

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TiN/TiAIN KAPLANMIŞ SVERKER 21 ile NİTRASYON YAPILMIŞ ve TiAIN KAPLANMIŞ
TOOLOX 44 MALZEMELERİN AŞINMA PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisi Engin ÖZKEKLİK

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği

Programı : Konstrüksiyon ve İmalat

MANİSA 2013

CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TiN/TiAIN KAPLANMIŞ SVERKER 21 ile NİTRASYON YAPILMIŞ ve TiAIN KAPLANMIŞ
TOOLOX 44 MALZEMELERİN AŞINMA PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisi Engin ÖZKEKLİK

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :

Tezin savunulduğu Tarih :

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hakan ÇETİNEL

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Bekir Sadık ÜNLÜ

Yrd. Doç. Dr. Selim Sarper YILMAZ

MANİSA 2013

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

ŞEKİL LİSTESİ	VI
ÇİZELGE LİSTESİ	IX
ÖZET	X
ABSTRACT	XI
TEŞEKKÜRLER.....	XII
1.GİRİŞ.....	1
2. TRİBOLOJİ	5
2.1. Sürtünme	6
2.2. Aşınma	9
2.2.1. Adhesiv Aşınma (Yapışma Aşınması)	11
2.2.2. Abrasif Aşınma.....	13
2.2.3. Korozyon Aşınması.....	14
2.2.4. Yüzey Yorulması.....	15
3. YÜZEY İŞLEMLERİ.....	18
3.1. Nitrürasyon (Azotlama)	18
3.1.1. Gaz Nitrürasyon.....	21
3.1.2. Banyo(Sıvı) Nitrürasyon	21
3.1.3. Plazma(İyon) Nitrürasyon	22
3.2. PVD(Fiziksel Buhar Biriktirme)	24
3.2.1. Buharlaştırma Yöntemi	25
3.2.1.1. Rezistans Ve Endüktif Buharlaştırma Yöntemleri	25
3.2.1.2. Elektron Demeti İle Buharlaştırma Yöntemi.....	26
3.2.1.3. Katodik Ark Buharlaştırma Yöntemi.....	27
3.2.2. Sıçratma Yöntemi	29
3.2.2.1. Diyot Sıçratma Yöntemi.....	31

3.2.2.2. Triyot Sıçratma Yöntemi.....	32
3.2.2.3. Manyetik Sıçratma Yöntemi	32
3.2.3. İyon kaplama Yöntemi	33
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	35
4.1. Malzeme	35
4.1.1. Sverker 21	35
4.1.1.1. Sverker 21 Malzeme Özellikleri	35
4.1.1.2. Sverker 21 Kimyasal Bileşimi	35
4.1.1.3. Sverker 21 Uygulama Alanları.....	35
4.1.1.4. Sverker 21 Mekanik Özellikleri	36
4.1.1.5. Sverker 21 Fiziksel Özellikleri.....	37
4.1.1.6. Erezyon (EMD) Tekniği ile İşlenebilme Özellikleri.....	37
4.1.1.7. Sverker 21 Isıl İşlem Özellikleri	39
4.1.1.8. Sverker 21 Yüzey İşlemleri Özellikleri.....	40
4.1.2. Toolox 44.....	41
4.1.2.1. Toolox 44 Malzeme Özellikleri.....	41
4.1.2.2. Toolox 44 Kimyasal Bileşimi	41
4.1.2.3. Toolox 44 Uygulama Alanları.....	41
4.1.2.4. Toolox 44 Mekanik Özellikleri.....	42
4.1.2.5. Toolox 44 Yüzey İşlemleri Özellikleri.....	42
4.1.2.6. Toolox 44 Fiziksel Özellikleri	43
4.2 Sertleştirme İşlemleri	44
4.2.1. Sverker 21 Deney Numunesi Sertleştirme İşlemleri	44
4.2.2. Toolox 44 Deney Numunesi Sertleştirme İşlemleri	45
4.3. Numunelerin Hazırlanması	46
4.4. PVD Kaplama İşlemi.....	47

4.4.1. Sverker 21 Deney Numunesi PVD Kaplama İşlemi	47
4.4.2. Toolox 44 Deney Numunesi PVD Kaplama İşlemi.....	47
4.5. Aşınma Deneyleri	48
4.6. Optik Mikroskop Görüntüsü	51
5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	52
5.1. Sertlik Ölçümü Sonuçları.....	52
5.2. Aşınma Deneyi Sonuçları	52
5.3. Optik Mikroskop Görüntüsü Sonuçları	59
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	64
Sonuçlar	64
Öneriler	66
KAYNAKLAR	67

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Tribolojik Sistem [26].....	6
Şekil 2.2. Sürtünme Esnasındaki Gerçek Temas Noktaları [2,30].....	7
Şekil 2.3. Statik Sürtünme ve Dinamik Sürtünme Esnasında Cisme Etki Eden Kuvvetlerin Şematik Gösterimi [33].	7
Şekil 2.4. Zamanla Gelişen Aşınma Kademeleri [40].....	10
Şekil 2.5. En Çok Kabul Edilen Sınıflamaya Göre Dört Farklı Aşınma Modelinin Şematik Gösterilmesi [44].	11
Şekil 2.6. Adhesiv Aşınma Örnekleri [48].....	12
Şekil 2.7. Abrasif Aşınma [47].....	13
Şekil 2.8. İki Yüzeyli ve Üç Yüzeyli Abrasif Aşınma [2,49].	13
Şekil 2.9. Oksidasyon Oluşumu [48].	15
Şekil 2.10. Yüzey Yorulması Oluşan Çukurlar [48].	16
Şekil 2.11. Dişlideki Yorulma Aşınması [54].	16
Şekil 2.12. Yorulma Sonucu Yüzeyde Çatlak Oluşumu Ve Büyümesi [2,22].....	17
Şekil 3.1. Farklı Çelik Alaşımları İçin Nitrürlenme Zamanları [58].....	19
Şekil 3.2. Nitürasyon Sonrası DIN 1.2344 Deneysel Çeliğine Ait Yüzeyden Merkeze Doğru Mikroyapı Değişimleri ve Detaylı Gösterimi [60].	20
Şekil 3.3. Plazma Nitrürlenme Mekanizması [71].....	23
Şekil 3.4. Rezistanslı Isıtıcı Sistemli PVD Sistemi [2,75].....	26
Şekil 3.5. Elektron Demeti İle Buharlaştırma [78].....	27
Şekil 3.6. Katodik Ark PVD Sistemi [2,76].....	28
Şekil 3.7. Sıçratma Mekanizması [83].	30
Şekil 3.8. Diyot Sıçratma Mekanizması [1]	31
Şekil 3.9. Triyot Sıçratma Mekanizması [84]	32
Şekil 3.10. Manyetik Sıçratma Mekanizması [2,84].	33

Şekil 4.1. Düşük sıcaklıkta menevişlenmiş 1.2080 Çeliği Tel Erozyon Çatlakları [46]...	38
Şekil 4.2. Sverker 21 Meneviş Diyagramı [46].....	40
Şekil 4.3. Toolox 44 Malzeme Nitrürasyon ve Kaplama Değerleri [90].	42
Şekil 4.4. Toolox 44 Malzeme Nitrürasyon Derinliği ve Sertlik Değerleri [91].	43
Şekil 4.5. Sistem Teknik VF-TE Serisi Isıl İşlem Fırınları	44
Şekil 4.6. Sistem Teknik VF-2D-A Serisi Gaz Nitrürasyon İşlemi Fırını	45
Şekil 4.7. Metkon FORCIPOL 2V Parlatma Cihazı	46
Şekil 4.8. CSM Ball – on - Disc Aşınma Test Cihazı.....	49
Şekil 4.9. Mitutoyo SJ – 301 Pürüzlülük Ölçüm Cihazı	49
Şekil 4.10. Aşınma Yolları	50
Şekil 4.11. Nikon ECLIPSE LV100 Model Optik Mikroskobu	51
Şekil 5.1. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 5 N Yük Sürtünme Katsayısı Değişimi.	54
Şekil 5.2. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 10 N Yük Sürtünme Katsayısı Değişimi. ...	54
Şekil 5.3. Gaz Nitrürasyon Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 5 N Yük Sürtünme Katsayısı Değişimi.....	55
Şekil 5.4. Gaz Nitrürasyon Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 10 N Yük Sürtünme Katsayısı Değişimi.....	55
Şekil 5.5. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 Aşınan Hacim Miktarları.....	57
Şekil 5.6. Gaz Nitrürasyon Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 Aşınan Hacim Miktarları	57
Şekil 5.7. 5 N Yük Aşınan Hacim Miktarları.	58
Şekil 5.8. 10 N Yük Aşınan Hacim Miktarları.	58
Şekil 5.9. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 Deney Numunelerinin 5 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (50X)	60
Şekil 5.10. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 Deney Numunelerinin 5 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (200X)	60

Şekil 5.11. Gaz Nitrürasyon İşlemi Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 Deney Numunelerinin 5 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (50X).....	61
Şekil 5.12. Gaz Nitrürasyon İşlemi Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 Deney Numunelerinin 5 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (200X).....	61
Şekil 5.13. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 Deney Numunelerinin 10 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (50X)	62
Şekil 5.14. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 Deney Numunelerinin 10 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (200X)	62
Şekil 5.15. Gaz Nitrürasyon İşlemi Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 Deney Numunelerinin 10 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (50X).....	63
Şekil 5.16. Gaz Nitrürasyon İşlemi Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 Deney Numunelerinin 10 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (200X).....	63

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 4.1. Sverker 21 Malzeme Kimyasal Bileşimi [87].....	35
Çizelge 4.2. Bazı Kalıcı Şekil Değiştirme Tipleri ve Sertlik Değerleri [87].....	36
Çizelge 4.3. Sertlik Değeri ve Basma Dayanımı İlişkisi [87].....	36
Çizelge 4.4. Sverker 21 Malzeme Fiziksel Özellikleri [87].	37
Çizelge 4.5. Sverker 21 Isıl İşlem Değerleri [87].	39
Çizelge 4.6. Sverker 21 Nitürasyon İşlemi Parametreleri [46].	40
Çizelge 4.7. Toolox 44 Malzeme Kimyasal Bileşimi [90].	41
Çizelge 4.8. Toolox 44 Malzeme Bazı Mekanik Özellikleri [90].	42
Çizelge 4.9. Toolox 44 Malzeme Fiziksel Özellikleri [92].....	43

ÖZET

Bu tez kapsamında; PVD yöntemiyle TiN/TiAlN kaplanmış Sverker 21 ile nitrürasyon işlemi yapılmış ve PVD yöntemiyle TiAlN kaplanmış Toolox 44 malzemelerinin aşınma performansları ball – on – disk test cihazında kuru sürtünme çalışma şartlarında incelenmiştir. 30 mm çapında 10 mm yüksekliğinde silindirik numuneler kullanılmıştır. Toolox 44 malzeme numuneler için gaz nitrürasyon işlemi, 350 ° C sıcaklıkta 30 dakika azot gazı ile beraber ısıtma sonrasında yapılan vakumun ardından 570 ° C sıcaklıkta 240 dakika azot, amonyak ve karbondioksit bulunan ortamda tutulduktan sonra fırının azot ile soğutulması (90 dakika) ile sonlanmaktadır. Sverker 21 malzeme numuneler ısıtma işlemi operasyonunda, 1030 ° C ye ısıtılıp, 35dakika östenitleme sıcaklığında bekletildikten sonra, 4 bar azot verilerek hızlı soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Sverker 21 malzeme numunelere su verme aşamasından sonra iki kere menevişleme yapılmıştır. Birinci menevişleme 510 ° C de 3 saat bekleme ile ikinci menevişleme 550 ° C 3 saat bekleme ile yapılmıştır. Birinci menevişleme çıkış sertliği 61 HRC, ikinci menevişleme çıkış sertliği 57 HRC olarak ölçülmüştür. Kaplama işlemi katodik ark metoduyla, TiAlN kaplama için 300 A katot akımı, - 50 V bias voltajı değerinde 450 ° C sıcaklıkta 98 dakika, TiN/TiAlN kaplama için, 300 A katot akımı, - 75 V bias voltajı değeri ile 450 ° C sıcaklıkta 110 dakika işlem görmesi sonrasında fırın içinde gezdirilen ve soğuk su taşıyan borular yardımıyla 190 ° C sıcaklığa soğutma ile yapılmıştır.

Normal yük değişken parametre olarak kullanılmıştır. Numunelerdeki aşınma miktarları yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. Normal yük – aşınma miktarı ve normal yük – sürtünme katsayısı grafikleri çizdirilmiştir. Aşındırma elemanı olarak 6 mm çapında seramik bilye kullanılmıştır.

Anahtar Sözcükler : PVD, Nitrürasyon, Aşınma, Ball – on - Disc

ABSTRACT

In this thesis, PVD TiN / TiAlN coated Sverker 21 and nitriding, PVD TiAlN coated Toolox 44 materials were investigated ball – on – disc wear tester under the dry friction working conditions. 30 mm diameter 10 mm high cylindrical specimens were used. The gas nitriding process for Toolox 44 samples of material, a temperature of 350 ° C for 30 minutes with nitrogen gas, after heating at a temperature of 240 ° C to 570 minutes with the vacuum then nitrogen, ammonia and carbon dioxide in the presence of nitrogen in the furnace after being cooled with (90 minutes) and ends with. The heat treatment operation for Sverker 21 samples of material, heat treatment operation, 1030 ° C degrees is heated, after waiting 35 minutes austenitizing temperature, 4 bar nitrogen given were subjected to rapid cooling. Sverker 21 samples of material quenching tempering stage was then twice. The first degree of tempering 510 ° C for 3 hours in standby and 3 hours with a standby of 550 ° C was the second tempering. The first tempering output is hardness of 61 HRC and second one tempering output is hardness of 57 HRC. Cathodic arc method of coating process, the value of - 50 V and 300 A cathode current for TiAlN coating at a temperature of 450 ° C , with a value of 98 minutes, The value of – 75 V and 300 A cathode current for TiN/TiAlN coating at a temperature of 450 ° C with a value of 110 minutes. After that, the temperatures cooled value of 190 ° C by cold water pipes in the oven of coating process with the help.

Normal load was used as a variable parameter. Wear quantity of the samples were determined by surface roughness measuring device. Normal load - the amount of wear and normal load - the coefficient of friction graphs were plotted. 6 mm diameter ceramic balls were used as abrasive element.

Key Words : PVD, Nitriding, Wear, Ball – on – Disc

TEŞEKKÜRLER

Çalışmalarım boyunca değerli yardımlarını esirgemeyen ve beni yönlendiren değerli hocam Doç.Dr. Hakan ÇETİNEL' e, Hayes Lemmerz Jantaş Jant San. A.Ş. Toolshop Müdürü Salih ÇAKMAK ' a, ASSAB ÇELİK ve ISIL İŞLEM SAN. ve TİC. A.Ş. İş Geliştirme Mühendisi (Soğuk İş) Alper KAYA' ya, GÜHRING TAKIM SANAYİ ve TİCARET LTD.ŞTİ. Kaplama Sorumlusu Korgün SÜCÜLLÜ' ye, VULCAN KALIP METAL GELİŞİM SAN. VE TİC. LTD. ŞTİ. Isıl İşlem Sorumlusu Enis MEN ' e, Osman AŞKIN ' a ve desteklerini esirgemeyen aileme ve mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

1.GİRİŞ

Endüstride kalın saclarda (10 – 15 mm) ezme ve form verme gibi işlemlerin yapılabilmesi için aşınma dayanımı ile ön plana çıkmış tokluk olarak da mekanik zorlamaları karşılayabilecek malzemeler kullanılmaktadır. Bu tür malzemelerden imal edilen kalıp parçaları kullanıldığı yere ve ortama göre değişmekle beraber sac kalınlığının oldukça fazla olmasından dolayı normal bir ömür gösterdiği durumda etkiyen kesme, basma ve çekme kuvvetinden çok daha fazla kesme, basma ve çekme kuvvetine maruz kalmaktadır. Bunun neticesinde, makine, kalıp yada aparat parçaları çok kısa sürede hasara uğramakta ve sık sık değiştirilme ihtiyacı duymaktadır. Bu olumsuzlukları en aza indirmek için uygulanacak işlemlerin ekonomikliğı de dikkate alındığında, malzemelerin dayanımlarının ve sertliklerinin artırılması için çalışmalar yapılmaktadır.

Kalıp parçalarının çalışma şartlarında istenilen özelliklerin iyileştirilmesi için, yüzey kaplama işlemleri son yıllarda oldukça yaygın kullanılan yöntemlerdir. Kalıp parçalarına uygulanan bu yüzey kaplama işlemleri ile, endüstride her yıl önemli kayıplara neden olan aşınma, kırılma ve çatlama gibi problemler büyük ölçüde giderilmektedir. Son yüzyıllarda kullanılan yüzey sertleştirme işlemlerinin başında PVD ve CVD kaplama yöntemleri ile dubleks yüzey işleme gibi yüzey sertleştirme işlemleri gelmektedir.

PVD yöntemi, yüksek sıcaklıklara ısıtılarak(buharlaştırma) yada yeterince yüksek enerjili iyonlarla bombardıman edilerek(sıçratma) buhar haline dönüştürülen kaplama malzemesinin buharının, oda sıcaklığına yakın bir sıcaklıktaki altlık malzeme üzerinde yoğunlaştırılması esasına dayanmaktadır. Kaplama malzemesinin buharlaştırılması ve bu fazın altlık yüzeyinde yoğunlaştırılması faz dönüşümlerini ve kütle transferini içeren fiziksel temel oluşumları kapsayan bir mekanizmadır. Bu nedenle bu tür kaplama işlemlerine Fiziksel Buhar Yoğuşurma (PVD) teknikleri adı verilmektedir [1].

Işık ve Çakır (2001) yaptıkları çalışmada, kaplamasız ve CVD kaplamalı kesici takımların aşınma davranışlarını ve performanslarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarda talaş kaldırma performansı en yüksek kesici takımın TiAlN kaplamalı kesici takım olduğu görülmüştür [2,3].

Çınar (1998) yapmış olduğu çalışmada, yüksek sertlik ve düşük ısı iletkenlik gösteren TiAlN kaplama daha iyi yapışma özelliğı olan TiN'ün önce tabanda sonra ara tabakalarda ve TiAlN'ünde en üst tabakada kullanımı ile çok katlı TiAlN-TiN kaplamaya olan etkisi ve TiAlN tabakasını incelenmiştir. Deneyler sonucunda metal yüzeyine yapılan TiN kaplama ve ara TiN katmanların çok katlı sistemin yapışma özelliğini arttırdığı görülmüştür [4].

Akkaş (1998) yapmış olduğu çalışmada, katodik ark buharlaştırma metodu ile yüksek hız çeliğı numuneler üzerinde üretilen TiN kaplamaların aşınma davranışı üzerine proses

parametrelerinin etkisini incelemiştir. Uygulanan bias voltajının artmasıyla aşınma miktarının azaldığını, daha düşük kalınlığa, daha yüksek sertliğe sahip olan ve taban malzemesine yapışma mukavemeti daha yüksek olan kaplamaların aşınma dirençlerinin daha yüksek olduğunu tespit etmiştir [5].

Kalkan (2008) yapmış olduğu çalışmada, alüminyum soğuk ekstürüzyon tüp imalatında kullanılan erkek kalıbı PVD yöntemi ile CrN kaplama yapılmış ve hali hazırda kullanılan 60 HRC sertliği sahip erkek kalıba göre vuruş adedi 9-10 kat artırılmış, numunede oluşan abrasif çiziklerin azaldığı ve erkek kalıbın çalışma zırh ölçüsünde hemen hemen hiç değişim olmadığı gözlenmiştir [6].

Kothari ve arkadaşları (2002) yapmış oldukları çalışmada, katodik ark metodu ile yüksek hız çeliği ana malzemeler üzerinde üretilen TiN, m – TiCN, TiAlN ve m – TiAlN kaplamaların (m : multi tabaka) özelliklerini incelemiştir. TiAlN ‘ ün en yüksek TiN ‘ ün ise en düşük aşınma, oksidasyon ve korozyon direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir [7].

Şafak (2008) yapmış olduğu çalışmada, çok ince (1 – 5 µm) kaplama yapılabildiğini ve parça toleranslarının korunduğunu tespit etmiştir. Kaplama tabakasının sertliğinin, malzemenin kendi sertliğine göre fazla olması ve bunun sonucunda da yüzeyden merkeze sertlik değişiminin çok büyük olmasının kaplamanın ömrüne olumsuz etki yapacağı düşünülerek kaplama ile ana malzeme arasında, ana malzemeye göre daha sert bir yapı elde edilmesi amacıyla yüzeye kaplamadan önce plazma nitrürleme uygulanmıştır. Aynı kaplama türünün sadece PVD kaplamalı ve plazma nitrürleme + PVD kaplamalı numunelerine uygulanan karşılaştırmalı testler sonucunda, uygulanan bu sertleştirme işlemi ile birlikte; hem aşınma miktarında çok büyük ölçüde azalma meydana gelmiş, hem de sürtünme kuvvetlerinde önemli ölçüde azalma olmuştur. Sadece PVD kaplama yapılan numunelerde ulaşılan sürtünme kuvveti ve aşınma değerlerine plazma nitrürleme + PVD kaplama yapılan numunelerde çok daha geç ulaşılmıştır [2].

Aihua ve arkadaşları (2011) yapmış oldukları çalışmada, PVD yönteminin katodik ark buharlaştırma tekniğiyle, TiN, TiAlN, AlTiN ve CrAlN kaplanmış parçaların sürtünme ve aşınma özelliklerini incelemiştir. TiN ve TiAlN kaplamalı parçalar diğer numunelere göre düşük sürtünme katsayısı ve oranı göstermişlerdir. TiAlN kaplama, TiN kaplama ile karşılaştırıldığında, daha iyi tribolojik özellikler göstermektedir. AlTiN kaplamadaki Al içeriğinin, adhesif aşınma artışına neden olduğu ve oluşturduğu alüminyum oksit tabakasının yapıyı gevreklettiği gözlemlenmiştir. TiAlN kaplama, Al ilavesinden dolayı çok iyi oksidasyon, direnci göstermiştir [8].

Leu ve arkadaşları (2001) yapmış oldukları çalışmada, katodik ark metodu ile üretilen (Ti,Al)N filmlerinin yüzey pürüzlülüğü, kaplama kalınlığı ve yüksek sıcaklık oksidasyon direnci

üzerindeki etkilerinin araştırmışlardır. Yaptıkları incelemelerde kaplama kalınlığının düşürülebilmesiyle yüzey pürüzlülüğünün azaldığını tespit etmişlerdir [9].

Kaya (1998) yapmış olduğu çalışmada, katodik ark metodu ile takım çeliği üzerinde üretilen TiN kaplamaların kalınlıklarının artan bias voltajı ile azaldığını tespit etmiştir [10].

Cheng (2003) yapmış olduğu çalışmada, katodik ark vakum tekniği ile üretilen TiN filmlerinin yapısını analiz etmiş ve yapının gelişimini etkileyen temel faktörlerin; iç gerilmeler ve yüzey pürüzlülüğü olduğunu ortaya koymuştur [11].

Karagöz (1994) yaptığı çalışmada, PVD yöntemiyle elde edilen kaplamaların performansını iş parçası malzemesi ve kesme parametreleri belirler. TiN kaplamalarda her uygulama için optimum kaplama olmadığından PVD yöntemiyle yeni kaplama bileşimleri geliştirmesine çalışılmaktadır. TiN yerine, HfN ve TiC gibi tabakaların uygulama alanı bulamaması sonucu çalışmalar üçlü ve dörtlü kaplamalar ile geçiş katmanlı kaplamalar yönünde yoğunlaşmıştır. Üçlü ve dörtlü kaplamalara TiAlN, TiNbN, TiAlVN ve TiHfN örnek olarak verilebilir. Bu kaplamalar içerisinde en iyi performans TiAlN kaplamalarda gözlenmiştir [12].

Park ve Kim (1998) yaptıkları çalışmada, çelik ana malzeme üzerine TiN, TiAlN ve TiSiN gibi kaplama malzemesi kullanılarak CVD yöntemiyle yaptıkları sert kaplamaların, mikro sertliklerini, mikro yapılarını ve oksidasyon davranışlarını deneysel olarak araştırılmışlardır. Az miktarda da olsa alüminyum ve silisyumun TiN' e ilavesinin, mikro sertlik ve oksidasyon direncine büyük miktarda etki ettiği gözlemlenmiştir. TiAlN ve TiSiN deki aşırı mikro sertlik artışı TiN ile karşılaştırılmış ve bunun sebebinin mikro yapıdaki değişiklikten kaynaklandığı anlaşılmıştır. TiN' in oksidasyon sıcaklığı 500 °C olarak belirlenirken TiAlN ve TiSiN 700 °C' de oksitlenmeye başladığı gözlemlenmiştir [13].

Gökkaya, Sur ve Dilipak (2004) CVD ve PVD kaplamalı kesici takımların işleme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerini incelemişler, CVD yönteminde TiN, PVD yönteminde TiAlN ve AlTiN kaplamalarını kullanmışlardır. Çalışmada kesme derinliği sabit tutularak farklı kesme hızları ve ilerleme hızlarıyla talaş kaldırma işlemi yapılmış, bu parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne etkileri incelenmiştir. En iyi yüzey kalitesi CVD yöntemiyle TiN kaplanmış numunelerde görülmüş, bunu sırasıyla PVD yöntemiyle yapılan TiAlN ve AlTiN izlemiştir [2,14].

Ranea (2002) yaptığı çalışmada, yüksek hız çelikleri üzerine TiC, TiCN, TiAlN ve TiN kaplama yaparak pin disk üzerinde kuru sürtünme ortamında aşınma hızlarını tespit etmiştir. En düşük aşınma hızını TiAlN kaplı numunelerde gözlemiştir. TiAlN' den sonra en düşük aşınma hızına sahip numuneler ise sırasıyla TiC, TiCN ve TiN olduğunu belirtmiştir. TiAlN kaplamanın sertliği ve sürtünme katsayısı düşük olduğundan diğer kaplamalara göre daha düşük aşınma hızına sahiptir. İnce film kaplamaların sertlik ve sürtünme katsayıları aşınmalarında önemli faktördür [15].

Janoss (2003) yaptığı çalışmalarda, kaplama yöntemi ve kaplama malzemesinin, yüzeyin mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisini inceleyerek sertlik, sürtünme katsayısı, oksidasyon sıcaklığı, korozyon dayanımı gibi özellikleri karşılaştırmıştır. En yüksek sertlik değeri PVD ile TiAlN kaplanmış malzemede 4500 HV olarak ölçülürken en iyi korozyon direnci CrN olarak tespit edilmiştir. En düşük sertlik değeri ise PVD yöntemi ile CrN kaplamada elde edilmiştir. En düşük sürtünme katsayısına sahip kaplama materyali ise PVD yöntemiyle TiAlN kaplanmış numuneler olarak gözlemlenmiştir [16].

Bressa, Hesse ve Silva (2001) yaptıkları çalışmada, yüksek hız çeliğine PVD yöntemiyle TiAlN ve TiCN kaplama uygulamış ve bu kaplamaların tribolojik performansını pin disk aşınma cihazı ile karşılaştırmışlardır. Aşınma miktarları SEM mikroskopuyla ölçülmüş ve kaplamalı malzemelerde ana malzemeye oranla aşınma davranışında çok büyük iyileşme görülmüştür. İki kaplama arasında ise TiAlN kaplamanın TiCN kaplamaya oranla aşınma davranışında daha iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [2,17].

Bu tez çalışması iki farklı numune grubu için gerçekleştirilmiştir. Birinci numune grubunu, ısıtma işlemi uygulanarak 57 HRC sertlikte olan sverker 21 soğuk iş takım çeliği malzemesi üzerine yapılan dubleks yüzey işlemi (PVD yöntemiyle TiN/TiAlN kaplanması) ile elde edilen numuneler oluşturmaktadır. İkinci numune grubunu, gaz nitrürasyon işlemi ile yüzeyi nitrürlenmiş olan Toolox 44 malzemesi üzerine uygulanan PVD yöntemiyle TiAlN kaplama ile elde edilen numuneler oluşturmaktadır. Hazırlanan iki farklı numune grubunun ball – on disc test cihazında, kuru ortamda ve oda sıcaklığında, iki farklı yükte aşınma performansları kaydedilmiştir. Kayıt altına alınan veriler ve ball – on disc test düzeneğinde yapılan deney neticesinde oluşan aşınma izleri görüntüleri doğrultusunda iki numune grubu kıyaslanmıştır. Kıyaslama neticesinde, hangi numune grubunun daha iyi aşınma dayanımı gösterdiği belirlenecektir. Tezin sonlandırılması neticesinde ulaşılan bilgi ve tecrübelerle daha iyi aşınma dayanımı gösteren numuneye uygulanan işlemler, endüstride kalın saclarda form verme ve ezme yapan, ince saclarda da kesme işlemi yapan kalıp parçalarında denenecektir. Böylelikle, yüzeyde aşınma dayanımı yüksek, çekirdekte tok bir malzeme elde edilip, kalıp parçasının aynı koşullarda daha uzun süre çalışması sağlanarak, hammadde, enerji, zaman, işçilik ve imalat devam ederken meydana gelen arızalardan dolayı kaybedilen değerlerin azaltılması sağlanacaktır.

2. TRIBOLOJİ

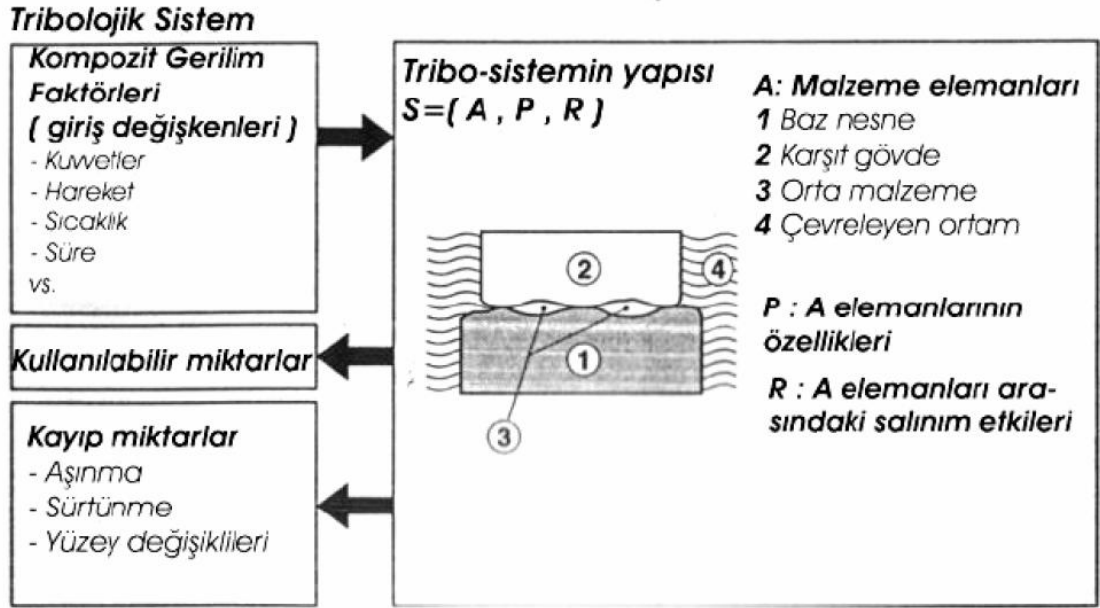
Triboloji, birbirlerine göre hareket eden ve birbirleriyle etkileşim halinde olan yüzeylerde sürtünme, aşınma ve yağlama konuları ile birlikte bunlara bağlı konuları inceleyen bilim dalıdır [18].

Günümüzde aynı parçanın gittikçe daha yüksek miktarlarda üretilme talepleri, yaygınlaşan otomasyona karşılık aşınma nedeni ile metal işleme tezgâh ve makinalarının durma süreleri maliyet faktörünü devamlı arttırmaktadır. Bu nedenle, aşınmanın önlenmesi veya geciktirilebilmesi, her geçen gün ekonomik anlamda daha büyük önem kazanmaktadır. Aşınan bir takımı yenisi ile değiştirmek yerine, takım yüzeyinin aşınma özelliklerini geliştirmek, soruna ekonomik ve pratik bir yaklaşımdır [19,20]. Makine elemanlarının ortalama %70'inin hurdaya ayrılma sebebi aşınmadır. Bunun sonucu olarak meydana gelen malzeme kayıpları, aşınan parçaların yenileriyle değiştirilmesi zorunluluğu, makinelerin bakım-onarım faaliyetleri için harcanan zaman, emek ve bu faaliyetler için istihdam edilen teknik personel, sürtünme sonucu oluşan enerji kayıpları göz önüne alındığında, tribolojinin önemi anlaşılmaktadır [21].

Triboloji alanında yapılan araştırmalar genellikle malzemelerin sürtünme katsayısının ve aşınma mekanizmalarının belirlenmesi, sürtünme ve aşınmaya sebep olan yüzeylerin birbirleriyle temaslarını kesecek ince film malzemelerin veya endüstriyel yağlarının bulunması gibi konuları içerir. Ancak her zaman sürtünmenin ve aşınmanın azaltılması istenmeyebilir; fren balatalarında sürtünme katsayısının yüksek olması ve aşınmanın yüksek tutulması buna örnektir [12].

Tribolojik sistemin temel unsurları:

- Temel Sürtünme Elemanı : Gerçek anlamda aşınma ve sürtünme özelliklerinin özel ilgiyle incelendiği ana malzemedir.
- Karşı Sürtünme Elemanı : Temel sürtünme elemanının çalışma anında temas ettiği düşünülen malzemedir.
- Ara Maddesi : Temel ve karşı sürtünme elemanları arasında bulunabilecek katı, sıvı, gaz veya bunların birkaçının bir arada bulunduğu maddelerden oluşur.
- Çevre : Deneyin yapıldığı ortam çevreyi oluşturur. Sürtünme sırasındaki ortamın sıcaklığı, nemi veya vakumlu bir ortam tribolojik sonuçları etkileyecektir.
- Yükleme : Yükleme büyüklüğü ve şekli tribo sistemin önemli parametrelerindendir.
- Hareket : Sürtünme sistemlerinde hareket kayma, yuvarlanma veya kaymalı yuvarlanma şeklinde olabilir [23, 24, 25].



Şekil 2.1. Tribolojik Sistem [26].

2.1. Sürtünme

Sürtünme, bir cismin diğerine göre bağlı hareket etmesi durumunda meydana gelen direnç olup, malzeme çiftlerinin özellikleri, kayma hızı, yük ve çevresel koşullara göre değişmektedir [5,27,28].

Sürtünme kuvveti cisimler hareket ederken temas ettikleri yüzeylerin sürtünmesinden kaynaklanan ve yer değiştirmeye zıt yönde ortaya çıkan kuvvete denir. Bir zemin üzerinde bulunan bir cismi harekete geçirmek için, cisme uygulanan hareketin zıt yönünde oluşan sürtünme kuvvetinden daha büyük bir kuvvete gereksinim vardır. Aksi halde uygulanan kuvvet cismin sürtünme kuvvetinden daha küçük veya eşitse cisim harekete geçmez [29].

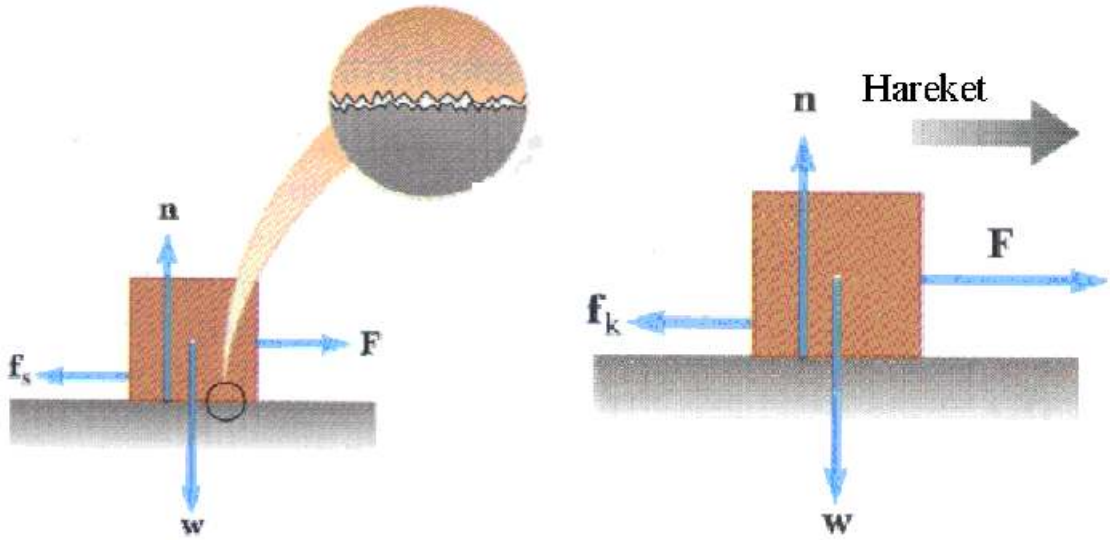
Endüstride kullanılmakta olan her türlü kalıp, makine yada aparat parçası, hangi teknoloji yada imalat yöntemi ile üretilmiş olursa olsun, malzeme üzerinde mikro yapıda girinti ve çıkıntılar vardır. Malzeme yüzeyinden giderilemeyen bu girinti ve çıkıntılar, birbirine temas ederek çalışan yüzeylerde temas noktalarını oluşturmaktadır. Yüzeylerde temas eden bu noktalar gerçek temas alanlarıdır. Temas noktaları görüldüğünden daha küçük olduğundan ve bu noktalara etkiyen yükün etkisiyle, mikro yapıda temas noktalarında yapışma ve kaynaklar oluşmaktadır. Yüzeylerin hareket edebilmesi için öncelikle bu bölgesel kaynak yada yapışmaları koparmak gerekmektedir.



Şekil 2.2. Sürtünme Esnasındaki Gerçek Temas Noktaları [2,30].

Sürtünme genel olarak ikiye ayrılmaktadır.

- Statik Sürtünme : Birbirlerine temas eden yüzeyler arasında bağıl hareket yoksa statik sürtünmeden söz edilir [31].
- Dinamik Sürtünme : Eğer temas eden yüzeyler arasında bağıl hareket mevcutsa bu durumdaki sürtünmeye dinamik veya kinetik sürtünme denir [32].



Şekil 2.3. Statik Sürtünme ve Dinamik Sürtünme Esnasında Cisme Etki Eden Kuvvetlerin Şematik Gösterimi [33].

İki malzeme birbirleriyle temas haline getirildiğinde, malzemelerden birinin diğeri üzerinde hareketine karşı sürtünme kuvvetleri direnç gösterir. Kaymayı başlatan kuvvet (F_S) ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (F_N) arasında şu bağıntı mevcuttur [34, 35, 36].

$$F_S = \mu_S \cdot F_N \quad (2.1)$$

Burada μ_S statik sürtünme katsayısıdır. Kayma başladıktan sonra sürtünme kuvvetinde bir azalma olur ve bu durumda şu bağıntı yazılabilir:

$$F_K = \mu_K \cdot F_N \quad (2.2)$$

Burada μ_K kinetik sürtünme katsayısı olup değeri μ_S 'den daha düşüktür. Kinetik sürtünme katsayısı μ_K 'nin daha düşük değerde olması şu şekilde açıklanabilir; yüzeyler birbiri üzerinde kaymaya başladığı zaman, çıkıntılar statik temasta olduğu gibi atom atoma bağ kuracak zamanı bulamazlar. Oysa statik temas durumunda temas bölgelerinde oluşan plastik deformasyonlar pürüz uçlarını birbirlerine çok iyi bastırarak, temas alanı boyunca atom atoma bağlar meydana getirir; yani soğuk basınç kaynağı oluşur. Statik sürtünme durumunda oluşan atom bağları sebebiyle birbiriyle sürtünen bu iki malzemenin kayması için, malzemenin kayma akma gerilmesi (τ_a) seviyesinde bir gerilmeye ihtiyaç vardır. Bu nedenle kaymaya sebep olan sürtünme kuvveti (F_S):

$$F_S = A \cdot (\tau_a) \quad (2.3)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir [29,30,31].

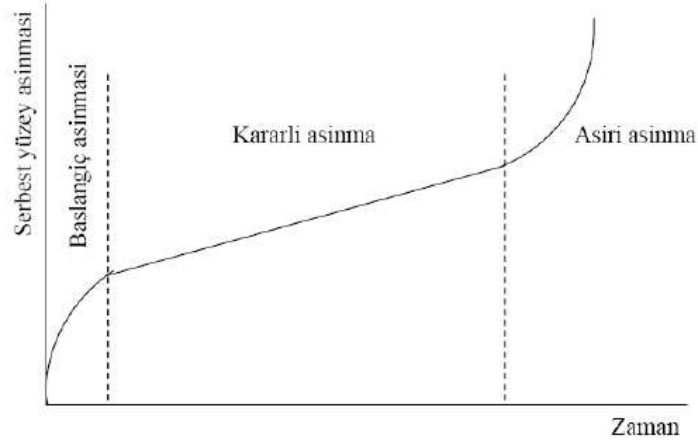
Yani temas alanı (A) azaldığında, kaymanın gerçekleşmesi için gerekli kuvvet de azalacaktır. Kinetik temas durumunda, temas alanında atomlar arası bağlar oluşmadığı için τ_a temas alanı önemli ölçüde azalır; bunun sonucunda sürtünme kuvveti ve dolayısıyla da sürtünme katsayısı azalır. Kayma durunca, atomlar arası bağlar oluşur ve sonuçta sürtünme katsayısı μ_S değerine yükselir [37].

2.2. Aşınma

Aşınma, birbirine temas eden ve birbirine göre bağıl hareket yapan sürtünme halindeki cisimlerin yüzeylerinde sürtünme etkisiyle oluşan ve istenilmeyen malzeme kaybıdır. Bunun sonucu olarak makine elemanları giderek aşınır ve fonksiyonlarını sağlıklı olarak yerine getiremez hale gelir [38].

Aşınma, oluşma hızı ve biçimi açısından zamanla gelişen ve aniden meydana gelen aşınma olmak üzere ikiye ayrılır [39].

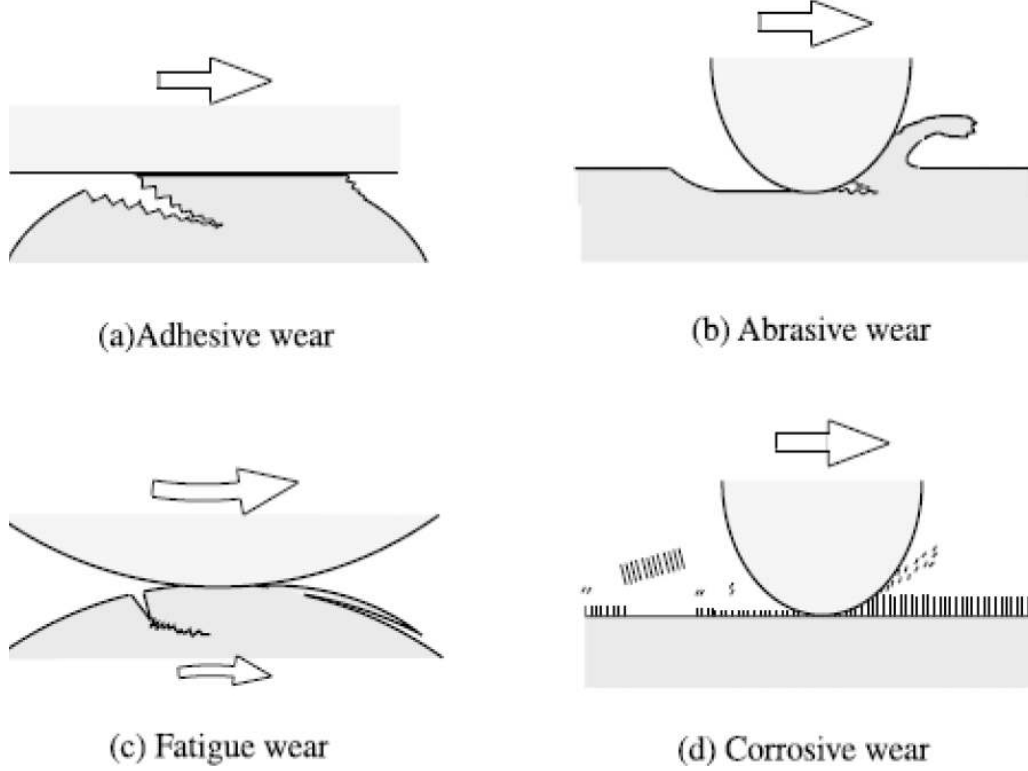
- Zamanla gelişen aşınmada makine elemanı üç aşamada aşınır ve normal çalışma ömrünü tamamlar. Zamanla gelişen aşınmanın kademeleri şu şekildedir:
 - ✓ Başlangıç (Rodaj) Aşınması : Zamanla gelişen aşınmanın ilk safhası makine elemanlarının alışma safhasıdır. Bu safhada hızlı ve şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bu ilk aşınmaya rodaj aşınması denir. Makine elemanlarının ömürlerinin uzun olması için rodaj aşınması mümkün olan en kısa zamanda, en az yükte ve normal hızdan daha düşük hızlarda tamamlanmalıdır [2,39].
 - ✓ Asıl (Kararlı) Aşınma Safhası : Rodajdan sonraki aşama, makine elemanının ömrünü belirleyen asıl aşınma safhasıdır. Bu safhada aşınma hızı çok azdır. Rodaj ne kadar uygun yapılmışsa bu aşama, dolayısıyla makine elemanı ömrü o kadar uzun olur [2,39].
 - ✓ Aşırı (Şiddetli) Aşınma Safhası : Makine elemanı önceden belirlenen bir aşınma sınırına kadar aşındığı zaman normal çalışma ömrünü tamamlamış demektir. Bu aşınma safhasında aşınma hızı oldukça artmıştır ve makine elemanı değiştirilmelidir [2,39].
- Aniden meydana gelen aşınma, parçalar üzerinde olaydan önce herhangi bir aşınma yokken; yanlış malzeme seçimi, yağlamanın uygun yapılamaması, sürtünme dolayısıyla meydana çıkan ısı enerjisinin dış ortama aktarılamaması gibi sebeplerden dolayı aşınmanın aniden ortaya çıkmasıdır. Birbiriyle eş çalışan makine elemanları bu durumda kilitlenebilirler ve çalışamaz duruma gelirler [39].



Şekil 2.4. Zamanla Gelişen Aşınma Kademeleri [40].

Aşınmanın azaltılabilmesi için, az pürüzlü yataklama yüzeylerinin seçilmesi, yüksek sıcaklıklardan kaçınılması, sert malzemelerin kullanılması, düşük sürtünme katsayılı malzemelerin ve yağlayıcıların kullanılması gibi önlemler alınabilmektedir [41].

Birbiri ile temas halinde olan, sürtünerek çalışan malzeme çifti arasında karşılıklı zorlama neticesinde meydana gelen aşınmanın değişik türleri vardır. Aşınma mekanizmalarının tanımlanmasında en etkili aşınma türü dikkate alınır. Malzeme kaybına neden olan başlıca dört tür aşınma vardır. Bunlar; adhesiv aşınma, abrasiv aşınma, korozyon aşınması ve yüzey yorulmasıdır [37, 42]. Aşınma; yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, hız, malzeme, yüzey pürüzlülüğü ve sertlik gibi özelliklerin değiştirilmesinden etkilenmektedir [43].



Şekil 2.5. En Çok Kabul Edilen Sınıflamaya Göre Dört Farklı Aşınma Modelinin Şematik Gösterilmesi [44].

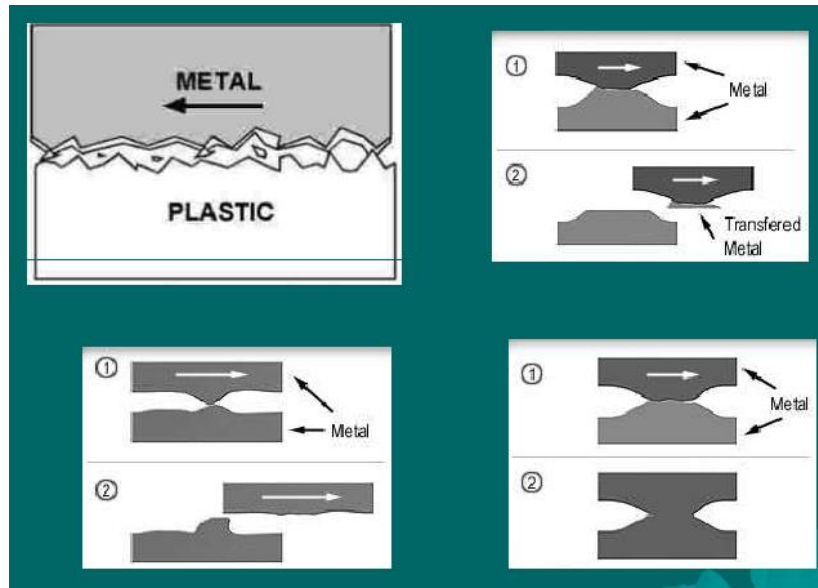
2.2.1. Adhesiv Aşınma (Yapışma Aşınması)

En çok meydana gelen aşınma türü olan adhesiv aşınma türünde birbiriyle temas halinde bulunan iki metalin, yüksek basınç ve meydana gelen sıcaklığın yükselmesi ile birlikte, yüzey kısımlarında bir kaynama meydana gelir. Çalışma sırasında bu kaynaklar birbirinden ayrılırken, yüzeylerden ufak parçalar kopar. Bu şekilde meydana gelen aşınma adhesiv aşınma olarak adlandırılır [45].

Çalışan parça ile iş parçasının temas yüzeyinde son büyük bir basınç ve sürtünme ortaya çıkmaktadır. Sürtünme de ısıya, yani kesme yada form vermeye çalışılan yüzeyde sıcaklığın artmasına yol açmaktadır. Temas anındaki bu koşullar, çalışan parça ile iş parçası ara yüzeyinde anlık mikro kaynaklara neden olmaktadır. Bu mikro kaynaklar bir adım sonra kopup gitmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, mikro kaynaklar oluşuyor ise koparken beraberinde çalışan parçadan da parça koparıp koparmadığıdır. Eğer yapışmadan sonra, yüzeye yapışan bu iş parçası çalışan parça yüzeyine yapışıp kalırsa bu duruma

sarma/sıvanma adı verilir; ancak çalışan malzemeden bir parçayı koparıp beraberinde götürürse buna da adhesiv aşınma adı verilir. Yani adhesiv aşınma, asıl olarak yapışma-kopma çevrimleri sırasında oluşan yüzey yorulmasıdır [46].

Adhesiv aşınma benzer kristal kafes yapıları malzemelerde görülür. Benzer kristal kafes yapısına sahip metallerin hareket ve sürtünmeleri nedeniyle sıcaklığın artmasıyla birlikte yüzeylerinde kaynama daha kolaydır. Buradaki kaynamadan maksat malzemelerin yüksek sıcaklıktan dolayı birbirleriyle bağ oluşturmalarıdır [47].



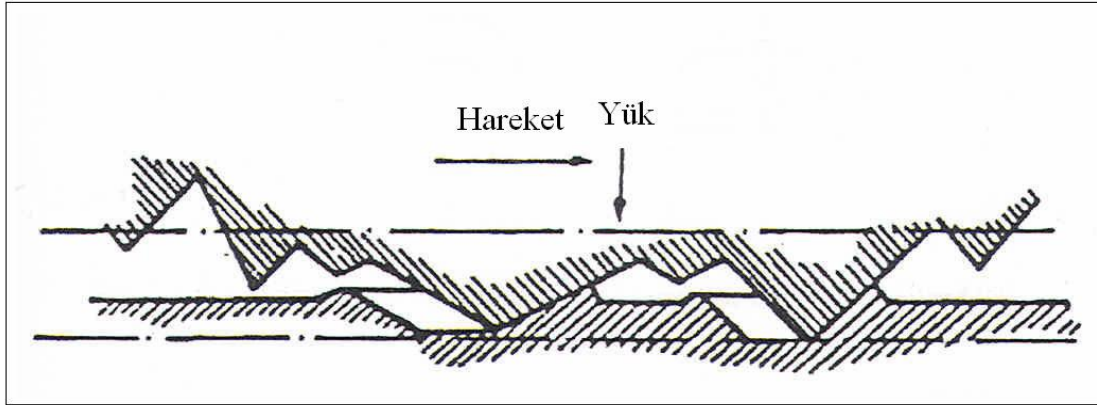
Şekil 2.6. Adhesiv Aşınma Örnekleri [48].

Adhesiv aşınmanın önlenmesi için,

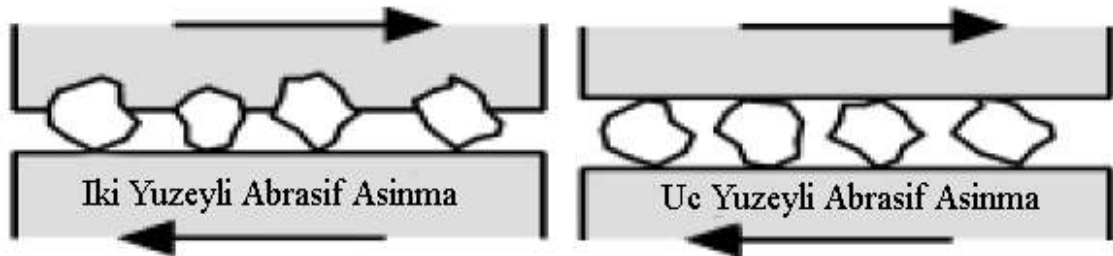
- Yağlama : İyi bir yağlama ile sürtünme azalır, ısı uzaklaştırılır. Sonuçta mikro kaynak bölgeleri önlenir.
- Düz Yüzeyler Kullanmak : Eğer temas eden yüzeylerde çıkıntılar yoksa aşınma meydana gelmez.
- Metal – Metal Temasını Önlemek : Aşınmayı meydana getiren metal – metal temas yüzeylerinde filmler(PVD kaplama ile, nitrürasyon işlemi ile) oluşturursak aşınmayı engellemiş oluruz [48].

2.2.2. Abrasif Aşınma

Abrasif aşınma, farklı iki sertlik değerine sahip malzemenin karşılıklı etkileşimi sırasında, sert olan malzemenin diğerinin yüzeyini çizerek malzeme yüzeyinden parçalar koparması esasına dayanır. Diğer bir deyişle; sert, keskin bir parçanın daha yumuşak bir parçadan talaş kaldırmasına abrasif aşınma denilmektedir. Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da adlandırılmaktadır [48]. Abrasif aşınmayı kendi içerisinde iki kategoride incelemek mümkündür. İlk olarak bir malzeme üzerinde bulunan sert partikülün, diğer malzemeyi çizmesi ile meydana gelen abrasif aşınma, iki elemanlı abrasif aşınma olarak adlandırılır. Üç elemanlı olarak meydana gelen abrasif aşınma ise iki malzeme yüzeyi arasında serbest olarak hareket edebilen sert partiküller tarafından meydana getirilir [49]. Çok hızlı meydana gelen ve etkisini çok çabuk gösteren bir aşınma türü olduğundan, eğer önlem alınmazsa büyük hasarlara ve maddi kayıplara sebep olur [2]. Ayrıca, iş parçası içerisinde takımdan daha sert olan karbür partiküllerinin, takım malzemesini çizip parçacık koparmasıyla da kesici takımda abrasif aşınmalar meydana gelmektedir [50].



Şekil 2.7. Abrasif Aşınma [47].



Şekil 2.8. İki Yüzeyli ve Üç Yüzeyli Abrasif Aşınma [2,49].

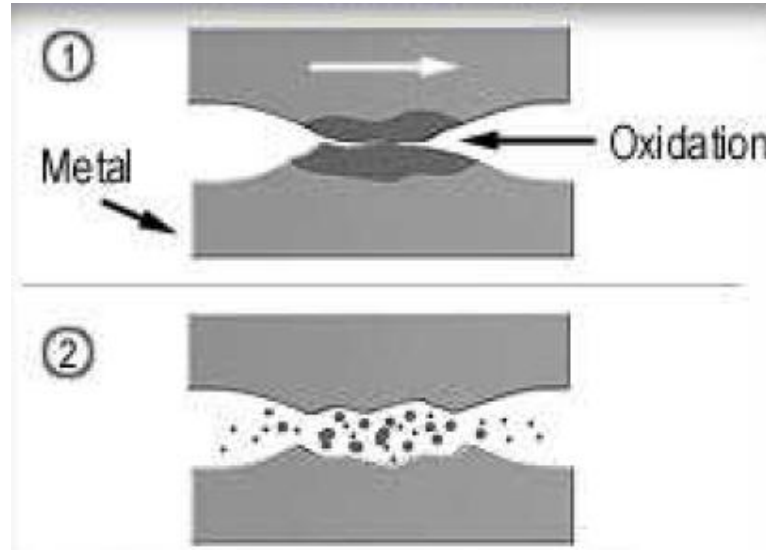
Aşındırıcı malzemenin yüzeye gömülü olması, bir yüzeyi zımparalama işlemine benzer ve yüzeyden aynen bir kesme takımıyla talaş kaldırılması şeklinde aşınma işlemi gerçekleşir. Üç yüzeyli abrasif aşınmada ise aşındırıcı tanecikler serbest halde yuvarlanmakta ve yüzeylerin üzerinde kaymaktadır. Üç yüzeyli abrasif aşınma, adhesiv aşınma ile birlikte meydana gelmektedir ve bu sebeple iki yüzeyli abrasif aşınmaya göre kat kat daha fazla aşınma meydana gelmektedir [22].

Abrasif aşınmanın azaltılması için aşınmayı oluşturan taneciklerin ve partiküllerin sistem içine girmemesini sağlayacak şekilde yüzeylerin sık sık temizlenmesi gerekmektedir. Yüzeyler temizlenirken kullanılan hava, su yada yağ, içerilerinde bulunabilecek partiküllerden iyi bir şekilde filtre edilmelidir [48]. Ayrıca abrasif aşınma malzemelerin sertliğiyle doğrudan ilişkili olduğundan, abrasif aşınmanın önlenmesi için de yine sertlikten yararlanılır. Bu sebeple abrasif aşınmayı önlemeye yönelik olarak sert malzeme kullanılmalı veya yüzeylerin sertliği ısıtılma işlemi, nitrürasyon, CVD, PVD gibi yüzey kaplama yöntemleriyle artırılmalıdır [39,42].

2.2.3. Korozyon Aşınması

Korozyon aşınması, düşük sıcaklık ve yüksek sıcaklık korozyon aşınması olmak üzere iki şekilde gerçekleşir. Metalik malzemelerin içerdikleri alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak yüzeylerinde 0,1 mikron kadar doğal bir oksit tabakası bulunmaktadır. Bu tabaka sayesinde korozyon ortamlara karşı direnç gösterirler. Aşındırıcı ortam tarafından metal yüzeyine uygulanan tekrarlı darbeler esnasında yüzeyden malzeme ile beraber oksit tabakası da kalkar. Tekrarlı darbelerin sıklığından veya koruyucu tabakayı oluşturan elementin alaşım içinde zamanla tükenmesinden dolayı oksit tabakası tekrar şekillenmez duruma gelir. Korozyonun beraber geliştiği ve korozyonun aşınma hasarına katkıda bulunduğu bu olaya düşük sıcaklık korozyon aşınması denir [51].

Metalik malzemeler birçok uygulamada yüksek sıcaklıklarda korozyon ortamlara maruz kalırlar ve malzemenin korozyon direnci bu ortamlardan etkilenir. En önemli yüksek korozyon aşınma türü oksitlenmedir. Metal ve alaşımlar yüksek sıcaklıklarda hava veya oksitleyici ortama maruz kaldıklarında yüzeylerdeki oksit tabakası doğal olarak büyür. Metalik malzeme ve üzerindeki oksit tabakası farklı ısı genleşme katsayılarına sahiptirler. Oksit tabakası, çalışma ortamındaki ısınma soğuma çevrimleriyle oluşan iç gerilmeler nedeniyle zaman zaman dökülür ve hemen doğal olarak kendini yeniler. Koruyucu oksidin kendini tekrar yenileyemeyecek duruma gelmesi durumunda savunmasız kalan metal ise hızla oksitlenir ve zamanla pul pul dökülerek yüzeyde malzeme kaybı oluşur [52].



Şekil 2.9. Oksidasyon Oluşumu [48].

Korozyon aşınmasından korunma yöntemleri;

- Malzemeye Alaşım Elementi İlavesi : Yüzeyde koruyucu oksit tabakası oluşturan alaşım elementleri (Cr gibi) ilavesi ile korozyondan korunabilir (paslanmaz çelikler). Paslanmazlık için krom yüzdesinin %10.5 ' den fazla olması gerekmektedir.
- Yüzey Kaplama : Korozyona uğrayacak metal, krom gibi korozyona direçli malzemelerle kaplanabilir.

2.2.4. Yüzey Yorulması

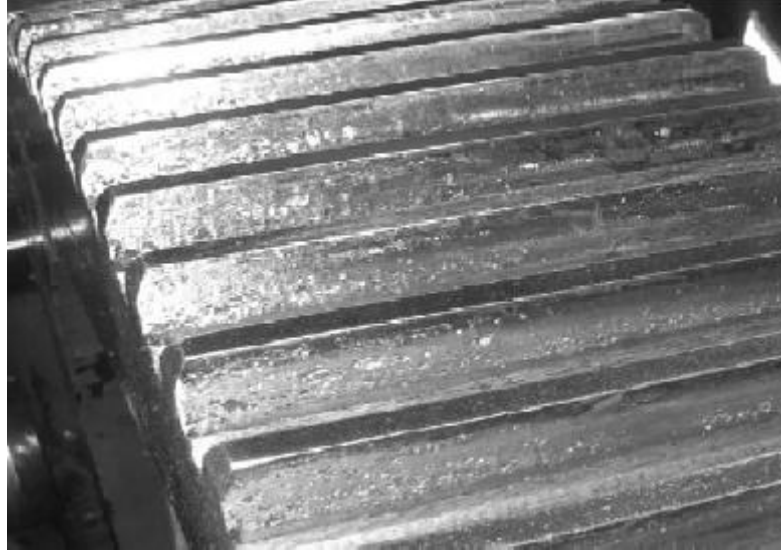
Yüzey yorulması; yüksek basınç altında çalışan parçalarda fazla sayıda yük tekrarlarının ardından, ya yüzey altında gelişen çatlakların yüzeye doğru büyümesi ya da yüzeydeki çatlakların gelişip yüzey altındaki çatlaklarla birleşmesi sonucu yüzeyden malzeme parçacığının kopup ayrılması ile oluşan bir aşınma şeklidir. Yetersiz yağlama nedeni ile ortaya çıkan aşınma hasarlarından farklıdır. İyi yağlama şartlarında bile görülebilir [52].

Değişken tekrarlı yüklemeler sonucunda maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerlerde plastik deformasyon ve dislokasyona bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir, Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerler, büyürler yüzeyde küçük çukurların ortaya çıkmasına sebep olurlar [48]. Önemli olarak dişli çark ve rulmanlı yataklarda gözükken pitting olarak da

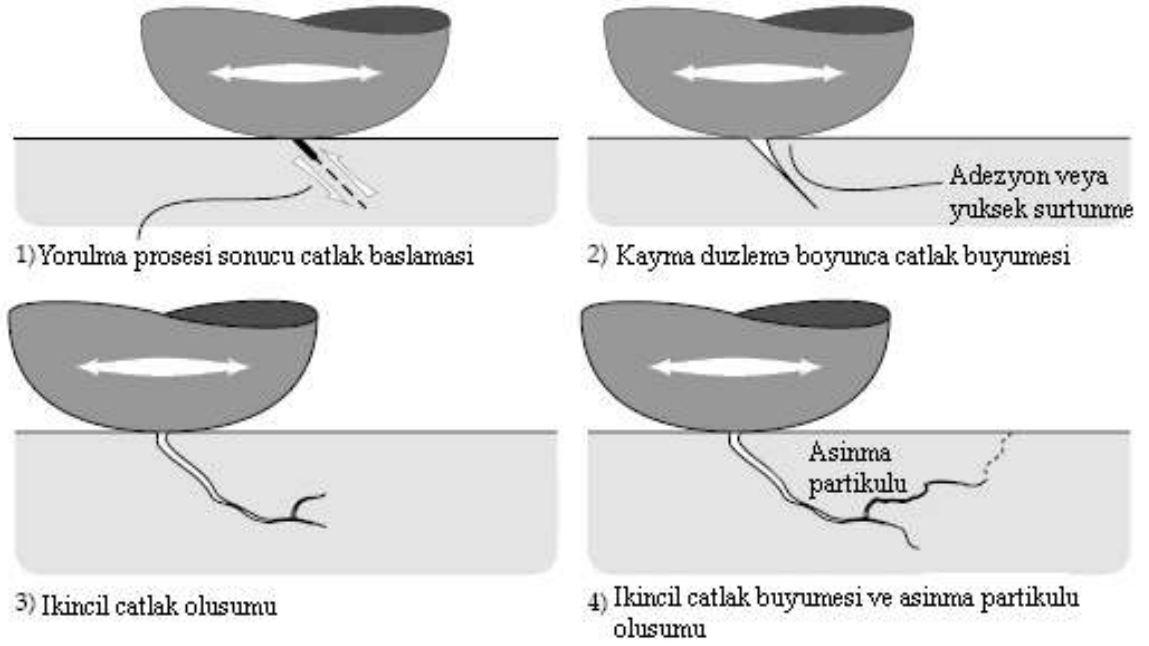
adlandırılan yorulma aşınmasında, hasar mekanizması yüzey altında oluşan kayma gerilmeleri ile çatlak oluşumu ve çatlakların ilerlemesi ile pullanma şeklinde meydana gelmektedir [53].



Şekil 2.10. Yüzey Yorulması Oluşan Çukurlar [48].



Şekil 2.11. Dişlideki Yorulma Aşınması [54].



Şekil 2.12. Yorulma Sonucu Yüzeyde Çatlak Oluşumu Ve Büyümesi [2,22].

Yorulma aşınması, yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısının azaltılması ile önlenabilir. Yüzeyler arasındaki yağın etkisine de çok dikkat etmek gerekmektedir. Yüksek basınç altında, yağın yüzey çatlaklarına girmesi, bunların büyümesinde önemli rol oynamaktadır. Ayrıca yüksek kayma ve basma mukavemetine sahip malzemeler kullanılmalıdır. Pitting denilen yorulma çukurcuklarının oluşumunda sertlik oldukça önemlidir. Yorulma aşınmasını önlemek için yüzeyler sertleştirilmelidir [22,42].

3. YÜZEY İŞLEMLERİ

3.1. Nitrürasyon (Azotlama)

Nitrürasyonla yüzey sertleştirme işleminde, çeliğin yüzeyine difüzyon ile azot verilerek, malzemenin yüzey özellikleri değiştirilir. Sertleştirme işlemi 500–590°C sıcaklıklar arasında yapılır. Belirtilen sıcaklıklar arasında yani ferritik fazda gerçekleşen ve çelikte herhangi bir faz dönüşümüne neden olmayan gaz nitrürasyon işleminde, yüzey sertliği ve sert tabaka derinliği işlem süresine, sıcaklığa, gaz karışımına ve demir esaslı malzemenin alaşım içeriğine bağlıdır [55]. Azotlama işlemi, çeliğin yüzey sertliğini artırmak, aşınma dayanımını artırmak, yorulma dayanımını artırmak, korozyon dayanımını artırmak ve yüksek sıcaklıklarda sertlik kaybını azaltmak için uygulanır. Parçada azotlama işlemi yapıldıktan sonra hızlı soğutma işlemi uygulanmadığı için boyutsal anlamda çarpılma olmamaktadır [56,57].

Bu yöntemle sertleştirmede sertlik artışı, östenitin martenzite dönüşümünden değil, 500 – 580 °C sıcaklıklarda azot atomunun parça yüzeyine yayınarak, yüzeyde nitrür tabakası oluşturması esasına dayanmaktadır. Yöntemin uygulanabilmesi için, çeliğin yaklaşık %1 oranında Al, Cr, Ti, V ve Mo gibi uygun nitrür yapıcılarla alaşımlandırılması gerekmektedir [58].

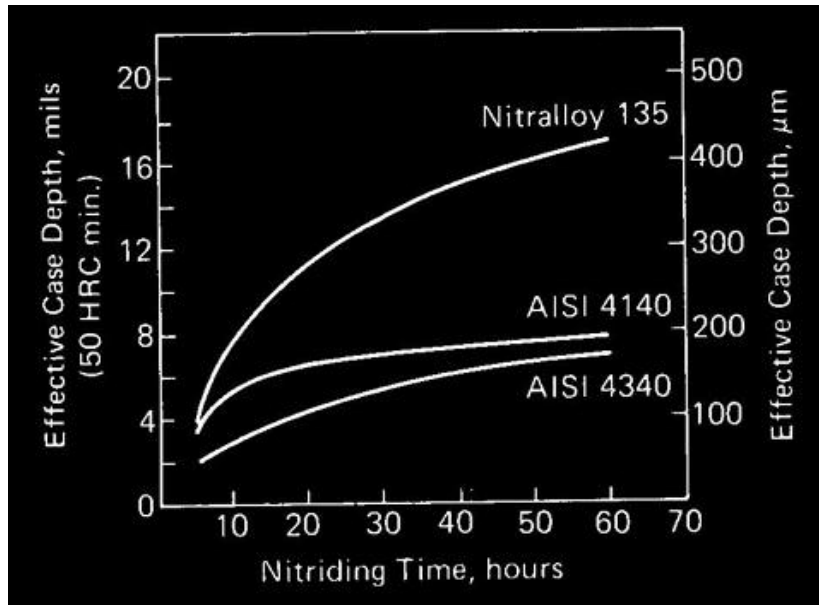
Düşük sıcaklık yüzey sertleştirme işlemlerinden biri olan nitrürasyonda, çelik parça yüzeyine azot atomları gönderilmektedir. Ayrışmış amonyak içeren ve kapalı hazne içerisine beslenmiş gaz nedeni ile nitrürasyon sıcaklıklarında azotun malzemenin yüzeyinden merkezine doğru nüfuziyeti söz konusudur. Azot, başta demir olmak üzere çelik içerisinde yer alan Al, Si, Cr, Mo ve V gibi alaşım elementleri ile reaksiyona girerek değişik nitrürlerin oluşumuna neden olmaktadır. Nitrürlerde, karbürler gibi sert yapılardır. Yüzeyden merkeze doğru belirli bir derinlikte azot difüzyonunun gerçekleşmesi ve çeşitli nitrür yapılarının oluşması halinde, yüzey sertliği orijinal matriks sertliğinin çok daha üzerinde bir değere ulaşabilmektedir [60].

Nitrürasyon İşleminin Sınırları;

- İşlem parametreleri ve malzemeye bağlı olarak nitrürasyon tabaka derinlikleri 0.05 ile 0.75 mm arasında değişebilir.
- Yüzey sertliği işlem parametreleri, malzeme ve malzemenin önceki durumuna bağlıdır. Optimum sonuç için nitrürasyon uygulanacak çelik sertleştirilmiş ve menevişlenmiş durumda olmalıdır. (Meneviş sıcaklığı nitrürasyon sıcaklığı üzerinde olmalıdır).
- Nitrürasyon işleminin uygun gerçekleşebilmesi için, hassas tornalanmış veya taşlanmış bir yüzey en uygun yüzeydir.
- Nitrürasyon sonrası çarpılmayı minimize etmek için yüksek hassasiyetteki sertleştirilmiş ve menevişlenmiş parçaların kaba ve son talaşlı işlemleri arası bir

gerilim giderme (“stabilizasyon”) işlemi gereklidir. (Uygulanan gerilim giderme sıcaklığı nitrürasyon sıcaklığından yüksek fakat meneviş sıcaklığından düşük olmalıdır).

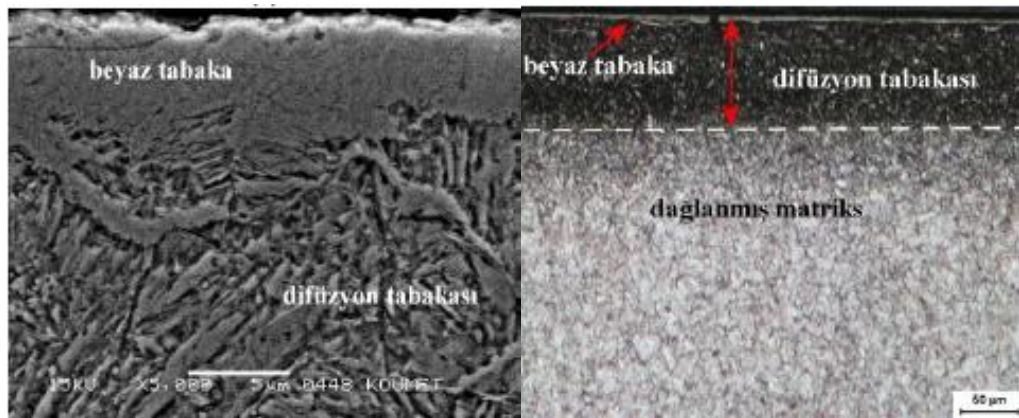
- Sertleştirilmiş, menevişlenmiş ve gerilim giderme işlemi uygulanmış parçada nitrürasyon işleminde minimal çarpılma meydana getirmelidir. Ancak miktarı, işlem parametreleri ve malzemeye bağlı olarak büyüyebilir. Bu tamamen göz ardı edilebilir ve genellikle çapta 0.05 mm altındadır.
- Paslanmaz çeliklerin pas dayanımı nitrürasyon sonrası azalır [61].



Şekil 3.1. Farklı Çelik Alaşımları İçin Nitrürleme Zamanları [58].

Demir esaslı malzemeler nitrürlendikten sonra içyapıları iki farklı bölgeden meydana gelir. Birinci bölge nitrürleme işleminden sonra yeni bir içyapı görünümüne kavuşan ve dış yüzeyden itibaren belirli kalınlıkta meydana gelen sert tabakadır. İkinci bölge ise malzemenin nitrürlemeden önceki içyapısını muhafaza eden ve sert tabakanın altında yer alan çekirdek kısmıdır. Sert tabaka ise azotun bağlanması ve yayılması bakımından beyaz (bileşik) tabaka ve yayınma (difüzyon) tabakası olarak ikiye ayrılır. Sadece birkaç mikron kalınlığında olan bileşik tabaka, dağlamadan etkilenmeyip, metalografik incelemede beyaz görüldüğü için “beyaz tabaka” olarak da anılır. Bileşik tabaka, oldukça kalın olan difüzyon tabakası tarafından desteklenir. Nitrürleme koşulları ve süresi ayarlanarak oluşumuna olanak verilen bu tabaka sert ve aşınmaya karşı dayanıklı olmasına rağmen camsı bir faz gibi davranıp gevrekleşebilmektedir. Proses koşulları ile tabaka kalınlığının daha fazla artırılması halinde,

tabakanın çatlak içirme olasılığı artacağından bu tür bir oluşum malzemenin yorulma davranışını olumsuz yönde etkileyecektir. Beyaz tabakada γ' (Fe_4N) ve ϵ (Fe_{2-3}N) fazları veya bunların karışımı görülebilmektedir. Bu fazlardan γ' yüzey merkezli kübik (ymk) geometrisinde kristallenir, ϵ ise hegzagonal yapıdadır. Beyaz tabakanın sadece bu metaller arası bileşiklerden oluşması sertliğinin malzemenin kimyasal bileşiminden bağımsız olmasını sağlamaktadır. Nitrüleme ortamında veya nitrülenen malzeme üzerinde bulunan karbonun artışıyla ϵ nitrür oluşumu teşvik edilir. Ayrıca, ϵ nitrürünün fazla olduğu malzemede oluşan bileşik tabakanın daha kalın olması, ϵ nitrürün büyüme hızının γ' nitrüründen daha fazla olması ile açıklanabilir. Beyaz tabakanın mekanik özellikleri, bu fazların bulunma miktarlarına ve tabakanın kalınlığına büyük ölçüde bağlıdır. Beyaz tabakada γ' fazının oluşumu, yumuşak ve sünek olması nedeniyle, aşınma dayanımının düşük, darbelere dayanıklı uygulamalarda tercih edilirken, ϵ fazının oluşumu, aşınma dayanımının yüksek olması istenen parçalarda tercih edilir. Her iki fazın birden oluşması durumunda ise fazların büyümelerindeki (hacimsel genişlemelerindeki) farktan dolayı iç gerilmeler oluşur. Ayrıca beyaz tabaka ile yayınım (difüzyon) tabakası arasındaki ara yüzeyin dayanımı da zayıftır. Tüm bu oluşumlar beyaz tabakanın küçük yükler altında bile çatlamasına sebep olmaktadır. Bu yüzden beyaz tabakanın oluşumunun yorulma çatlak başlangıcını hızlandıracağı düşünüldükçe, özellikle değişken dinamik zorlanmalara maruz kalacak parçaların nitrülenmesi istenmez. Beyaz tabakanın altındaki difüzyon tabakası çok küçük ve sık dağılmış sert nitrür fazları içerir. Nitrülemde azot atomları daha yüksek enerjili bölgeler olan tane sınırlarından difüze olurlar ve buralarda daha önce bulunan karbür fazları ile birleşerek çok gevrek olan karbonitrürleri oluştururlar. Bunun neticesinde difüzyon tabakasının gerilmelere olan hassasiyeti büyük ölçüde artmış olur. Böylece gevrek karbonitrür fazları iç kısımlara doğru itilerek yüzeyin aşınmaya ve yorulmaya dayanımı artar [62,63].



Şekil 3.2. Nitrürasyon Sonrası DIN 1.2344 Deneysel Çeliğine Ait Yüzeyden Merkeze Doğru Mikroyapı Değişimleri ve Detaylı Gösterimi [60].

3.1.1. Gaz Nitrürasyon

İşlem amonyak gazı yada CO, N₂ ve H₂ den ibaret bir gaz karışımı içerisinde gerçekleşir. İşlem sıcaklığı 510-550°C'dir. Amonyak gazı işlem sıcaklıkları arasında hidrojen ve azota ayrışır, açığa çıkan azotun çelik yüzeyine difüze olmasıyla nitrürleme gerçekleşir [53,108]. Parçalar, kontrol atmosferli gaz sızdırmaz fırın içerisinde yavaş yavaş ısıtılır. Azot difüzyonu için gereken sürenin sonunda, parça tekrar yavaş yavaş soğutulur ve malzeme yüzeyinde nitrür tabakası oluşur [64]. Nitrür tabakasını oluşturan azot çeliğin kafes yapısında ara yer boşluklarına oturmaktadır.

- Avantajları : Martenzitten çok daha sert olan bir tabaka meydana gelir. Malzeme sertleştirilirken su vermeye gerek olmadığı için içyapı dönüşümleri de vuku bulmaz. Bu nedenle parçada ölçü değişimleri ortaya çıkmadığı için parçalar kullanılacakları ölçülerde işlenip nitrürasyon işlemine tabi tutulabilir [65].
- Dezavantajları : Bu işlem çok uzun zaman gerektirir ve bu da maliyeti artırır. Yüzey üzerinde meydana gelen gevrek beyaz tabaka pul pul dökülebilir ve yüzey davranışlarına zarar verebilir. Özel çelikler nitrürlenmelidir ve bu da ürün fiyatını artırır. Nitrürlenmiş çelikler yüksek miktarda yüklemeler için kullanılmayabilir. Gaz nitrürleme gereken derinliğe ulaşmak için tuz banyosu nitrürasyonuna ve iyon nitrürlemeye göre daha çok zaman alır [66].

3.1.2. Banyo(Sıvı) Nitrürasyon

İşlem tuz banyosunda gerçekleşir. Siyanürlü tuzda 570±10°C' de gerçekleşen işlemde, yüzeye azot atomu yayındırılır. Tuzun ısı iletiminin yüksek olması nedeniyle, parça yüzeyi kısa sürede ısınır [53]. Sıvı nitrürlemede, gaz nitrürlemeye göre sertleşme derinliği daha fazladır. Fakat hızlı ısınmadan dolayı çarpılma riski vardır. Yüksek aşınma dayanımlı yüzey elde etmek için tercih edilir [67].

İşlemin yapıldığı tuz banyosu, % 25-50 siyanür ve % 50 siyanat içermektedir. Nitrürasyon sonrası parçalar suda ani olarak soğutulurlar. Banyo nitrürasyonda bölgesel olarak kısmi daldırma yapılarak, bölgesel nitrürasyon yapılabilir [64].

3.1.3. Plazma(İyon) Nitrürasyon

Plazma nitrürasyon yönteminde azot difüzyonu, metal yüzeyinde ve yüzeye çok yakın bölgede gerçekleştirilir. Reaksiyonların oluşması için gerekli azot, azot gazının ya da azot içeren bir gaz veya gaz karışımının yüksek gerilimli doğru akım ile iyonlara ayrıştırması ile elde edilmektedir [68]. İşlem N_2 , H_2 , Ar ve NH_3 gaz ortamında, 350-590°C arasında gerçekleştirilebilir. Malzeme yüzeyi iyon bombardımanına tutularak sertleştirme işlemi yapılır. Nitrür partiküllerinin oluşması için gerekli olan aktifleşme enerjisi, fırın cidarı ile parça arasında oluşturulan yüksek gerilim ile azot verilecek parçaya doğru ivmelendirilen iyonların parça yüzeyini bombardımanı sonucunda açığa çıkmaktadır [55,64]. Yani azot gazının iyonizasyonu ile serbest kalan elektron anot kutbuna gitmekte, elektron kaybederek pozitif yüklü hale gelen azot atomu ise katot durumundaki iş parçası yüzeyine hızlı çarpılmaktadır. Bu sırada anot ve katot olarak konumlanan iş parçası arasında parıltılı bir boşalım meydana gelmektedir. İyon nitrürasyon işlemi en yalın haliyle, anod-katod arasına tatbik edilen gerilim nedeni ile anod-katod (iş parçası) arasında oluşan elektrik alanının plazma içindeki elektrik yüklü parçacıklara etki ettirdiği kuvvet sonucu hızlanan yüklü parçacıkların, özellikle katod (iş parçası) çevresinde çarpışma ile gaz atomlarını (N ve H) iyonize etmeleridir. Bu sayede oluşan azot ve hidrojen iyonları da mevcut elektrik alanı etkisiyle gidip metal (iş parçası) yüzeyine çarpırlar. Anod - katod arasına tatbik edilen gerilimin anod-katod arasındaki dağılımı lineer olmayıp, gerilim düşümünün hemen hemen tamamı katodun (iş parçası) birkaç mm çevresinde (önünde) gerçekleştiğinden bütün çarpışma ve iyonizasyonun tamamına yakını bu bölgede gerçekleşir. Bu olay iş parçasının tüm dış yüzeyine yayılır ve sonuçta iş parçasının dış yüzeyi ne şekilde (delikli, düz, karmaşık, pürüzlü v.s.) olursa olsun iş parçasının tüm dış yüzeyine homojen bir iyon bombardımanı, dolayısıyla homojen bir sertlik ve sertlik derinliği elde edilir [69].

İyonların bombardımanı sırasında kinetik enerjilerini yüzeye aktarmaları parça yüzeyinin ısınmasına ve buradaki sıcaklığın artmasına neden olur. Ayrıca kullanılan gaz çiftinden birinin asal olması (H_2) yüzeylerin işlem öncesi temizlenmesini sağlamaktadır [70].

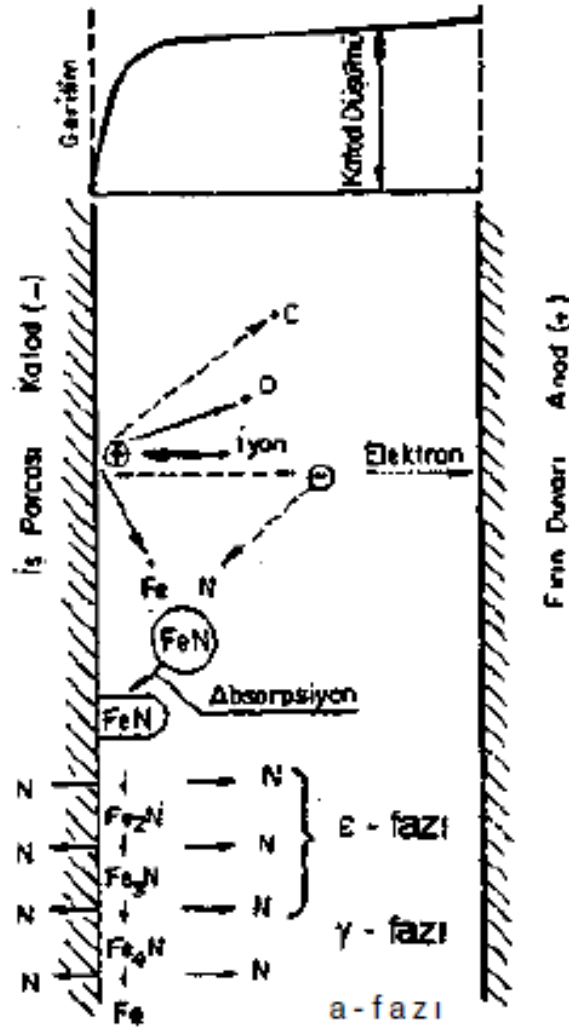
Gaz nitrürasyonda Fe_4N (γ) veya $Fe_{2-3}N$ (ϵ) fazlarından oluşan bir beyaz tabaka gözükmemektedir. Sıvı nitrürasyonda ise daha ziyade tek fazın oluşumu (ϵ fazı) iç gerilim bakımından tabakayı daha uygun hale getirmesine rağmen kalınlıktaki artış gevrekleşmeye yol açmaktadır. İyon nitrürasyon ile bu tabaka gayet hassas olarak kontrol edilebilir. $N_2 + H_2$ gazı kullanarak beyaz tabaka kalınlığı azaltılabilir. H_2 gazı yüzeyi temizler, yani beyaz tabakanın azalmasını hatta yok olmasını sağlar [61]. Nitrürleme süresi sadece difüzyon tabakası kalınlığı ile ilgiliyken, gaz karışım oranı bileşim (beyaz) tabakası kalınlığına etki eder [70].

İyon nitrürasyon işleminde gaz karışımı, iyonlara ayrılarak parça yüzeyine hızla çarpmakta olup, bunun sonucunda yayınma ve ısınma beraber sağlanmaktadır. Gaz nitrürleme

işleminde gazın parça yüzeyine emilmesi sonucu nitrürasyon oluşur. Bu farklılık iyon nitrürasyonla, gaz nitrürasyonu ayıran en temel farklılıktır [70].

Yöntemin diğer nitrürasyon yöntemlerine göre farklılıkları şöyle özetlenebilir:

- Sertlik ayarlanabilir (Sertlik yüksek değerlere de çıkabilir)
- Parça yüzeyinin temiz olması sağlanabilir.
- İşlem sıcaklığı düşük
- İşlem süresi kısa
- İyon nitrürasyon işleminin yatırım maliyeti yüksektir.
- Aynı şarjda; aynı boyut ve kesitteki parçalara nitrürasyon işlemi uygulanır [58,70].



Şekil 3.3. Plazma Nitrürleme Mekanizması [71].

3.2. PVD(Fiziksel Buhar Biriktirme)

Kaplama tekniklerinden fiziksel buhar biriktirme (PVD) yönteminde, kaplama malzemesi bir kaynağa yerleştirilerek ya yüksek sıcaklıklara ısıtılarak (buharlaştırma) yada yeterince yüksek enerjili iyonlarla bombardıman edilerek (sıçratma) buhar haline geçirilir. Katı haldeki kaplama malzemesinin yüzeyinden buhar fazına geçecek parçaların yüzeyden ayrılması için gerekli olan enerji buharlaştırma tekniğinde ısı enerjisiyle, sıçratma tekniğinde ise bombardıman iyonlarının çarpma enerjisi transferiyle sağlanmaktadır. Kaplama malzemesinin buharlaştırılması ve bu buharın bir altlık yüzeyinde yoğunlaştırılması faz dönüşümlerini ve kütle transferini içeren fiziksel temel oluşumları kapsayan bir mekanizma olduğundan bu tür kaplama işlemlerine PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) teknikleri adı verilmektedir. Kısaca PVD yöntemi vakum altında bulundurulmuş malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomların yüzeyden kopartılması ve kaplama yapılacak yüzeye atomsal veya iyonik olarak biriktirilmesi işlemidir [2,18,71].

PVD yöntemi gaz fazın elde edilmiş prensibine göre genel olarak iki grup altında incelenebilir [74].

- Buharlaştırma,
- Sıçratma

Bu teknikler aracılığıyla üretilen metal buharının iyonize edilerek taban malzemeye uygulanan negatif potansiyel (bias) aracılığıyla hızlandırılması ile yöntemler plazma destekli(iyon kaplama) haline dönüştürülür [72].

Buhar fazının elde edileceği malzeme vakum odasına katot olarak, kaplanacak malzeme de anot olarak bağlanır. Yüksek akım ve düşük voltaj etkisiyle katot yüzeyinden bir ark meydana gelir. Katot yüzeyinde arkın meydana geldiği noktalarda sıcaklığın çok yüksek değerlere ulaşması, bu noktalarda ergime ve buharlaşmalara sebep olur [73].

PVD yöntemi ile kaplanan takım, kalıp parçası gibi parçaların faydaları aşağıda belirtilmiştir.

- Uzun ömür,
- Yüksek kesme hızı,
- Çapak birikintisinin önlenmesi,
- Kenar keskinliğinin aynı kalması,
- Kesici takımların tekrar bilenebilme sayısının artması,
- Yüksek korozyon mukavemeti,
- Parça ve malzemenin kalıba yapışmasını engellemesi,

- Montaj ve alet değiştirme zamanlarının ve makine durma zamanlarının azalması,
- Tamir, bakım ve yenileme işlerinde azalma,
- Zaman, enerji ve malzeme tasarrufu,
- Yüksek sertlik (2400 – 4000 HV) ($\approx$ 80 – 90 HRC)
- Artan aşınma mukavemeti
- Düşük sürtünme katsayısı (Yüksek yüzey kayganlığı)
- Düşük ısı iletkenlik nedeniyle takım ısınmasının azalması
- İşlenen parçaların yüzey kalitesinde artış
- Çok düşük kaplama kalınlığı ile takım toleranslarına etkisinin azlığı (1 – 10 mikron arası)
- Kaplama sıcaklığı takım çeliklerinin meneviş sıcaklığının altında ($180-400^{\circ}\text{C}$) kaldığından çelikte yumuşama ve deformasyon oluşmaması [18,50].

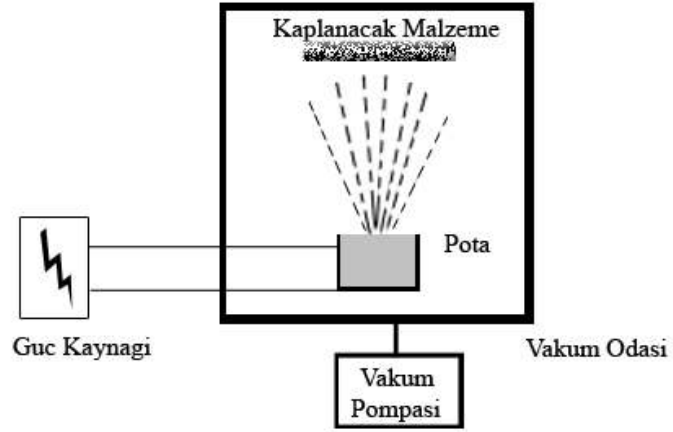
3.2.1. Buharlaştırma Yöntemi

Buharlaştırma yöntemi ile yapılan PVD kaplamada, sistem vakum altında olduğundan buharlaşan atomlar kaplanacak parçaya doğru enerjilerini kaybetmeden ilerleyebilirler (Vakum üretilen buhar fazı atomlarının, kaplanacak yüzeye ulaşması sırasında diğer atomlar veya moleküller ile çarpışarak enerjilerini kaybetmemeleri ve yüzeyde istenilmeyen bileşiklerin oluşmamasını sağlamaktadır [74].) ve parça üzerinde önce çekirdek oluşumu daha sonra çekirdeğin gelişimi şeklinde birikirler [81]. Buharlaştırma yönteminde, kaplanacak malzeme rezistanslı, endüktif, elektron bombardımanlı, ve katodik arklı sistemleri ile buharlaştırılabilmektedir.

3.2.1.1. Rezistans Ve Endüktif Buharlaştırma Yöntemleri

Bu yöntemlerde buhar fazının elde edileceği kaplama malzemesi yüksek sıcaklıklara dayanıklı potalar içine yerleştirilir. Endüktif buharlaştırmada, su soğutmalı bakır tellerin potalara sarılması ve akım uygulanmasına dayanır. Rezistanslı sistemlerin aksine buharlaşma sıcaklığının çok üstüne çıkılmasına gerek kalmaz. Böylelikle kontrollü buharlaşma sağlanır ve düşük ısı kayıplar olmasından dolayı buharlaşma verimi yüksektir [2,50].

Rezistanslı sistemde ısıtma, yüksek sıcaklığa dayanıklı pota çevresine sarılmış rezistanslar yardımıyla sağlanmaktadır [75,76]. Sıcaklık kontrolü devreye uygulanan akımın ayarlanmasıyla yapılır [50].



Şekil 3.4. Rezistanslı Isıtıcı Sistemli PVD Sistemi [2,75].

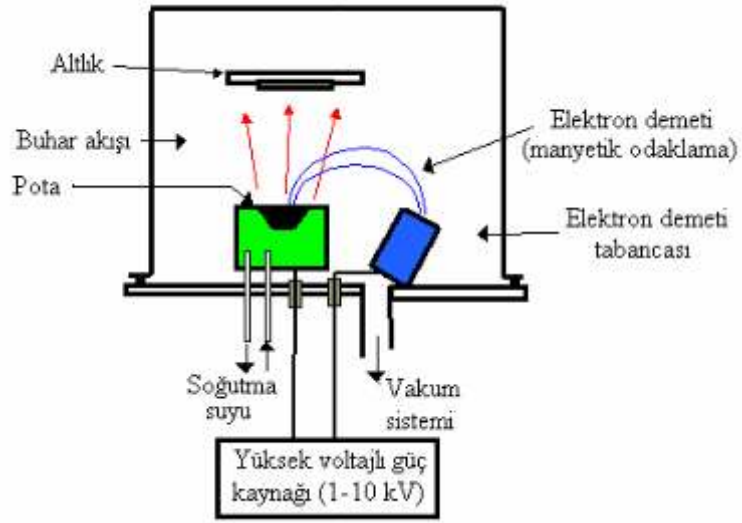
- Bu yöntemlerde kaplama kalınlığının homojenliği pota önünde oluşan buhar bulutu ve akışına bağlıdır.
- Geometrik faktörler nedeniyle büyük çaplı üretimler mümkün olmamaktadır.
- Bu yöntemlerle yüksek buharlaştırma sıcaklığına çıkılamadığı için kaplama malzemesi olarak genelde düşük buharlaşma sıcaklığına sahip malzemeler kullanılır.
- Belirtilen dezavantajları nedeniyle rezistans ya da endüksiyon buharlaştırma yöntemleri performans artırımına yönelik bilinen kaplamalardan ziyade dekoratif uygulamalarda kullanılmaktadır [75,50].

3.2.1.2. Elektron Demeti İle Buharlaştırma Yöntemi

Yatırım maliyetinin yüksek olmasına karşın kontrollü ve homojen buharlaştırma ile kaplama yapılabilmesi sayesinde özellikle hassas kaplamaların yapımında tercih edilebilen elektron demeti ile buharlaştırma yöntemi, bir elektron kaynağı tarafından sağlanan elektronların, kaplama malzemesi üzerine bombardıman edilmesi yardımıyla buharlaşmanın sağlanması esasına dayanır. Bu yöntemin en büyük avantajı kaplama malzemesinin ergitme sıcaklığı ne olursa olsun ergitip buharlaştırabilme yeteneğine sahip olmasıdır [72,77].

Elektron demeti ile buharlaştırmada gerekli elektronlar elektron tabancası ile sağlanmaktadır.

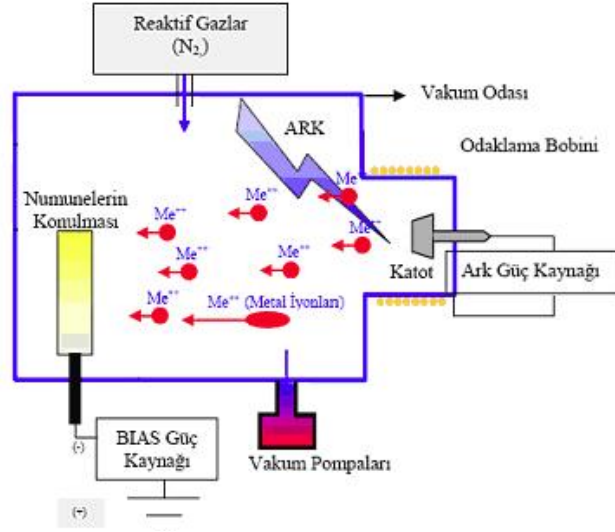
- Temel bir elektron tabancası, katot ve anottan oluşur. Katotdan (flaman) elde edilen elektronlar katot ve anot arasında oluşturulan yüksek potansiyel yardımıyla hızlandırılarak buharlaştırılacak malzeme üzerine düşürülür ve buharlaştırılacak malzemeden üretilen elektronlar kaplanacak malzemeye pozitif potansiyel uygulanması ile yönlendirilir [77].



Şekil 3.5. Elektron Demeti İle Buharlaştırma [78].

3.2.1.3. Katodik Ark Buharlaştırma Yöntemi

Ark ile buharlaştırma yöntemi; Bir gaz ya da elektrod malzemesinin buharı içerisinde geçen yüksek-akım düşük-voltaja sahip bir elektrik akımından ibarettir [79]. Yöntem malzemenin vakum altında ark etkisi ile buharlaştırılması esasına dayanır. Ark etkisi altında buharlaşan malzeme oluşan elektriksel alan içerisinde hemen, yüksek oranda ve yüksek enerjili olarak iyonlaşmaktadır [72].



Şekil 3.6. Katodik Ark PVD Sistemi [2,76].

Katodik ark tekniğinde; buharlaştırılacak olan malzeme vakum odasında katot, kaplanacak olan taban malzemesi ise anot olarak yerleştirilir. (Alçak gerilim ve yüksek akımda negatif kutuplu katot ve pozitif kutuplu anottur.) Bu teknikte yüksek akım ve düşük voltaj ile katot üzerinde ark oluşturulur. Bunu sağlamak için katodun ve iş gazlarının iyonizasyon potansiyeline yakın de düşük voltajlar ve katot yüzeyine yüksek akım uygulanır. Katot yüzeyinde arkın meydana geldiği noktalarda, sıcaklık çok yüksek (yaklaşık 2500 ° C) değerlere ulaşır ve katodun bu noktaları hemen buharlaşır. Katot üzerinde arkın olduğu noktalar sabit değildir ve hızla yer değiştirirler. Böylece katodun homojen olarak buharlaşması sağlanır. Oluşan buhar fazı, katodun önündeki yüksek elektron yoğunluğuna sahip bölgede çarpışmalar sonucu iyonize olur (Kaplama elemanları yüksek oranda iyonize edilebilmektedir.) ve oluşan iyonlar üniform olmayan potansiyel dağılımı nedeniyle bu bölgeden hızlı bir şekilde anot üzerine taşınırlar [50,80].

Katodik arkı sisteminde, katot yüzeyinde oluşan arkın etkisi ile 0.1-100 mm boyutlarındaki makro partiküllerin kütsel olarak kopması neticesinde, kaplama yüzeylerinde damlacık olarak anılan hatalar oluşmaktadır. Katodik ark yöntemi ile yapılan kaplamaların yüzeylerinde, damlacık oluşumunu azaltmak için katotların arkasına kuvvetli mıknatıslar yerleştirilmektedir. Mıknatısların oluşturdukları manyetik alan, iyon gibi yüklü partiküllerin üzerinde etkili olurken, yüksüz olan makro partiküller üzerinde etkisi yoktur. Bu farklılık ile manyetik alan sistemde iyonlar ile makro partiküller arasında filtre görevi görür. Manyetik alanın iyonlar üzerindeki etkisi, iyonların hızlarını artırır ve bununla orantılı olarak film biriktirme hızları

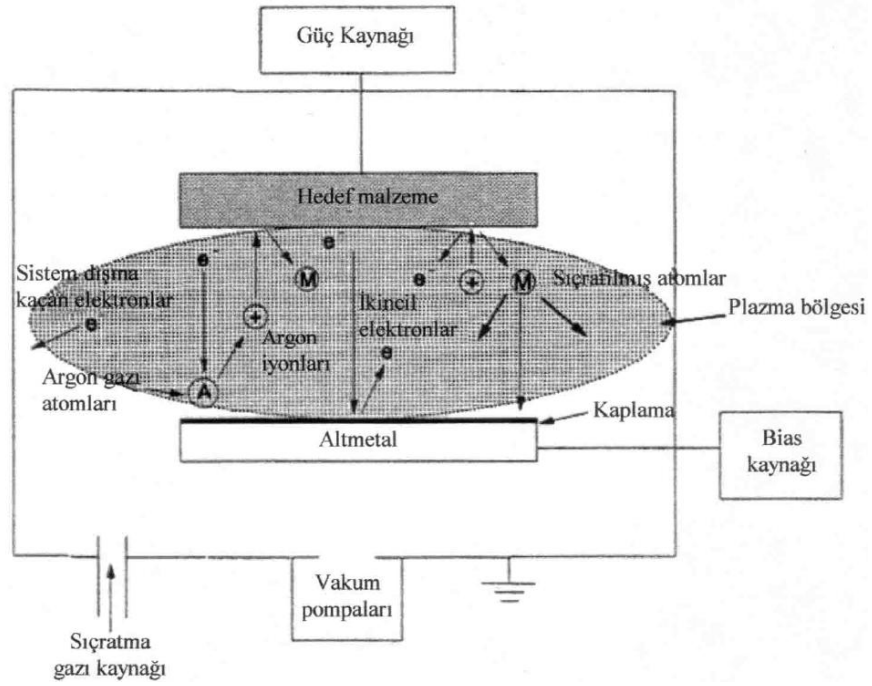
da artarak, kaplama süresi kısalır. Sonuç olarak kısalan kaplama süresi ile film yüzeyine düşen makro partikül sayısı da azalacaktır [50].

Katodik ark PVD kaplama yönteminde, ilk olarak numuneler döner taşıyıcıya yerleştirilir. Kaplamanın yapılacağı ortama proses gazı olarak azot gazı (N_2) verilir. Daha sonra numunelere bias voltajı uygulanarak hem malzemelerin ısınması hem de malzeme yüzeylerinin temizlenmesi sağlanır. TiN kaplamada Ti katot, TiAlN ve AlTiN kaplamalarda ise hem Ti hem de Al katot kullanılır. Katotlar uygulanan arkın etkisiyle buharlaşır. Kaplanacak malzemeye ulaşırken buhar fazındaki atomların enerjileri yükseltilir ve iyonizasyon sağlanır. Kaplanacak parçaya uygulanan negatif potansiyel (bias) sayesinde ortamdaki iyonlar parçaya doğru yönlendirilir ve hızlandırılır. Son olarak parça yüzeyine doğru yönlendirilmiş ve hızlandırılmış iyonlar parça yüzeyine yapışarak kaplamayı oluşturur [81].

3.2.2. Sıçratma Yöntemi

Sıçratma işleminde plazma oluşumunu başlatabilmek için diğer malzemeler ile reaksiyona girmeyecek inert gaz iyonları kullanılır. Ayrıca sıçratma işleminde iyonun yüzeyden atom koparması için kütlelerinin oldukça büyük olması gerekmektedir. Bunun için en yaygın kullanılan gaz argon' dur. Hedef adı verilen kaplama malzemesine negatif potansiyel uygulanır ve oluşturulan plazmadaki pozitif iyonların hedef yüzeyine çarpmaları sağlanır. Çarpan iyonlar hedef malzemeden atom kopartırlar. Hedef malzemesinin atomlarının bu şekilde malzemeden uzaklaştırılmasına sıçratma adı verilir [2,75,82].

Sıçratma tekniği ile kaplama işleminde, hedef adı verilen kaynak malzemesi vakum odasına yerleştirilmekte ve bu kamara vakum edilip içine argon gibi bir çalışma gazı verilmektedir. Hedef malzemeye uygulanan negatif bir elektriksel potansiyel neticesinde (hedef katottur.) hedefin pozitif iyonlarla bombardımanı sağlanmaktadır. Oluşan plazmanın gerilimi ile ivmelendirilen iyonlar hedefe çarparak hedefin sıçratılmasına sebep olmaktadır. Kaplanmak istenen altlık malzemeler yüzeyden sıçratılan malzeme akışının yolu üzerine yerleştirilmekte ve böylelikle sıçratılan parçacıkların altlık yüzeyinde yoğunlaşması sağlanmaktadır [1].



Şekil 3.7. Sıçratma Mekanizması [83].

Sıçratılan iyonların bazıları kaplanacak taban metal yüzeyine giderek orada birikir ve bir film oluşturur. Sıçratma sırasında hedef yüzeyine pozitif yüklü iyonların çarpması ile başka ara etkimeler de meydana gelebilir:

Hedef yüzeye çarpan atomlardan bazıları malzeme içine gömülebilir veya enerjilerini malzemeye bırakarak geri saçınabilir. Geri saçınmaları durumunda bıraktıkları enerji malzeme yüzeyinde ısı olarak açığa çıkacaktır [75,82].

Sıçratma ile, birçok malzeme başarılı bir şekilde biriktirilmesine rağmen, birikme hızının ve plazma içindeki iyonlaşma etkisinin düşük olması, altmetal sıcaklığının yükselmesi sistemin kullanımını sınırlamıştır [83].

Temel olarak sıçratma ile kaplama tekniği kendi içinde üçe ayrılmaktadır:

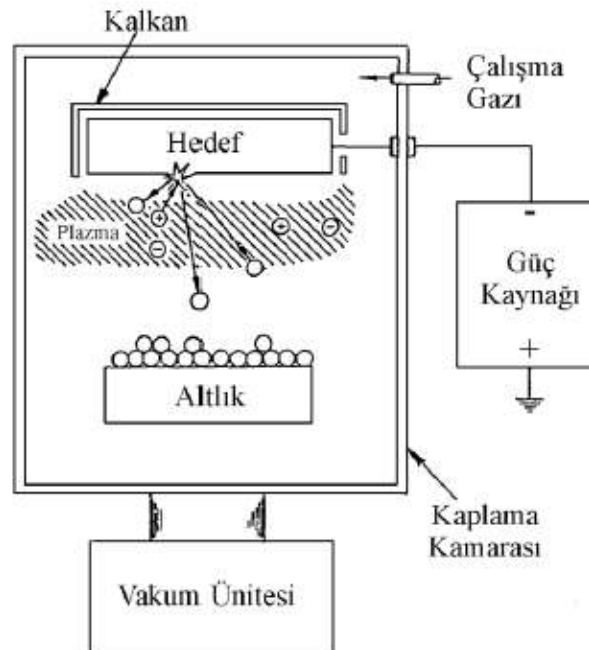
1. Diyot Sıçratma
2. Triyot Sıçratma
3. Manyetik Sıçratma [74,75].

3.2.2.1. Diyot Sıçratma Yöntemi

Sıçratma mekanizmasını oluşturabilmek için, vakum yapılan odaya çalışma gazının verilmesinin ardından anot ile katot arasında ısıtılı boşalma olarak adlandırılan plazma ateşlenmektedir. Katottaki hedef malzeme dışında hedef malzemeyi tutmakla görevli diğer parçalarında ortama sıçratılmasını önlemek için hedef malzemenin çevresinde şase gerilimine sahip bir kalkan bulundurulmaktadır. Ayrıca pek çok uygulamada hedef ile altlıklar arasında bir perde bulundurulmaktadır. Bu perde hedef malzemesinin yüzeyinin ön sıçratma ile temizlenmesi sırasında kullanılmaktadır. Böylelikle hedef malzemesinin yüzeyi temizlenirken bu esnada sıçrayan ve pislik içeren malzemenin altlık üzerine yoğunlaşması engellenmektedir [1].

Plazma içerisinde çarpışmalar sonucu oluşan iyonlar, bu büyük potansiyel fark nedeniyle hedefe doğru ivmelendirilmektedir. Bu iyonların hedef yüzeyini bombardımanı ile hedef malzemesinin atomları ortama sıçratılmaktadır. Sıçratılan atomlar karşı tarafında bulunan malzemelere çarpmakta ve burada yoğunlaşmaktadır [1].

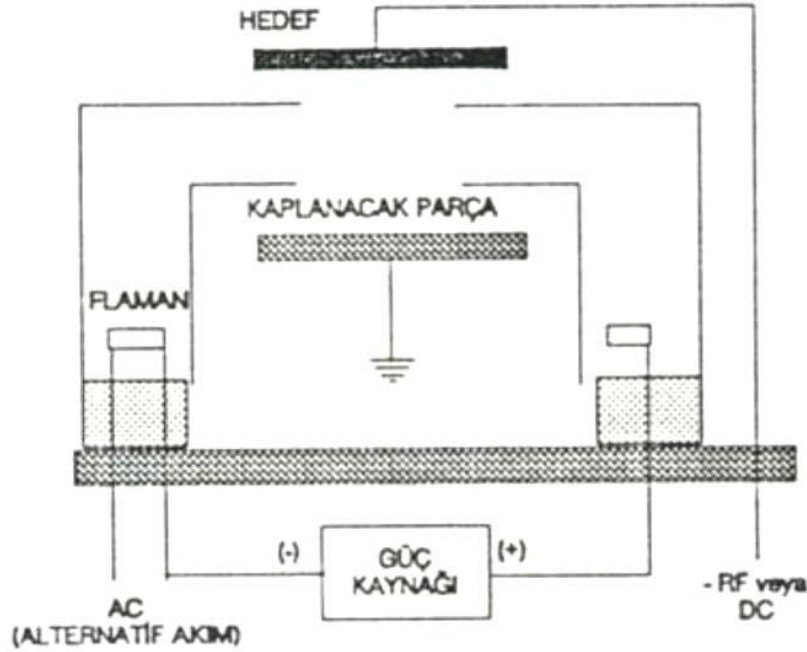
Hedekten malzeme sıçratma hızı dışarıdan uygulanan potansiyelle çok fazla kontrol edilemediğinden ve kaplama hızının yükseltilebilmesi için çalışma gazının basıncının artırılması sıçratılan parçacıkların yollarını kısalttığı için belirli bir değerin üzerinde basınç artışı da kaplama hızında azalmaya neden olması gibi sebeplerden diyot sıçratma, sıçratma etkisinin zayıf olması nedeniyle çok kullanılmamaktadır [75,82].



Şekil 3.8. Diyot Sıçratma Mekanizması [1]

3.2.2.2. Triyot Sıçratma Yöntemi

Bu sistemde diyot sıçratma düzeneğine bir elektron kaynağı ve bir yardımcı anot eklenmiştir. Bu sayede plazmanın iyon yoğunluğu artırılmıştır, bunun sonucunda da argon' un iyonlaşma olasılığı yükseltilmiş ve basıncı düşürülmüştür. Sistemdeki elektron miktarı uygulama potansiyeli ile orantılı olduğundan, bu teknikte uygulama potansiyeli de düşürülebilmektedir [75,84].

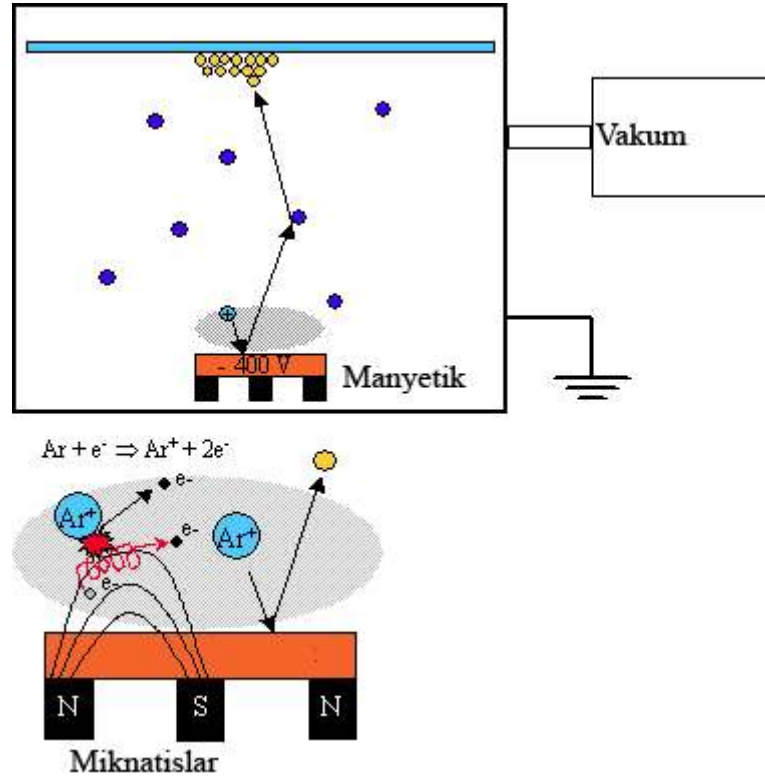


Şekil 3.9. Triyot Sıçratma Mekanizması [84]

3.2.2.3. Manyetik Sıçratma Yöntemi

Manyetik alanda sıçratma yöntemi diyot sıçratma yönteminin bir benzeridir. Burada sisteme ilave olarak hedef malzemenin hemen arkasına bir mıknatıs yerleştirilmiştir. Mıknatısın manyetik alan çizgileri hedef malzemesi yüzeyine paraleldir [80].

Mıknatıslı katot düzeneğinde, manyetik alan hedef yüzeyine paralel ve elektrik alan çizgilerine dik konumdadır. Yüzeyden yayılan ikincil elektronlar manyetik ve elektrik alanın etkisiyle katot yüzeyi önünde spiral tarzı bir yörüngede hareket ederler. Bu sayede elektronların yolları uzadığından ve çarpışma olasılıkları artacağından iyonlaşma verimi oldukça yükselir. Hedef yüzeyinin hemen önündeki bu yüksek iyonlaşma sıçratma hızını oldukça yükseltir [80].



Şekil 3.10. Manyetik Sıçratma Mekanizması [2,84].

İyonizasyon etkisinin artması, daha düşük çalışma basınçlarında plazma oluşturabilen manyetik alanlar meydana getirir. Çalışma basıncının düşürülmesi ile, sıçratılan hedef atomlarının gaz fazındaki saçınması daha az olacağından altmetale ulaşan tanecik sayısı artar ve böylelikle birikme hızı da artmış olur [75,82,2].

3.2.3. İyon kaplama Yöntemi

Bu teknik buharlaştırma yöntemine benzetilebilir. Kaplanacak malzeme buharlaştırmaya benzer bir yöntemle buharlaştırılır, oluşan buhar, gaz akış (glow) deşarjı (akış deşarjı kaplanacak parçaya negatif potansiyelle bias uygulayarak üretilir) boyunca taban malzemeye ulaşırken buhar fazındaki atomların enerjileri yükseltilir ve iyonizasyon sağlanır. Böylece kaplanacak parçaya uygulanan negatif potansiyel (bias) sayesinde ortamdaki iyonlar parçaya doğru yönlendirilir ve hızlandırılır. Kaplama öncesi uygulanan yüksek bias voltajı ile hem kaplanacak parçanın yüzeyi temizlenir hem de parça ısıtılmış olur [85].

Kaplamaların özellikleri ve yapışma kalitesi ana malzeme yüzey sıcaklığının artırılmasıyla geliştirilebilir. Ancak ana malzemenin özelliğinden dolayı istenilen kaplama özelliğini elde etmek için yeterince yüksek sıcaklıkta çalışma imkanını engellediği durumlarda vardır. Bu sorunu çözmek için yapılacak işlem ana malzemenin kaplanmasından önce ve kaplama sırasında enerjik parçacıklarla bombardımana tabi tutulmasıdır. Bu işlem ana malzeme sıcaklığının arttırılmasına eşdeğer bir etkiye sahiptir. Bu nedenle ana malzemeyi yüksek sıcaklıklarda ısıtmaya gerek duyulmaz [86].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Malzeme

Deney numunesi olarak Sverker 21 soğuk iş takım çeliği ve Toolox 44 ön sertleştirilmiş çelik kullanılmıştır.

4.1.1. Sverker 21

4.1.1.1. Sverker 21 Malzeme Özellikleri

Sverker 21 soğuk iş takım çeliği, sahip olduğu yüksek karbon ve krom oranı ile aşağıda belirtilen özellikleri taşımaktadır [87].

- Yüksek Aşınma Direnci
- Yüksek Basma Dayanımı
- Yüksek Tokluk
- Yüksek Sertleşebilirlik
- Yüksek Meneviş Direnci
- Isıl İşlemde Mükemmel Boyutsal Kararlılık
- PVD gibi Yüzey İşlemlerine Uygunluk
- İkincil sertlik özelliği

4.1.1.2. Sverker 21 Kimyasal Bileşimi

Çizelge 4.1. Sverker 21 Malzeme Kimyasal Bileşimi [87].

ISO/DIN	AISI	Teslim Sertliği	C	Mn	Cr	Mo	V	Si
1,2379	D2	210 HB	1,55	0,40	11,80	0,80	0,80	0,30

4.1.1.3. Sverker 21 Uygulama Alanları

Kalınlığı 6 mm'ye kadar her türlü soğuk sac kalıplarının delme, kesme zımbaları, kıvrırma, bükme, ezme, şişirme, şekillendirme kalıpları, boru ve profil haddeleme makaraları, kağıt, karton, plastik ve sac kesme makinelerinin kesici bıçakları, ağaç işleme takımları, vida, civata, perçin, somun gibi bağlantı elemanlarının soğuk şekil verme ve diş çekme kalıpları,

apak alma kalıpları, derin çekme kalıpları, ilaç, seramik sanayinde kullanılan aşındırıcı tozların sıkıştırma kalıpları, hassas kesme kalıpları ve dilme bıçaklarında kullanılmaktadır [88].

4.1.1.4. Sverker 21 Mekanik Özellikleri

Çizelge 4.2. Bazı Kalıcı Şekil Değıştirme Tipleri ve Sertlik Değeri [87].

ŞEKİL VERME	SERTLİK(HRC)
EZME	56-62
JANT HADDELEME	56-62
DERİN ÇEKME	56-62
SOĞUK EKSTRÜZYON	58-60
ZIMBA	56-60

Çizelge 4.3. Sertlik Değeri ve Basma Dayanımı İlişkisi [87].

Sertlik (HRC)	Basma Dayanımı(MPa, N/mm ²)
62	2200
60	2150
55	1900
50	1650

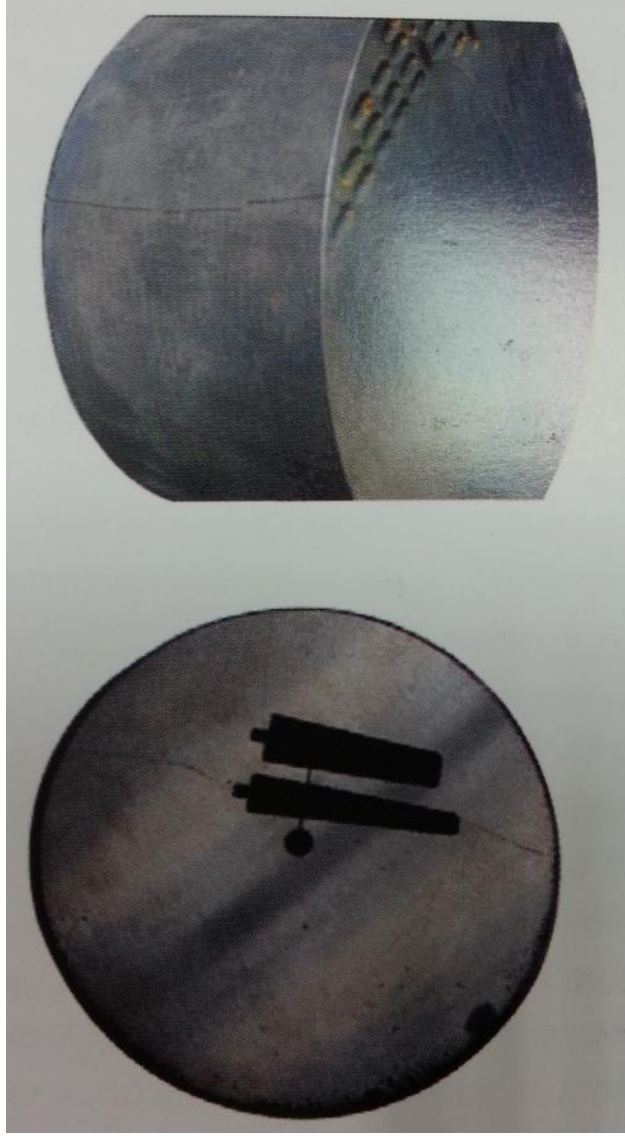
4.1.1.5. Sverker 21 Fiziksel Özellikleri

Çizelge 4.4. Sverker 21 Malzeme Fiziksel Özellikleri [87].

Sıcaklık (° C)	20	200	400
Yoğunluk (kg/m³)	7700	7650	7600
Isıl Genleşme Katsayısı	*	12.3*10 ⁻⁶ 11.2*10 ⁻⁶	12*10 ⁻⁶
Isıl İletkenlik (W/m°C)	20	21	23
Elastiklik Modülü (MPa)	210000	200000	180000
Özgül Isı (J/kg °C)	460	*	*

4.1.1.6. Erezyon (EMD) Tekniği ile İşlenebilme Özellikleri

EMD teknolojisi, sertleştirilmiş çelik kütüklerden karmaşık şekilli parçaların kesilmesinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Özellikle ince saclarda kesme kalıpcılığında, kalıpların çıkarılmasında sık kullanılan bir yöntemdir. EMD teknolojisinin sağlıklı bir şekilde uygulanabilmesi için kesme işleminin yapılacağı malzemenin, yüksek sıcaklıklarda menevişlenmiş olması gerekmektedir. 1.2080, Calmax gibi yüksek meneviş direnci olmayan malzemeler, EMD teknolojisi ile işlenmeye çalışıldığında işlenecek malzemede çatlak oluşumu ve şekil değişimi gözlenmektedir. Bunların yerine Sverker 21, Sleipner gibi meneviş direnci yüksek malzemeler tercih edilmelidir [46].



Şekil 4.1. Düşük sıcaklıkta menevişlenmiş 1.2080 Çeliği Tel Erozyon Çatlakları [46].

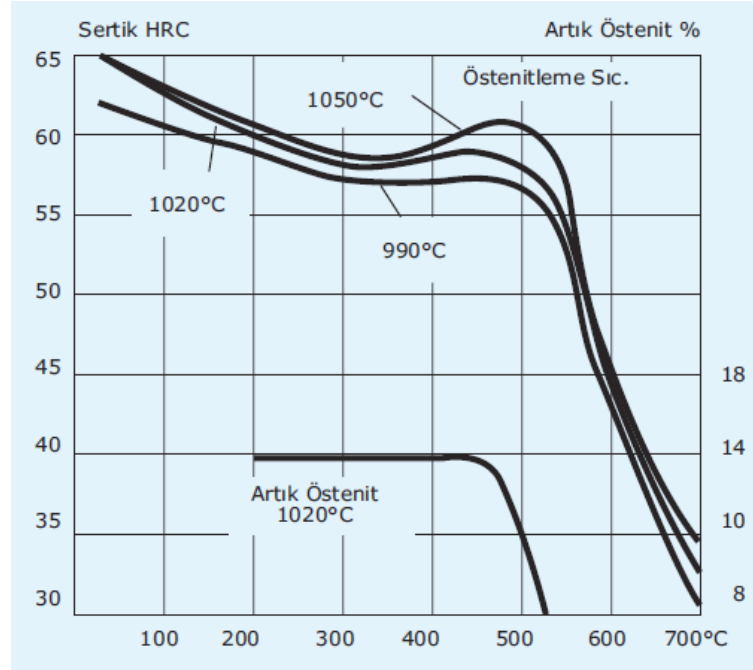
4.1.1.7. Sverker 21 Isıl İşlem Özellikleri

Çizelge 4.5. Sverker 21 Isıl İşlem Değerleri [87].

İşlem	Sıcaklık(°C)
Yumuşak Tavlama	850
Gerilim Giderme	650
Sertleştirme	
Önısıtma	650 – 750
Östenitleme	990 – 1050

Östenitleme Sıcaklığı(°C)	Tutma Süresi(Dak)	Meneviş Öncesi Sertlik (HRC)
990	60	63
1030	30	65

Sertleştirme Ortamı
Yağ (Sadece Basit Geometrilili Kalıplarda)
Kademeli Soğutma(180 - 500 ° C / Hava)
Vakum(Yüksek Basınçlı Gaz)
Menevişleme
En Düşük Meneviş Sıcaklığı : 180 ° C
En Düşük Meneviş Süresi : 2 Saat
Menevişleme Sayısı : En Az 2



Şekil 4.2. Sverker 21 Meneviş Diyagramı [46].

4.1.1.8. Sverker 21 Yüzey İşlemleri Özellikleri

Sverker 21 soğuk iş takım çeliği malzemesi için, yüksek sıcaklık menevişinin ardından nitrürleme işlemi yapılarak yüzey sertleştirilip aşınma dayanımı artırılabilir.

Çizelge 4.6. Sverker 21 Nitrürasyon İşlemi Parametreleri [46].

Nitrürleme Sıcaklığı(° C)	Nitrürleme Süresi(Saat)	Derinlik(mm)
525	20	0,25
525	30	0,3

Nitrürleme işlemi ile yüzeyin aşınma dayanımı artarken korozyon direnci de artmaktadır. 525 °C de nitrürleme işlemi sonrasında yaklaşık 1250 HV yüzey sertliği sağlanır [87].

Sverker 21 yüksek sıcaklık menevişinin ardından PVD, CVD gibi yeni yüzey işlem teknolojilerine uygun bir malzemedir. Bu kaplamalarla, sürtünme katsayısını düşürmek, aşınma dayanımını arttırmak mümkündür [89].

4.1.2. Toolox 44

4.1.2.1. Toolox 44 Malzeme Özellikleri

Toolox 44 yüksek darbe dayanımı gösteren, iyi boyutsal kararlılığa sahip temperlenmiş bir çeliktir. Yaklaşık 45 HRC sertlik değerinde teslim edilmesine rağmen talaşlı imalata uygundur. Toolox 44 yüksek sıcaklık değerinde yüksek mukavemet gösterebilmektedir. Bükme, sac şekillendirme ve döküm kalıpların da kullanılmaktadır [90].

4.1.2.2. Toolox 44 Kimyasal Bileşimi

Çizelge 4.7. Toolox 44 Malzeme Kimyasal Bileşimi [90].

MALZEME	Teslim Sertliği	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Ni
TOOLOX44	~45 HRC	0,32	0,6 - 1,1	0,80	max 0,01	max 0,003	1,35	0,80	0,14	max 1

4.1.2.3. Toolox 44 Uygulama Alanları

Toolox 44 malzemesi pek çok operasyonda pek çok farklı işlem için kullanılmaktadır. Bunlardan başlıcaları aşağıda belirtilmiştir [91].

- Çekme Test Cihazı Numune Tutma Çeneleri
- Mengene Ayakları
- Destek Plakası
- Sac Kesme Ve Şekil Verme Kalıpları Tutucusu
- Çelik Sac İmalatında Kasnak Haddeme Millerinde
- Çekme Test Makinesi Hidrolik Silindiri
- Dişli Çark
- Vinç Tekerleği
- Alüminyum Kesme Bıçakları
- İnce Saclarda Kesme ve Delme Zımbası (Nitrürasyon işlemi ile yüzey sertleştirme yapılarak)
- Aşınma Plakaları (Nitrürasyon işlemi ile yüzey sertleştirme yapılarak)

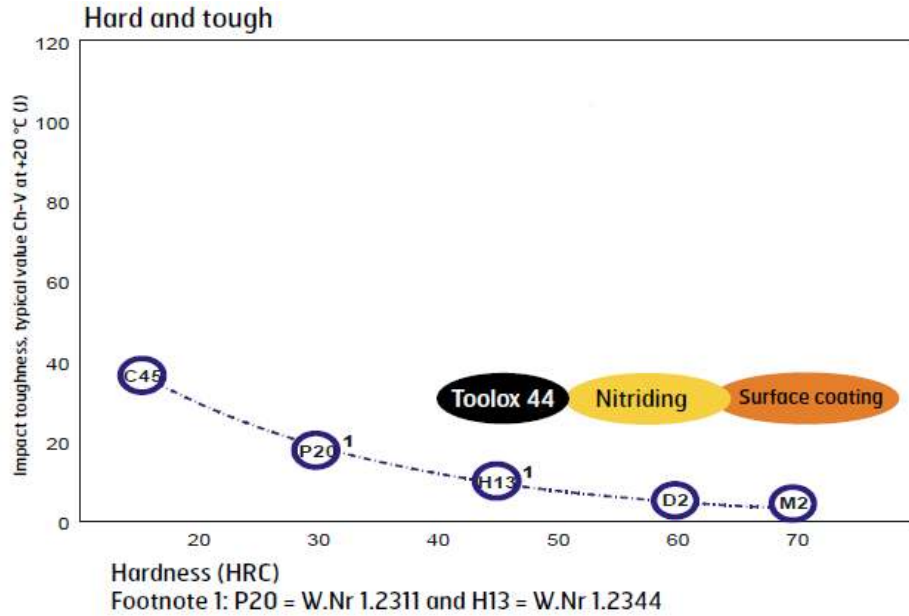
4.1.2.4. Toolox 44 Mekanik Özellikleri

Çizelge 4.8. Toolox 44 Malzeme Bazı Mekanik Özellikleri [90].

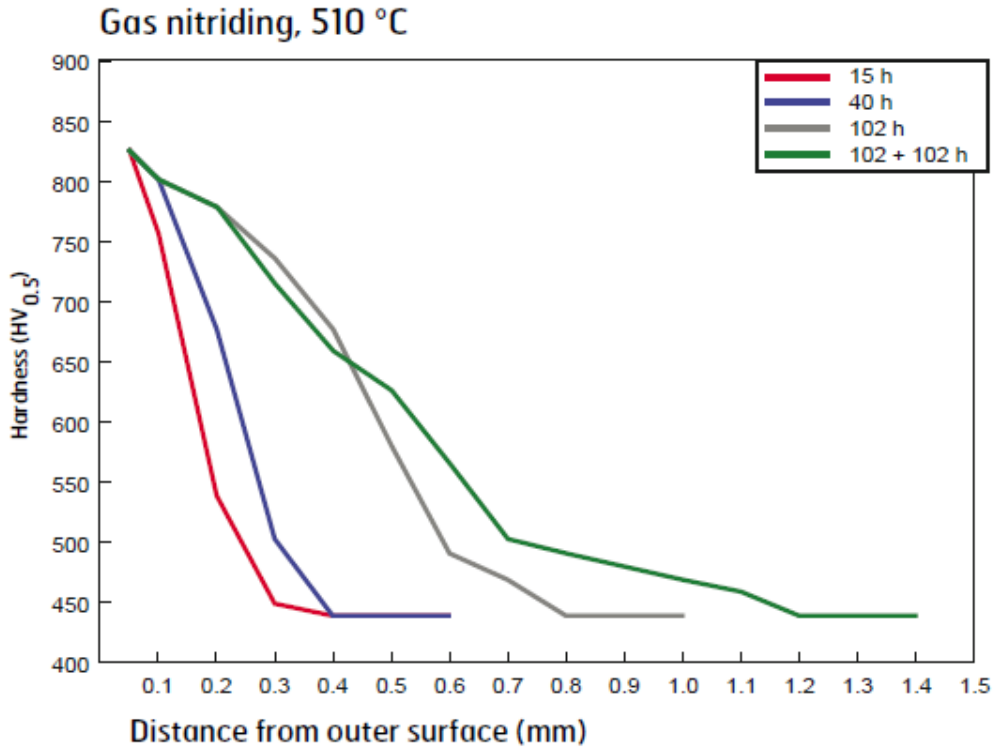
Sıcaklık (° C)	20	200	300	400
Çekme Dayanımı (MPa)	1450	1380		
Akma Dayanımı (MPa)	1300	1200		
Uzama (%)	13	10		
Darbe Tokluğu (J)	30	60	80	80
Sertlik (HRC)	45			

4.1.2.5. Toolox 44 Yüzey İşlemleri Özellikleri

Toolox 44 malzemesi teslim sertliği olan 45 HRC sertlik değerinde, tokluk özelliği ile ön plana çıkmış soğuk iş takım çeliklerinden çok daha yüksek tokluk enerjisine sahiptir. Fakat teslim sertliği değeri soğuk iş takım çeliklerine göre oldukça düşük bir değerdir. Bu noktada Toolox 44 malzemesinin nitrürasyon ve kaplama ile yüzeyinin sertleştirilerek, sürtünme katsayısının azaltılması ve aşınma dayanımının artırılabilmesi durumu gündeme gelmektedir.



Şekil 4.3. Toolox 44 Malzeme Nitrürasyon ve Kaplama Değerleri [90].



Şekil 4.4. Toolox 44 Malzeme Nitrürasyon Derinliği ve Sertlik Değerleri [91].

4.1.2.6. Toolox 44 Fiziksel Özellikleri

Çizelge 4.9. Toolox 44 Malzeme Fiziksel Özellikleri [92].

Sıcaklık (° C)	20	200
Isıl İletkenlik (W/m.K)	28	29
Termal Genleşme Katsayısı ($10^{-6}/K$)	13,5	13,5

4.2 Sertleştirme İşlemleri

4.2.1. Sverker 21 Deney Numunesi Sertleştirme İşlemleri

Sverker 21 malzemeler ASSAB ÇELİK ve ISIL İŞLEM SAN. ve TİC. A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Sırasıyla torna ve satıh taşlama aşamasından geçirilerek ısıtılma işlemine gönderilmeye hazırlanmıştır. Sverker 21 numuneler yine ASSAB ÇELİK ve ISIL İŞLEM SAN. ve TİC. A.Ş. firmasında Sverker 21 malzemesi için standart ısıtılma işlem şartlarında ısıtılma işlemine alınmıştır. Numuneler, Sistem Teknik marka VF-TE serisi ısıtılma işlem fırınlarında ısıtılma işlemine alınmıştır. Şekil 4.5. de sağ tarafta gösterilen ısıtılma işlem fırını numunelerin sertleştirme işleminin yapıldığı fırındır. Şekil 4.5. de gösterilen ısıtılma işlem fırını numunelerin menevişleme yapıldığı ısıtılma işlem fırınıdır.



Şekil 4.5. Sistem Teknik VF-TE Serisi Isıl İşlem Fırınları

Numunelerin ısıtılma işleminde ;

- 1030 ° C ye ısıtılıp, 35dakika östenitleme sıcaklığında bekletilmiştir.
- 4 bar basınçta azot verilerek hızlı soğutma işlemine tabi tutulmuştur.
- Numuneler su verme aşamasından sonra iki kere menevişleme işlemine tabi tutulmuştur. Birinci menevişleme işlemi, su verilen çelikteki kalıntı gerilmeleri gidermek, çeliğin sünekliğini ve tokluğunu arttırmak için 510 ° C ' de 3 saat bekleme ile ikinci menevişleme işlemi, istenilen sertlik değerine ulaşılabilmesi için menevişleme diyagramından istenilen sertlik değeri için belirtilen 550 ° C ' de 3 saat bekleme ile yapılmıştır. Birinci menevişleme işlemi çıkış sertliği 61 HRC iken İkinci menevişleme işlemi çıkış sertliği istenilen sertlik değeri olan 57 HRC olarak ölçülmüştür.

4.2.2. Toolox 44 Deney Numunesi Sertleştirme İşlemleri

Toolox 44 deney numuneleri VULCAK KALIP METAL GELİŞİM LTD. firmasından tedarik edilmiştir. Sırasıyla torna ve satıh taşlama aşamasından geçirilerek gaz nitrürasyon işlemine hazırlanmıştır. Toolox 44 numuneler nitrürasyon işlemi için yine VULCAN KALIP METAL GELİŞİM LTD. firmasında Toolox 44 malzemesi için standart nitrürasyon işlem şartlarında gaz nitrürasyon işlemine alınmıştır. Numuneler Sistem Teknik marka VF-2D-A serisi fırında gaz nitrürasyon işlemine alınmıştır. Şekil 4.6. da gaz nitrürasyon işleminde kullanılan ısıtım işlem fırını gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Sistem Teknik VF-2D-A Serisi Gaz Nitrürasyon İşlemi Fırını

Numuneler nitrürasyon işleminde;

- 350 ° C ye 30 dakikada hava ve azot bulunan ortamda ısıtılmaya başlanmıştır.
- 350 ° C de aynı ortamda 30 dakika bekletilmiştir.
- Ortamdaki basınç 0,05 bar değerine düşüncüye kadar vakum yapılmıştır. (Yaklaşık olarak 20 – 25 dakikaya tekabül etmektedir.)
- 350 ° C den 570 ° C ye 30 dakikada azot ve amonyak ortamında ısıtılmıştır.
- 570 ° C ' de azot, amonyak ve karbondioksit bulunan ortamda 240 dakika bekletilmiştir.
- Tüm gazlar kapatılıp, fırın azot ile soğutulmuştur. (Numunelerin soğutulması işlemi 90 dakikada tamamlanmıştır.)
- Sıcaklık 70 ° C ye geldiğinde numuneler fırından çıkarılmıştır.

4.3. Numunelerin Hazırlanması

Deneylerde 30 mm çapında, 10 mm ykseklinde silindirik numuneler kullanılmıştır.

Her iki grup deney numunesi de şekil 4.7. de gösterilmekte olan Metkon FORCIPOL 2V parlatma cihazında parlatma işlemine tabi tutulmuştur.



şekil 4.7. Metkon FORCIPOL 2V Parlatma Cihazı

Sverker 21 deney numuneleri, ısıl işlem sonrasında parlatma cihazında sırasıyla 180 – 320 – 600 – 1000 lik kum su zımparaları ile ve son olarak 1 m elmas solüsyon ile parlatma işlemine tabi tutulmuştur. R_a değeri 0,07 – 0,12 m olarak ölçülmüştür.

Toolox 44 deney numuneleri, nitrürasyon işlemi öncesinde, parlatma cihazında sırasıyla 180 – 320 – 600 – 1000 lik kum su zımparaları ile ve son olarak 1 m elmas solüsyon ile parlatma işlemine tabi tutulmuştur. R_a değeri 0,09 – 0,15 m olarak ölçülmüştür. Gaz nitrürasyon işleminden çıkan Toolox 44 deney numunelerinde nitrürasyon işlemi prosesi gereği oluşan ve gevrek bir yapıya sahip olan beyaz tabakanın çatlak başlangıcı oluşturabileceği düşünülerek 1000 lik kum su zımparası ve 1 m elmas solüsyon kullanılarak beyaz tabaka yüzeyden kaldırılmıştır.

4.4. PVD Kaplama İşlemi

4.4.1. Sverker 21 Deney Numunesi PVD Kaplama İşlemi

PVD yöntemiyle TiN/TiAlN kaplanmış olan Sverker 21 deney numunelerine sırasıyla aşağıda belirtilen işlemler belirtilen değerlerde uygulanmıştır.

- Kaplama işleminin yapıldığı fırına yerleştirilen numunelere vakum ve ısıtma, fırın basıncı 10^{-5} bar değerine düşene kadar uygulanmıştır.
- Bu aşamadan sonra argon gazı kullanılarak etching (dağlama) aşaması gerçekleştirilmiştir.
- Daha sonra öncelikle ortama azot gazı verilerek iyonize olan azot ile buhar elde edilmiştir.
- 300 A, 75 V değeri ile 450°C sıcaklıkta 110 dakika tutulan numuneler, bu aşama sonrasında içinden soğuk su gezdirilen borular yardımıyla 190°C sıcaklığa soğutulmuştur.

4.4.2. Toolox 44 Deney Numunesi PVD Kaplama İşlemi

PVD yöntemiyle TiAlN kaplanmış olan gaz nitrürasyon işlemi uygulanmış Toolox 44 deney numunelerine sırasıyla aşağıda belirtilen işlemler belirtilen değerlerde uygulanmıştır.

- Kaplama işleminin yapıldığı fırına yerleştirilen numunelere vakum ve ısıtma, fırın basıncı 10^{-5} bar değerine düşene kadar uygulanmaktadır.
- Bu aşamadan sonra argon gazı kullanılarak etching (dağlama) aşaması gerçekleştirilmiştir.
- Daha sonra öncelikle ortama azot gazı verilerek iyonize olan azot ile buhar elde edilmektedir.
- 300 A, 50 V değeri ile 450°C sıcaklıkta 98 dakika tutulan numuneler, bu aşama sonrasında içinden soğuk su gezdirilen borular yardımıyla 190°C sıcaklığa soğutulmuştur.

4.5. Aşınma Deneyleri

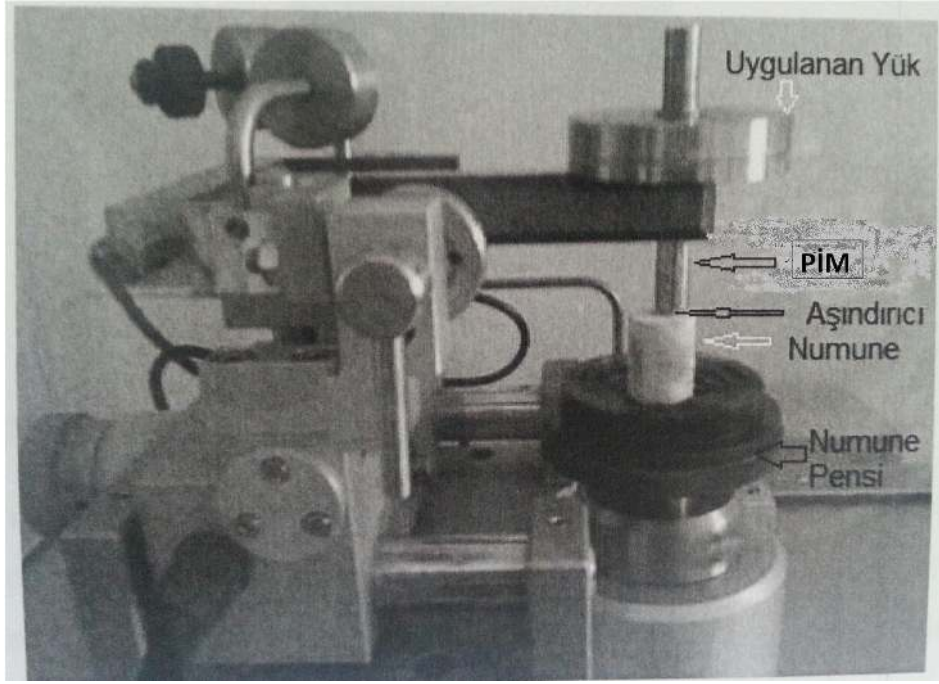
Tez çalışması kapsamında aşınma miktarlarının ve sürtünme katsayılarının ölçülmesi maksadıyla ball – on – disc aşınma deney düzeneği kullanılmıştır. Aşındırıcı olarak seramik bilye kullanılmıştır ve aşınan malzeme olarak numuneler 30 mm çapında 10 mm yüksekliğinde disk şeklinde hazırlanmıştır. Disk şeklindeki test numunelerine temas ettirilen bilye pime sabitlenmiştir ve pime farklı ağırlıklar eklenerek uygulanan dikey kuvvetin değiştirilmesi sağlanmaktadır. Bilyenin disk yüzeyine teması sonucunda disk parçasında oluşan malzeme kayıpları ölçülerek aşınma miktarları tespit edilmiştir.

Aşınma deneyleri oda koşullarında kuru sürtünme şartlarında yapılmıştır. Aşınma test cihazı olarak Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümündeki CSM Instruments TRIBOMETER 01 – 02808 cihazı kullanılmıştır. Aşınan numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri Celal Bayar Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümündeki Mitutoyo SJ – 301 pürüzlülük ölçüm cihazında yapılmıştır.

Aşınma deneylerinde, numuneler aşınma cihazının üzerine yerleştirilip sabitlendikten sonra, pimin içerisine 6mm çapında alüminyum oksit içerikli seramik bilye yerleştirilir ve sabitlenir. Pimin üzerine istenilen yük konularak pime sabitlenen seramik bilyenin numuneye baskı yapması sağlanır. Aşınma cihazı üzerine sabitlenen numunenin dönmeye başlamasıyla birlikte dairesel yörüngede aşınma izleri meydana gelir.

Aşınma deneyleri, numune tutucu döner tabla hızı $v = 0,4$ m/s değerinde iken pime 5 N' luk ve 10 N' luk normal yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi toplamda 3000 m yol boyunca uygulanmış ve 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m ve 3000 metredeki aşınan hacim miktarları kayıt altına alınmıştır. Aşınan hacim miktarları belirlenirken, ölçüm yapılan yol değerlerinde sistem durdurulduğunda, aşınma yolu pürüzlülük ölçümü gerçekleştirilmiştir. Pürüzlülük ölçümü sonucu elde edilen grafikte gerekli alan hesaplamaları yapılmış ve elde edilen alan değeri aşınma test cihazının elde etmiş olduğu programda yerine konularak aşınan hacim miktarı tespit edilmiştir.

Ball – on – disc test cihazında aşındırıcı olarak 6 mm çapında seramik bilye kullanılmıştır. Aşınma deneylerinde kullanılan seramik bilye, yüksek sertlik(~ 80 HRC) ve aşınma dayanımı özelliklerini gösteren Al_2O_3 tür.



Şekil 4.8. CSM Ball – on - Disc Aşınma Test Cihazı



Şekil 4.9. Mitutoyo SJ – 301 Pürüzlülük Ölçüm Cihazı

Ball – on – dics aşınma test cihazında 5 N ve 10 N yük değerleri ile oluşan aşınma sonrasında aşınma miktarları hesaplanan ve optik mikroskopta 50X ve 200X büyütme değerlerinde incelenmiş olan aşınma yolları Şekil 4.10. da görülmektedir.



Şekil 4.10. Aşınma Yolları

4.6. Optik Mikroskop Görüntüsü

Her iki grup deney numunelerinin aşınan kısımlarının mikroyapı incelemeleri Celal Bayar Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Bölümünün Laboratuvarında bulunan Nikon ECLIPSE LV100 model optik mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11. 'de Nikon ECLIPSE LV100 model optik mikroskobu görülmektedir.



Şekil 4.11. Nikon ECLIPSE LV100 Model Optik Mikroskobu

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Sertlik Ölçümü Sonuçları

Deney numuneleri için GÜHRING TAKIM SANAYİ ve TİCARET LTD.ŞTİ firması tarafından bildirilen sertlik değerleri alınmıştır. Bu doğrultuda TiN/TiAIN kaplama işlemi yapılmış olan Sverker 21 deney numuneleri 3300 HRV, gaz nitrürasyon işlemi uygulanmış TiAIN kaplama işlemi yapılmış Toolox 44 deney numuneleri 3200 HRV sertlik değerindedir.

5.2. Aşınma Deneyi Sonuçları

Dinamik sürtünme katsayısında meydana gelen dalgalanmanın nedeni, yük ile birlikte gerçek temas noktalarında oluşan bağın dayanımı nedeniyle sürtünme katsayısının yüksek değerlere çıkması ve oluşan bağın kopmasıyla birlikte sürtünme katsayısının düşük değerlere ulaşmasıdır. Sürtünme katsayısında meydana gelen dalgalanmalar ile birlikte her iki deney numunesinde de kendi içerisinde sabit kayma hızında, artan yük ile birlikte azda olsa artış gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak yükün artmasıyla statik sürtünme katsayısında olduğu gibi sistem durağan halde iken oluşan anlık soğuk basınç kaynağı, yükün daha az olduğu şartlara göre, sıcaklığında artışı ile daha iyi oluşmaktadır. Yani sürtünme açıklanan nedenlerden dolayı fazlaşmış ve sürtünme katsayısının yükselmesine neden olmuştur.

Sabit kayma hızı değerlerinde ve her iki yükleme durumu içinde, TiN/TiAIN kaplanmış Sverker 21 deney numunelerinin, gaz nitrürasyon yapılmış ve TiAIN kaplanmış Toolox 44 deney numunelerinden çok azda olsa daha yüksek sürtünme katsayısı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum ilk olarak yüksek bir aşınma direncine sahip bir kaplamanın daha düşük bir sürtünme katsayısı göstermesi gerekliliğini düşündürse de sürtünme katsayısı ve aşınma direnci birbiriyle karıştırılmamalıdır. Sürtünme katsayısı aşındırıcı eleman ile aşınan yüzeyin etkileşimine bağlı olarak gerçek temas noktalarında meydana gelen bağ ve soğuk basınç kaynağı ile ilişkili iken, aşınma direnci ise malzemenin yada sistemin gerçek temas noktalarında meydana gelen bağ ve soğuk basınç kaynaklarının oluşup kopması sıklığına gösterdiği dayanım ile ilişkilidir. Diğer bir deyişle tribo sistemdeki tüm etkileşimlere bağlıdır.

TiN/TiAIN kaplanmış Sverker 21 deney numunelerinde 5N yük için sürtünme katsayısı – yol grafiği incelendiğinde, yaklaşık 100 m yol değerine kadar sürtünme katsayısında artış meydana gelmektedir. 100 metre yol değerinden sonra ise sürtünme katsayısı değeri 0,7 – 0,8 arasında değişim göstermektedir.

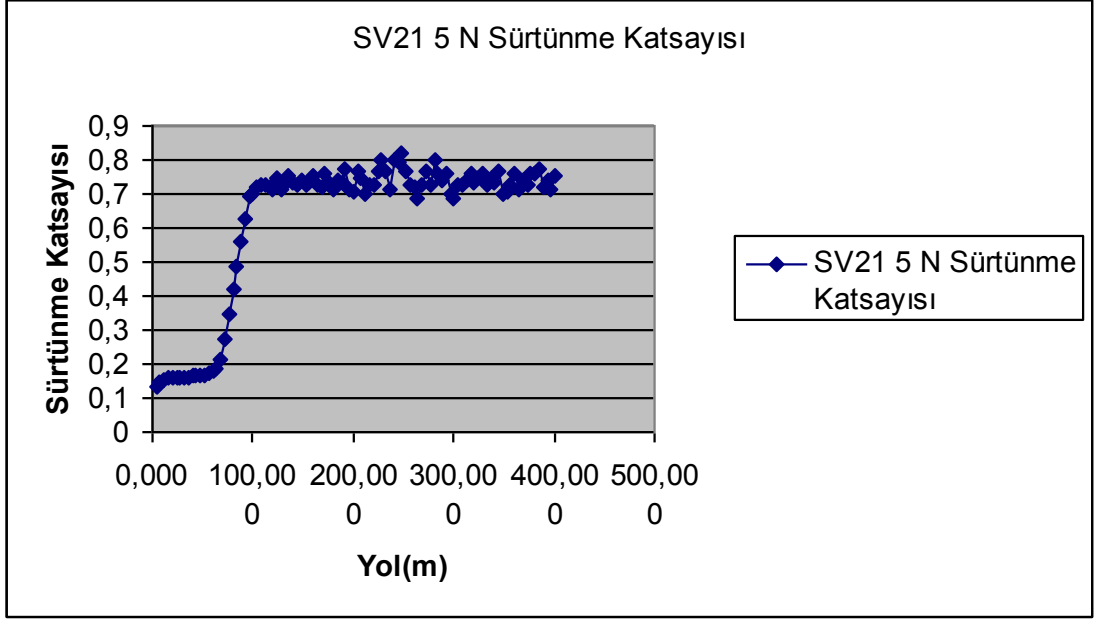
TiN/TiAIN kaplanmış Sverker 21 deney numunelerinde 10N yük için sürtünme katsayısı – yol grafiği incelendiğinde, yaklaşık 200 m yol değerine kadar sürtünme katsayısında artış

meydana gelmektedir. 200 metre yol değerinden sonra ise sürtünme katsayısı değeri 0,8 değeri üzerinde değişim göstermektedir.

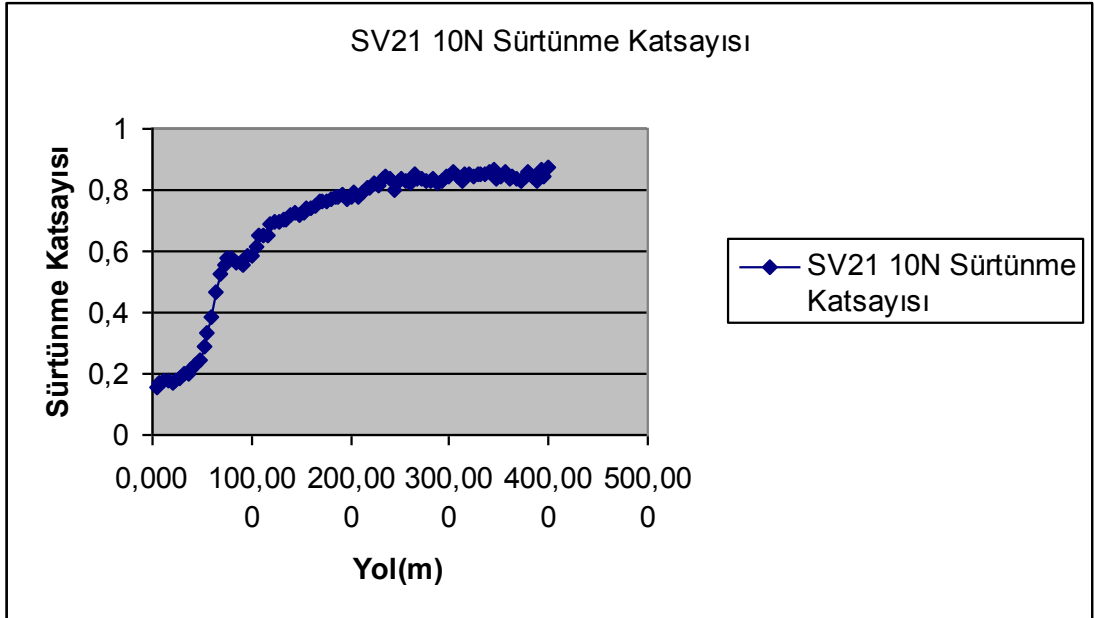
Gaz nitürasyon işlemi yapılmış TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunelerinde 5N yük için sürtünme katsayısı – yol grafiği incelendiğinde, yaklaşık 110 m yol değerine kadar sürtünme katsayısında artış meydana gelmektedir. 110 metrede sürtünme katsayısı yaklaşık 0,7 değerindedir. 110 metre yol değerinden sonra 260 metre yol değerine artış ve azalış şeklinde değişimler göstererek 260 metre de tekrar yaklaşık olarak 0,7 sürtünme katsayısı değerini yakalamıştır. 260 metre yol değerinden sonra yaklaşık 0,7 sürtünme katsayısı değerinde küçük aralıklarla değişim göstermektedir.

Gaz nitürasyon işlemi yapılmış TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunelerinde 10N yük için sürtünme katsayısı – yol grafiği incelendiğinde, yaklaşık 75 m yol değerine kadar sürtünme katsayısı artış göstermektedir. 75 metre yol değerinde sürtünme katsayısı yaklaşık olarak 0,6 değerindedir. Sürtünme katsayısı değeri 75 metreden 250 metreye kadar farklı değişimler sonucunda 0,74 değerine yükselmiştir. 250 metre yol değerinden sonra sürtünme katsayısı 0,7 – 0,8 değeri arasında değişim göstermektedir.

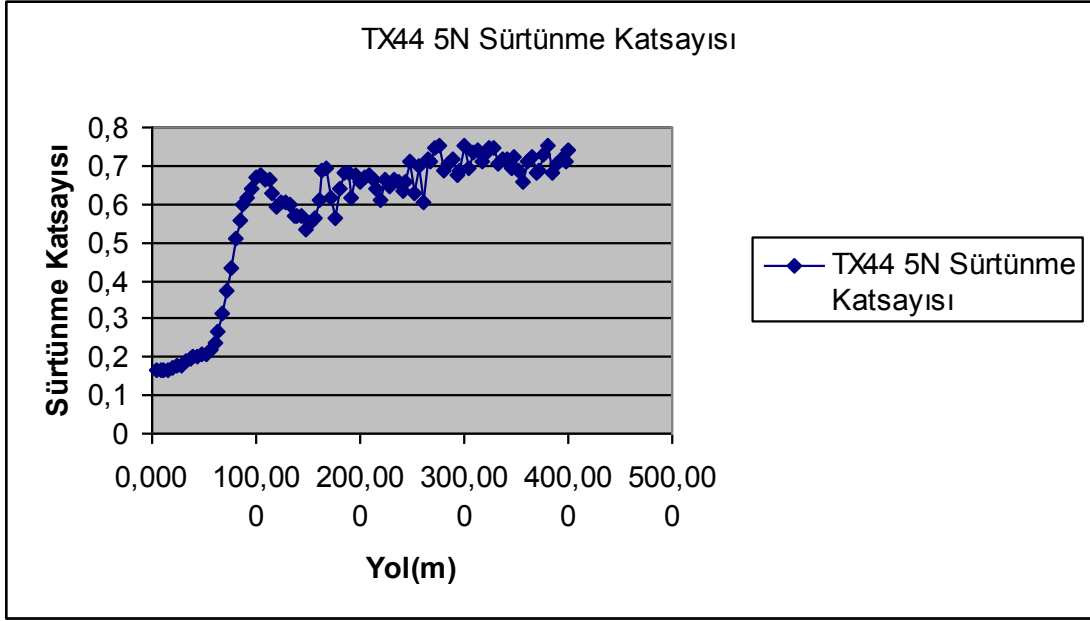
Her iki aşınma deney numune grubu için, 5 N ve 10 N yük değerlerinde sürtünme katsayısı – yol grafiği incelendiğinde yaklaşık 100 – 150 metre yol değerine kadar sürtünme katsayısında artış meydana geldiği görülmektedir. Bu artışın sebebi zamanla gelişen aşınma sisteminde rodaj (başlangıç aşınması) safhasının ilk 100 – 150 metrelik yol değerinde gerçekleşmiş olmasıdır.



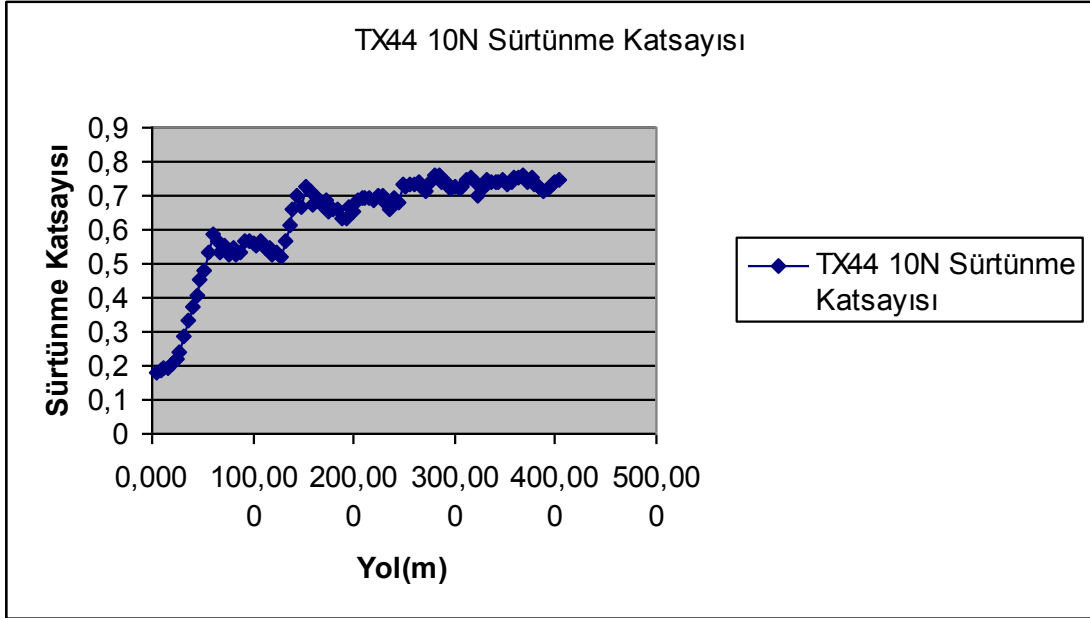
Şekil 5.1. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 5 N Yük Sürtünme Katsayısı Değişimi.



Şekil 5.2. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 10 N Yük Sürtünme Katsayısı Değişimi.



Şekil 5.3. Gaz Nitrürasyon Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 5 N Yük Sürtünme Katsayısı Değişimi.



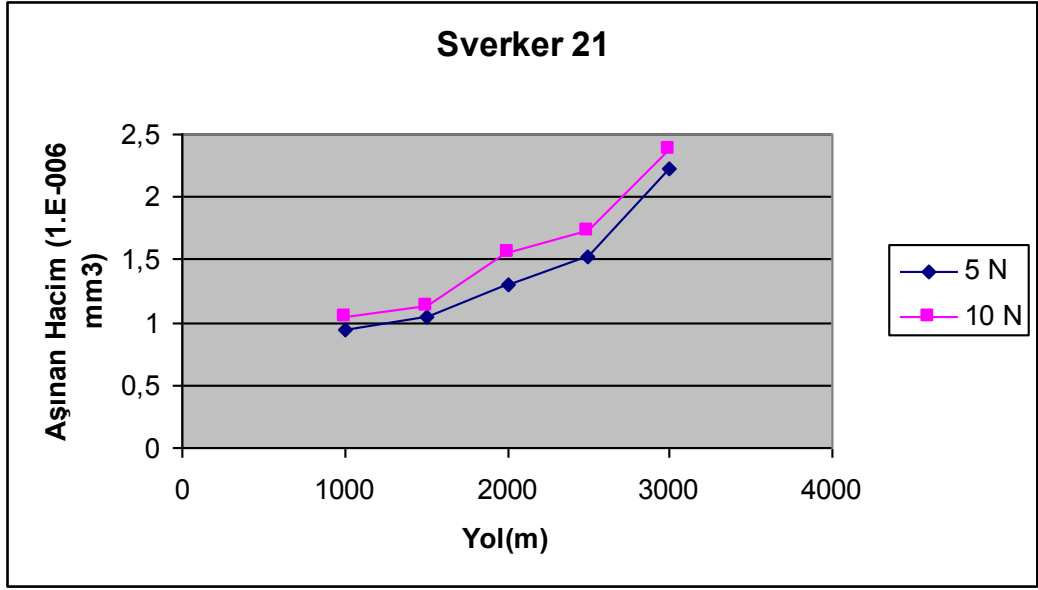
Şekil 5.4. Gaz Nitrürasyon Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 10 N Yük Sürtünme Katsayısı Değişimi.

Gaz nitrürasyon işlemi yapılmış ve TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunesi ile TiN/TiAlN kaplanmış Sverker 21 deney numuneleri çok yüksek sertlik değerlerine sahip olmasından dolayı aşınma deneyleri sonrasında yapılan ölçümlerle belirlenen hacim kaybı değerlerinin çok düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir. İki deney grubu numunesi için toplamda 5 N ve 10 N yükleme için 10 adet veri kayıt edilmiştir. Elde edilen veriler her iki numune grubu içinde yol 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m, 3000 metrede iken kayıt altına alınan verilerdir. Maximum hacim kaybı değeri $2,568 * 10^{-6} \text{ mm}^3$ ve minimum hacim kaybı değeri $0,9368 * 10^{-6} \text{ mm}^3$ olarak tespit edilmiştir. Minimum hacim kaybı TiN/TiAlN kaplanmış Sverker 21 deney numunesinde 5 N yükleme ile yol 1000 metrede iken, maximum hacim kaybı gaz nitrürasyon işlemi yapılmış TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunesinde 10 N yükleme ile yol 3000 metrede iken tespit edilmiştir.

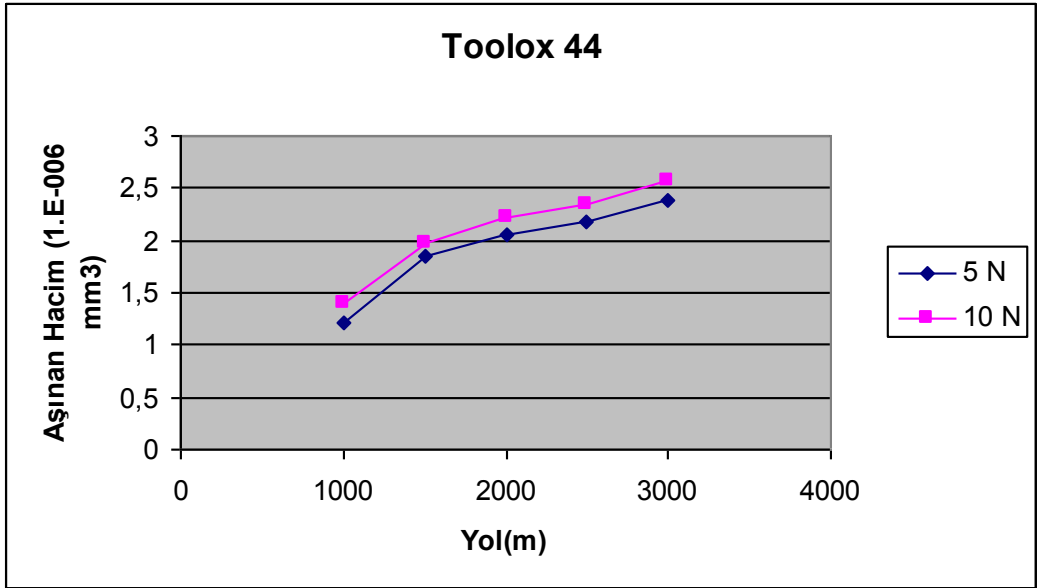
Şekil 5.5. ve Şekil 5.6. de görüldüğü gibi her iki numune grubu içinde sabit kayma hızı şartlarında yük arttıkça aşınan hacim miktarının aynı yol değerinde arttığı tespit edilmiştir. Aşınan hacim miktarındaki artış miktarı, iki numune grubu içinde farklı değişimler göstererek gerçekleşmiştir. Aynı kayma hızı ve yol değerinde, TiN/TiAlN kaplanmış Sverker 21 deney numunelerinin hacim kaybı değerlerinin, gaz nitrürasyon yapılmış TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunelerinin hacim kaybı değerlerinden daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu da, TiN/TiAlN kaplanmış Sverker 21 deney numunelerinin daha yüksek bir aşınma direncine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Gaz nitrürasyon yapılmış ve TiAlN kaplanmış olan Toolox 44 deney numunelerine kaplama öncesinde gaz nitrürasyon işlemi yapılarak oluşturulan, yaklaşık 300 mikron(0,3 mm) kalınlığında ve yaklaşık 65 HRC sertlik değerinde olan bileşke tabakası ile düzgün bir sertlik gradyanı dağılımının elde edilmesi, daha iyi bir tutunma sağlanması ve kaplamada oluşan yumurta etkisini azaltarak daha az maliyetle, aşınma direnci daha yüksek olan numunelerin elde edilmesi istenmiştir.

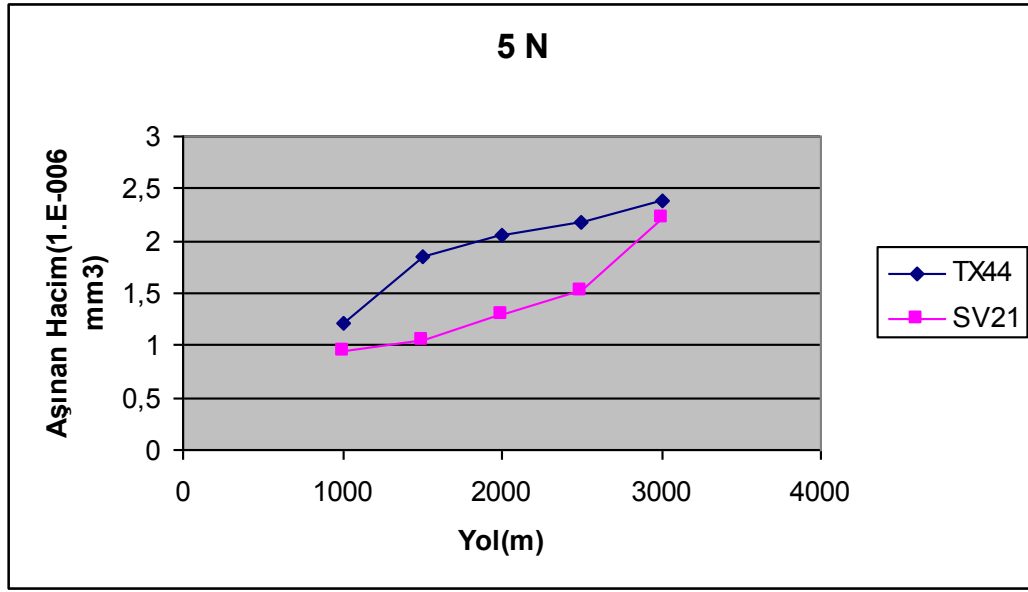
Gaz nitrürasyon işlemi yapılmadan PVD yöntemiyle TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numuneleri ile gaz nitrürasyon işlemi yapılmış ve PVD yöntemiyle TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunelerinin mukayese edilmesine gerek görülmemiştir. Çünkü literatürde yapılan çalışmaların tamamında nitrürasyon işlemi yapılan malzemelerde nitrürasyon işlemi sonucu elde edilen ve malzemenin çekirdek sertliğine göre daha sert olan yüzey kaplamanın yüzeye tutunmasına olumlu etki yarattığı ve aşınma direncini arttırdığı gözlemlenmiş bir sonuçtur [2].



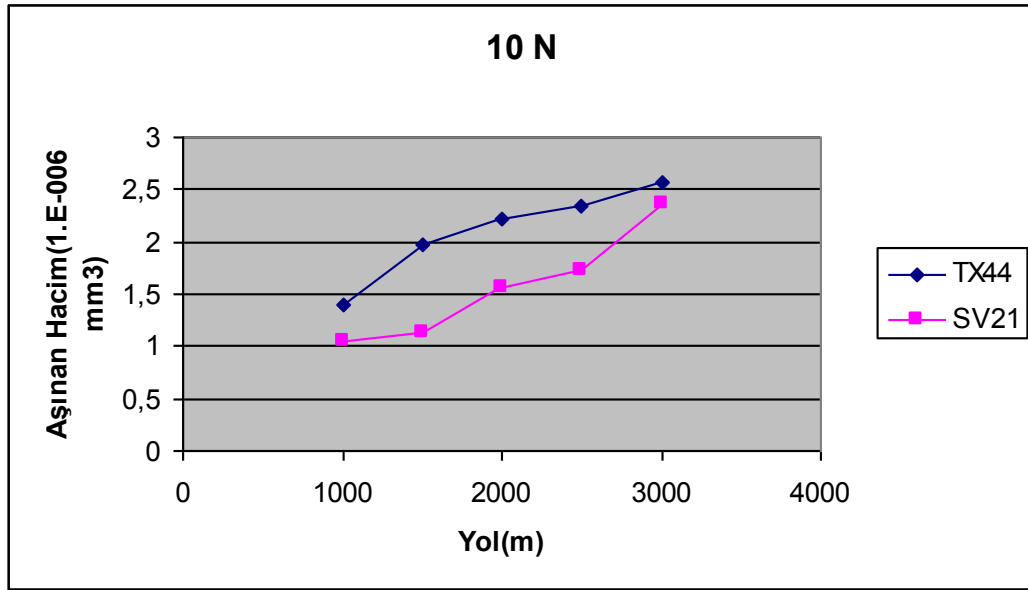
Şekil 5.5. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 Aşınan Hacim Miktarları



Şekil 5.6. Gaz Nitrürasyon Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 Aşınan Hacim Miktarları



Şekil 5.7. 5 N Yük Aşınan Hacim Miktarları.



Şekil 5.8. 10 N Yük Aşınan Hacim Miktarları.

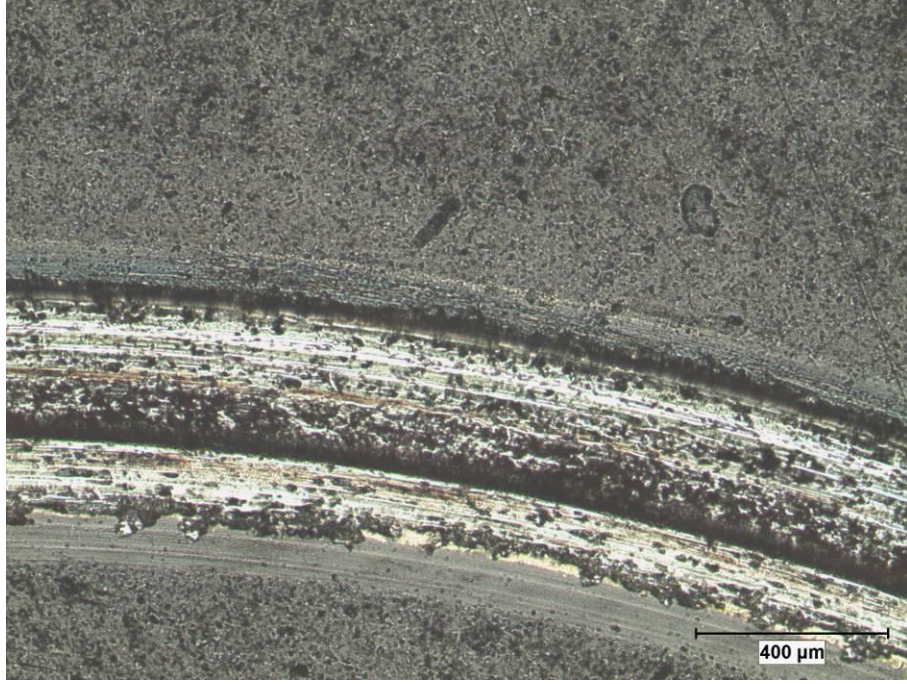
5.3. Optik Mikroskop Görüntüsü Sonuçları

Aşınma deneylerinde uygulanan yük neticesinde, kaplama yüzeylerinde yüke bağlı olarak plastik deformasyon, abrasif çizik ve aşınma izleri oluştuğu gözükmemektedir.

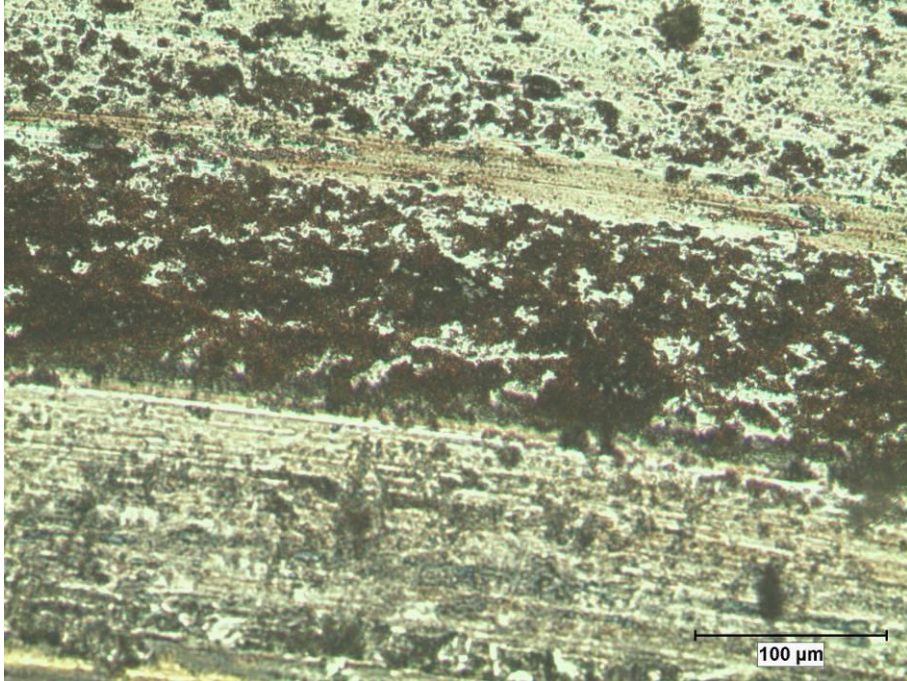
Optik mikroskop görüntülerinin 50X ve 200X görüntüleri incelendiğinde gaz nitrürasyon yapılmış ve TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunelerindeki abrasif çiziklerin, TiN/TiAlN kaplanmış Sverker 21 deney numunelerindeki abrasif çiziklerden daha geniş olduğu görülmektedir. Buda, ball – on – disk aşınma testi sonucunda ölçümü yapılan kaybedilen hacim miktarları neticesinde ulaşılan sonuçlarında gösterdiği gibi TiN/TiAlN kaplanmış Sverker 21 deney numunelerinin, gaz nitrürasyon yapılmış ve TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunelerine göre aşınma dayanımının daha iyi olduğu sonucunu desteklemektedir.

Optik mikroskop görüntülerinde özellikle yükün 10N değerine artırılmasıyla elde edilmiş olan aşınma yollarında gözlemlenen siyah bölgeler aşağıda belirtilen sebeplerden kaynaklanabilir ;

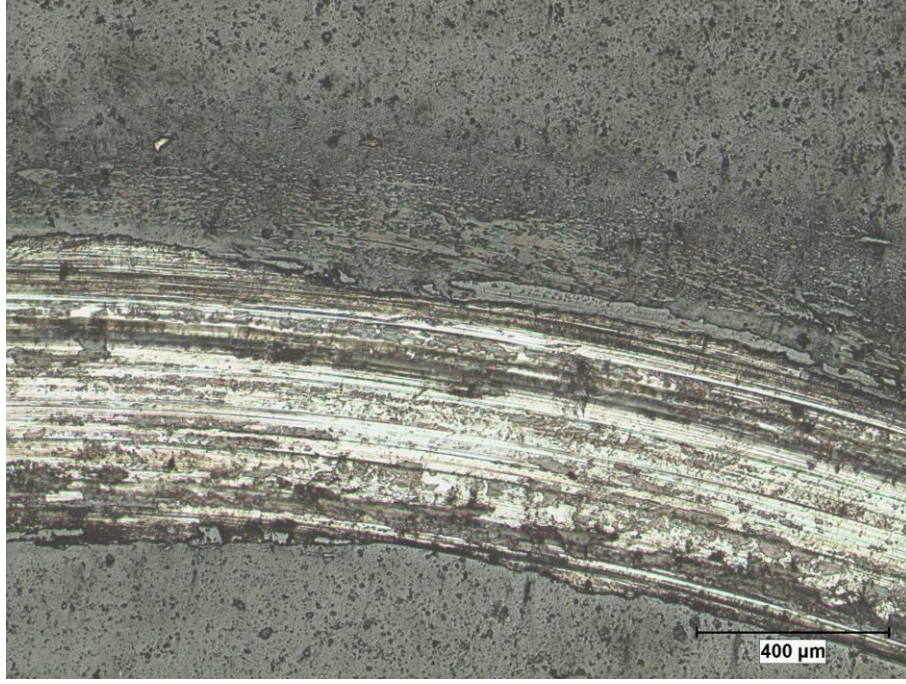
1. Optik mikroskopta özellikle yükün 10 N değerine yükseltilmesiyle oluşan aşınma yollarında gözlemlenen siyah bölgeler, yük artışı ile birlikte genişleyen abrasif çiziklere aşındırıcı seramik bilyeye ait mikro partiküllerin sıcaklığın ve yükün etkisiyle yapışmış olmasından kaynaklanabilir.
2. Deney numunelerinde optik mikroskop ile aşınma yollarının görüntülenmesi işleminde, ultrasonik banyo ile temizleme işleminin yapılmış olmasına rağmen, görüntülemenin yapılmış olduğu aşınma yolu bölgelerinde yabancı maddeler kalmış olabilir.
3. Yükün artmasıyla birlikte genişleyen abrasif çizikler üzerinde, malzemenin mikro seviyede kopmasıyla açılan mikro çukurlar bu bölgelerin optik mikroskop altında siyah görünmesine neden olmuş olabilir.



Şekil 5.9. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 Deney Numunelerinin 5 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (50X)



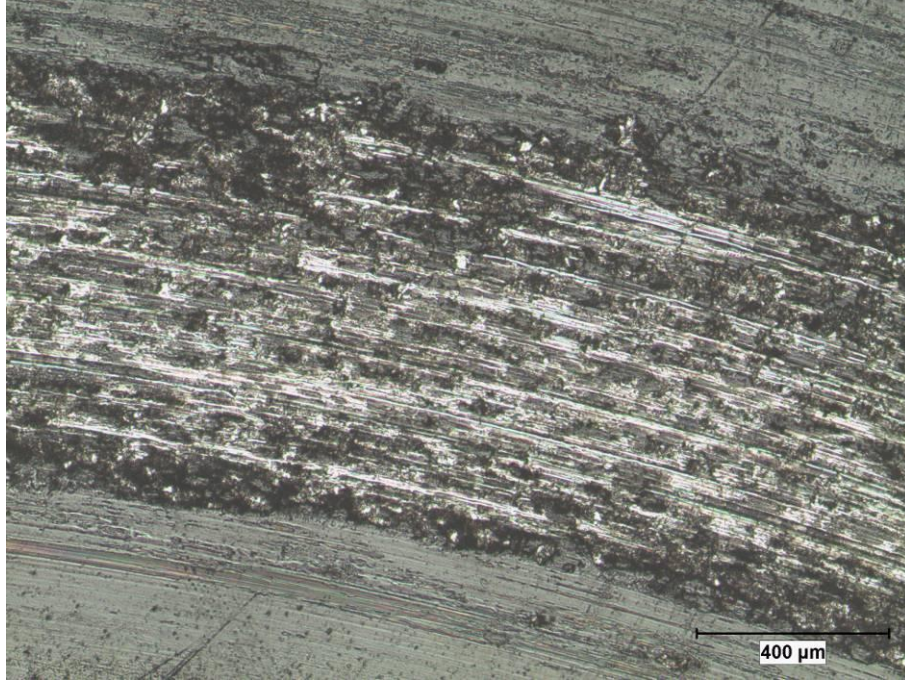
Şekil 5.10. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 Deney Numunelerinin 5 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (200X)



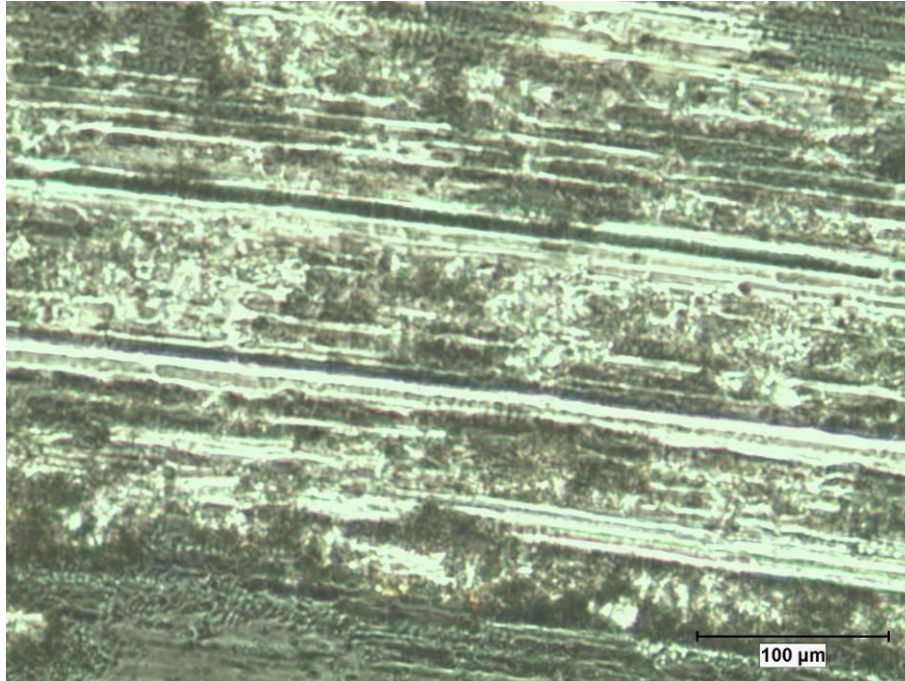
Şekil 5.11. Gaz Nitrürasyon İşlemi Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 Deney Numunelerinin 5 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (50X)



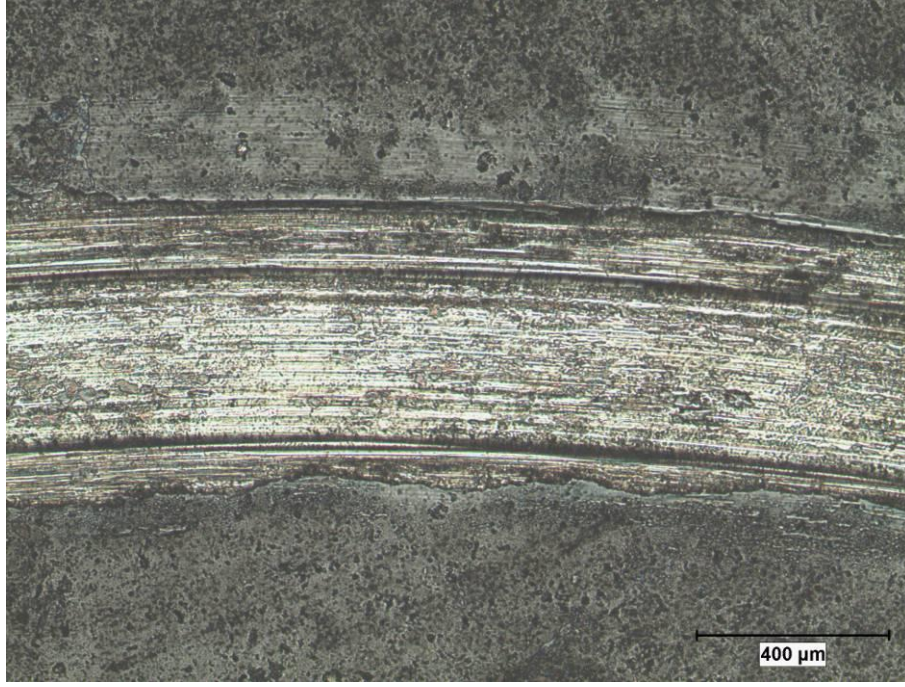
Şekil 5.12. Gaz Nitrürasyon İşlemi Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 Deney Numunelerinin 5 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (200X)



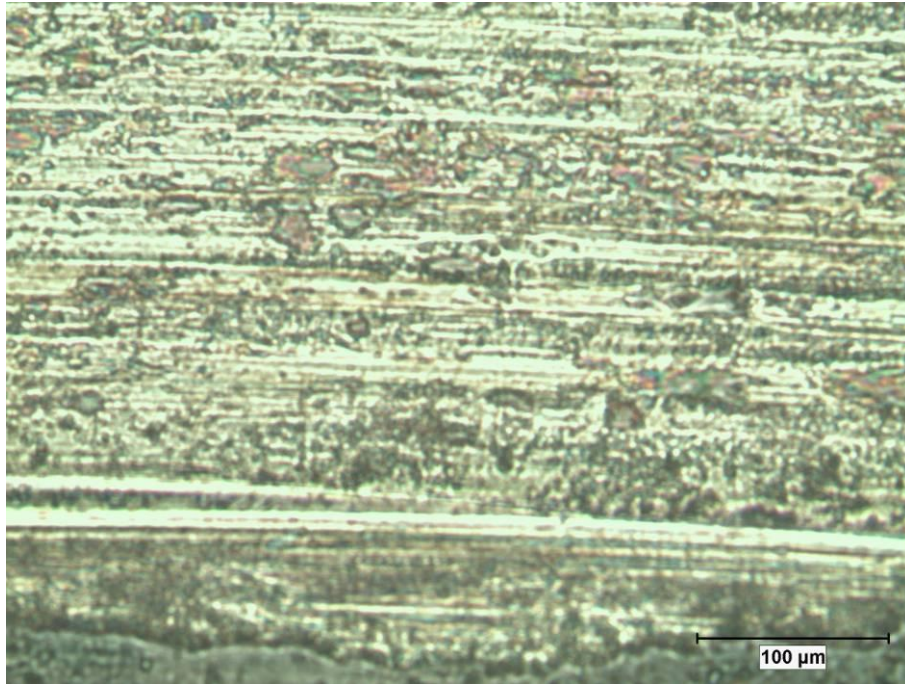
Şekil 5.13. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 Deney Numunelerinin 10 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (50X)



Şekil 5.14. TiN/TiAlN Kaplanmış Sverker 21 Deney Numunelerinin 10 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (200X)



Şekil 5.15. Gaz Nitrürasyon İşlemi Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 Deney Numunelerinin 10 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (50X)



Şekil 5.16. Gaz Nitrürasyon İşlemi Yapılmış TiAlN Kaplanmış Toolox 44 Deney Numunelerinin 10 N Yük Altında Oluşan Aşınma Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüsü (200X)

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Sonuçlar

TiN/TiAlN kaplanmış Sverker 21 deney numuneleri ile gaz nitrürasyon yapılmış TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunelerinin, kuru sürtünme ve oda sıcaklığı çalışma şartlarında, sabit hız ve değişken yüklerde yapılan deney sonuçlarında elde edilen verilerden çıkarılan sonuçlar ve yorumlar şu şekilde özetlenebilir.

1. PVD yöntemiyle Sverker 21 deney numunesinde TiN/TiAlN, gaz nitrürasyon yapılmış Toolox 44 deney numunesinde TiAlN kaplama başarıyla uygulanabilmektedir.
2. TiAlN ve TiN/TiAlN kaplamalarının çok yüksek sertlik değerlerine sahip olmasından dolayı aşınma deneyleri sonrasında yapılan ölçümlerle belirlenen hacim kaybı değerlerinin çok düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir.
3. Maximum hacim kaybı değeri $2,568 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3$ ve minimum hacim kaybı değeri $0,9368 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3$ olarak tespit edilmiştir. Minimum hacim kaybı TiN/TiAlN kaplanmış Sverker 21 deney numunesinde 5 N yükleme ile yol 1000 metrede iken, maximum hacim kaybı gaz nitrürasyon işlemi yapılmış TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunesinde 10 N yükleme ile yol 3000 metrede iken tespit edilmiştir.
4. Her iki numune grubu içinde sabit kayma hızı şartlarında yük arttıkça aşınan hacim miktarının aynı yol değerinde arttığı tespit edilmiştir. Aynı kayma hızı ve yol değerinde, TiN/TiAlN kaplanmış Sverker 21 deney numunelerinin hacim kaybı değerlerinin, gaz nitrürasyon yapılmış ve TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunelerinin hacim kaybı değerlerinden daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu da, TiN/TiAlN kaplanmış Sverker 21 deney numunelerinin daha yüksek bir aşınma direncine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.
5. Kaplama tabakasının sertliği, malzemenin kendi sertliğine göre oldukça fazladır. Toolox 44 deney numunesi yüzey sertliği yaklaşık 45 HRC dir. Bu numuneye uygulanan TiAlN kaplamanın sertliği ise yaklaşık 3200 HRV dir. Gözükteği gibi yüzeyden merkeze sertlik değişimi çok büyüktür. Bu olay kaplamanın ömrüne olumsuz etki yapmaktadır. Bu etkiyi azaltmak için kaplama ile ana malzeme arasına, ana malzemeye göre daha sert olan bir yapı elde edilmesi amacıyla kaplamadan önce gaz nitrürasyon işlemi ile yaklaşık 300 mikron kalınlığa ve 65 HRC sertliğe sahip bir bileşke tabakası oluşturulmuştur.
6. Sabit kayma hızı değerlerinde ve her iki yükleme durumu içinde, TiN/TiAlN kaplanmış Sverker 21 deney numunelerinin, gaz nitrürasyon işlemi yapılmış ve TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunelerinden çok azda olsa daha yüksek sürtünme katsayısı gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca aynı numune grubunda yük arttıkça sürtünme

katsayısının da çok azda olsa arttığı gözlenmektedir. Bunun nedeni olarak yükün artmasıyla statik sürtünme katsayısında olduğu gibi sistem durağan halde iken oluşan anlık soğuk basınç kaynağı, yükün daha az olduğu şartlara göre, daha çok oluşmaktadır. Bu durumda sürtünme katsayısında artışa neden olmaktadır.

7. Her iki aşınma deney numune grubu için, 5 N ve 10 N yük değerlerinde sürtünme katsayısı – yol grafiği incelendiğinde yaklaşık 100 – 150 metre yol değerine kadar sürtünme katsayısında artış meydana geldiği görülmektedir. Bu artışın sebebi zamanla gelişen aşınma sisteminde rodaj (başlangıç aşınması) safhasının ilk 100 – 150 metrelik yol değerinde gerçekleşmiş olmasıdır.
8. Sverker 21 deney numunelerinde 5N yük için sürtünme katsayısı – yol grafiği incelendiğinde, yaklaşık 100 m yol değerine kadar sürtünme katsayısında artış meydana gelmektedir. 100 metre yol değerinden sonra ise sürtünme katsayısı değeri 0,7 – 0,8 arasında değişim göstermektedir.
9. Sverker 21 deney numunelerinde 10N yük için sürtünme katsayısı – yol grafiği incelendiğinde, yaklaşık 200 m yol değerine kadar sürtünme katsayısında artış meydana gelmektedir. 200 metre yol değerinden sonra ise sürtünme katsayısı değeri 0,8 değeri üzerinde değişim göstermektedir.
10. Gaz nitrürasyon işlemi yapılmış TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunelerinde 5N yük için sürtünme katsayısı – yol grafiği incelendiğinde, yaklaşık 110 m yol değerine kadar sürtünme katsayısında artış meydana gelmektedir. 110 metreden 260 metre yol değerine kadar sürtünme katsayısı artış ve azalış şeklinde değişimler göstererek gelmiştir. 260 metre yol değerinden sonra yaklaşık 0,7 sürtünme katsayısı değerinde küçük aralıklarla değişim göstermektedir.
11. Gaz nitrürasyon işlemi yapılmış TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunelerinde 10N yük için sürtünme katsayısı – yol grafiği incelendiğinde, yaklaşık 75 m yol değerine kadar sürtünme katsayısı artış göstermektedir. 75 metreden 250 metre yol değerine kadar sürtünme katsayısı artış ve azalış şeklinde değişimler göstererek gelmiştir. 250 metre yol değerinden sonra sürtünme katsayısı 0,7 – 0,8 değeri arasında değişim göstermektedir.

Öneriler

Bu çalışmada, Sverker 21 malzeme üzerine TiN/TiAlN kaplanmış numunelerdeki ve gaz nitürasyon yapılmış Toolox 44 malzemeye TiAlN kaplanmış numunelerdeki yola ve yüke bağlı olarak aşınan hacim miktarları elde edilmiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda kısmen de olsa daha iyi aşınma direnci gösteren Sverker 21 malzeme için çok daha iyi bir sertlik gradyanı oluşturulup oluşturulamayacağı hususunda inceleme yapılabilir. Özellikle daha iyi bir sertlik gradyanı oluşturma yöntemi olarak düşünülen nitürleme işlemi için deneysel çalışmalar yapılabilir.

Bu çalışma bundan sonra yapılacak olan kaplama ile ilgili çalışmalarda özellikle dubleks yüzey işlemlerinin uygulanabilmesi hususunda fikir verici bir kaynak olarak kullanılabilir.

Bu çalışmada kullanılan kaplama parametreleri ve süreleri ile ilgili deneysel çalışmalar yapılarak kaplama kalınlıklarında ve tutunma özelliklerinde optimum olan değerlerin yakalanabilmesi ile endüstride kullanılabilme üzere çok daha ucuz maliyetli ve aşınma direnci çok daha yüksek olan kaplama yada ısıtım şartları belirlenebilir.

Aynı çalışma Toolox 44 malzemeye plazma nitürasyon işlemi yapılarak da uygulanabilir. Plazma nitürasyon işlemi sonucunda oluşacak bileşke tabaka aşınma dayanımında artış sağlayabilir.

Her ne kadar TiN/TiAlN kaplanmış Sverker 21 deney numunelerinin aşınma dayanımı gaz nitürasyon yapılmış ve TiAlN kaplanmış Toolox 44 deney numunelerine göre nispeten de olsa daha iyi aşınma dayanımı gösterse de endüstride maliyet ve temin süresi hususu dikkate alındığında gaz nitürasyon yapılmış ve TiAlN kaplanmış deney numuneleri tercih sebebi olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Keleşoğlu Ergün, Sert Kaplamalar Üretim Teknikleri ve Özellikleri, İstanbul 2011, 31-70.
- [2] Şafak Emrah H., Yüzeyi PVD Yöntemiyle Kaplanmış Metallerde Tribolojik Özelliklerin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bornova – İzmir 2008.
- [3] Işık Yahya, Çakır Cemal M., Kaplamasız ve CVD Kaplamalı Kesici Takımların Aşınma Davranışları ve Performanslarının Deneysel Olarak İncelenmesi, Makine Tasarım ve İmalat Teknolojileri Kongresi Bildiriler Kitabı, 2001 Mmo Yayın No: E/2001/279, Konya.
- [4] Çınar Oğuz, TiAlN, TiN Tek ve Çok Katlı Kaplamaların Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul 1998.
- [5] Akkaş O., TiN Kaplama Parametrelerinin Aşınma Davranışı Üzerindeki Etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul 1998.
- [6] Kalkan Nusrettin, PVD Yöntemi ile TiN, CrN ve TiN/CrN Kaplanmış Soğuk İş Takım Çeliğinin aşınma Performanslarının Deneysel İncelenmesi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [7] Kothari D. C., Kale A. N., Recent Trends in Surface Engineering Using Cathodic Arc Technique, Surface and Coatings Technology, 158-159, 174-176, 2002.
- [8] Aihua Liu, Jianxin Deng, Haibing Cui, Yangyang Chen, Jun Zhao, Friction and Wear Properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD Nitride Coatings, Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials 31 (2012) 82–88.
- [9] Leu M. S., Chen B. F., Chen S. Y., The Influence of Magnetic Solenoid Filtration on the Property of (Ti-Al)N Coatings Deposited In A Cathodic Arc Deposition System, Surface and Coatings Technology, 148, 25-29, 2001.
- [10] Kaya A. U., PVD Kaplama Tekniğiyle Hazırlanan TiN İnce Filmelerinin Temel Karakteristiklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Koceli Üniversitesi, Koceli 1998.
- [11] Cheng Y. H., Tay B. K., Development of Texture in TiN Films Deposited by Filtered Cathodic Vacuum Arc, Journal of CryStal, 252, 257-264, 2003.
- [12] Karagöz, H., Kesici Takım Malzemelerinde PVD/CVD Tipi modern Seramik Katmanların Takım Ömrüne Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Ün., Fen Bil. Ens., Kocaeli 1994.
- [13] Park, W. and Kim, K.H., Coatings material of TiN, TiAlN and TiSiN by plasma enhanced chemical vapour deposition for mechanical applications, Journal Of Material Processing Technology, 130: 254-259 1998.

- [14] Gökkaya, H., Sur, G., Dilipak H., PVD ve CVD Kaplamalı Sementit Karbür Kesici Takımların İşleme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Teknoloji Dergisi, Cilt 7, Sayı 3, 473-478, 2004.
- [15] Ranea. C., Wear resistance of thin coatings based on titanium, Balkanrib, Kayseri, 783-788 2002.
- [16] Janoss, B., PVD/CVD coatings enhance Stamping &forming of stainless steels, MultiArc incNJ, 42: 1-9, 2003.
- [17] J.D. Bressan, R.Hesse, E.M.Silva, Jr., Abrasive Wear Behavior of High Speed Steel and Hard Metal Coated With TiAlN and TiCN, Wear, Volume 250, P: 561-568, Brazil 2001.
- [18] Öztürk U., AISI 3343 Çeliği Kalıp Zimbalarının PVD Tekniğiyle TiN ve CrN Kaplayarak Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Mart 2010.
- [19] Tokmanoğlu, K., 1992, PVD - ARK Teknik ile Yapılan Kaplamalarının Özellikleri ve Üretim Üzerindeki Katkıları, Makine ve Metal Teknolojisi.
- [20] www.pvd-coatings.co.uk/theory-of-pvd-coatings-arc-evaporation.htm, 2006.
- [21] Vikipedi, Triboloji, <http://tr.wikipedia.org/wiki/triboloji#s.c3.bcr.t.c3.bcnme>, Aralık 2008.
- [22] Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W., Engineering Tribology, Butterworth Heinemann, Australia 2001.
- [23] Atik E., Triboloji Ders Notları, Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa 2006
- [24] Demirci A. H., Teknik Kuru Sürtünmeli Bir Aşınma Deney Düzeneği Tasarım ve İmalatı, Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendis ve Makine Dergisi Cilt 29, Sayı 330, Temmuz 1987.
- [25] Gürleyik M.Y., Makine Mühendisliğinde Aşınma Olayları KTU Mühendislik - Mimarlık Fakültesi, Mühendis ve Makine Dergisi, Cilt 27, Sayı 323, Aralık 1986.
- [26] GWIDON W. S., ANDREW W. B., Engineering Tribology, Butterworth - Heinemann, 2005.
- [27] Odabaş D., Topal E.S., Gerçekçi E., Karamış M.B., The Friction Characteristics of AISI 3315 Steel at High Loads Under Dry Sliding Conditions, Mediterraneantrib 2002, 2. International Conferance on Tribology, Kayseri, 138-144, June 12-14 2002.
- [28] Phoenix Tribology Ltd., England, [http : //www.plint-tribology.com](http://www.plint-tribology.com), 2003.
- [29] Yaman S., Sürtünme Kuvveti, <http://w3.gazi.edu.tr/web/syaman/hareket9.htm>, Ocak 2008.

- [30] Sheffield University,
<http://www.shef.ac.uk/mecheng/tribology/teaching/whatistribology.htm>, 2008
- [31] Babalık, F.C., Makine Elemanları Ve Konstrüksiyon Örnekleri, Vipaş A.Ş., Cilt 2, Uludağ Üniversitesi, Bursa 2000.
- [32] Belice T., Bilim ve Teknik Dergisi
http://www.biltek.tubitak.gov.tr/merak_etiketleriniz/index.php?kategori_id=4&soru_id=2695, 2002
- [33] K. Kato and K. Adachi, Wear mechanisms, in Modern Tribology Handbook, Bhushan, CRC Press, Florida, 2001.
- [34] Eryürek, İ. B., Hasar Analizi, s. 154-162, Birsen Yayınevi, 1993 İstanbul
- [35] Çimenoglu, H. ve Kayalı, E. S., Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, s. 236-246, İTÜ Kimya - Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, 1991 İstanbul.
- [36] Savaş Soner, PVD Metodu ile TiN Kaplanmış S 6-5-4 Yüksek Hız Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2004 Kayseri
- [37] Onaran, K., Malzeme Bilimi, s. 287-288, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul 2003.
- [38] Vikipedi, Triboloji, Aralık 2008
<http://tr.wikipedia.org/wiki/triboloji#s.c3.bcr.c3.bcnme>
- [39] Vikipedi, 2007a, Aşınma, Aralık 2007
<http://tr.wikipedia.org/wiki/a%c5%9f%c4%b1nma>
- [40] Özdemir, U., Erten M., 2003, Talaşlı İmalat Sırasında Kesici Takımda Meydana Gelen Hasar Mekanizmaları Ve Takım Hasarını Azaltma Yöntemleri, Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi,Cilt 1 Sayı 1(37-50).
- [41] Ludema, K.C., 1996, Friction Wear Lubrication A Textbook In Tribology, Crc Press, Florida.
- [42] Akkurt M., Makina Elemanları, Birsen Yayınevi Ltd. Şti., Cilt 1-2, İstanbul 2000.
- [43] Timur Mustafa, Otomotiv’de Kullanılan Sürtünme Malzemelerinin Sürtünme Katsayısını Tespit Eden Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı, Ayfon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Aralık 2007.
- [44] Akbulut H. Dr. Prof., Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Aşınma Ders Notları 2005.
- [45] Toparlı M., Şen S., Karbonlu Çeliklerde Aşınma, 5.Malzeme Denizli Sempozyumu, 1993.

- [46] Assab, Takım Çelikleri El Kitabı, 2012.
- [47] Aslan A., Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma davranışının İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara 42–54 2002.
- [48] Prof. Dr. İrfan AY, Aşınma Hasarları Ders Sunumu.
- [49] Hutchings, I. M., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, London 1992.
- [50] İnçal E., PVD Yöntemi ile Kaplanan HSS Takım Çeliklerinin Karakterizasyonu ve Aşınma Dayanımının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul 2007.
- [51] Karabaşoğlu M., Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Mayıs 2008.
- [52] Sarıkaya Ö., Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri, 1-60, 2007.
- [53] Can Çetin A. Prof., Makine Tasarımcıları İçin Malzeme Bilgisi, Birsan Yayınevi, İstanbul 2006.
- [54] Vedat Temiz Triboloji Ders Sunumu 2013-05-01.
- [55] Çelik A., Alsaran A., Karakan M., Plazma İle Termokimyasal Yüzey İşlemleri, Mühendis ve Makine, Sayı 510 2002.
- [56] Atik E., Çavdar U., Demir Esaslı Sinter Metallerine Yapılabilecek Isıl İşlemlerin Belirlenmesi ve Geliştirilmesi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa 2005.
- [57] Bargel, Shultze, Çevirenler: Aran A., Güleç Ş., Malzeme Bilgisi Cilt II, İTÜ Makine Fakültesi, İstanbul 1995.
- [58] Eker Akdoğan A. Dr. Prof., Yüzey Sertleştirme İşlemleri, 2008.
- [59] Yrd. Doç. Dr. Atilla Evcin Kaplama Teknikleri Ders Notları 2006.
- [60] Polat Ş., Atapek H. Ş., Topaç H., Gaz Nitrürasyon İle Yüzeyleri Sertleştirilmiş AISI 4140 ve DIN 1.2344 Çeliklerinde Mikroyapısal Karakterizasyon, International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, Turkey, 16-18 May 2011.
- [61] İSTAŞ Isıl İşlemler Kataloğu 2012.
- [62] N. Ö. Asan, Çelik yüzeyine azot yayınımları ile yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2004.
- [63] Thelning E. K., Çelik ve ısıtma işlemi, Çeviri : Tekin A., Hakan Ofset, İstanbul, 1984.
- [64] Özdemir, U., Erten M., Talaşlı İmalat Sırasında Kesici Takımda Meydana Gelen Hasar Mekanizmaları Ve Takım Hasarını Azaltma Yöntemleri, Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi, Cilt 1 Sayı 1(37-50) 2003.

- [65] Develi F., Plazma Nitrüleme ve Borlama İle Çift Yüzey İşlem Uygulanmış AISI 8620 Çeliğinin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ocak 2010.
- [66] http://www.frenlemedirenci.com/index.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=6 25.05.2009.
- [67] Ürün R., Sürtünme ve Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Manisa 2008.
- [68] Foster H., 2004, IBAD, Kasım 2007
<http://cim.aamu.edu/Activities/ibad.html>
- [69] Genç Mehmet Gökçe, Plazma Daldırma İyon Implantasyonu(PIII) Yöntemi İle Demir Dışı Metallerin Nitrülenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2010.
- [70] Sevil C., Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin İyon Nitrürasyonu, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Edirne 2008.
- [71] Sarı Y. Nejat, Akay Sarı, Kaluç Erdiñç, Aşınmayı Önlemede Etkili Yöntemler Bölüm - II : Plazma (İyon) Nitrüleme, Mühendis ve Makine Cilt : 38 Sayı : 450 , Makale 1997.
- [72] Avuncan, G., Talaş Kaldırma Ekonomisi Ve Kesici Takımlar, Makine Takım Endüstrisi A.Ş., Gebze 1998.
- [73] Hazar, H., Öner, C., CrN Kaplamanın Bir Dizel Motor Üzerindeki Etkileri, Mühendis ve Makine, 48 (574):1-5 (2007).
- [74] Alpdoruk D., Kesici Takımlar Üzerine Yapılan TiN Sert Seramik Film Kaplamanın Kesici Takım Ömrüne Etkisi, İtÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 1996.
- [75] Eryılmaz, L.O., ZrB,ZrBN Çok Katlı Kaplamaların Korozyon Davranışı, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü 1996.
- [76] Gündüz O., Oktar F., Salman S., Effect Of Pulse Bias Voltage On ZrN Coatings By Cathodic Vacuum Arc, Journal Of Engineering And Natural Sciences Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi 2005/3.
- [77] Holmberg, K., Matthews, A., Coating Tribology, Elsevier, P(11-21, 172-189, 351-371) 1994.
- [78] http://www.icmm.csic.es/fis/english/evaporacion_electrones.html adresinden 2007.
- [79] Mattox, D. M., Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. Film Formation, Adhesion, Surface Preparation and Contamination Control, 1998.
- [80] Pauleau Y., Advanced Techniques for Surface Engineering, W. Gissler, H. Jehn (ed.), Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, p.135., 1992.

- [81] Bozkurt T., TiAlN ve AlTiN Kaplamaların Aşınma Performanslarının İncelenmesi ve Farklı Altlık Malzemede TiN Kaplamanın Etkisinin Araştırılması, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Gebze 2006.
- [82] Cansever, N., Manyetik Alanda Sıçratma Yönteminde Son Gelişmeler, Mühendis Ve Makine Dergisi, Sayı 496 2001.
- [83] R.D.Arnell, P.J.Kelly, Recent Developments in Magnetron Sputtering Systems, Advances in Surface Engineering, Vol.II: Process Technology, Edited by: P.K.Datta, J.S. Burnell-Gray, 4th International Conference on Advances in Surface Engineering, 14-17th May 1996, 19-30, 1997.
- [84] Lermips, 2008, Kasım 2007
http://www.lermips.com/PHP/HTML/textes.php?ref=process_depot%20phase%20vapeur.xls
- [85] Smith D.L., Thin-Film Deposition - Principles & Practice, McGraw-Hill Inc - New York 1995.
- [86] Sert H., PVD ile TiN Kaplanmış Alüminyum Ekstürüzyon Kalıplarının Yüzey Özelliklerinin ve Aşınma Performanslarının Deneysel İncelenmesi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri 1-47 1997.
- [87] Uddeholm Sverker 21 Material Catalog 2012.
- [88] 1.2379 X153CrMoV12 Material Catalog.
- [89] Pekşen Gülşah, DIN 1. 2379 ve Sleipner Malzemelerin Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul 2006.
- [90] Toolox Technical Information Toolox 44.
- [91] Toolox Machine Components June 09.
- [92] Korkmaz Çelik Ürün Kataloğu 2012.