nitrojenin demir kafesine difüzyonunu, difüzyon bölgesi içindeki alaşım nitrürlerinin çökeltisini ve yüzeyde demir nitrür tabakasının (γ -Fe₄N) oluşumunu eş zamanlı olarak dikkate alan matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Bu modelin; çözelti içindeki nitrojen dağılımı ve nitrür alaşımlarının oluşumunu, plazma nitrürlenme sırasında oluşan demir nitrür tabakası kalınlığını, demir nitrür tabakasının oluşumu için gerekli olan süreyi ve alaşım elementlerinin nitrür çökelti davranışlarını belirlemek için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca oluşturulan bu modelin plazma nitrürlenmiş düşük alaşımlı ticari çeliğe uygulanması; modelin, çeliğin nitrürlenmeye cevabını çok büyük bir doğrulukla tanımladığını göstermişlerdir.

Musil ve diğ. (2000), geleneksel nitrürlenme sistemine ilave edilen yardımcı bir katotla, nitrürlenilen yüzey özelliklerinde ilave bir iyileşme sağlayan yeni bir yöntem ileri sürmüşlerdir. Konvansiyonel nitrürlenme sisteminde nitrürlenecek parçaların katot

olduğunu, bu yüzden işlemin katotik nitrürleme olarak adlandırılabilceğini, yeni geliştirdikleri yöntemde ise iş parçasının anot olduğunu ve anotik plazmayla nitrürlenmiş parçaların pozitif potansiyelde olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; anotik plazmayla yüzeylerin katottan gelen malzemeyle zenginleşebildiğini, katot malzemesi olarak Mo ,Cr, Ti, V ve C seçilmesi durumunda bu malzemelerin nitrürlenene yüzeye transfer olmasıyla yüzey sertliğinde yaklaşık %40 artış sağlanabildiğini, ancak konvansiyonel nitrürlemeye göre nitrürleme prosesinin (sputtering) çok yavaş olduğunu, bu amaçla katot ile birlikte yardımcı katotun yer aldığı yeni bir nitrürleme sisteminin kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ancak, aynı yüzey sertliğinin elde edilebilmesi için ileri sürülen bu yeni yöntemin klasik nitrürleme yöntemine göre oldukça uzun olmasının önemli bir dezavantaj olduğu değerlendirilmektedir.

Sakamoto ve diğ. (2001), Cr-Mo alaşımlı çeliklerin talaş kaldırılmasında kullanılan takımların kesme performansını artırmak için, takımları 1 saat süreyle NH₃, H₂ gaz karışım oranında plazma nitrürlemişler ve talaş kaldırma performansını incelemek amacıyla talaş kaldırma deneyleri yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; takımın yüzey sertliğini 800 HV'den 1200 HV'ye çıkardıklarını, takımın aşınma dayanımı ve kesme performansında iyileşme olduğunu, bunun paralelinde takım ömrünün arttığını belirtmişlerdir. Ancak gerek nitrürleme şartları, gerekse talaş kaldırma şartlarına ait detaylı bilgi vermemişlerdir. Ayrıca plazma nitrürleme parametrelerin çok dar bir aralıkta seçilmiş ve plazma nitrürleme sonrasında takım performansında sağlanan iyileşmeler hakkında açıklayıcı bilgi verilmemiştir.

Plazma nitrürleme konusunda yapılmış çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde; çalışmaların büyük bir bölümünün demir esaslı malzemeler üzerinde yapıldığı ve bu nedenle plazma nitrürleme sonrasında değişen yüzey özelliklerinin demir esaslı malzemelere bağlı olarak verildiği, çalışmaların tek boyutlu olarak yapıldığı (plazma nitrürleme sonrasında değişen metalurjik yüzey özelliklerinin incelenmesi yada değişen tribolojik özelliklerin incelenmesi), plazma nitrürlenmiş malzemelerin gerçek çalışma şartlarında kullanılmadığı ve bu nedenle gerçek çalışma performanslarının değerlendirilmediği, plazma nitrürleme parametrelerinin oldukça dar bir aralıkta değiştirilerek genel bir durum için hüküm verildiği ve malzeme yüzey özelliklerinde sağlanan iyileşme ile plazma nitrürleme parametrelerinin ilişkilendirilmediği görülmüştür. Bu çalışmada sayılan bu eksiklerin tamamlanması amaçlanmıştır.

3. TAKIM ÖMRÜ VE AŞINMA MEKANİZMALARI

3.1 Giriş

Talaşlı imalatın en genel tanımı belirli bir malzemeden talaş kaldırarak, teknik resimde belirtilen boyutlarda ve yüzey kalitesinde parça imal etmektir. Talaşlı imalatın teknik (istenilen boyut ve yüzey kalitesinin sağlanması) ve ekonomik (en düşük maliyetle imalatın gerçekleştirilmesi) olmak üzere iki yönü vardır. Gerek teknik gerekse ekonomik faktörler talaş kaldırma koşullarını tayin eden birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerin en önemlileri; kesme hızı, ilerleme hızı, talaş (paso) derinliği, parça malzemesi, takım malzemesi, takım geometrisi ve takım ömrüdür.

Talaş kaldırma sırasında iş parçası ve talaş ile olan temas ve sürtünme takımın aşınmasına neden olur. Sürtünme nedeniyle meydana gelen sıcaklık artışı bunu kolaylaştırır. Takımın aşınması; takım malzemesi, işlenen parçanın malzemesi, takım ve talaş geometrisi, kesme hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği, sıcaklık ve kesme sıvısı gibi birçok faktöre bağlıdır. Takım ömrü ise; takımın müsaade edilen aşınma değerine ulaşınca kadar geçen talaş kaldırma süresi olarak ifade edilebilir. Bu tanımdan anlaşılacağı üzere takım ömrü aşınma olayına bağlıdır. Aşınmanın mümkün olduğu kadar yavaşlatılması, takımın müsaade edilen aşınma değerine ulaşınca kadar geçen talaş kaldırma süresini arttıracığından, takım ömrü arttırılmış olacaktır. Yapılan doktora çalışmasının ana fikrini bu kavram oluşturmaktadır.

Takım ömrü hakkında fikir sahibi olabilmek için, takımın hasara uğramasına neden olan sebepleri bilmek gereklidir. Takım hasarı aşınma, plastik deformasyon ve/veya kırılma nedeniyle meydana gelir. Takım aşınması, takımın aşındığı bölge veya aşınmayı meydana getiren fiziksel olaya göre sınıflandırılır. Aşınma mekanizması büyük ölçüde takım malzemesine de bağlıdır. Takımlar kesme sırasında meydana gelen zorlanmayı karşılayamadıklarında, plastik deformasyona uğrarlar veya kırılırlar.

Talaş kaldırmayla ilgili çalışmalarda temel amaç, göz önüne alınan takım hasar mekanizmasından takım ömrünü tespit edecek yöntemler geliştirmektir. Maalesef, herhangi bir durum için takım ömrünü doğrulukla tespit etmek oldukça zordur. Çünkü takım ömrü pek çok değişik faktöre bağlıdır. Pratikte, takımlar kesme ömrünü tamamlamadan kullanımdan alınırlar. Bu belli büyüklükte bir oyuk veya diğer aşınma şartları oluştuğunda veya kesme kuvvetleri yada gücün artırılmasıyla oluşan belli bir hasar oluştuğunda sağlanır. Farklı operasyonlarda aynı şartlar altında kullanılan takımlar, kritik tolerans veya diğer gereksinimlere göre oldukça az farklılık gösterirler. Bu nedenle, takım ömrünü tespit etme yöntemi göreceli karşılaştırmalar için faydalıdır. Örneğin; farklı iş parçası malzemesi, takım malzemesi veya işleme koşulları için takımdan beklenen en yüksek takım ömrü, verilen bir uygulamada, benzer parçalar için elde edilen veriler olmadıkça takım ömrünün doğru değerlendirilmesinin mümkün olacağı beklenmemelidir.

Arsecularatne ve diğ. (1996), talaş kaldırma teorisinden elde edilen takım yüzeyindeki sıcaklık dağılım profilini kullanarak takım ömrünün hesaplanabilmesi için yeni bir metot ileri sürmüşlerdir. Bu amaçla, sinterlenmiş tungsten karbür takım kullanılarak AISI 1022 ve AISI 1045 malzemeler değişik kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliklerinde işlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlarda oluşturulan yeni metottan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yaptıkları değerlendirme sonucunda; takım ömrünün her şeyden önce kesme hızı, ilerleme hızı, talaş açısı ve iş parçası karbon içeriğinden etkilendiğini, diğer yandan göz önüne alınan takım için eğim açısı ve kesme derinliğinin de takım ömrü üzerinde az daha olsa etkili olduğunu, oluşturulan yeni metotla elde edilen takım ömrü değeriyle deneysel olarak bulunan takım ömrü değerlerinin birbirine çok yakın olduğunu, ancak bu çalışmada önerilen metodun kullanılabilmesi için iş parçası ısı özelliklerinin ve akma dayanımının bilinmesine gerek duyulduğunu, takım ömrüyle kesme hızı arasındaki ilişkinin Taylor denkleminde belirtildiği gibi lineer olmayıp bir eğri şeklinde olduğunu belirtmişlerdir.

Diniz ve Filho (1999), alın frezeleme sırasında, takım ile iş parçası arasındaki izafi konumun takım ömrü ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla takım ile iş parçası arasındaki izafi konumun farklı olduğu alın frezeleme deneyleri yapmışlar, takımın meydana gelen serbest yüzey aşınması ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünü ölçmüşlerdir. Talaş kaldırma, AISI 1045 malzemenin sinterlenmiş karbür takım ile frezelenmesiyle yapılmıştır. Yaptıkları çalışmada; takımın iş parçasına girdiği nokta ile takım çapı arasındaki dik mesafeyi

(takım eksenine paralel uzunluk) j parametresi olarak tanımlayarak, j mesafesinin artmasıyla birlikte takım ömrünün azaldığını ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünün j mesafesiyle doğrudan ilişkili olmadığını belirtmişlerdir.

Choudhury ve Apparao (1999), talaş kaldırma işlemi sırasında kesme hızı ve ilerleme hızının optimum değerlerini kullanarak takım ömrünün artırılabilmesi için yeni bir yaklaşım ileri sürmüşlerdir. Yaptıkları çalışmada optimizasyon için; sabit bir talaş kaldırma hacmini esas almışlardır. Deneysel olarak elde ettikleri verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi sonucunda optimum kesme hızı ve ilerleme hızının kullanılması durumunda takım ömrünün aynı talaş hacmi için yaklaşık olarak %30 artırılabilirdiğini belirtmişlerdir.

Gu ve diğ. (1999), takım ömrünü kesme ve ilerleme hızının bir fonksiyonu olarak tanımlayabilmek için, AISI 4140 malzemeyi değişik özellikteki sinterlenmiş karbür takımlar (TiN kaplanmış, TiAlN kaplanmış, ZrN kaplanmış ve kaplanmamış) kullanarak alın frezelemiştir. Takım ömür kriteri olarak; takımda meydana gelen krater aşınmasını ihmal ederek, serbest yüzey aşınmasını esas almışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; düşük kesme hızlarında ağız birikintisinin (BUE-Build Up Edge) meydana geldiğini, kesme hızının artmasıyla birlikte ağız birikintisinin azaldığını, belli bir kesme hızının üzerinde sıcaklık artışı nedeniyle ağız birikintisinin oluşmadığını, yüksek kesme hızlarında difüzyon esaslı aşınma mekanizmalarının etkili olduğunu, bu nedenle orta kesme hızlarında daha yüksek bir takım ömrü elde edilebildiğini, ilerleme hızının artmasıyla birlikte mikro çentiklenmelerin başladığını, bu çentiklerin kısa sürede makro çentikler haline gelerek takım kenarının kırılmasına neden olduğunu, ancak takım ömrünün ilerleme hızından daha çok kesme hızındaki değişime duyarlı olduğunu, aşınmaya karşı en dayanıklı takımın TiAlN kaplanmış takım olduğunu, bunun nedeninin TiAlN kaplamanın ağız birikimine karşı gösterdiği yüksek direnci ve sertliği olduğunu, en düşük aşınma direncini ise ZrN kaplanmış takımın gösterdiğini ve kaplamanın aşınmasında etkili olan mekanizmanın abrazyon, adhezyon, mekanik yorulma ve ısıl kırılma mekanizmalarını tanımlayarak aşınma diyagramında göstermişlerdir.

3.2 Takım Malzemeleri

Talaş kaldırmada kullanılan takım malzemelerinin genel olarak, talaş kaldırma sırasında oluşan yüksek sıcaklık ve yüksek gerilmelere karşı koyabilme özelliğine

sahip olması gerekir. Bunun yanı sıra ideal kabul edilebilecek bir takım malzemesinde olması gereken özellikler şöyle sıralanabilir;

- 1- Yüksek sıcaklıklarda oluşan abrazyon aşınmaya karşı direnç için yüksek sıcak sertlik,
- 2- Yüksek gerilme altında kesme kenarının deforme olmasını önlemek için yüksek bir deformasyon direnci,
- 3- Özellikle kesintili talaş kaldırmada kırılma ve çentiklenme (chipping) olayına karşı yüksek kırılma tokluğu,
- 4- Difüzyon, kimyasal ve oksidasyon aşınmasına karşı direnç için iş parçası malzemesiyle düşük kimyasal benzerlik, yüksek kimyasal kararlılık,
- 5- Takım kenarı yakınlarındaki sıcaklığın azaltılabilmesi için yüksek ısı iletkenlik,
- 6- Özellikle kesintili talaş kaldırmada yüksek yorulma dayanımı,
- 7- Kesintili talaş kaldırmada takım kırılmasını önlemek için yüksek ısı şok direnci,
- 8- Boyutsal kararlılık için yüksek rijitlik,
- 9- Özellikle yumuşak ve sünek malzemelerin düşük hızlarda işlenmesinde karşılaşılan, ağız birikintisini önlemek için uygun özellikler,
- 10- Kolay temin edilebilmesi, işlenebilirliğinin kolay ve ucuz olması.

Yukarıda sayılan bu özelliklerin hepsi bir bütün olarak değerlendirildiğinde, bütün bu özellikleri tek başına sağlayan takım malzemesinin olmadığı görülür. Genellikle yüksek sertliğe sahip, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya dayanıklı takım malzemeleri; eğilme, basınç ve darbelere karşı mukavemetleri düşük, zor işlenebilen pahalı malzemelerdir. Burada önemli olan, birbirine zıt teknik ve ekonomik şartları değerlendirerek gerçekleştirilmesi istenilen işe bağlı olarak en uygun takım malzemesini seçebilmektir. Bu seçimi yapabilmek için takım malzemelerinin bilinmesi, bu bilgiler ışığı altında seçim yapılması gerekir.

Pratikte en çok kullanılan takımlar yüksek hız çelikleri (HSS), kobaltla zenginleştirilmiş yüksek hız çelikleri (HSS-Co), sinterlenmiş tungsten karbür (WC),

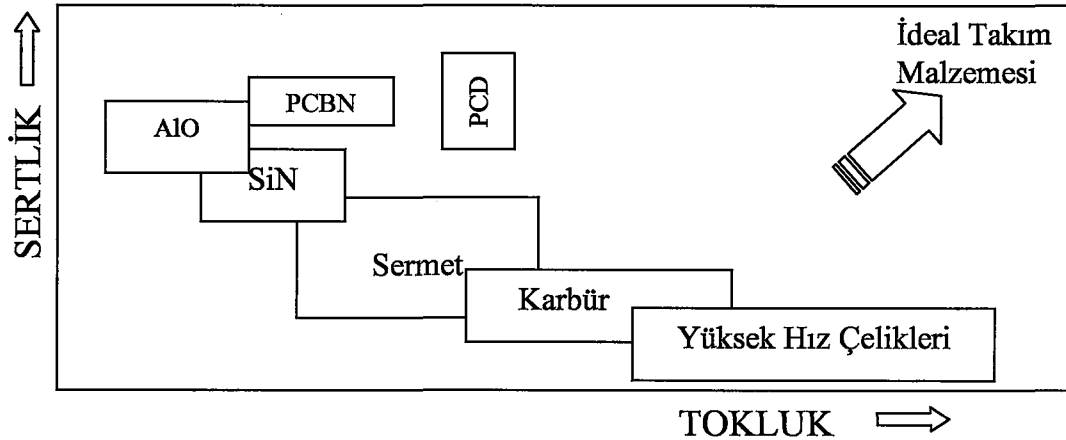
sinterlenmiş tungsten karbür esaslı diğer karbür bileşimleri (WC-TiC-TaC), seramikler, çok kristalli kübik boron nitrür (PCBN), çok kristalli elmas (PCD) ve tek kristalli elmadır. Bu takımların özellikleri çok geniş bir aralıkta değişmektedir. Tablo 3.1’de takım malzemelerinin özellikleri, her bir sütundaki özellik yukarıdan aşağıya doğru azalacak şekilde sıralanmıştır. Şekil 3.1’de ise değişik takım malzemelerinin sertlik ve tokluk özelliklerinin karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3.1. Takım malzemelerinin bazı özelliklerinin karşılaştırılması
(Stephenson ve Agapiou, 1996)

Mikro-Sertlik	Kırılma Tokluğu	Elastiklik Modülü	Kayma Modülü	Isıl İletkenlik	Özgül Isı	Isıl Yumuşama	Kimyasal Kararlılık
A	D	A	D	A	G	A	G
B	J	B	A	B	E	B	J
C	H	D	F	D	I	G	H
D	F	G	C	E	C	D	F
E	E	C	E	F	F	-	E
F	C	J	H	C	H	-	D
G	G	E	G	I	-	-	-
H	I	F	B	G	-	-	-
I	-	I	I	H	-	-	-

A : Çok kristalli elmas (PCD)
B : Çok kristalli kübik boron nitrür (PCBN)
C : Al_2O_3+TiC
D : C2 Karbür
E : Si_3N_4 HIP

F : Sialon
G : Al_2O_3
H : ZrO_2
I : Si_3N_4 RB
J : $SiCw-Al_2O_3$



Şekil 3.1 Takım malzemelerinin sertlik ve tokluk özelliklerinin karşılaştırılması
(Trent ve Wright, 2000)

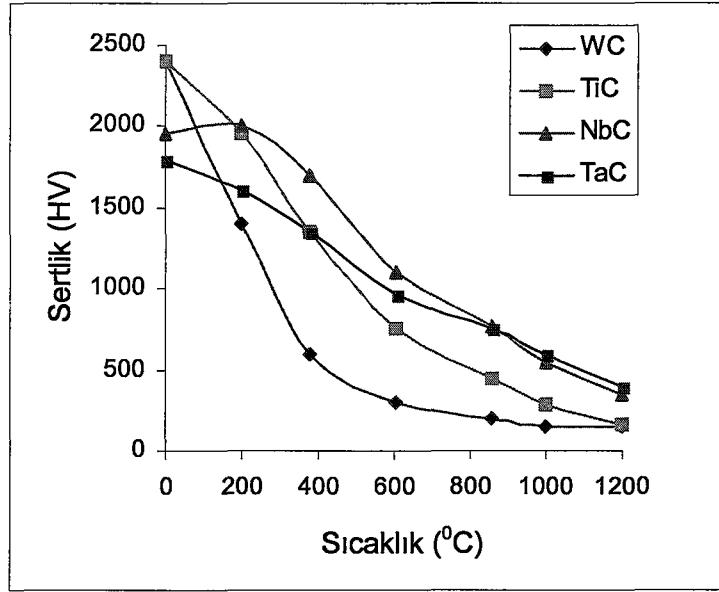
Tablo 3.1 ve Şekil 3.1 incelendiğinde, istenilen tüm özellikleri aynı anda sağlayan takım malzemesinin olmadığı görülür. Bu nedenle belli kesme şartları altında en iyi çözümü veren takım malzemesi seçilerek kullanılır.

3.3 Sinterlenmiş Karbür Plaketler

Sinterlenmiş karbür plaketler bağlayıcı malzemeleri kobalt olan; tungsten (WC), titan (TiC) ve tantal (TaC) karbürlerinin sinterlenmesi ile elde edilirler. Nadir de olsa bağlayıcı malzeme olarak nikel ve demir kullanılır. Bu plaketler sert metal olarak da adlandırılırlar. Sert metal plaketler toz halindeki karbürlerin preslenerek ön şekil alması, elektrik fırınlarında ön sinterleme yapılması ve taşlama sonrasında 1400-1600°C'lerde son sinterleme işleminin yapılması aşamalarından geçerek imal edilirler. Sinterlenmiş karbür plaketlerin erime sıcaklıkları karbür çeşidine bağlı olarak 2750-3900°C arasında değişmektedir. Bu plaketler, çelik esaslı takımlardan farklı olarak, erime sıcaklıklarına kadar önemli bir yapısal değişim veya mekanik özelliklerinde kararsızlık gibi bir tutum sergilememektedirler. Sinterlenmiş karbür plaketlerin yüksek sıcaklıklardaki sertlik profiline bakılacak olursa, tüm sinterlenmiş karbür plaket sertliklerinin çelik esaslı takımların sertliklerinden yüksek olduğu görülür (Trent ve Wright, 2000). Şekil 3.2'de farklı sinterlenmiş karbür plaketlerin yüksek sıcaklıklardaki sertlik değişimleri verilmiştir (Trent ve Wright, 2000). Sıcaklığın artmasıyla birlikte karbürlerin sertliği hızla düşer. Buna rağmen yaklaşık her durumda karbürlerin sertliği çelikten daha yüksektir. Bütün bu özellikler (yüksek sertlik, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya dayanım ve yüksek kesme hızı), sinterlenmiş karbür plaketlerin çok yüksek hız (>80 m/dak) ve sıcaklıklarda (~900°C) kullanılmasını mümkün hale getirmektedir (Akkurt, 1992).

Sinterlenmiş karbür plaketler arasında en yaygın olarak kullanılanı WC-Co (Tungsten karbür-Kobalt) esaslı plaketlerdir. Bu tip plaketlerde ağırlık olarak %4-12 kobalt mevcut olup karbür tanelerinin büyüklüğü 0,5-10 µm arasındadır. Sinterlenmiş karbür plaketlerin talaş kaldırma performansı büyük ölçüde karbür tanelerinin büyüklüğüne ve kimyasal bileşimine bağlıdır. Kimyasal bileşimde Kobalt miktarının artmasıyla sertlik ve basma dayanımı azalırken tokluk artar. Herhangi bir kimyasal bileşim için karbür taneleri küçülmesiyle sertlik artar.

Sıcaklığa ve aşınmaya karşı oldukça yüksek dayanım gösteren sinterlenmiş karbür plaketlerin eğilme ve darbe mukavemetleri oldukça düşüktür. Çelik esaslı takım malzemelerine göre çok pahalı olmaları ise diğer dezavantajlarıdır.



Şekil 3.2 Sinterlenmiş karbür plakelerin yüksek sıcaklıklardaki sertlik profilleri

3.4 WC+TiC+TaC-Co Esaslı Sinterlenmiş Karbür Plaketler

1920'li yılların sonuna doğru kullanımı yaygınlaşmaya başlayan WC-Co esaslı sinterlenmiş karbür plakeler, dökme demir ve demir dışı metallerin işlenmesinde oldukça başarılı olmalarına rağmen, çelik esaslı malzemelerin işlenmesinde daha az başarı sağlayabilmişlerdir. Bunun temel nedeni difüzyonla oluşan krater aşınmasının, kesme hızının artmasıyla birlikte hızlı bir şekilde plaketin hasara uğramasına neden olması ve hasara neden olan bu kesme hızı değerinin HSS takımlardaki kadar yüksek olmamasıdır. Sinterlenmiş karbür plakelerin kötü olan bu özelliğini iyileştirebilmek amacıyla WC-Co yapı içerisine değişik karbürler ilave edilerek yeni kimyasal bileşimler oluşturulmuştur. 1930'lu yılların sonundan itibaren kullanım alanı bulmaya başlayan WC+TiC+TaC-Co esaslı sinterlenmiş karbür plakeler bu gelişmenin sonucunda ortaya çıkan plakelerdir.

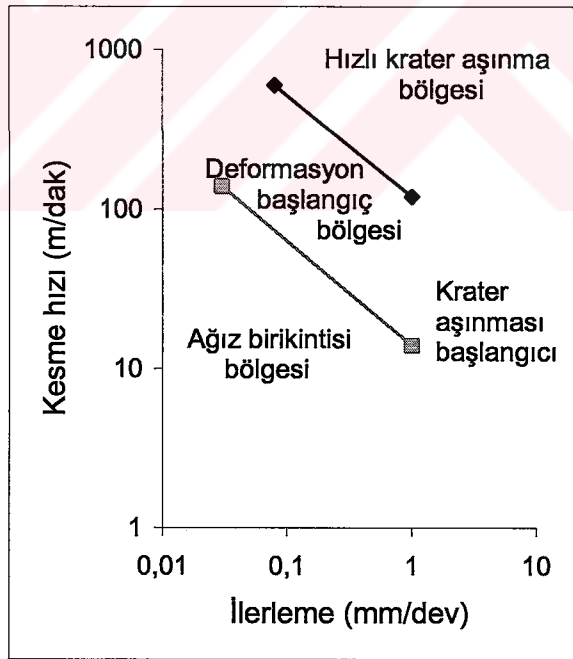
Takım performansının ve özelliklerinin iyileşmesi açısından en yüksek başarıyı sağlayan karbürler TiC, TaC ve NbC'dir. Değişik firmalar tarafından üretilerek kullanıma sunulan WC esaslı TiC, TaC ve NbC içeren çok farklı özellikte sinterlenmiş karbür plakeler mevcuttur. Bu plakelerin bazılarına ait mekanik özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir.

WC+TiC+TaC-Co esaslı sinterlenmiş karbür plakelerin iki önemli avantajı vardır. Bunlar yüksek sıcaklıklardaki sertlik ve basma dayanımlarının WC-Co esaslı karbür plakelere göre daha yüksek olması ve yüksek hızlarda çelik malzemelerin işlenmesi

sırasında meydana gelen serbest yüzeyde malzeme kaybı ve talaş yüzeyinde krater oluşturan hızlı bir difüzyon aşınmasına karşı dayanımın WC-Co esaslı karbür plakette göre daha yüksek olmasıdır. Şekil 3.3'te WC+TiC+TaC-Co esaslı sinterlenmiş karbür plakette, %0,4 C'lu çeliğin işlenmesi sırasında kesme şartlarına bağlı olarak plakette görülen aşınma mekanizmaları verilmiştir.

Tablo 3.2 WC+TiC+TaC-Co esaslı sinterlenmiş karbür plakette özellikleri
(Trent ve Wright, 2000)

Kimyasal Bileşim			Ortalama Tane Büyükliği (μm)	Sertlik (HV 30)	Kopma Dayanımı (MPa)	Elastiklik Modülü (GPa)
%Co	%TiC	%TaC				
9	5	-	2,6	1475	1890	566
9	9	12	3,0	1450	1930	510
10	19	15	3,0	1525	1410	455
5	16	-	2,5	1700	1230	537



Şekil 3.3 WC+TiC+TaC-Co plakette %0,4 C'lu çeliğin işlenmesi sırasında, kesme şartlarına bağlı olarak plakette görülen aşınma tipleri

WC-Co esaslı sinterlenmiş karbür plakette, talaş kaldırma performansı ve özelliklerini etkileyen iki faktör (kobalt bileşimi ve karbür büyüklüğü) söz konusudur. WC+TiC+TaC-Co esaslı plakette ise talaş kaldırma performansını ve takım

özelliklerini etkileyen daha çok parametre vardır. Bunlar TiC ve TaC bileşim oranı, karbürlerin birbirinden bağımsız olarak değişebilen tane büyüklüğü ve kaliteleri, karbürlerin imalat şekilleri ve karbürlerin sinterlenme yöntemidir. WC+TiC+TaC-Co esaslı plakette talaş kaldırma performansını ve özelliklerini etkileyen bu kadar çok değişkenin olması, özellikleri çok geniş bir aralıkta değişen plaket spektrumunu ortaya çıkarmaktadır. Bu özellikler ISO sınıflandırma sisteminde P, K ve M harfleriyle ifade edilen üç gruba ayrılmıştır. P grubundakiler özellikle çelik esaslı malzemelerin işlenmesi için, K grubundakiler dökme demir ve demir dışı metallerin işlenmesi için ve M grubundakiler geniş bir uygulama alanı bulan plakettir. Her bir harf grubu içinde numaralarla ifade edilen alt sınıflandırmalar yapılmıştır. Bu alt sınıflandırmada sayının artması, plakette sertliğinin azalıp tokluğunun arttığını ifade etmektedir.

3.5 Sinterlenmiş Karbür Plakette Meydana Gelen Hasar Tipleri

Soderberg ve Hogmark (1986), talaşlı imalatla kullanılan yüksek hız takım çeliklerinde görülen aşınma mekanizmalarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda; yüksek hız çeliği takımlarda abrazyon, aşırı (şiddetli) abrazyon, adeziv aşınma, kenar çentikleme ve sürekli aşınma olmak üzere 5 çeşit aşınma mekanizması oluştuğunu, düşük kesme hızlarında abrazyon ve kenar çentiklenmesi görülürken kesme hızının artmasıyla birlikte şiddetli adeziv aşınmanın etkin aşınma mekanizması olduğunu, bu aşınma mekanizmalarının nispi yoğunluğunun kesme parametrelerine, iş parçası malzemesinin cinsine ve talaş kaldırma yöntemine göre değiştiğini, takımın mikroyapı ve kimyasal bileşimindeki değişimin ana aşınma mekanizmasını değiştirmediğini, ancak takımın mikroyapı ve kimyasal bileşimindeki değişimin aşınma mekanizmalarına karşı direnci etkilediğini açıklamışlardır. Ayrıca yaptıkları çalışma sonucunda elde edilen verilerin kullanılmasıyla yüksek hız takım çeliği için maksimum takım ömrünü sağlayan optimum talaş kaldırma şartlarının tespit edilebileceğini de belirtmişlerdir.

Kowstubhan ve Philip (1991), TiN kaplanmış AISI M42 yüksek hız çeliği ve kaplamasız AISI M42 yüksek hız çeliği takımları AISI 1015 düşük karbonlu malzemenin tormalanmasında kullanarak, regresyon analizi yardımıyla kesme ve ilerleme hızının takım ömrü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda TiN kaplı takım ömrünün kaplamasız takım ömrüne göre kesme şartlarına bağlı olarak 3 ila 10 kat arasında değişen oranda yüksek olduğunu, ilerleme ve kesme hızının geniş bir aralıkta değişmesinden kaynaklanan takım ömrü verilerinin dağınık olması nedeniyle en doğru sonucu verecek takım-ömür

denklemlerinin ikinci dereceden logaritmik denklemler şeklinde olması gerektiğini, bu şekilde elde edilen ve kesme hızıyla birlikte ilerleme hızının etkisini de dikkate alan modelin yüksek hız çelikleri için gerçeğe çok yakın sonuçlar verdiğini, kaplamalı ve kaplamasız her iki takım içinde maksimum takım ömrünü veren kesme hızının aynı olduğunu, yüksek kesme hızlarına çıkıldığında kaplamasız takımın hasara uğramasına rağmen kaplamalı takımın hasara uğramadan talaş kaldırmaya devam edebildiğini belirtmişlerdir.

Jawahir ve diğ. (1995), plaketa takımlarda görülen takım aşınma mekanizmalarının anlaşılabilmesi için talaş akış biçimini esas alan sistematik bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Uygun olmayan kesme şartlarında ve/veya talaş-takım geometrisinde arzu edilmeyen bir talaş akış biçiminin meydana geldiğini, bunun sonucunda krater ve serbest yüzey aşınması şiddetli olmasa dahi hızlı bir takım aşınması ve hasarının oluştuğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; bilinen aşınma tiplerinden farklı biçimlerde görülen takım aşınmasının adhezyon ve difüzyon aşınmasından daha ziyade talaş akışının mekanik etkisi nedeniyle oluştuğunu belirtmişlerdir.

Errico ve diğ. (1998), takımlardaki aşınma mekanizmalarını, kırılma mekanizmalarını ve mekanik çarpmaya karşı dirençlerini incelemek maksadıyla, yedi farklı takım üretici firmadan temin ettikleri seramik takımlarla AISI 1045 malzemeyi frezelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda TiCN bileşimi en yüksek olan takımdan en yüksek kesme performansının elde edilebildiğini, TiCN bileşiminin difüzyon ve adhezyon aşınmasına karşı direnci arttırdığını, VC bileşiminin yorulma dayanımını arttırdığını, Co ve Ni bileşimlerinin plastik deformasyona karşı direnci arttırdığını, TaC ve NbC bileşimlerinin ısı şoka karşı dayanımı arttırdığını, C bileşiminin sertliği arttırmakla birlikte toklukta azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir.

Jawahir ve arkadaşları (2000), plaketa takımlarla yapılan tornalama sırasında takımda meydana gelen en etkin aşınma mekanizmasının belirlenebilmesi için yeni bir metot ileri sürmüşlerdir. Eşdeğer Takım Yüzeyi modeli ismi verilen bu modelin oluşturulmasında, kesme şartları ve takım-talaş geometrisindeki değişimlerin ortaya çıkardığı kesme kuvvetleriyle ilişkili olan takım hasarı esas alınmıştır. Yapılan çalışmayla oluşturulan modelin kullanılması sonucunda elde edilen verileri değerlendirerek; bazı takımlarda ömür kriteri olarak kabul edilen belli serbest yüzey aşınmasına ulaşılmadan önce takımın kırıldığını, takım hasarının eş zamanlı olarak gerçekleşen birçok takım-aşınma parametresi sonucunda oluştuğunu, plaketa

takımların karmaşık geometrileri nedeniyle takım aşınma hızı ve ömrünün belirlenmesinin oldukça zor olduğunu, bu nedenle tüm geometri ve kesme şartlarını kapsayan bir takım ömür modelinin kurulmasının oldukça zor olduğunu, bu nedenle sadece belli geometri ve kesme şartları için kullanılabilecek takım ömür modelinin daha doğru bir yaklaşım olduğunu belirtmişlerdir.

Lim ve diğ. (2001), TiC kaplanmış sinterlenmiş karbür takımla farklı malzemelerin (AISI 1045 ve AISI 4340) tornalanması durumunda, daha önceki çalışmalarda hazırlanmış olan aşınma diyagramlarını kullanarak takımda meydana gelen aşınmaları incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda daha yüksek sertlik, tokluk ve dayanıma sahip AISI 4340 malzemenin tornalanması sonucunda takım aşınmasının daha fazla olduğunu, her iki malzemenin düşük kesme ve ilerleme hızlarında işlenmesinde durumunda takım aşınma hızının birbirine yakın olduğunu, aşınma diyagramlarında yer alan güvenli aşınma bölgesinin çelik esaslı farklı malzemeler için benzer olduğunu ve bu nedenle çelik esaslı farklı malzemeler için farklı aşınma diyagramları oluşturulmasının gereksiz olduğunu belirtmişlerdir.

Dolinsek ve diğ. (2001), yüksek kesme hızları için kullanılan takımlarla yapılan talaş kaldırma sırasında oluşan mekanizmalar ve bu mekanizmaların ana aşınma mekanizmalarıyla (adhezyon, abrazyon ve difüzyon) olan ilişkisini incelemişlerdir. Bu amaçla iki kesme kanallı yuvarlak burunlu yüzeyi çok tabakalı PVD kaplanmış parmak frezeyle talaş kaldırma deneyleri yapılmıştır. Yaptıkları çalışma sonucunda takım aşınmasının abrazyon ve adhezyon gibi ısı yükleri altında mekanik hareketler nedeniyle oluşan termo-dinamik aşınma ve takım ile iş parçası arasındaki kimyasal etkileşimin bir sonucu olduğunu, kaplamanın takım performansında önemli bir artışa neden olduğunu, takımdaki koruyucu kaplamanın yüksek sıcaklık ve darbeli yüklerle parçalanabildiğini ve bunun sonucunda çok şiddetli aşınmalar oluştuğunu, iş parçasının homojen olmaması ve bünyesinde sert parçacıklar içermesi, ayrıca oksidasyon sonucu oluşan sert parçacıkların abrazyon aşınmasını arttırdığını belirtmişlerdir.

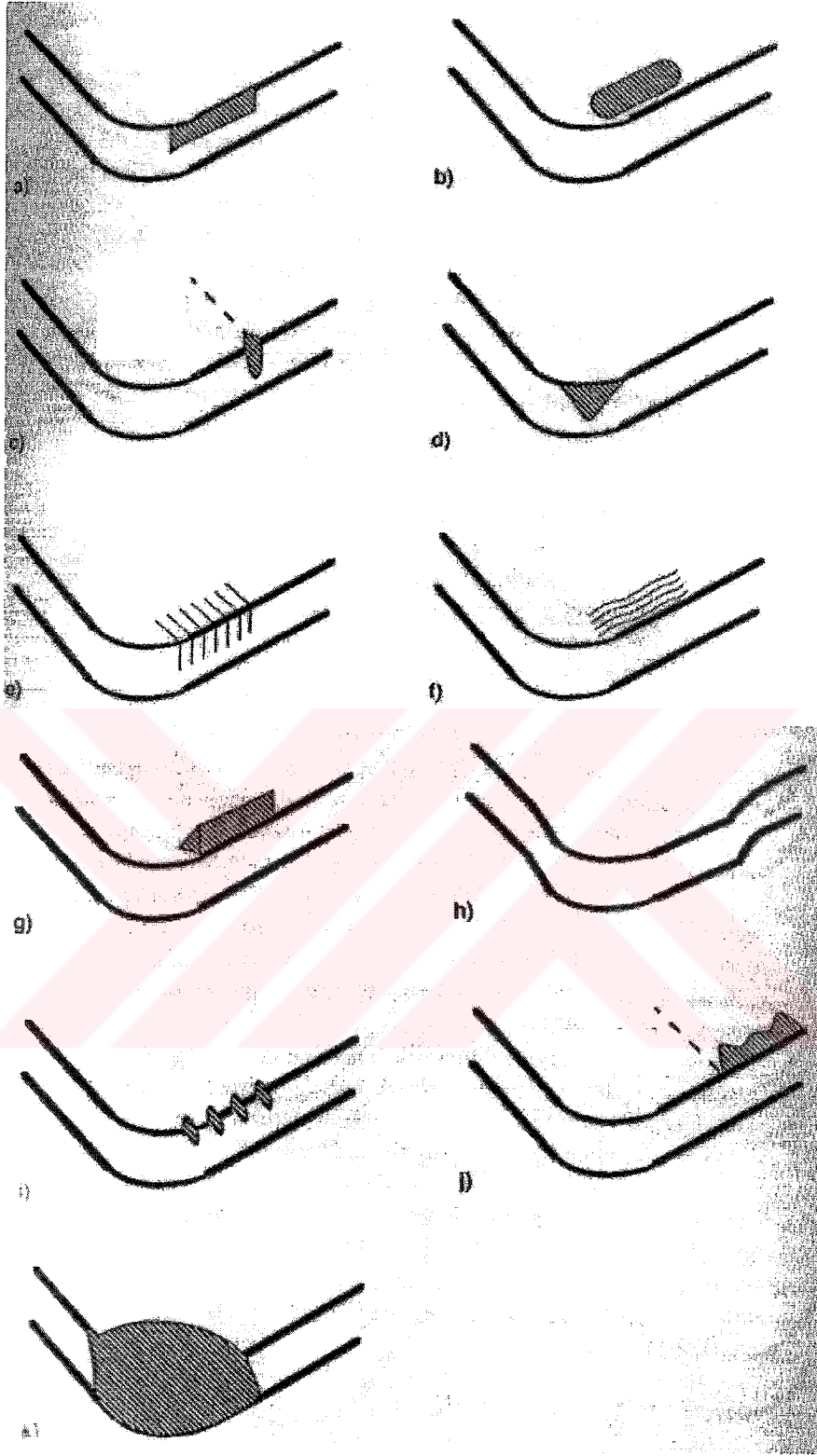
Liu ve diğ. (2002), dört farklı takım malzemesiyle (sinterlenmiş karbür takım, ince taneli sinterlenmiş karbür takım, seramik takım ve PCBN-polycrystalline cubic boron nitride-çok kristalli kübik bor nitrür takım) dökme demir, %0,45 C'lu temperlenmiş çelik ve %0,45 C'lu sertleştirilmiş çelik malzemeleri yüksek kesme hızlarında frezelemişler ve talaş kaldırma sonrasında her bir takımda oluşan aşınmaları mikroskop altında incelemişlerdir. Yaptıkları inceleme sonucunda değişik takım ve malzeme kombinasyonlarında farklı aşınma tiplerinin oluştuğunu, takımlarda

gözlenen ana hasar tiplerinin krater aşınması, serbest yüzey aşınması, çentiklenme, çatlak ve kırılma olduğunu, bu aşınmaların meydana gelmesinde etkili olan mekanizmaların ise mekanik sürtünme, adhezyon, difüzyon ve kimyasal aşınma olduğunu, takımın yüksek ısı direnci ve kimyasal kararlılığının aşınmaya karşı dayanımı arttırdığını, kesme hızının artmasıyla birlikte baskın aşınma mekanizmasının serbest yüzey aşınmasından talaş yüzeyi aşınmasına dönüştüğünü ve yüksek kesme hızlarında meydana gelen aşınma topografyasının düşük kesme hızlarında meydana gelen aşınma topografyasından oldukça farklı olduğunu belirtmişlerdir.

Molinari ve Nouari (2002), HSS takımlar için difüzyonla oluşan takım aşınmasını modellemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda takım-talaş arayüzeyindeki ortalama sıcaklığı esas alan model ve takım-talaş arayüzeyindeki üniform olmayan sıcaklık dağılımını esas alan model olmak üzere iki ayrı model oluşturmuşlardır. Modellerin oluşturulması sırasında; difüzyon akışının takım-talaş arayüzeyine dik doğrultuda olduğu ve difüzyon hızını etkileyen ana faktörün takım-talaş temas sıcaklığı olduğu kabulleri yapılmıştır. Ayrıca elde edilen difüzyon modellerinin sinterlenmiş karbür takımlara uygulanması sonucunda elde edilen verilerle, deneysel olarak elde edilen sonuçların birbirlerine oldukça yakın olduğunu da belirtmişlerdir.

Gekonde ve Subramanian (2002), AISI 1045 malzemenin sinterlenmiş karbür takımla tornalanması sırasında, kesme kuvvetini sistematik olarak değiştirerek takım-talaş arayüzeyindeki tribolojik olayları ve takım aşınma mekanizmasını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda düşük kesme hızlarında takım-talaş arayüzeyindeki tribolojik olayların kayma esaslı olduğunu, kesme hızının artmasıyla birlikte tribolojik olayların kaymadan yapışmaya (atomal bağlarla gerçekleşen katı faz kaynağı) dönüştüğünü, yapışmanın talaş yüzeyinde lokal olarak termoplastik kaymaya ve bunun sonucunda sıcaklığın artmasına neden olduğunu, lokal olarak artan sıcaklık nedeniyle krater aşınmasına neden olan difüzyon mekanizmasının etkili olduğunu, maksimum krater derinliğinin iş parçasının faz dönüşüm sıcaklıklarında meydana geldiğini, takımın difüzyon aşınmasına dayanıklı bir malzemeyle kaplanmasının bu aşınmayı azaltabileceğini belirtmişlerdir.

Sinterlenmiş karbür plakette meydana gelen aşınma tipleri, bunları etkileyen faktörler, aşınma tipine bağlı olarak aşınmayı azaltma veya önleme teknikleri aşağıda sıralanmıştır. Şekil 3.4'te bu aşınma mekanizmaları sonucunda plakette meydana gelen hasar şekillerinin şematik resimleri verilmiştir.

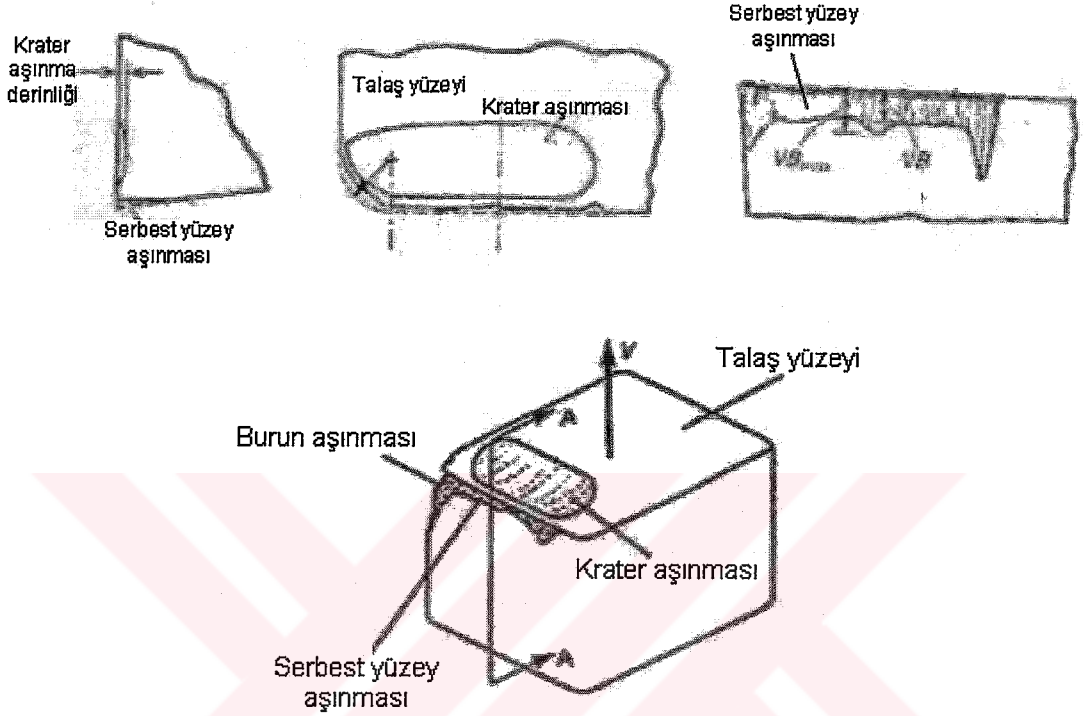


Şekil 3.4 Plaketlerde meydana gelen aşınma ve hasar tipleri
(Stephenson ve Agapiou, 2000)

- | | |
|---------------------------|---|
| a. Serbest Yüzey Aşınması | g. Ağız Birikintisi (Built-up Edge-BUE) |
| b. Krater Aşınması | h. Plastik Deformasyon |
| c. Yenme (Notch) Aşınması | i. Kenar Çentikleme (Edge Chipping) |
| d. Burun Aşınması | j. Talaş Vurması |
| e. Termal Çatlaklar | k. Kırılma |
| f. Mekanik Çatlaklar | |

3.5.1 Serbest Yüzey Aşınması ve Krater Aşınması

Sinterlenmiş karbür plakelerin yüksek kesme ve ilerleme hızlarında kullanılması halinde plaketin talaş yüzeyinde krater, serbest yüzeyinde ise serbest yüzey aşınması meydana gelir (Şekil 3.5).

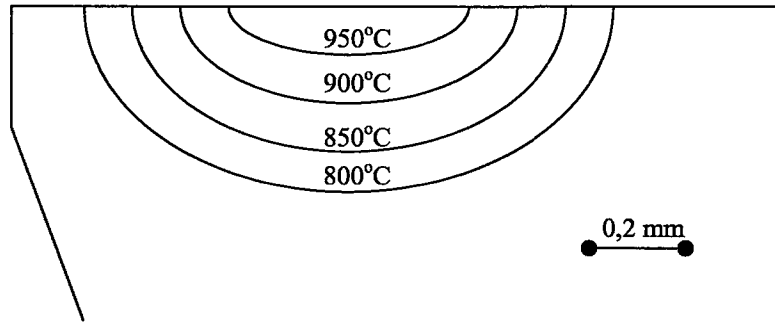


Şekil 3.5 Karbür takımlarda meydana gelen krater aşınması ve serbest yüzey aşınması (Kendall, 1986)

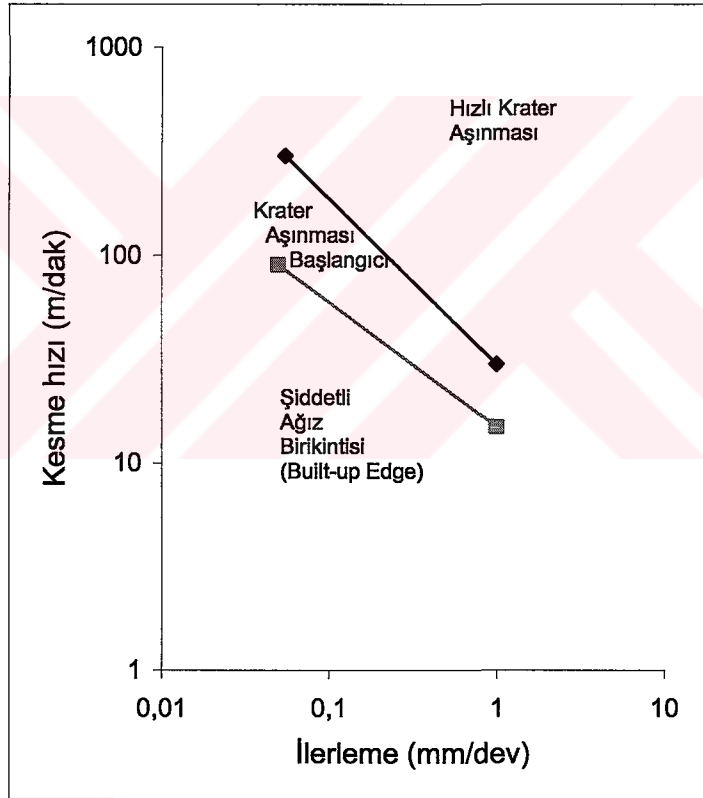
Dearnley ve Trent (1982) tarafından sinterlenmiş karbür plakete yapılan talaş kaldırma deneylerinden elde edilen, plaketin talaş yüzeyindeki sıcaklık dağılımı Şekil 3.6'da verilmiştir. Şekil 3.6'dan da görülebileceği gibi yüksek sıcaklığa bağlı olarak plaketin talaş yüzeyinden krater şeklinde bir aşınma meydana gelir. Bunun yanı sıra sıcaklığın nispeten düşük olduğu plaket ucunda bir aşınma söz konusu değildir. HSS takımlarda görülen deformasyonun aksine, sinterlenmiş karbür plakelerde kraterin kaymayla oluşan plastik deformasyonun sonucu oluştuğuna ilişkin hiç bir belirti yoktur. Kraterin yüzeyi genellikle düzgün olup kırılma şeklinde bir aşınma durumu söz konusu değildir.

Krater aşınması plaket-iş parçası arayüzeyinde katı hal difüzyonunu başlatan sıcaklıklara ulaşılmasına neden olan nispeten yüksek kesme ve ilerleme hızlarında meydana gelir. WC-Co esaslı sinterlenmiş karbür plakete %0,4 C'lu çeliğin

frezelenmesi durumunda kesme şartlarına bağlı olarak plakette meydana gelmesi olası aşınma durumu Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.6 %0,4 C’lu çeliğin 183 m/dak’lık kesme hızında işlenmesi durumunda plaketin talaş yüzeyindeki sıcaklık profili



Şekil 3.7 WC-Co esaslı karbür plakette %0,4 C’lu çeliğin frezelenmesi sırasında, kesme şartlarına bağlı olarak plakette görülen aşınma tipleri (Trent ve Wright, 2000)

Genellikle ılımlı bir krater aşınması takım ömrünü sınırlamaz (Trent ve Wright, 2000). Gerçekten krater oluşumu takım talaş açısının etkinliğini artırır ve böylece kesme kuvvetleri azalır. Fakat, aşırı krater aşınması kesme kenarlarını zayıflatır ve bu durum takımın deformasyonuna veya kırılmasına yol açar. Buradan da

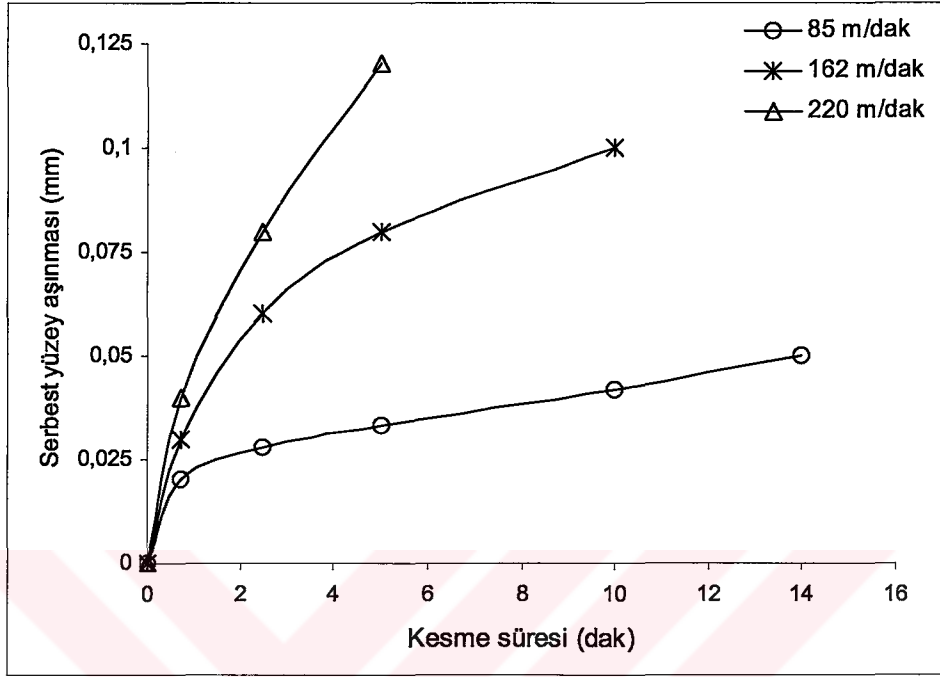
anlaşılacağı gibi takım ömrünü kısalttığı ve takımın yeniden bileşmesini zorlaştırdığı için aşırı krater aşınmasından kaçınılmalıdır. Aşırı krater aşınması, difüzyon veya kimyasal aşınma mekanizmalarıyla meydana gelir. Krater aşınması, takım malzemelerinin kimyasal kararlılığının arttırılması veya takımın talaş içinde çözünürlüğünün azaltılmasıyla minimize edilebilir.

Farklı tipteki takım-iş parçası ikilisi arasında çok farklı difüzyon aşınması meydana gelir. Aşınma hızı takımın sertliği veya mekanik dayanımından daha çok kimyasal özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle yüksek sertliği sağlayan ince taneli sinterlenmiş karbür plaketi yapısının difüzyon aşınmasına karşı dayanımı yüksek olmayabilir. Difüzyon aşınma hızı takımda çözünen ve iş parçasına nüfuz eden atomların hızına bağlıdır. Sinterlenmiş karbür plakette iş parçasına nüfuz eden tungsten ve karbon atomlarının hızı, difüzyon aşınma hızını belirler. Bu hız sadece sıcaklığa bağlı olmayıp, plaketin yüzeyine çok yakın olan iş parçası akış hızına da bağlıdır.

Şekil 3.8'de WC-Co esaslı sinterlenmiş karbür plakette çelik esaslı malzemenin işlenmesi sırasında difüzyon esaslı aşınma mekanizmasının, kesme hızı ve kesme süresine bağlı olarak plaketin serbest yüzeyinde meydana getirdiği aşınma miktarı değişimi verilmiştir. Takımın serbest yüzeyinde meydana gelen aşınma serbest yüzey aşınması olarak adlandırılır ve bir aşınma bölgesi oluşur. Bu aşınma bölgesinin işlenmiş yüzeye sürtünmesiyle, bu yüzeyde hasar oluşur, oluşan yüksek kuvvetler nedeniyle boyutsal doğruluktan sapmalar meydana gelir. Serbest yüzey aşınması genellikle kesme ağızlarının abrazyonu ile oluşur. Serbest yüzey aşınmasının büyüklüğü, ortalama serbest yüzey aşınması veya takım ucuna olan maksimum mesafesi ile ifade edilir. Serbest yüzey aşınma bölgesi genellikle üniform genişliktedir ve kenara yakın bölgede oluşur. Şekil 3.8'den de görülebileceği gibi, kesme hızı ve kesme süresinin artmasıyla birlikte serbest yüzey aşınması da artmaktadır. Sinterlenmiş karbür plaketin bünyesindeki kobalt miktarı difüzyon aşınma hızını etkiler. Serbest yüzey aşınma hızı kobalt bileşiminin artmasıyla yükselir. Ancak bu artış plaketin deforme olmasına neden olacak kadar yüksek değildir.

Dearnley (1985), üç farklı malzemeyi (AISI 1040, AISI 1055 ve AISI 4340), kaplanmış (TiC, TiN ve Al₂O₃) ve kaplanmamış sinterlenmiş karbür takımla tornalayarak, takımların serbest yüzey ve krater aşınmalarını incelemiştir. Yaptığı çalışma sonucunda; birkaç mikron kalınlığındaki kaplamanın takımın aşınma hızını azalttığını, takım aşınma hızındaki azalmanın kesme ve kaplama şartlarına bağlı olarak çok geniş bir aralıkta değiştiğini, krater aşınmasına karşı en yüksek direnci

TiN kaplamanın sağladığını, serbest yüzey aşınmasına karşı en yüksek direnci ise TiC kaplamanın gösterdiğini, kaplanmış takımlarda meydana gelen hasarın difüzyon aşınması ve kaplamanın plastik deformasyonundan kaynaklandığını belirtmiştir.

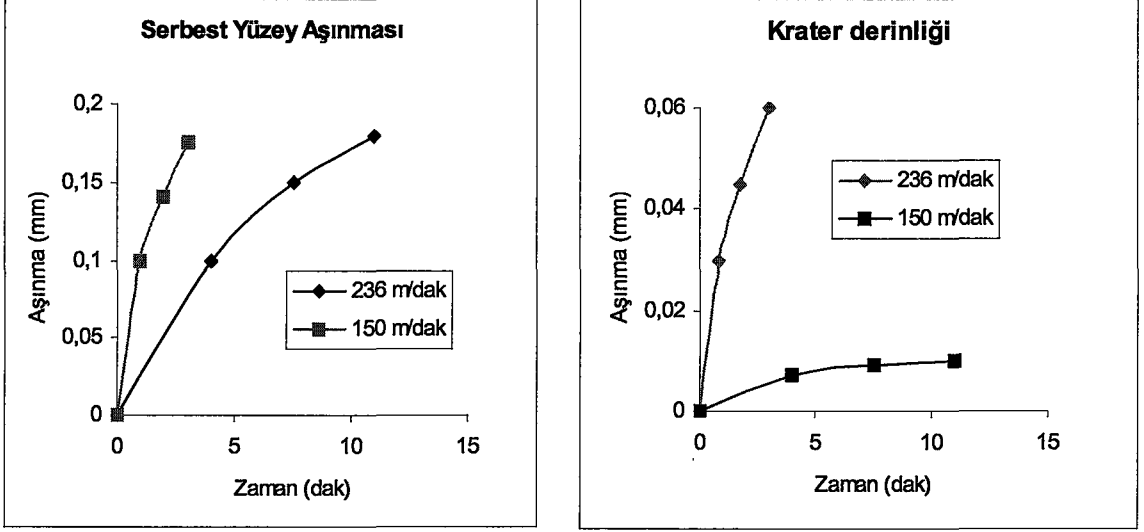


Şekil 3.8 WC-Co esaslı karbür plakette çelik esaslı malzemenin işlenmesi sırasında difüzyon esaslı aşınma mekanizmasının, kesme hızı ve kesme süresine bağlı olarak plaketin serbest yüzeyinde meydana getirdiği aşınma miktarı değişimi (Trent ve Wright, 2000)

Şekil 3.9'da, P10 serisi sinterlenmiş karbür plakette %0,45 karbonlu çeliğin değişik kesme hızlarında frezelenmesi sırasında elde edilen serbest yüzey ve krater aşınma miktarları verilmiştir (Childs ve diğ., 2000). Şekil 3.9'dan da görülebileceği gibi; serbest yüzey aşınma hızı değişimi, krater aşınmasına göre kesme hızının artışından daha az etkilanmektedir. Kesme hızındaki değişimin krater aşınması üzerindeki etkisi daha fazladır.

Lim ve diğ. (2001), HSS takımların serbest yüzey aşınmalarını, ilerleme ve kesme hızının fonksiyonu olarak tanımlayan bir aşınma diyagramı oluşturmuşlar, ilerleme ve kesme hızının bu diyagramda belirtilen kriterlere uygun seçilmesi durumunda takım aşınmasının minimum düzeyde olacağını belirtmişlerdir. Böylece bu tür takımlar için aşınmanın minimum olduğu güvenli bölge ismi verilen bir alan tanımlanmış olup, en uygun kesme şartlarının oluşturulabilmesi için bu alan içerisinde kalınması tavsiye edilmiştir. Ayrıca; takım yüzeyinin aşınmaya dayanıklı ince bir tabaka ile kaplanmasıyla güvenli bölge sınırlarını belirleyen kesme ve ilerleme hızlarının arttığını, ancak talaş kaldırma parametrelerinin uygun

seçilmemesi durumunda bu kaplamanın kendinden beklenen faydayı sağlayamadığını da belirtmişlerdir.



Şekil 3.9 %0,45 karbonlu çeliğin P 10 sinterlenmiş karbür plakette frezelenmesi durumunda serbest yüzey ve krater aşınmasının kesme hızına göre değişimi (kesme derinliği 1 mm, ilerleme 0,2 mm/dev) (Childs ve diğ., 2000)

Haron ve diğ. (2001), kaplanmamış ve çok tabakalı kaplamaya (altta TiCN, ortada Al_2O_3 ve en dışta TiN) sahip sinterlenmiş karbür takım ile DIN 95MnCrW1 malzemeyi tornalayarak serbest yüzey aşınma davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; kaplanmış takım aşınma hızının kaplanmamış takıma göre oldukça düşük olduğunu, kaplanmış takım serbest yüzey aşınmasının daha kararlı olduğunu, talaş kaldırma sırasında uygun özellikte soğutucu sıvı kullanılmasının takım ömrünü arttırdığını, kaplanmış takım için yüksek kesme hızlarında aşınma mekanizmasının abrazyon aşınmasından termal aşınmaya dönüşmesi nedeniyle takım ömrünün azaldığını belirtmişlerdir.

3.5.2 Yenme Aşınması (Notch Wear)

Kaba yüzeylerin tornalanmasında kullanılan plakette, işlenmemiş yüzey ve plaket kesme ağızları arasındaki temas noktasında, plaket yüzeyinde yenme (notch) aşınması meydana gelir. Çentiğin derinliği genellikle abrazyonun ve özellikle işlenen parçaların sert bir yüzey tabakasına sahip olması veya işlenen parçanın kendi sertliğinden dolayı oluşan abrazif talaşın (örneğin paslanmaz çelik ve nikel-bazlı süperalaşımlar) bir sonucudur. Kullanılan bir soğutucunun neden olduğu veya plaket ile atmosfer arasındaki kimyasal reaksiyon veya korozyon nedeniyle oluşan oksidasyon da yenme aşınmasına neden olur. Aşırı yenme aşınması sinterlenmiş

karbür ve özellikle seramik parçalarda kırılmaya neden olur. Yenme aşınması, plaketi ile iş parçası yüzeyi arasındaki temas alanını arttıran dalma açısının artırılmasıyla, çok pasolu talaş kaldırmada kesme derinliğinin değiştirilmesiyle ve plaketi malzemesinin ısı sertlik ve deformasyon direncini arttırarak, azaltılabilir.

3.5.3 Burun Aşınması (Nose Wear)

Bu aşınma, plaketi burun yarıçapında, serbest yüzeyinin sonuna yakın bölgede iz kenarı üzerinde meydana gelir. Bu aşınma şekli, serbest yüzey aşınması ile yenme aşınmasının kombinasyonuna benzer bir karakterdedir ve öncelikle abrazyon ile korozyon yada oksidasyon nedeniyle oluşur. Aşırı burun aşınması işlenmiş yüzeyin kalitesini azaltır.

3.5.4 Mekanik ve Termal Çatlaklar

Özellikle frezeleme gibi kesintili talaş kaldırma işlemlerinde, plaketi yüzeyinde kısa çatlaklar oluştuğu görülür. Bu çatlaklar; plaketi yüzey tabakasının, talaş kaldırma sırasında ısınması nedeniyle genişmesi, talaş kaldırmaya iştirak etmediği zaman aralıklarında ise soğuması nedeniyle büzülmesinden ve özellikle kesintili talaş kaldırma işleminde plaketin değişken yüklere maruz kalmasından kaynaklanır. Soğutucu bir sıvı kullanıldığında değişken ısı yükleri altında kesme kenarlarına dik olarak oluşan çatlaklar ve değişken mekanik yükleri nedeniyle kesme kenarlarına paralel olarak oluşan çatlaklar olmak üzere iki farklı tipte çatlak oluşur. Bu çatlaklar genellikle plaketin talaş yüzeyi üzerindeki en sıcak noktadan başlar. Çatlak sayısının çok fazla olması durumunda, çatlakların birleştiği ve kesme kenarında kırılmalara neden olduğu görülür.

3.5.5 Ağız Birikintisi (Built-up Edge-BUE) Oluşumu

Dökme demir veya çelik esaslı çoğu malzemelerin orta ve düşük kesme hızlarında işlenmesi sırasında, talaş takıma yapışır (seizure). Böylece takım-iş parçası ara yüzeyinde ağız birikintisi (built-up) meydana gelir. Ağız birikintisi; işlenen malzemenin kesme ağzına çok güçlü yapışarak birikmesi ve çıkıntı oluşturmasıyla meydana gelir. Ağız birikimi oluşumu, etkili kesme derinliğini değiştirdiği, böylelikle kesme derinliğinin kararsız olmasına ve dolayısıyla kalitesiz bir işlenmiş yüzeyin meydana gelmesine neden olduğu için istenilmez. Bununla birlikte; karbür plaketi yeterince yüksek olan ısı dayanımı, plaketi, yüksek sıcaklıktaki kaymayla oluşan yüzeysel plastik deformasyonun neden olduğu aşınma tipinden korumaktadır.

3.5.6 Plastik Deformasyon

Sinterlenmiş karbür plaketer, yüksek sıcaklık ve basma gerilmesi altında plastik deformasyona maruz kalırlar. Bu nedenle kesme ve ilerleme hızı; talaş yüzeyi üzerinde etkili olan basma gerilmesinin sinterlenmiş karbür plaketerde oluşturacağı deformasyonun, emniyet değeri içinde kalmasını sağlayacak şekilde seçilmelidir. Plaketler yüksek sıcaklıkta dahi çok az şekil değıştırerek çok küçük deformasyona karşı koyabilirler ve oluşan bir çatlak aniden hasara neden olabilir. Yüksek ilerleme hızlarında ve işlenen malzemenin sertliğinin yüksek olması halinde böyle bir durumun oluşma ihtimali yüksektir. Plaketlerin bünyesindeki kobalt miktarının düşmesiyle deformasyona karşı direnç artacağı için, kobalt miktarı düşük sinterlenmiş karbür plaketer daha yüksek kesme ve ilerleme hızlarında kullanılabilirler. Maksimum plastik deformasyon plaket ucunda meydana gelir. Keskin uçlu veya çok küçük radyüse sahip bir plakette deformasyon bu noktadan başlar. Kesme kenarındaki aşırı plastik deformasyon boyutsal doğruluğun azalmasına, kötü bir yüzey kalitesine ve aşırı serbest yüzey aşınmasına veya plaketin kırılmasına neden olur.

3.5.7 Kenar Çentiklenmesi (Chipping veya Fritting)

Kenar çentiklenmesi, sinterlenmiş karbür gibi gevrek malzemelerle yapılan talaş kaldırmada veya sert parçacıklar içeren metal matrisli kompozitler gibi malzemelerin işlenmesi durumunda meydana gelir. Aşırı kesme kuvvetleri veya düşük sistem rijitliği nedeniyle meydana gelen titreşim de kenar çentiklemesine neden olur. Kenar çentiklemesi nedeniyle işlenen yüzeyin kalitesi düşer, serbest yüzey aşınması artar ve sonuçta plaket kırılabilir. Bu mekanizma; plaket ağızlarının uygun zamanda değıştırilmesiyle veya plaketlerin kırılma dayanımlarının artırılmasıyla önenebilir.

Tlusty ve Masood (1978), AISI 4340 malzemenin sinterlenmiş karbür takımla tornalanması sırasında meydana gelen kesme kuvvetlerinin oluşturduğu gerilmeler nedeniyle takımda meydana gelen çentiklenmeleri ve kırılmaları incelemiştir. Yaptıkları çalışmada; çentiklenmenin talaş yüzeyindeki maksimum lokal gerilmenin meydana getirdiği bir gevrek kırılma olduğu kabulüyle ısı gerilmeler dikkate alınmamıştır. Böylece, belli bir takım-iş parçası çifti için sürekli ve kesintili talaş kaldırmaya ait çentiklenme ve kırılmanın meydana geldiği kesme şartları belirlenmiş ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak takım yüzeyinde oluşan gerilmenin, takımdaki kırılma ve çentiklenmeye etkisi ilişkilendirilmiştir.

3.5.8 Plaketin Kırılması

Kırılma, plaketin önemli bir parçasının veya kesme ağzının parçalanması anlamında kullanılmaktadır. Bu tip hasarı önlemek için genel stratejiler; kesme kuvvetlerinin azaltılması, sağlam ve daha rijit takım tutturma tertibatlarının kullanılması ve kırılma tokluğu arttırılmış plaketler kullanılması şeklinde sıralanabilir. Aşınmayla plaket ömrünün tamamlanmasından önce meydana gelen kırılmalar, plaket ömründe istikrarsızlığa neden olur. Plaket tokluğunun yüksek olması kırılmalara karşı direnci artırır. Diğer talaş kaldırma yöntemlerine göre tornalama gibi sürekli talaş kaldırma işlemlerinde plaket kırılmasıyla daha nadir karşılaşılır. Frezeleme gibi kesintili talaş kaldırmanın söz konusu olduğu uygulamalarda mekanik yorulma nedeniyle plaketin kırılarak hasara uğrama ihtimali daha yüksektir.

Plaketin kırılma ile hasara uğramasına yol açan bir diğer etkende talaş vurmasıdır (Chip Hammering). Talaş vurması; talaşın geriye doğru kıvrılıp kesme kenarından uzakta plaket yüzeyine çarpmasıyla meydana gelir. Böylece plaket yüzeyinde çukurcuklar oluşur ve bu durumun devam etmesi halinde plaket hasara uğrar. Talaş vurması yanlış talaş kontrolü nedeniyle oluşur. Talaş akış yönünü değiştirmek için dalma açısı, kesme derinliği, ilerleme hızı veya plaket burun ucu kavis yarıçapı değiştirilerek talaş vurması önlenabilir.

3.5.9 Yıpranma Aşınması (Attrition Wear)

Nispeten düşük kesme hızlarında gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinde, etkin olan aşınma mekanizması yıpranma aşınmasıdır. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi düşük kesme hızlarında ağız birikintisi meydana gelir. Kesme hızı daha da düşürüldüğünde aşınma, yıpranma aşınması şeklinde oluşur.

Talaş kaldırma işlemi sırasında ağız birikintisi koparak sürekli olarak değişir. Eğer ağız birikmesi kopmaz ve plakete yapışıp kalırsa, plakette uzun süre aşınma oluşmaz. Özellikle dökme demir malzemelerin işlenmesi sırasında karşılaşılan bu durumda plaket ömrü oldukça yüksektir. Ağız birikintisinin meydana geldiği kesme şartları altında çalışılması durumunda, WC-Co esaslı sinterlenmiş karbür plaket yıpranma ile hızlı bir şekilde hasara uğrar. Yıpranma aşınmasıyla oluşan yüzeyler, difüzyon aşınması ile oluşan yüzeye göre oldukça pürüzlüdür.

Yıpranma aşınmasının hızı, plaketin sertliği ile doğrudan ilişkili değildir. İnce taneli sinterlenmiş karbür plaketin yıpranma aşınması direnci, kaba taneli sinterlenmiş karbür plakete göre daha yüksektir. İnce taneli plaketin sertliği, kaba taneli plakete

göre daha yüksek olduğundan, sert plaketin yıpranma aşınması direnci daha yüksektir.

Kobalt bileşimi yıpranma aşınmasını çok az etkiler. Kesme hızının azalmasıyla birlikte, plaket kesme kenarı etrafındaki iş parçası akışının laminarlığı bozulduğu için yıpranma aşınması hızı artar. Yıpranma aşınmasının etkin olduğu aşınma durumunda plaket ömrünü arttırmak için; talaş kaldırma sistemindeki titreşimler azaltılmalı, sistemin rijitliği yükseltilmeli ve uygun kesme açısına sahip plaketer kullanılmalıdır.

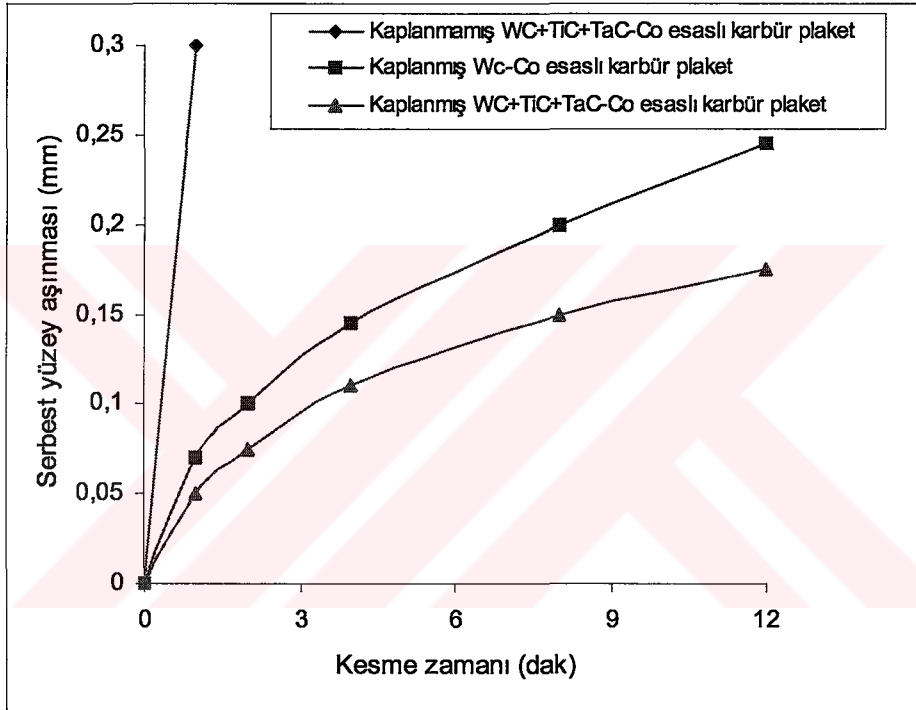
3.5.10 Abrasyon Aşınması

Sinterlenmiş karbür plaketerin sertliği yüksek olduğundan, abrazyon aşınmasının etkin aşınma mekanizması olma olasılığı oldukça düşüktür. Bu aşınma mekanizması en şiddetli olarak görüldüğü durum, yüzeyinde kum kalmış döküm malzemelerin işlenmesi sırasında karşılaşılan aşınma durumudur. Talaş kaldırma sırasında; plaketerdeki karbür taneleri arasındaki kobaltı aşındıran, iş parçasındaki küçük sert parçacıkların izole edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle kayma şartlarının oluştuğu plaket-iş parçası ara yüzeyinde önemli abrazyon aşınması oluşma ihtimali oldukça yüksektir. Abrasyon aşınma direncini arttırmak için sinterlenmiş karbür plaket bileşimindeki kobalt miktarı azaltılmalı ve ince taneli bir yapı tercih edilmelidir.

3.6 Kaplanmış Sinterlenmiş Karbür Plaketerin Talaş Kaldırma Performansı

1970'li yıllardan itibaren yüzeyleri belli bir tabaka ile kaplanmış sinterlenmiş karbür plaketer kullanılmaya başlanmıştır. Bu kaplama, kimyasal (CVD-Chemical Vapor Deposition) veya fiziksel buhar yoğunlaşmasıyla (PVD-Physical Vapor Deposition) oluşturulan oldukça ince (maksimum 10 µm kalınlığında) genellikle titanyumkarbür (TiC), titanyum nitrür (TiN) yada alüminyumoksit (Al_2O_3) tabakasıdır. Uygulanan tabakanın özelliklerine ve kesme şartlarına bağlı olarak kaplanmamış takıma göre kaplanmış plaketerde aşınmanın 2-3 kat azaltılabildiği yada takım ömrü aynı kalmak kaydıyla kesme hızının yaklaşık %25-50 artırılabilirdiği görülmüştür (Trent ve Wright, 2000). Şekil 3.10'da kaplanmamış WC+TiC+TaC-Co esaslı karbür plaket, kaplanmış WC-Co esaslı karbür plaket ve kaplanmış WC+TiC+TaC-Co esaslı karbür plakete ait kesme süresine bağlı olarak serbest yüzey aşınma miktarları verilmiştir. Şekil 3.10'dan da görülebileceği gibi en iyi aşınma şartları kaplanmış WC+TiC+TaC-Co esaslı karbür plaket için elde edilmiştir.

Yapılan araştırmalar; sinterlenmiş plaket yüzeyine yapılan kaplamanın daha çok difüzyon aşınmasına karşı yüksek bir dayanım sağladığını göstermiştir (Dearnley ve Trent, 1982). Özellikle düşük kesme hızlarında gerçekleştirilen talaş kaldırma işlemlerinde görölen ağız birikintisi kaplama cinsine bağlı olarak minimum düzeyde gerçekleşmektedir. Çok ince yapılan kaplamalarda plaketin yüzeyinde belli bir bölgesinde lokal olarak (genellikle kraterin merkezinde yada serbest yüzey üzerinde) çok şiddetli ve hızlı bir aşınmanın gerçekleştiği, ancak kaplama tamamen soyulana kadar görevini yaptığını ve plaketin genel aşınmasında önemli bir düşüş olduğu görölmektedir.



şekil 3.10 Değişik özellikteki sinterlenmiş karbür plaketlerin serbest yüzey aşınma dayanımlarının karşılaştırılması (Trent ve Wright, 2000)

Değişik kaplama tabakalarının takım ömrü yada diğer bir ifadeyle aşınma direnci üzerindeki etkisi de farklıdır. elik esaslı malzemelerin işlenmesi sırasında krater aşınmasının oluşumuna karşı titanyumnitrür (TiN), titanyumkarbür (TiC) göre daha direnç göstermesine rağmen, TiC serbest yüzey aşınmasına karşı daha dirençlidir. Yapılan incelemeler sonucunda alüminyumoksit tabakasının serbest yüzey ve krater aşınma dayanımının, TiC ve TiN'den çok farklı olmadığını görölmüştür (Trent ve Wright, 2000). Alüminyum oksit kaplanmış plaketlerde meydana gelen krater aşınmasının, difüzyon aşınmasından daha çok yüzeysel plastik deformasyondan kaynaklanan bir aşınma olduğu bilinmektedir (Dearnley ve Trent, 1982). Kaplama

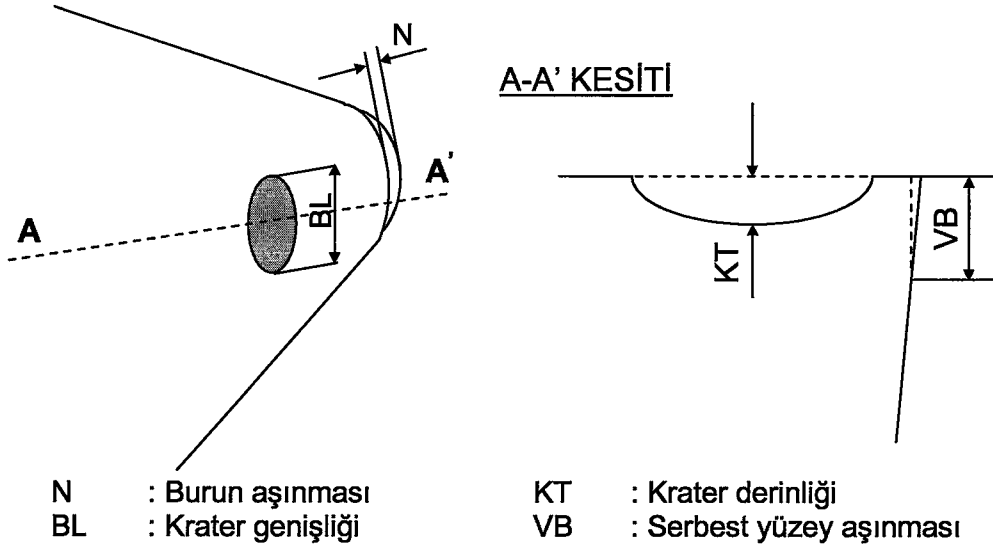
tipine göre aşınma hızının en farklı olduğu aşınma tipi, plaket-iş parçası temas bölgesinde meydana gelen çentiklenme aşınmasıdır. Bu noktadaki aşınmaya karşı en kötü dayanım sergileyen kaplama alüminyumoksit kaplamadır. TiN kaplama da yaklaşık alüminyumoksit yakın bir özellik sergilemektedir. Bu bölgedeki TiC kaplamanın bu tip aşınmaya karşı dayanımının oldukça iyi olmasına rağmen, kaplanmamış plakete göre dayanımda çok önemli bir fark yoktur.

Günümüzde yüzeyleri çok tabakalı bir yapıyla kaplanmış karbür plaketer kullanılmaktadır. Genellikle titanyum esaslı karbür tabakalarından oluşan ve "sandviç yapı" olarak adlandırılan bu tabakalı kaplamanın kalınlığı 10-15 µm arasında değişmektedir. Oldukça ince tabakalardan meydana gelen sandviç yapının aşınma özellikleri, aynı kalınlıkta olan tek tabakalı kaplamaya göre daha iyidir. Günümüzde ticari amaçlı üretilen ve titanyum esaslı çok tabakalı sandviç yapıyla kaplanmış pek çok değişik sinterlenmiş karbür plaketer kullanılmaktadır.

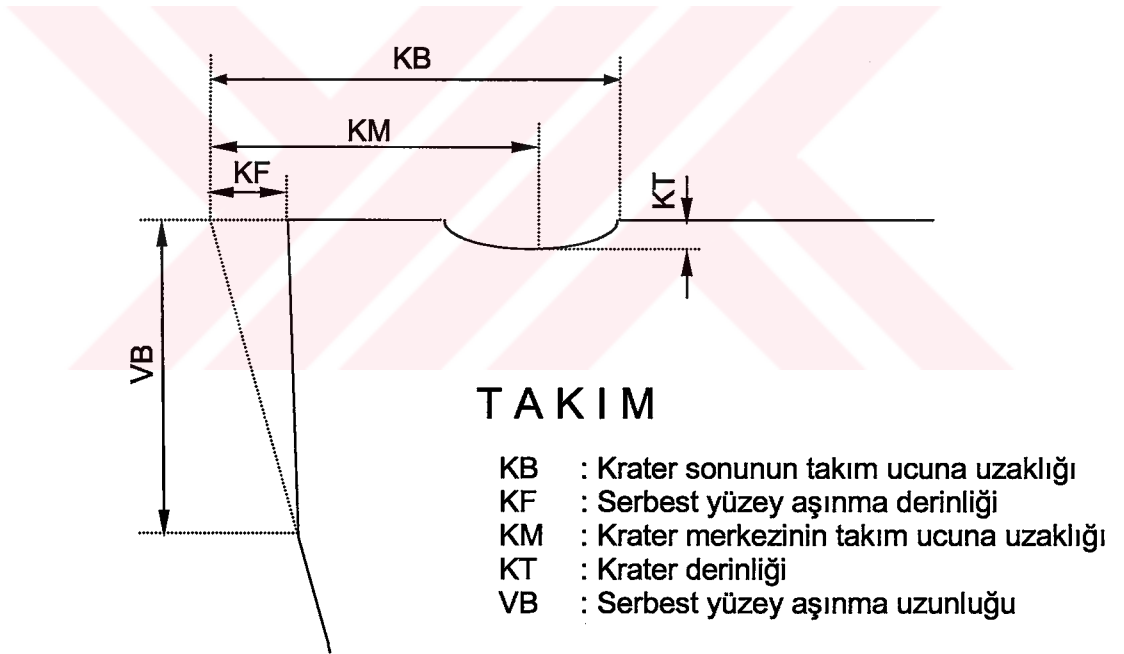
3.7 Sinterlenmiş Karbür Plaketlerde Meydana Gelen Aşınma

Tipik bir sinterlenmiş karbür plakette meydana gelen ölçülebilir aşınma bölgeleri Şekil 3.11'de verilmiştir. Kesme koşullarındaki (kesme hızı, ilerleme hızı, talaş derinliği, işlenen malzemenin cinsi vb.) ve plaket geometrisindeki (talaş açısı, serbest yüzey açısı, burun yarıçapı vb.) değişimler sonucunda 3 boyutlu talaş akışında farklılıklar meydana geleceğinden plaket aşınma şekli de önemli ölçüde değişecektir. Pek çok talaş kaldırma işleminde plaketin hasara uğramasında yada plaket ömrünün tamamlanmasında etkili olan faktör plaketin aşınmasından daha çok, uygun olmayan kesme şartlarının ve/veya plaket geometrisinin bir araya getirilmesidir.

Serbest yüzey aşınması ve krater aşınması en önemli aşınma tipleri olduğu ve hemen hemen tüm talaşlı imalat yöntemlerinde serbest yüzey aşınması meydana geldiği için, plaket aşınmasının izlenmesinde genellikle serbest yüzey aşınması ölçümü (VB) kullanılır. Talaş yüzeyi üzerinde ise; krater genişliğinin plaket ucuna olan maksimum mesafesi KB, talaş yüzeyi üzerinde serbest yüzey aşınma derinliği KF, maksimum krater derinliği KT ve krater merkezinin plaket ucuna olan mesafesi KM ölçülebilen diğer büyüklüklerdir. Plaketin talaş yüzeyi üzerinde ölçülen diğer büyüklükler Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Plakette meydana gelen ölçülebilir aşınma bölgeleri



Şekil 3.12 Plaketin talaş yüzeyi üzerinde ölçülebilen aşınma mesafeleri

4. PLAZMA NİTRÜRASYON DENEYLERİ

4.1 Plazma Nitrürleme Mekanizması

Plazma nitrürleme oldukça karmaşık bir prosestir. Nitrürleme sırasında iş parçası yüzeyine nitrojenin nüfuz etmesiyle birlikte, plazmada, iş parçası yüzeyinde ve yüzeyin altındaki tabakalarda bazı reaksiyonlar meydana gelir. Nitrürleme reaksiyonu sadece iş parçası yüzeyinde değil, aynı zamanda nitrojen atomlarının uzun mesafeli difüzyonu nedeniyle numune yüzeyinin altında da devam eder. Bu reaksiyonlar plazmadan numune yüzeyine kütle transferi, azotun difüzyonu, iş parçasının nitrojene doyması, alaşım nitrürlerinin çökeltisi, artık gerilmelerin oluşması, iş parçası yüzeyinde beyaz tabakanın oluşması ve büyümesi mekanizmalarıdır (Menthe, 1995). Bazı durumlarda, plazma nitrürleme parametrelerine bağlı olarak bu reaksiyonların bazıları meydana gelmeyebilir.

Plazma ile iş parçası arasındaki reaksiyon sonucunda, nitrojen içeren plazmadan iş parçasına nitrojenin kütle transferi oluşur. Kütle transfer reaksiyonu iş parçasının yüzey sınır şartlarını belirler. Plazmadaki reaksiyon, plazmanın nitrojen aktivasyonunu belirler ve iş parçasına nüfuz edecek gerekli nitrojen türlerini üretir. Bu türler N^+ , N_2^+ , NH^+ , N , N_2 , NH_j vb.dir.

Nitrürleme sırasında nitrojen atomlarının parça yüzeyinden çekirdeğe doğru difüzyonu ile parça yüzeyinde sertleşmiş bir tabaka meydana gelir. Nitrojen difüzyonu sırasında difüzyon bölgesinde, iş parçasındaki Ti, V ve Cr gibi alaşım elementleri nitrojen ile birleşerek sertleşmeyi sağlayan ince taneli çökelti alaşım nitrürleri meydana getirirler. Bu nedenle difüzyon bölgesindeki nitrojen atomları katı çözeltiler ve nitrürler olmak üzere iki farklı yapıdadırlar. Difüzyon bölgesindeki çoğu nitrojen atomlarının alaşım elementleriyle çökelti oluşturması sertlik artışının asıl nedenidir. Difüzyon tabakasındaki çökelti dağılımı ve büyüklüğü sertlik profilini belirler. Bu çökelti dağılım ve büyüklüğü nitrürleme sıcaklığı ve iş parçası bünyesindeki nitrür oluşturmaya etkenlere bağlıdır. Difüzyon tabakasının oluşması difüzyon kontrollü bir mekanizmadır. Yapılan çalışmalar, difüzyon tabakası derinliğinin, nitrürleme süresinin kareköküyle yaklaşık lineer olarak değiştiğini

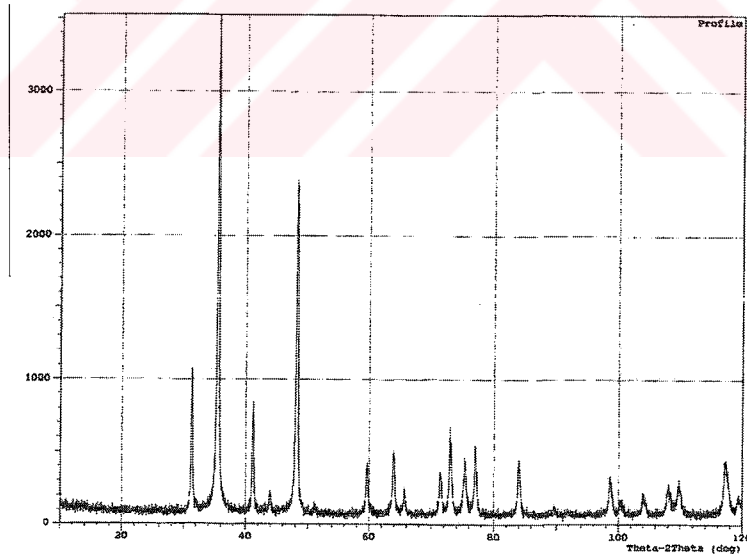
göstermiştir (Sun ve Bell, 1991). İşlem süre veya sıcaklığının artmasıyla azotun malzeme içindeki yayılımı kolaylaşacağından, oluşan difüzyon tabakasının kalınlığı da artmaktadır (Karaoğlu ve diğ., 2001).

İş parçasının yüzeyi nitrojene doyduktan sonra, iş parçası yüzeyinde kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Nitrürlenme çok aşamalı bir işlem olduğundan, iş parçası yüzeyindeki nitrojen konsantrasyonu zamanla birlikte artar ve belli bir zamandan sonra nitrojen çözünebilirlik limitine ulaşıldığında yüzey doyar ve beraberinde yüzeyde nitrürler oluşmaya başlar. Böylece bir sınır tabakası oluşmaya başlar. Bu sınır, beyaz tabaka/difüzyon tabakası arayüzeyidir. Böylece yüzeyde çok ince bir tabaka meydana gelirken, bu tabakanın altında nispeten daha kalın bir difüzyon bölgesi meydana gelir. Difüzyon bölgesindeki sertlik ve nitrojen konsantrasyonu iş parçasının çekirdeğine doğru azalır. Yüzeyde bu şekilde kimyasal reaksiyonlar oluşurken, difüzyon bölgesinde de kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Bu reaksiyonlar sonucunda difüzyon bölgesinde, ince taneli TiN ve VN gibi alaşım nitrürleri oluşur. Nitrürlenme sırasında, nitrürlerin çökmesi termodinamik bir prosesdir. Bu işlem sırasında, önce kuvvetli nitrür oluşturmaya elementler nitrojenle birleşir ve sonrasında diğer nitrür oluşturma kabiliyeti düşük olan elementler tüketilir.

Nitrürlenme sırasında, difüzyon bölgesi iş parçası içine doğru genişleme eğilimindedir ve iş parçası çekirdeği bunu sınırlar. Bunun sonucunda yüzeye yakın bölgelerde artık basma gerilmeleri oluşurken, iş parçası çekirdeğinde artık çekme gerilmeleri oluşur. Bu artık gerilmelerin seviyesi sadece nitrürlenme şartlarına bağlı olmayıp, aynı zamanda iş parçasının kompozisyonuna da bağlıdır. Difüzyon tabakasındaki artık basma gerilmelerinin nedeni iş parçasının nitrojene doyması ve nitrür çökeltileridir.

“Eşik nitrürlenme potansiyeli” olarak adlandırılan belli bir nitrojen miktarının altında beyaz tabaka meydana gelmez. Bu tür nitrürlenme “parlak nitrürlenme” olarak adlandırılır. Eşik nitrürlenme potansiyelinin zamana bağlı olması, beyaz tabaka oluşumu için belli bir kuluçka zamanının olduğu gerçeğini ortaya çıkarmaktadır. Bu kuluçka süresi, yüzeyde belli bir kritik nitrojen konsantrasyonunun oluşması için gereken süredir (Sun ve Bell, 1991). Bu süre nitrürlenme parametrelerine bağlı olarak değişmekle birlikte, büyük ölçüde gaz karışım oranındaki azot miktarına bağlıdır. Gaz karışım oranındaki azot miktarının artmasıyla birlikte bu süre azalır. İyon nitrürlenme atmosferindeki azot miktarının kontrol edilmesi suretiyle istenilen özellikte beyaz tabaka oluşturulabilir. Beyaz tabakanın oluşumu nitrürlenmenin ilk birkaç saatinde yaklaşık paraboliktir ve belli bir kalınlığa ulaştıktan sonra kalınlıkta önemli bir artış meydana gelmez.

İyon nitrürleme sonrasında plakette meydana gelen fazları tespit etmek amacıyla, 23 numaralı plaket (%25 N₂+%75 H₂ gaz karışım oranında 700°C'de 2 saat süreyle nitrürlenmiş plaket) Cu K α radyasyon kullanan X-Ray difraktometrede 10-110 2 θ açıları arasında taratılarak yapılar incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda, plakette kimyasal bileşimine bağlı olarak yüzeyde çeşitli fazların meydana geldiği görülmüştür (Şekil 4.1). İyon nitrürlenmiş sert metal plakette kimyasal bileşimi, Co matris içinde sinterlenmiş TiC, WC ve Ta(Nb)C'den meydana gelmektedir. İyon nitrürleme sonrasında sağlanan sertlik artışının temel nedeni, nitrürleme sırasında meydana gelen TiN'lerdir. Nitrürleme sırasında; vakum ortamında hidrojen iyonlarının bombardımanı ve nitrürleme sıcaklığı nedeniyle TiC'ler parçalanarak Ti ve C olarak ayrılmakta ve gaz karışımındaki azot boşta kalan Ti ile birleşerek TiN meydana getirmektedir. İyon nitrürleme sonrasında yüzey sertliğindeki artışın temel nedeninin bu olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, plazma ile iş parçası arasındaki reaksiyon sonucunda, nitrojen içeren plazmadan iş parçasına nitrojenin kütle transferi meydana gelmektedir. Co matrisin doyma sınırına kadar devam eden nitrojenin kütle transferi sonucunda da sertlik artışı meydana gelmektedir. İyon bombardımanı sırasında parçalanmayan TiC ile azotun reaksiyonu sonucunda meydana gelen TiCN'lerde sertlik artışında etkili olmaktadır.



Şekil 4.1 %25 N₂+%75 H₂ gaz karışım oranında 700°C'de 2 saat süreyle nitrürlenmiş plakette X-Ray difraksiyonu

Yüzey sertliğinin zamana ve sıcaklığa bağlı olması, meydana gelen nitrür çökeltilerinin boyut ve dağılımının etkisini işaret etmektedir. Kısa işlem sürelerinde ve düşük sıcaklıklarda azot difüzyonu ve çökelti yoğunluğu düşük olacağından, elde edilen sertleşme de sınırlı kalmaktadır. Aşırı uzun süre ve/veya yüksek sıcaklıklarda

işlem gören numunelerde, kaba çökeltiler yüzünden sertlikte düşme görülmektedir. Bu nedenle, maksimum yüzey sertliğinin sağlanabilmesi için optimum nitrüleme parametrelerinin tespit edilmesi gereklidir.

İyon nitrüleme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre, gaz karışım oranındaki nitrojenin artmasıyla birlikte yüzey sertliğinin arttığı, ancak gaz karışım oranındaki nitrojenin belli bir değerden sonra nitrojenin artması ile birlikte yüzey sertliğinin düştüğü gözlemlenmiştir. Bunun temel nedeni, gaz karışım oranındaki nitrojen miktarının değişmesine paralel olarak değişen hidrojen miktarıdır. Gaz karışım oranındaki nitrojen miktarının artması hidrojenin azalmasına neden olmaktadır. Gaz karışım oranındaki hidrojenin azalmasıyla birlikte, azot difüzyonu için gerekli olan yüzey aktifleşme kabiliyeti kötüleşmekte ve yüzeye doğru olan azot difüzyonu azalmaktadır. Ayrıca nitrojen miktarının artmasıyla birlikte, yüzeyde beyaz tabaka oluşmaya başlamakta, bu tabaka azot difüzyonu için bir bariyer görevi yaparak azot difüzyonu zorlaşmaktadır. Bu nedenle maksimum yüzey sertliği için gaz karışım oranındaki nitrojen oranının belli bir aralıkta tutulması gereklidir.

4.2 Deney Planı

Yapılan çalışma, seçilen plakelerin plazma nitrülenmesi ve plazma nitrülenen plakelerin talaş kaldırmada kullanılarak talaş kaldırma performanslarının belirlenmesi olmak üzere iki ana alandan meydana gelmektedir. Bu nedenle, yapılan çalışmaya ait deney planlaması bu iki alanı kapsamaktadır.

Plazma nitrüleme deneylerine başlamadan önce nitrülenecek plakeler belirlenmiştir. Plazma nitrülenecek plaket tipi olarak TPKN 2204 PD-R SBF tespit edilmiştir. Bu plaketin belirlenmesinde en etkili olan kriter; sinterlenmiş karbür plakeler arasında, nitrür oluşturu elementler açısından en zengin bileşime sahip olan plaketin bu tipteki plaket (ağırlık olarak %69,5 WC, %14,5 Ta(Nb)C %6,5 TiC ve %9,5 Co) olmasıdır. Plaket tipinin belirlenmesi ve plakelerin temin edilmesinden sonra plazma nitrüleme deneylerine başlanmıştır.

Plazma nitrüleme sonucunda oluşan yüzey tabakası özelliklerini etkileyen bir çok değişken söz konusudur. İşlem parametreleri adı verilen bu değişkenlerin yüzey tabakası özellikleri üzerindeki etkisinin incelenmesi ve elde edilen yüzey tabakasının malzemenin cinsine ve çalışma koşullarına bağlı olarak talaş kaldırma performansının araştırılması için nitrüleme süresi, nitrüleme sıcaklığı ve gaz karışım oranı sistematik olarak değiştirilerek deney şartları belirlenmiştir. Her bir

nitrürleme parametresinin alt ve üst sınırlarının belirlenmesinde literatür taraması ve pilot deneylerden elde edilen veriler ile bu konuda daha önceden çalışmış kişilerle yapılan görüşmeler etkili olmuştur. Nitrürleme parametrelerinin, plakelerin talaş kaldırma performansı üzerindeki etkisini inceleyebilmek için, nitrürleme parametreleri, deney tertibatının izin verdiği en dar aralıklarda sistematik olarak değiştirilmiştir. Herhangi bir nitrürleme parametresinin plaketin talaş kaldırma performansı üzerindeki bağımsız etkisini görebilmek için, diğer tüm parametreler sabit tutularak, plaketin talaş kaldırma performansı üzerindeki bağımsız etkisi araştırılan ilgili parametre sistematik olarak değiştirilmiştir. Bu kriterler dikkate alınarak 49 farklı deney şartı tespit edilmiştir.

Plazma nitrürleme sonrasında plakelerin yüzey sertlikleri değişmektedir. Asıl deneylere başlamadan önce yapılan pilot deneylerde, plazma nitrürleme sonrasında plakelerin yüzey sertliklerinin arttığı görülmüştür. Bu nedenle plazma nitrürleme sonrasında plakelerin yüzey sertliklerinde meydana gelen değişimin tespit edilebilmesi amacıyla, nitrürleme öncesinde ve sonrasında plakelerin yüzey sertliklerinin ölçülmesi planlanmıştır. Böylelikle plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak plakelerde elde edilen yüzey sertliği değişimlerinin izlenebilmesi amaçlanmıştır.

Plazma nitrürleme deneylerinin ve yüzey sertliği ölçümlerinin tamamlanmasıyla birlikte talaş kaldırma deneylerine başlanması planlanmıştır. Talaş kaldırma deneylerinin, belli kesit ölçüsünde SAE/AISI 1020 (DIN Ck 22) malzemenin yatay işleme merkezinde alın frezelemesi ile yapılması kararlaştırılmıştır. Bu tezgahın seçiminde talaş kaldırma deneylerinin yapıldığı fabrikanın mevcut imkan ve şartları etkili olduğu kadar, iş parçasını sökme-bağlama, plaketi sökme-bağlama ve ayar olanaklarının basit ve hızlı olması ve aynı anda birden fazla plaketin bağlanabilme imkanının olması gibi özellikleri de dikkate alınmıştır. İşlenecek malzeme (iş parçası) seçiminde; daha önceden tespit edilmiş plaketin tipi, malzemenin kolay temin edilebilirliği, talaş kaldırmanın sürekliliğini ve homojenliğini bozmayacak ılımlı bir malzeme olması ve talaş kaldırmanın gerçekleştirildiği fabrika şartları dikkate alınmıştır. Talaş kaldırma şartlarının belirlenmesinde, ilgili plakelerin temin edildiği firma kataloglarında tavsiye edilen değerler, talaş kaldırmanın yapıldığı tezgahın özellikleri ve seçilen plakeler için değişik kaynaklarda tavsiye edilen değerler esas alınmıştır. Kesme şartlarının belirlenmesinde, kesme süresi değişken olmak üzere diğer tüm kesme şartlarının sabit tutulması prensibi esas alınmıştır. Böylelikle; belli bir kesme süresi sonucunda plakelerde meydana gelen aşınmanın tespit edilmesi,

aynı kesme sürelerinde kullanılmış değişik plazma nitrüleme şartlarında nitrülenmiş plakette oluşun aşınmanın karşılaştırılması suretiyle plakette talaş kaldırma performanslarının belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Seçilen plakette üç kesme ağzına sahip olması nedeniyle her bir kesme ağzının farklı kesme sürelerinde kullanılabilmesi ve talaş kaldırma sonrasında hasara uğramamış bir ucun tekrar talaş kaldırmada kullanılabilmesi imkanını ortaya çıkmıştır. Nitrülenmiş plakette talaş kaldırma performansı ile nitrülenmemiş plakette talaş kaldırma performansının karşılaştırılabilmesi için nitrülenmemiş plakette de talaş kaldırma deneylerine tabii tutulması kararlaştırılmıştır.

Talaş kaldırma deneyleri sırasında, plakette meydana gelen aşınma nedeniyle plakette bir miktar ağırlık kaybı meydana gelecektir. Bu ağırlık kaybı sadece serbest yüzey aşınmasından kaynaklanan bir ağırlık kaybı olmamakla birlikte, bu kaybın oldukça büyük bir bölümünü serbest yüzey aşınması oluşturacaktır. Bu kabulden yola çıkarak, her bir talaş kaldırma deneyi öncesinde ve sonrasında plakette ağırlıkları ölçülmesi ve plaketteki ağırlık kaybının hesaplanması planlanmıştır. Böylece, talaş kaldırma sonrasında plakette oluşun aşınma miktarı konusunda hızlıca bir fikir sahibi olunabilmesi ve bu bilginin bundan sonra yapılacak talaş kaldırma deneylerinde kullanılabilmesi amaçlanmıştır.

Talaş kaldırma sırasında, kesme şartlarına bağılı olarak plakette değişik aşınma tipleri meydana gelecektir. Bu aşınma tipleri arasında takım ömrünü belirleyen yada takım ömrü için referans kabul edilen aşınma tipi serbest yüzey aşınması olduğundan, plaketteki etkin aşınma serbest yüzey aşınması olacak şekilde kesme şartları seçilmiştir. Seçilen kesme şartları incelendiğinde, plaket ömrünün belirlenmesinde etkili olan aşınma tipinin serbest yüzey aşınması olduğu görülecektir. Bu nedenle gerek plazma nitrülenmiş, gerekse nitrülenmemiş plakette talaş kaldırma performansının belirlenebilmesi için talaş kaldırma sonrasında plakette meydana gelen serbest yüzey aşınmasının ölçülmesi planlanmıştır.

Nitrüleme konusunda yapılan çalışmalarda sürtünme katsayısının nitrüleme şartlarına bağılı olarak değiştiğı belirtilmektedir. Bu nedenle; nitrüleme şartlarının plaketteki sürtünme katsayısını ne derecede ve nasıl değiştirdiğini görebilmek amacıyla, nitrüleme öncesinde ve sonrasında plakette sürtünme katsayılarının ölçülmesi planlanmıştır. Sürtünme katsayısı; yüzeyler arasındaki izafi hız, yüzey pürüzlülüğü, yağlama şartları, normal kuvvet, sıcaklık, malzeme çifti ve ortam şartları gibi birçok faktöre bağılı olarak değişmektedir. Yapılan bu çalışmada; tezin

amacı gereği, sürtünme katsayısını etkileyen tüm bu faktörlerin değişimine göre nitrürlenmiş plaketteki sürtünme katsayısının durumu incelenmemiş, sadece belli bir sürtünme şartı altında nitrürlenmiş ve nitrülenmemiş plaketteki sürtünme katsayıları arasındaki farklar incelenmiştir. Oda sıcaklığında, kuru sürtünme şartlarında, çelik-sinterlenmiş karbür malzeme çifti arasında, 45 N'luk normal kuvvet ve 600 d/d'lık dönme hızı altında tüm numunelerdeki sürtünme kuvvetinin belirlenmesi planlanmıştır.

Plazma nitrüleme alanında yapılan çalışmalarda; plazma nitrüleme sonrasında malzeme yüzeyinde farklı özelliklerde tabakaların oluştuğu, bu tabaka özelliklerinin nitrüleme şartlarına bağlı olarak değiştiği ve malzemenin tribolojik özelliklerini etkilediği belirtilmektedir. Bu nedenle; plazma nitrülenmiş plaketteki yüzeylerinde meydana gelen tabakaların incelenmesi de planlanmıştır. Bu amaçla; talaş kaldırma deneyleri sonrasında, plaketteki bir takım yüzey hazırlama işlemine (taşlama, zımparalama, parlatma, dağlama vb.) tabii tutulup yüzeyleri hazırlandıktan sonra, yüzeylerinde meydana gelen tabakaların incelenmesi kararlaştırılmıştır.

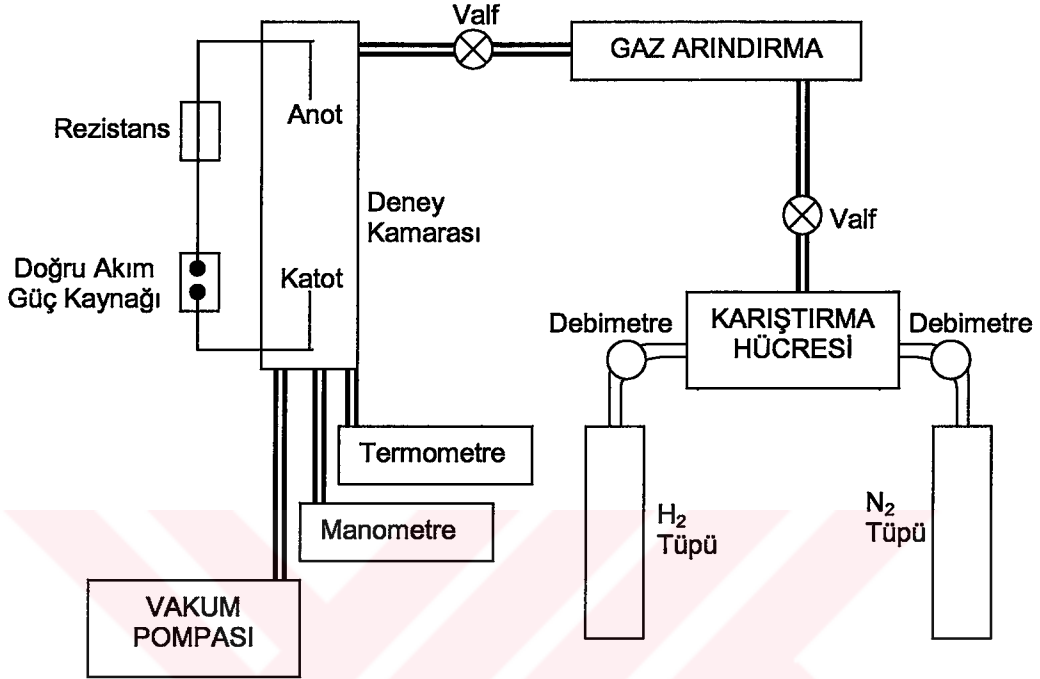
Deneyler ve ölçümler sonucunda elde edilen verilerin analizi ve yorumlanması amacıyla istatistiksel analiz yapılması kararlaştırılmıştır. Bu amaçla korelasyon ve ortalama değer analizi analizinin kullanılması planlanmıştır. Böylelikle plazma nitrüleme parametrelerinin, değişen malzeme özellikleri (yüzey sertliği, sürtünme katsayısı, tabaka kalınlıkları vb.) üzerindeki etkisi ve değişkenler arasındaki ilişkinin araştırılması amaçlanmıştır.

4.3 Plazma Nitrüleme Deneyleri

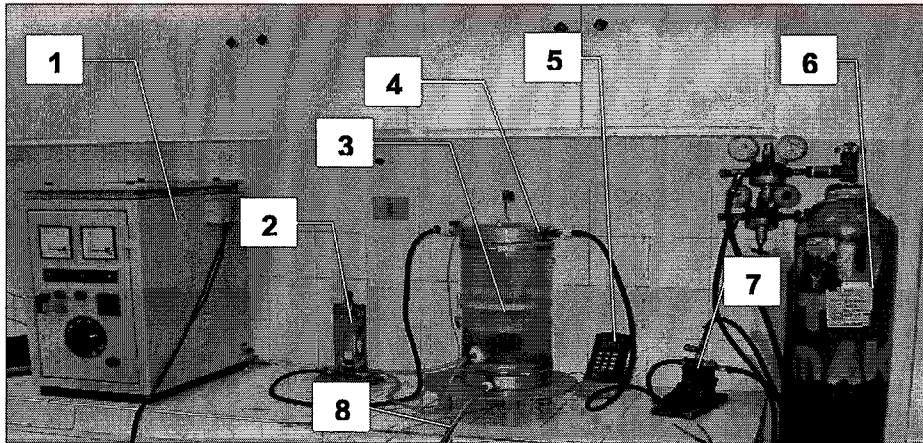
4.3.1 Plazma Nitrüleme Deney Tertibatı

Şekil 4.2'de plazma nitrüleme yönteminde kullanılan yüzey sertleştirme sistemin şematik resmi verilmiştir. Şekil 4.2'den de görülebileceği gibi nitrüleme tesisatı; nitrüleme kamarası, gaz karışım ve dağıtım sistemi, elektrik güç kaynağı ve vakum pompası olmak üzere dört ana donanımın birleşmesinden meydana gelmektedir. Bu ana donanımların yanı sıra; nitrülen parçaların yüzey sıcaklığının eş zamanlı olarak ölçülmesini sağlayan termometre, deney kamarasındaki basıncın eş zamanlı olarak ölçülmesini sağlayan manometre ve deney kamarası cidarlarını soğutan soğutma tesisatı gibi yardımcı cihaz ve sistemlere de ihtiyaç vardır. Şekil 4.3'te plazma nitrüleme deneylerinin yapıldığı plazma nitrüleme tesisatının fotoğrafı

verilmiştir. Şekil 4.3'ten de görülebileceği gibi bu deney tertibatı 8 temel elemanın birleşmesinden meydana gelmiştir. Bu elemanlar; doğru akım güç ünitesi, deney kamarası, vakum pompası, gaz tüpleri, gaz karışım ünitesi, soğutma ünitesi, manometre ve termometredir.



Şekil 4.2 Plazma nitrürleme deney tesisatının ana bileşenleri



- | | |
|----------------------|------------------------|
| 1- Güç kaynağı | 5- Termometre |
| 2- Manometre | 6- Gaz tüpleri |
| 3- Deney kamarası | 7- Gaz karışım ünitesi |
| 4- Soğutma tertibatı | 8- Vakum pompası |

Şekil 4.3 Plazma nitrürleme deney tesisatı

Güç kaynağının kapasitesi, nitrürlenecek parça büyüklüğüne, diğer bir ifadeyle nitrürlenecek parçanın yüzey alanına bağlıdır. Genellikle iyon nitrürleme için kullanılan 400-800 V arasında doğru akım alınabilen transformatörlerde akım yoğunluğu 1 mA/cm^2 seviyesindedir. Şekil 4.3'te deneylerinin yapıldığı iyon nitrürleme deney tesisatında kullanılan, iyon nitrürleme için gerekli olan enerjiyi sağlayan 2 kW'lık doğru akım güç kaynağı gösterilmiştir.

Gaz karışım ve dağıtım sistemi gaz tüpleri, gazların deney kamarasına sevk edilebilmesini sağlayan hortumlar ve gazları istenilen oranda karıştırmayı sağlayan vanalardan meydana gelmektedir. Gaz tüplerinden çıkan gazlar önce gaz karışım ünitesine gelmekte, burada istenilen oranda karıştırıldıktan sonra bir hortum vasıtasıyla nitrürleme kamarasına sevk edilmektedir. İstenilen gaz karışım oranı, gaz karışım ünitesinde mevcut olan gaz debi ayar vanalarıyla sağlanmaktadır. Gaz karışım ünitesi üzerinde mevcut olan vanaları çevirmek suretiyle yapılan gaz karışım ayarlamasından sonra, vakum pompası çıkışındaki gazların debisi ölçülmek suretiyle yapılan ayarlamaların doğruluğu kontrol edilmiştir. Bu amaçla, vakum pompası çıkışındaki gazların su içindeki çözünürlüğü, suya daldırılan üzerinde ölçekler bulunan cam boru ile ölçülmüştür. Önce gazlardan herhangi biri kapatılarak, diğer gazın belli bir sürede su içindeki çözünürlüğü ölçülmüştür. Daha sonra, her iki gazda birlikte açılarak aynı süre içinde istenilen gaz karışım oranında su içinde çözünüp çözünmedikleri kontrol edilmiştir. Çözünme oranları istenilen gaz karışım oranlarıyla aynı olduğunda gaz karışım oranı ayarlama işlemi tamamlanmıştır. Şekil 4.3'te deneylerinin yapıldığı iyon nitrürleme deney tesisatında kullanılan gaz tüpleri ve gaz karışım ünitesi gösterilmiştir.

Deney kamarası nitrürlenecek numuneleri içinde bulunduran, anot ve katotu üzerinde taşıyan ve kapalı deney atmosferini oluşturan iyon nitrürleme deney tertibatının ana elemanlarından biridir. Deneylerin yapıldığı kamara içi içe iki cam borudan meydana gelmekte olup, bu cam boruların altı ve üstü çelik silindirik plakalarla kapatılmıştır. İki cam boru arasında açık çevrimli olarak dolaşan su, cam cidarların soğumasını sağlamaktadır. Deney kamarasında; nitrürlenecek parçaların konulduğu katot, arkin oluşmasını sağlayan anot, soğuk su girişi, sıcak su çıkışı, manometreye ait hortum çıkışı, vakum pompası çıkışı, nitrürleme atmosferini oluşturacak gazların girişi ve termometreye ait termo-eleman çifti girişi için gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Şekil 4.3'te deneylerinin yapıldığı iyon nitrürleme deney tesisatında kullanılan deney kamarası gösterilmiştir.

Nitrürleme atmosferini oksijenin bozucu etkisinden korumak ve ark oluşumunu sağlamak için deney kamarasının vakuma alınması gereklidir. Bu amaçla genellikle 1-10 torr basınç aralığında çalışabilen vakum pompası kullanılır. Şekil 4.3'te deneylerinin yapıldığı plazma nitrürleme deney tesisatında kullanılan vakum pompası gösterilmiştir.

Nitrürleme işlemi sırasında yüzey sıcaklığının eş zamanlı ve sürekli olarak ölçülmesi gereklidir. Çünkü değişik nedenlerden dolayı nitrürlenene parçanın yüzey sıcaklığı değişebildiğinden, sıcaklığın eş zamanlı olarak kontrol edilmesi gereklidir. Böyle bir durumda, değişen sıcaklık miktarına bağlı olarak, güç kaynağının potansiyeli ayarlanmak suretiyle, nitrürlenene numunenin yüzey sıcaklığı istenilen değere getirilebilir. Şekil 4.3'te deneylerinin yapıldığı iyon nitrürleme deney tesisatında kullanılan Ni-Cr-Ni termo-eleman çiftli termometre gösterilmiştir.

Deney kamarası içindeki basıncın eş zamanlı olarak ölçülebilmesi için manometreye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla iyon nitrürleme deney tesisatında U tipi civalı manometre kullanılmıştır. Şekil 4.3'te deneylerinin yapıldığı iyon nitrürleme deney tesisatında kullanılan U tipi civalı manometre gösterilmiştir.

4.3.2 Plazma Nitrürleme Deney Şartları

İyon nitrürleme deney şartlarının belirlenmesi için, nitrürleme sonrasında elde edilen yüzey özellikleri üzerinde etkili olan nitrürleme süresi, nitrürleme sıcaklığı ve gaz karışım oranı sistematik olarak değiştirilmiştir. Her bir nitrürleme parametresinin alt ve üst sınırlarının belirlenmesinde literatür taraması, pilot deneylerden elde edilen veriler ve bu konuda çalışmış kişilerle yapılan görüşmeler etkili olmuştur.

Nitrürleme parametrelerinin plaket performansı üzerindeki etkisini inceleyebilmek için nitrürleme parametreleri, deney tertibatının izin verdiği en dar aralıklarda sistematik olarak değiştirilmiştir. Herhangi bir nitrürleme parametresinin plaket performansı üzerindeki bağımsız etkisini görebilmek için; diğer tüm parametreler sabit tutularak, plaket performansı üzerindeki bağımsız etkisi araştırılan ilgili parametre sistematik olarak değiştirilmiştir. Bu kriterler dikkate alınarak tespit edilen iyon nitrürleme parametreleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Deneylerin başlangıcında; iyon nitrürleme tesisatında deneylerin yapılabilmesi için küçük modifikasyonlar yapılmış (anot ve katot arasındaki mesafenin değiştirilmesi, numunelerin yerleştirildiği plakanın değiştirilmesi ve sıcaklık ölçüm elemanının modifikasyonu) ve oksitlenmiş anot ile katotun temizlenmesi sağlanmıştır. Asıl

numuneler nitrülenmeden önce, bir adet numune ön nitrülemeye tabii tutulmuş ve numunenin yüzey sertliğinin arttığı gözlemlenmiştir.

Tablo 4.1. Plazma nitrüleme parametreleri

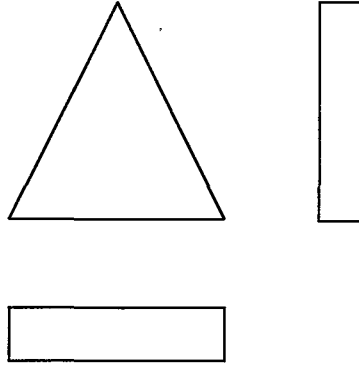
Numune No	DENEY ŞARTLARI			Numune No	DENEY ŞARTLARI		
	SICAKLIK (°C)	SÜRE (saat)	GAZ KARIŞIM ORANI		SICAKLIK (°C)	SÜRE (saat)	GAZ KARIŞIM ORANI
1	500	1	%75 H ₂ + %25 N ₂	27	500	1	%50 H ₂ + %50 N ₂
2	500	2		28	500	2	
3	500	4		29	500	4	
4	500	6		30	500	6	
5	500	8		31	500	8	
6	550	1		32	550	1	
7	550	2		33	550	2	
8	550	4		34	550	4	
9	550	6		35	550	6	
10	550	8		36	550	8	
11	600	0,5		37	600	1	
12	600	1		38	600	2	
13	600	2		39	600	4	
14	600	4		40	600	8	
15	600	6		41	650	0,83	
16	600	8		42	650	2	
17	650	1		43	650	3	
18	650	2		44	650	4	
19	650	3		45	650	7	
20	650	4		46	700	1	
21	650	8		47	700	2	
22	700	1		48	700	4	
23	700	2		49	700	8	
24	700	3		-	-	-	
25	700	4		-	-	-	
26	700	8		-	-	-	

4.3.3 Plazma Nitrürlenecek Plaketin Seçimi

Talaş kaldırmada kullanılan pek çok farklı tip (farklı geometri ve geometriye bağlı özellikler) ve özellikle (farklı kimyasal bileşimler, kaplamalı, kaplamasız) sinterlenmiş karbür plaket mevcuttur. Bu çalışmada kaplamasız plaketlerde iyon nitrürleme ile sağlanan performans değişimi incelendiği için, nitrürlenecek plaket olarak kaplamasız plaket seçilmiştir. Kaplamasız plaketler arasında seçim yapılırken, bünyesinde nitrür oluşturma kabiliyeti bulunan elementler içeren plaketlerin seçimi esas alınmıştır. Plaketlerin temin edildiği fabrika yetkilileri ile yapılan görüşmeler sonucunda nitrürlenecek plaket olarak TPKN 2204 PD-R SBF seçilmiştir. Bu tipteki plaketin seçiminde en etkili kriter, plaket bünyesinde bulunan nitrür oluşturu elementler açısından en zengin olan plaketin, bu tipteki plaket olmasıdır. Bunun yanı sıra; takımların talaş kaldırma sırasında takılacağı mevcut freze kafasının tipi (R 265.2-125 M 7 plaketli Sandvik freze kafası) ile ilgili firmanın imkan ve şartları da plaket tipinin seçiminde etkili olmuştur. Talaş kaldırma deneylerinin yapılacağı fabrikada mevcut olan freze kafa tipi, plaketin kimyasal bileşiminden daha ziyade geometrisinin belirlenmesinde etkili olmuştur. Seçilen plakete ait teknik Tablo 4.2’de, teknik resim ise Şekil 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.2. Plakete ait geometrik ve kimyasal özellikler

ÖZELLİK	TİP
Standart ifade şekli	TPKN 2204 PD-R SBF
Geometri	Üçgen
Serbest açı	11°
Uç tipi	Talaş kırıcsız ve deliksiz
Kesici kenar boyu	22,000 mm
Yüzey sertliği	1500 HV
Kalınlık	4,76 mm
Kesme yönü	Sağ
Plaketle işlenebilecek malzemeler	Çelik, Paslanmaz Çelik, Dökme Demir
kullanıldığı talaş kaldırma yöntemleri	Tornalama, Frezeleme
Alaşsız çelik için maksimum kesme hızı	330 m/dak (Kuru Kesme İçin)
Alaşsız çelik için maksimum ilerleme	0,4 mm/dev (Kuru Kesme İçin)
Kimyasal bileşim	WC, Ta(Nb)C, Co, TiC



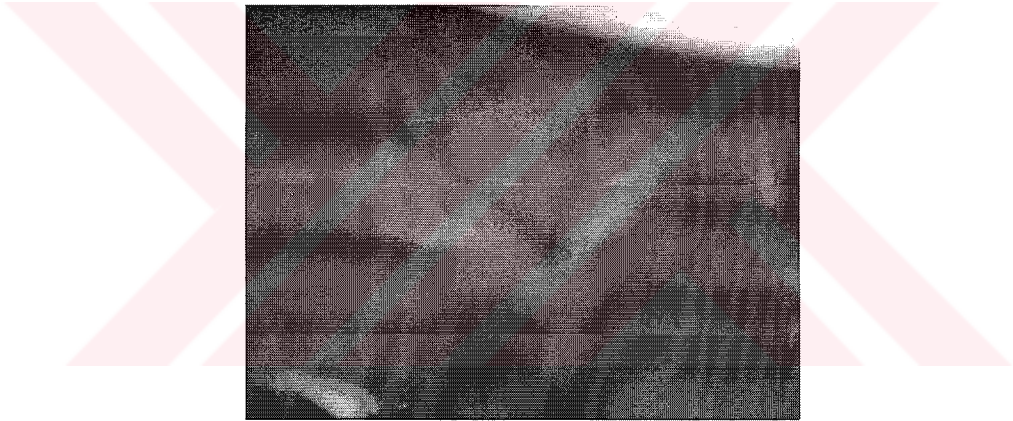
Şekil 4.4 TPKN 2204 PD-R SBF plaket

4.3.4 Plazma Nitrüleme Deneylerinin Yapılması

İyon nitrüleme için ihtiyaç duyulan plazma paslanmaz çelik anot ve katot diskler arasında gerçekleştirilen boşalımla sağlanmıştır. Deney kamarasının basıncı U tipi civalı manometre ile, nitrülenen plakelerin sıcaklığı ise Ni-Cr-Ni termo-eleman çiftiyle eş zamanlı ve sürekli olarak ölçülmüştür.

Nitrülenecek plakelerin yüzeyi yağ ve kirlerden alkol ile temizlendikten sonra deney kamarasına yerleştirilmiştir. Plaketlerin yerleştirildiği disk katot (negatif kutup), plakelerin üst tarafında yer alan disk ise anot (pozitif kutup) olarak doğru akım kaynağına bağlanmıştır. Dolayısıyla nitrülenen plakeler deney kamarasında katot olarak yer almıştır. Bu işlem tamamlandıktan sonra deney kamarası kapatılmış ve deney kamarası vakum pompasıyla 10 torr'luk vakuma alınmıştır. Bu durumda yeterli doğru akımın (DC) uygulanması ile plazmanın oluşumu sağlanmış ve 400-600 V mertebelerinde sadece H₂ gazı verilerek parçaların yüzeyleri atom mertebesinde temizlenmiştir (sputtering). Bu işleme yaklaşık 1 saat süreyle devam edilmiştir. Başlangıçta 1000 V değerine kadar yükselen gerilim farkı, artan gaz miktarı ile azalarak 600-700 V civarında istenilen basınç ve sıcaklık sağlandığında sabit duruma gelmiştir. Bu sırada, iyonlaşmış gazın akkor ışını, katotik pozisyonda olan iş parçasını tamamen sarmış ve parıltılı boşalım adı verilen ayrıışmış gaza ait iyonların parça yüzeyine bombardımanı başlamıştır. Bu iyon bombardımanı ile iş parçasında mükemmel bir yüzey temizliği sağlanmıştır. Nitrüleme için gerekli azot difüzyonu ise, difüzyon için gerekli sıcaklığa ulaşıldığında başlatılmıştır. İstenilen nitrüleme sıcaklığına ulaşıldığında azot gazının vanasının açılması suretiyle istenilen gaz karışım oranının akış hızı 250 cm³/dak mertebesinde olacak şekilde deney kamarasına sevk edilmesi sağlanmıştır. Böylece plakelerin iyon

nitr rlenmesine başlanmıştır. Plazma nitr rlmeye başlanmasıyla birlikte; elektronlarla iyonlaşan gaz moleküllerinin nitr rlen n plakete hızla çarpması sonucunda oluşan mor renkli bir ışınım ortaya çıkmıştır (şekil 4.5). Bu duruma glow-discharge adı verilir. Nitr rlen n plakelere çarpan iyonların kinetik enerjilerini plaket yüzeylerine aktarması sonucunda yüzey sıcaklığı belli bir değere kadar yükselir. Bu sıcaklık nitr rl me için yeterlidir. Nitr rl me sırasında termometreden okunan sıcaklık sürekli olarak kontrol edilmiş, sıcaklığın değişmesi durumunda güç kaynağının potansiyel ayarlaması ile sıcaklığın sabit tutulması sağlanmıştır. Nitr rl me için gerekli olan süre tamamlandıktan sonra, doğru akım güç kaynağı kapatılarak gaz akışı kesilmiş ve plak tlerin kamara içinde oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiştir. Bu süre nitr rl me sıcaklığına bağlı olarak değişmekle birlikte 1 ila 1,5 saat arasında değişmiştir. Nitr rl me işleminin başlangıcından plak tlerin deney kamarasından alınmasına kadar, deney kamarası cidarları sirkülasyonu açık çevrimli olarak sağlanan su ile soğutulmuştur.



şekil 4.5 Plak tlerin iyon nitrürlenmesi sırasında oluşan mor renkli ışınım (glow-discharge).

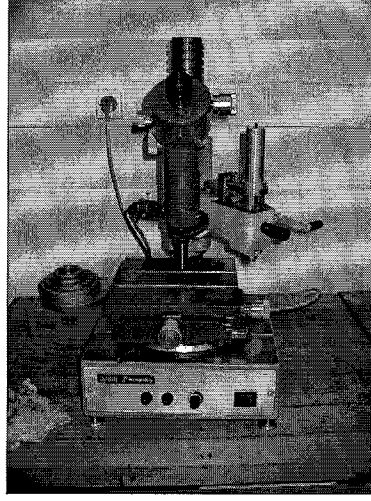
İyon nitr rl me konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde; hidrojenin, nitr rl me sonrasında elde edilen özellikler üzerinde olumlu katkılar sağladığı görülmektedir. İyon nitrürlenmiş malzeme özellikleri üzerindeki bu olumlu katkı; hidrojen atomlarının g    deoksidasyon kabiliyeti ve g    bir hidrojen-nitrojen moleküler iyon akışının sağlanmasıyla ortaya çıkmaktadır (Michel ve diğ., 1995). Diğer bir ifadeyle, hidrojen; azot difüzyonu için gerekli olan yüzey temizliğine yaparak yüzeyin aktifleşmesini ve azot difüzyon kabiliyetinin iyileşmesini sağlamaktadır. Ayrıca; gaz karışım oranının tamamen azottan meydana gelmiş olması beyaz tabaka gibi istenilmeyen özelliklerin oluşmasına katkı sağladığı için gaz karışım oranındaki hidrojen seyreltme amacıyla da kullanılmaktadır ( elik ve diğ., 2000). Bu nedenle; iyon nitr rl me gaz

atmosferinin, hidrojen ve azot karışımından oluşması sağlanmıştır. Gaz karışım oranlarının belirlenmesinde; bu alanda yapılmış çalışmalar etkili olduğu kadar, pilot deneyler sonrasında elde edilen sertlik değişim profilleri de etkili olmuştur. Pilot nitrürleme deneyleri sonrasında; gaz karışım oranındaki azotun önemli ölçüde artırılması durumunda (%90 N₂+%10 H₂ gaz karışım oranında 550°C sıcaklığında 1 saat süreyle nitrürleme sonrasında yüzey sertliği 1590 HV₁, aynı şartlarda 2 saat süreyle nitrürleme sonrasında yüzey sertliği 1628 HV₁ olmaktadır) yüzey sertliğinde önemli bir artış sağlanmadığı görülmüştür. Bu sonuç gaz karışım oranındaki azotun artmasından daha çok, gaz karışım oranındaki azotun artmasına bağlı olarak miktarı azalan hidrojenden kaynaklanmaktadır. Hidrojenin miktarının azalmasıyla birlikte; azot difüzyonu için gerekli olan yüzey temizliğine kötüleşme oluşmakta, buna bağlı olarak da yüzeyin aktifleşme ve azot difüzyon kabiliyetinde kötüleşme meydana gelmektedir. Bu nedenle nitrürleme deneyleri %25 N₂+%75 H₂ ve %50 N₂+%50 H₂ gaz karışım oranlarında gerçekleştirilmiştir.

4.4 Yüzey Sertliğinin Ölçülmesi

Plazma nitrürleme başlangıcında belli bir değerde olan plakelerin yüzey sertliği, nitrürleme şartlarına bağlı olarak değişmektedir. Bu değişim miktarını tespit edilebilmesi amacıyla, plazma nitrürleme sonrasında her bir plaketin yüzey sertliği ölçülmüştür.

Yüzey sertliği ölçümleri için Zwick Materialprüfung D-7900 Type 3212001/00 Vickers mikrosertlik cihazı (Şekil 4.6) kullanılmış ve her bir plaket için 4 farklı noktadan yüzey sertliği ölçülmüştür. Yüzey sertliği plakelerin üst yüzeyinde, yüzey merkezinde ve köşe noktalarından yaklaşık 5 mm içeride olmak üzere 4 farklı noktada ölçülmüştür. Sertlik ölçümü sonucunda elde edilen sertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır. Sertlik ölçümü sırasında ölçülen değerlerin birbirinden oldukça farklı çıkması durumunda, 4'ten daha fazla noktadan sertlik ölçümü yapılmış ve ölçülen uç değer yada değerler dikkate alınmamıştır. Sertlik ölçümleri için 1000 gr.lık yük kullanılmıştır. İz oluşturma yükünün küçük seçilmesi numune yüzeyinde oluşan izin görülmeyecek kadar küçük olmasına neden olurken, yükün çok büyük seçilmesi çok ince olan sert tabakadan daha derin bölgelerdeki sertliğin ölçülmesine neden olmaktadır. Bu nedenle bu konuda yapılan çalışmalar ve laboratuvar çalışanlarının tecrübeleri dikkate alınarak iz oluşturma yükü olarak 1000 gr. seçilmiştir. Farklı nitrürleme şartları altında plazma nitrürlenmiş plakelerde ölçülen yüzey sertliği değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.6 Zwick Materialprüfung D-7900 mikrosertlik ölçüm cihazı

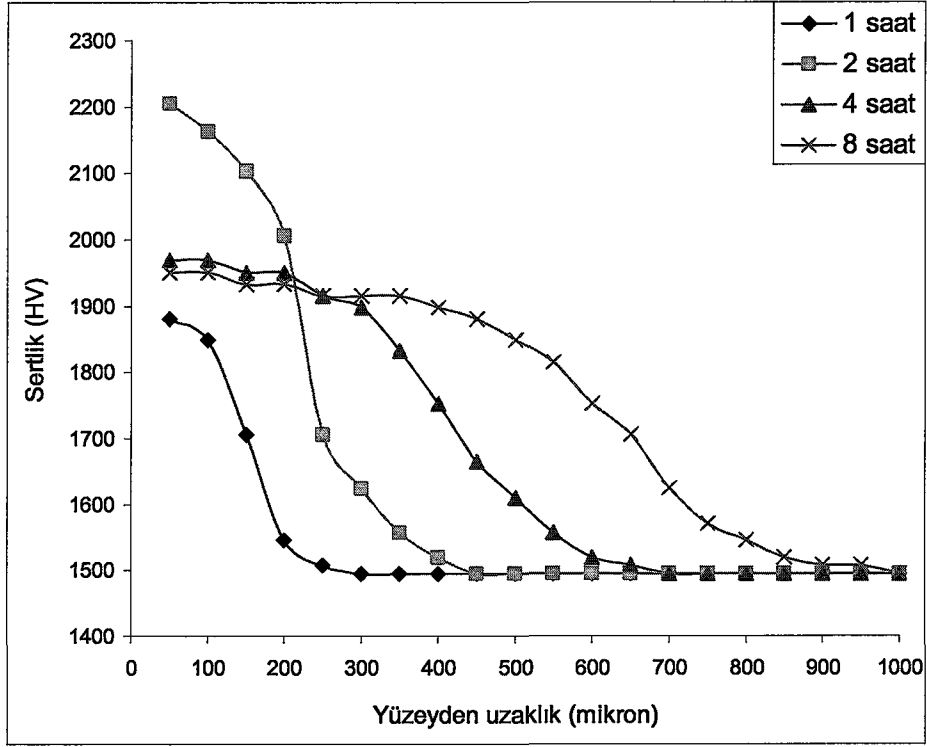
Tablo 4.3 Plazma nitrülenmiş plaketlenin yüzey sertlik değeri

GAZ KARIŞIM ORANI	SICAKLIK (°C)	SÜRE (SAAT)	SERTLİK (HV ₁)	SERTLİK DEĞİŞİMİ (%)
%75 H ₂ + %25 N ₂	500	1	1616	7,7
		2	1677	11,8
		4	1783	18,9
		6	1683	12,2
		8	1658	10,5
	550	1	1640	9,3
		2	1702	13,5
		4	1832	22,1
		6	1729	15,3
		8	1677	11,8
	600	0,5	1690	12,7
		1	1716	14,4
		2	1769	17,9
		4	1847	23,1
		6	1769	17,9
		8	1729	15,3
	650	1	1729	15,3
		2	1945	29,7
		3	2122	41,5
		4	1899	26,6
		8	1804	20,3
	700	1	1891	26,1
		2	2224	48,3
		3	2077	38,5
		4	1961	30,7
		8	1945	29,7

Tablo 4.3 Plazma nitr rl nmiş plaketlerin yüzey sertlik değerleri (Devamı)

GAZ KARIşIM ORANI	SICAKLIK (�C)	SÜRE (SAAT)	SERTLİK (HV ₁)	SERTLİK DEğİşİMİ (%)
%50 H ₂ + %50 N ₂	500	1	1598	6,5
		2	1658	10,5
		4	1735	15,7
		6	1658	10,5
		8	1640	9,3
	550	1	1628	8,5
		2	1683	12,2
		4	1755	17,0
		6	1677	11,8
		8	1652	10,1
	600	1	1652	10,1
		2	1716	14,4
		4	1783	18,9
		8	1677	11,8
	650	0,83	1665	11,0
		2	1783	18,9
		3	1961	30,7
		4	1804	20,3
		7	1776	18,4
	700	1	1832	22,1
		2	2052	36,8
		4	1906	27,1
		8	1891	26,1

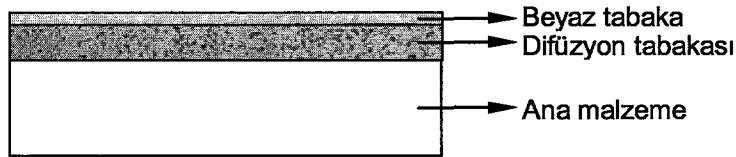
Tablo 4.3 incelendiğinde; en yüksek yüzey sertliğinin, %75 H₂+%25 N₂ gaz karışım oranında 700 C'de 2 saat süreyle yapılan nitrürleme sonrasında elde edildiği görülmektedir. Bu nitrürleme grubundaki (%75 H₂+%25 N₂ gaz karışım oranı ve 700 C sıcaklık) plaketlere ait sertlik profili değişimi de incelenmiştir. Bu amaçla talaş kaldırma deneyleri sonrasında sertlik profilleri elde edilecek plaketlerin yan yüzeyleri taşlanarak soyulmuş ve 50 mikron aralıklarla 500 gr.lık yük altında mikro sertlikler ölçülmüştür. şekil 4.7'de %75 H₂+%25 N₂ gaz karışım oranında 700 C'de 1,2,4 ve 8 saat süreyle yapılan nitrürleme sonrasında plaketlerde elde edilen sertlik profili değişimi verilmiştir.



Şekil 4.7 %75 H₂+%25 N₂ gaz karışım oranında 700°C'de 1,2,4 ve 8 saat süreyle yapılan plazma nitrürleme sonrasında elde edilen sertlik profili değişimi

4.5 Beyaz Tabaka ve Difüzyon Tabakası Kalınlıklarının Ölçülmesi

Nitrürleme alanında yapılan çalışmalarda plazma nitrürleme sonrasında malzeme yüzeyinde farklı özelliklerde tabakaların oluştuğu ve bu tabaka özelliklerinin nitrürleme şartlarına bağlı olarak değiştiği belirtilmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 İyon nitrürleme sonrasında malzeme yüzeyinde oluşan tabakalar

Metin ve İnal (1987) iyon nitrürleme sırasında meydana gelen demir nitrürlerin (Fe₂N, Fe₂₋₃N ve Fe₄N) oluşumu, büyüme kinetiğini ve bunların iyon nitrürlemeye etkilerini incelemiştir. Bu amaçla %99,85 saflık değerindeki demir malzemeyi, 500-600°C sıcaklıklarında saf nitrojen ve %20 nitrojen+ %80 hidrojen gaz karışımı altında iyon nitrürlemiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda saf nitrojen plazma altında elde edilen bileşim tabakası kalınlığının diğer gaz karışım oranında elde edilen tabakadan biraz daha büyük olduğunu, bileşim tabakası kalınlığının gaz

nitrürlemede olduğu gibi zamana göre parabolik olarak artmadığını, nitrojen+hidrojen gaz karışım oranında saf nitrojene göre daha fazla difüzyon derinliği elde edilebildiğini, difüzyon derinliğinin zamana göre parabolik olarak arttığını, difüzyon tabakasının oluşumu için gereken aktivasyon enerjisinin nitrojenin α demiri içine nüfuz etmesi için gereken aktivasyon enerjisinden düşük olduğunu ve bunun temel nedeninin parabolik olmayan nitrür tabakası büyümesi olduğu belirtmişlerdir.

Karamış (1991) AISI H13 sıcak iş takım çeliğini değişik nitrürleme sıcaklıklarında (530°C ve 550°C) farklı sürelerde (4 ve 10 saat) plazma nitrürlemiş ve nitrürlenmiş numunelerin aşınma davranışı ile mikroyapısal özelliklerini incelemiştir. Yaptığı çalışma sonucunda; nitrürleme sonucunda oluşan tabaka özelliklerinin gaz karışım oranı, nitrürleme sıcaklığı ve nitrürleme süresine bağlı olduğunu, nitrürleme süresinin artmasıyla birlikte bileşim tabakası kalınlığının arttığını, bileşim tabakası oluşumunda en etkili parametrenin nitrojen miktarı olduğunu, nitrojen miktarının azalmasıyla birlikte belli nitrojen miktarında bileşim tabakasının oluşmadığını ve sadece difüzyon bölgesinin oluştuğunu belirtmiştir.

Çelik ve Karadeniz (1996) AISI 4140 çeliğini %50 N₂+%50 H₂ gaz karışım oranında değişik sıcaklıklar (500-550-600°C) altında plazma nitrürlemişler ve elde ettikleri bileşim tabakasının özelliklerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; en kalın bileşim tabakasının 550°C'de elde edilebildiğini, yüksek nitrürleme sıcaklıklarının bileşim tabakası kalınlığını azalttığını, yüksek sıcaklık ve uzun işlem sürelerinde çok ince bir beyaz tabaka elde edilebildiğini, ancak yüksek sıcaklık ve uzun işlem sürelerinin yüzey sertliğinin düşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir.

Çelik ve arkadaşları (2000) AISI 8620 çeliğini farklı gaz karışım oranları altında sertleştirerek difüzyon ve beyaz tabaka kalınlıklarındaki değişimleri incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; gaz karışım oranındaki hidrojen miktarının artmasıyla birlikte yüzey sertliği ile difüzyon derinliğinin arttığını ve beyaz tabaka kalınlığının azaldığını, argon gazının yüzey sertliği üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu, difüzyon tabakası kalınlığının nitrürleme süresinin artmasıyla birlikte arttığını belirtmişlerdir.

Jeong ve Kim (2001) değişik plazma nitrürleme şartları (gaz karışım oranı, gaz basıncı, nitrürleme sıcaklığı) altında meydana gelen nitrür tabakanın oluşum mekanizmasını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; bileşim ve difüzyon tabakası kalınlığının gaz basıncındaki artışla birlikte arttığını, özellikle bileşim tabakası kalınlığının gaz basıncından önemli ölçüde etkilendiğini, ancak 0,6 torr'dan

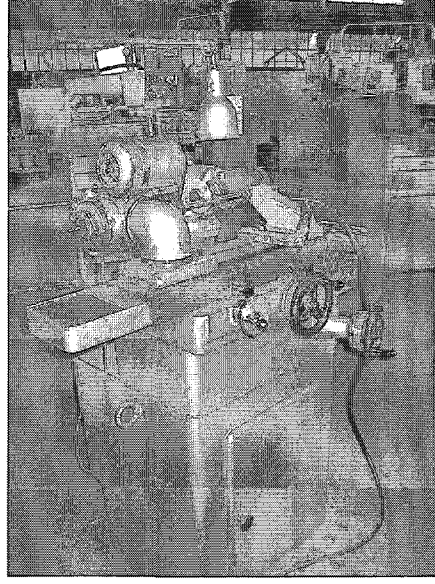
daha düşük basınçlarda bileşim tabakasının oluşmadığını ve sıcaklıkla birlikte mikrogözenekliliğin arttığını belirtmişlerdir.

Çelik ve diğ., (2001) AISI 8620 çeliğinin değişik nitrürleme parametreleri (süre 1-8 saat, sıcaklık 450-600°C ve gaz karışım oranı %70 H₂+%30 N₂) altında plazma nitrürlemişler ve nitrürleme sonrasında elde edilen özellikleri incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; en büyük difüzyon tabakasının 600°C'de 8 saat süreyle yapılan nitrürleme sonrasında elde edilebildiğini, kısa işlem süreleri ve düşük sıcaklıklarda bileşim tabakasının oldukça ince olduğunu, sıcaklık ve zamanın artmasıyla bileşim tabakası kalınlığının arttığını, ancak 600°C'den yüksek sıcaklıklarda nitrürleme süresinin artmasıyla birlikte bileşim tabakası kalınlığının azaldığını belirtmişlerdir.

Gavgalı ve diğ. (2002) AISI 5140 malzemeyi farklı sıcaklık (400, 450, 500 ve 550°C), farklı süre (1, 4, 8 ve 12 saat) ve farklı gaz karışım oranlarında (0.11, 0.33, 1 ve 3 N₂/H₂) plazma nitrürlemişlerdir. Nitrürlenen her bir numunenin sertlik profili, burulma dayanımı, beyaz tabaka kalınlığı ve faz kompozisyonu incelenmiştir. Yapılan inceleme ve değerlendirme sonucunda; beyaz tabaka kalınlığının nitrürleme süresi, nitrürleme sıcaklığı ve gaz karışım oranının artmasıyla büyüdüğünü, difüzyon bölgesinin nitrürleme süresinin ve sıcaklığın artmasıyla büyüdüğünü ve gaz karışım oranının artmasıyla azaldığını belirtmişlerdir.

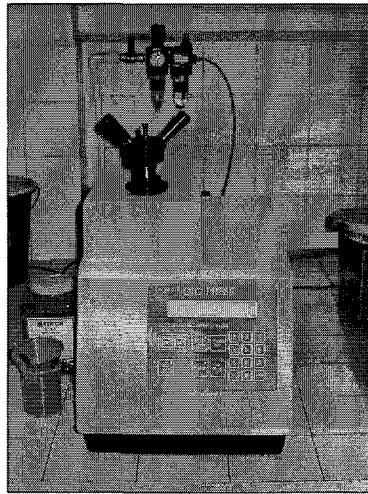
Plazma nitrürleme şartlarının, nitrürlenen plakelerin yüzey şartlarını ne derecede ve nasıl değiştirdiğini görebilmek amacıyla, nitrürleme sonrasında plakelerin yüzeylerinde oluşan tabaka kalınlıkları ölçülmüştür.

Tabaka kalınlıklarının ölçümü öncesinde, plakelere bir dizi ön işlem uygulanmıştır. Plaketlerin alt yüzeyi dışında tüm yüzeyleri sertleştirilmiş olduğundan, herhangi bir yüzeydeki sert tabakanın soyulması ve bu yüzeyden bakılması suretiyle tabaka kalınlıkları hakkında fikir edinilebilmesi mümkün olmuştur. Bu amaçla plakelerin yan yüzeyleri taşlanmıştır. Taşlama tezgahına resim Şekil 4.9'da verilmiştir. Plaketlerin taşlanması iki kademeli olarak gerçekleştirilmiştir. Önce 1 mm kalınlığında birinci taşlama, daha sonra 0,5 mm. kalınlığında ikinci bir taşlama işlemi yapılmıştır. Böylelikle, uzun süren taşlama periyodu süresinde plaket yüzeyin aşırı derecede ısınarak kimyasal yapısının bozulması ihtimalinin azaltılması amaçlanmıştır. Ayrıca taşlama sırasında taşlanan yüzeyler sürekli olarak soğutulmuştur. Bu uygulama da aşırı ısınmadan kaynaklanabilecek problemlerin önüne geçilmesinde fayda sağlamıştır.



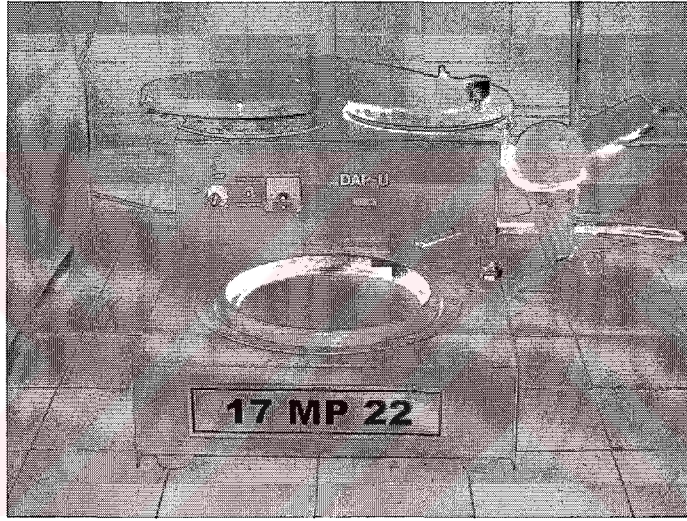
Şekil 4.9 Plaketlerin yan yüzeylerinin taşlandığı taşlama tezgahı

Yan yüzeyleri taşlanan plaketler 3'erli gruplar halinde bakalit kalıba alınmıştır. Böylelikle; ileride uygulanacak yüzey hazırlama işlemlerinin aynı anda 3 plakete birden uygulanması suretiyle, zamandan kazanılması amaçlanmıştır. Bakalite alma işlemi Metkin Dıgıpress Otomatik Numune Kalıplama Cihazı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.10). Bakalit kalıplama sonrasında elde edilen her bir kalıba numara verilmiştir. Aynı zamanda plaketlerin kalıplaması yapılırken; plaketler, referans alınan bir kenardan başlamak üzere küçük numaradan büyük numaraya doğru dizilmiştir. Bakalit kalıplar üzerindeki referans noktaları, kalıplama yapılırken küçük numaralı plaketlerin yanına konulan bir talaş parçası olmuştur. Böylelikle plaket numaralarının karıştırılması ihtimali ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 4.10 Metkin Dıgıpress otomatik numune kalıplama cihazı

Bakalit kalıplama sonrasında; her bir bakalit kalıbın ön yüzüne, dolayısıyla plaket yüzeylerine kademeli olarak yüzey işlemleri uygulanmış ve böylece plaket yüzeyleri mikroskop altında incelenmeye hazır hale getirilmiştir. Bu amaçla; plaket yüzeyleri sırasıyla 200, 400, 600, 800 ve 1000 numaralı zımparalarda ve her bir zımpara altında en az 5 dakika kalacak şekilde zımparalanmışlar. Zımparalama işlemi Struers-Dap-u tipi cihaz kullanılarak yapılmıştır (Şekil 4.11). Zımparalama sonrasında; önce alüminyum oksit ve sonrasında krom oksitle kaba parlatma, daha sonrasında elmas pastayla ince parlatma yapılmıştır. Son işlem olarak da, ısıtılmış plaket yüzeyleri 25 cc HNO_3 +75 cc Etil Alkol karışımı kullanılarak 30 saniye süreyle dağlanmış. Böylece plaketlerin yüzeyleri mikroskop altında incelenmeye hazır hale getirilmiştir.



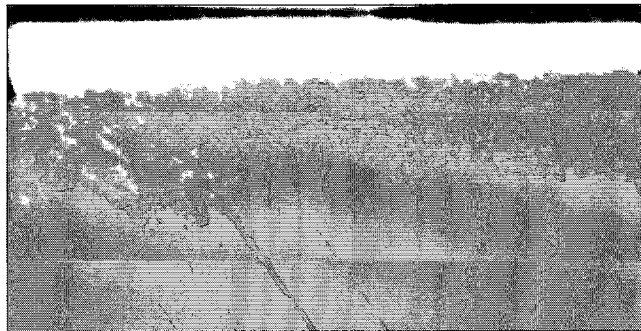
Şekil 4.11 Struers-Dap-u tipi zımparalama cihazı

Bileşim ve difüzyon tabakası kalınlıkları Chyo XK-220 optik mikroskopla ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda elde edilen tabaka kalınlıkları Tablo 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.18'de ise, 6 numaralı numuneye ait difüzyon tabakasının optik mikroskop altında 150 büyütmeyle elde edilen görüntüsü verilmiştir.

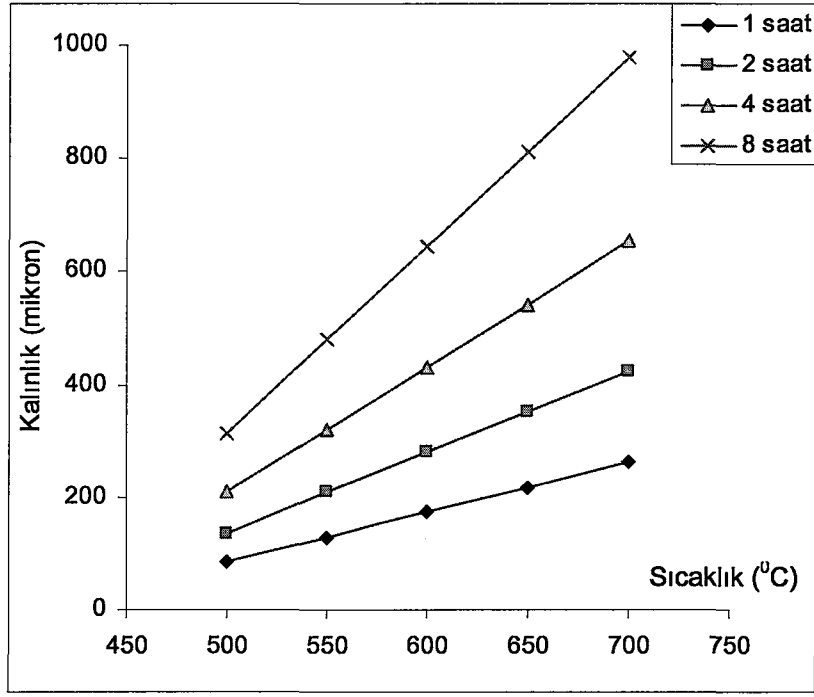
Difüzyon tabakası kalınlığının, sabit bir nitrürleme süresi için nitrürleme parametrelerine göre değişimi Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te verilmiştir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 incelendiğinde sabit bir nitrürleme süresi için, difüzyon tabakası kalınlığının artan sıcaklıkla birlikte arttığı görülmektedir. Difüzyon tabakasının oluşma mekanizması sıcaklık esaslı bir mekanizma olması nedeniyle artan sıcaklıkla birlikte tabaka kalınlığının arttığı değerlendirilmektedir.

Tablo 4.4 Nitrülenmiş plaketlerdeki bileşim ve difüzyon tabakası kalınlıkları

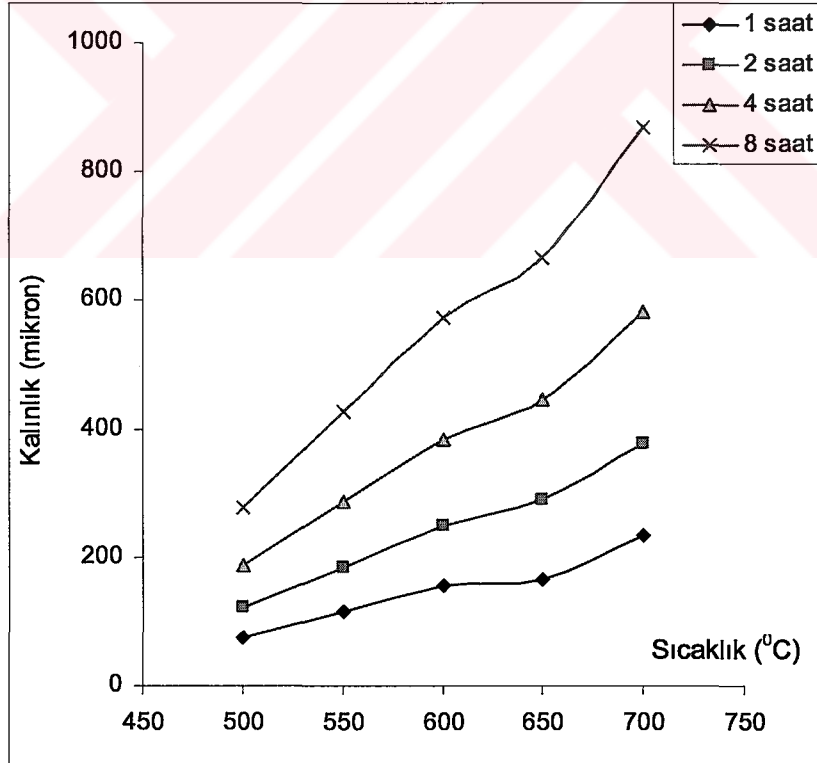
Numune No	Difüzyon Tabakası (�m)	Bileşim Tabakası (�m)	Numune No	Difüzyon Tabakası (�m)	Bileşim Tabakası (�m)
1	84	0	26	979	0
2	136	0	27	74	0
3	210	0	28	121	0
4	266	0	29	186	0
5	313	0	30	236	0
6	129	0	31	279	0
7	209	0	32	114	0
8	320	0	33	185	0
9	406	0	34	285	0
10	480	0	35	362	0
11	Bakalite alınmadı		36	427	0
12	173	0	37	154	1
13	281	0	38	249	1
14	432	0	39	384	2
15	584	0	40	574	2
16	646	0	41	164	1
17	218	0	42	290	2
18	352	0	43	374	2
19	455	0	44	447	3
20	543	0	45	668	3
21	813	0	46	233	1
22	263	0	47	378	2
23	424	0	48	582	3
24	549	0	49	870	4
25	654	0			



şekil 4.12 6 numaralı plakette plazma nitrüleme sonrasında meydana gelen difüzyon tabakasının optik mikroskopta altında 150 büyütmedeki görüntüsü



Şekil 4.13 %75 H₂+%25 N₂ gaz karışım oranında, sabit nitrürleme sıcaklığı için artan sıcaklıkla birlikte difüzyon tabakası kalınlığının değişimi



Şekil 4.14 %50 H₂+%50 N₂ gaz karışım oranında, sabit nitrürleme sıcaklığı için artan sıcaklıkla birlikte difüzyon tabakası kalınlığının değişimi

5. TALAŞ KALDIRMA DENEYLERİ

5.1 Giriş

Takım ömrünü belirleyebilmek amacıyla, ömrünün tespit edilmesine ihtiyaç duyulan takımların kullanıldığı talaş kaldırma deneyleri yapılmalıdır. Bu amaçla çok farklı talaş kaldırma yöntemi kullanılabilir. Takım ömrünün tespit edilmesine yönelik çalışmalar incelendiğinde tornalama ve frezeleme başta olmak üzere, az da olsa diğer talaş kaldırma yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Bunun temel nedeni tornalama ve frezelemenin en çok kullanılan talaş kaldırma yöntemleri olması, gerek laboratuvar gerekse fabrika ortamında kolayca uygulanabilir olması ve bu konuda uzman personel temininin oldukça kolay olmasıdır.

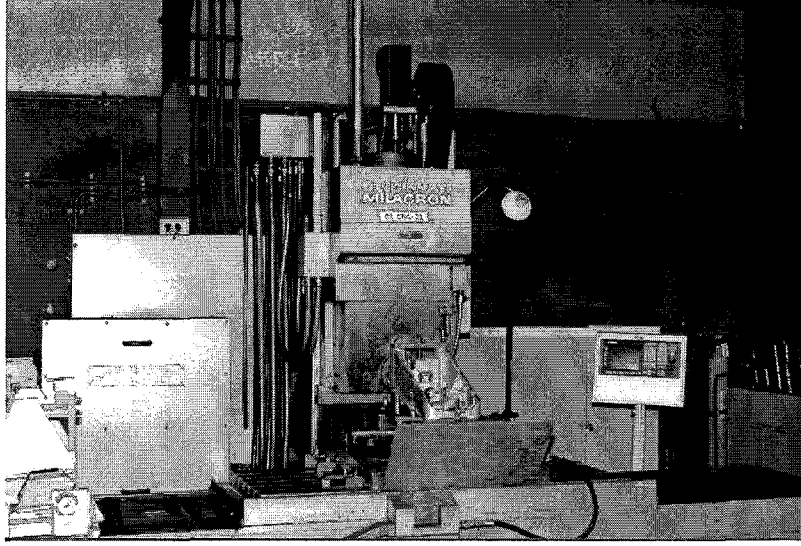
Takım ömrünün tespit edilebilmesi için uygun talaş kaldırma yönteminin seçilmesinde dikkat edilecek önemli bir kriter, ömrü tespit edilecek takımın seçilen talaş kaldırma yöntemine uygun bir takım olması gerekliliğidir. Plazma nitrürlenmiş takımların özellikleri incelendiğinde, ilgili takımların tornalama veya frezelemede kullanılmak üzere imal edildiği anlaşılabacaktır.

Bu çalışmada takım ömrünün tespit edilmesi için kullanılacak talaş kaldırma yöntemi olarak frezeleme seçilmiştir. Bu yöntemin seçilmesindeki temel neden, aynı anda birden fazla takımın talaş kaldırma deneylerinde kullanılabilmesidir. Böylece aynı anda freze kafasına bağlanan takımların aynı kesme şartlarında kullanılabilmesi imkanı sağlanmıştır. Ayrıca tezgahın ayarlanması, takımların sökülmesi ve bağlanması gibi zamanlardan tasarruf sağlandığı için toplam talaş kaldırma deney süresi de kısaltılabilmektedir.

5.2 Talaş Kaldırma Şartları

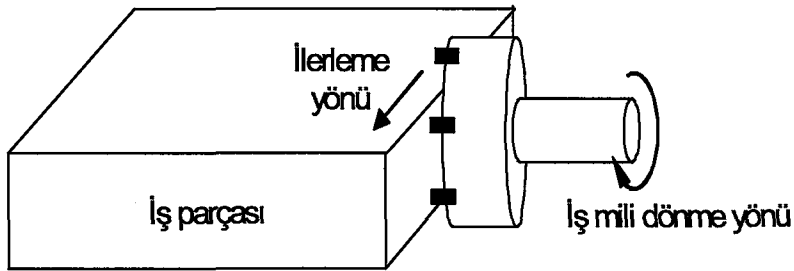
Talaş kaldırma deneyleri, sonradan NUN 1020 (Fransa) CNC ünitesi monte edilmiş CINCINATI MILACRON (USA) 10H-1500 18 kW yatay işleme merkezinde yapılmıştır. Bu tezgahın seçiminde fabrikanın mevcut imkan ve olanakları etkili olduğu kadar, iş parçasını sökme-bağlama, takımı sökme-bağlama ve ayar

olanaklarının basit ve hızlı olması gibi özellikleri de dikkate alınmıştır. Şekil 5.1’de talaş kaldırma deneylerinde kullanılan tezgah gösterilmiştir.



Şekil 5.1 CINCINATI MILACRON (USA) 10H-1500 18 kW yatay işleme merkezi

İşlenecek malzeme olarak SAE/AISI 1020 (DIN Ck 22) seçilmiştir. İşlenecek malzeme seçiminde; daha önceden tespit edilmiş plaketin tipi, malzemenin kolay temin edilebilirliği, talaş kaldırmanın sürekliliğini ve homojenliğini bozmayacak ılımlı bir malzeme olması ve talaş kaldırmanın gerçekleştirildiği fabrika şartları dikkate alınmıştır. Talaş kaldırma deneyleri kesit ölçüleri 466 mm x 75,5 mm olan bu malzemenin alın frezelenmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.2). Talaş kaldırmada kullanılan malzemeye ait özellikler Tablo 5.1’de verilmiştir.

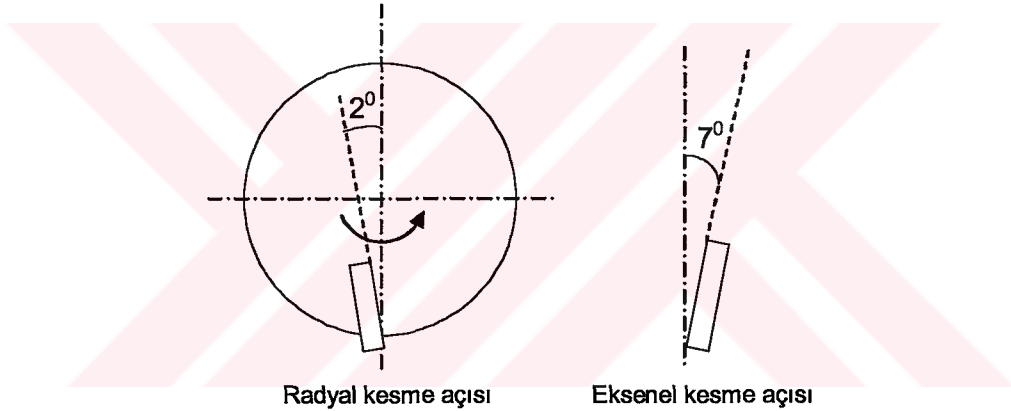


Şekil 5.2. İş parçasının alın frezelenmesi

Talaş kaldırmada kullanılan plaketlere ait geometrik ve kimyasal özellikler ise 4 ncü Bölümde anlatılmıştır. Plaketler, R 265.2-125 M 7 plaketli Sandvik freze kafasına takılarak talaş kaldırmada kullanılmıştır. Bu freze kafasına bağlı olarak, plaketlere ait radyal ve aksenal kesme açıları Şekil 5.3’te verilmiştir.

Tablo 5.1. Talaş kaldırmada kullanılan malzemeye ait özellikler

Özellik	Değer
Standart İfade Şekli	SAE/AISI 1020 (DIN Ck 22)
Kimyasal Bileşim	%0,15-0,24 C, %0,30-0,60 Mn, %0,10-0,30 Si, maksimum %0,040 P maksimum % 0,050 S
Kopma Dayanımı	50-65 daN/mm ²
Akma Dayanımı	30 daN/mm ²
Sertlik (maksimum)	140 HB
Kesit ölçüleri	466 mm x 75,5 mm



Şekil 5.3 Plaketlere ait kesme açıları

Talaş kaldırma şartlarının belirlenmesinde; ilgili plakelerin temin edildiği firma kataloglarında tavsiye edilen değerler, talaş kaldırmanın yapıldığı tezgahın özellikleri ve seçilen plakeler için değişik kaynaklarda tavsiye edilen değerler esas alınmıştır.

Kesme şartlarının belirlenmesinde; kesme süresi değişken olmak üzere diğer tüm kesme şartlarının sabit tutulması prensibi esas alınmıştır. Böylelikle belli bir kesme süresi sonucunda plakette meydana gelen aşınmanın tespit edilmesi, eşit kesme sürelerinde kullanılmış her bir plakette oluşan aşınma miktarlarının karşılaştırılması suretiyle plaket performanslarının belirlenebilmesi ve belli kesme şartları altında plaket ömrünün belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Talaş kaldırmada kullanılan plaketin üç kesme kenarına sahip olması, her bir kesme kenarının farklı kesme sürelerinde kullanılabilmesi ve talaş kaldırma sonrasında hasara uğramamış bir ucun tekrar

talaş kaldırmada kullanılabilmesi imkanını ortaya çıkmıştır. Tablo 5.2’de kesme şartları, Tablo 5.3’te ise kesme süreleri verilmiştir.

Tablo 5.2 Talaş kaldırma deneyleri boyunca sabit tutulan kesme şartları

Özellik	Seçilen Değer
İş mili devir sayısı	330 d/d
Takım başına ilerleme miktarı	0,15 mm
İlerleme hızı	346,5 mm/dak
Kesme hızı	130 m/dak
Freze kafa çapı ve plaket sayısı	125 mm / 7 adet plaket
Kesme derinliği	1,25 mm (1 nolu kesme ucu için) 1 mm (diğer kesme kenarları için)

Tablo 5.3 Plaketin kesme kenarına bağlı olarak seçilen kesme süreleri

Kesme Kenarı (*)	Kesme Süresi (dakika)
1	26,80
2	21,15
3	35,97
4*	41,47

(*) 3 numaralı kesme kenarı ilave talaş kaldırma deneyine tabi tutulmuştur

Nitrülenmiş plaket performansının, nitrülenmemiş plaket performansı ile karşılaştırılabilmesi için nitrülenmemiş 10 plaket, nitrülenmiş plaketlerle birlikte talaş kaldırma deneylerine tabii tutulmuş ve performansları izlenmiştir.

5.3 Ağırlık Kaybının Ölçülmesi

Talaş kaldırma sırasında, plakette meydana gelen aşınma nedeniyle plakette bir miktar ağırlık kaybı meydana gelecektir. Bu ağırlık kaybı; sadece serbest yüzey aşınmasından kaynaklanan bir kayıp olmamakla birlikte, seçilen kesme şartları nedeniyle bu kaybın oldukça büyük bir bölümünü serbest yüzey aşınması oluşturacaktır. Bu nedenle her bir talaş kaldırma deneyi öncesinde ve sonrasında plaketlerin ağırlıkları ölçülmüş ve başlangıç durumuna göre plaketlerdeki ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Böylece; talaş kaldırma sonrasında plakette oluşan aşınma miktarı konusunda hızlıca bir fikir sahibi olunabilmektedir ve daha sonradan yapılacak serbest yüzey aşınma miktarı ölçümlerine yönelik bir ön hazırlık sağlanabilmektedir. Bu

amaçla; talaş kaldırma deneylerine başlamadan önce ve her bir talaş kaldırma operasyonu sonunda plakelerin ağırlıkları ölçülerek, ağırlık kayıpları izlenmiştir. Plaket ağırlıklarının ölçümünde, 0,0001 hassasiyette ölçüm yapan Chyo JL-180 ağırlık ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.4). Tablo 5.4'te nitrülenmiş plakelerde, Tablo 5.5'te ise nitrülenmemiş plakelerde oluşan ağırlık kayıpları verilmiştir.

Tablo 5.4 Talaş kaldırma sonrasında nitrülenmiş plakelerde oluşan ağırlık kayıpları

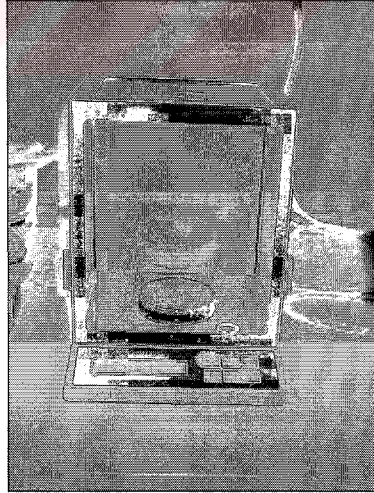
Numune No	İlk Ağırlık	Talaş Kaldırma Deney Numarası							
		1. talaş kaldırma deneyi sonrası		2. talaş kaldırma deneyi sonrası		3. talaş kaldırma deneyi sonrası		4. talaş kaldırma deneyi sonrası	
		Ağırlık kaybı	Değişim (%) x 10	Ağırlık kaybı	Değişim (%) x 10	Ağırlık kaybı	Değişim (%) x 10	Ağırlık kaybı	Değişim (%) x 10
1	10,6340	0,0616	5,79	0,0470	4,47	0,0849	8,13	0,1043	10,1
2	10,6444	0,0567	5,33	0,0433	4,11	0,0782	7,47	0,0961	9,27
3	10,6332	0,0476	4,48	0,0363	3,44	0,0657	6,27	0,0807	7,76
4	10,6241	0,0507	4,77	0,0388	3,68	0,0695	6,64	0,0859	8,28
5	10,6332	0,0498	4,68	0,0380	3,60	0,0680	6,49	0,0841	8,09
6	10,6393	0,0598	5,62	0,0456	4,33	0,0823	7,87	0,1012	9,78
7	10,6373	0,0544	5,11	0,0417	3,96	0,0751	7,18	0,0926	8,93
8	10,6393	0,0434	4,08	0,0333	3,15	0,0598	5,69	0,0738	7,08
9	10,6336	0,0493	4,64	0,0381	3,61	0,0684	6,53	0,0862	8,30
10	10,6312	0,0495	4,66	0,0382	3,62	0,0686	6,55	0,0863	8,31
11	10,6490	0,0611	5,74	0,0462	4,38	0,0812	7,76	0,1033	9,97
12	12,5160	0,0555	4,43	0,0420	3,38	0,0738	5,98	0,0939	7,66
13	10,6416	0,0489	4,60	0,0355	3,36	0,0678	6,46	0,0836	8,03
14	10,6332	0,0386	3,63	0,0205	1,94	0,0505	4,80	0,0719	6,88
15	10,6459	0,0470	4,41	0,0310	2,93	0,0605	5,76	0,0812	7,79
16	10,6415	0,0455	4,28	0,0299	2,83	0,0586	5,58	0,0795	7,62
17	10,6426	0,0526	4,94	0,0396	3,75	0,0719	6,86	0,0891	8,58
18	10,6298	0,0347	3,26	0,0265	2,51	0,0476	4,52	0,0588	5,62
19	10,6312	0,0200	1,88	0,0153	1,44	0,0275	2,60	0,0338	3,21
20	10,6462	0,0266	2,50	0,0230	2,17	0,0367	3,48	0,0451	4,29
21	10,6260	0,0253	2,38	0,0205	1,94	0,0365	3,46	0,0450	4,29
22	10,6419	0,0396	3,72	0,0293	2,77	0,0540	5,13	0,0660	6,31
23	10,6251	0,0120	1,13	0,0093	0,88	0,0167	1,58	0,0202	1,91
24	10,6414	0,0174	1,64	0,0143	1,35	0,0257	2,43	0,0315	2,99

Tablo 5.4 Talaş kaldırma sonrasında nitrürlenmiş plakette oluşun ağırlık kayıpları
(devamı)

Numune No	İlk Ağırlık	Talaş Kaldırma Deney Numarası							
		1. talaş kaldırma deneyi sonrası		2. talaş kaldırma deneyi sonrası		3. talaş kaldırma deneyi sonrası		4. talaş kaldırma deneyi sonrası	
		Ağırlık kaybı	Değişim (%) x 10	Ağırlık kaybı	Değişim (%) x 10	Ağırlık kaybı	Değişim (%) x 10	Ağırlık kaybı	Değişim (%) x 10
25	10,6589	0,0230	2,16	0,0176	1,66	0,0318	3,00	0,0390	3,70
26	10,6407	0,0218	2,05	0,0166	1,57	0,0303	2,87	0,0369	3,50
27	10,6238	0,0632	5,95	0,0482	4,59	0,0871	8,35	0,1070	10,4
28	10,6426	0,0580	5,45	0,0444	4,21	0,0796	7,61	0,0983	9,49
29	10,6400	0,0519	4,88	0,0397	3,76	0,0732	6,99	0,0869	8,37
30	10,6412	0,0522	4,91	0,0399	3,78	0,0740	7,06	0,0886	8,53
31	10,6332	0,0513	4,82	0,0390	3,70	0,0728	6,95	0,0870	8,38
32	10,6279	0,0606	5,70	0,0464	4,41	0,0836	8,01	0,1028	9,95
33	10,6498	0,0557	5,23	0,0427	4,05	0,0770	7,35	0,0946	9,11
34	10,6305	0,0503	4,73	0,0384	3,64	0,0689	6,58	0,0850	8,18
35	10,6286	0,0521	4,90	0,0398	3,78	0,0718	6,86	0,0883	8,51
36	10,6415	0,0510	4,79	0,0390	3,70	0,0706	6,74	0,0865	8,32
37	10,6340	0,0589	5,54	0,0450	4,27	0,0812	7,77	0,0997	9,63
38	10,6282	0,0537	5,05	0,0411	3,90	0,0739	7,07	0,0907	8,75
39	10,6314	0,0477	4,49	0,0365	3,46	0,0658	6,28	0,0809	7,78
40	10,6414	0,0495	4,65	0,0379	3,59	0,0682	6,50	0,0841	8,09
41	10,6415	0,0574	5,39	0,0437	4,15	0,0781	7,46	0,0968	9,34
42	10,6416	0,0476	4,47	0,0364	3,45	0,0656	6,25	0,0807	7,75
43	10,6416	0,0407	3,82	0,0311	2,94	0,0566	5,38	0,0691	6,62
44	10,6297	0,0459	4,32	0,0351	3,33	0,0632	6,03	0,0779	7,48
45	10,6374	0,0444	4,17	0,0336	3,18	0,0608	5,79	0,0753	7,22
46	10,6744	0,0438	4,10	0,0332	3,13	0,0594	5,64	0,0737	7,04
47	10,6943	0,0253	2,37	0,0194	1,82	0,0354	3,34	0,0425	4,02
48	10,6835	0,0376	3,52	0,0289	2,72	0,0516	4,88	0,0638	6,08
49	10,6674	0,0353	3,31	0,0268	2,53	0,0483	4,58	0,0591	5,63

Tablo 5.5 Talaş kaldırma sonrasında nitrürlenmemiş plakette oluşan ağırlık kayıpları

Numune No	İlk Ağırlık	Talaş Kaldırma Deney Numarası							
		1. talaş kaldırma deneyi sonrası		2. talaş kaldırma deneyi sonrası		3. talaş kaldırma deneyi sonrası		4. talaş kaldırma deneyi sonrası	
		Ağırlık kaybı	Değişim (%) x 10	Ağırlık kaybı	Değişim (%) x 10	Ağırlık kaybı	Değişim (%) x 10	Ağırlık kaybı	Değişim (%) x 10
101	10,6312	0,0651	6,12	0,0496	4,72	0,0895	8,58	0,1103	10,69
102	10,6462	0,0647	6,08	0,0498	4,73	0,0894	8,56	0,1096	10,61
103	10,6537	0,0649	6,09	0,0495	4,70	0,0893	8,55	0,1096	10,60
104	10,6386	0,0647	6,08	0,0496	4,71	0,0893	8,56	0,1101	10,66
105	10,6448	0,0649	6,10	0,0496	4,71	0,0891	8,53	0,1102	10,67
106	10,6269	0,0658	6,19	0,0495	4,71	0,0893	8,57	0,1108	10,75
107	10,6426	0,0645	6,06	0,0493	4,68	0,0893	8,55	0,1096	10,61
108	10,6434	0,0651	6,12	0,0496	4,71	0,0895	8,57	0,1105	10,70
109	10,6389	0,0647	6,08	0,0498	4,73	0,0894	8,57	0,1098	10,63
110	10,6458	0,0650	6,11	0,0496	4,71	0,0893	8,55	0,1098	10,63
Ort.	-	0,0649	-	0,0496	-	0,0893	-	0,1100	-



Şekil 5.4 Chyo JL-180 ağırlık ölçüm cihazı

5.4 Takımlarda Oluşan Aşınmanın Ölçülmesi

Takım aşınma miktarının belirlenmesi yöntemleri dolaylı ve dolaysız yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır. Aşınmanın doğrudan izlenmesi yöntemlerinde, talaş

kaldırma işlemi durdurularak takım üzerinde meydana gelen aşınma fiziksel olarak ölçülür. Dolaylı yöntemlerde ise talaş kaldırma işlemi kesintiye uğratılmadan, talaş kaldırmadan elde edilen değişik sinyaller (titreşim, gürültü, güç, kesme kuvveti, iş mili hızı, iş parçası boyutları değişiminin ölçümü gibi) kullanılarak eş zamanlı olarak takım aşınmasının durumu hakkında bilgi edinilir. Dolaylı yöntemde talaş kaldırma işlemi durdurulmadığından doğrudan yöntemde olduğu gibi bir üretim kaybı söz konusu olmadığı gibi, aşınmanın eş zamanlı olarak ölçülebilmesi istenildiği veya gerektiği zaman talaş kaldırma işleminin durdurabilmesi imkanını da sağlar. Ancak dolaylı yöntemin kullanılması durumunda; takım aşınmasının güvenilir bir şekilde izlenebilmesi için, algılanan sinyaller üzerindeki bozucu etkilerin filitrelenmesinde yaşanan sıkıntılar ve bu yöntemin uygulanabilmesi için ihtiyaç duyulan cihaz ve donanımların karmaşıklığı ciddi sıkıntılar oluşturmaktadır.

Takım aşınmasının doğrudan ölçülmesi için mikroskopla takımın aşınmış yüzey büyüklüğü ölçülebilir veya takımdaki ağırlık ölçümü ile aşınma nedeniyle meydana gelen ağırlık kaybı hesaplanabilir. Eş zamanlı (on-line) olarak takım aşınmasının izlendiği metotlar olarak; optik, pnomatik, elektrik, yer değişimi, güç ve kuvvet ölçümleri yöntemleri sayılabilir. Bu metotlar içinde, kuvvet ve güç ölçüm yöntemi en pratik olan yöntemlerdir. Bu yöntemlerin esası; talaş kaldırma sırasında algılanan sinyallerin, takımın aşınma durumu ile ilişkilendirilmesi prensibine dayanmaktadır.

Gomayel ve Bregger (1986), tornalama sırasında takım aşınmasının eş zamanlı olarak izlenmesi için iş parçası çap değişiminin ölçülmesini esas alan bir yöntem ileri sürmüşlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; çap değişimi yoluyla takım aşınmasının izlenmesinin, eş zamanlı takım aşınmasının belirlenmesi için uygun bir yol olduğunu, ancak bu teknikle takımın değişik bölgelerinde meydana gelen aşınma hakkında bir fikir edinebilmenin mümkün olmadığını belirtmişlerdir.

Rao (1986), tornalama sırasında eş zamanlı olarak serbest yüzey aşınmasının izlenebilmesi için aşınma indeksi (WI-Wear Index) adını verdiği bir teknik kullanmıştır. Aşınma indeksi, takım ucu-iş parçası arayüzeyinde serbest yüzey boyunca, takım tutucunun ankastre kısmındaki kuvvet salınımlarına karşı ölçülen direnci ifade etmektedir. Yaptığı çalışma sonucunda; serbest yüzey aşınmasının artmasıyla birlikte takım-iş parçası temas alanının büyüdüğünü, bu durumun kesme parametrelerinden bağımsız olarak aşınma indeksini arttırdığını, aşınma indeksi üzerinde bozucu etkiye sahip tek kesme parametresinin işlenen parçanın sertliğindeki değişimler olduğunu, böylece aşınma indeksi yardımıyla takım aşınma

durumunun eş zamanlı olarak izlenebildiğini, ileri sürülen bu yeni teknikle takım aşınmasının %95 güvenilirlikle eş zamanlı olarak tespit edilebileceğini belirtmiştir.

Blum ve Inasaki (1990), kaplamasız sinterlenmiş karbür takımla S45C malzemeyi tornalayarak, kesme parametrelerinin talaş kaldırma sırasında oluşan akustik emisyonlar üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; akustik emisyonların malzemenin iç yapısının yeniden düzenlenmesi nedeniyle malzeme kristal kafesinden açığa çıkan titreşim dalgaları olduğunu, akustik emisyonların değişen kesme şartlarına karşı oldukça duyarlı olduğunu, bu sinyallerin sürekli ve patlamalı tip olmak üzere iki farklı özellikte olduğunu, sürekli tipin sünek malzemelerin plastik deformasyonu sırasında oluştuğunu, patlamalı tipin ise malzemedeki çatlak büyümesi, talaş çarpması veya talaş yumağı (chip tangling) nedeniyle meydana geldiğini, serbest yüzey aşınmasının artmasıyla birlikte akustik emisyonun arttığını, kesme hızındaki artışla birlikte büyüme eğilimi gösteren akustik emisyon sinyallerin ilerleme hızının artmasıyla birlikte azaldığını belirtmişlerdir.

Cuppini ve diğ. (1990), tornalama sırasında takım aşınmasının eş zamanlı olarak izlenebilmesi için kesme gücüyle aşınma arasında bir ilişki tanımlamışlardır. Bu amaçla sinterlenmiş karbür takımla AISI 1045 malzemenin tornalanması sırasında tezgahın tükettiği güç eş zamanlı olarak ölçülmüştür. Yaptıkları çalışma sonucunda; kesme gücüyle takım aşınması arasında lineer bir ilişki olduğunu ve bu yöntemin kullanılması sonucunda elde edilen verilerin gerçek değerlere çok yakın olduğunu belirtmişlerdir. Ancak yaptıkları çalışmada; bu ilişkinin nasıl oluşturulduğu konusunda yeterli bir açıklama da bulunmamışlar, ayrıca kurmuş oldukları kesme gücüyle aşınma arasındaki ilişkiyi deneysel veya pratik bilgilerle doğrulamamışlardır.

Diniz ve diğ. (1992), farklı kesme şartları altında, takım aşınmasındaki artıştan kaynaklanan iş parçası yüzey pürüzlülüğü değişiminin eş zamanlı olarak izlenebilmesi için akustik emisyon sinyallerinin kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Bu amaçla, kaplamamız sinterlenmiş karbür takım kullanılarak AISI 1045 malzeme tornalanmıştır. Ayrıca talaş kaldırma sırasında kesme kuvvetleri de ölçülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda; işlenen malzeme yüzey pürüzlülüğünün ve takım aşınma durumunun eş zamanlı olarak izlenebilmesi için akustik emisyon sinyallerinin iyi bir teknik olduğunu, talaş kaldırma sırasında yüzey pürüzlülüğünü etkileyen birçok faktörün olduğunu, bunlardan en önemlilerinin serbest yüzey ve krater aşınması olduğunu, serbest yüzey aşınmasıyla yüzey pürüzlülüğü değişim karakteristiğinin birbirine çok yakın olduğunu, talaş kaldırma deneylerinin yapıldığı şartlar için 200-300 kHz aralığındaki akustik emisyon sinyallerinin anlamlı olduğunu

ve akustik emisyon sinyallerinin kullanılarak talaş kaldırmaya ait diğer parametre değişimlerinin de eş zamanlı olarak izlenebileceğini belirtmişlerdir.

Bonifacio ve Diniz (1993), AISI 4340 malzemeyi yüzeyi çok tabakalı (en altta TiCN, ortada Al_2O_3 ve en üstte TiN) sinterlenmiş karbür takımla farklı kesme şartlarında tornalayarak, takım aşınmasıyla iş parçası yüzey pürüzlülüğü ve titreşim arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; titreşim ölçüm yöntemiyle iş parçası yüzey pürüzlülüğünün eş zamanlı olarak izlenebileceğini, takım ömrünü belirlemek için kesme ve ilerleme doğrultusundaki titreşim sinyallerinin oldukça kullanışlı parametreler olduğunu, kesme hızıyla birlikte değişen yüzey pürüzlülüğünü açıklamak için titreşim ölçümünün yeterli olmadığını, ilerleme hızındaki değişimlerin titreşim sinyallerini etkilemediğini ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde önemsiz bir etkiye sahip olduğunu, takım ömrü üzerinde ilerleme hızının etkisinin oldukça az olmasına rağmen kesme hızının etkisinin oldukça fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Ravindra ve diğ. (1993), tornalama işlemi için aşınma-kuvvet ve aşınma-zaman ilişkisini tanımlayan matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Bu amaçla küresel grafitli dökme demiri kaplanmış karbür takımla tornalanmışlar, kesme kuvveti ana bileşenleri ve kesme kuvvetleri doğrultusundaki takım tutucu titreşimlerini eş zamanlı olarak ölçmüşlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; kesme kuvveti bileşenlerinin, aşınma ve takım hasarı ile yakından ilişkili olduğunu, aşınmayı izlemek için en iyi göstergenin kuvvetlerin mutlak değerlerinden daha ziyade kuvvet bileşenleri oranları olduğu, aşınmanın artmasıyla birlikte tüm kuvvet bileşenlerinde artış olduğunu, ilerleme ve radyal kuvvetle serbest yüzey aşınması arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca yaptıkları çalışmayla, kuvvet değişim sinyalleri üzerinde bozucu etkiye sahip faktörlerin etkisinin en aza indirilmesi için gerekli tedbirleri aldıklarını da belirtmişlerdir.

Kaye ve diğ. (1995), tornalama sırasında takım serbest yüzey aşınmasının eş zamanlı olarak tespit edilmesi için iş mili hız değişimlerini esas alan bir model geliştirmişlerdir. Karbür takımla AISI 4130 malzemenin farklı kesme şartları altında tornalanması suretiyle yaptıkları 6 deneyle, ölçülen gerçek serbest yüzey aşınması ile geliştirdikleri modeli kullanarak hesapladıkları serbest yüzey aşınması arasında iyi bir uyum olduğunu belirtmişlerdir.

Lim (1995), tornalama sırasında oluşan titreşimlerin algılanmasını esas alan bir takım serbest yüzey aşınmasını eş zamanlı olarak izleme metodu geliştirmiştir. Geliştirdiği metodu doğrulamak için tungsten karbür takımla AISI 1045 malzemeyi üç

farklı kesme hızında tornalamıştır. Yaptığı çalışma sonucunda; bu metodun takım serbest yüzey aşınmasının izlenmesi için oldukça güvenilir bir yöntem olduğunu, takımın serbest yüzey aşınması ile titreşim büyüklüğünün ivmelenmesi arasında çok güçlü bir ilişki olduğunu, titreşim ivme analizinin direk olarak takım aşınmasının değerlendirilmesinde kullanılabileceğini, talaş kaldırma sırasında elde edilecek verilerin eş zamanlı olarak bir bilgisayar yazılımında değerlendirilmesi suretiyle titreşim büyüklüğünün bir fonksiyonu olarak takım ömrünün belirlenebileceğini değerlendirmiştir.

Zhou ve diğ. (1995), takım kesme kenarlarına uygulanan gerilmenin hesaplanmasını esas alan bir eş zamanlı takım aşınması izleme yöntemi geliştirmişlerdir. Gerilmenin hesaplanması; ölçülen kesme kuvvetleri, yük fonksiyonları, kesme parametreleri ve kesme geometrisi ile yapılmıştır. Yaptıkları çalışma sonucunda; takımın kesme kenarlarında ani hasar oluşumunu belirleyen bir risk faktörü tanımlamışlar, bu faktörün hesaplanan maksimum gerilmenin kesme kenarı karakteristik gerilmesine oranı olduğunu ve bu faktördeki bir değişim durumunda ani takım hasarın beklenilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Choudhury ve Ramesh (1995), optik yer değişim sensörleri kullanarak, takım aşınmasının izlenmesi ve iş parçası boyutlarını toleranslar dahilinde tutan bir geri besleme kontrol sistemi geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, geliştirdikleri geri besleme kontrol sistemini deneysel olarak da doğruladıklarını belirtmişlerdir.

Obikawa ve diğ. (1996), eş zamanlı olarak ölçülen kesme kuvveti değişimini içeren yapay sinir ağları metoduyla orta karbonlu takım çeliğinin serbest yüzey aşınma hızını izlemişlerdir. Yapay sinir ağlarından elde edilen sonuçlarla, deneysel olarak elde edilen sonuçların karşılaştırılmasından, oluşturulan modelin gerçeğe çok yakın sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Lin ve Lin (1996), alın frezelemede takım aşınmasının izlenmesi için kesme kuvveti sinyallerini kullanmışlardır. Bu amaçla kesme kuvvetleri ortalamasının ve bilenen diğer kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme hızı ve parça geometrisi gibi) giriş değişkenleri olarak kullanıldığı bir yapay sinir ağı yaklaşımı ve regresyon modeli oluşturmuşlardır. Bu amaçla karbür takım kullanarak T6061 alüminyum alaşımının alın frezelemesini yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda gerçek değerlere en yakın sonucu veren yapay sinir ağını belirterek; alın frezeleme için takım aşınmasının hesaplanmasında yapay sinir ağı yaklaşımı yoluyla kuvvet sinyallerinin kullanılmasının uygun sonuçlar verdiğini ve takım aşınmasının ortalama

talaş kalınlığı, ağız sayısı ve ortalama kesme kuvvetlerine bağılı olarak hesaplanabileceğini göstermişlerdir.

Galente ve diğ. (1998), takım aşınma davranışını stokastik bir proses olarak dikkate alan bir model ileri sürmüşlerdir. Oluşturdukları modelde; takım ömrünü tamamlama kriteri olarak, serbest yüzey aşınmasının ulaşacağı belli bir değeri esas almışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; oluşturdukları modelin değişik çalışma şartları için doğrulandığını, oluşturulan yeni modelin sadece belli bir aşınma seviyesi için sınırlı olmaması nedeniyle daha esnek olduğunu ve bu model kullanılarak kesme parametreleriyle takım ömrü arasında ilişki kurulabileceğini belirtmişlerdir.

Lee ve diğ. (1998), takım aşınmasının güvenilir bir şekilde izlenebilmesi için kuvvet oranlarının duyarlılık analizi ve istatistiğini kullanmışlardır. Bu amaçla 7 değişik kuvvet oranı tanımlanmış ve bunların yapay sinir ağları ile değerlendirmesi yapılmıştır. Yapılan değerlendirme sonunda değişen kesme şartlarına göre en iyi sonucu veren kuvvet oranının, radyal kesme kuvveti ile ilerleme kesme kuvveti bileşkesinin toplam kesme kuvvetine oranı olduğu belirtilmiştir.

Dolinsek ve Kopac (1999), takım aşınmasının eş zamanlı olarak izlenebilmesi için iş parçası yüzey kalitesiyle birlikte akustik emisyon sinyallerini kullanmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; akustik emisyon sinyallerinin kesme şartlarına bağılı olarak 100-610 kHz arasında değiştiğini, karbür ve seramik takımlar için farklı özellikte akustik emisyon sinyallerinin oluştuğunu, seramik takımların yüksek sönümlleme karakteristiğinin akustik emisyon sinyalleri dağılımında açıkça görüldüğünü, akustik emisyon sinyallerindeki artışın en önemli sebebinin takım aşınmasındaki artış olduğunu ve böylece talaş kaldırma sırasında elde edilen akustik emisyon sinyalleriyle takım aşınmasındaki değişimin izlenebileceğini belirtmişlerdir.

Tamas (1999), yapay sinir ağlarını kullanarak kesme kuvvetlerini modellemiştir. Oluşturulan model kullanılarak elde edilen kesme kuvvetleriyle, deneysel olarak ölçülen kesme kuvvetlerinin karşılaştırılmasından, geliştirilen bu yeni modelin gerçeğe çok yakın sonuçlar verdiği değerlendirilmiştir. Yaptığı çalışma sonucunda; kesme kuvveti bileşenlerinin çok sayıda kesme parametresine bağılı olarak değiştiği için modellenmesinin oldukça zor olduğunu, istatistiksel olarak tanımlanan kesme kuvveti katsayıları yerine yapay sinir ağları modelinin kullanılabileceğini ve bu modelin simülasyon amaçlı kullanılarak takım aşınma durumunu eş zamanlı olarak yansıtabileceğini belirtmiştir.

Choudhury ve diğ. (1999), tornalama sırasında takım serbest yüzey aşınmasının eş zamanlı olarak izlenebilmesi için çok tabakalı yapay sinir ağı ve optoelektronik sensörler kullanmışlardır. Ayrıca, algılanan serbest yüzey aşınması sinyallerini doğrulamak için, iş parçası boyutlarındaki değişimi esas alan geometrik bir ilişki de tanımlamışlardır. HSS takımla AISI 4340 malzemenin frezelenmesi sırasında eş zamanlı olarak elde ettikleri sonuçlarla oluşturdukları yapay sinir ağından elde ettikleri sonuçları kıyaslayarak; takım aşınmasının eş zamanlı olarak izlenebilmesi için oluşturulan yapay sinir ağı modelinin uygun olduğunu ve takım ömrünü belirleyebilmek için serbest yüzey aşınmasının izlenmesinin yeterli olduğunu değerlendirmişlerdir.

Choudhury ve Kishore (2000), tornalamada takım serbest yüzey aşınmasının eş zamanlı olarak tespit edilebilmesi için kesme kuvveti sinyallerinin kullanıldığı bir model geliştirilmişlerdir. Bu amaçla HSS takımla AISI 1045 malzemeyi tornalayarak eş zamanlı olarak kesme kuvveti ve ilerleme kuvveti bileşenlerini ölçmüşlerdir. Yaptıkları çalışma ile; oluşturdukları modeli deneysel olarak doğruladıklarını, ilerleme hızının kesme hızına oranı değişiminin takım aşınma durumunu eş zamanlı olarak izlemek için güvenilir bir yöntem olduğunu, kesme kuvvetleri oranı, ilerleme hızı, kesme derinliği ve iş parçası çapının takımın serbest yüzey aşınması üzerinde etkisinin lineer olduğunu, bununla birlikte kesme hızının takımın serbest yüzey aşınması üzerindeki etkisinin ise parabolik olduğunu belirtmişlerdir.

Dimla ve Dimal (2000), talaş kaldırma işlemi sırasında takım aşınmasının eş zamanlı olarak izlenebilmesi için kullanılan yöntemlerin genel bir değerlendirmesini yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; eş zamanlı olarak takım aşınma durumu izleme tekniğinin takım ömrünü tayin etme konusunda oldukça faydalı olduğunu, eş zamanlı olarak takım aşınma durumu hakkında en güvenilir bilgiyi veren parametrelerin kesme kuvvetleri ve titreşim olduğunu, bu nedenle pratikte en yaygınca kullanılan ve doğruya en yakın sonuçlar veren yöntemlerin kesme kuvvetleri ve titreşim sinyallerini izleme metotları olduğunu ve bu yöntemleri kullanarak elde edilen bilgilerle takım ömrü hakkında fikir sahibi olunabileceğini vurgulamışlardır.

Tansel ve diğ. (2000), alüminyum ve çelik esaslı iki farklı malzemeyi frezeleyerek, talaş kaldırma sırasında oluşan kesme kuvvetleriyle takım aşınması arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Elde ettikleri verileri değerlendirilebilmek amacıyla yapay sinir ağlarını kullanmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; Al esaslı malzemenin işlenmesi sırasında kesme kuvvetlerinin sürekli olarak arttığını, bunun nedeninin

kesme kenarının aşamalı olarak etkinliğini kaybetmesi ve körlenmesi olduğunu, böylece Al esaslı malzemenin işlenmesi durumunda kesme kuvveti değişiminin takımın aşınma durumunu yansıttığını, çelik esaslı malzemenin işlenmesi sırasında ise kesme kuvvetlerinin düzenli bir değişim göstermediğini, bu nedenle çelik esaslı malzemenin işlenmesi sırasında oluşan kesme kuvveti değişiminin takım aşınmasını izlemek için yetersiz olduğunu belirtmişlerdir.

Tomkiewicz (2001), tornalama sırasında yüzeyde oluşan yüzey pürüzlülüğünü eş zamanlı olarak ölçmüş ve elde edilen verileri yapay sinir ağlarını (neural networks) kullanarak değerlendirmiştir. Yaptığı çalışma sonucunda yapay sinir ağları kullanılarak takımın aşınma durumu hakkında yeterli bilgi edinilebileceğini, 2 boyutlu olarak ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin takımın aşınma durumu hakkında bilgi verdiğini, ancak 3 boyutlu olarak ölçülen yüzey pürüzlülüğünün takımın aşınma durumu hakkında daha sağlıklı bilgi verdiğini belirtmiştir.

Kopac ve Sali (2001), tornalama sırasında kesme bölgesinde oluşan sesleri bir mikrofonla algılayarak takım aşınma durumu hakkında eş zamanlı olarak bilgi edinilmesini sağlayan bir yöntem geliştirmişlerdir. Takım aşınmasının eş zamanlı olarak izlenebilmesi için; seramik takımla AISI 1015 malzemenin değişik kesme ve ilerleme hızlarında tornalanması sırasında kesme bölgesinden 0,5 m uzaklıkta oluşan ses basınçlarını bir mikrofonla ölçülmüşler ve analizini yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; talaş kaldırma sırasında meydana gelen gürültü üzerinde ilerleme ve kesme hızı değişimlerinin etkili olduğunu, ilerlemeyle karşılaştırıldığında kesme hızı değişiminin gürültü üzerinde daha küçük bir etkiye sahip olduğunu, ilerleme ve kesme hızı sabit tutulduğunda gürültüdeki değişim nedeninin aşınma olduğunu, takım aşınmasındaki artışın 6 ila 20 kHz arasında kaydedilen seslerin büyüklüğündeki artışla ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Choudhury ve Rath (2002), AISI 1045 malzemenin HSS takım çeliğiyle frezelenmesi sırasında takım ömrünü belirleyebilmek için, ortalama teğetsel kesme kuvveti ile takımın serbest yüzey aşınması arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bu amaçla, her paso sonunda takım aşınması ve frezeleme yapılırken eş zamanlı olarak teğetsel ve radyal kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Yapılan çalışma sonucunda; takım serbest yüzey aşınmasının kesme parametreleri ve teğetsel kesme kuvvetiyle yakından ilişkili olduğunu, teğetsel kesme kuvveti ve kesme parametrelerinin kullanılmasıyla serbest yüzey aşınmasının belirlenebileceğini, kesme derinliği, kesme hızı ve ilerleme hızının artmasıyla serbest yüzey aşınmasının arttığını belirtmişlerdir.

Tay ve diğ. (2002), AISI 4340 malzemeyi TiN kaplı sinterlenmiş karbür takımla tornalayarak, takımındaki maksimum serbest yüzey aşınması ile aşınmış serbest yüzey topografyası arasındaki ilişkiyi incelemişler ve aşınmış serbest yüzey topografyasını tanımlamışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda; takımın serbest yüzey pürüzlülük parametrelerindeki artışla birlikte, serbest yüzey aşınmasının arttığını belirtmişlerdir.

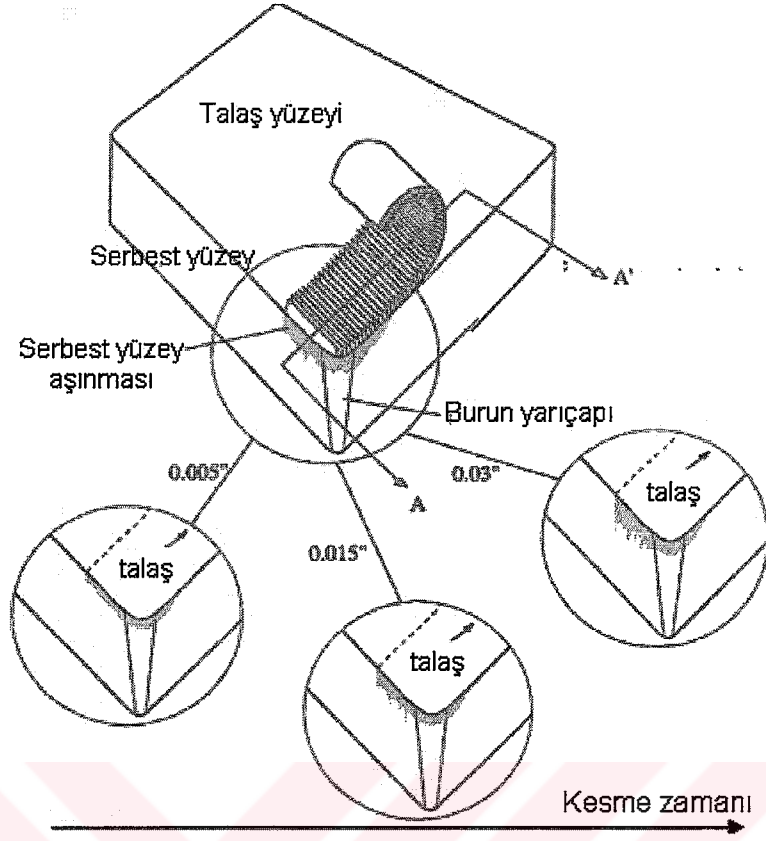
Xiaoli (2002), tornalama sırasında takım aşınmasının eş zamanlı olarak izlenebilmesi için kullanılan akustik emisyon yöntemlerinin genel bir değerlendirmesini ve birbirleriyle kıyaslamasını yapmıştır.

Takımlarda oluşan aşınmanın izlenmesi konusunda yapılan çalışmaların çok büyük bir bölümünü dolaylı (eş zamanlı) takım aşınmasını izleme teknikleri oluşturmaktadır. Bunun temel nedeni, dolaylı takım aşınmasını izleme tekniklerin yeni ve gelişmeye açık yöntemler olmasıdır. Yapılan çalışmalarda, talaş kaldırma sisteminden veya çevreden kaynaklanan bozucu sinyallerin filtre edilebilmesi ve elde edilen sinyallerin doğru bir şekilde yorumlanabilmesi durumunda eş zamanlı takım aşınmasını izleme tekniklerinden oldukça iyi sonuçlar elde edilebildiği değerlendirilmektedir. Ancak yine bu çalışmalarda bozucu sinyallerin filtre edilebilmesinin ve elde edilen sinyallerin doğru olarak yorumlanmasının oldukça zor olduğu da belirtilmektedir. Bu nedenle takım aşınma durumunun izlenebilmesi için dolaysız yöntem tercih edilmiştir.

5.5 Serbest Yüzey Aşınmasının Ölçülmesi

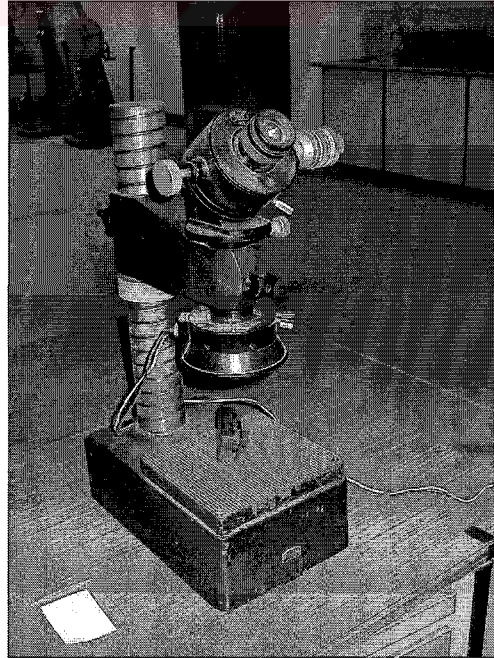
Talaş kaldırma sırasında, kesme şartlarına bağlı olarak plakette değişik aşınma mekanizmaları meydana gelir. Kesme şartlarına bağlı olarak plakette meydana gelen aşınma tipleri ve oluşma mekanizmaları “Bölüm 3.5 Sert Metal Plaketlerde Meydana Gelen Hasar Tipleri” başlığı altında anlatılmıştır.

Plazma nitrülenmiş plaketlerin kullanıldığı kesme şartları incelendiğinde, plaket ömrünün belirlenmesinde etkili olan aşınma tipinin serbest yüzey aşınması olduğu görülecektir. Bu nedenle gerek plazma nitrülenmiş, gerekse nitrülenmemiş plaketlerin talaş kaldırma performansının belirlenebilmesi için talaş kaldırma sonrasında meydana gelen serbest yüzey aşınmasının ölçülmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir. Talaş kaldırma şartlarına bağlı olarak plakette meydana gelen aşınma durumu Şekil 5.5’te verilmiştir.



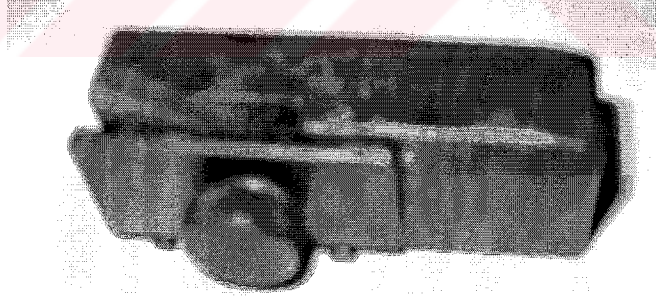
Şekil 5.5 Plaketlerde meydana gelen aşınma durumu (Trent ve Wright, 2000)

Serbest yüzey aşınma miktarının ölçümü için Chyo XK-220 optik mikroskop cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.6).



Şekil 5.6 Serbest yüzey aşınmasının ölçümünde kullanılan optik mikroskop

Serbest yüzey aşınması, plaketin serbest yüzeyinde meydana gelen bir aşınmadır. Nitrürlenmiş plaketlerin serbest yüzeyi incelenecek olursa; serbest yüzeyin plaketin yan alın yüzeyine göre 11° 'lik bir açıya, tabana göre ise 120° 'lik bir açıya sahip olduğu görülür. Bu durum, serbest yüzey aşınma miktarı ölçülecek plaketin herhangi bir aparat kullanılmadan mikroskop tablasına yerleştirilmesi durumunda, plaketin serbest yüzeyinin mikroskop objektifine paralel olmasını engeller. Böyle bir durumda serbest yüzey aşınma miktarının doğrulukta ölçülebilmesi mümkün değildir. Çünkü plaketin serbest yüzeyi ile mikroskop tablası arasındaki sıfırdan farklı olan açı, aşınma bölgesi büyüklüğünü ifade eden görüntünün mikroskop objektifinden doğrulukla görüntülenmesini engelleyecektir. Bu nedenle, mikroskop tablasına yerleştirilen plaket serbest yüzeyinin mikroskop objektifine paralel hale getirilmesini, yani mikroskoptan bakıldığında serbest yüzeyin net bir şekilde görüntülenebilmesini sağlayan bir aparata ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla bir aparat yapılmıştır. Şekil 5.7 de gösterilen bu aparat, $15 \times 25 \times 60$ boyutlarındaki bir dikdörtgenler prizması üzerine 4,76 mm kalınlığındaki plaketin rahatça girebilmesi için yeterli genişlikte ve tabana göre 30° 'lik eğimi olan bir kanalın açılması, serbest yüzey açısı için tabanının 11° 'lik eğimde işlenmesi, kanala yerleştirilen plaketin mikroskop objektifine hep aynı mesafede olmasını sağlayan bir dayama pimi ve kanala yerleştirilen plaketin sıkılmasını sağlayan bir vidalı bir baskı plakasının monte edilmesi suretiyle yapılmıştır.



Şekil 5.7 Serbest yüzey aşınmasının ölçülmesi sırasında kullanılan aparat

Talaş kaldırma deneyleri sonrasında; nitrürlenmiş plaketlerin serbest yüzeyinde meydana gelen aşınma miktarları Tablo 5.6'da, nitrülenmemiş plaketlerin serbest yüzeyinde meydana gelen serbest yüzey aşınma miktarları ise Tablo 5.7'de verilmiştir. Tablo 5.6 ve Tablo 5.7'deki değerler; optik mikroskop görüntüsünden okunan direkt değerler olmayıp, mikroskop görüntüsünde mevcut olan yardımcı çizgilerle okunan değer mikroskop tablası ile objektifi arasındaki mesafeye bağlı olarak belirlenen ölçek faktörüyle çarpılması sonucunda elde edilen değerlerdir.

Tablo 5.6 Talaş kaldırma nedeniyle nitrürlenmiş plakettein serbest yüzeyinde meydana gelen aşınma miktarları

Numune No	Serbest Yüzey Aşınma Miktarları (µm)			
	1. talaş kaldırma deneyi sonrası	2. talaş kaldırma deneyi sonrası	3. talaş kaldırma deneyi sonrası	4. talaş kaldırma deneyi sonrası
1	457,0	347,5	548,4	620,7
2	420,8	319,9	504,6	572,2
3	353,2	268,5	424,6	480,8
4	376,0	286,6	448,4	511,2
5	374,1	284,6	442,7	508,4
6	442,7	337,0	531,2	602,6
7	403,6	308,4	484,6	551,2
8	321,8	245,6	385,6	439,8
9	348,4	265,6	417,9	475,0
10	341,8	260,8	411,3	465,5
11	435,1	325,6	524,6	584,5
12	415,1	316,1	498,8	564,5
13	367,5	278,9	437,9	496,9
14	224,7	172,3	270,4	305,6
15	283,7	210,4	336,1	385,6
16	280,8	205,6	332,2	381,8
17	389,4	292,3	464,6	530,3
18	257,0	196,1	307,5	350,3
19	147,6	112,3	178,0	201,8
20	197,1	169,5	237,0	268,5
21	187,5	151,4	236,1	267,5
22	293,2	216,1	348,4	393,2
23	88,5	68,5	107,6	120,9
24	129,5	105,7	165,6	187,5
25	170,4	130,4	204,7	232,3
26	161,8	121,9	195,2	219,9
27	468,4	356,0	561,7	636,9
28	430,3	328,4	513,1	585,5
29	384,6	293,2	473,1	517,9
30	387,5	294,7	477,9	527,4
31	385,6	294,2	476,0	526,5
32	449,3	342,7	539,8	612,1
33	413,2	315,1	496,9	563,6
34	373,2	283,7	444,6	506,5
35	386,5	294,2	463,6	525,5
36	379,8	288,5	456,0	516,0
37	436,0	332,2	523,6	593,1
38	397,9	303,7	477,0	539,8
39	353,2	269,4	424,6	481,7

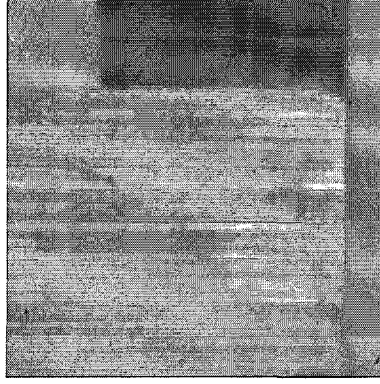
Tablo 5.6 Talaş kaldırma nedeniyle nitrülenmiş plakelerin serbest yüzeyinde meydana gelen aşınma miktarları (devamı)

Numune No	Serbest Yüzey Aşınma Miktarları (µm)			
	1. talaş kaldırma deneyi sonrası	2. talaş kaldırma deneyi sonrası	3. talaş kaldırma deneyi sonrası	4. talaş kaldırma deneyi sonrası
40	367,5	279,9	440,8	500,8
41	425,5	322,7	504,6	576,0
42	353,2	268,5	423,6	480,8
43	301,8	230,4	365,6	411,3
44	340,8	258,9	408,4	463,6
45	329,4	248,5	392,2	448,4
46	324,6	245,6	383,7	438,9
47	187,5	143,8	228,5	253,2
48	278,9	213,2	333,2	379,8
49	261,8	198,0	312,3	352,2

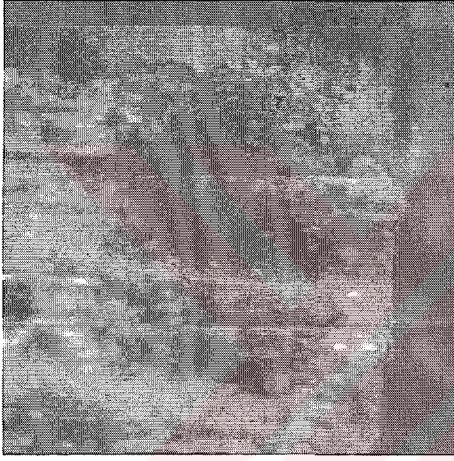
Tablo 5.7 Talaş kaldırma nedeniyle nitrülenmemiş plakelerin serbest yüzeyinde meydana gelen aşınma miktarları

Numune No	Serbest Yüzey Aşınma Miktarları (µm)			
	1. talaş kaldırma deneyi sonrası	2. talaş kaldırma deneyi sonrası	3. talaş kaldırma deneyi sonrası	4. talaş kaldırma deneyi sonrası
101	484,6	361,8	579,8	659,7
102	476,0	362,7	573,1	660,7
103	476,0	369,4	579,8	660,7
104	476,0	361,8	575,0	659,7
105	481,7	361,8	572,2	662,6
106	479,8	371,3	577,9	660,7
107	482,7	369,4	579,8	660,7
108	486,5	365,6	576,0	659,7
109	481,7	370,3	579,8	660,7
110	484,6	369,4	573,1	662,6
Ort.	481,0	366,3	576,6	660,8

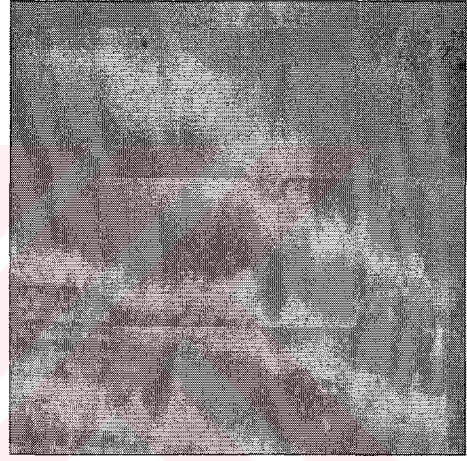
Şekil 5.8'de, talaş kaldırma sonrasında plakette meydana gelen serbest yüzey aşınmaların mikroskop görüntüsü altında elde edilen görüntüleri verilmiştir.



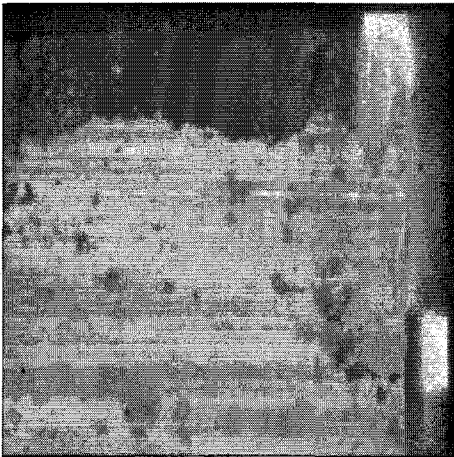
a. Talaş kaldırma öncesinde plakette serbest yüzeyi



b- 23 nolu plaket 1 nci talaş kaldırma deneyi sonrası serbest yüzey aşınması



c- Nitritlenmemiş plakette 1 nci talaş kaldırma deneyi sonrası serbest yüzey aşınması



d- 19 nolu plaket 3 ncü talaş kaldırma deneyi sonrası serbest yüzey aşınması



c- Nitritlenmemiş plakette 3 ncü talaş kaldırma deneyi sonrası serbest yüzey aşınması

Şekil 5.8 Plakette serbest yüzeylerinde meydana gelen aşınma durumu (100x)

5.6 Sürtünme Katsayısının Ölçülmesi

Plazma nitrürleme alanında yapılan çalışmalarda, nitrürleme şartlarına bağlı olarak tribolojik özelliklerin değiştiği belirtilmektedir.

Peng (1989), nitrokarbürleme ve plazma nitrürleme gibi yüzey sertleştirme yöntemlerinin, DIN 5CrMnMo sıcak iş çeliğinin abrazyon aşınma direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. Yaptığı çalışma sonucunda; geleneksel yüzey sertleştirme yöntemleriyle karşılaştırıldığında plazma nitrürlemenin abraziv aşınma direncinde dikkate değer bir artış sağladığını, aynı zamanda düşük bir sürtünme katsayısı ve plastik deformasyona karşı yüksek bir direnç sağlandığını, plazma nitrürleme sonrasında elde edilen nitrürlerin yayımı ve büyüklüğünün gaz nitrürlemeye göre daha homojen olduğunu, nitrokarbürleme ile elde edilen yüzey özelliklerinin de geleneksel yüzey sertleştirme yöntemlerine göre daha iyi olduğunu, ancak plazma nitrürlemeyle elde edilen yüzey özellikleri kadar iyi olmadığını belirtmiştir.

Karamış (1991), farklı sıcaklık ve sürelerde plazma nitrürlenmiş AISI 722M24 (En40B) çeliğinin kuru sürtünme şartları altındaki tribolojik davranışını incelemiştir. Yaptığı inceleme sonucunda; nitrürlenmiş numunenin aşınma direncindeki artışın nitrürleme süresi ve sıcaklığına göre farklılık gösterdiğini, aşınma hızının yüzey sertliği ve difüzyon tabakası kalınlığının bir fonksiyonu olduğunu, ancak yüzey sertliğinin aşınma hızı üzerindeki etkisinin daha büyük olduğunu, yağlayıcının bulunduğu ortamlarda beyaz tabakanın gözenekli yapısının yağ deposu olarak görev yapması nedeniyle tribolojik özellikleri iyileştirdiği, ancak kuru sürtünme koşullarında beyaz tabakanın parçalanarak abraziv aşınmaya katkıda bulunduğu ve bu nedenle kuru sürtünme koşulları altında çalışacak yüzeylerde beyaz tabakanın oluşmasının istenmediğini belirtmiştir.

Karamış (1993), 100 saat süreyle 3 farklı sıcaklıkta (550-570-590°C) nitrürlenmiş AISI 722M24 (En40B) çeliğinin yüksek sıcaklıktaki aşınma davranışını incelemiştir. Yaptığı çalışma sonucunda; plazma nitrürlemeyle numunenin aşınma direncinin artırılabilirliğini, nitrürlenen parçanın kimyasal bileşiminin de yüzey sertliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu, nitrür oluşturma kabiliyeti yüksek alaşım elementleri içeren malzemelerde daha yüksek yüzey sertliği elde edilebildiğini, bileşim tabakası kalınlığının artmasıyla aşınma hızının arttığını, yüksek yüzey sertliği ve ince bir bileşim tabakasına sahip bir yüzeyin aşınma davranışının daha iyi olduğunu, nitrürlerin sadece yüksek yüzey sertliği değil aynı zamanda düşük bir dinamik sürtünme katsayısı sağladığını açıklamıştır.

Lee ve Shih (1994), AISI 304 ve AISI 410 paslanmaz çelikleri ve AISI 4140 düşük alaşımlı çeliği 560°C sıcaklıkta 50 saat süreyle plazma nitrürlenmişler ve elde ettikleri nitrürlenmiş tabakanın bileşimini ve mikroyapısını incelemişlerdir. Nitrürlenme öncesinde aşınma hızı ve sürtünme katsayısı değerinin büyükten küçüğe doğru sırasıyla AISI 4140, AISI 410 ve AISI 404 şeklinde olurken, nitrürlenme sonrasındaki sıralamanın AISI 304, AISI 410 ve AISI 4140 şeklinde değiştiğinin ifade etmişlerdir.

Lei ve diğ. (1997), DIN 9SiCr düşük alaşımlı çeliği 250°C sıcaklıkta 4 saat süreyle plazma nitrürlenmişler ve kuru abrasiv sürtünme koşullarında değişik yükler altında aşınma davranışını incelemişlerdir. Deneyler sonucunda; yüzey sertliğinin yaklaşık 2 kat arttığını, nitrülenmemiş numuneye göre nitrülenmiş numunenin abrasiv aşınma direncinin arttığını, aşınma direncindeki bu artışın nitrür ve nitrojen içeren katı çözeltilerin oluşumundan kaynaklandığını, ancak yüksek yükler altında (>55 N) çalışan yüzeyler için nitrürlenmenin önemli bir fayda sağlamadığını belirtmişlerdir.

Karamış ve Gerçekcioğlu (2000), AISI H13 ve 722M24 takım çeliklerini değişik nitrürlenme sıcaklıkları ve farklı sürelerde plazma nitrürlenerek numunelerin oda sıcaklığındaki ve yüksek sıcaklıklardaki aşınma davranışını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda; artan sıcaklıkla birlikte yüzey pürüzlülüğünün azalmasına rağmen sürtünme katsayısının yükseldiğini ve uzun işlem süreleri sonucunda elde edilen nitrür tabakasının kısa işlem süresinde elde edilmiş tabakasına göre daha uzun süre daha düşük aşınma hızına sahip olduğunu belirtmişlerdir.

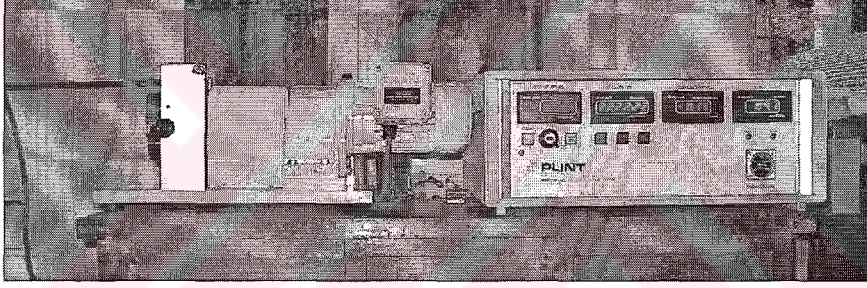
Nitrürlenme alanında yapılan çalışmalarda sürtünme katsayısının nitrürlenme şartlarına bağlı olarak değiştiği belirtilmektedir. Bu nedenle, nitrürlenme şartlarının nitrülen plaketlerdeki sürtünme katsayısını ne derecede ve nasıl değiştirdiğini görebilmek amacıyla, nitrürlenme sonrasında plaketlerin sürtünme katsayıları ölçülmüştür. Sürtünme katsayısı yüzeyler arasındaki izafi hız, yüzey pürüzlülüğü, yağlama şartları, normal kuvvet, sıcaklık, malzeme çifti ve ortam şartları gibi birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada, sürtünme katsayısını etkileyen tüm bu faktörlerin değişimine göre nitrülenmiş plaketlerdeki sürtünme katsayısının durumu incelenmemiş, sadece belli bir sürtünme şartı altında nitrülenmiş ve nitrülenmemiş plaketlerin sürtünme katsayıları arasındaki farklar incelenmiştir.

Sürtünme katsayısı ölçümleri, genel amaçlı pin-on-disk tipi sürtünme ölçüm cihazıyla yapılmıştır (Şekil 5.9). Bu cihaz; biri sabit diğeri dönel iki disk arasındaki sürtünme kuvvetinin ölçülmesi ve bilinen normal kuvvete göre sürtünme katsayısının hesaplanması esasına göre çalışmaktadır. Sürtünme katsayısı ölçülecek

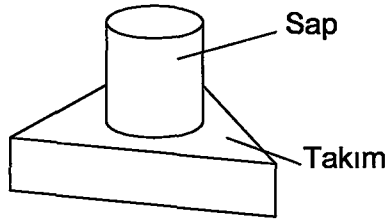
numunelerin cihazın sabit kısmına bağlanabilmesi için; 10 mm çap ve 8 mm yüksekliğindeki silindirik parçalar hazırlanmış ve bu parçalar “sap” görevi yapacak şekilde metal yapıştırıcı kullanılarak plakelere yapıştırılmıştır (Şekil 5.10). Daha sonra bu plakeler cihaza bağlanmış ve sürtünme kuvvetleri ölçülmüştür.

Oda sıcaklığında, kuru sürtünme şartlarında, çelik-sinterlenmiş karbür malzeme çifti arasında, 45 N'luk normal kuvvet ve 600 d/d'lık dönme hızı altında tüm numunelerdeki sürtünme kuvveti ölçülmüştür. Kuvvet sensörleri yardımıyla ölçülen sürtünme kuvveti dijital olarak okunmuş ve Denklem (5.1) kullanılarak sürtünme kuvveti hesaplanmıştır. Denklem (5.1)'de μ sürtünme katsayısını, F_s cihazdan okunan sürtünme kuvvetini ve F_n normal kuvveti ifade etmektedir.

$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad (5.1)$$



Şekil 5.9 Genel amaçlı pin-on-disk tipi sürtünme katsayısı ölçüm cihazı



Şekil 5.10 Sürtünme katsayısının ölçülebilmesi maksadıyla imal edilen ve plakelere yapıştırılan “sap”

Sürtünme kuvvetinin ölçüldüğü sürtünme şartları incelendiğinde, plakelerin kullanıldığı gerçek çalışma koşullarında meydana gelen sürtünme koşullarından farklı olduğu görülecektir. Özellikle oda sıcaklığında ölçülen sürtünme kuvveti ile talaş kaldırma nedeniyle oluşan yüksek sıcaklıklar altındaki sürtünme kuvveti farklı olacaktır. Sürtünme kuvvetinin ölçüldüğü sürtünme şartları incelendiğinde sıcaklık,

karşı malzeme, normal kuvvet ve izafi hızın plakelerin gerçek kullanım şartlarından farklı olduğu, kuru sürtünme şartlarının ise plakelerin kullanıldığı şartlarla aynı olduğu görülecektir. Yapılan inceleme itibariyle, sürtünme şartlarına ilişkin göreceli bir değerlendirme yapılması amaçlandığından böyle bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Sürtünme katsayısının talaş kaldırma şartları altındaki değerinden daha ziyade, iyon nitrürleme parametrelerine bağlı olarak değişim miktarı araştırıldığından bu şartlar altındaki ölçümün yeterli ve açıklayıcı sonuçlar verdiği değerlendirilmektedir.

Her bir plaket için ölçülen sürtünme kuvveti ve Denklem (5.1) kullanılarak hesaplanan sürtünme katsayısı değerleri Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8 Nitrürlenmiş ve nitrülenmemiş plakelerin sürtünme katsayıları

Numune No	Sürtünme Kuvveti (N)	Sürtünme Katsayısı	Numune No	Sürtünme Kuvveti (N)	Sürtünme Katsayısı
1	18,5	0,411	26	8,4	0,187
2	16,2	0,360	27	19,2	0,427
3	14,4	0,320	28	17,3	0,384
4	15,8	0,351	29	15,8	0,351
5	16,8	0,373	30	16,7	0,371
6	17,6	0,391	31	17,6	0,391
7	14,9	0,331	32	18,2	0,404
8	12,4	0,276	33	16,1	0,358
9	14,4	0,320	34	13,4	0,298
10	15,0	0,333	35	14,9	0,331
11	17,8	0,396	36	15,4	0,342
12	16,4	0,364	37	17,3	0,384
13	13,3	0,296	38	13,9	0,309
14	9,9	0,220	39	10,9	0,242
15	11,0	0,244	40	13,4	0,298
16	11,9	0,264	41	16,2	0,360
17	14,7	0,327	42	11,3	0,251
18	10,6	0,236	43	8,7	0,193
19	7,7	0,171	44	10,2	0,227
20	9,2	0,204	45	11,3	0,251
21	10,8	0,240	46	12,2	0,271
22	11,1	0,247	47	7,2	0,160
23	6,6	0,147	48	8,6	0,191
24	7,2	0,160	49	9,0	0,200
25	7,9	0,176	105-106*	21,5	0,478

(*) Nitrülenmemiş plakeler

6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRMESİ

6.1 Deney Sonuçlarının İstatistiksel Analizi

Yapılan çalışmada; deneysel ölçümler sonucunda elde edilen verilerin analizi ve yorumlanması amacıyla bilinen istatistik araçlarından korelasyon analizi ve ortalama değerlere bağlı değişim analizi kullanılmıştır.

6.1.1 Korelasyon Analizi

İki yada daha fazla değişken arasındaki ilişkinin gücünü gösteren ölçüye korelasyon, bu ilişkiyi rakamsal olarak ifade eden katsayıya ise korelasyon katsayısı (r) denir (Newbold, 2001). Diğer bir ifadeyle korelasyon, değişkenler arasındaki ilişkinin beraber değişme derecesinin bir ölçüsüdür (Yurtsever, 1984). Korelasyon katsayısı aynı zamanda regresyon doğrusunun “en iyi uyma” derecesini de belirtmektedir (Akkurt, 1999). Korelasyon, değişkenler arasındaki ilişkinin ortalamasını veren bir analizdir.

Korelasyon katsayısı $-1 < r < 1$ arasında değişir. Korelasyon katsayısının $r=0$ olması değişkenler arasında bir ilişki olmadığını, korelasyon katsayısının $r=1$ olması durumunda değişkenler arasında aynı yönlü tam doğrusal bir ilişki olduğunu ve korelasyon katsayısının $r=-1$ olması ise değişkenler arasında ters yönlü tam doğrusal ilişki olduğunu ifade etmektedir. Korelasyon katsayısının mutlak değeri ne kadar büyük ise, değişkenler arasındaki ilişki de o kadar güçlüdür.

Korelasyon katsayılarının mukayesesine ilişkin yanlış yorumlar yapılabilir. Örneğin; $r=0,60$ olan bir korelasyon, $r=0,20$ olarak hesaplanan bir korelasyondan üç misli daha iyi gibi anlaşılabilir. Oysa ki böyle bir durumda karşılaştırma yapabilmek için r^2 ifadesi kullanılmalıdır. Çünkü r^2 ifadesi y sapmalarının x sapmalarından da oluştuğunu gösterir (Akkurt, 1999). Buna göre; $r=0,60$ korelasyon için $r^2=0,60^2=0,36$ ve $r=0,2$ korelasyon için $r^2=0,20^2=0,04$ yazılır ve karşılaştırma yapılırsa, $r=0,60$ olan korelasyon $r=0,2$ olan korelasyona göre $0,36/0,04=9$ kat daha iyidir.

Korelasyon katsayısı Denklem (6.1) kullanılarak hesaplanabilir.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - n \bar{y}^2 \right)}} \quad (6.1)$$

Denklem (6.1)'de; x ve y değişkenleri, n değişken sayısını, $\bar{x}$ ve $\bar{y}$ değişkenlerin ortalamasını ifade etmektedir.

Plazma nitrürleme parametreleri ile deney sonuçları arasındaki korelasyon katsayıları Tablo 6.1'de verilmiştir. Korelasyon katsayıları $\alpha=0,05$ (%95) anlamlılık seviyesi için hesaplanmıştır. Tablo 6.1'de verilen korelasyon katsayılarından, %95 itimat seviyesine göre anlamlı olan değerler gri kutucuklarda, anlamlılık seviyesinin altında kalan değerler ise renksiz kutucuklar içinde verilmiştir.

Plazma nitrürleme sonrasında değişen özellikler (yüzey sertliği, tabaka kalınlıkları, sürtünme katsayısı, serbest yüzey aşınması ve ağırlık kayıpları) ile plazma nitrürleme parametreleri korelasyonunun büyükten küçüğe doğru sıralamasının nitrürleme sıcaklığı, gaz karışım oranı ve nitrürleme süresi şeklinde olduğu görülmektedir. Deney sonuçları ile en yüksek korelasyona sahip olan nitrürleme sıcaklığı aynı zamanda deney sonuçlarının tamamıyla anlamlı korelasyona sahiptir. Nitrürleme süresi sadece difüzyon tabakası kalınlığı ile anlamlı bir korelasyona sahipken, gaz karışım oranı yüzey sertliği, sürtünme katsayısı ve difüzyon tabakası kalınlığı dışındaki tüm deney sonuçlarıyla anlamlı bir korelasyona sahiptir. Bu durum plazma nitrürlemenin difüzyon esaslı bir mekanizma olması ve plazma nitrürleme sonucunda ortaya çıkan özelliklerin nitrürleme atmosferindeki özelliklere, diğer bir ifadeyle gaz karışım oranına bağlı olmasıyla açıklanabilir. Plazma nitrürleme süresi de nitrürleme sonucunda ortaya çıkan özellikler üzerinde etkilidir. Ancak uzun nitrürleme süreleri sonrasında malzemenin yüzey özelliklerindeki değişim hızının azalması, deney sonuçları ile nitrürleme süresi arasındaki korelasyonun düşük olmasına neden olmaktadır.

Tablo 6.1 incelendiğinde gaz karışım oranı ile deney sonuçları arasındaki anlamlı tüm korelasyonun pozitif yönde olduğu görülmektedir. Yüzey sertliği ile gaz karışım oranı arasında korelasyon ters yönlü olmakla birlikte, kabul edilen anlamlılık seviyesinin altındadır. Bu durum gaz karışım oranındaki hidrojen&nitrojen oranı ile açıklanabilir. Gaz karışım oranındaki nitrojen miktarının artmasıyla birlikte yüzey sertliği azalmaktadır. Bunun nedeninin, artan nitrojen miktarıyla birlikte azalan

hidrojen nedeniyle yüzey aktifleşmesinde görülen azalma olduğu değerlendirilmektedir. Gaz karışım oranının deney sonuçları ile korelasyonunun genel olarak düşük olduğu, anlamlı en yüksek korelasyonu beyaz tabaka kalınlığı ($r=0,56$) ve anlamlı en düşük korelasyonu 4 numaralı talaş kaldırma deneyi sonucunda ölçülen ağırlık kaybı ($r=0,30$) ile oluşturduğu görülmektedir.

Tablo 6.1 Değişkenler arasındaki korelasyon katsayıları

KORELASYON KATSAYISI												
(*)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-0,25	0,32	0,35	0,34	0,30	0,36	0,36	0,37	0,36	0,17	-0,15	0,56
2	0,75	-0,72	-0,72	-0,74	-0,73	-0,71	-0,72	-0,72	-0,71	-0,83	0,58	0,46
3	-0,07	-0,20	-0,21	-0,20	-0,18	-0,24	-0,24	-0,23	-0,23	-0,14	0,68	0,11
4		-0,93	-0,92	-0,93	-0,93	-0,91	-0,91	-0,91	-0,91	-0,91	0,49	0,18
5			0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,99	0,90	-0,70	-0,09
6				0,99	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,91	-0,71	-0,07
7					0,99	0,99	0,98	0,99	0,99	0,91	-0,70	-0,09
8						0,98	0,97	0,98	0,97	0,90	-0,68	-0,10
9							0,99	0,99	0,99	0,91	-0,72	-0,07
10								0,99	0,99	0,91	-0,73	-0,07
11									0,99	0,92	-0,72	-0,07
12										0,91	-0,72	-0,07
13											-0,71	-0,37
14												0,34

(*) Değişken Numarası

1. Gaz karışım oranı

2. Sıcaklık

3. Süre

4. Yüzey sertliği

5. 1. talaş kaldırma sonrası ağırlık kaybı

6. 2. talaş kaldırma sonrası ağırlık kaybı

7. 3. talaş kaldırma sonrası ağırlık kaybı

8. 4. talaş kaldırma sonrası ağırlık kaybı

9. 1. talaş kaldırma sonrası aşınma

10. 2. talaş kaldırma sonrası aşınma

11. 3. talaş kaldırma sonrası aşınma

12. 4. talaş kaldırma sonrası aşınma

13. Sürtünme katsayısı

14. Difüzyon tabakası kalınlığı

15. Bileşim (beyaz) tabakası kalınlığı

Nitrürleme sıcaklığı ile deney sonuçlarından yüzey sertliği, difüzyon tabakası kalınlığı ve beyaz tabaka kalınlığı pozitif yönde korelasyona sahipken, diğer deney sonuçları ile negatif korelasyona sahiptir. Plazma nitrürlemenin difüzyon esaslı bir mekanizma olması nedeniyle ve difüzyonun önemli ölçüde sıcaklığa bağlı olmasının böyle bir sonucu oluşturduğu düşünülmektedir. Nitrürleme sıcaklığı en yüksek

korelasyonu sürtünme katsayısı ($r=-0,83$) ve anlamlı en düşük korelasyonu bileşim tabakası kalınlığı ($r=0,46$) ile sağlamaktadır.

Deney sonuçları ile nitrürleme süresi arasındaki tek anlamlı korelasyona sahip sonucun difüzyon tabakası kalınlığı olduğu ve bu ilişkinin pozitif yönde olduğu görülmektedir. Uzun nitrürleme süreleri sonrasında malzemenin yüzey özelliklerindeki değişim hızının azalması, deney sonuçları ile nitrürleme süresi arasındaki korelasyonun düşük olmasına neden olmaktadır. Nitrürleme süresi ile difüzyon tabakası kalınlığı arasındaki korelasyonun pozitif olmasının nedeni, artan süre ile birlikte daha fazla difüzyonun gerçekleşmesi nedeniyle difüzyon tabakası kalınlığının artmasıdır.

Deney sonuç verilerinden, aşınma deney sonuçları ile serbest yüzey aşınma değerleri arasındaki korelasyonun oldukça yüksek olduğu (yaklaşık $r=1$) görülmektedir. Bunun nedeninin, aşınma ve aşınma sonrasında ölçülen ağırlık kayıplarının birbiriyle yakından ilişkili olmasından ve plaketteki etkili aşınma mekanizmasının serbest yüzey aşınması olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

6.1.2 Ortalama Değer Analizi

Plazma nitrürleme deneyleri, üç nitrürleme parametresinin (nitrürleme sıcaklığı, nitrürleme süresi ve gaz karışım oranı) sistematik olarak değiştirilmesiyle oluşturulan nitrürleme şartları altında yapılmıştır. Plazma nitrürleme sonrasında plakette meydana gelen değişimler (yüzey sertliğinin değişimi, yüzeyde belli kalınlıklarda tabakaların oluşması, sürtünme katsayısındaki değişim) ve talaş kaldırma sonrasında plakette oluşan serbest yüzey aşınması ile ağırlık azalmaları ölçülmüştür. Bu bölümde, plazma nitrürleme parametreleri ile plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak değişen özellikler (yüzey sertliği, tabaka kalınlıkları, sürtünme katsayısı, serbest yüzey aşınması, ağırlık kaybı) arasındaki değişim incelenmiştir.

Plazma nitrürleme şartlarının belirlenmesinde nitrürleme sıcaklığının 5, nitrürleme süresinin 4 ve gaz karışım oranının 2 farklı değeri dikkate alınmıştır. Böylece $5 \times 4 \times 2 = 40$ farklı plazma nitrürleme şartı belirlenmiştir. Ancak yapılan deneyler incelendiğinde, bazı değişkenlerin (örneğin bazı deneylerde nitrürleme süresi için 5 farklı değer dikkate alınmıştır) ara değerleri içinde deney yapıldığı ve böylelikle 49 farklı plazma nitrürleme şartının belirlendiği görülecektir. Plazma nitrürleme parametreleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Plazma nitrürleme parametreleri ile nitrürleme

şartlarına bağlı olarak değişen özellikler arasındaki değişim incelenirken nitrürleme sıcaklığının 5 (500-550-600-650-700°C), nitrürleme süresinin 4 (1-2-4-8 saat) ve gaz karışım oranının 2 (%75H₂+%25N₂, %50H₂+%50N₂) farklı değerinin olduğu, böylelikle 40 farklı plazma nitrürleme şartının olduğu dikkate alınmıştır.

Talaş kaldırma deneyleri 4 farklı kesme şartı altında yapılmıştır. Bu nedenle plakelerde kesme şartlarına bağlı olarak 4 farklı serbest yüzey aşınması ve ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Araştırılan konunun özelliği gereği, serbest yüzey aşınması ve ağırlık kaybı değişimi üzerinde kesme şartlarının etkisinden daha ziyade plazma nitrürleme şartlarının etkisi dikkate alınmıştır. Bu nedenle 4 farklı serbest yüzey aşınması ve 4 farklı ağırlık kaybının ortalaması alınmıştır. Böylece plazma nitrürleme parametreleri ile ortalama serbest yüzey aşınması ve ortalama ağırlık kaybı ilişkilendirilmiştir. Tablo 6.2’de deney sonuçları toplu olarak verilmiştir.

Değişim analizinin sonuçları Tablo 6.3’te verilmiştir. Tablo 6.3’te plazma nitrürleme parametreleri sütunlar halinde, nitrürleme şartlarına bağlı olarak değişen özellikler ise satırlar halinde verilmiştir. Herhangi bir satır ile sütunun kesiştiği hücrede kalan sayı iki faktör arasındaki değişimi ifade etmektedir. Değişim analizi sonuçları incelendiğinde; yüzey sertliği üzerinde en büyük etkiye sahip olan plazma nitrürleme parametresinin sıcaklık olduğu görülmektedir. Sıcaklığı, sırasıyla gaz karışım oranı ve nitrürleme süresi takip etmektedir. Ağırlık kaybı, serbest yüzey aşınması ve sürtünme katsayısı ile en büyük etkileşimi yine nitrürleme sıcaklığı sağlamakla birlikte, diğer nitrürleme parametreleriyle bu faktörler arasındaki değişim yaklaşık aynıdır. Difüzyon tabakası kalınlığı üzerinde en büyük etkiye sahip olan plazma nitrürleme parametresi zaman olmakla birlikte, zamanı sırasıyla sıcaklık ve gaz karışım oranı takip etmektedir. Ancak gaz karışım oranı etkisi ile sıcaklığın etkisi arasında oldukça önemli bir fark vardır. Beyaz tabaka kalınlığı üzerinde gaz karışım oranı ile sıcaklığın etkisi aynıdır ve nitrürleme süresinin etkisinden daha büyüktür.

Şekil 6.1’de değişim analizi sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 6.1 incelendiğinde grafiklerdeki hiçbir doğrunun yatay eksene paralel olmadığı görülür. Bu nedenle plazma nitrürleme parametrelerinin tamamı, plazma nitrürleme sonucunda değişen özelliklerin üzerinde etkilidir. Ancak nitrürleme parametrelerinin değişen özellikler üzerindeki etki derecesi farklıdır. Şekil 6.1’deki herhangi bir doğrunun eğimi ne kadar fazla ise, bu doğrunun ifade ettiği parametrenin ilgili sonuç üzerindeki etkisi o derece büyüktür. Bunun tersi de doğrudur. Şekil 6.1’de bazı doğruların eğiminin pozitif, bazılarının ise negatif olduğu görülmektedir. Bu durum, ilgili doğrunun işaret ettiği değişimin aynı yönlü (eğim pozitif) yada ters yönlü (eğim

negatif) olduğunu göstermektedir. Örneğin Şekil 6.1.a'da gaz karışım oranı ile yüzey sertliğini değişimini ifade eden A doğrusunun eğimi negatiftir. Bu durum gaz karışım oranı ile yüzey sertliği arasındaki değişimin ters yönlü olduğunu göstermektedir. Yüzey sertliğinin nitrürleme süresi ve sıcaklığı ile olan değişimi ise aynı yönlüdür.

Tablo 6.2 Deney sonuçları

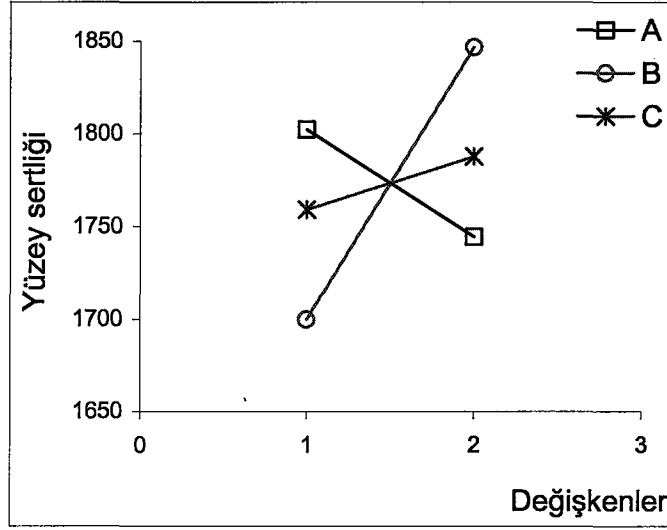
PLAZMA NİTRÜRLEME PARAMETRELERİ			ÇIKIŞ DEĞERLERİ					
Gaz karışım oranı	Sıcaklık (°C)	Süre (saat)	Yüzey sertliği (HV)	Ort. ağırlık kayıpı (gr)	Ort. serbest yüzey aşınması (mm)	Sürtünme katsayısı	Difüzyon tabakası kalınlığı (mikron)	Beyaz tabaka kalınlığı (mikron)
%75H ₂ +%25N ₂	500	1	1616	0,0745	0,4934	0,411	84	0
		2	1677	0,0686	0,4544	0,360	136	0
		4	1783	0,0576	0,3818	0,320	210	0
		8	1658	0,0600	0,4025	0,373	313	0
	550	1	1640	0,0722	0,4784	0,391	129	0
		2	1702	0,0660	0,4370	0,331	209	0
		4	1832	0,0526	0,3482	0,276	320	0
		8	1677	0,0607	0,3699	0,333	480	0
	600	1	1716	0,0663	0,4486	0,364	173	0
		2	1769	0,0590	0,3953	0,296	281	0
		4	1847	0,0454	0,2433	0,220	432	0
		8	1729	0,0534	0,3001	0,264	646	0
	650	1	1729	0,0633	0,4192	0,327	218	0
		2	1945	0,0419	0,2777	0,236	352	0
		4	1899	0,0329	0,2180	0,204	543	0
		8	1804	0,0318	0,2106	0,240	813	0
	700	1	1891	0,0472	0,3127	0,247	263	0
		2	2224	0,0146	0,0964	0,147	424	0
		4	1961	0,0278	0,1845	0,176	654	0
		8	1945	0,0264	0,1747	0,187	979	0
%50H ₂ +%50N ₂	500	1	1598	0,0764	0,5058	0,427	74	0
		2	1658	0,0701	0,4643	0,384	121	0
		4	1735	0,0629	0,4172	0,351	186	0
		8	1640	0,0625	0,4206	0,391	279	0
	550	1	1628	0,0734	0,4860	0,404	114	0
		2	1683	0,0675	0,4472	0,358	185	0
		4	1755	0,0607	0,4020	0,298	285	0
		8	1652	0,0618	0,4101	0,342	427	0

Tablo 6.2 Deney Sonuçları (devamı)

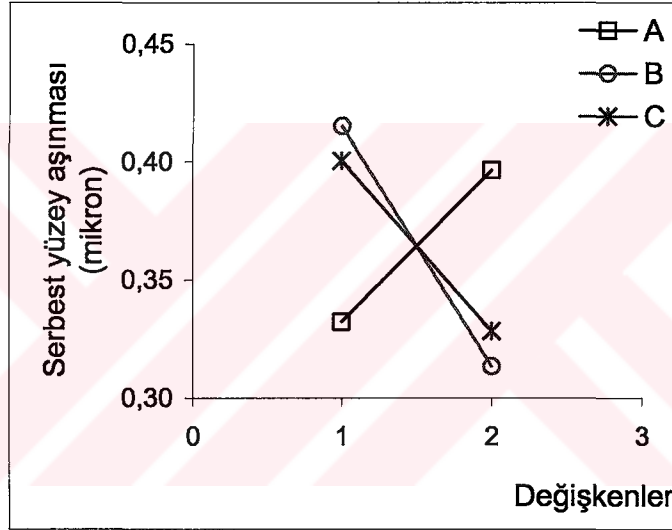
PLAZMA NİTRÜRLEME PARAMETRELERİ			ÇIKIŞ DEĞERLERİ					
Gaz karışım oranı	Sıcaklık (°C)	Süre (saat)	Yüzey sertliği (HV)	Ort. ağırlık kaybı (gr)	Ort. serbest yüzey aşınması (mm)	Sürtünme katsayısı	Difüzyon tabakası kalınlığı (mikron)	Beyaz tabaka kalınlığı (mikron)
%50H ₂ +%50N ₂	600	1	1652	0,0712	0,4712	0,384	154	1
		2	1716	0,0649	0,4296	0,309	249	1
		4	1783	0,0577	0,3822	0,242	384	2
		8	1677	0,0599	0,3973	0,298	574	2
	650	1	1665	0,0690	0,4572	0,360	164	1
		2	1783	0,0576	0,3815	0,251	290	2
		4	1804	0,0555	0,3679	0,227	447	3
		7	1776	0,0535	0,3546	0,251	668	3
	700	1	1832	0,0525	0,3482	0,271	233	1
		2	2052	0,0307	0,2033	0,160	378	2
		4	1906	0,0455	0,3013	0,191	582	3
		8	1891	0,0424	0,2811	0,200	870	4

Tablo 6.3 Değişim analizinin sonuçları

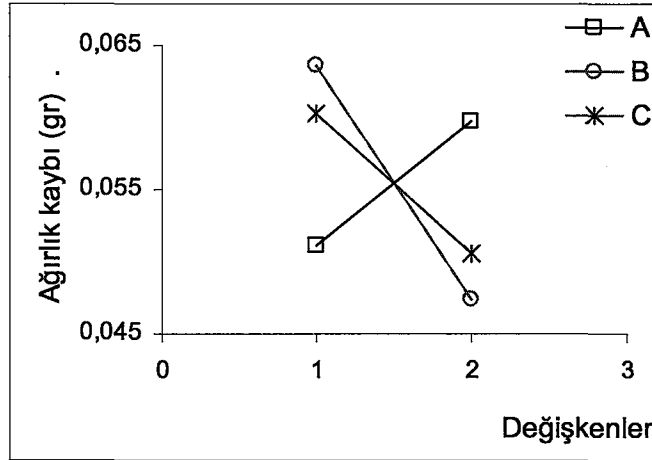
PLAZMA NİTRÜRLEME ŞARTLARINA BAĞLI OLARAK DEĞİŞEN ÖZELLİKLER	PLAZMA NİTRÜRLEME PARAMETRELERİ		
	Gaz Karışım Oranı	Sıcaklık	Süre
Yüzey Sertliği	-58	147	29
Ağırlık Kaybı	0,0087	-0,0162	-0,0098
Serbest Yüzey Aşınması	0,0641	-0,1018	-0,0720
Sürtünme Katsayısı	0,02	-0,1	-0,052
Difüzyon Tabakası Kalınlığı	-50	208	293
Beyaz Tabaka Kalınlığı	1,25	1,25	0,45



a- Plazma nitrüleme parametreleri ile yüzey sertliğinin değişimi

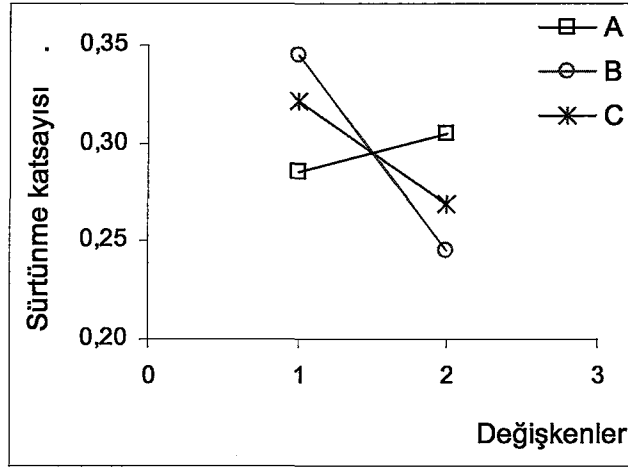


b- Plazma nitrüleme parametreleri ile serbest yüzey aşınmasının değişimi

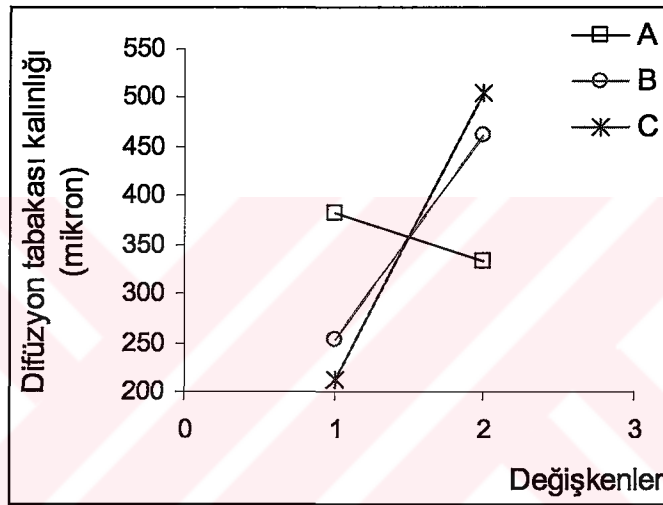


c- Plazma nitrüleme parametreleri ile ağırlık kaybı değişimi

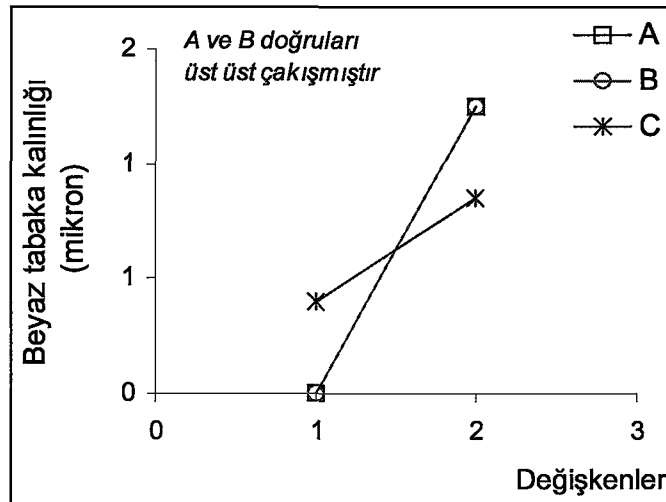
Şekil 6.1 Plazma nitrüleme parametreleri ile malzeme özelliklerinin değişimi (A-Gaz karışım oranı, B-Nitrüleme sıcaklığı, C-Nitrüleme süresi)



d- Plazma nitrüleme parametreleri ile sürtünme katsayısının değişimi



e- Plazma nitrüleme parametreleri ile difüzyon tabakası kalınlığının değişimi



f- Plazma nitrüleme parametreleri ile beyaz tabaka kalınlığının değişimi

Şekil 6.1 Plazma nitrüleme parametreleri ile malzeme özelliklerinin değişimi (A-Gaz karışım oranı, B- Nitrüleme sıcaklığı, C-Nitrüleme süresi) (devamı)

Yüzey sertliği üzerinde en büyük değişim etkisine sahip olan nitrürleme parametresi sıcaklıktır (Şekil 6.1.a). Nitrürleme parametreleri arasında yüzey sertliği ile en büyük korelasyonu sağlayan parametre de nitrürleme sıcaklığıdır. Plazma nitrürleme mekanizmasının difüzyon esaslı bir mekanizma olması ve difüzyonun önemli ölçüde sıcaklığa bağlı olması böyle bir sonucu ortaya çıkarmaktadır. Yüzey sertliği ile ikinci en büyük değişimi sağlayan nitrürleme parametresi gaz karışım oranı, en az değişimi sağlayan nitrürleme parametresi ise nitrürleme süresidir. Bu sonuçlar, korelasyon analizi sonucunda elde edilen korelasyon katsayıları ile de uyumludur. Yüzey sertliği ile nitrürleme süresi arasındaki değişimin düşük çıkmasının nedeni, uzun nitrürleme süreleri boyunca malzeme yüzey sertliğinde önemli bir değişim olmamasıdır. Şekil 6.1.a'dan da görülebileceği gibi, gaz karışım oranı ile yüzey sertliği arasındaki değişim ters yönlüdür. Bunun nedeni; gaz karışım oranındaki nitrojenin artmasına bağlı olarak yüzey sertliğinde görülen azalmadır.

Şekil 6.1.b'de nitrürleme parametreleri ile plakelerin serbest yüzey aşınma miktarları arasındaki değişimi verilmiştir. Nitrürleme parametreleri ile serbest yüzey aşınması arasındaki değişim, nitrürleme parametreleri ile yüzey sertliği arasındaki değişim ile yaklaşık aynı ancak ters yönlüdür. Bu benzerliğin nedeni, nitrürleme parametrelerinin plaketin tribolojik özellikleri üzerinde etkili olması ve serbest yüzey aşınmasının da bu tribolojik özelliklere bağlı olarak ortaya çıkmasıdır. Benzer durum talaş kaldırma deneyleri sonrasında ölçülen ağırlık kayıpları ve sürtünme katsayısı içinde geçerlidir (Şekil 6.1.c-d). Serbest yüzey aşınması ve ağırlık kayıplarının nitrürleme parametreleri ile değişiminin yaklaşık aynı olması, talaş kaldırma deneyleri boyunca etkin olan aşınma mekanizmasının serbest yüzey aşınması olduğu ve ağırlık kaybının büyük ölçüde bu aşınmadan kaynaklandığı kabulünü doğrulamaktadır.

Difüzyon tabakası kalınlığı ile en büyük değişime sahip plazma nitrürleme parametresi süredir (Şekil 6.1.e). Süreyi sırasıyla nitrürleme sıcaklığı ve gaz karışım oranı takip etmektedir. Bu sonuçlar da korelasyon analizinden elde edilen sonuçlar ile benzerdir. Difüzyon tabakası kalınlık artışı önemli ölçüde nitrürleme süresi ve sıcaklığına bağlı olduğu için böyle bir sonuç elde edilmiştir. Bileşim tabakası kalınlığı ile gaz karışım oranı ve sıcaklığın değişimi aynıdır (Şekil 6.1.f). Nitrürleme süresinin etkisi ise daha azdır. Bu durum, beyaz tabakanın oluşumu ve büyümesinin gaz karışım oranına ve sıcaklığa bağlı olmasıyla açıklanabilir.

6.1.3 Hata Analizi

Belirli sayıda deney yapıldıktan sonra bu deneylere ait hata oranlarının tespit edilmesi için pratikte birkaç yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan en çok kullanılanları “akılcı yaklaşım” (common sense basis), diğeri ise “belirsizlik analizi” (uncertainty analysis) yöntemleridir (Genceli, 2000).

Akılcı yaklaşım tekniğinde, ölçme sistemini oluşturan tüm bileşenlerde aynı anda maksimum hatanın yapıldığı kabul edilir. Bu yaklaşım kullanılarak hesaplanan hata miktarı oldukça yüksek olup, bu kadar büyük hatanın oluşma ihtimali oldukça düşüktür. Bu nedenle; son yıllarda, araştırmacılar tarafından hata oranlarının tespitinde belirsizlik analizi daha çok tercih edilmektedir (Genceli, 2000).

Belirsizlik analizi; en büyük hataya neden olan değişkenin tespit edilmesini ve en büyük hataya neden olan değişken yanında diğer değişkenlerin ihmal edilmesini sağlayan bir analizdir. Bu analizde hata; ölçülmesi gereken büyüklük R, bu büyüklüğe etki eden değişkenler $x_1, x_2, \dots, x_n$, bu değişkenlere ait hata oranları $w_1, w_2, \dots, w_n$ ve R büyüklüğünün hata oranı w_r olmak üzere Denklem (6.2) kullanılarak hesaplanabilir (Genceli, 2000).

$$w_r = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n\right)^2} \quad (6.2)$$

İyon nitrürleme deneylerinde nitrürleme parametreleri olarak nitrürleme süresi, gaz karışım oranı ve nitrürleme sıcaklığı esas alınmıştır. Süre, plazma nitrürleme boyunca tutulan bir kronometre ile ölçülmüştür. Nitrürleme sürelerinin oldukça uzun olduğu düşünülürse nitrürleme süresine bağlı olarak (1 ila 8 saat arasında), kronometrenin başlatılması ve durdurulması sırasında yapılan olası hataların oldukça az olduğu değerlendirilmektedir. Kronometrenin başlatılması ve durdurulması sırasında toplam 4 s.'lik bir hata yapıldığı kabul edilirse, deney süresine bağlı olarak yapılan hata (t_h) %0,11 ila %0,014 arasında değişmektedir. Gaz karışım oranı, gaz karışımın sağlayan üniteadaki ayar vidalarının uygun konuma getirilmesi suretiyle yapılmıştır. Gaz karışım ünitesinin rijitliği nedeniyle; nitrürleme sırasında deney kamarasına doğru olan gaz sirkülasyonu sırasında gaz karışımında oluşması muhtemel hata miktarının da oldukça düşük olduğu ve bu hata (k_h) miktarının %1'i geçmeyeceği değerlendirilmektedir. Nitrürleme sıcaklığı ise termometre ile ölçülmüştür. Ölçümler sırasında sıcaklığın $\pm 5^\circ$ arasında değişmesine

izin verilmiştir. Nitrüleme sıcaklıklarının 500°C ila 700°C arasında değiştiği düşünülürse, sıcaklık ölçümü sırasında yapılan hata (T_h) %1 ila %0,7 arasında değişmektedir. Bu kabullerden yola çıkarak ve belirsizlik analizi tekniği kullanılarak; plazma nitrüleme sonrasında değişen yüzey sertlikleri ölçümünde yapılan hatalar (w_h), tabaka kalınlıkları ölçümünde yapılan hatalar (db_h) ve sürtünme katsayısı ölçümlerinde yapılan hatalar (μ_h) hesaplanabilir.

Yüzey sertlikleri ölçümünde yapılan hatalar(w_h); mikrosertlik cihazının özelliklerine ve kalibrasyonuna bağlı olası hatalar ($w_{ch}=\%0,1$) ve sertlik ölçümü sırasında okumadan kaynaklanan olası hatalar ($w_{oh}=\%1$) birlikte dikkate alınarak Denklem (6.3) kullanılarak hesaplanabilir.

$$w_{yh} = \sqrt{t_h^2 + k_h^2 + T_h^2 + w_{ch}^2 + w_{oh}^2} \quad (6.3)$$

Yüzey sertliği ölçümünde yapılan maksimum ve minimum hata miktarı ise sırasıyla Denklem (6.4) ve Denklem (6.5) ile hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} w_{yh \max} &= \sqrt{t_{h \max}^2 + k_h^2 + T_{h \max}^2 + w_{ch}^2 + w_{oh}^2} \\ &= \sqrt{0,11^2 + 0,1^2 + 1^2 + 0,1^2 + 1^2} \\ &= 1,42 \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$\begin{aligned} w_{yh \min} &= \sqrt{t_{h \min}^2 + k_h^2 + T_{h \min}^2 + w_{ch}^2 + w_{oh}^2} \\ &= \sqrt{0,014^2 + 0,1^2 + 0,7^2 + 0,1^2 + 1^2} \\ &= 1,23 \end{aligned} \quad (6.5)$$

Benzer yaklaşımla; tabaka kalınlıkları ve sürtünme katsayısının ölçümleri sırasında kullanılan cihazdan ve okumadan kaynaklanan hatanın aynı olduğu kabul edilirse yapılan maksimum ve minimum hatalar sırasıyla Denklem (6.4) ve Denklem (6.5)'de olduğu gibidir.

Talaş kaldırma deneyleri sonrasında plakette meydana gelen ağırlık kaybı ve serbest yüzey aşınması ölçülmüştür. Bu ölçümler neticesinde elde edilen sonuçlar üzerinde talaş kaldırma sırasında yapılan hatalarda (kesme hızından kaynaklanan hata $w_{kesme}=\%0,1$, ilerlemeden kaynaklanan hata $w_{ilerleme}=\%1$, kesme derinliğinden kaynaklanan hata $w_{derinlik}=\%0,1$, ölçüm cihazından kaynaklanan hata $w_{ch}=\%0,1$ ve

okumadan kaynaklanan hatalar $w_{oh}=\%1$) bulunacaktır. Buna göre plazma nitrürleme sırasında yapılan hatalarda dikkate alınarak; ağırlık kaybı (w_w) ve serbest yüzey aşınması ($w_{serbest}$) ölçümünde yapılan maksimum ve minimum hatalar sırasıyla Denklem (6.6) ve Denklem (6.7) kullanılarak hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} w_{w \max} = w_{serbest \max} &= \sqrt{w_{yh \max}^2 + w_{kesme}^2 + w_{ilerleme}^2 + w_{derinlik}^2 + w_{ch}^2 + w_{oh}^2} \\ &= \sqrt{1,42^2 + 0,1^2 + 1^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 1^2} \\ &= 2,01 \end{aligned} \quad (6.6)$$

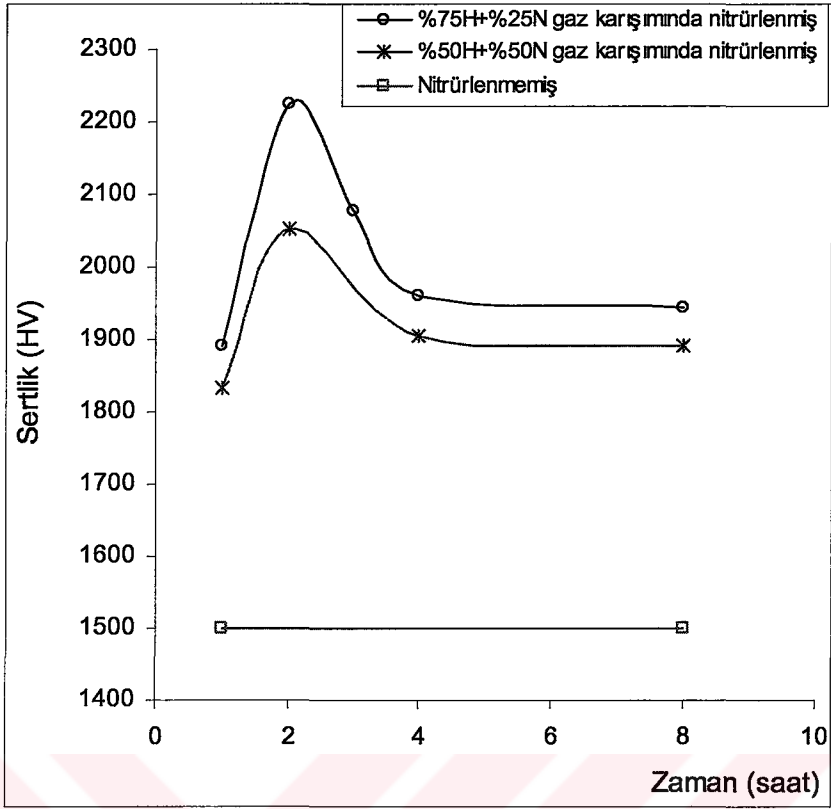
$$\begin{aligned} w_{w \min} = w_{serbest \min} &= \sqrt{w_{yh \min}^2 + w_{kesme}^2 + w_{ilerleme}^2 + w_{derinlik}^2 + w_{ch}^2 + w_{oh}^2} \\ &= \sqrt{1,23^2 + 0,1^2 + 1^2 + 0,1^2 + 0,1^2 + 1^2} \\ &= 1,88 \end{aligned} \quad (6.7)$$

6.2 Plazma Nitrürleme Şartlarına Bağlı Olarak Yüzey Sertliğindeki Değişim

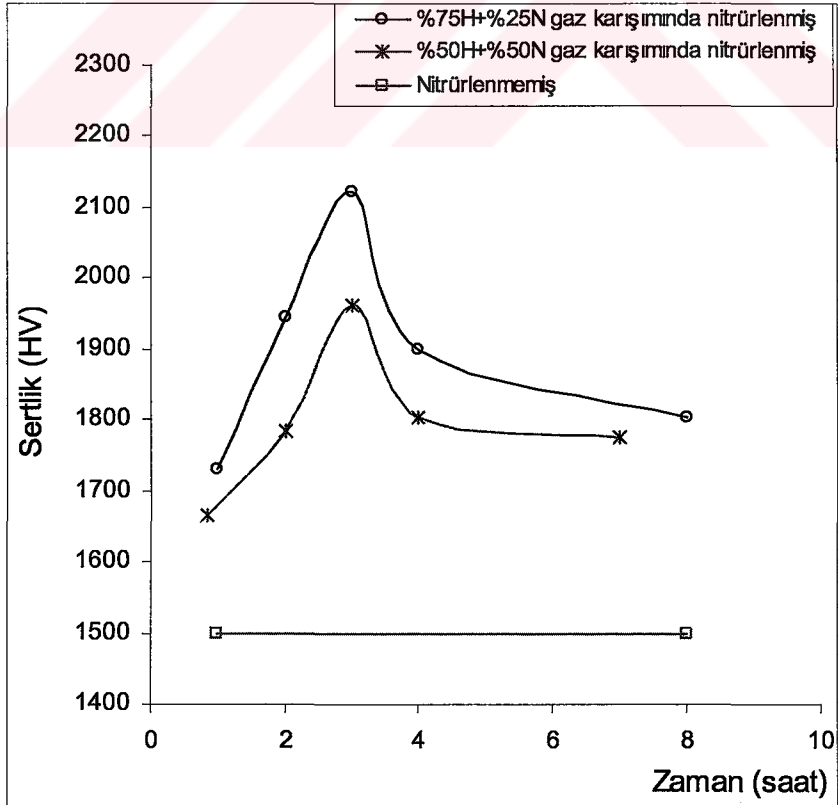
Plazma nitrürleme deney şartları Bölüm 4.3.2 başlığı altında anlatılmış ve plazma nitrürleme deney parametreleri de Tablo 4.1'de verilmiştir. Tablo 4.1'de verilen şartlarda yapılan plazma nitrürleme sonucunda elde edilen yüzey sertlikleri değişimleri ise Tablo 4.3'te gösterilmiştir.

Plaketlerde, plazma nitrürleme süresine göre elde edilen yüzey sertliği değişimleri Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de, nitrürleme sıcaklığına göre elde edilen yüzey sertliği değişimleri Şekil 6.9, Şekil 6.10'da ve gaz karışım oranlarına göre elde edilen yüzey sertliği değişimleri ise Şekil 6.11'de verilmiştir.

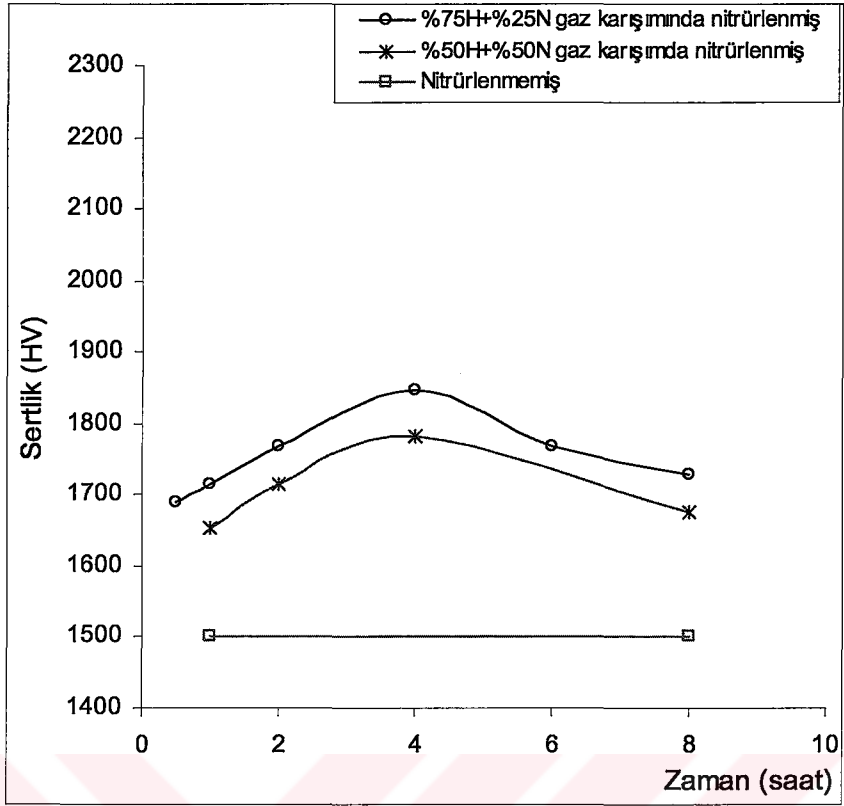
Şekil 6.2'den Şekil 6.11'e kadar verilmiş olan şekillerden de görüldüğü gibi, yüzey sertliği nitrürleme parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Plazma nitrürleme öncesinde 1500 HV olan yüzey sertliği, plazma nitrürleme parametrelerindeki değişime bağlı olarak %6,5 ila %48,3 arasında değişen oranlarda artmıştır. Yüzey sertliğinin en yüksek değeri (2224 HV) %75H₂+%25N₂ gaz karışım oranında 700°C sıcaklıkta 2 saat süreyle yapılan plazma nitrürleme ile elde edilirken, en düşük yüzey sertliği değeri (1598 HV) %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranında 500°C sıcaklıkta 1 saat süreyle yapılan plazma nitrürleme ile elde edilmiştir.



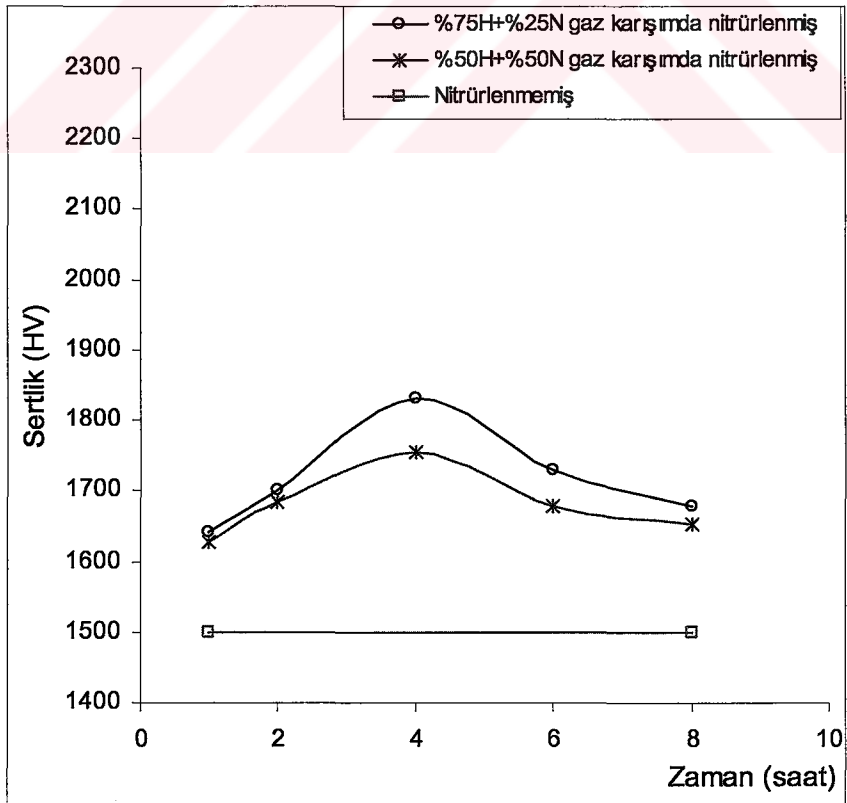
Şekil 6.2 700°C sıcaklıkta plazma nitrülenmiş plakelerin yüzey sertliği değişimleri



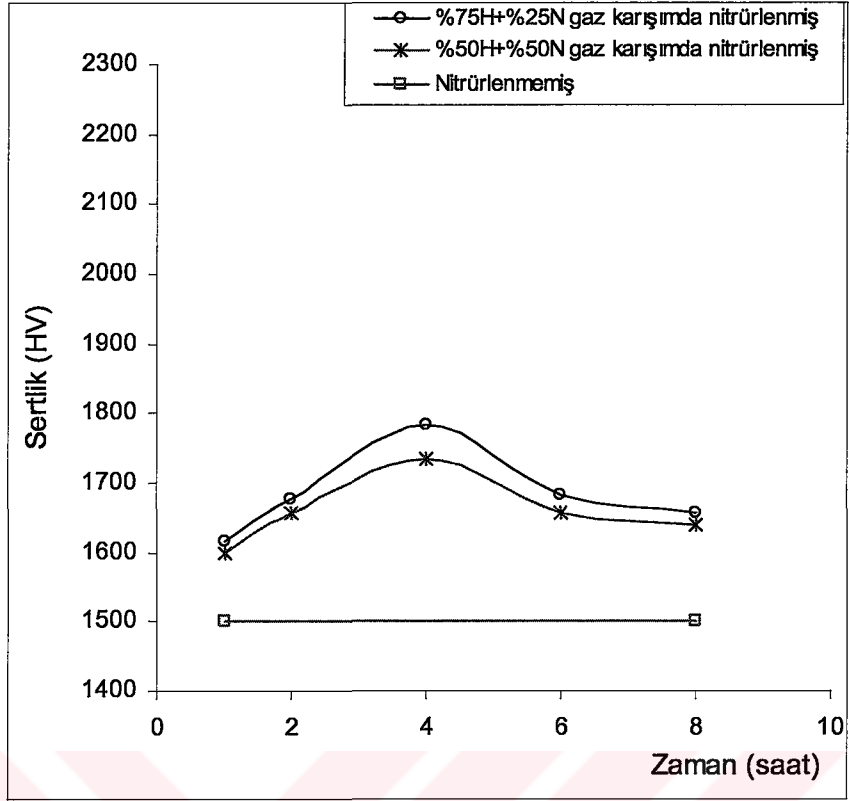
Şekil 6.3 650°C sıcaklıkta plazma nitrülenmiş plakelerin yüzey sertliği değişimleri



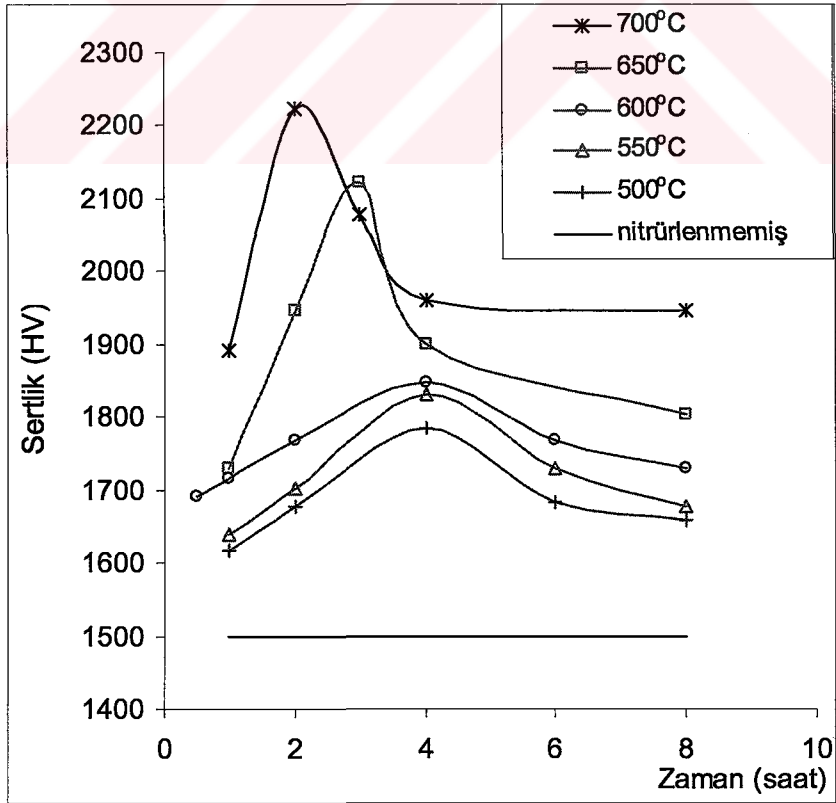
Şekil 6.4 600°C sıcaklıkta plazma nitrülenmiş plakelerin yüzey sertliği değişimleri



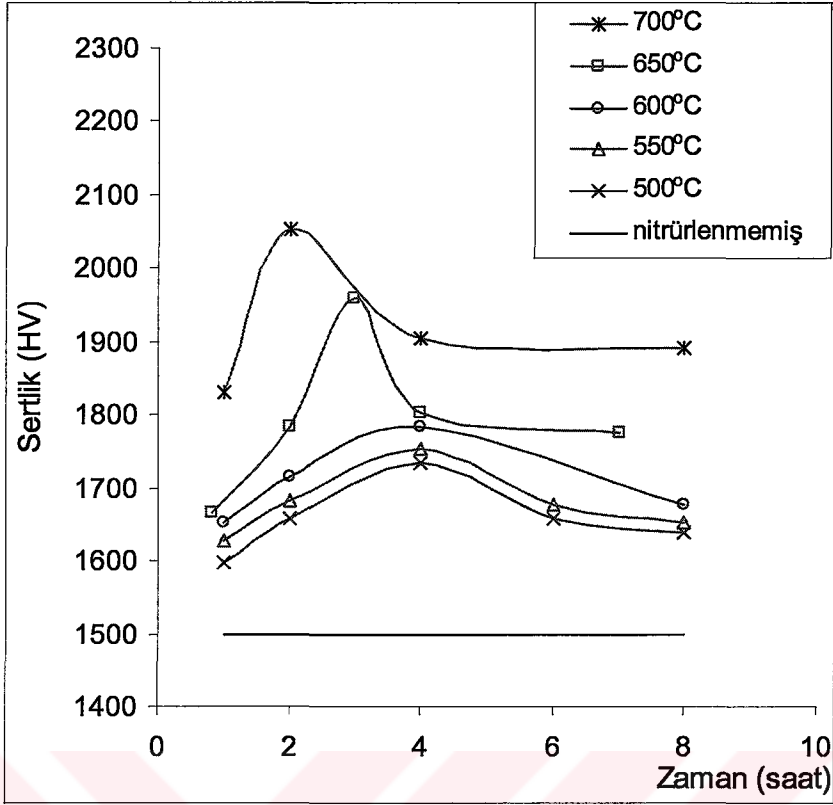
Şekil 6.5 550°C sıcaklıkta plazma nitrülenmiş plakelerin yüzey sertliği değişimleri



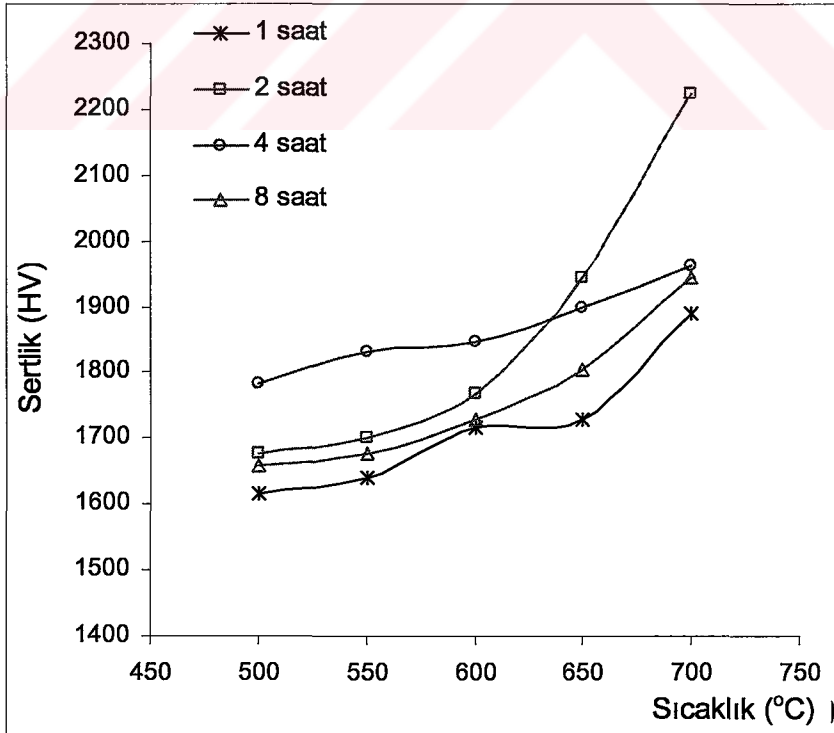
Şekil 6.6 500°C sıcaklıkta plazma nitrülenmiş plakelerin yüzey sertliği değişimleri



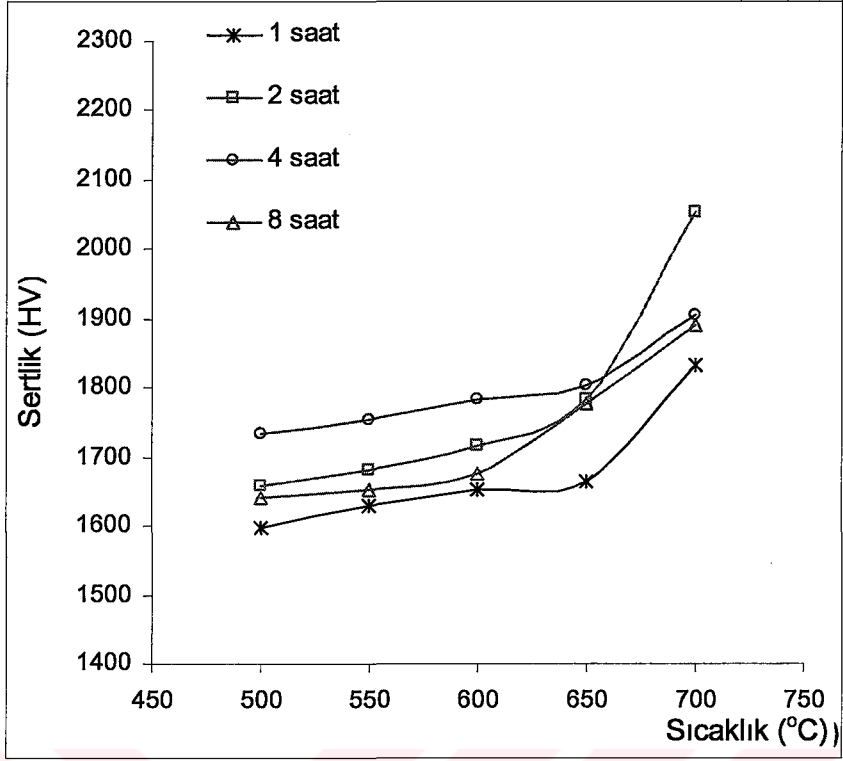
Şekil 6.7 %75H₂+25N₂ gaz karışım oranında nitrüleme süresine bağlı olarak yüzey sertliğinin değişimi



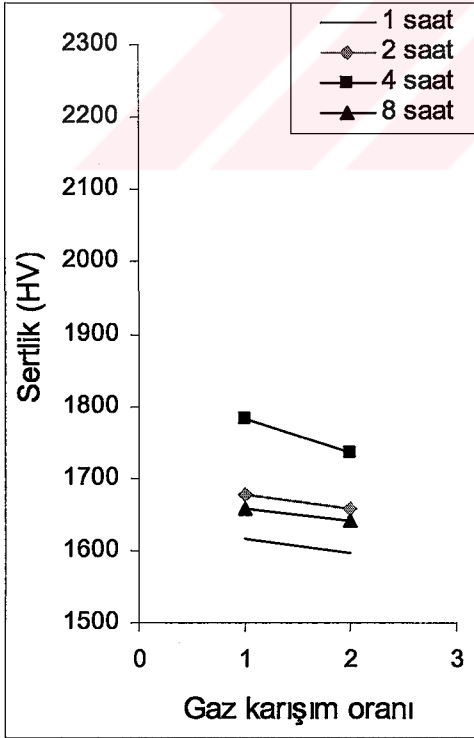
Şekil 6.8 %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranında nitrürleme süresine bağlı olarak yüzey sertliğinin değişimi



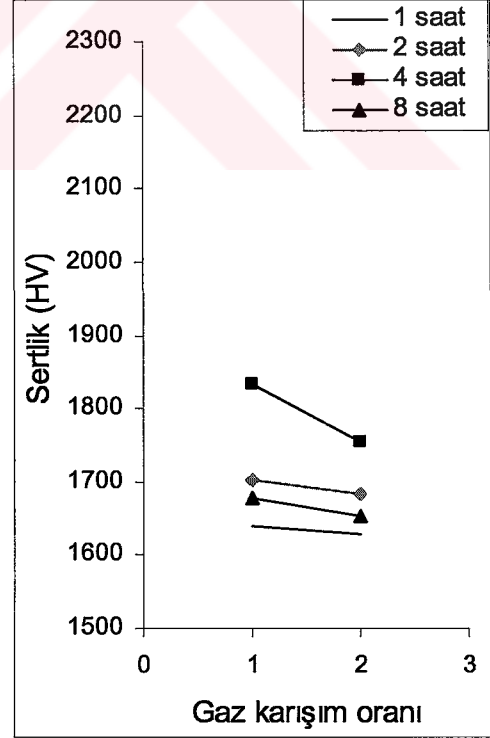
Şekil 6.9 %75H₂+%25N₂ gaz karışım oranında nitrürleme sıcaklığına bağlı olarak yüzey sertliğinin değişimi



Şekil 6.10 %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranında nitrüleme sıcaklığına bağlı olarak yüzey sertliğinin değişimi

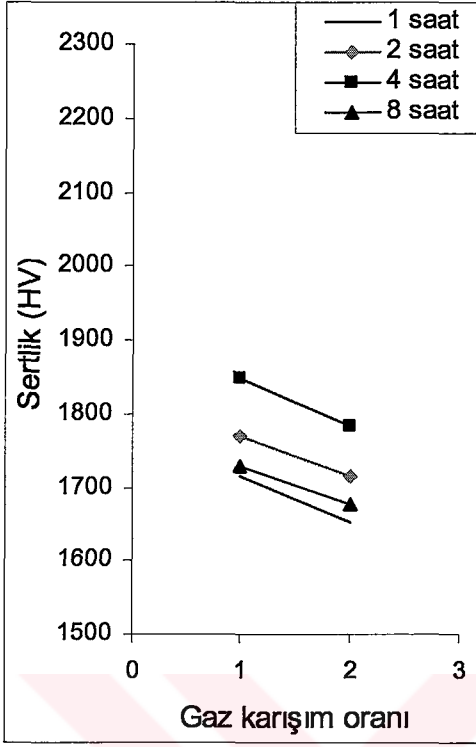


a- Sıcaklık 500°C

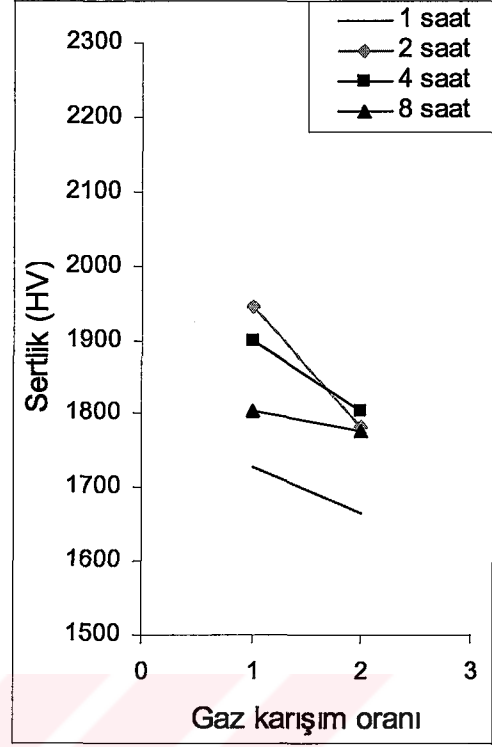


b- Sıcaklık 550°C

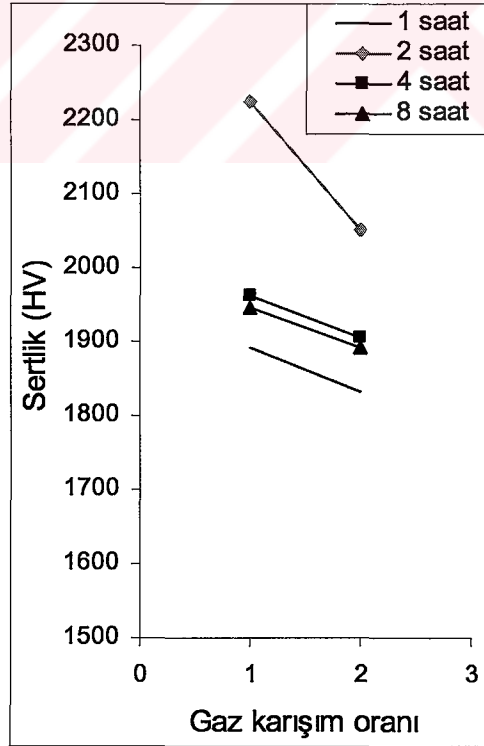
Şekil 6.11 Gaz karışım oranına bağlı olarak yüzey sertliğinin değişimi
1-%75H₂+%25N₂ 2-%50H₂+%50N₂



c- Sıcaklık 600°C



d- Sıcaklık 650°C



Şekil 6.11 Gaz karışım oranına bağlı olarak yüzey sertliğinin değişimi (devamı)
1-%75H₂+%25N₂ 2-%50H₂+%50N₂

Aynı gaz karışım oranı ve nitrürleme sıcaklığı için, plazma nitrürleme süresinin artmasıyla birlikte yüzey sertliği artmaktadır. Difüzyon bölgesindeki nitrojen atomlarının alaşım elementleriyle çökelti oluşturması sertlik artışının asıl nedenidir. Difüzyon tabakasındaki çökelti dağılımı ve büyüklüğü sertlik profilini belirler. Bu çökelti dağılım ve büyüklüğü nitrürleme sıcaklığı ve iş parçası bünyesindeki nitrür oluşturu elementlere bağlıdır. Nitrürleme parametrelerine bağlı olarak değişen belli bir nitrürleme süresinden sonra yüzey sertliği azalmakta ve belli bir değerde yaklaşık sabit kalmaktadır (Şekil 6.2-7). Bunun nedeni, nitrürlenmiş yüzeyin nitrüre doyması ve aşırı uzun süre ve/veya yüksek sıcaklıklar nedeniyle oluşan kaba çökelti yüzünden sertliğin düşmesidir.

Nitrürleme süresi ve gaz karışım oranının sabit tutulması durumunda, artan nitrürleme sıcaklığı ile birlikte yüzey sertliği artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda nitrojenin difüzyonu daha kolay olduğundan, malzemeye nüfuz eden nitrojen miktarının artmasına paralel olarak yüzey sertliği artmaktadır. Ancak çok yüksek sıcaklıklarda oluşan kaba çökelti nedeniyle yüzey sertliği düşmektedir.

Şekil 6.11’de gaz karışım oranına bağlı olarak yüzey sertliğindeki değişim verilmiştir. Aynı plazma nitrürleme süresi ve sıcaklığı için gaz karışım oranındaki nitrojenin artmasıyla birlikte yüzey sertliğinin artmakta, ancak gaz karışım oranındaki nitrojenin belli bir değerdan sonra nitrojenin artması ile birlikte yüzey sertliği düşmektedir. Bunun temel nedeni, gaz karışım oranındaki nitrojen miktarının değişmesine paralel olarak değişen hidrojen miktarıdır. Gaz karışım oranındaki nitrojen miktarının artması hidrojenin azalmasına neden olmaktadır. Gaz karışım oranındaki hidrojenin azalmasıyla birlikte, azot difüzyonu için gerekli olan yüzey aktifleşme kabiliyeti kötüleşmekte ve yüzeye doğru olan azot difüzyonu azalmaktadır. Ayrıca azot miktarının artmasıyla birlikte, yüzeyde beyaz tabaka oluşmaya başlamakta, bu tabaka azot difüzyonu için bir bariyer görevi yaparak azot difüzyonu zorlaşmaktadır. Bu nedenle maksimum yüzey sertliği için gaz karışım oranındaki nitrojen oranının belli bir aralıkta tutulması gereklidir.

Aynı gaz karışım oranı için, düşük sıcaklıklarda daha uzun süre plazma nitrürleme ile yada yüksek sıcaklıklarda daha kısa süre plazma nitrürleme ile aynı yüksek yüzey sertliğinin elde edilebilmektedir (Şekil 6.11). Bu durum, arzu edilen yüzey sertliğinin oluşmasını sağlayan difüzyon için gereksinin duyulan enerji miktarı ile açıklanabilir.

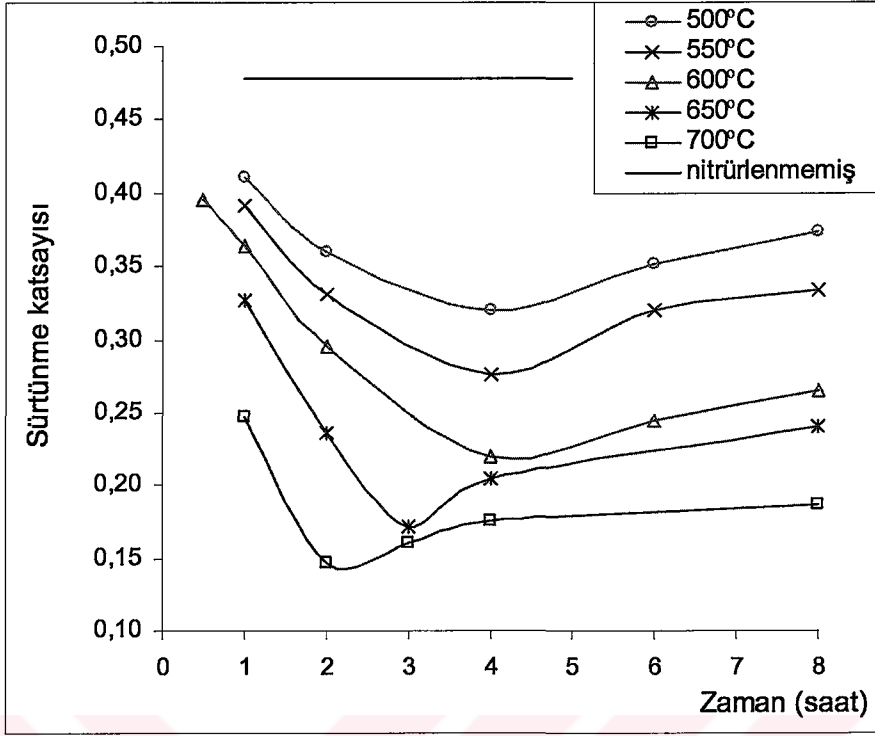
6.3 Plazma Nitrürleme Şartlarına Bağlı Olarak Sürtünme Katsayısındaki Değişim

Tablo 4.1’de verilen plazma nitrürleme şartları altında yapılan plazma nitrürleme sonucunda elde edilen ve Bölüm 5.6’da verilen şartlar altında yapılan ölçümler sonucunda bulunan sürtünme katsayıları Tablo 5.8’de gösterilmiştir. Plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak plakette elde edilen sürtünme katsayısı değişimleri ise Şekil 6.12 ve Şekil 6.13’te verilmiştir. Şekil 6.12’de %75H₂+%25N₂ ve Şekil 6.13’te %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranları için nitrürleme süresi ve nitrürleme sıcaklığına bağlı olarak sürtünme katsayısındaki değişimler verilmiştir.

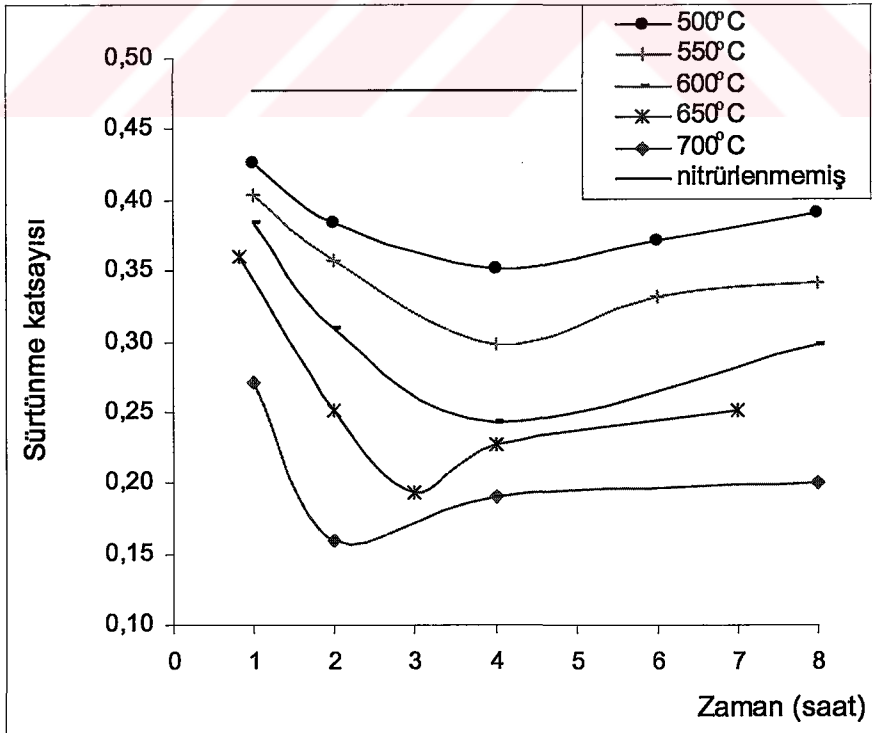
Şekil 6.12, Şekil 6.13, Şekil 6.14 ve Şekil 6.15’ten görüldüğü gibi plazma nitrürlenmiş plaketteki sürtünme katsayısı nitrürleme parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Plazma nitrürleme öncesinde 0,478 olan sürtünme katsayısı, plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak %11 ila %70 arasında değişen oranlarda azalmıştır. Sürtünme katsayısının en düşük değeri ($\mu=0,147$) %75H₂+%25N₂ gaz karışım oranında 700°C sıcaklıkta 2 saat süreyle yapılan plazma nitrürleme ile elde edilirken, en yüksek değeri ($\mu=0,427$) %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranında 500°C sıcaklıkta 1 saat süreyle yapılan plazma nitrürleme sonunda elde edilmiştir.

Nitrürleme sıcaklığı ve gaz karışım oranının sabit tutulması durumunda; artan süre ile birlikte sürtünme katsayısı azalmakta, nitrürlemeye devam edilmesiyle birlikte artarak belli bir değerde sabit kalmakta, bu sabit sürtünme katsayısı değerinin başlangıçtaki sürtünme katsayısı değerinden daha küçük olmakta (Şekil 6.5, Şekil 6.6 ve Şekil 6.7), nitrürleme süresi ve gaz karışım oranının sabit tutulması durumunda, artan nitrürleme sıcaklığıyla birlikte sürtünme katsayısının azalmaktadır (Şekil 6.14 ve Şekil 6.15). Sürtünme katsayısındaki bu azalma, plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak değişen yüzey sertliğinden kaynaklanmaktadır.

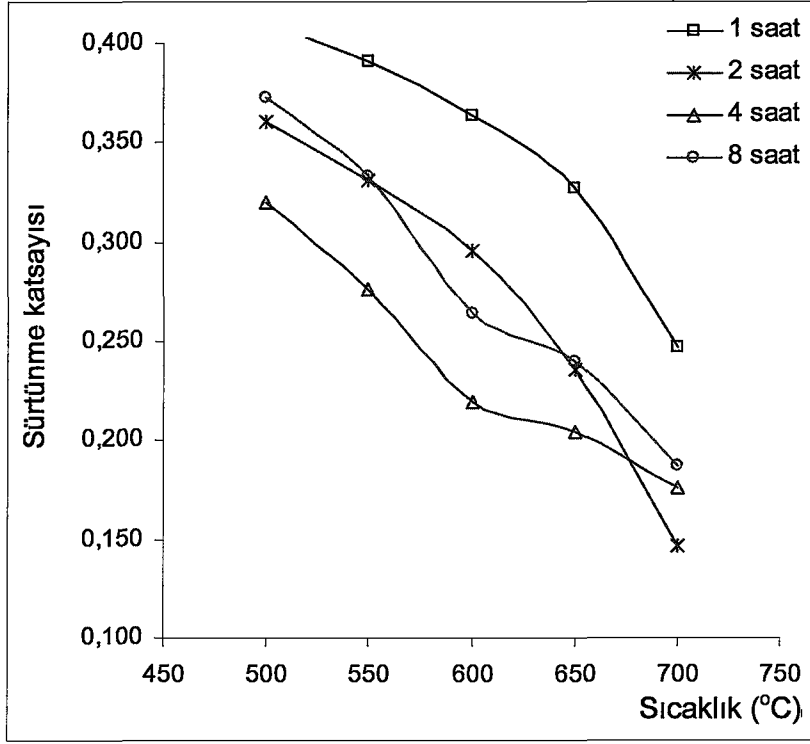
Aynı gaz karışım oranı için, düşük sıcaklıklarda daha uzun süre plazma nitrürleme ile yada yüksek sıcaklıklarda daha kısa süre plazma nitrürleme ile aynı düşük sürtünme katsayısı elde edilebilmektedir (Şekil 6.12). Böylece birbirinden farklı her iki durum içinde yüksek yüzey sertliği elde edilebilmekte, bununla ilişkili olarak da düşük sürtünme katsayısı elde edilebilmektedir. Malzeme çiftleri arasında en iyi sürtünme durumu (en düşük sürtünme katsayısı) yüzeylerden birinin sert diğerinin yumuşak olduğu durumdur. Sürtünme deneyleri boyunca karşı malzeme hep aynı sertlikte olduğuna göre, plaketteki sürtünme katsayıları nitrürleme sonrasında elde edilen yüzey sertlik değerleriyle doğrudan ilişkili olacaktır.



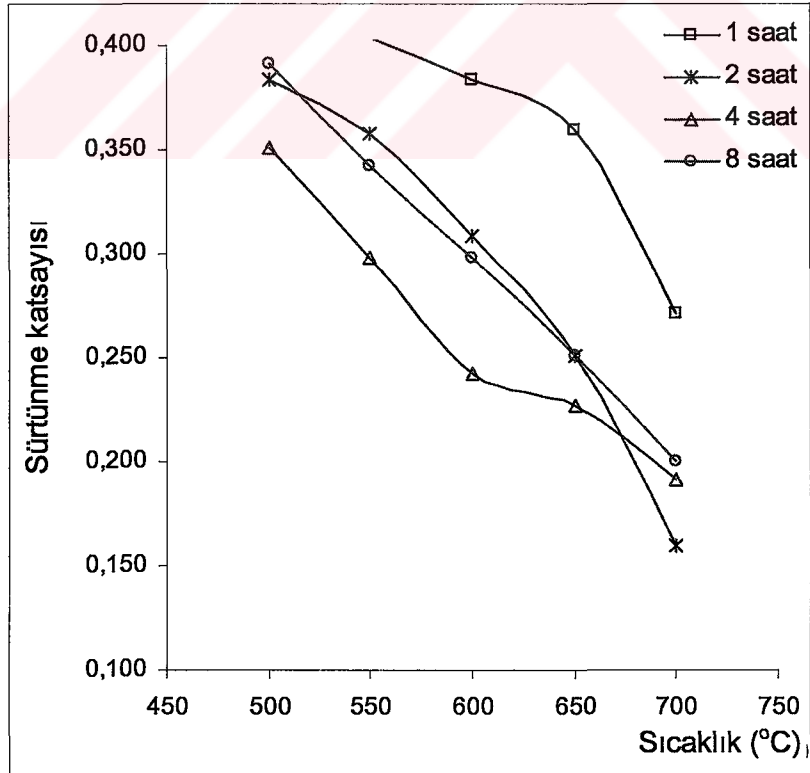
Şekil 6.12 %75H₂+%25N₂ gaz karışım oranında nitrüleme süresine bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi



Şekil 6.13 %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranında nitrüleme süresine bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi



Şekil 6.14 %75H₂+%25N₂ gaz karışım oranında nitrürleme sıcaklığına bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi



Şekil 6.15 %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranında nitrürleme sıcaklığına bağlı olarak sürtünme katsayısının değişimi

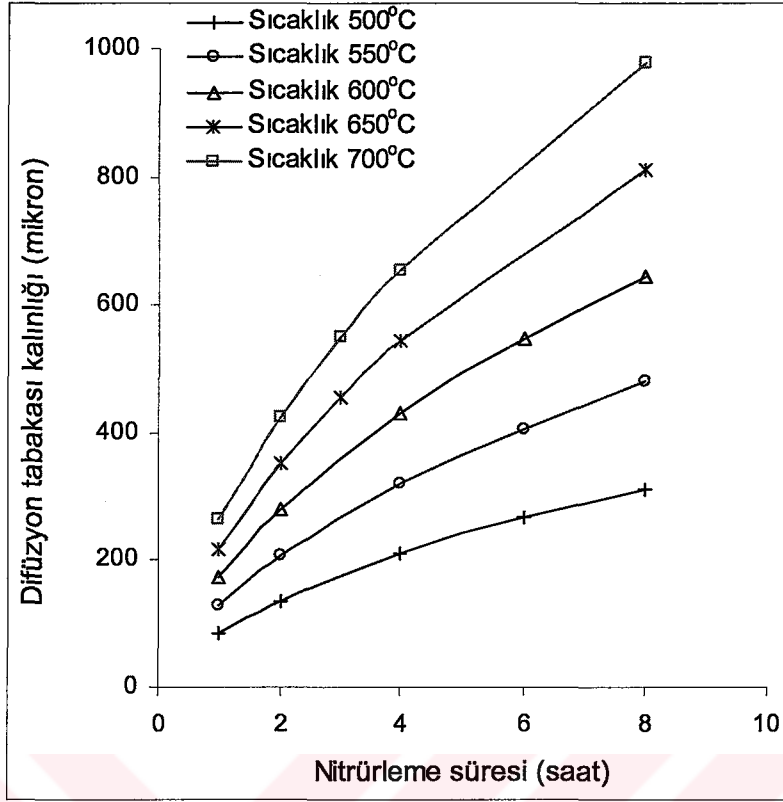
Plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak sürtünme katsayısının genel değişimi incelendiğinde, sürtünme katsayısı değişiminin yüzey sertliği değişim profiline benzer bir yapıda olduğu ve sürtünme katsayısının büyük ölçüde yüzey sertliği profilinden etkilendiği görülmektedir. Yüzey sertliği ile sürtünme katsayısı arasındaki korelasyon katsayısının ($r=-0,91$) oldukça yüksek olması bunu doğrulamaktadır.

6.4. Plazma Nitrürleme Şartlarına Bağlı Olarak Beyaz Tabaka ve Difüzyon Tabakası Kalınlıklarındaki Değişim

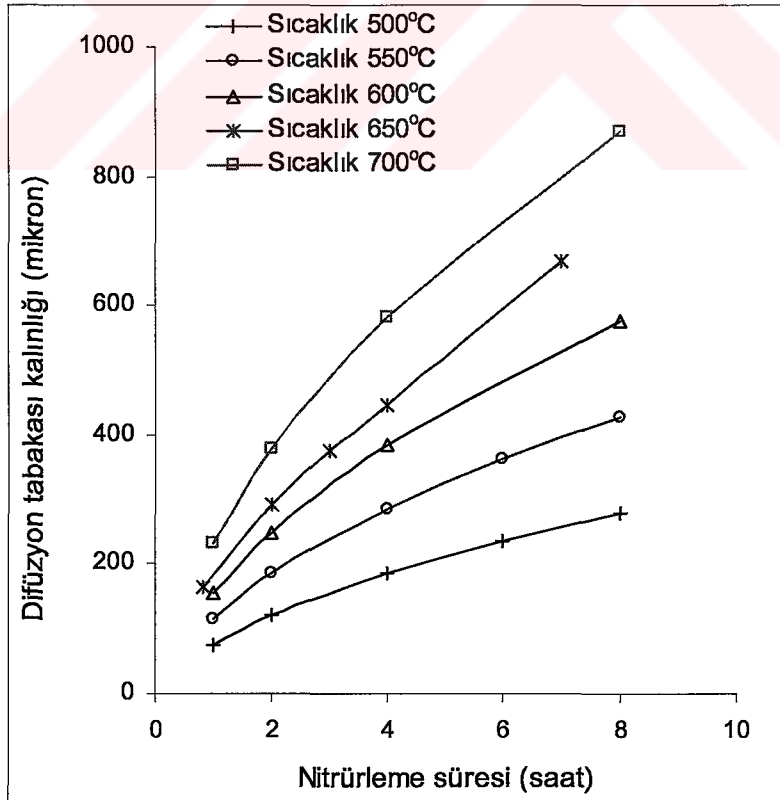
Plazma nitrürleme sonucunda elde edilen tabaka kalınlıkları Tablo 4.4'te verilmiştir. Plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak oluşan tabaka kalınlıkları değişimleri ise Şekil 6.16 ila Şekil 6.22 arasında verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi plaketteki tabaka kalınlıkları nitrürleme parametrelerine bağlı olarak değişmekte, en kalın difüzyon tabakası (979 mikron) %75H₂+%25N₂ gaz karışım oranında 700°C sıcaklıkta 8 saat sürede, en ince difüzyon tabakası (74 mikron) %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranında 500°C sıcaklıkta 1 saat süreyle yapılan plazma nitrürleme sonunda elde edilmiştir (Şekil 6.16 ve Şekil 6.17).

Nitrürleme süresi ve gaz karışım oranının sabit tutulması durumunda, artan sıcaklıkla birlikte difüzyon tabakasının kalınlığı artmaktadır (Şekil 6.16, Şekil 6.17). Benzer durum nitrürleme sıcaklığı ve gaz karışım oranının sabit tutulması durumu içinde geçerlidir. Difüzyon tabakasının oluşması difüzyon kontrollü bir prosesdir. Bu nedenle nitrürleme süresi ve/veya sıcaklığının artmasıyla azotun plaket içindeki yayılımı kolaylaşacağından, oluşan difüzyon tabakasının kalınlığı da artmaktadır.

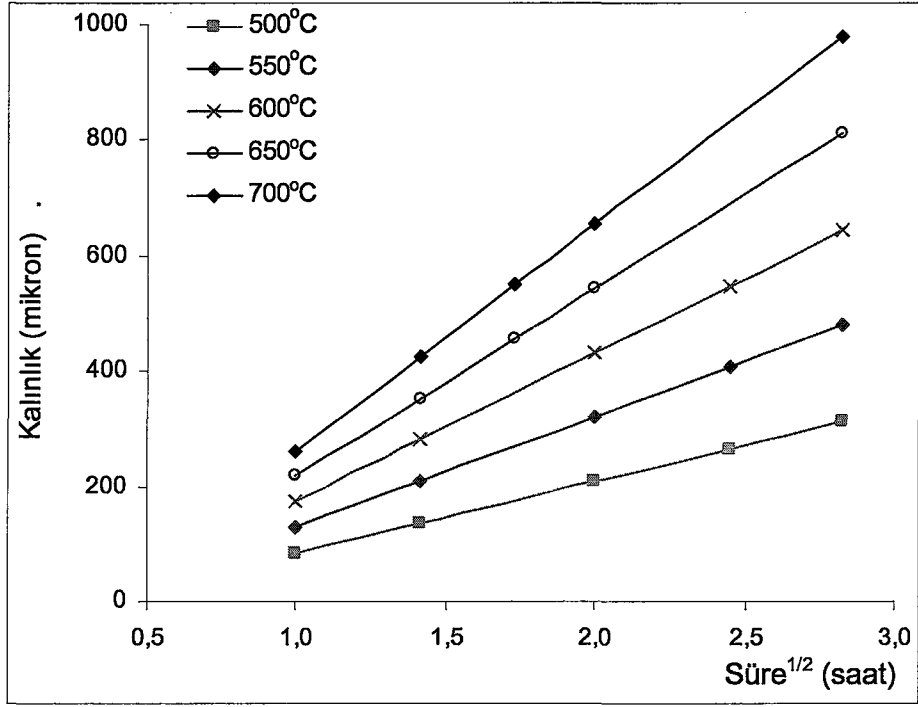
Sabit nitrürleme sıcaklıkları altında yapılan plazma nitrürleme sırasında difüzyon tabakası kalınlığındaki artış parabolik karakterdeyken (Şekil 6.16 ve Şekil 6.17), sabit nitrürleme süreleri altında yapılan plazma nitrürleme sırasında difüzyon tabakası kalınlıklarındaki artış doğrusal karakterdedir (Şekil 6.20 ve Şekil 6.21). Bu durum difüzyon tabakası oluşumunun kontrolünde nitrürleme süresinin, nitrürleme sıcaklığına göre daha etkili olduğu göstermektedir. Gerek korelasyon gerekse etkileşim analizi sonucunda elde edilen veriler de bunu doğrulamaktadır. Difüzyon tabakası ile nitrürleme sıcaklığı arasındaki korelasyon $r=0,58$ iken, difüzyon tabakası ile nitrürleme süresi arasındaki korelasyon $r=0,68$ 'dir. Etkileşim analizine göre de difüzyon tabakası kalınlığının nitrürleme süresi ile etkileşimi, nitrürleme sıcaklığına göre daha yüksektir (Şekil 6.1.e) Bu durum, plazma nitrürleme sırasında nitrojenin malzeme içine nüfuz edebilmesi için sıcaklığa duyulan ihtiyaçtan daha çok süreye ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır.



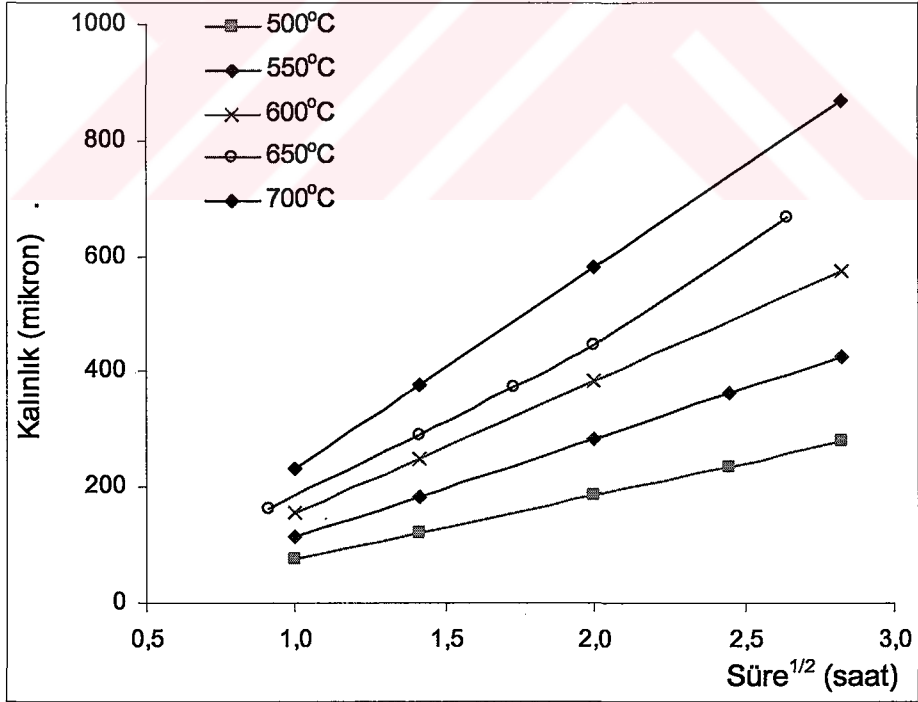
Şekil 6.16 %75H₂+%25N₂ gaz karışım oranında nitrürleme süresine bağlı olarak difüzyon tabakası kalınlıklarındaki değişim



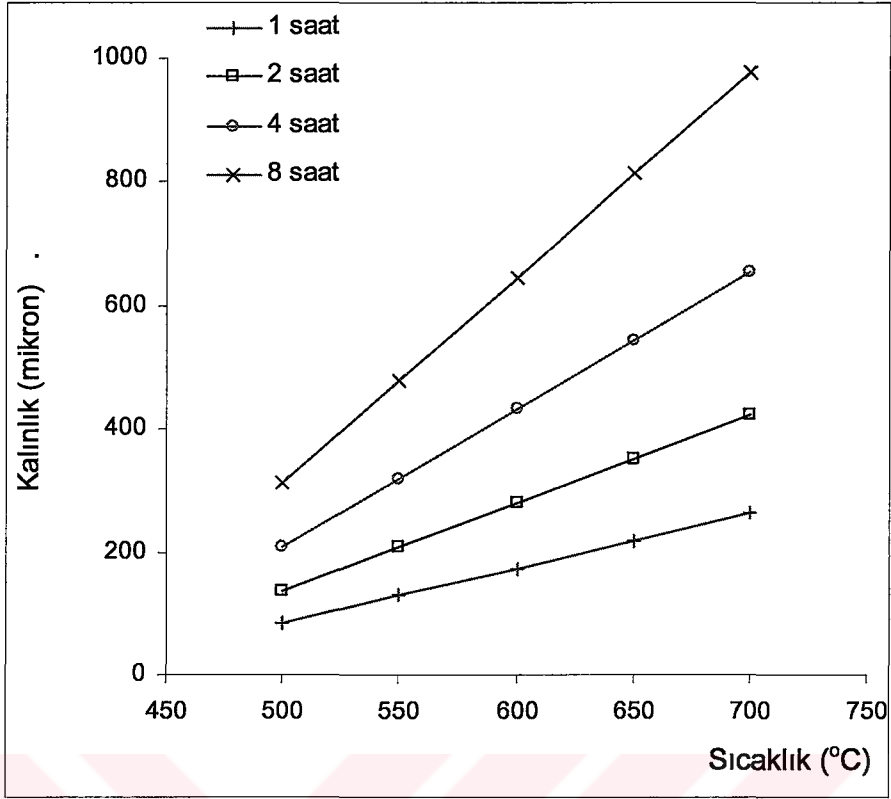
Şekil 6.17 %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranında nitrürleme süresine bağlı olarak difüzyon tabakası kalınlıklarındaki değişim



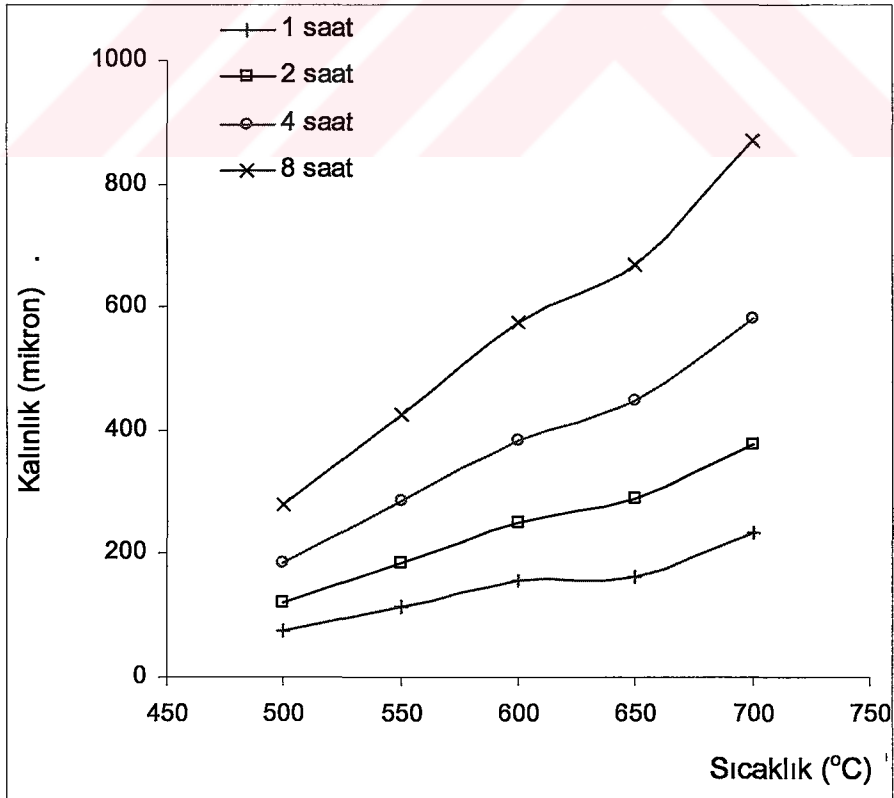
Şekil 6.18 %75H₂+%25N₂ gaz karışım oranında nitrürleme süresinin kareköküne bağlı olarak difüzyon tabakası kalınlıklarındaki değişim



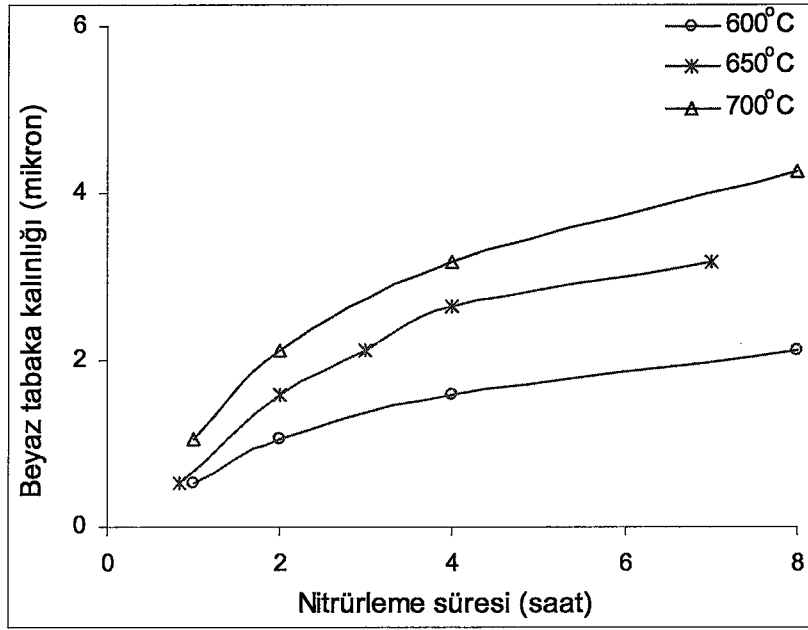
Şekil 6.19 %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranında nitrürleme süresinin kareköküne bağlı olarak difüzyon tabakası kalınlıklarındaki değişim



Şekil 6.20 %75H₂+%25N₂ gaz karışım oranında nitrürleme sıcaklığına bağlı olarak difüzyon tabakası kalınlıklarındaki değişim



Şekil 6.21 %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranında nitrürleme sıcaklığına bağlı olarak difüzyon tabakası kalınlıklarındaki değişim



Şekil 6.22 Nitrüleme parametrelerine bağlı olarak plakette elde edilen beyaz tabaka kalınlığı değişimleri

Aynı gaz karışım oranında, yüksek nitrüleme sıcaklığında daha kısa süre yada düşük nitrüleme sıcaklıklarında daha uzun nitrüleyerek maksimum difüzyon tabakası kalınlığı elde edilebilir (Şekil 6.16, Şekil 6.17, Şekil 6.19, Şekil 6.20). Bu durum, difüzyon tabakası oluşumunun difüzyon kontrollü bir proses olması ve difüzyonun ise sıcaklık ile süreye bağlı olmasından kaynaklanmaktadır.

Gaz karışım oranındaki nitrojen ile hidrojen miktarı difüzyon tabakası kalınlığını değiştirmektedir. Gaz karışım oranındaki nitrojenin artmasıyla birlikte difüzyon tabakası kalınlığı azalır. Bunun nedeni artan nitrojen miktarına bağlı olarak gaz karışım oranındaki hidrojenin azalması ve azalan hidrojen nedeniyle malzeme yüzeyinin yeterince aktifleşememesidir. Böylece nitrojenin malzemeye nüfuz etmesi zorlaşacaktır. Ayrıca nitrojen miktarının artmasıyla birlikte, yüzeyde beyaz tabaka oluşmaya başlamakta, bu tabaka azot difüzyonu için bir bariyer görevi yaparak azot difüzyonu zorlaşmaktadır. Nitrojen miktarının azaltılması durumunda ise malzeme yüzeyinde nitrür oluşma kabiliyeti azaltacaktır.

Beyaz tabaka, nitrüleme parametrelerine bağlı olarak sadece belli nitrüleme parametreleri altında oluşmaktadır (Şekil 6.22). En kalın beyaz tabaka (4 mikron) %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranında 700°C sıcaklıkta 8 saat süreyle yapılan plazma nitrüleme ile elde edilmiştir. Beyaz tabakanın oluşum karakteri; sabit nitrüleme sıcaklığında altında artan nitrüleme süresine göre paraboliktir (Şekil 6.22). Beyaz

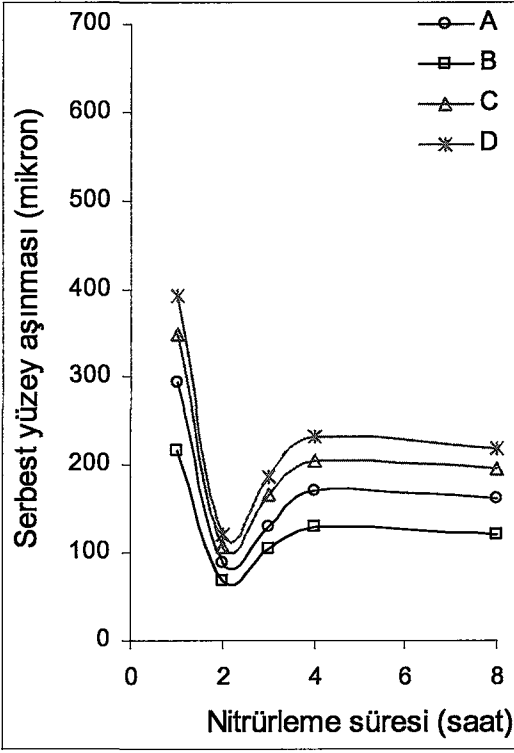
tabaka, gaz karışım oranındaki nitrojen miktarının artmasına bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda uzun süren nitrürleme şartlarında oluşmaktadır.

6.5. Plazma Nitrürleme ve Talaş Kaldırma Şartlarına Bağlı Olarak Plaketlerde Meydana Gelen Serbest Yüzey Aşınması Değişimleri

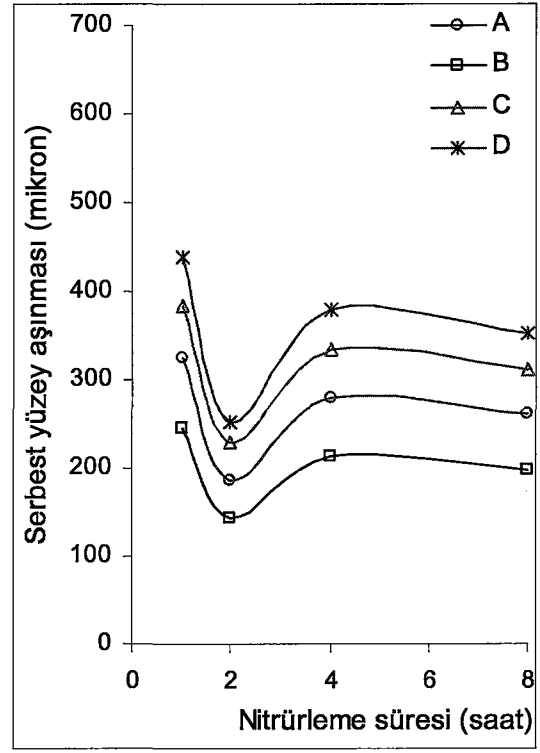
Tablo 4.1’de verilen plazma nitrürleme şartlarında plazma nitrürlenmiş plaketler talaş kaldırma deneylerine tabii tutulmuşlardır. Talaş kaldırma deneylerine ait detaylar Bölüm 5’te verilmiştir. Bölüm 5’te detayları verilen kesme şartları altında yapılan talaş kaldırma sonrasında plaketlerde meydana gelen serbest yüzey aşınma miktarları ölçülmüştür. Nitrürlenmiş plaketlerde, plazma nitrürleme ve talaş kaldırma şartlarına bağlı olarak meydana gelen serbest yüzey aşınma miktarı değişimleri Şekil 6.23’te gösterilmiştir. Nitrürlenmiş plaketlerde meydana gelen serbest yüzey aşınma miktarıyla karşılaştırma yapabilmek amacıyla, aynı kesme şartlarında talaş kaldırmada kullanılan nitrülenmemiş plaketlere ait serbest yüzey aşınma miktarı değişimleri ise Şekil 6.24’te verilmiştir.

Plazma nitrürlenmiş plaketlerde oluşan serbest yüzey aşınma miktarları; talaş kaldırma ve plazma nitrürleme şartlarına bağlı olarak değişmektedir. En büyük serbest yüzey aşınması (637 mikron) %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranında 500°C sıcaklıkta 1 saat süreyle plazma nitrürlenmiş plaketin 4 ncü talaş kaldırma deneyinde kullanılmasıyla elde edilirken (Şekil 6.23.h), en küçük serbest yüzey aşınması (68 mikron) %75H₂+%25N₂ gaz karışım oranında 700°C sıcaklıkta 2 saat süreyle plazma nitrürlenmiş plaketin 2 nci talaş kaldırma deneyinde kullanılmasıyla elde edilmiştir (Şekil 6.23.a). En büyük serbest yüzey aşınmasının elde edildiği talaş kaldırma şartlarında nitrülenmemiş plaketteki serbest yüzey aşınması 661 mikron ve en küçük serbest yüzey aşınmasının elde edildiği talaş kaldırma şartlarında nitrülenmemiş plaketteki serbest yüzey aşınması 336 mikron olduğuna göre plazma nitrürleme ile serbest yüzey aşınmasında yaklaşık %3,6 ila %81,3 arasında değişen oranlarda iyileşme sağlanmıştır (Şekil 6.23 ve Şekil 6.24).

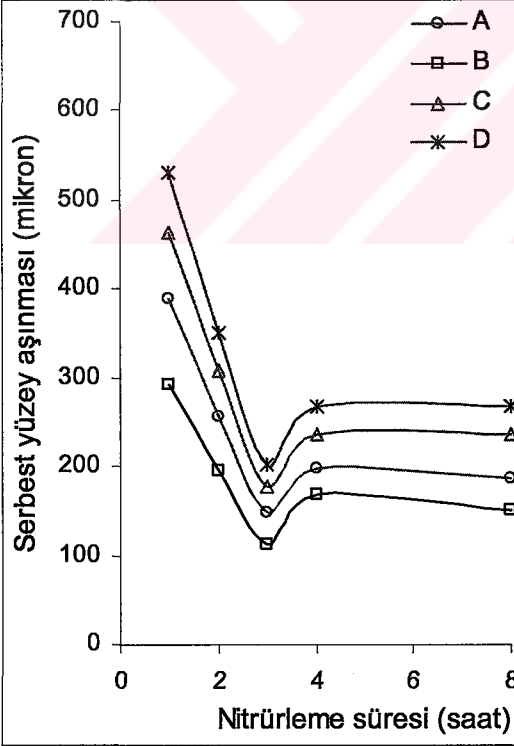
Serbest yüzey aşınması plaketlerin yüzey sertliği, sürtünme katsayısı ve difüzyon tabakası kalınlığı ile yakından ilişkilidir. Korelasyon analizi sonuçları bunu doğrulamaktadır. Serbest yüzey aşınması ile yüzey sertliği arasındaki korelasyon $r=-0,91$, sürtünme katsayısı ile korelasyon $r=0,91$ ve difüzyon tabakası kalınlığı ile korelasyon $r=-0,72$ ’dir. Serbest yüzey aşınması bu değişkenlere bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle, plazma nitrürleme parametrelerinin bu değişkenler



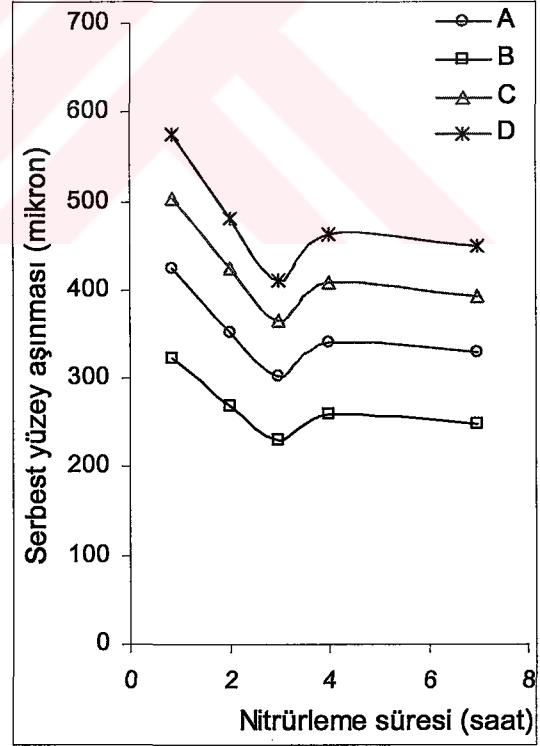
a. Gaz karışım oranı %75H₂+%25N₂, sıcaklık 700°C



b. Gaz karışım oranı %50H₂+%50N₂, sıcaklık 700°C

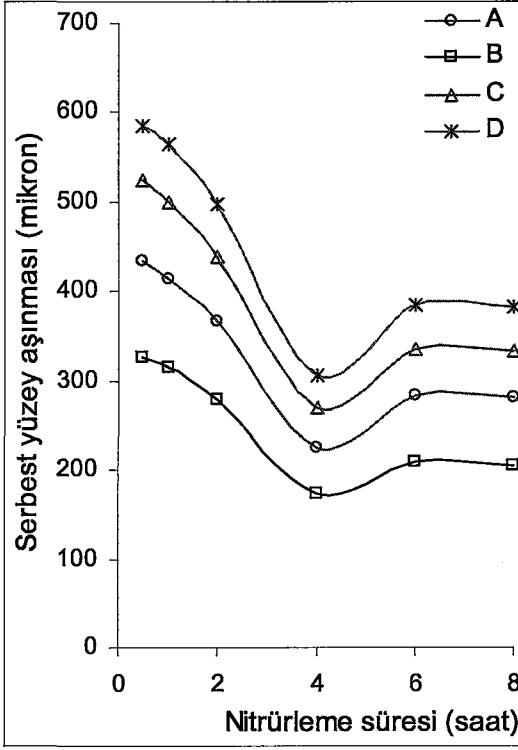


c. Gaz karışım oranı %75H₂+%25N₂, sıcaklık 650°C

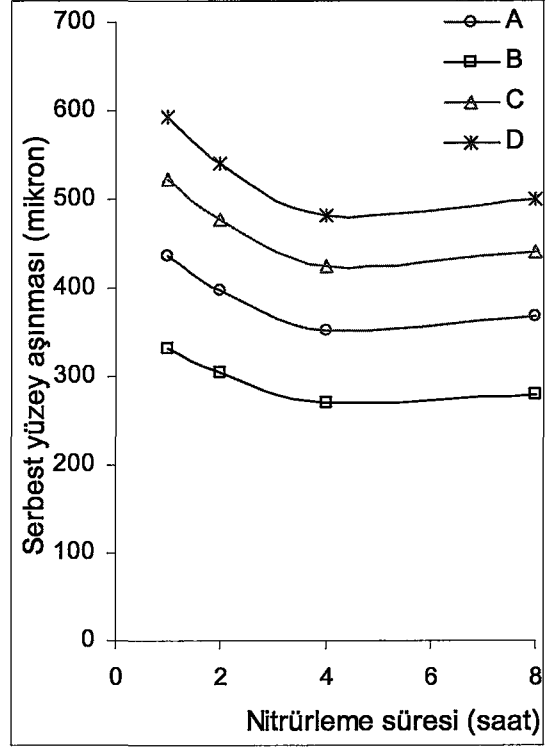


d. Gaz karışım oranı %50H₂+%50N₂, sıcaklık 650°C

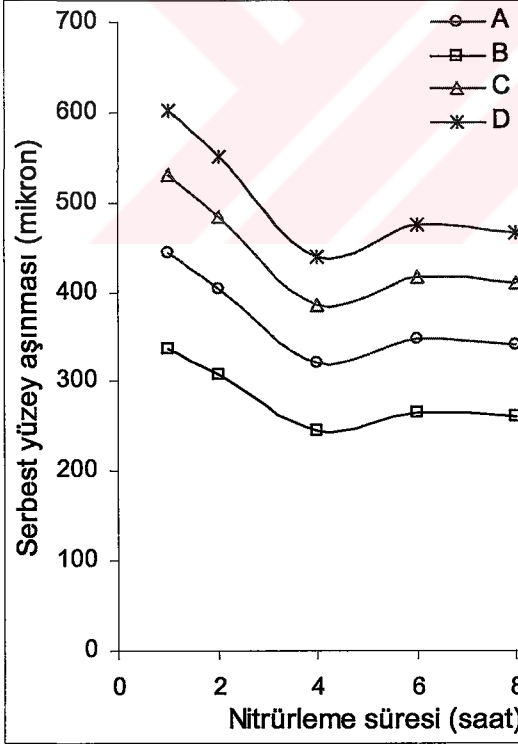
Şekil 6.23 Nitrürlenmiş plakette, plazma nitrüleme ve talaş kaldırma şartlarına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınma miktarları
(A-1 nci talaş kaldırma deneyi, B-2 nci talaş kaldırma deneyi,
C-3 ncü talaş kaldırma deneyi, D-4 ncü talaş kaldırma deneyi)



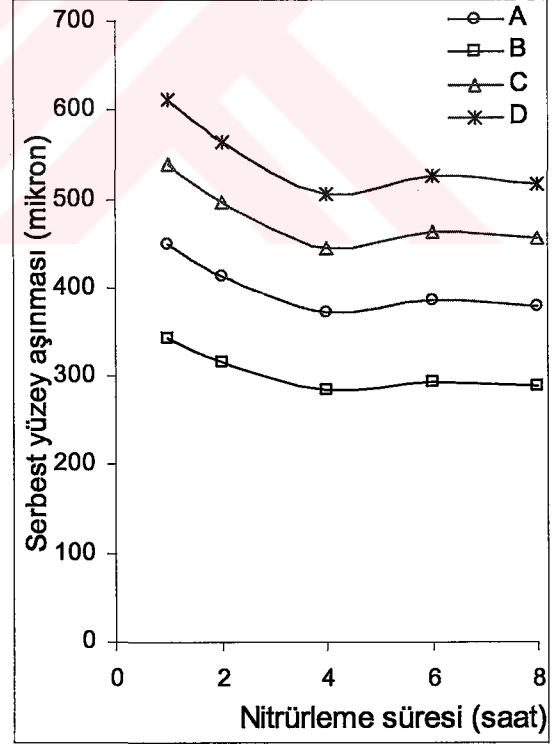
e. Gaz karışım oranı %75H₂+%25N₂, sıcaklık 600°C



f. Gaz karışım oranı %50H₂+%50N₂, sıcaklık 600°C

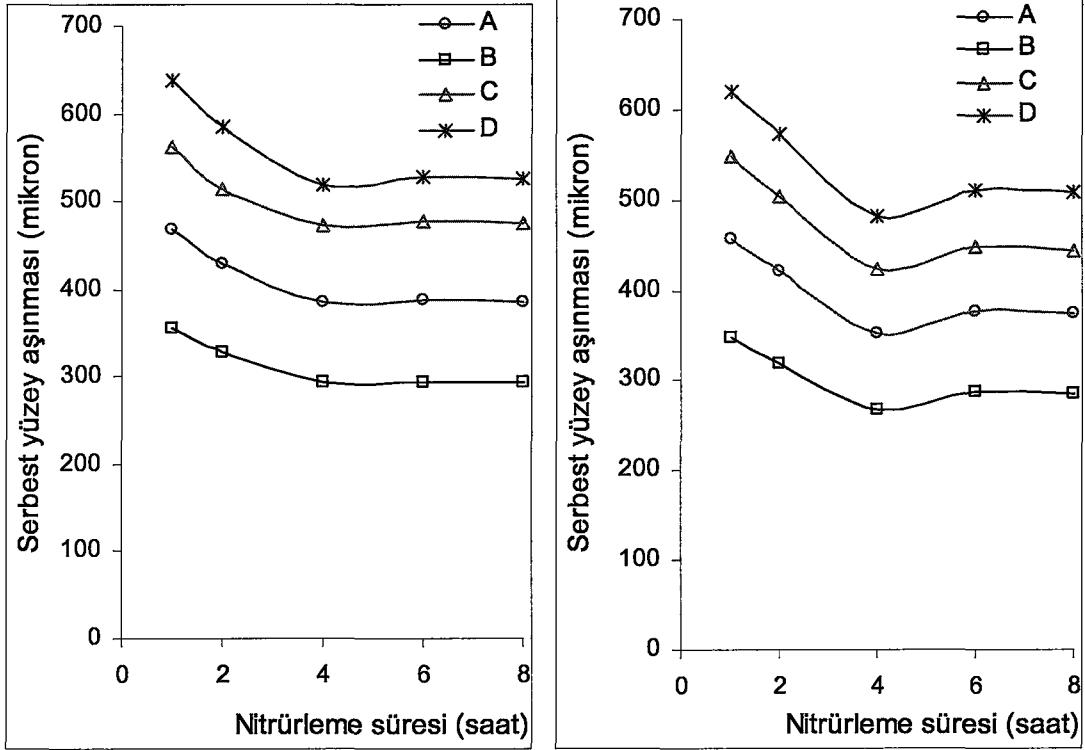


g. Gaz karışım oranı %75H₂+%25N₂, sıcaklık 550°C



h. Gaz karışım oranı %50H₂+%50N₂, sıcaklık 550°C

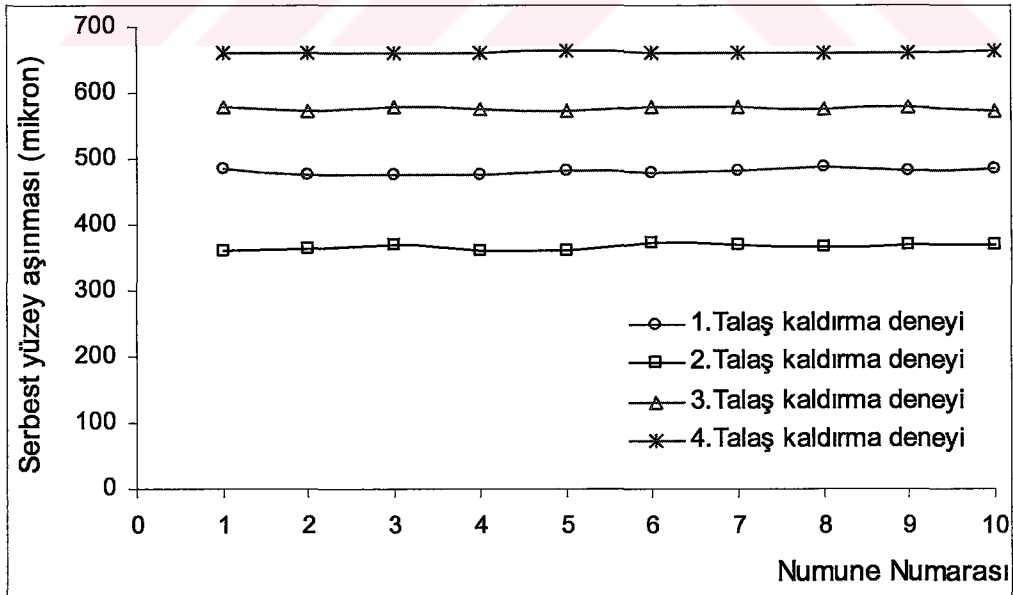
Şekil 6.23 Nitrürlenmiş plakette, plazma nitrüleme ve talaş kaldırma şartlarına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınma miktarları (devamı)
(A-1 nci talaş kaldırma deneyi, B-2 nci talaş kaldırma deneyi,
C-3 ncü talaş kaldırma deneyi, D-4 ncü talaş kaldırma deneyi)



I. Gaz karışım oranı %75H₂+%25N₂, sıcaklık 500°C

J. Gaz karışım oranı %50H₂+%50N₂, sıcaklık 500°C

Şekil 6.23 Nitrülenmiş plakette, plazma nitrüleme ve talaş kaldırma şartlarına bağlı olarak oluşan serbest yüzey aşınma miktarları (devamı)
(A-1 nci talaş kaldırma deneyi, B-2 nci talaş kaldırma deneyi,
C-3 ncü talaş kaldırma deneyi, D-4 ncü talaş kaldırma deneyi)



Şekil 6.24 Nitrülenmemiş plakette talaş kaldırma sonrasında meydana gelen serbest yüzey aşınma miktarları

üzerindeki etkisi dolaylı olarak serbest yüzey aşınmasını da etkilemektedir. Bu nedenle, serbest yüzey aşınmasının azaltılabilmesi için maksimum yüzey sertliği, minimum sürtünme katsayısı ve maksimum difüzyon tabakası kalınlığını sağlayan plazma nitrüleme parametreleri seçilmelidir.

Talaş kaldırma şartlarından sadece kesme süresinin değişken olduğu düşünülürse; plazma nitrüleme şartlarından bağımsız olarak kesme süresinin artmasıyla birlikte plakette oluşun serbest yüzey aşınma miktarı artmıştır. Birbirinden bağımsız 4 talaş kaldırma deneyi sonucunda plakette oluşun serbest yüzey aşınma profili benzer karakterdedir. Bu sonuç birbirinden bağımsız talaş kaldırma deneylerinin kendi içersinde tutarlı olduğunu göstermektedir.

10 adet nitrülenmemiş plaket, nitrülenmiş plaketterle birlikte talaş kaldırma deneylerinde kullanılmıştır. Böylece nitrülenmemiş plaketterin nitrülenmiş plaketterle aynı kesme şartlarında kullanılması sağlandığı gibi, farklı zamanlarda yapılan talaş kaldırma deneylerinde oluşması muhtemel hatalarında kontrolü sağlanmıştır. Şekil 6.24'te nitrülenmemiş plaketterle yapılan talaş kaldırma deneyleri sonucunda plakette meydana gelen serbest yüzey aşınma miktarları verilmiştir. 10 farklı plaket için elde edilen serbest yüzey aşınma miktarlarındaki sapmanın ihmal edilebilecek kadar az olması, talaş kaldırma deneylerinin kendi içinde tutarlı olduğunu ispatlamaktadır.

6.6 Plazma Nitrüleme ve Talaş Kaldırma Şartlarına Bağlı Olarak Plakette Meydana Gelen Ağırlık Azalmaları

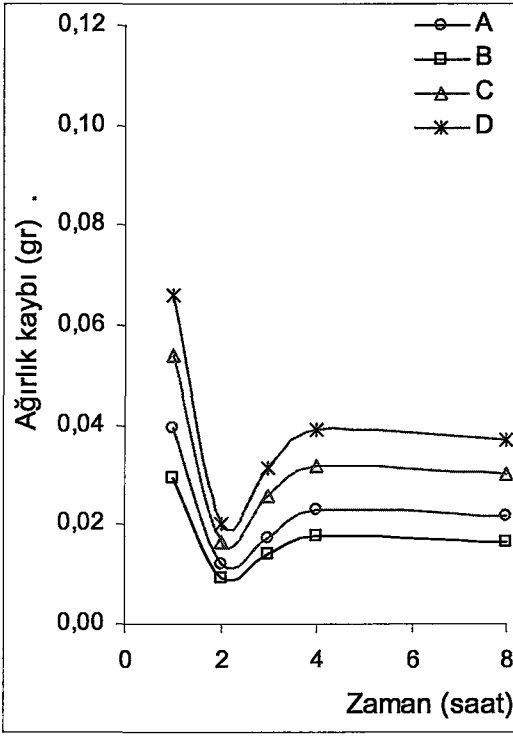
Talaş kaldırma sırasında meydana gelen aşınma nedeniyle plakette bir miktar ağırlık kaybı meydana gelecektir. Bu ağırlık kaybı; sadece serbest yüzey aşınmasından kaynaklanan bir kayıp olmamakla birlikte, bu kaybın oldukça büyük bir bölümünü serbest yüzey aşınması oluşturacaktır. Çünkü talaş kaldırma şartları serbest yüzey aşınmasının etkin aşınma mekanizması olmasını sağlayacak şekilde seçilmiştir. Bu nedenle her bir talaş kaldırma deneyi sonrasında plaketterin ağırlıkları ölçülmüş ve başlangıç durumuna göre plaketterdeki ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Plaketterdeki ağırlık kayıplarının ölçülmesine ilişkin esaslar Bölüm 5'te anlatılmıştır.

Nitrülenmiş plakette talaş kaldırma şartlarına bağlı olarak meydana gelen ağırlık kayıpları değişimleri Şekil 6.25'te gösterilmiştir. Nitrülenmiş ve nitrülenmemiş plakette meydana gelen ağırlık kayıplarını karşılaştırabilmek amacıyla nitrülenmemiş plakette meydana gelen ağırlık kayıpları da ölçülmüş ve Şekil

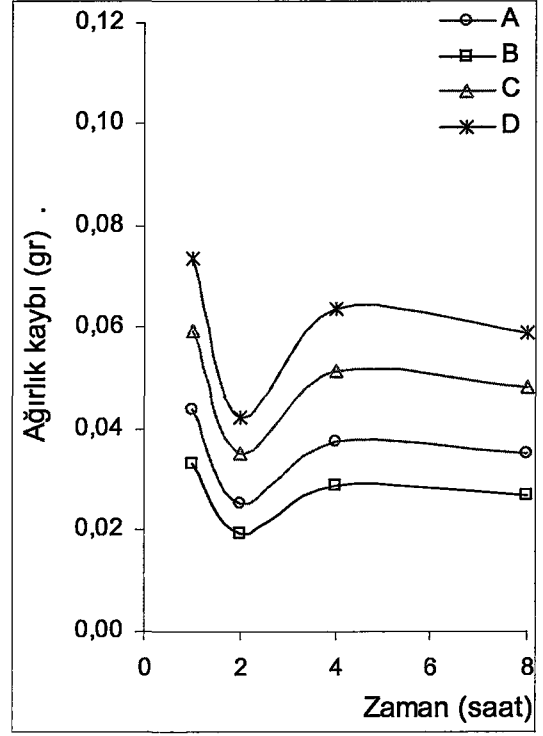
6.26'da verilmiştir. Şekil 6.25 incelendiğinde plakette meydana gelen ağırlık kayıpları değişim profilinin serbest yüzey aşınma değişim profiline oldukça benzer karakteristikte olduğu görülmektedir. Seçilen talaş kaldırma şartlarının plaketteki etkin aşınma mekanizması serbest yüzey aşınması yapması ve seçilen kesme şartlarına bağlı olarak diğer aşınma mekanizmalarının oluşmaması yada ihmal edilebilecek kadar az olması böyle bir sonucu ortaya çıkarmaktadır. Serbest yüzey aşınması ile ağırlık kayıpları arasındaki korelasyon katsayısının yaklaşık $r=0,99$ olması bunu doğrulamaktadır. Bu sonuç ağırlık kaybı ile serbest yüzey aşınması arasında çok güçlü bir korelasyon olduğunu söylemektedir.

Ağırlık kaybının asıl nedeni serbest yüzey aşınması olduğundan, serbest yüzey aşınması üzerinde etkili olan plazma nitritleme parametrelerinin ağırlık değişim profili üzerindeki etkisi de benzer karakterdedir. Ağırlık kayıpları ile plazma nitritleme sonrasında değişen malzeme özellikleri arasındaki korelasyon incelendiğinde; yüzey sertliği ile olan korelasyon $r=-0,93$, sürtünme katsayısı ile olan korelasyon $r=0,91$, difüzyon tabakası kalınlığı ile olan korelasyon $r=0,70$ ve beyaz tabaka ile olan korelasyon $r=-0,09$ 'dur. Bu sonuçlardan da görüleceği gibi, ağırlık kaybı kesme şartlarıyla birlikte plaketteki yüzey sertliği, sürtünme katsayısı ve difüzyon tabakası kalınlığı ile kontrol edilebilir. Minimum ağırlık kaybı için maksimum yüzey sertliği, minimum sürtünme katsayısı ve maksimum difüzyon tabakası kalınlığını sağlayacak nitritleme parametreleri seçilmelidir.

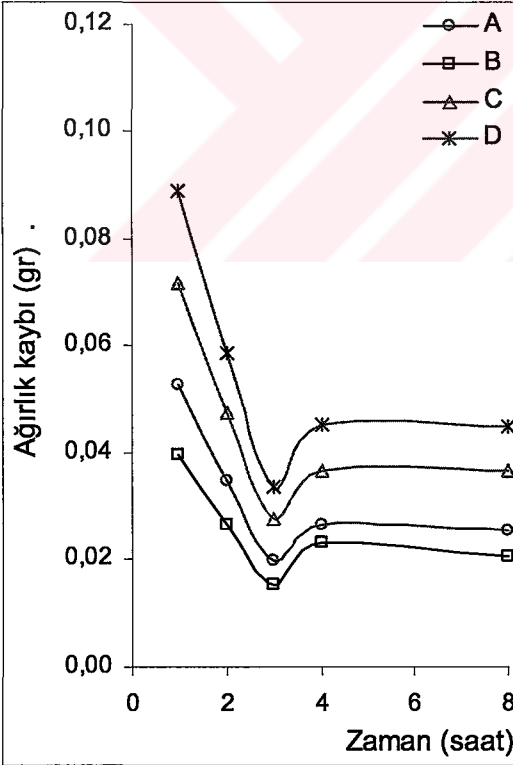
Ağırlık kayıpları; talaş kaldırma ve plazma nitritleme şartlarına bağlı olarak değişmektedir. En düşük ağırlık kaybı (0,0093 gr) $\%75H_2+\%25N_2$ gaz karışım oranında $700^{\circ}C$ sıcaklıkta 2 saat süreyle plazma nitritlenmiş plakette 2 nci talaş kaldırma deneyinde kullanılmasıyla (Şekil 6.25.a), en büyük ağırlık kaybı (0,1070 gr) ise $\%50H_2+\%50N_2$ gaz karışım oranında $500^{\circ}C$ sıcaklıkta 1 saat süreyle plazma nitritlenmiş plakette 4 ncü talaş kaldırma deneyinde kullanılmasıyla elde edilmiştir (Şekil 6.25.h). En düşük ağırlık kaybının olduğu talaş kaldırma şartlarında nitritlenmemiş plaketteki ağırlık kaybı 0,0496 gr ve en büyük ağırlık kaybının olduğu talaş kaldırma şartlarında nitritlenmemiş plaketteki ağırlık kaybı 0,1100 gr olduğuna göre plazma nitritleme ile ağırlık kaybı miktarında yaklaşık $\%2,7$ ila $\%81$ arasında değişim sağlanmıştır (Şekil 6.26). Bu oranlar serbest yüzey aşınmasında sağlanan iyileşme ile ($\%3,6$ ila $\%81,3$) yaklaşık aynıdır. Aradaki farkın talaş kaldırma sırasında oluşan diğer aşınma mekanizmalarından ve ölçümler sırasında yapılan hatalardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir.



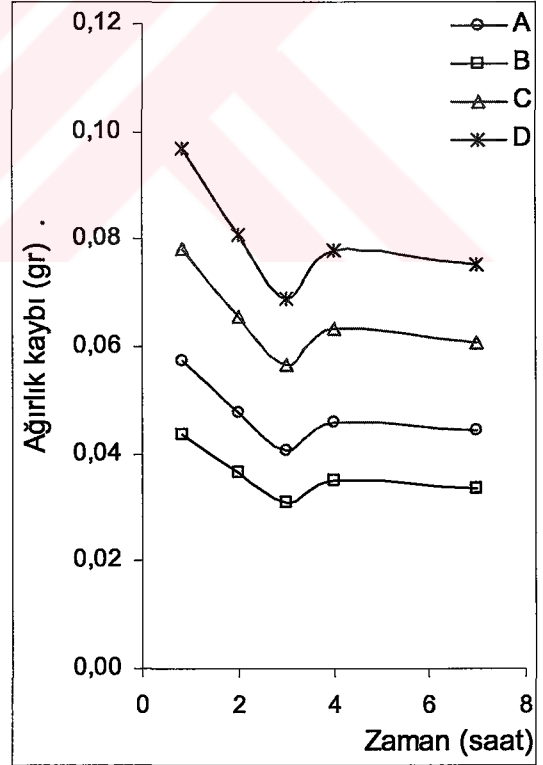
a. Gaz karışım oranı %75H₂+%25N₂, sıcaklık 500°C



b. Gaz karışım oranı %50H₂+%50N₂, sıcaklık 500°C



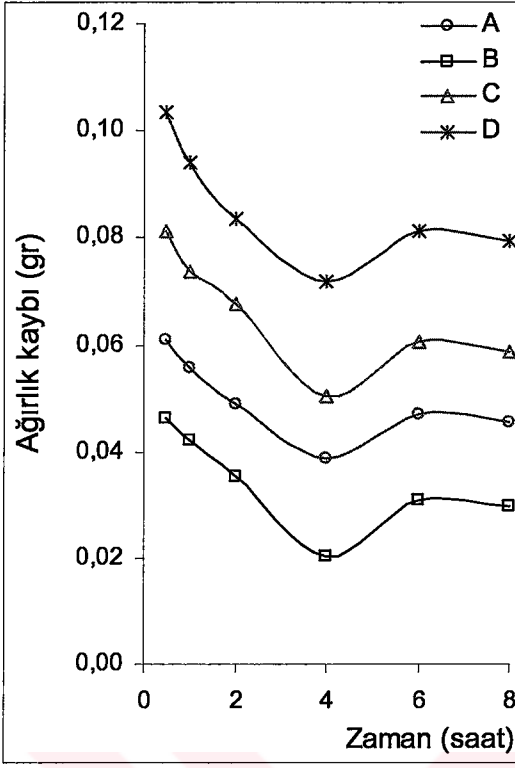
c. Gaz karışım oranı %75H₂+%25N₂, sıcaklık 550°C



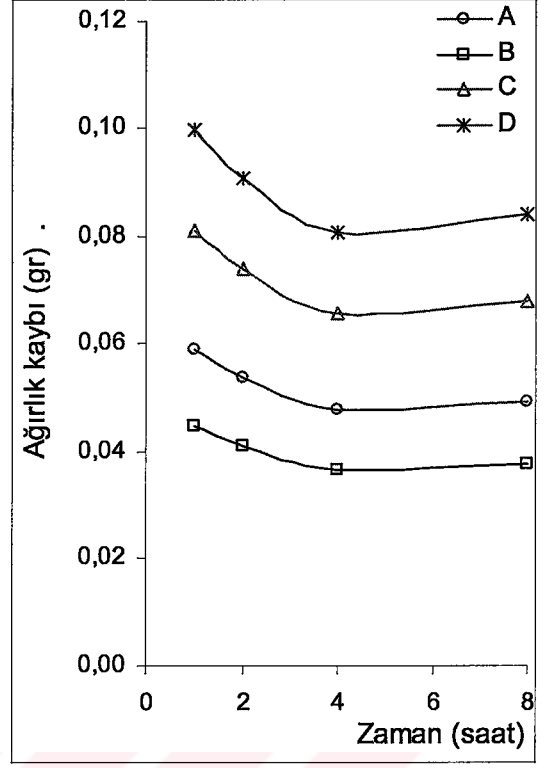
d. Gaz karışım oranı %50H₂+%50N₂, sıcaklık 550°C

Şekil 6.25 Plazma nitrülenmiş plakette talaş kaldırma sonrasında oluşan ağırlık kayıpları

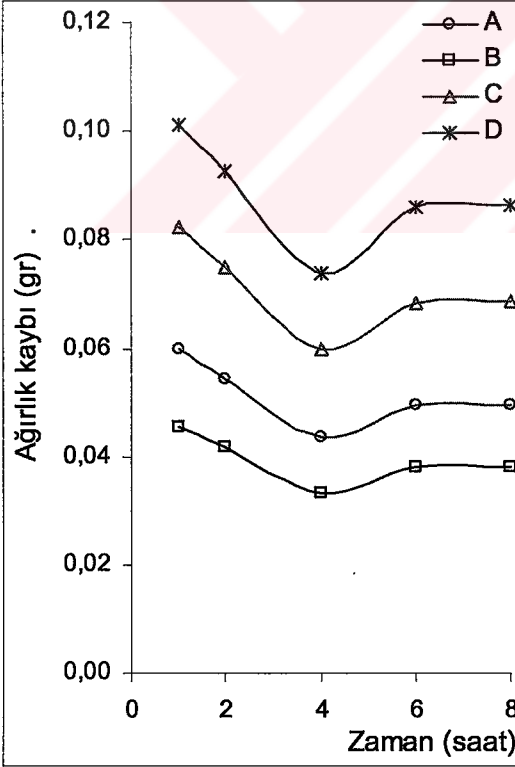
(A-1 nci talaş kaldırma deneyi, B-2 nci talaş kaldırma deneyi, C-3 ncü talaş kaldırma deneyi, D-4 ncü talaş kaldırma deneyi)



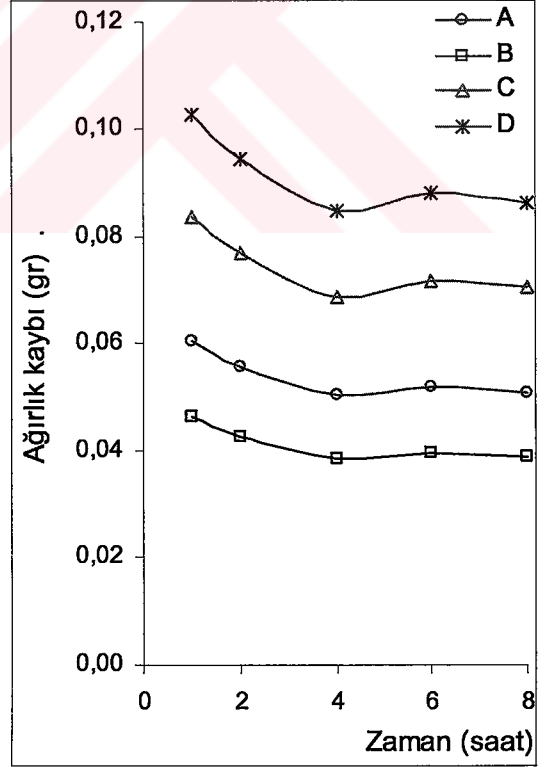
e. Gaz karışım oranı %75H₂+%25N₂, sıcaklık 600°C



f. Gaz karışım oranı %50H₂+%50N₂, sıcaklık 600°C



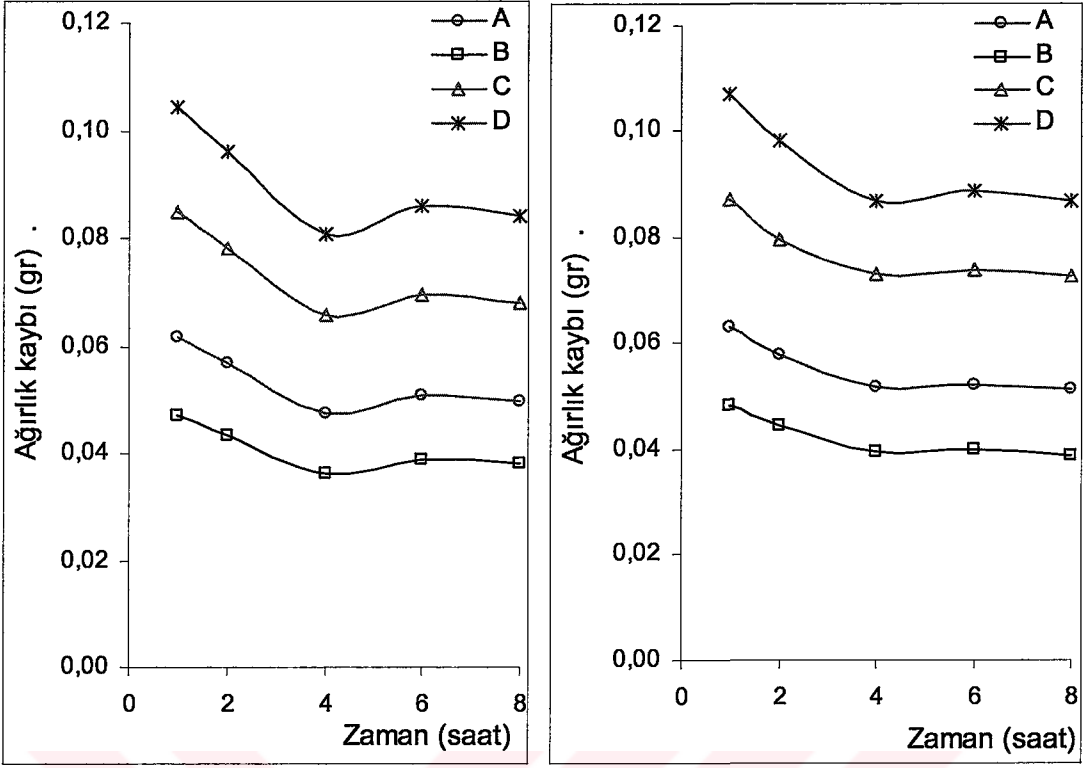
g. Gaz karışım oranı %75H₂+%25N₂, sıcaklık 650°C



h. Gaz karışım oranı %50H₂+%50N₂, sıcaklık 650°C

Şekil 6.25 Plazma nitrülenmiş plakette talaş kaldırma sonrasında oluşan ağırlık kayıpları (devamı)

(A-1 nci talaş kaldırma deneyi, B-2 nci talaş kaldırma deneyi, C-3 ncü talaş kaldırma deneyi, D-4 ncü talaş kaldırma deneyi)

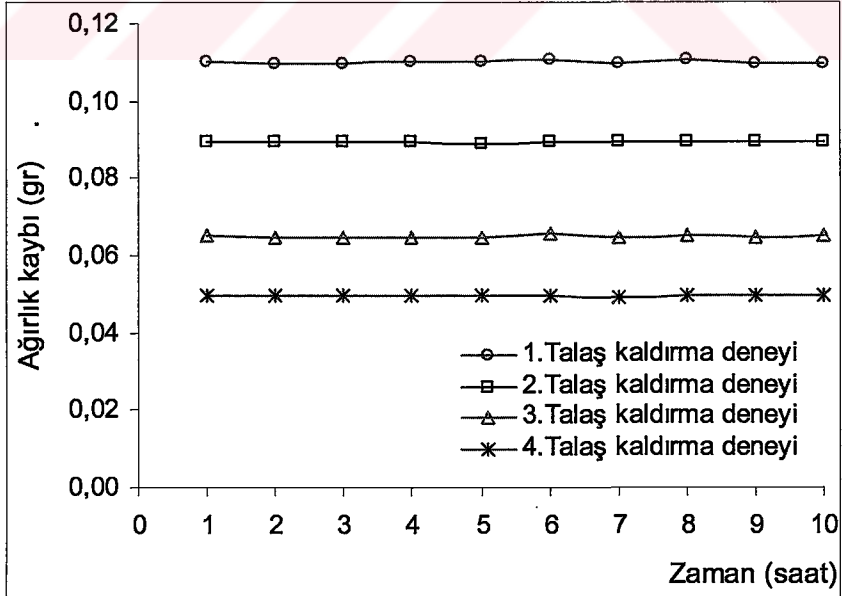


i. Gaz karışım oranı %75H₂+%25N₂, sıcaklık 700°C

j. Gaz karışım oranı %50H₂+%50N₂, sıcaklık 700°C

Şekil 6.25 Plazma nitrülenmiş plakette talaş kaldırma sonrasında oluşan ağırlık kayıpları (devamı)

(A-1 nci talaş kaldırma deneyi, B-2 nci talaş kaldırma deneyi, C-3 ncü talaş kaldırma deneyi, D-4 ncü talaş kaldırma deneyi)



Şekil 6.26 Nitrülenmemiş plakette talaş kaldırma sonrasında oluşan ağırlık kayıpları

(A-1 nci talaş kaldırma deneyi, B-2 nci talaş kaldırma deneyi, C-3 ncü talaş kaldırma deneyi, D-4 ncü talaş kaldırma deneyi)

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar

İyon nitrürleme sonrasında nitrürleme parametrelerine bağlı olarak plakelerin yüzey özellikleri değişmektedir. Değişen bu özellikler yüzey sertliği, sürtünme katsayısı ve plaket yüzeyinde oluşan tabakaların kalınlıklarıdır.

İyon nitrürlenmiş plakelerin yüzey sertlikleri, nitrürleme parametrelerine bağlı olarak %6,5 ila %48,3 arasında değişen oranlarda artmıştır. Maksimum yüzey sertliği (2224 HV) %75H₂+%25N₂ gaz karışım oranı ve 700°C nitrürleme sıcaklığında 2 saat süren nitrürleme sonrasında elde edilmiştir. Minimum yüzey sertliği ise (1598 HV) %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranı ve 500°C nitrürleme sıcaklığında 1 saat süren nitrürleme sonrasında oluşmuştur. Difüzyon bölgesindeki nitrojen atomlarının alaşım elementleri ile oluşturdukları nitrür çökeltilerin dağılımı ve büyüklüğü yüzey sertliği değerini belirlemektedir. Bu çökeltilerin dağılım ve büyüklüğü nitrürleme parametrelerine bağlıdır.

Diğer nitrürleme parametreleri sabit kalmak şartıyla artan sıcaklık yada artan süreyle birlikte yüzey sertliğinin arttığı, ancak belli bir sıcaklık değerinden sonra yüzey sertliği azalarak belli bir değerde sabit kaldığı görülmüştür. Bu durum yüzeyin nitrüre doyması ve nitrür çökeltilerinin büyümesi nedeniyle oluşmuştur.

Diğer nitrürleme parametreleri sabit kalmak şartıyla, gaz karışım oranının %75H₂+%25N₂ değerinde en yüksek yüzey sertliğinin olduğu görülmüştür. N₂ miktarının düşük olduğu gaz karışım oranlarında yeterli nitrür bileşiklerinin oluşmaması nedeniyle yüzey sertliğinin azaldığı, N₂ miktarının yüksek olduğu gaz karışım oranlarında da H₂ miktarının azalmasından kaynaklanan yüzeyin yeterince aktifleşmemesi nedeniyle yüzey sertliğinin düştüğü görülmüştür. Bu nedenle maksimum yüzey sertliği gaz karışım oranındaki N₂'nin optimum değerinde (%75H₂+%25N₂) sağlanmıştır.

İstenilen yüzey sertliğinin; aynı gaz karışım oranı için yüksek sıcaklıklarında kısa süre nitrürleyerek yada düşük sıcaklıklarında daha uzun süre nitrürleyerek

sağlanabileceği görülmüştür. Bu durum, arzu edilen yüzey sertliğinin oluşumunu sağlayan difüzyon için gereksinim duyulan enerji miktarı ile açıklanabilir.

Yüzey sertliği ile en yüksek korelasyona sahip nitrürleme parametresi sıcaklıktır. Değişim analizi sonuçlarına göre de yüzey sertliği üzerinde en büyük etkiye sahip parametre sıcaklıktır. Bu durum, iyon nitrürlemenin difüzyon esaslı bir mekanizma olmasından kaynaklanmaktadır. Böylece, istenilen yüzey sertliğinin sağlanabilmesi için kontrol edilmesi gereken asıl nitrürleme parametresinin sıcaklık olduğu anlaşılmıştır.

İyon nitrürlenmiş plakentin sürtünme katsayısı, iyon nitrürleme parametrelerine bağlı olarak %11 ila %70 arasında değişen oranlarda azalmıştır. Minimum sürtünme katsayısı (0,147) %75H₂+%25N₂ gaz karışım oranı ve 700°C nitrürleme sıcaklığında 2 saat süren nitrürleme sonrasında elde edilmiştir. Maksimum sürtünme katsayısı ise (0,427) %50H₂+%50N₂ gaz karışım oranı ve 500°C nitrürleme sıcaklığında 1 saat süren nitrürleme sonrasında oluşmuştur. Sürtünme katsayısındaki bu değişim profili, plakentin yüzey sertliği değişim profili ile ters yönlü olarak benzerlik göstermektedir. Bu nedenle sürtünme katsayısı ile nitrürleme parametreleri arasındaki ilişki, yüzey sertliği ile nitrürleme parametreleri arasındaki ilişkinin benzeri ancak ters yönlüdür. Diğer bir ifadeyle; yüzey sertliğinde artışa neden olan bir nitrürleme parametresi, sürtünme katsayısında benzer miktarda düşüşe neden olmaktadır. Sürtünme katsayısı ile yüzey sertliği arasındaki korelasyonun -0,91 olması bunu ispatlamaktadır.

Aynı sürtünme katsayısının (gaz karışım oranının sabit kalmak şartıyla) yüksek sıcaklıklarda kısa süre nitrürleyerek yada düşük sıcaklıklarda daha uzun süre nitrürleyerek sağlanabileceği görülmüştür. Sıcaklığın ve sürenin sabit kalması durumunda gaz karışım oranındaki N₂ miktarına bağlı olarak sürtünme katsayısı değişmekte, gaz karışım oranının %75H₂+%25N₂ değeri için minimum sürtünme katsayısı sağlanmaktadır. Bu durum sürtünme katsayısının önemli ölçüde yüzey sertliğine bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Yüzeyler arasındaki sertlik farkı maksimum olduğunda en iyi sürtünme şartları meydana gelmekte ve sürtünme katsayısı minimum olmaktadır.

İyon nitrürleme şartlarına bağlı olarak plakelerin yüzeylerinde bileşim (beyaz) ve difüzyon tabakası meydana gelmektedir. Difüzyon tabakası tüm iyon nitrürleme şartlarında meydana gelirken, beyaz tabaka sadece belli nitrürleme şartları altında meydana gelmiştir. Aynı gaz karışım oranı ve sıcaklık için difüzyon tabakasının

oluşum karakteristiğinin zamana göre parabolik bir yapıda olduğu, diğer bir ifadeyle difüzyon tabakası kalınlığındaki artış hızının nitrürlemenin başlangıcında oldukça büyük olduğu, artan nitrürleme süresi ile birlikte bu hızda azalma meydana geldiği görülmüştür. Difüzyon tabakası kalınlığındaki artış hızının azalma nedeni, yüzeyin nitrüre doyması nedeniyle azot difüzyonunun başlangıca göre daha zor olmasıdır. Difüzyon tabakası kalınlığı ile nitrürleme parametrelerinin korelasyonu incelendiğinde, en yüksek korelasyonu nitrürleme süresi ve sıcaklığı ile sağladığı görülmektedir. Değişim analizi sonuçlarına göre de en değişimi nitrürleme süresi ve sıcaklığı ile sağlamaktadır. Difüzyon tabakası oluşma mekanizması zamana ve sıcaklığa bağlı olduğundan böyle bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Gaz karışım oranı ile difüzyon tabakasının korelasyonu incelendiğinde; aralarında oldukça düşük ve ters yönlü bir korelasyon olduğu, diğer tüm parametrelerin sabit tutulması durumunda gaz karışım oranındaki N_2 miktarının artmasıyla difüzyon tabakası kalınlığının azaldığı görülmüştür. Gaz karışım oranındaki N_2 miktarının artmasıyla difüzyon tabakası kalınlığının azalması, uygulanan voltajdaki değişimin etkisiyle açıklanabilir. Gaz karışım oranındaki N_2 miktarının artışı, daha düşük bir uygulama voltajı gerektirir. Uygulanan düşük voltaj nedeniyle, iyonize olan gazların miktarı ve iyonların kinetik enerjisi azalmaktadır. Bu yüzden; gaz karışım oranında N_2 miktarının artması nitrürleme hızında azalma meydana getirmektedir.

Bileşim tabakası sadece belli nitrürleme şartları altında meydana gelmiştir. Bileşim tabakası değişim profilinin difüzyon tabakası değişim profiline benzer karakterde olduğu görülmüştür. Ancak kalınlıkları itibariyle bir karşılaştırma yapılacak olursa, bileşim tabakasının difüzyon tabakasına göre oldukça ince olduğu görülmüştür. Bileşim tabakası ile nitrürleme parametreleri arasındaki korelasyon, difüzyon tabakası ile nitrürleme parametreleri arasındaki korelasyondan farklıdır. Bileşim tabakası ile en yüksek korelasyonu gaz karışım oranı sağlamaktadır. Değişim analizine göre de bileşim tabakası kalınlığı üzerinde en yüksek etkiye sahip nitrürleme parametreleri gaz karışım oranı ve sıcaklıktır. Bileşim tabakası oluşumunda en etkili olan parametre gaz karışım oranındaki N_2 miktarıdır. Korelasyon ve değişim analizi sonuçları bunu doğrulamaktadır. Gaz karışım oranındaki N_2 miktarının artmasıyla birlikte bileşim tabakası meydana gelmektedir. Sıcaklığının artması difüzyonu kolaylaştırdığı için, artan nitrürleme sıcaklığı bileşim tabakası kalınlığının artmasına neden olmaktadır.

Plaketlerin değişen yüzey özelliklerine bağlı olarak talaş kaldırma performanslarında da değişim olduğu görülmüştür. Bu amaçla talaş kaldırma sırasında plaketlerde

oluşan serbest yüzey aşınması ve ağırlık kaybı izlenmiştir. Farklı talaş kaldırma deneyleri sonrasında, plakette oluşmuş serbest yüzey aşınması değişim profilleri benzer karakterdedir. Bu değişim profilleri plakette yüzey sertliği ve sürtünme katsayısı değişim profilleri ile de benzer yapıdadır. Korelasyon analizi sonuçlarına göre serbest yüzey aşınması ile sürtünme katsayısı arasındaki korelasyon 0,91, serbest yüzey aşınması ile yüzey sertliği arasındaki korelasyonun ise -0,91'dir. Değişim analizi sonuçlarına göre de serbest yüzey aşınması ile nitrürleme parametreleri arasındaki değişim, yüzey sertliği ve sürtünme katsayısı ile nitrürleme parametreleri arasındaki değişim ile aynıdır. Bu sonuç; plaketteki serbest yüzey aşınmasını etkileyen parametrelerin yüzey sertliği ve sürtünme katsayısı değişiminde etkili olan parametrelerle aynı olduğunu göstermektedir. Plaket aşınmasını etkileyen pek çok faktör olmakla birlikte talaş kaldırma deneylerinde kesme zamanı dışındaki tüm değişkenlerin sabit tutulduğu göz önüne alınırsa, plakette serbest yüzey aşınmasını etkileyen parametreler plakette yüzey sertliğini etkileyen parametrelerle aynıdır.

Takım performanslarının iyileştirilebilmesi amacıyla değişik yüzey işlemleri (nitrürleme, kaplama, nitrürleme+kaplama, çok tabakalı kaplama vb.) uygulanmakta ve sağlanan performanslar değerlendirilmektedir. Sinterlenmiş karbür plakette farklı tabakalarla kaplanması sonucunda talaş kaldırma performansında %1 ila %70 arasında iyileşme sağlandığını belirten çalışma (Gu ve diğ., 1999), kaplanmış plakette talaş kaldırma performansının kaplanmamış plakete göre %8 ila %33 arasında değişen oranlarda arttığını belirten çalışma (Haron ve diğ., 2001), iyon nitrürleme sonrasında yapılan TiN kaplamayla kaplanmamış takıma göre abraziv aşınma direncinin %47 arttığını belirten çalışma (Batista ve diğ., 2002), TiN kaplanmış takımın abraziv aşınma direncinin kaplanmamış takıma göre %23 daha yüksek olduğunu belirten çalışma ve çok tabakalı TiN kaplamayla abraziv aşınma direncinde %45, takımın talaş kaldırma performansında ise %50 iyileşme sağlandığını belirten çalışma (Imbeni ve diğ., 2001) bunlardan en önemlileridir.

Talaş kaldırma performansı olarak plakette meydana gelen serbest yüzey aşınması referans alındığında; nitrürlenmemiş plakete göre nitrürlenmiş nitrürlenmiş plakette iyon nitrürleme şartlarına bağlı olarak %3,6 ila %81,3 arasında değişen oranlarda iyileşme sağlanmıştır. Plakette yüzey sertliğindeki maksimum artış %48,3, sürtünme katsayısındaki maksimum azalma %70 olurken, serbest yüzey aşınmasındaki maksimum iyileşme %81,3'lere çıkmıştır. Bunun nedeninin; serbest yüzey aşınmasının sadece yüzey sertliğine bağlı olmadığı, aynı

zamanda difüzyon tabakası kalınlığı, sürtünme katsayısı etkileşimi gibi yüzeyin diğer tribolojik özelliklerine bağlı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bileşim tabakasının, serbest yüzey aşınması üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı değerlendirilmektedir. Oldukça sert ve kırılğan, aynı zamanda oldukça ince bir yapıda olan bileşim tabakasının, talaş kaldırmanın başlangıcında aşınarak yada parçalanarak ana kütleden uzaklaştığı ve bu tabaka altında yer alan difüzyon tabakasının aşınma dayanımında etkili olduğu değerlendirilmektedir.

Talaş kaldırma deneylerinin başlangıcında ve sonunda her bir plakentin ağırlığı ölçülerek, plaketin talaş kaldırma performansı ile ağırlık kaybı ve nitrürleme parametreleri arasındaki ilişkinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Talaş kaldırma şartlarına bağlı olarak, plakette aynı anda birden fazla aşınma tipinin oluşması mümkündür. Ancak kesme şartlarının uygun seçilmesi durumunda plakette tek bir aşınma tipinin etkin olmasını sağlamak da mümkündür. Ağırlık ölçümleri sonucunda elde edilen değişim profillerinin serbest yüzey aşınma değişim profillerine benzer bir yapıda olması, plakette etkili olan ana aşınma tipinin serbest yüzey aşınması olduğunu göstermektedir. Ayrıca, ağırlık kaybı ile serbest yüzey aşınması arasındaki korelasyon 0,99'dur. Bu durum da ağırlık kaybının önemli ölçüde serbest yüzey aşınmasından kaynaklandığını göstermektedir. Plaketlerin talaş kaldırmada kullanıldığı kesme şartları da bu durumu işaret etmektedir. Zira talaş kaldırma şartları serbest yüzey aşınması etkin aşınma tipi olacak şekilde seçilmiştir. Nitrülenmemiş plaketlere göre, iyon nitrülenmiş plaketlerde nitrürleme şartlarına bağlı olarak ağırlık kaybında yaklaşık %2,7 ila %81 arasında değişen oranlarda azalma sağlanmıştır. Bu oranlar iyon nitrülenmiş plaketlerde sağlanan talaş kaldırma performansındaki iyileşme ile paralellik arz etmektedir.

Yapılan çalışma sonucunda bilime sağlanan katkıların şunlar olduğu değerlendirilmektedir.

a- İyon nitrürleme ile sinterlenmiş sert metal plakelerin talaş kaldırma performanslarının artırılabilceği görülmüştür.

b- Plaketlerin talaş kaldırma performansındaki artış miktarının iyon nitrürleme parametrelerine (nitrürleme süresi, nitrürleme sıcaklığı ve gaz karışım oranı) bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Böylece; uygun seçilecek iyon nitrürleme parametreleri ile kaplamasız sinterlenmiş karbür takımdan maksimum talaş kaldırma performansının elde edilebileceği görülmüştür.

c- İyon nitürleme parametrelerine bağlı olarak plakelerin yüzey sertliği, sürtünme katsayısı, aşınma dayanımı, yüzeyde meydana gelen tabaka özelliklerinin değiştiği görülmüştür. Böylece değişik uygulamalar için farklı özellikte (örneğin değişik yüzey sertliği-difüzyon tabakası kalınlığı) bir yüzey istenildiğinde, nitürleme parametrelerini değiştirerek istenilen özellikte yüzey tabakasının oluşturulabildiği anlaşılmıştır.

d- Elde edilen deney sonuçlarının istatistiksel analizi yapılarak sonuçlar yorumlanmıştır. Bu amaçla korelasyon, değişim ve hata analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda değişkenlerin birbirini etkileme miktarı ve yönü ile değişkenler arasındaki ilişkinin miktarı ve yönü incelenmiştir. Böylece incelenen yüzey özelliklerinin hangi parametrelerle nasıl kontrol edilebileceği tespit edilmiştir.

e- Talaş kaldırmada kullanılan takımların değişik yöntemlerle (PVD kaplama, CVD kaplama, tek yada çok tabakalı kaplama, iyon nitürleme sonrasında kaplama vb.) talaş kaldırma performansını artırmaya yönelik çalışmalar incelenmiş ve bu çalışmalarla sağlanan performans artışları izlenmiştir. Böylece bu çalışma sonucunda ortaya konulan performans artışının diğer çalışmalarla mukayesesi yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

7.2 Öneriler

Bu konuda yapılması planlanan çalışmalara ilişkin öneriler aşağıda sıralanmıştır:

a-Farklı kimyasal bileşimdeki sinterlenmiş karbür plaketer aynı nitürleme parametreleri altında iyon nitürlendikten sonra elde edilen yüzey özellikleri ve talaş kaldırma performansları karşılaştırılabilir. Örneğin plaketer bünyesinde titanyuma göre daha yüksek nitür oluşturma kabiliyeti olan alüminyumun bulunması durumunda, sağlanan performans artışı da farklı olacaktır. Bu nedenle farklı kimyasal bileşime sahip plaketer iyon nitürlendikten sonra değişen yüzey özellikleri ve/veya talaş kaldırma performansları değerlendirilerek, plaketerin genel anlamda iyon nitürleme karakteristikleri belirlenebilir.

b- Talaş kaldırma şartları (parça malzemesi, ilerleme ve kesme hızları vb.) değişken tutularak, aynı şartlarda iyon nitürlenmiş plaketerin değişik talaş kaldırma şartları altındaki performansları izlenebilir. Böylece değişik talaş kaldırma şartlarının her biri için optimum iyon nitürleme şartları tespit edilebilir. Ayrıca talaş kaldırma deneyleri sonucunda elde edilecek veriler üzerinde kesme sıvısının etkisini bertaraf etmek için kesme sıvısı kullanılmamıştır. Bu nedenle iyon nitürlenmiş plaketer performansının

kesme sıvısına bağılı olarak değişimini izlemek için talaş kaldırma işlemi kesme sıvısı altında yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilebilir.

c- Aynı özellikteki plaketer değişik yöntemlerle nitrürlenerek (katı, sıvı, gaz, iyon) talaş kaldırma performansları izlenebilir. Böylece değişik nitrürleme yöntemlerinin plaketin talaş kaldırma performansı üzerinde sağlamış olduğu faydalar belirlenebilir.

d- İyon nitrürlenmiş plaket ile iyon nitrürlendikten sonra yüzeyi değişik yöntemlerle (PVD veya CVD) kaplanmış plaketin talaş kaldırma performansı izlenebilir. Böylece iyon nitrürlenmiş ve iyon nitrürlendikten sonra yüzeyi kaplanmış plaketin performansı karşılaştırılabilir. Yapılan çalışma sonucunda, iyon nitrürleme sonrasında yapılan kaplamaya nitrürlemenin katkısı tespit edilebilir.

e- Kaplamasız plakete göre sağlanan performans artışı bilindiğine göre, iyon nitrürleme tesisatının kurulma ve işletme maliyetleri hesaplanarak bu maliyet ile performans artışı suretiyle sağlanan tasarrufun karşılaştırması yapılarak, kaplamasız takıma göre sağlanan faydanın ekonomik değerlendirmesi yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Akkurt, M.**, 1992. Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Akkurt, M.**, 1999. Bilgisayar (Excel) Destekli Uygulamalı İstatistik, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Alsaran, A. and Çelik, A.**, 1998. Structural characterization of ion nitrided AISI 5140 low alloy steel, *Materials Characterization*, **5**, 77-82.
- Alsaran, A., Çelik, A., Çelik, C. ve Efeoğlu, İ.**, 2000. İyon nitürasyon ile yüzey sertleştirme işleminde optimum çalışma şartlarının belirlenmesi, 9. *Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi*, ODTÜ, Ankara, 13-15 Eylül, s.77-82.
- Alves, C., Rodrigues, J.A. and Martinelli, A.E.**, 2000. Growth of nitrided layers on Fe-Cr alloys, *Materials Science and Engineering*, **279**, 10-15.
- Alves, C., Silva, E.F. and Martinelli, A.E.**, 2001. Effect of workpiece geometry on the uniformity of nitrided layers, *Surface and Coating Technology*, **139**, 1-5.
- Arsecularatne, J.A., Fowle, R.F., Mathew, P. and Oxley, P.L.B.**, 1996. Prediction of tool life in oblique machining with nose radius tools, *Wear*, **198**, 220-228.
- Astakhov, V.P.**, 1998. Metal Cutting Mechanics, CRC Press, New York.
- Atik, E.**, 2001. Farklı bir yüzey sertleştirme yöntemi : Borlama, *Mühendis ve Makina*, **117**, 14-27.
- Batista, J.C.A., Joseph, M.C., Godoy, C. And Matthews, A.**, 2002. Micro-abrasion wear testing of PVD TiN coatings on untreated and plasma nitrided AISI H13 steel, *Wear*, **249**, 971-979.
- Bayazıt, M. ve Oğuz, B.**, 1992. Mühendisler İçin İstatistik, Birsen Yayınevi, İstanbul.

- Baycık, H. ve Çapa, M., 2001.** İyon nitürleme yapılmış sıcak iş takım çeliğinin ortam sıcaklığı ve zamanla yüzey sertliğinin değişimi, 1. *Demir Çelik Sempozyumu*, ERDEMİR, Zonguldak, 3-5 Ekim, s.851-859.
- Baydur, G., 1979.** Malzeme, Milli Eğitim Bakanlığı Yayınlar ve Basılı Eğitim Malzemeleri Genel Müdürlüğü Basımevi, Ankara.
- Berg, M., Budtz, J.C.V., Reitz, H., Schweitz, K.O., Chevallier, C., Kringhoj, P. and Bottiger, J., 2000.** On plasma nitriding of steels, *Surface and Coating Technology*, **124**, 25-31.
- Black, P.H., 1961.** Theory of Metal Cutting, McGraw-Hill Book Company Inc., New York.
- Blum, T. and Inasaki I., 1990.** A study on acoustic emission from the orthogonal cutting process, *ASME Journal of Engineering for Industry*, **112**, 203-211.
- Bonifacio, M.E.R. and Diniz, A.E., 1993.** Correlating tool wear, tool life, surface roughness and tool vibration in finish turning with coated carbide tools, *Wear*, **173**, 135-144.
- Childs, T., Maekawa, K., Obikawa, T. and Yamane, Y., 2000.** Metal Machining Theory and Applications, John Wiley&Sons Inc., New York.
- Choudhury, S.K. and Apparao, I.V.K., 1999.** Optimization of cutting parameters for maximizing tool life, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **39**, 343-353.
- Choudhury, S.K. and Kishore, K.K., 2000.** Tool wear measurement in turning using force ratio, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **40**, 899-909.
- Choudhury, S.K. and Ramesh, S., 1995.** On-line tool wear sensing and compensation in turning, *Journal of Materials Processing Technology*, **49**, 247-254.
- Choudhury, S.K. and Rath, S., 2002.** In-process tool wear estimation in milling using cutting force model, *Journal of Materials Processing Technology*, **99**, 113-119.

- Choudhury, S.K., Jain, V.K. and Rama, R.V.V.**, 1999. On-line monitoring of tool wear in turning using a neural network, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **39**, 489-504.
- Cuppini, D., Derrico, G. and Rutelli, G.**, 1990. Tool wear monitoring based on cutting power measurement, *Wear*, **139**, 303-311.
- Çelik, A. and Karadeniz, S.**, 1996. Investigation of compound layer formed during ion nitriding of AISI 4140 Steel, *Surface and Coating Technology*, **80**, 283-286.
- Çelik, A., Alsaran, A. ve Karakan, M.**, 2002. Plazma ile termokimyasal yüzey işlemleri, *Mühendis ve Makina*, **510**, 28-37.
- Çelik, A., Efeoğlu, İ. and Sakar, G.**, 2001. Microstructure and structural behavior of ion-nitrided AISI 8620 Steel, *Materials Characterization*, **46**, 39-44.
- Çelik, A., Efeoğlu, İ. ve Alsaran, A.**, 1999. İyon nitrürleme işleminden sonra ısıtılmanın iç yapıya etkisinin araştırılması, Bilim Günleri Sempozyumu, Denizli, 5-7 Mayıs, s.150-156.
- Çelik, A., Karakan, M. ve Alsaran, A.**, 2000. Gaz karışımlarının iyon nitrürleme üzerine etkisinin araştırılması, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **2-2**, 87-94.
- Davis, J.R.**, 1995. Tool Materials, ASM Specialty Handbook, ASM International Materials Park, Ohio.
- Dearnley, P.A.**, 1985. Rake and flank wear mechanisms of coated and uncoated cemented carbides, *ASME Journal of Engineering for Industry*, **107**, 68-82.
- Dearnley, P.A., and Trent, E.M.**, 1982. Wear mechanisms of coated cemented carbides cutting tools, *Metals Technology*, **9(2)**, 60-76.
- Devi, M.U., Chakraborty, O.N. and Mohanty, O.N.**, 1999. Wear behaviour of plasma nitrided tool steels, *Surface and Coating Technology*, **116-119**, 212-221.
- Dimla, E. and Dimal, S.**, 2000. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations-a review of methods, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **40**, 1073-1098.

- Diniz, A.E. and Filho, J.C.,** 1999. Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process, *Wear*, **232**, 67-75.
- Diniz, A.E., Liu, J.J. and Dornfeld, D.A.,** 1992. Correlating tool life, tool wear and surface roughness by monitoring acoustic emission in finish turning, *Wear*, **152**, 395-407.
- Dolinsek, S. and Kopac, J.,** 1999. Acoustic emission signals for tool wear identification, *Wear*, **225-229**, 295-303.
- Dolinsek, S., Sustarsic, B. and Kopac, J.,** 2001. Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes, *Wear*, **250**, 349-356.
- Errico, G.E.D., Bugliosi, S. and Guglielmi, E.,** 1998. Tool-life reliability of cermet inserts in milling tests, *Journal of Materials Processing Technology*, **77**, 337-343.
- Erten, M., ve Özdemir, U.,** 2003. Getting higher performance from cemented carbide tool inserts by ion (plasma) nitriding, *4th Workshop on European Scientific and Industrial Collaboration*, Miskolc, Lillafüred, Hungary, May 28-30.
- Fancey, K.S., Leyland, A., Egerton, D., Torres, D. and Matthews, A.,** 1995. The influence of process gas characteristics on the properties of plasma nitrided steel, *Surface and Coating Technology*, **76-77**, 694-699.
- Galente, G., Lombardo, A. and Passannati, A.,** 1998. Tool life modelling as a stochastic process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **38**, 1361-1369.
- Gavgalı, M., Çelik, A., Alsaran, A. ve Totik, Y.,** 2002. İyon nitrürleme işleminin AISI 5140 çeliğinin burulma özelliklerine etkisi üzerine bir çalışma, *Mühendis ve Makina*, **510**, 38-44.
- Gekonde, H.O. and Subramanian, S.V.,** 2002. Tribology of tool-chip interface and tool wear mechanisms, *Surface and Coating Technology*, **149**, 151-160.
- Genceli, O.F.,** 2000. Ölçme Tekniği, Birsen Yayınevi, İstanbul.

- Genel, K.**, 2002. İyon nitrürlenmiş AISI 4140 çeliğinin yorulma ve korozyonlu yorulma davranışı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gomayel, J.I.E. and Bregger, K.D.**, 1986. On-line tool wear sensing for turning operations, *ASME Journal of Engineering for Industry*, **44**, 44-47.
- Gu, J., Barber, G., Tung, S. and Gu, R.J.**, 1999. Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts, *Wear*, **229**, 273-284.
- Gülmez, T.**, 1998. Ostenitik paslanmaz çelik ortopedik implantların iyon nitrülemeyle yorulma dayanımlarının artırılması, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Gürel, K., Demirkol, M. and Çapa, M.**, 2000. Effect of ion nitriding on fatigue behavior of AISI 4140 steel, *Materials Science and Engineering*, **279**, 207-216.
- Haron C.H.C., Ginting, A. and Goh, J.H.**, 2001. Wear of coated and uncoated carbides in turning tool steel, *Journal of Materials Processing Technology*, **116**, 49-54.
- Höck, K., Spies, H., Larisch, B., Leonhardt, G. and Buecken, B.**, 1996. Wear resistance of prenitrided hardcoated steels for tools and machine components, *Surface and Coating Technology*, **88**, 44-49.
- Imbeni, V., Martini, C., Lanzoni, E., Poli, G. ve Hutchings, I.M.**, 2001. Tribological behaviour of multi-layered PVD nitride coatings, *Wear*, **251**, 997-1002.
- Jawahir, I.S., Ghosh, R., Balaji, A.K. and Li, P.X.**, 2000. Predictability of tool failure modes in turning with complex grooved tools using the equivalent toolface (ET) model, *Wear*, **244**, 94-103.
- Jawahir, I.S., Ghosh, R., Fang, X.D. and Li, P.X.**, 1995. An investigation of the effects of chip flow on tool-wear in machining with complex grooved tools, *Wear*, **184**, 145-154.
- Jeong, B.Y. and Kim, M.**, 2001. Effect of the process parameters on the layer formation behavior of plasma nitrided steels, *Surface and Coating Technology*, **141**, 182-186.

- Kalpajian, S.**, 1997. *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Addison Wesley Longman, Inc., California.
- Karamış, M.B. and Gerçekcioğlu, E.**, 2000. Wear behaviour of plasma nitrided steels at ambient and elevated temperatures, *Wear*, **243**, 76-84.
- Karamış, M.B.**, 1991. An investigation of the properties and wear behavior of plasma-nitrided hot working steel, *Wear*, **150**, 331-342.
- Karamış, M.B.**, 1991. Tribological behaviour of plasma nitrided 722M24 material under dry sliding conditions, *Wear*, **147**, 385-399.
- Karamış, M.B.**, 1993. Wear properties of steel plasma nitrided, at high temperatures, *Materials Science and Engineering*, **168**, 49-53.
- Karaoğlu, S., Karadeniz, S. ve Karaoğlu, Ç.**, 2001. Plazma nitrülenmiş az alaşımlı bir çeliğin aşınma davranışının incelenmesi, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, **3-3**, 85-92.
- Kaye, J.E., Yan, D.H., Popplewell, N. and Balakrishnan, S.**, 1995. Predicting tool flank wear using spindle speed change, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **35(9)**, 1309-1320.
- Kendall, L.A.**, 1986. Tool wear and tool life, *Journal of American Society for Materials*, **99**, 37-48.
- Kopac, J. and Sali, S.**, 2001. Tool-wear monitoring during the turning process, *Journal of Materials Processing Technology*, **113**, 312-316.
- Kowstubhan, M.V. and Philip, P.K.**, 1991. On the tool life equation of TiN coated high speed steel tools, *Wear*, **143**, 267-275.
- Krauss, G.**, 1995. *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*, ASM International Materials Park, Ohio.
- Lee, C.K. and Shih, H.C.**, 1994. Structure and corrosive wear resistans of plasma nitrided alloy steels, *Corrosion*, **50**, 848-856.
- Lee, J.H., Kim, D.E. and Lee, S.J.**, 1998. Statistical analysis of cutting force ratios for flank-wear monitoring, *Journal of Materials Processing Technology*, **74**, 104-114.

- Lei, M.K., Wang, P., Huang, Y., Yu, Z.W., Yuan, L.J. and Zhang, Z.L., 1997.**
Tribological studies of plasma source ion nitrided low alloy tool steel, *Wear*, **209**, 301-307.
- Leppanen, R., 1999.** Properties of Nitrided Components-A Result of the Material and Nitriding Process, *Ovaka Steel Technical Report*, **0284-3366**, Bodycote, Sweden.
- Lim, C.Y.H., Lau, P.P.T. and Lim, S.C., 2001.** The effects of work material on tool wear, *Wear*, **250**, 344-348.
- Lim, G.H., 1995.** Tool-wear monitoring in machine turning, *Journal of Materials Processing Technology*, **51**, 25-36.
- Lim, S.C. and Lim C.Y.H., 2001.** Effective use of coated tools the wear-map approach, *Surface and Coating Technology*, **139**, 127-134.
- Lim, S.C., Liu, Y.B., Lee, S.H. and Seah, K.H., 1993.** Mapping the wear of some cutting tool materials, *Wear*, **162**, 971-974.
- Lin, S.C. and Lin, R.J., 1996.** Tool wear monitoring in face milling using force signals, *Wear*, **198**, 136-142.
- Liu, Z.Q., Ai, X., Zhang, H., Wang, Z.T. and Wan, Y., 2002.** Wear patterns and mechanisms of cutting tools in high-speed face milling, *Journal of Materials Processing Technology*, **129**, 222-226.
- Menthe, E., Rie, K.T., Schultze, J.W. and Simson, S., 1995.** Structure and properties of plasma-nitrided stainless steel, *Surface and Coating Technology*, **74-75**, 412-416.
- Metin, E. and İnal, O.T., 1987.** Formation and growth of iron nitrides during ion-nitriding, *Journal of Materials Science*, **22**, 2783-2788.
- Michel, H., Czerwec, T., Gantois, M., Ablitzer, D. ve Richard, A., 1995.** Progress in the analysis of the mechanisms of ion nitriding, *Surface and Coating Technology*, **72**, 103-111.
- Molinari, A. and Nouari, M., 2002.** Modeling of tool wear by diffusion in metal cutting, *Wear*, **252**, 135-149.

- Musil, J., Vleck, J. and Ruzicka, M., 2000.** Recent progress in plasma nitriding, *Vacuum*, **59**, 940-951.
- Newbold, P., 2001.** İşletme ve İktisat İçin İstatistik, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Nickel, J., Shuaib, A.N., Yilbas, B.S. and Nizam, S.M., 2000.** Evaluation of the wear of plasma-nitrided and TiN-coated HSS drills using conventional and micro-PIXE techniques, *Wear*, **239**, 155-165.
- Obikawa, T., Kaseda, C., Matsumura, T., Gong, W.G. and Shirakashi, T., 1996.** Tool wear monitoring for optimizing cutting conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, **62**, 374-379.
- Özbaysal, K., İnal, O.T. and Romig, A.D., 1986.** Ion-nitriding behaviour of several tool steels, *Materials Science and Engineering*, **78**, 179-191.
- Özdemir, Ö., İpek, M. ve Zeytin S., 2000.** Kesici takım malzemeleri, *Mühendis ve Makina*, **98**, 27-38.
- Özdemir, U. ve Erten, M., 2003.** Plazma (iyon) nitrürleme yöntemi ve malzeme özellikleri üzerindeki etkisi, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, **2**, 41-48.
- Özdemir, U. ve Erten, M., 2003.** Talaşlı imalat sırasında kesici takımda meydana gelen hasar mekanizmaları ve takım hasarını azaltma yöntemleri, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, **1**, 37-50.
- Özdemir, U. ve Erten, M., 2004.** Plazma nitrürlemenin sert metal plakette sürtünme katsayısına etkisi, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, **3**, 29-38.
- Peng, Q.F., 1989.** Improving abrasion wear by surface treatment, *Wear*, **129**, 195-203.
- Pranevicius, L., Templier, C., Riviere, J.P., Meheust, P., Pranevicius, L.L. and Abrasonis, G., 2001.** On the mechanism of ion nitriding of an austenitic stainless steel, *Surface and Coating Technology*, **135**, 250-257.
- Rao, S.B., 1986.** Tool wear monitoring through the dynamics of stable turning, *ASME Journal of Engineering for Industry*, **108**, 183-190.

- Ravindra, H.V., Srinivasa, Y.G. and Krishnamurthy, R.,** 1993. Modelling of tool wear based on cutting forces in turning, *Wear*, **169**, 25-32.
- Roberts, G., Krauss, G. and Kennedy, R.,** 1997. Tool Steels, ASM International Materials Information Society, Ohio.
- Rocha, A.S., Strohaecker, T., Tomala, V. and Hirsch, T.,** 1999. Microstructure and residual stresses of a plasma-nitrided M2 tool steel, *Surface and Coating Technology*, **115**, 24-31.
- Sakamoto, Y., Takaya, M., Ishii, Y. and Igarashi, S.I.,** 2001. Surface modified tool fabricated by radical nitriding, *Surface and Coating Technology*, **142-144**, 152-155.
- Soderberg, S. and Hogmark, S.,** 1986. Wear mechanisms and tool life of high speed steels related to microstructure, *Wear*, **110**, 315-329.
- Stappen, M., Malliet, B., Stals, L., Schepper, L., Roos, J.R. and Celis, J.P.,** 1991. Characterization of TiN coatings deposited on plasma nitrided tool steel surfaces, *Materials Science and Engineering*, **140**, 554-562.
- Stephenson, D.A. and Agapiou, J.S.,** 1996. Metal Cutting Theory and Practice, Marcel Dekker Inc., New York.
- Sun, Y. and Bell, T.,** 1991. Plasma surface engineering of low alloy steels, *Materials Science and Engineering*, **140**, 419-434.
- Sun, Y. and Bell, T.,** 1997. A numerical model of plasma nitriding of low alloy steel, *Materials Science and Engineering*, **224**, 33-47.
- Tamaki, M., Tomii, Y. and Yamamoto, N.,** 2000. The role of hydrogen in plasma nitriding: Hydrogen behavior in the titanium nitride layer, *Plasmas and Ions*, **3**, 33-39.
- Tamas, S.,** 1999. Cutting force modeling using artificial neural networks, *Journal of Materials Processing Technology*, **92-93**, 344-349.
- Tansel, I.N., Arkan, T.T., Bao, W.Y., Mahendrakar, N., Shisler, B., Smith, D. and McCool, M.,** 2000. Tool wear estimation in micro-machining Part I: Tool usage-cutting force relationship, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **40**, 599-608.

- Tay, F.E.H., Sikdar, S.K. and Mannan, M.A.,** 2002. Topography of the flank wear surface, *Journal of Materials Processing Technology*, 120, 243-248.
- Tekin, A.,** 1984. Çelik ve Isıl İşlemi, Hakan Ofset, İstanbul.
- Tlusty, J. and Masood, Z.,** 1978. Chipping and breakage of carbide tools, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 100, 403-412.
- Tomkiewicz, A.Z.,** 2001. Classifying the wear of turning tools with neural networks, *Journal of Materials Processing Technology*, 109, 300-304.
- Topbaş, M.A.,** 1993. Isıl İşlemler, Prestij Yayın ve Basım Hizmetleri, İstanbul.
- Trent, E.M. and Wright, P.K.,** 2000. Metal Cutting, Butterworth Heinemann Press, New Delhi.
- Usui, E., Shirakashi, T. and Kitagawa, T.,** 1984. Analytical prediction of cutting tool wear, *Wear*, 100, 129-151.
- Xiaoli, L.,** 2002. A brief review: acoustic emission method for tool wear monitoring during turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 157-165.
- Yurtsever, N.,** 1984. Deneysel İstatistik Metotlar, Toprak ve Gübre Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Yayınları, Ankara.
- Zhou, J.M., Andersson, M. and Stahl, J.E.,** 1995. A system for monitoring cutting tool spontaneous failure based on stress estimation, *Journal of Materials Processing Technology*, 48, 231-237.

ÖZGEÇMİŞ

Ufuk ÖZDEMİR, 28 Eylül 1972 tarihinde İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini İstanbul'da tamamladıktan sonra 1993 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ve İmalat Programından mezun oldu. Otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firmada Kalite Kontrol Mühendisi olarak yaklaşık bir yıl süreyle görev yaptı. 11 Şubat 1994 tarihinde Hava Kuvvetlerine muvazzaf subay olarak katıldı. 1998 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı İmalat Programında yüksek lisansını tamamladı. Halen Hava Harp Okulu Dekanlığı Planlama Değerlendirme ve Geliştirme Şube Müdürlüğünde Plan Subayı/Öğretim Elemanı olarak görev yapmaktadır. Hava Harp Okulunda Makina Elemanları, Makina Projesi ve Bilgisayar Destekli Teknik Resim, Bilgisayar Destekli Tasarım ve Üretim derslerine girmektedir. İngilizce bilmekte olup evli ve bir kız çocuk babasıdır.