

**PLAZMA NİTRÜLENMİŞ, PVD KAPLANMIŞ VE  
ÇİFT YÜZEY İŞLEMİ UYGULANMIŞ SICAK İŞ  
TAKIM ÇELİKLERİNİN AŞINMA  
DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI**

**Mümin TUTAR**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PLAZMA NİTRÜLENMİŞ, PVD KAPLANMIŞ VE ÇİFT YÜZEY İŞLEMİ  
UYGULANMIŞ SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN AŞINMA  
DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI**

**Mümin TUTAR**

Prof. Dr. Ali BAYRAM  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2011  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ ONAYI

Mümin TUTAR tarafından hazırlanan "PLAZMA NİTRÜLENMİŞ, PVD KAPLANMIŞ VE ÇİFT YÜZEY İŞLEMİ UYGULANMIŞ SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Ali BAYRAM

**Başkan** : Prof. Dr. Ali BAYRAM  
U. Ü. Müh.-Mim. Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Prof. Dr. Nurettin YAVUZ  
U. Ü. Müh.-Mim. Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Üye** : Prof. Dr. Ferruh ÖZTÜRK  
U. Ü. Müh.-Mim. Fakültesi,  
Otomotiv Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Kadri ARSLAN**  
Enstitü Müdürü

27.07.2011 (Tarih) 2011

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

22 / 07 / 2011

İmza

Mümin TUTAR

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### PLAZMA NİTRÜLENMİŞ, PVD KAPLANMIŞ VE ÇİFT YÜZEY İŞLEMİ UYGULANMIŞ SICAK İŞ TAKIM ÇELİKLERİNİN AŞINMA DAVRANIŞLARININ ARAŞTIRILMASI

**Mümin TUTAR**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Ali BAYRAM

Bu çalışmada; AISI H13 ve ASSAB patenti iki farklı sıcak iş takım çeliği seçilmiş ve bu çeliklere uygulanan ıslah etme, plazma nitrüleme (PN), PVD (Physical Vapour Deposition – Fiziksel Buhar Biriktirme) kaplama, çift yüzey işlemleri (PN+PVD kaplama) sonucu elde edilen yüzey özellikleri deneysel olarak incelenmiştir.

Numuneler ıslah edilmiş ve PN işlemi uygulanmıştır. PN parametreleri; 500 °C sıcaklık, 10 saat süre, gaz ve gaz oranları olarak  $\frac{1}{4}$  (H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>) ve 250 Pa basınç değerleri seçilmiştir. PN işleminin öncesinde ve sonrasında işlemlerin pürüzlülüğe etkisini görmek için zımparalama ve parlatma işlemleri ile yüzey pürüzlülüğü azaltılmıştır. Bir kısım numune ıslah sonrası direkt olarak, bir kısım numune de PN sonrası PVD yöntemiyle CrN ve TiAlN kaplanmıştır. Uygulanan işlemlerin meydana getirdiği yapıların yüzey sertlikleri ve sertlik dağılımları mikrovickers sertlik ölçüm cihazı ile ölçülmüş, pürüzlülük ölçüm cihazı ile yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş; ball on disk aşınma test cihazı ile sürtünme katsayılarının değişimleri incelenmiş, optik mikroskop ile mikro yapılar ve aşınma izleri incelenmiştir.

Deney sonuçlarının karşılaştırmalı değerlendirilmesi sonucu;

- PN üzerine PVD kaplama ile ıslah üzerine PVD kaplama arasında ciddi pürüzlülük farkları görülmemiştir.
- PN üzerine PVD kaplamanın, ıslah üzerine PVD kaplamaktan daha pürüzlü yüzeyler oluşturduğu tespit edilmiştir.
- CrN kaplama TiAlN kaplamadan daha düşük pürüzlülük değerleri göstermiş ancak daha yüksek sürtünme katsayılarıyla daha fazla aşınma göstermiştir.
- Q grubu numunelerde PN üzerine PVD kaplamanın ıslah üzerine kaplamaya göre sürtünme katsayısının daha yüksek olduğu, S grubu numunelerde ise PN üzerine PVD kaplamaların sürtünme katsayısının daha düşük olduğu gözlenmiştir.
- Plazma nitrülemenin her iki numunede de sürtünme katsayısını düşürdüğü ve aşınmayı azalttığı görülmüştür.
- Q kodlu numunelerin ıslah sonrası daha ince tanelere, PN sonrası daha yüksek sertliklere sahip olduğu ve deneylerde daha düşük sürtünme katsayıları gösterdiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Plazma nitrüleme, PVD kaplama, pürüzlülük, sertlik, aşınma

**2011, viii + 69 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOR OF PLASMA NITRIDED, PVD COATED AND DUPLEX TREATED HOT WORK TOOL STEELS**

**Mümin TUTAR**

Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Ali BAYRAM

In this study, two different hot work tool steels with patented under the name of AISI H13 and ASSAB were chosen and surface properties of these steels resulting from tempering, Plasma Nitriding (PN), Physical Vapour Deposition (PVD) coating and PN+PVD coating (duplex) were experimentally investigated.

Samples were tempered and then plasma nitriding was performed for all samples. The plasma nitriding processes of all samples were carried out at 500 °C for 10 hours using the mixed nitrogen and hydrogen at a volume ratio of 4:1 as the source gas at a total pressure of 250 Pa. Before and after plasma nitriding processes, the surface roughness of the samples was reduced with grinding and polishing to determine the effect of heat treatments and coatings on surface roughness. A group of samples were directly CrN and TiAlN coated with PVD technique after tempering while the other group were CrN and TiAlN coated with PVD technique after PN. Surface hardnesses and hardness profiles of all samples were performed on a Vickers microhardness tester, the surface roughness of the samples were measured by using stylus profilometer, friction characteristics of all samples were evaluated on a wear tester in a ball-on-disc contact configuration, which allows the determination of the friction coefficient, and the morphologies of the surfaces and worn surfaces of the samples were observed using an optical microscope.

The experimental results indicated that;

- There were no noticeable differences on surface roughness between PVD coating on plasma nitrided samples with PVD coating on only tempered samples.
- CrN coating exhibited the lower surface roughness values compared to TiAlN coating, but the wear loss of CrN coated samples increased depending on the higher friction coefficient.
- In Q group of the samples, PVD coating on plasma nitrided samples had the higher friction coefficient with respect to PVD coating on only tempered samples, whereas in S group of the samples, the lower friction coefficients were observed on PVD coating on plasma nitrided samples.
- PN reduced the wear loss and the friction coefficient of both groups of the samples.
- Q coded samples had finer grains following tempering, and the higher hardness values and the lower friction coefficients following PN.

**Key words:** Plasma nitriding, PVD coating, roughness, hardness, wear

**2011, viii + 69 pages.**

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıŐmasının hazırlanmasında; destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ali Bayram'a, deneyler ve tez yazımı sırasında gürüŐ ve yönlendirmelerinden faydalandığım hocalarım Yrd. Doç. Dr. Ali Durmuş'a, Öğr. Gör. Dr. KurtuluŐ Yiğit'e ve ArŐ. Gör. Dr. Hakan Aydın'a teşekkür ederim.

Numunelerin hazırlanmasında ve deneylerin yapılmasında bana yardım eden; Er&Mir Tekstil ve Makine San. Tic. Ltd. Şti. ve Dr. Ersin Eser Korkmaz'a, FEKA Otomotiv Mamülleri Sanayi ve Ticaret A.Ő. Kalıphane Őefi Selim Koca'ya, MGI Coutier mühendislerinden Őükrü Topçu'ya teşekkür ederim.

Ayrıca; her zaman oldukları gibi bu süreçte de desteklerini hep arkamda hissettiğim sevgili eŐime ve aileme teşekkür ederim.

22 / 07 / 2011  
Mümin TUTAR

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	3
2.1. Triboloji.....	3
2.2. Sürtünme .....	6
2.3. Aşınma .....	8
2.4. Aşınma Mekanizmaları .....	10
2.4.1. Abrziv, eroziv ve kavitasyon aşınmaları .....	11
2.4.2. Adeziv aşınma.....	15
2.4.3. Koroziv aşınma ve oksidasyon aşınması .....	16
2.4.4. Yorulma aşınması .....	18
2.5. Aşınmayı Azaltmaya Yönelik Yüzey İşlemleri ve Kaplamalar.....	20
2.5.1. Plazma Nitrürleme .....	22
2.5.2. PVD Kaplama .....	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	33
3.1. Materyal.....	33
3.2. Yöntem.....	34
3.2.1. Isıl işlemler.....	34
3.2.2. Plazma nitürleme.....	37
3.2.3. PVD kaplama.....	37
3.2.4. Pürüzlülük ölçümleri.....	38
3.2.5. Sertlik ölçümleri.....	39
3.2.6. Aşınma deneyleri.....	39
3.2.7. Optik mikroskop çalışmaları.....	40
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....	41
4.1. Pürüzlülük Değerleri .....	41
4.2. Sertlik Değerleri .....	43
4.3. Mikro yapılar.....	46
4.4. Aşınma Deneyi Sonuçları .....	54
5. SONUÇ .....	65
KAYNAKLAR .....	66
ÖZGEÇMİŞ .....	69



## SİMGELER VE KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\mu$	Sürtünme katsayısı
$\mu\text{m}$	Mikrometre
eV	ElektronVolt
$\emptyset$	Çap
$\sigma$	Standart sapma
X	Aritmetik ortalama

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
AISI	American Iron and Steel Institute
ASSAB	Associated Swedish Steels AB
DIN	Deutsches Institut für Normung
PN	Plazma Nitrüleme
PVD	Physical Vapour

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Tribolojinin uygulamadaki amaçları.....	4
Şekil 2.2. Tribolojik sistemde temel elemanlar.....	5
Şekil 2.3. Statik ve kinetik sürtünme katsayılarının farkı .....	6
Şekil 2.4. Gerçek temas alanı ve gerçek temas basıncı.....	7
Şekil 2.5. Ara maddeye bağlı olarak sürtünme çeşitleri.....	8
Şekil 2.6. Bir tribolojik sistemde etken faktörler.....	10
Şekil 2.7. Abrasiv aşınmadaki mekanizmalar.....	11
Şekil 2.8. İki ve üç yüzeyli abrasiv aşınma.....	12
Şekil 2.9. Eroziv aşınma mekanizmaları.....	14
Şekil 2.10. Kavitasyon aşınma mekanizması.....	15
Şekil 2.11. Adeziv aşınmada metal transferi.....	16
Şekil 2.12. Koroziv aşınma mekanizması .....	17
Şekil 2.13. Yorulma aşınması mekanizması ve dökme demirde yorulma aşınmasının mikroskop görüntüsü .....	19
Şekil 2.14. Aşınmanın getirdiği maliyetlerin dağılımı .....	20
Şekil 2.15. Yüzey işlemlerinin sıcaklık-sertleştirilmiş tabaka açısından karşılaştırılması .....	22
Şekil 2.16. Plazma ile nitrüleme işleminin demir esaslı malzemeler için mekanizması .....	24
Şekil 2.17. PN ünitesinin şematik gösterimi .....	24
Şekil 2.18. Alaşım elementlerinin çeliğin nitrülenmesi sonrası sertliğe etkisi .....	25
Şekil 2.19. PN sonrası oluşan içyapılar .....	25
Şekil 2.20. Modifiye olmuş bölgenin sertlik dağılımı .....	26
Şekil 2.21. SAE 1050 çeliğinden imal edilmiş dişlilerin PN sırasındaki görüntüsü. ....	28
Şekil 2.22. Dizel araçlarda kullanılan krank millerin PN sırasındaki görüntüsü ...	28
Şekil 2.23. PVD kaplama yöntemleri .....	29
Şekil 2.24. İyon demeti destekli buharlaştırma .....	30
Şekil 2.25. PVD kaplamada sıçratma yöntemi .....	31
Şekil 2.26. Manyetik alanda sıçratma yöntemi .....	32
Şekil 3.1. Çeliklerin demir karbon denge diyagramındaki yerleri .....	35
Şekil 3.2. S kodlu çelikler için ıslah parametreleri .....	36
Şekil 3.3. Q kodlu çelikler için ıslah parametreleri .....	36
Şekil 3.4. TR200 portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı .....	38
Şekil 4.1. Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen işlemler ve ölçülen yüzey pürüzlülükleri. ....	42

	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.2. Başlangıç malzemesi, ıslah sonrası ve kaplama sonrası numunelerin sertlik değerleri .....	44
Şekil 4.3. Q20 ve S20 numunelerin sertlik dağılımları .....	46
Şekil 4.4. Q00 numunesinin x200 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	47
Şekil 4.5. S00 numunesinin x200 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	48
Şekil 4.6. Q10 numunesinin x200 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	48
Şekil 4.7. S10 numunesinin x200 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	49
Şekil 4.8. Q11 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	49
Şekil 4.9. S11 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	50
Şekil 4.10. Q12 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	50
Şekil 4.11. S12 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	51
Şekil 4.12. Q21 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	51
Şekil 4.13. S21 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	52
Şekil 4.14. Q22 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	52
Şekil 4.15. S22 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	53
Şekil 4.16. Q20 numunesinin x200 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	53
Şekil 4.17. S20 numunesinin x200 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü .....	54
Şekil 4.18. Q10 – Q20 kodlu numunelerin aşınma deneyi sonuçları .....	55
Şekil 4.19. S10 – S20 kodlu numunelerin aşınma deneyi sonuçları .....	56
Şekil 4.20. Q10 – Q11 – Q12 kodlu numunelerin aşınma deneyi sonuçları .....	56
Şekil 4.21. S10 – S11 – S12 kodlu numunelerin aşınma deneyi sonuçları .....	57
Şekil 4.22. Q20 – Q21 – Q22 kodlu numunelerin aşınma deneyi sonuçları .....	57
Şekil 4.23. S20 – S21 – S22 kodlu numunelerin aşınma deneyi sonuçları .....	58
Şekil 4.24. Q10 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100 .....	58
Şekil 4.25. Q11 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100 .....	59
Şekil 4.26. Q12 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100 .....	59
Şekil 4.27. Q20 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100 .....	60
Şekil 4.28. Q21 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100 .....	60
Şekil 4.29. Q22 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100 .....	61
Şekil 4.30. S10 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100 .....	61
Şekil 4.31. S11 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100 .....	62
Şekil 4.32. S12 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100 .....	62
Şekil 4.33. S20 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100 .....	63
Şekil 4.34. S21 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100 .....	63
Şekil 4.35. S22 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100 .....	64

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Q12 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100 ....	4
Çizelge 2.2. Yüzey işlemlerinin uygulamalarına göre temel tipleri.....	21
Çizelge 3.1. Deneylede kullanılan çeliklerin özellikleri.....	33
Çizelge 3.2. Tungsten Karbür bilyenin özellikleri.....	33
Çizelge 3.3. Numune kodları .....	34
Çizelge 3.4. PN parametreleri .....	37
Çizelge 3.5. PVD kaplama katalog bilgileri.....	38
Çizelge 4.1. Başlangıç malzemesi, ıslah sonrası ve kaplama sonrası numunelerin sertlik değerleri ve istatistiki bilgiler .....	44
Çizelge 4.2. PN işlemleri uygulanmış Q20 numunesinin sertlik dağılımı ve ölçümlere ait istatistiki bilgiler .....	45
Çizelge 4.3. PN işlemleri uygulanmış S20 numunesinin sertlik dağılımı ve ölçümlere ait istatistiki bilgiler .....	45

## 1. GİRİŞ

Otomotiv ve makine üretim sanayilerinde; teknolojinin gelişimi, ekonomiklik ve verimlilik odaklı üretim anlayışı beraberinde daha uzun ömürlü çelikler konusunda araştırmaları getirmiştir. Bir yandan yeni çelik türleri geliştirilirken, diğer yandan çeliklere uygulanan işlemlerle çeliğin kullanım ömrü arttırılmaya ve aynı takımdan, parçadan daha yüksek verim almaya çalışılmaktadır (Korkmaz 2008).

Bu iyileştirme çalışmaları içinde, aşınmayı azaltmak amacıyla; sünek bir içyapıyı çevreleyen sert yüzeyler elde etmek için çeliklere çeşitli yüzey sertleştirme işlemleri uygulanır. Bu işlemlerden biri olan PN işlemi; otomotiv sektöründen talaşlı imalatta kullanılan kesici takımlara kadar birçok alanda başarıyla kullanılmaktadır (Özdemir ve Erten 2003).

Geçiş metallerinin nitrür ve karbürleri (CrN, CrC, TiAlN, TiB<sub>2</sub> gibi) kullanılarak sert kaplamalar da yüzey özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır (Panjan ve ark. 2004). 3000 HV<sub>0,025</sub> üzerinde yüzey sertlik değerlerine ulaşılabilen, mükemmel aşınma dayanımları ve kullanım ömrünü önemli derecede artırmasıyla ince film kaplamalar da çeşitli sektörlerde kullanılmaktadır. İnce film kaplamaların bir çeşidi olarak PVD kaplamalar da; işlemin düşük sıcaklıkta yapılması, önemli bir boyut değişimi meydana getirmemesi gibi avantajlarıyla kendine kullanım alanı bulmuştur.

PVD kaplamalarda elde edilen yüksek sertlik değerlerinin, nispeten yumuşak olan çelik üzerine uygulanması çelik ve kaplama arasında sertlik açısından bir uyumsuzluk doğurmuş ve kaplamanın verimli kullanılamaması sonucunu getirmiştir. Bu durumu aşmak için kaplamadan taban malzemeye doğru uyumlu bir sertlik gradyanı oluşturmak için bazı çift yüzey işlemleri denenmiş ve bu konuda da önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Çeliklerde PN işlemi ile 1100 HV'lere ulaşan yüzey sertlikleri elde edilmektedir. PN işlemi üzerine PVD kaplama çift yüzey işlemi olarak uygulandığında sertlik değerlerinin geçişini daha uyumlu hale getirerek hem PN işleminden hem de PVD kaplamadan daha dayanımlı yüzeyler elde edilmiştir (Björk ve ark. 2001).

Bu çalışmada amaç; AISI H13 ve ASSAB pantentli sıcak iş takım çeliklerinin ıslah etme, PN, PVD kaplama ve PN zerine PVD kaplama ile oluşturulmuş yüzey özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesidir. Çalışma dahilinde TiAlN ve CrN olmak üzere iki farklı PVD kaplama uygulanmıştır. Uygulanan işlemler sonucu oluşan içyapılar incelenmiş, işlemlerin sonrasında yüzey pürüzlülükleri ölçülmüş, elde edilen sertlik değerleri ve dağılımları ölçülmüş, ball on disk aşınma cihazı ile aşınma süresince sürtünme katsayılarındaki değişimler izlenmiş ve optik mikroskopla aşınma izlerinin görüntüleri değerlendirilmiştir.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

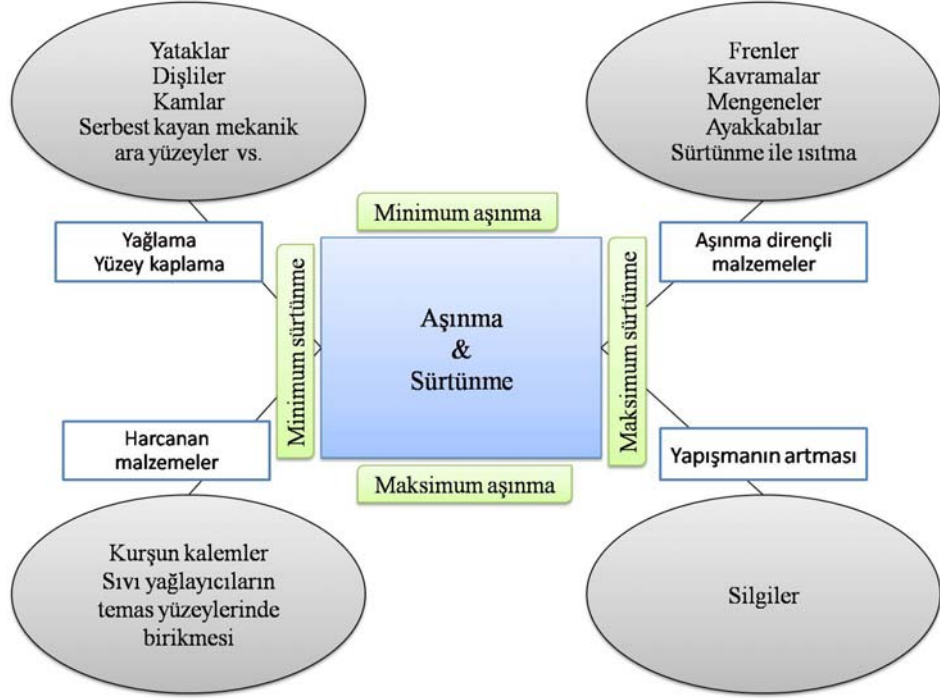
### 2.1 Triboloji

Triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlama konularını ve bunların aralarındaki iliŐkileri inceleyen çok disiplinli ve nispeten yeni -60'lı yılların sonlarında ortaya ıkımıŐ- bir bilim dalıdır (Takadoum 2008, Stachowiak ve Batchelor 2005).

AŞınma, malzeme sarfiyatının ve mekanik performans kaybının temel nedenlerindedir. AŞınmadaki küçük bir azalma bile çok büyük tasarrufları sağlayabilir. Sürtünme ise aşınmanın ve enerji kayıplarının baŐlıca nedenlerindedir. İyileŐtirilmiŐ bir sürtünme kontrolü ile dikkate alınmaya değer tasarruflar sağlanabilir. Yağlama, aşınmanın kontrolü ve sürtünmenin azaltılması için etkin bir araçtır.

Tribolojik problemlerden meydana gelen hasarlar muhtemelen kırılma, yorulma, plastik deformasyon gibi hasarlardan meydana gelenlerden daha fazladır. Triboloji, ev uygulamalarından uzay gemilerine birçok teknik alanda, güvenilirlik, bakım ve aşınma gibi oldukça büyük ekonomik anlam taŐıyan bu konuların iŐlevsel uygulamalarını içeren bir bilim dalıdır. Şekil 2.1.'de bu alanlara ve amaçlara örnekler verilmiştir. (Stachowiak ve Batchelor 2005, <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-800-tribology-fall-004/lecture-notes,2011>).

Bir tribolojik sistemde, sürtünen yüzeylerin davranıŐlarını etkileyen çok sayıda parametre vardır (izelge 2.1.). Bu parametrelerin çoğu birbirileriyle güçlü etkileŐimlerde bulunur ve bu etkileŐimler lineer değildir. Bu yüzden de parametreler arasında genel bir denklem çıkarmak mümkün değildir (Polak ve Wicox 2003).



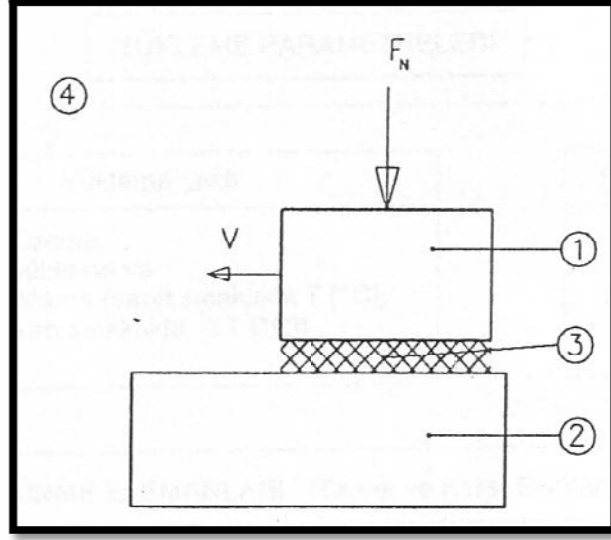
Şekil 2.1. Tribolojinin uygulamadaki amaçları (Stachowiak ve Batchelor 2005)

Çizelge 2.1. Bir tribolojik sistemde ele alınması gereken parametreler (Polak ve Wicox 2003)

<b>Parçaların hareketi</b>	Yuvarlanma veya kayma Yer değiştirmenin genliği Sürekli veya kesikli hareket
<b>Parçaların şekilleri Temas geometrisi</b>	Açık veya kapalı temas Yüzeysel veya hertzian temas Yüzey temizliği
<b>Parçanın malzeme özellikleri</b>	Mekanik özellikler Yapı Fiziksel özellikler Kompozisyon İki parça için malzeme seçimi
<b>Topografi</b>	Pürüzlülük Profil şekli
<b>Gerilmeler</b>	Temas kuvveti veya basıncı Kayma hızı Çalışma süresi Çevrim sayısı
<b>Çevre</b>	Kimyasal reaktivite Fiziksel özellikler Sıcaklık Temizlik
<b>Yağlama</b>	Viskozite Sınır yağlama özellikleri Yüzey gerilimi Kompozisyon



Tribolojik bir sistem içerisinde aşınma olayını analiz edebilmek için bazı temel unsurların bilinmesi gerekir. Aşınmanın meydana gelebilmesi için Şekil 2.2.'de gösterilen 6 temel unsurun hepsinin veya bazılarının bir arada bulunması gerekir.



**Şekil 2.2.** Tribolojik sistemde temel elemanlar (Yiğit 1994, Aydın 2002)

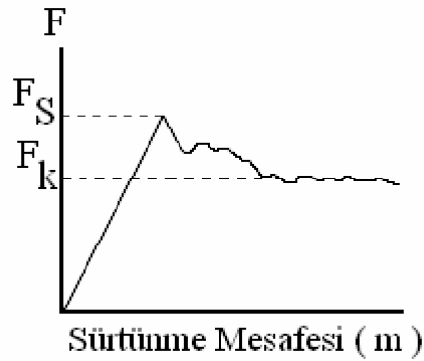
- 1- Temel Sürtünme Elemanı: Fiziksel ve kimyasal özellikleri ve durumu, yüzey yapısı, şekli tamamen belirli ve aşınma durumu önem arz eden parçadır.
- 2- Karşı Sürtünme Elemanı: Gaz, sıvı veya katı olabilir. Temel sürtünme elemanı ile birlikte bir "sürtünme çifti" teşkil ederler.
- 3- Ara Madde: Temel sürtünme elemanı ile karşı sürtünme elemanı arasında katı, sıvı, gaz, buhar veya bunların karışımı şeklinde bir madde bulunabilir. Aşınma esnasında yüzeylerden kopan parçacıklar yüzeyler arasında kalıyorsa ara madde olarak düşünülebilir.
- 4- Çevre: Diğer elemanları çevreleyen mahaldir.
- 5- Yükleme: Etki eden yükün büyüklüğü, şekli –statik, titreşimli, darbeli vs.- , doğrultu ve zamana göre değişimi yükleme konusunu meydana getirir.
- 6- Hareket: Temel sürtünme elemanının karşı sürtünme elemanına göre bağlı hareketinin cinsi – kayma, yuvarlanma, çarpma vs.- , büyüklüğü, doğrultusu ve süresi ile ilgilidir.

## 2.2 Sürtünme

Sürtünme günlük hayatta ve birçok endüstriyel uygulamalarda çok önemli bir role sahiptir. Yürümek için harekete başlamada, yön değiştirmede, durmada sürtünme kuvvetinin yardımı vardır. Sürtünme olmasaydı birçok vidalı bağlantı tutmaz, kemanın sesi çıkmaz, frenler tutmaz ve sürtünme kaynağı olmazdı. Bunun yanında hareket eden mekanizmalarda enerji kaybının temel sebeplerinden biri de sürtünmedir. Kayma hareketinin devam edebilmesi için, sürtünmede harcanan enerji, sürekli olarak sağlanan bir enerji girişi gerektirir. Bu enerji sistem içerisinde öncelikle –hasarlardan kaçınmak için soğutulması gereken- ısı enerjisine dönüşür. Sürtünmeye harcanan enerjinin bir kısmı sürtünen parçaların kullanılamaz hale gelmesine sebep olacak aşınma gibi deformasyon süreçlerinde harcanır. Bu da, sürtünmenin ekonomik önemini gösteren bir başka durumdur. Bu vb. sebeplerden dolayı, sürtünme bazen istenen bir durumken bazen de istenmeyen bir durum olabilir (Davis 2001, <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-800-tribology-fall-004/lecture-notes,2011>).

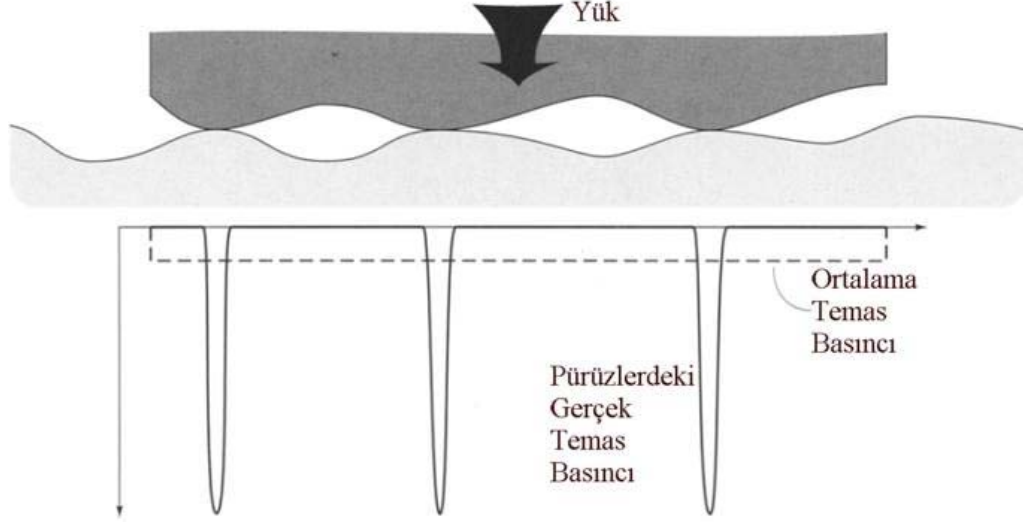
1875'te Coulomb'un formüle ettiği katılarda sürtünmenin kanunları oldukça basittir ve çok genel terimlerle ifade edilebilir:

- Statik sürtünme kinetik (veya dinamik) sürtünmeden daha büyük olabilir (Şekil2.3.).



**Şekil 2.3.** Statik ve kinetik sürtünme katsayılarının farkı (F<sub>s</sub>:Statik sürtünme katsayısı, F<sub>k</sub>:Kinetik sürtünme katsayısı)(Karaoğlu 2006)

- Sürtünme kayma hızından bağımsızdır.
- Sürtünme temas alanından bağımsızdır (Şekil 2.4.).



**Şekil 2.4.** Gerçek temas alanı ve gerçek temas basıncı (Stachowiak ve Batchelor 2005)

Yüzeyler her ne kadar pürüzsüz görünürse görünsün, mikroskobik boyutta girintilere ve çıkıntılara sahiptir. Sürtünme bu tepe noktaları noktalar arasında gerçekleşir. Böylece sürtünme görünen temas alanından bağımsız olur.

- Sürtünme kuvveti uygulanan yük ile doğru orantılıdır.

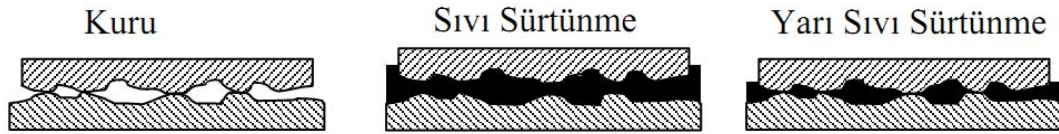
Sürtünme çoğunlukla sürtünme katsayısıyla temsil edilir. Sürtünme katsayısı; sürtünme kuvveti (F) ile normal kuvvet (N) arasındaki orandır ve  $\mu = F/N$  olarak gösterilir. Sürtünme katsayısı tipik olarak; iyi yağlanmış bir yatakta 0,03'ten kuru sürtünmede 0,5-0,7 gibi değerler arasında olabilir (Hutchings 1992, Davis 2001, Karaoğlu 2006).

Sürtünme yüzeyler arasındaki temas noktalarıyla ilişkili olduğundan yüzeyler arasındaki teması kesmek ya da azaltmak için yağlayıcı kullanmak sürtünmenin azaltılmasında kullanılan en yaygın yöntemdir. Sürtünmenin kuru, sıvı ve yarı sıvı olmak üzere ara maddeye bağlı olarak üç çeşittir.

Kuru sürtünme yağlanmamış iki katı cisim arasındaki sürtünmedir. En hassas işlemede bile yüzeyde pürüzlülük olacağından, yüzeyler arasındaki temas noktalarında oluşan yüksek basınç kaynak bağlantısı oluşmasına sebep olacak ve bu sebeple ortaya çıkan sürtünme kuvveti oldukça fazla olacaktır.

Sıvı sürtünmede iki yüzey arasındaki yüzey pürüzlülükleri karşı tarafa temas etmeyecek şekilde yüzeyler arasında yağ filmi oluşturulmuştur. Bu durumda sürtünmeyi oluşturan faktör yağın viskozitesidir.

Yüzeyler arasındaki yağ filmi yeterli kalınlıkta oluşmadıysa bazı pürüz tepelikleri birbirlerine temas edebilir. Bu durum da yarı sıvı sürtünmedir. Bahsi geçen üç durum Şekil 2.5.'te gösterilmiştir (Babalık 2000).



**Şekil 2.5.** Ara maddeye bağlı olarak sürtünme çeşitleri (Babalık 2000)

### 2.3 Aşınma

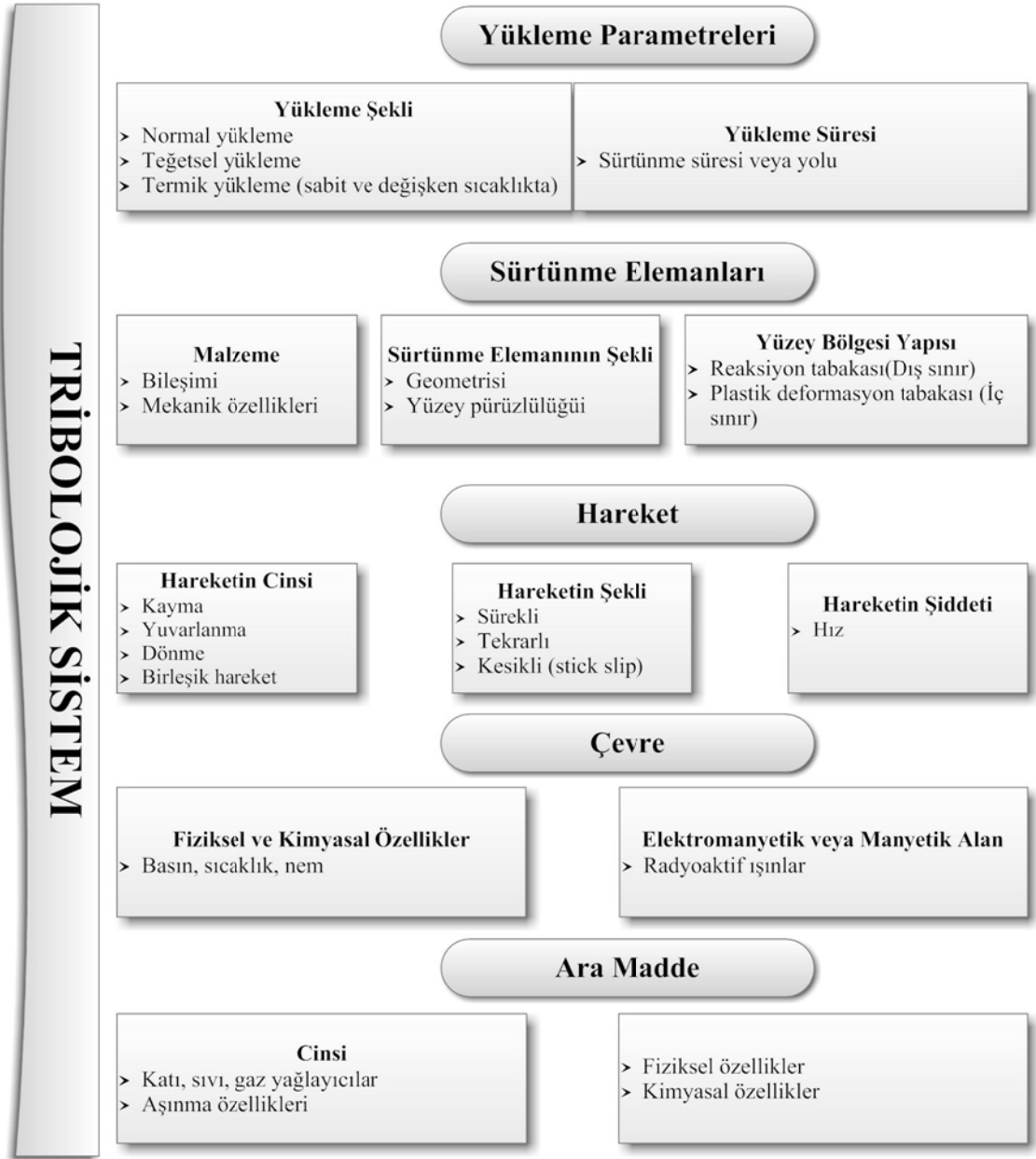
Aşınma konusunda birçok tanımlama yapılmış ve tek bir tanım şeklinde konu anlatılamadığından, çoğu zaman anlatımlara ek açıklamalar ilave edilmek zorunda kalmıştır. 1976'da yayınlanan DIN 50320'ye göre; "aşınma, katı cisim yüzey bölgesinden tribolojik zorlanma sonucu sürekli ilerleyen malzeme kaybı olayıdır." Ayrıca tamamlayıcı iki ek açıklamaya gerek görülmüş ve aşınmanın, malzeme değişimi, şekil değişimi ve/veya küçük malzeme parçacıklarının koparak ayrılması şekillerinde kendini gösterebileceğine dikkat çekilmiştir.

Tanımların şekli ne olursa olsun, aşınmayı karakterize eden kriterler şu şekilde özetlenebilir:

- Sürtünme doğuracak bir bağıl hareket söz konusudur.
- Teknik açıdan aşınma, istenmeyen veya zarar verici bir olay olarak görülür. (Silindir gömleği/segman alıştırması gibi istenen bilinçli aşındırma uygulamasını, aşınma mekanizmalarından yararlanarak yapılan malzeme işlenmesi olarak değerlendirilmek gerekir.)
- Yüzey bölgesinde cereyan eder ve yüzeyde şekil değişimi (plastik deformasyon), malzeme değişikliği (sürtünme oksidasyonu) veya mekanik etkilerle parçacık ayırma (aşınma tozları) şeklinde kendini gösterir.
- Aşınma süreci, yavaş ilerleyen sürekli bir olaydır. Talaş kaldırarak işleme, dövme (plastik şekil verme), testereleme gibi olaylar da yüzey bölgesinden başladıkları ve diğer kriterleri de yerine getirdikleri halde aşınma kapsamına alınmazlar.

Aşınma özelliği veya aşınma direnci, sertlik veya çekme dayanımı gibi spesifik bir malzeme özelliği değil bir sistem özelliğidir. Bu sistem; sürtünme çifti, yükleme ve hareket şekilleriyle, çevre faktörleri gibi bir bütün halinde göz önüne alınması gereken tribolojik sistemlerdir (Aydın 2002, <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-800-tribology-fall-004/lecture-notes>, 2011).

Aşınma direnci incelenecek malzeme parçası, tribolojik sistem, aşınma cins ve miktarını tayin eden eleman ve faktörlerden en önemlisi ancak sadece birisidir. Bu yüzden aşınma miktarının minimuma indirilmesi veya optimize edilmesi çalışmalarında sistemi bir bütün olarak ele almak gerekir. Tribolojik sistemde aşınmayı etkileyen eleman ve faktörler Şekil 2.6.'da gösterilmiştir (Aydın 2002).



**Şekil 2.6.** Bir tribolojik sistemde etken faktörler (Yiğit 1994)

#### 2.4 Aşınma Mekanizmaları

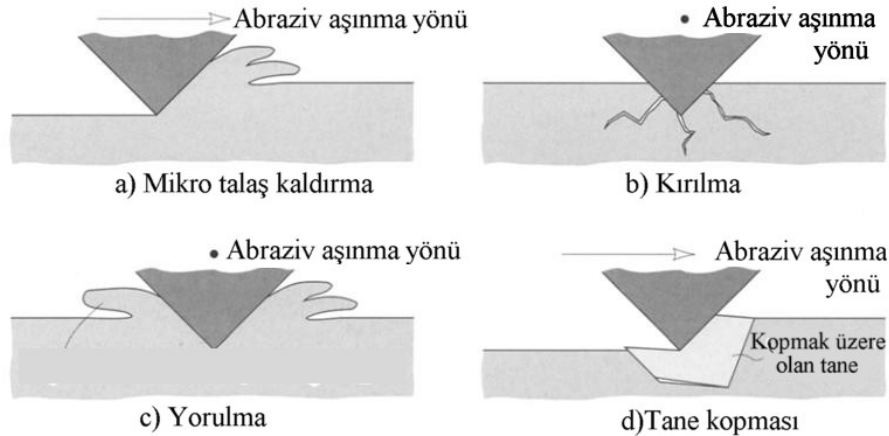
Aşınma olayını meydana getiren unsurların farklı durumlarına göre bunların değişik kombinasyonları, değişik aşınma tiplerinin ortaya çıkmasına neden olur. Aşınma, malzemelerin cinsi, yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, malzemenin işlenme şekli ve sertlik gibi parametrelerin değiştirilmesinden etkilenmektedir (Karaoğlu 2006).

## 2.4.1 Abraziv, eroziv ve kavitasyon aşınmaları

Abraziv ve eroziv aşınma, katı malzeme ve parçacık temasının sebep olduğu mekanizmalardır. Abraziv aşınma, sert parçacıkların yüzeyle temasında malzeme kaybı meydana getirmesidir. Eroziv aşınma, sert parçacıkların yüzeye çarpması sonucu meydana gelir. Kavitasyon ise sıvı kabarcıklarının patlarken yerel olarak yüzeyde oluşturduğu darbe ile oluşan aşınmadır. Her üç aşınma türünün ortak yönleri olmasına rağmen abraziv ve eroziv aşınmalar; hızlı gelişen aşınma tipleri olup yüksek maliyetli hasarlar doğurabilir.

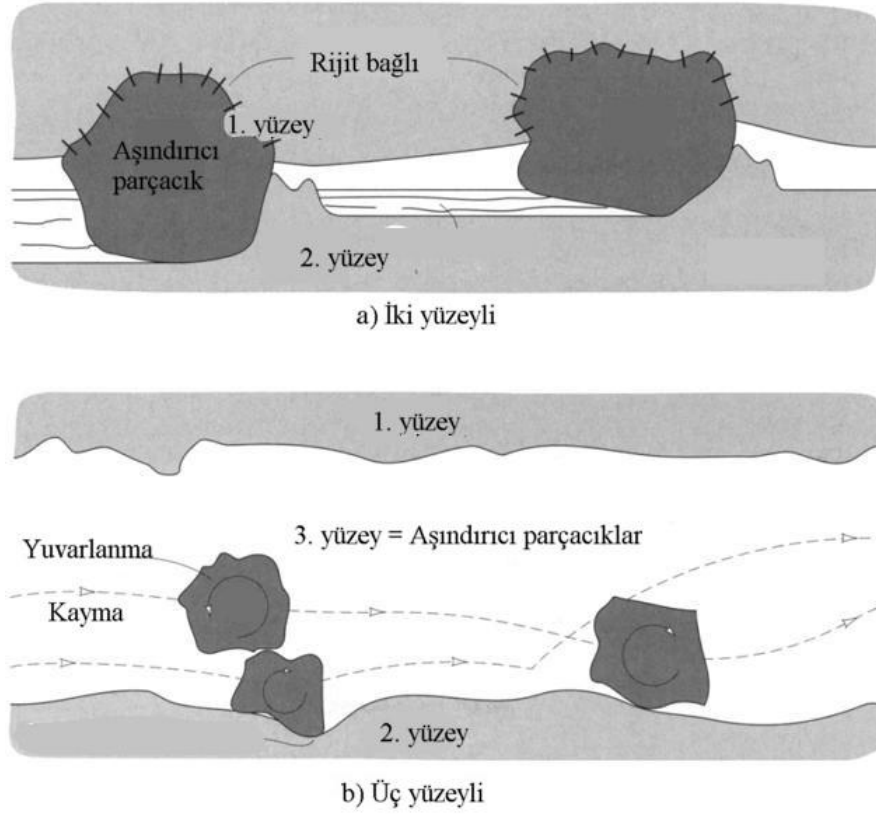
Abraziv aşınma katı bir parçanın, kendisine eşit ya da daha fazla sert parçacıklara sahip malzemelerle sürtünmesi durumunda oluşur.

Abraziv aşınma kendi içerisinde farklı tiplere sahiptir ve abraziv aşınmanın kontrolündeki temel zorluk, “abraziv aşınma” teriminin aşınmanın şeklini tam olarak açıklamamasıdır. Gerçekte farklı karakteristik özellikleri olan mekanizmalar bir arada bulunur. Abraziv aşınma, parçacıkların veya sert pürüzlülüklerin törpü gibi mikro talaş kaldırması olarak düşünülse de; mikroskopik incelemeler bunun dışında dolaylı mekanizmaların bir arada olduğunu göstermektedir. Malzemenin aşınması mikro talaş kaldırma, mikro kırılma, tanelerin koparılması ve hızlandırılmış yorulma şeklinde olabilir (Stachowiak ve Batchelor 2005) (Şekil 2.7.).



Şekil 2.7. Abraziv aşınmadaki mekanizmalar (Stachowiak ve Batchelor 2005)

Tribolojik sistemdeki elemanlara bağı olarak da abraziv aşınma çeşitli şekillerde meydana gelir. Literatürde bununla ilgili iki farklı tip belirtilmektedir. Bunlar; iki yüzeyli ve üç yüzeyli abraziv aşınmalardır (Şekil 2.8.).



**Şekil 2.8.** İki ve üç yüzeyli abraziv aşınma (Stachowiak ve Batchelor 2005)

Aşındırıcı malzemenin yüzeye gömülü olması, bir yüzeyi zımparalama işlemine benzer ve yüzeyden aynen bir kesme takımıyla talaş kaldırılması şeklinde aşınma işlemi gerçekleşir. Üç yüzeyli abraziv aşınmada ise aşındırıcı parçacıklar serbest halde yuvarlanmakta ve yüzeylerin üzerinde kaymaktadır. İki yüzeyli abraziv aşınma, adezyon aşınması ile birlikte meydana gelmektedir ve bu sebeple üç yüzeyli abraziv aşınmaya göre kat kat daha fazla aşınma meydana gelmektedir .

Eroziv aşınma, sıvı veya katı parçacıklarının yüzeye darbesi ile meydana gelir. Tipik örnekler olarak; uçağın toz bulutu içerisinde uçarken gaz türbinlerinin kanatçıklarının aşınması ve sıvı-katı karışımı içerisinde çalışan pompa çarklarının aşınması verilebilir. Diğer aşınma türlerinde olduğu gibi mekanik dayanım aşınma direncini garanti etmez.

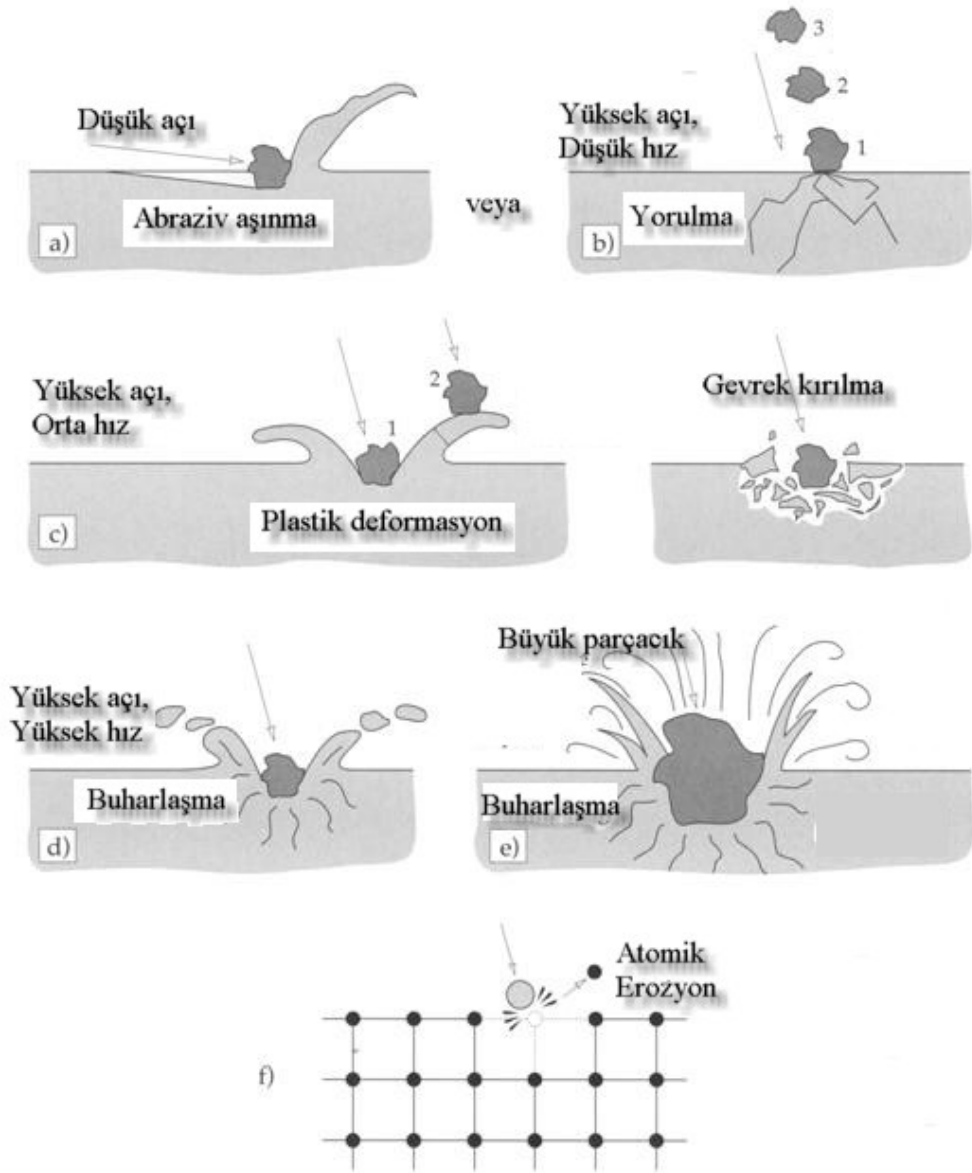


Aşınmayı azaltmak için malzeme karakteristikleriyle ilgili detaylı çalışma gerekir. Aşındıran parçacıkların özellikleri de aşınmanın azaltılmasında önemli rol oynamaktadır.

Eroziv aşınma; genelde aşındırıcı parçacıkların özelliklerine (çarpma açısı, çarpma hızı, parçacık boyutu gibi) bağlı olarak çeşitli mekanizmalara sahiptir. Katı aşındırıcı parçacıkların düşük açılarla yüzeye çarpması abrazyon aşınmaya benzer bir aşınma gösterebilir. Parçacıkların sıvı olması durumunda abrazyon yerine tekrarlı yüklemelerin bulunduğu bir aşınma meydana gelir. Yüksek açılı çarpmalar tipik eroziv aşınmayı oluşturur.

Çarpma hızı aşınmada çok güçlü etkilere sahiptir. Hız, plastik deformasyona sebep olamayacak kadar küçükse yüzeyde yorulma söz konusu olurken yüksek hızlarda (örneğin 20m/s) plastik deformasyona bağlı bir aşınma gözlenir. Çok yüksek hızlarda ise çarpma yüzeyinde buharlaşma meydana gelebilir (Stachowiak ve Batchelor 2005).

Bilinen eroziv aşınma mekanizmaları Şekil 2.9.'da gösterilmiştir.

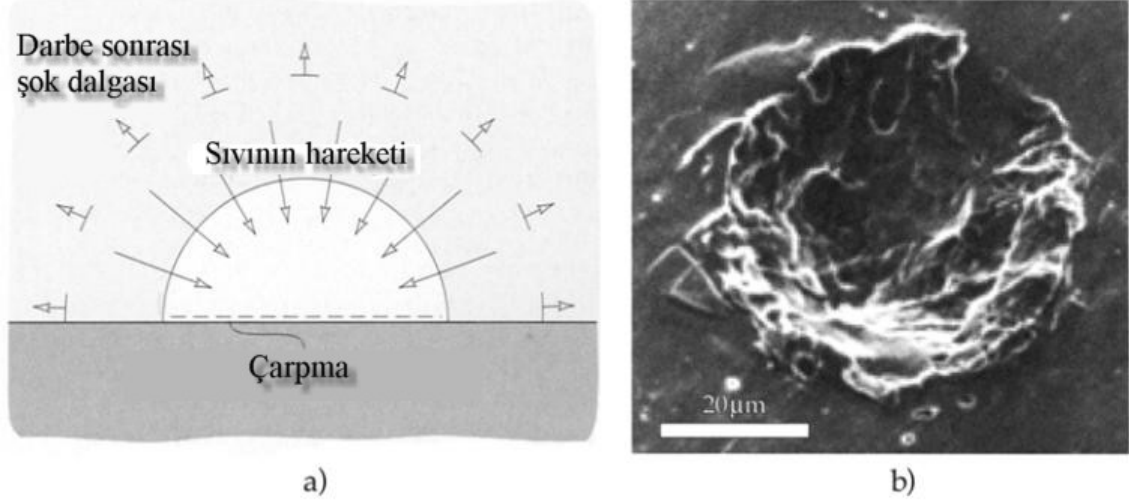


**Şekil 2.9.** Eroziv aşınma mekanizmaları a)Abrazyon, b)Yüzey yorulması, c)Yüzey yorulması ve gevrek kırılma, d)Buharlaşma, e)Makroskopik erozyon, f)Atomların çarpmasıyla kristal kafes bozulması (Stachowiak ve Batchelor 2005)

Kavitasyon aşınması, ıslak buhar içerisinde çalışan türbin kanatçıkları gibi parçaların hasarı olarak bilinir. Bu aşınma türü kendini yüzeyde oluşan çukurcuklar olarak gösterir. Sonuç olarak da; kanatçıklar gibi parçalarda titreşim olarak kendini gösterir.

Kavitasyon aşınmasının karakteristik oluşumu, sıvı teması olan yüzeyde kabarcıkların oluşması ve bu kabarcıkların patlaması ile yüzeye bir basıncın etki etmesi şeklinde olur

(Şekil2.10.). Yüzeyde oluşan basınç geçici olarak 1,5 GPa değerlerine ulaşabilir (Stachowiak ve Batchelor 2005).



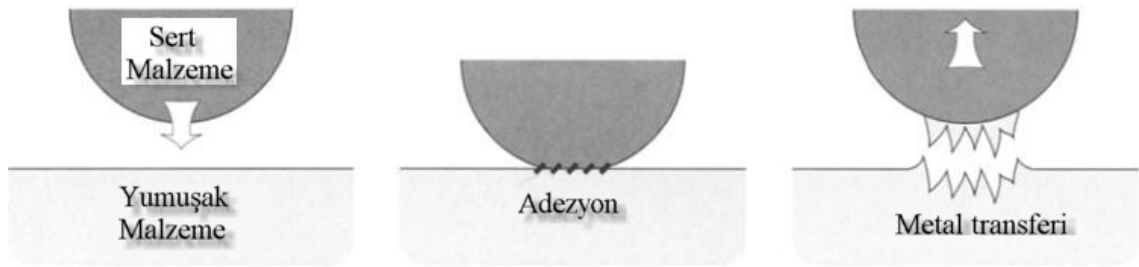
**Şekil 2.10.** a)Kavite aşınma mekanizması, b)Metalik malzeme (indiyum) yüzeyindeki kavite aşınmasının SEM görüntüsü (Stachowiak ve Batchelor 2005)

#### 2.4.2 Adeziv aşınma

Adeziv aşınma, yüksek aşınma oranları ve dengesiz sürtünme katsayısıyla karakterize edilen çok tehlikeli bir aşınma türüdür. Kayma yüzeyleri hızlı bir şekilde zarar görebilir ve sürtünme katsayısının alırı artışıyla kayma hareketi engellenebilir. Birbiri üzerinde kayan metallerin yağlanmasında doğabilecek sorunların çoğu adeziv aşınma ile sonuçlanır. Araç motorlarında; piston-silindir mekanizmasının kilitlemesi bu aşınma türünün önemini gösteren bir örnek olarak verilebilir.

Birbirine temas eden yüzeylerdeki temas alanları çok küçük olduğundan bu noktalarda çok yüksek basınçlar oluşmaktadır. Bu yüksek basınç nedeniyle temas noktalarında malzemeler akma sınırına ulaşır ve bölgesel mikro kaynaklar oluşur. Bu sırada iki cisim arasında devam eden bağıl hareket sonucu kaynak bağı kopar ve sonuçta cismin birinden malzeme eksilmesi oluşur. Bu malzeme kaybı adeziv aşınmayı oluşturur (Stachowiak ve Batchelor 2001, Akkurt 2000, Şafak 2008).

Malzeme çiftleri arasında özellikle metalik malzemelerde büyük adeziv aşınmalar meydana gelir. Çeşitli metal kombinasyonlarında yapılan aşınma testleri sonucunda metallerde adeziv aşınmanın malzeme çiftindeki yumuşak malzemeden sert malzemeye kaynak noktasında transfer olduğunu göstermektedir. Bu transfer sonucunda yumuşak malzemeden kopan parçaların bir kısmı sert malzemeye transfer olmakta, bir kısmı ise sürtünme yüzeyinde kalmakta ve yüzeyleri aşındırmaya devam etmektedir (Stachowiak ve Batchelor 2005) (Şekil 2.11.).



**Şekil 2.11.** Adeziv aşınmada metal transferi (Stachowiak ve Batchelor 2005)

Adeziv aşınmayı önlemek için; malzemenin diğer mühendislik özelliklerini bozmayacak şekilde mümkün olduğunca sert olması gerekmektedir. Genellikle sert metaller çok zor plastik davranış gösterirler ve daha düşük sürtünme katsayısına sahiptirler. Adeziv aşınma, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir. Bu sebeple malzeme çiftlerinden birisi sert ise, diğeri yumuşak olacak şekilde seçilmelidir (Şafak 2008).

### 2.4.3 Koroziv aşınma ve oksidasyon aşınması

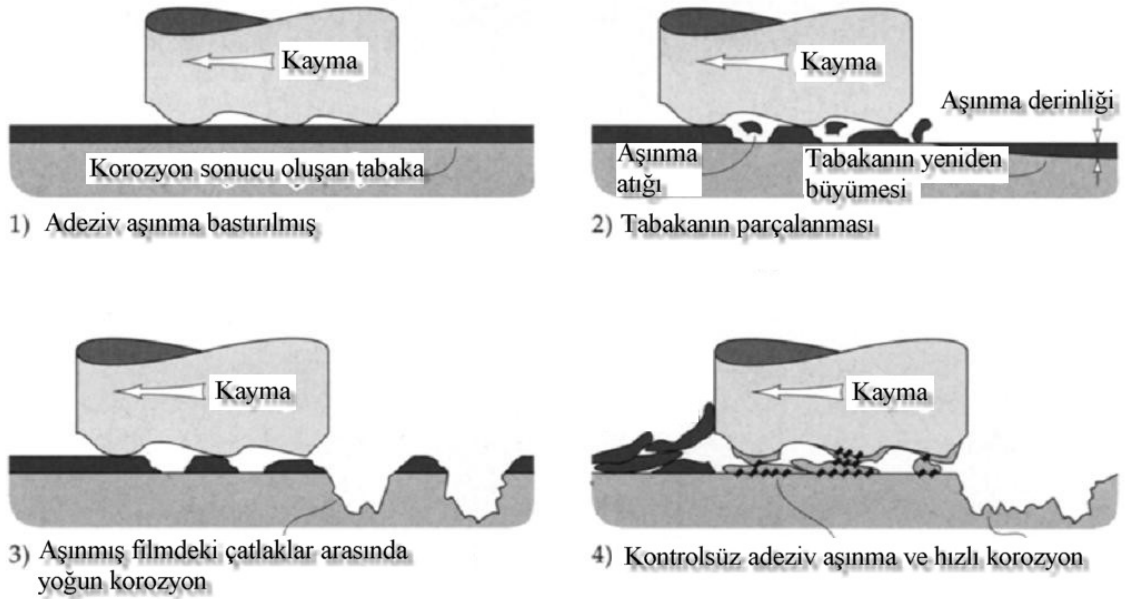
Koroziv aşınma ve oksidasyon aşınması, sıvı ve kuru sürtünmelerde birçok farklı şekilde meydana gelebilir. Bu aşınma türlerinin temel sebebi malzemenin, hava ve yağ gibi koroziv ortamlarda kimyasal reaksiyona girmesidir.

Koroziv aşınma terimi genel olarak; kimyasal reaksiyonla belirlenen herhangi bir aşınmayı gösterirken oksidasyon aşınması atmosferik oksijenin reaksiyonu ile belirlenen aşınmadır. Her iki türde de genellikle sürtünme katsayısının düşüşü ile hızlı

aşınma oranları ortak özelliklerdir. Bu özellikler bu tip aşınmaları belirlemekte oldukça faydalıdır.

Özellikle koroziv sıvı ve gazlarla temas halinde bulunan malzemelerde bu kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda malzeme yüzeylerinde reaksiyon ürünleri oluşur. Eğer bu reaksiyon ürünleri yüzeye güçlü bir şekilde bağlanırsa yüzey üzerinde ince ancak sert bir tabaka oluşur ve böylelikle esas malzemenin aşınma mekanizmasında birtakım değişiklikler olur (Akkurt 2000, Şafak 2008).

Değişken yük altında bu sert tabaka parçalanır ve sert parçacıklar kırılarak aşınma parçacıklarını meydana getirirler. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar bir sert tabaka oluşur, yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder (Akkurt 2000).



**Şekil 2.12.** Koroziv aşınma mekanizması (Stachowiak ve Batchelor 2005)

Şekil 2.12.'deki ilk resimde dayanıklı, korozyon ürünü bir tabaka görülmektedir. Pratikte çok az korozyon tabakası dayanıklı yapı göstermektedir, pek çoğu ikinci resimde gösterildiği gibi kayma temasları sonucunda çok çabuk kırılabilen oksit veya

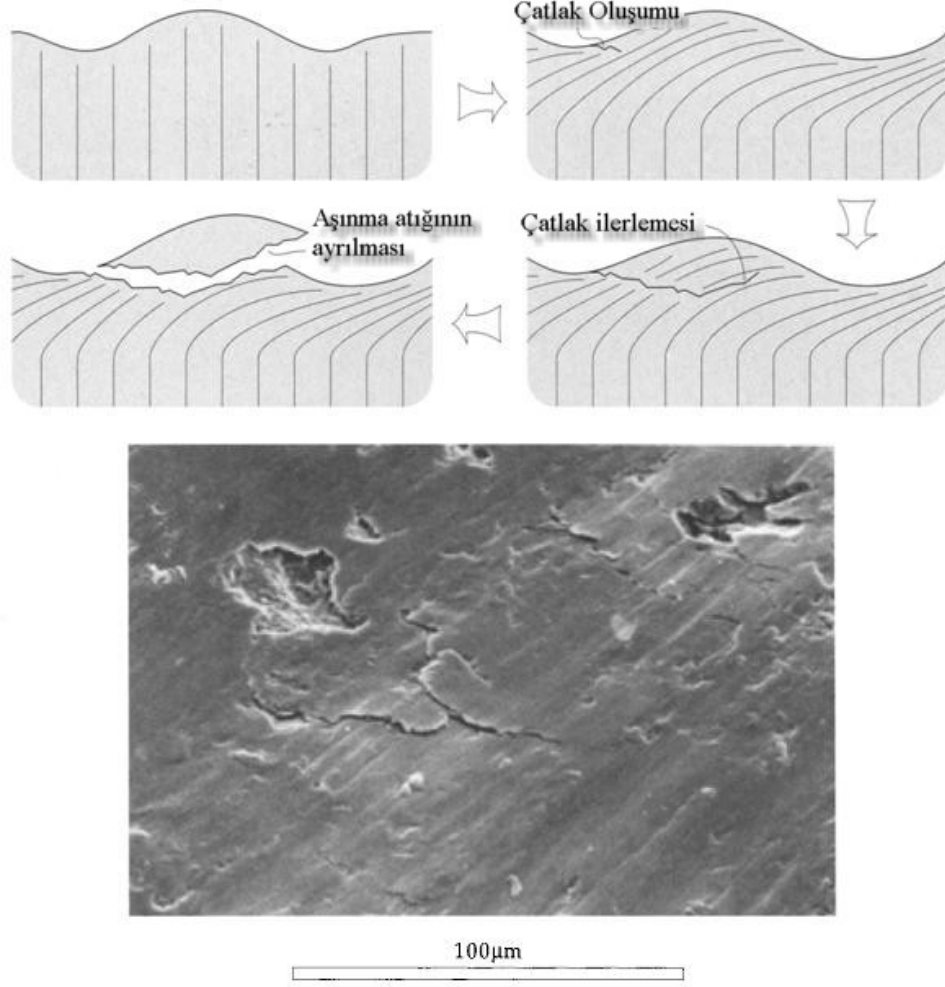
diğer kırılğan bileşikleri içermektedir. Korozyon tabakasının parçalanması sonucu oluşan aşınma atıklarının etkisiyle esas malzeme yüzeyinde abraziv aşınma meydana gelir ve son safhada korozyon tabakası tamamen yüzeyden ayrılır (Stachowiak ve Batchelor 2005)

Koroziv aşınmayı önlemek için malzeme yüzeylerine ısıl işlem uygulanır ve oksidasyon önleyici özel yağlayıcı maddeler kullanılır (Akkurt 2000).

#### **2.4.4 Yorulma aşınması**

İyi yağlanmış temaslarda adeziv aşınma önem arz etmeyebilir. Ancak hala önemli aşınma miktarları gözlenebilir. Bunun sebebi; pürüzlerin temasından doğan deformasyonlardır. Pürüzlülüklerin teması, yuvarlanma veya kayma yolu üzerinde büyük tekrar sayılarında çok büyük yerel gerilmelerin oluşmasına, bu sebeple de yorulma aşınmalarının oluşmasına yol açar. Bu şartlar altında aşınma, çatlak oluşumu, ilerlemesi ve kırılma ile belirlenir.

Birincil çatlak yüzeyde zayıf bir noktada ortaya oluşur. Ardından kayma düzlemi veya dislokasyon çizgisi boyunca ilerler. İkincil çatlaklar birincil çatlaktan gelişebilir veya mevcut diğer çatlaklarla birincil çatlağı bağlayabilir. Çatlak ilerlemesi, çatlağın tekrar yüzeye ulaştığı zamana kadar devam eder ve yüzeye ulaştıktan sonra aşınma parçacığı kopar (Şekil 2.13.)( Stachowiak ve Batchelor 2005).

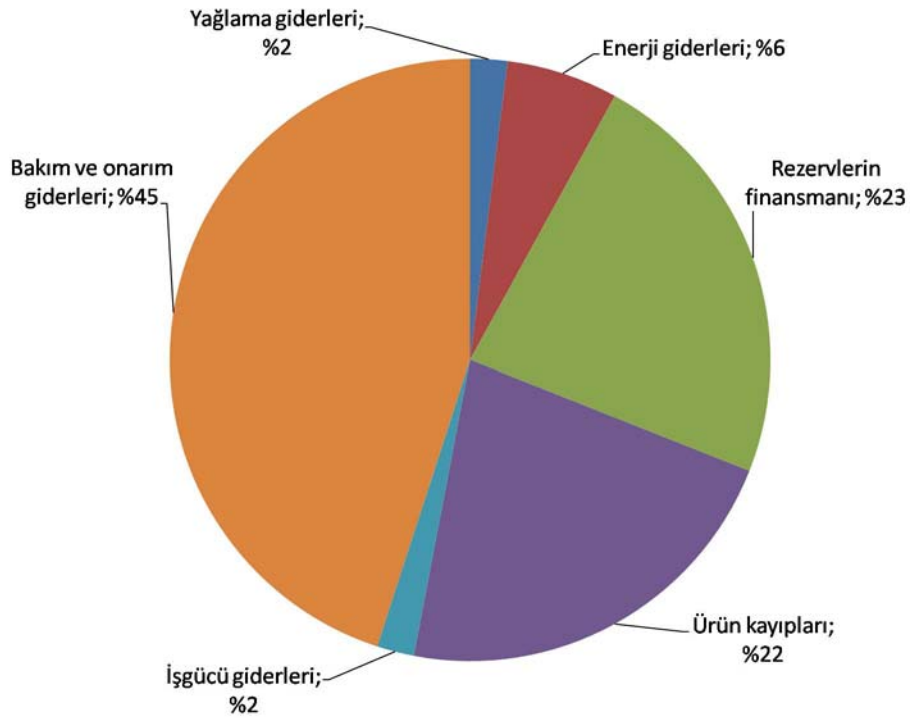


**Şekil 2.13.** Yorulma aşınması mekanizması ve dökme demirde yorulma aşınmasının mikroskop görüntüsü (Stachowiak ve Batchelor 2005)

Yorulma esaslı aşınmayı önlemenin en temel yolu etkileşen yüzeyler arasındaki sürtünme katsayısının azaltılmasıdır. Ancak aynı zamanda 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 (Akkurt 2000, Stachowiak ve Batchelor 2005, Şafak 2008).

## 2.5 Aşınmayı Azaltmaya Yönelik Yüzey İşlemleri ve Kaplamalar

Aşınma, malzeme yüzeyinde meydana gelen, istenmeyen bir durumdur ve farklı alanlarda maddi kayıplara yol açar. Şekilde 2.14.'te gösterilen maliyetleri azaltmak amacıyla aşınmayı azaltmak için malzemeye bazı işlemler uygulanmaktadır. Bu işlemlerde (aşınmanın yüzeyde meydana gelmesinden dolayı) malzemenin genelinden ziyade yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanır.




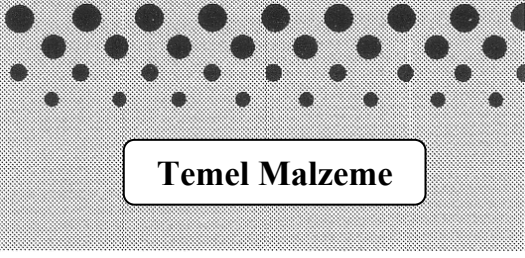
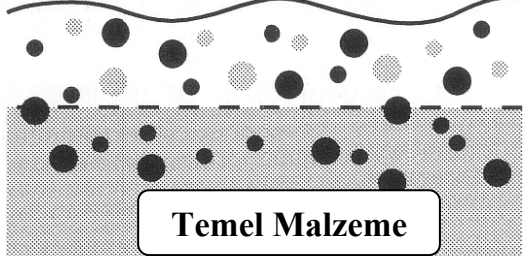
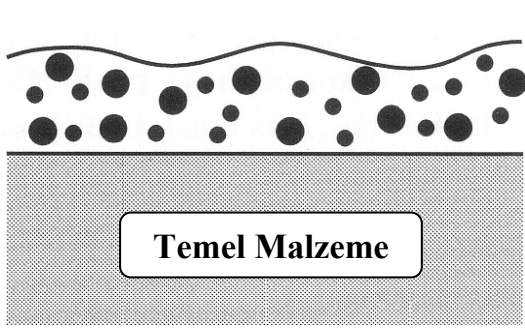
**Şekil 2.14.** Aşınmanın getirdiği maliyetlerin dağılımı (Polak ve Wicox 2003)

Yüzey işlemleri ve kaplamalar; yüzeyin sertliği, kompozisyonu ve içyapısı, yüzey artık gerilmelerin dağılımı, yüzey enerjisi gibi özelliklerin düzenlendiği, mekanik, fiziksel, kimyasal veya elektrokimyasal yöntemleri içeren işlemlerdir.

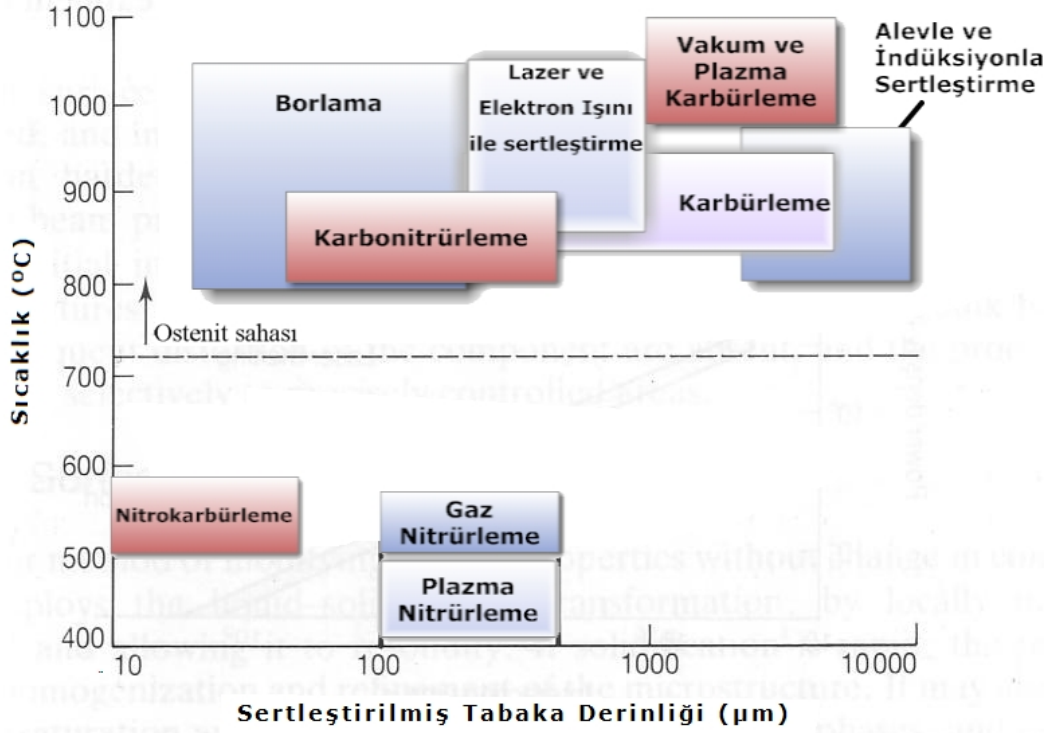
Uygulamalarına bağlı olarak yüzey işlemleri ve kaplamalarının temel tipleri ve bazı yöntemler Çizelge 2.2.'de gösterilmiştir (Polak ve Wicox 2003).



**Çizelge 2.2.** Yüzey işlemlerinin uygulamalarına göre temel tipleri (Polak ve Wicox 2003)

 <p style="text-align: center;"><b>Temel Malzeme</b></p>	<p><b>Yapısal Dönüşüm İşlemleri:</b> Ayrı bir malzemeye ihtiyaç duyulmaz. Yüzeyin metalurjik yapısı düzenlenir.</p> <p><b>Dönüşüm Sertleşmesi:</b> Su verme çeşitleri (alevle, indüksiyonla vs.)</p> <p><b>Mekanik İşlemler:</b> Dövme, haddeleme gibi.</p>
 <p style="text-align: center;"><b>Temel Malzeme</b></p>	<p><b>Difüzyon Destekli İşlemler</b> Temel malzemeye uygulanan ve ● gösterilen malzemenin difüzyonu sağlanır. Bu süreçte temel malzeme ile difüze olan malzeme arasında bir etkileşim olması şartı yoktur.</p> <p><b>Termo-Kimyasal Difüzyon İşlemleri:</b> Karbürizasyon, Nitrüleme, Karbonitrüleme, Borlama, Kromlama vb.</p> <p><b>Püskürtme İyon Aşılama</b></p>
 <p style="text-align: center;"><b>Temel Malzeme</b></p>	<p><b>Kimyasal Dönüşüm İşlemleri</b> Yüzeğe uygulanan (● şekli ile gösterilmiş) malzeme temel malzeme ile etkileşime girer.</p> <p><b>Kimyasal:</b> Fosfat kaplama, Demir esaslı metallerin oksidasyonu</p> <p><b>Elektrokimyasal:</b> Düşük sıcaklıkta Sülfürleme, Alüminyum Eloksal kaplama</p>
 <p style="text-align: center;"><b>Temel Malzeme</b></p>	<p><b>Kaplamalar</b> Yüzeğe uygulanan malzeme (●) ne temel malzemeye difüze olur ne de temel malzemeyle etkileşime girmez.</p> <p><b>Islak İşlemler:</b> Metalik elektrokaplama (Cr, Ag vb.), Organik kaplamalar, Kimyasal metalik kaplamalar (NiP),</p> <p><b>Kuru İşlemler:</b> Termal Spreyleme ile yapılan kaplamalar, Fiziksel ve Kimyasal Buhar Biriktirme (PVD ve CVD)</p>

Uygulamada sık rastlanan yüzey işlemlerinin uygulama sıcaklıkları ve sertleştirilen tabaka derinlikleri açısından karşılaştırılması Şekil 2.15.'te verilmiştir.



**Şekil 2.15.** Yüzeysel işlemlerin sıcaklık-sertleştirilmiş tabaka açısından karşılaştırılması (Polak ve Wicox 2003)

Yukarıda bahsedilen her bir yöntemin detayına inilmeyecek, bu çalışmada uygulanan yöntemler açıklanacaktır.

### 2.5.1 Plazma nitrüleme (İyon nitrüleme)

Sahip olduğu enerji konumuna göre madde; katı, sıvı, gaz, plazma ve daha yüksek enerji konumlu hallerine sahip olabilir. Maddenin herhangi bir konumdaki enerjisini değiştirmek suretiyle maddeyi diğer bir konuma geçirmek mümkündür. Örneğin, katı haldeki bir maddeyi o maddeye has özel bir sıvılaştırma (ergitme) enerjisi vermek suretiyle sıvı, sıvı hale de belirli bir buharlaştırma enerjisi vererek gaz ve gaz hale de belirli bir iyonizasyon enerjisi vererek plazma haline geçirmek mümkündür. Bu işlemin tersi yapılarak, yani verilen bu enerjileri maddeden geri alarak maddeyi tekrar eski hallerine geri döndürmek mümkündür (Sever 2003).

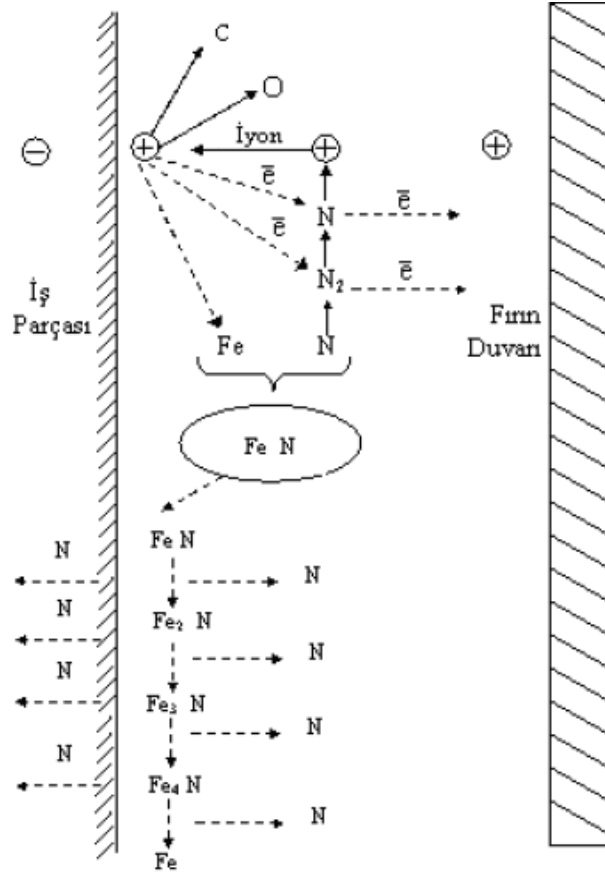
Teknik vakum üretilmiş bir ortama N<sub>2</sub> veya NH<sub>3</sub> doldurulduktan sonra iş parçası ve anot arasına yüksek gerilim uygulanarak gaz atmosferinin iyonlaştırılması ve oluşan azot iyonlarının iş parçası üzerine hızlandırılarak çarptırılması ile nitrüleme gerçekleşir.

1960'lı yıllardan itibaren uygulama alanı bulan PN işlemi, diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre nispeten yeni bir yöntem olmakla birlikte, günümüzde pek çok alanda uygulanmaktadır. Bunun temel nedeni diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre sağlamış olduğu üstünlüklerdir. Bu üstünlükler içinde en önemliler; sadece iş parçasının ısıtılması ve aynı yüzey sertliği için işlem süresinin daha kısa olması nedeniyle sağlanan enerji tasarrufudur (Topçu 2010).

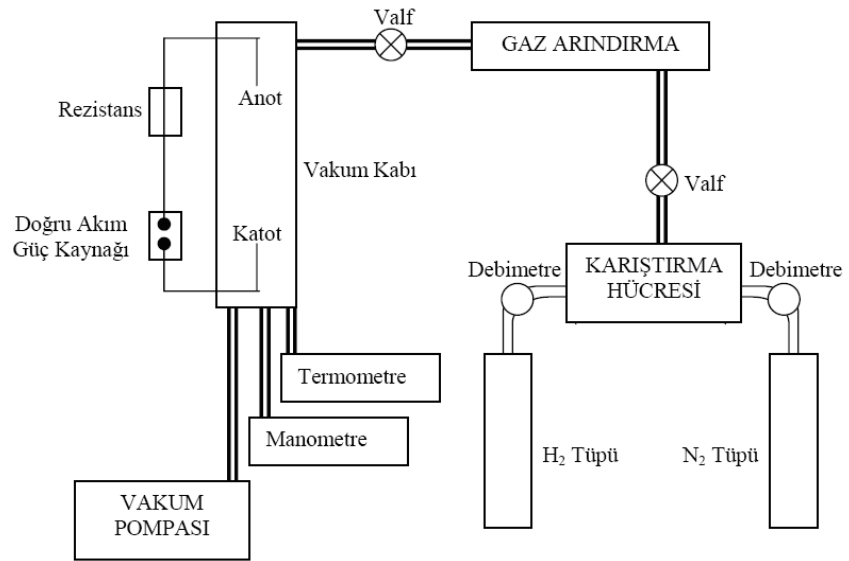
Bunun yanı sıra; işlem sırasında ölçü değişimi ve deformasyon riskinin minimum düzeyde olması, düşük basınçlarda çalışıldığından gaz tasarrufunun maksimum düzeyde olması, nitrülenmesi istenmeyen yüzeylerin mekanik olarak izolasyonunun mümkün olması, gaz veya diğer atıklarla çevreyi kirletmemesi, insan sağlığı açısından zararlı olmaması, nitrüleme parametrelerinin dolayısıyla işlemin otomasyona uyumlu olması, iş parçası üzerindeki tüm girinti, çıkıntı ve delikler üzerinde homojen bir azot difüzyonunun sağlanabilmesi, nitrülenecek parçanın büyüklüğü ve ağırlığının önemli olmaması da bu yöntemin sağlamış olduğu diğer üstünlüklerdir.

Yorulma dayanımının yüksekliği, aşınma direncinin artması ve ihmal edilebilir boyut değişikliği sayesinde işlem sonrasında tekrar işlem görmeden kullanım amacıyla PN işlemi tercih edilebilir ve takımların yüzey sertliklerini arttırarak aşınma dirençlerini ve ömürlerini arttırmakta etkilidir.

PN'nin demir esaslı malzemelere uygulanmasındaki mekanizmalar (Şekil 2.16.) ve PN ünitesi şematik olarak (Şekil 2.17.) gösterilmiştir.

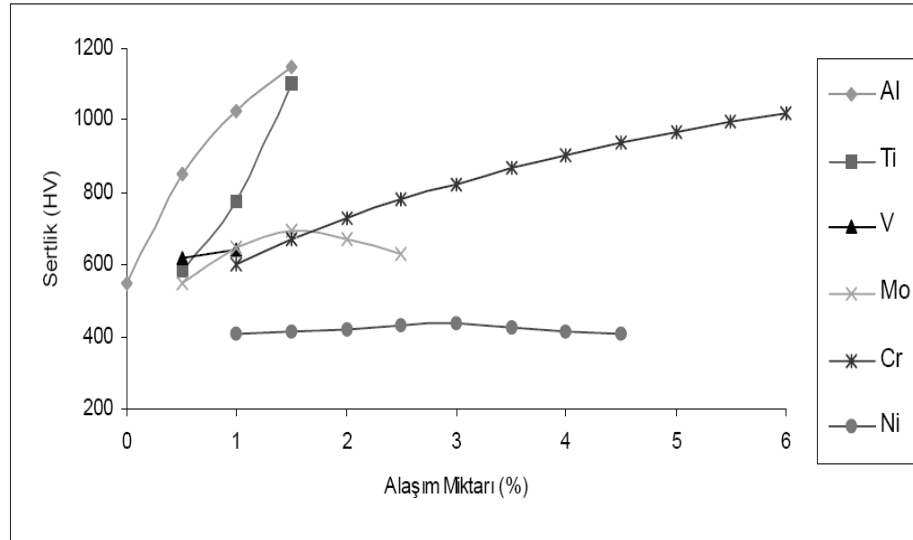


Şekil 2.16. Plazma ile nitrüleme işleminin demir esaslı malzemeler için mekanizması (Anonim 1991)



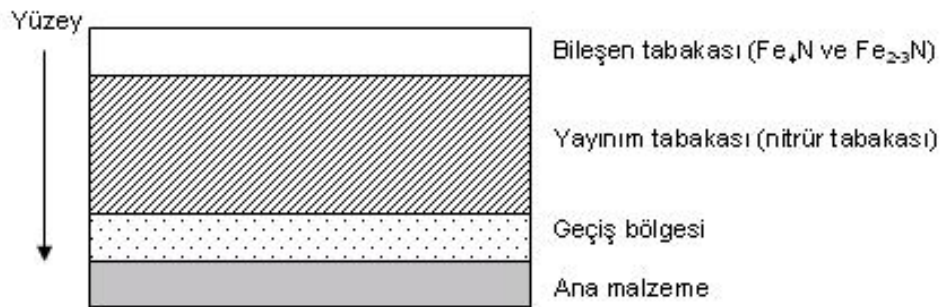
Şekil 2.17. PN ünitesinin şematik gösterimi (Özdemir ve Erten 2005)

PN sonrasında elde edilen yüzeyin mikro yapısı ve tribolojik özellikleri, nitrüleme parametrelerine bağlıdır. Bu parametreler arasında mikroyapı ve tribolojik özellikler üzerinde en etkili olanları, nitrüleme sıcaklığı, nitrüleme süresi, gaz karışım oranı ve nitrülenen malzemenin cinsidir. Alaşım elementlerinin çeliğin nitrülenmesi sonrası sertliğe etkileri Şekil 2.18.'de verilmiştir. (Özdemir ve Erten 2003).



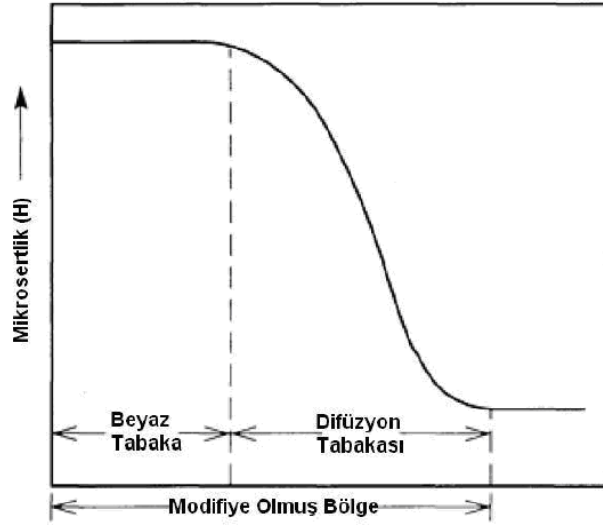
**Şekil 2.18.** Alaşım elementlerinin çeliğin nitrülenmesi sonrası sertliğe etkisi (Özdemir ve Erten 2003)

Nitrülenmiş yüzey bölgesi dış tarafta  $Fe_4N$  ve/veya  $Fe_{2-3}N$  fazlarından oluşan sıkı ve çok ince bir bileşen tabakası, bu bölgenin altında ise azot atomlarının kısmen eridiği daha kalın yayılım tabakası şeklinde iki katmandan oluşur (Şekil 2.19.). Modifiye olmuş bölgenin sertlik dağılımı Şekil 2.20.'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.19.** PN sonrası oluşan içyapılar (<http://www.ermir.com.tr/tr/technical.asp>, 2011)

Sıcaklık, zaman ve gaz karışım oranı gibi parametrelerin değişimine bağlı olarak PN sonrasında bir difüzyon tabakası oluşur. Beyaz tabaka adı verilen diğer bir tabaka ise her zaman olmamakla birlikte oluşabilir (Topçu 2010).



**Şekil 2.20.** Modifiye olmuş bölgenin sertlik dağılımı (Anonim 1991, Anonim 2001)

Beyaz tabaka; karışık bölge düzenli ve pürüzsüz olan kesintisiz bir tabaka nitrürlenmiş malzemenin en dış kısmında kimyasal dağlama işleminden etkilenmeyen, çok ince nitrürler (demir esaslı malzemeler için demir nitür) içeren bir tabakadır. Dağlama işleminden etkilenmediğinden beyaz tabaka olarak adlandırılmıştır.

En üstteki bu tabaka genellikle farklı fazların karışımından ibarettir. Nitrür biçiminde en çok görülen alaşım elementleri (Al, Cr, Mo, V, W, Ti) yukarıda sözü geçen fazlardan biri veya birkaçı olabilir. Bu da sertlik ve mukavemeti artırır.

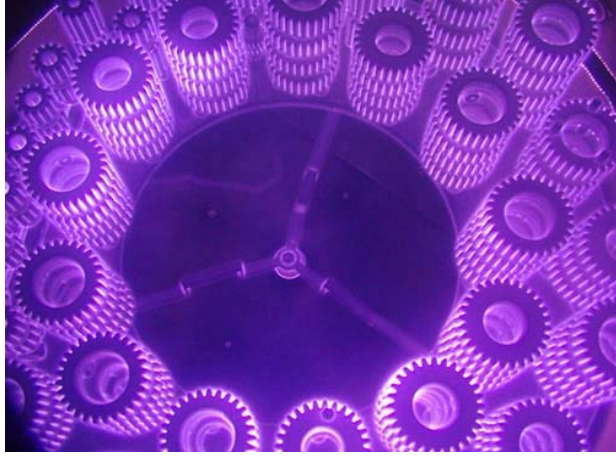
İş parçasının içerdiği alaşım durumuna göre ve işlem değişkenleri değiştirilerek beyaz tabakanın kalınlığı değiştirilebilir. Bu bölge sürtünmeye ve yorulmaya karşı çok yüksek dayanıklılığa sahiptir.

Yapılan çalışmalarda demir esaslı malzemelerde bu tabakanın düşük sıcaklıklarda (400°C'den az) oluşmadığı ve sıcaklıkla doğru orantılı olarak kalınlığının arttığı

gözlenmiştir. Ayrıca zaman da bu tabakanın kalınlığı üzerinde etkili olup, zamanla doğru orantılı olarak kalınlığın arttığı gözlenmiştir. Tabaka oluşum ve kalınlığına sadece sıcaklık ve zaman değil, kullanılan gaz kompozisyonlarının etkisi de oldukça fazladır. PN ile bu tabaka gayet hassas olarak kontrol edilebilir. Örneğin  $N_2+H_2$  gazı kullanılarak beyaz tabaka kalınlığı azaltılabilir.  $H_2$  gazı saçılmayı arttırarak yüzeyi temizler, yani beyaz tabaka kalınlığının azalmasını, hatta yok olmasını sağlar.

Beyaz tabaka altındaki difüzyon tabakası, çok ufak ve sık dağılmış sert nitrür fazları ihtiva eder. Geleneksel nitrüleme yöntemlerinde azot atomları daha yüksek enerjili bölgeler olan tane sınırlarına difüze olurlar ve buralarda karbür fazları bulunması halinde bu fazlar ile birleşerek çok gevrek olan karbonitrürleri oluştururlar. Bunun neticesinde difüzyon tabakasının gerilmelere olan hassasiyeti büyük ölçüde artmış olur. Diğer taraftan PN işleminde karbonsuz nitrüleme gazı kullanılarak ve karbon saçılması uygulayarak yüzey ve yüzeye yakın yerlerde karbon azalması sağlamak mümkündür. Bunun sonunda gevrek karbonitrür fazları iç kısımlara doğru itilerek yüzeyin aşınmaya ve yorulmaya dayanımı artar. Difüzyon tabakası oluşumu da zamanın ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Sıcaklık ve zamanın artışına bağlı olarak tabaka kalınlığı artmaktadır. Bu bölge yüzeyden çekirdek malzemeye bir geçiş sağlar. Difüzyon bölgesi malzeme cinsine ve işlem parametrelerine bağlı olarak 5-600 $\mu$ m veya daha derinlere inebilir. Nitrüleme ile ulaşılabilecek sertlik değeri alaşım elementlerinin cinsi ve miktarına bağlı olmak üzere martenzitik yapıdaki sertlikten daha yüksek olabilmektedir (Singh ve Alphonsa 2005).

Şekil 2.21. ve 2.22.'de PN işlemi esnasında malzemelerin görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 2.21.** SAE 1050 çeliğinden imal edilmiş dişlilerin PN işlemi sırasındaki görüntüsü (Topçu 2010)



**Şekil 2.22.** Dizel araçlarda kullanılan krank millerin PN işlemi sırasındaki görüntüsü (Topçu 2010)

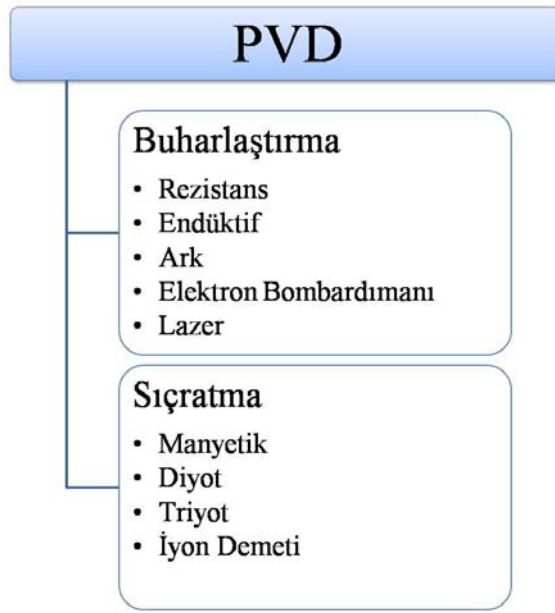
### **2.5.2 PVD kaplama**

PVD (Physical Vapour Deposition – Fiziksel Buhar Biriktirme) yöntemi ile yapılan kaplama yöntemleri atomik düzeyde biriktirme yöntemleridir. PVD yöntemi; kaplama malzemesi sıvı ya da katı halden atom ya da molekül formda buharlaştırılarak, vakum ya da düşük basınç altında bulunan yüzeye biriktirilmesi yolu ile gerçekleştirilir (Anonim 1994).



Vakum ortamında katı veya sıvı halde bulunan malzemelerin buharlaştırılarak veya sıçratılarak atomlarının yüzeyden koparılması ve kaplanacak olan temel malzeme yüzeyine atomsal veya iyonik olarak biriktirilmesi esasına dayanan PVD kaplama yöntemi “Buharlaştırma” ve “Sıçratma” olmak üzere iki grupta incelenmektedir.

Şekil 2.23’te PVD kaplama yöntemleri görülmektedir (Holmberg ve Matthews 1998).

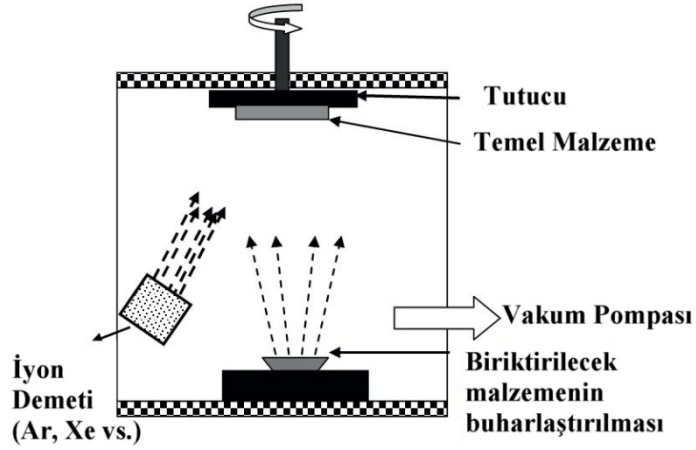


Şekil 2.23. PVD kaplama yöntemleri (Holmberg ve Matthews 1998)

Buharlaştırma ve sıçratma yöntemleri aracılığı ile elde edilen gaz fazının, ortama verilen reaktif gaz ile reaksiyona geçirilmesi durumunda, buharlaştırma yöntemi “reaktif buharlaştırma”, sıçratma yöntemi ise “reaktif sıçratma” adını almaktadır.

Buharlaşan hedef malzemenin, temel malzeme üzerine uygulanan yüksek negatif potansiyel (2-5 kV) ve vakum odasına verilen gaz neticesinde oluşan ışılı boşalma etkisine (glow discharge) maruz kalarak iyonize olması ve bu iyonların temel malzeme üzerine biriktirilmesi sonucunda elde edilen kaplamaya ise iyon kaplama adı verilmektedir (Oktay 2007).

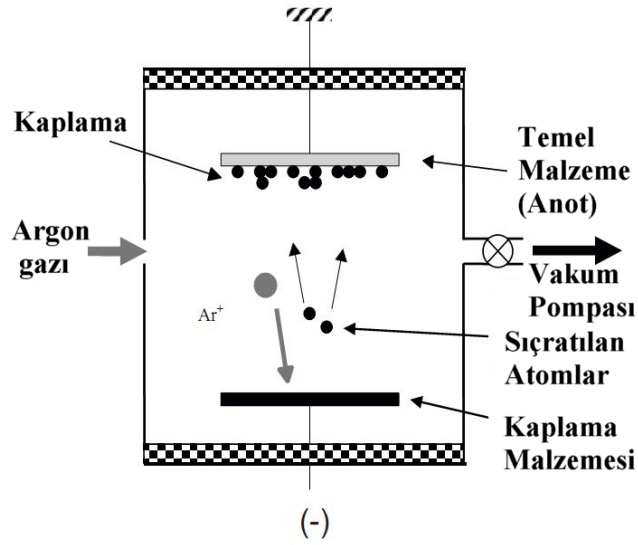
Buharlaştırma işlemi kullanılarak elde edilen PVD kaplamalar ark, rezistans, indüksiyon, elektron bombardımanı ve lazer ile buharlaştırma olarak gruplandırılmaktadır (Holmberg ve Matthews 1998). Buharlaştırma yöntemine bir örnek Şekil 2.24.'te gösterilmiştir.



**Şekil 2.24.** İyon demeti destekli buharlaştırma (Takadoum 2008)

Sıçratma yöntemi, hedef malzeme yüzeyinin, genellikle plazma veya iyon tabancası aracılığı ile hızlandırılmış atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonlarıyla bombardıman edilerek, atomların yüzeyden sıçratılması ve hedef malzeme yüzeyinden koparılan atomların buhar fazına geçerek temel malzeme üzerine biriktirilmesi esasına dayanır. Sıçratma işleminde, genellikle pozitif yüklü argon gazı iyonları kullanılmaktadır. Şekil 2.25'te sıçratma yöntemi ve sıçratma mekanizması şematik olarak gösterilmektedir. Sıçratma yöntemi, ısı kullanılmadan momentum transferi aracılığı ile buharlaşmanın gerçekleştiği bir PVD kaplama tekniğidir (Oktay 2007).

Sıçratma yöntemi, katodik ark yönteminde görülen kaplama yüzeyini bozan dropletlerin oluşmaması, hedef malzeme ile aynı özellikte kaplamaların elde edilebilmesi, sisteme sıçratma amacıyla verilen soygazlar haricinde reaktif gazlar verilerek bileşik kaplamaların elde edilebilmesi gibi avantajlara sahiptir (Holmberg ve Matthews 1998).



**Şekil 2.25.** PVD kaplamada sıçratma yöntemi (Takadoum 2008)

Sıçratma tekniğinin en önemli dezavantajı sıçratma amacıyla kullanılan enerjinin ancak %1'inin sıçratma işlemini gerçekleştirmesidir. Bunu önlemek için iyonların hedefe çarpma açısı  $70^\circ$  den düşük tutulur.

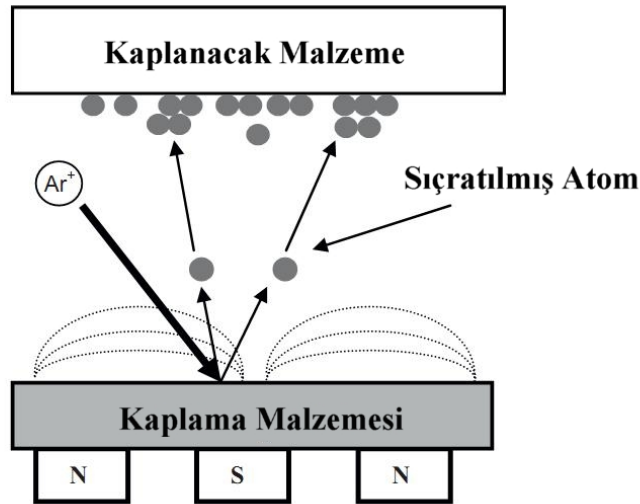
Sıçratma tekniğinde aşağıdaki etkenler kaplama hız ve özelliklerine doğrudan etki eder:

- Sistem geometrisi
- Kaynak-Hedef uzaklığı
- Kullanılan soygazın saflığı
- Hedef malzemenin sıcaklığı
- Ortam temizliği

Sıçratma yönteminde, buharlaştırma yöntemine göre basınç yüksek olmasına rağmen çekirdeklenme ve çekirdek gelişimi hemen hemen aynıdır. Sıçrayan atomlar kaplanacak parça yüzeyine ulaştıklarında ortalama kinetik enerjileri 10-40 eV 'tur. Buharlaştırma yönteminde ise bu 0.3-1 eV civarındadır. Sıçratma tekniği kullanılan PVD sistemleri uygulanabilirlik açısından çok geniş kullanım alanı bulmuştur. Bu yöntemler kullanılarak manyetik ve optik kayıt üniteleri, çok katlı elektronik kaplamalar, ayna ve filtreler için çok katlı optik kaplamalar, antirefle ve reflekte kaplamalar, güneş ve radyasyon filtreleri, elmas benzeri kaplamalar, performans artırıcı kaplamalar ve dekoratif kaplamalar imal edilebilir.

Sıçratma yöntemi diyot, triyot, iyon demeti ve manyetik alanda sıçratma olmak üzere dört grupta incelenmektedir. Plazma içindeki iyonlaşma etkisinin ve biriktirme hızının düşük olması, işlem sırasında temel malzemenin ısınarak yüksek sıcaklık değerlerine çıkması, sıçratma tekniğinin kullanım alanlarını 1970’li yılların ortalarına kadar sınırlamıştır. Manyetik alanda sıçratma yönteminin kullanılmaya başlanması ile ise, bu olumsuzluklar büyük ölçüde ortadan kalkmıştır. Manyetik alanda sıçratma yönteminde mıknatıslar ve elektrik enerjisi etkisi ile kaplama malzemesinin önünde plazma oluşturulur. Mıknatıslar aracılığı ile oluşan manyetik alan, kaplama malzemesinin yüzeyine yakın elektronların toplanmasını, bu şekilde iyonlaşma ve sıçratma hızında artış gerçekleşmesini sağlamaktadır. Plazma içinde hızlandırılan iyonlar, kaplama malzemesinin yüzeyinden atom ve moleküllerin sıçratılmasını ve daha sonra temel malzeme üzerine birikmesini sağlamaktadır (Holmberg ve Matthews 1998, İnçal 2007, Oktay 2007).

Manyetik alanda sıçratma yönteminin prensibi Şekil 2.26’da görülmektedir.



Şekil 2.26. Manyetik alanda sıçratma yöntemi (Takadoum 2008)

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1 Materyal

Deneyleerde kullanılmak üzere ASSAB firmasından iki farklı sıcak iş takım çeliği temin edilmiştir. Çeliklerin kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.1.'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Deneyleerde kullanılan çeliklerin kimyasal kompozisyonları (% ağırlık)

Malzeme	ASSAB Ürün Adı	DIN	AISI	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
	Uddeholm Orvar Supreme	1.2344	H13	0,39	1,00	0,40	5,30	1,40	0,90
	Uddeholm QRO 90 Supreme	ASSAB Patenti		0,38	0,30	0,75	2,60	2,30	0,90

Malzemeler talaşlı imalat payları da göz önüne alınarak temin edilmiş Orvar Supreme Ø28 mm, QRO 90 ise Ø26 mm olmak üzere tornada tezgahında işlenmiş ve 20 mm kalınlığında kesilmiştir.

Ball on disk aşınma testinde kullanılan tungsten karbür (WC/Co) bilyelerin özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Tungsten Karbür bilyenin özellikleri

Tungsten Karbür (WC)	%93,5 - %94,5
Kobalt (Co)	%5,5 - %6,5
Çap (Ø)	5 mm
Grade	25
Çekme Dayanımı	1517 MPa
Basma Dayanımı	5171 – 5447 MPa
Elastisite Modülü	~634 – 641 GPa
Poisson Oranı	0,26
Yoğunluk	14,95 g/cm <sup>3</sup>

## 3.2 Yöntem

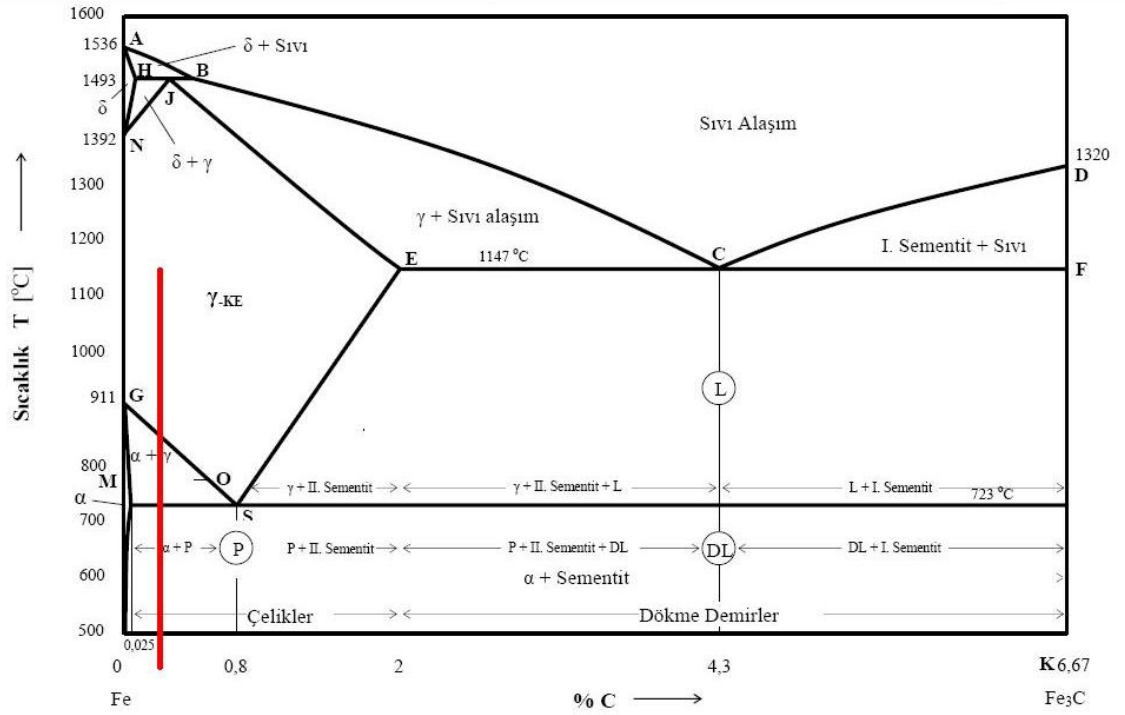
### 3.2.1 Isıl işlemler

Çeliklere uygulanan farklı ısıl işlemler ve yüzey işlemleri için yapılan kodlamalar Çizelge 3.3.'te verilmiştir. Genel olarak Uddeholm Orvar Supreme S, Uddeholm QRO 90 Supreme Q şeklinde kodlanmıştır.

**Çizelge 3.3.** Numune kodları

ASSAB Ürün Adı	Numune Kodu	İşlem
Uddeholm Orvar Supreme	S00	Başlangıç malzemesi
	S10	Islah edilmiş
	S11	Islah + PVD (CrN)
	S12	Islah + PVD (TiAlN)
	S20	Islah + PN
	S21	Islah + PN + PVD (CrN)
	S22	Islah + PN + PVD (TiAlN)
Uddeholm QRO 90	Q00	Başlangıç malzemesi
	Q10	Islah edilmiş
	Q11	Islah + PVD (CrN)
	Q12	Islah + PVD (TiAlN)
	Q20	Islah + PN
	Q21	Islah + PN + PVD (CrN)
	Q22	Islah + PN + PVD (TiAlN)

Çeliklerin karbon oranları birbirine çok yakındır. Demir karbon denge diyagramındaki yaklaşık yerleri Şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.1.** Çeliklerin demir karbon denge diyagramındaki yerleri

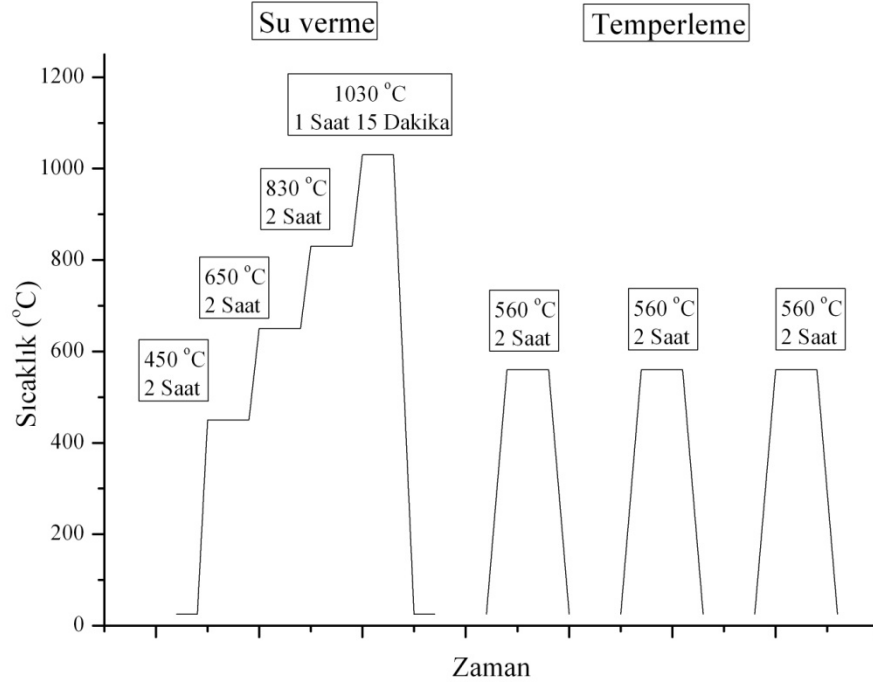
İslah işlemi ASSAB Isıl İşlem Firmasında yaptırılmıştır.

Isıl işlemler gerçekleşmeden fırında önce vakum ortamı sağlanmış, sonrasında ortama takviye edilen azot ile birlikte ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir.

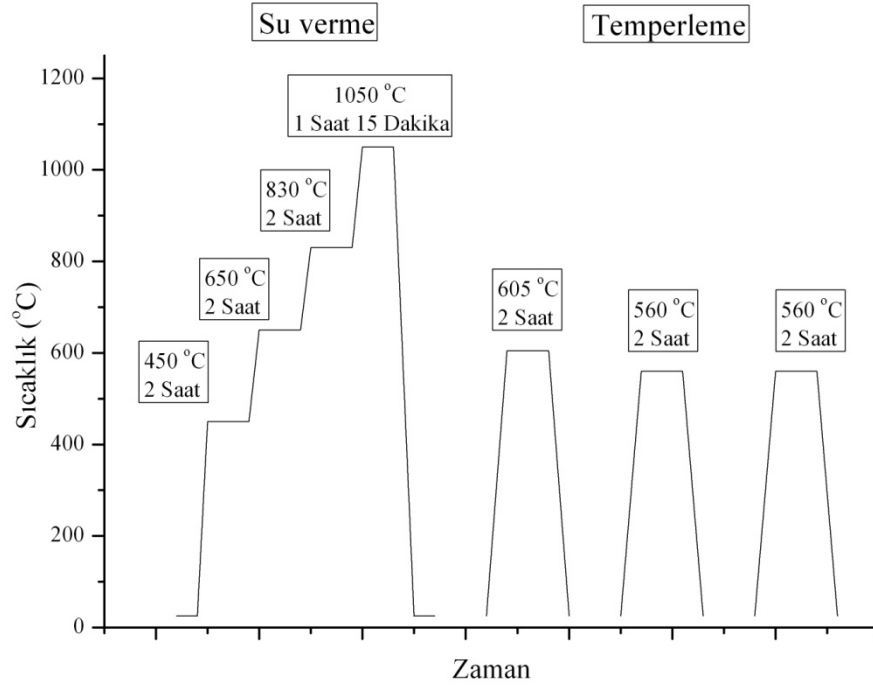
S grubu için su verme işlemi; 450°C, 650°C ve 830°C’de ikişer saat ön ısıtma ile 1030°C’de 75 dakika bekleme sonrası 4 bar basınçta azot gazı ile soğutma sağlanmıştır. Temperleme işlemi ise 560°C’de ikişer saat 3 kez tutularak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2.).

Q grubu için su verme işlemi; 450°C, 650°C ve 830°C’de ikişer saat ön ısıtma ile 1050°C’de 75 dakika bekleme sonrası 4 bar basınçta azot gazı ile soğutma sağlanmıştır. Temperleme işlemi ise 605°C’de 2 saat ve 560°C’de ikişer saat 2 kez tutularak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3.).

İslah sonrası alınan raporda, malzemelerin teslim sertlikleri S grubu için 54-55 HRc, Q grubu için 50-52 HRc olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.2. S kodlu çelikler için ıslah parametreleri



Şekil 3.3. Q kodlu çelikler için ıslah parametreleri



### 3.2.2 Plazma nitrürleme

Sıcaklıkla difüzyonun hızlandığı ve buna bağlı olarak plazma nitrürleme (PN) sıcaklığının difüzyon tabakası kalınlığını arttırdığı literatürden bilinmektedir (Mahboubi ve Abdolvahabi 2006). PN işlem sıcaklığını belirlerken dikkat edilmesi gereken bir diğer husus çeliğin temperleme sıcaklığıdır. Temperleme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda uzun süre tutmak da aşırı temperlenmeyi doğurur. Bu bilgilerin ışığında PN işlem sıcaklığı olarak 500 °C olarak belirlenmiştir.

PN'de işleminde gaz ve gaz oranları olarak, H<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub> gazları ve ¼ (H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>) olarak belirlenmiştir.

PN işlem basıncının belirli bir ideal değeri olmamakla beraber 130-1300 Pa aralığında malzeme cinsi ve geometrisine bağlı olarak seçilebilir (Anonim 1991, Korkmaz 2009). Bu çalışmada PN işlemleri 250 Pa basınç altında yapılmıştır.

Tüm numunelere 10 saat süreyle PN işlemi uygulanmıştır. PN parametreleri Çizelge 3.4.'te verilmiştir.

**Çizelge 3.4.** Plazma nitrürleme parametreleri

Sıcaklık	Süre	Gaz oranları	Basınç
500 °C	10 Saat	H <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> (¼)	250 Pa

PN işlemleri, Er&Mir Tekstil Makine San. Tic. Ltd. Şti.'de Plateg PP60 Puls Plazma Nitrürleme Cihazı kullanılarak yapılmıştır.

### 3.2.3 PVD kaplama

İslah edilmiş ve plazma nitrürlenmiş gruplar CrN ve TiAlN olmak üzere iki farklı PVD kaplama işlemine tabi tutulmuştur.

CrN kaplamalar Ionbond Tinkap, TiAlN kaplamalar ise Oerlikon Balzers'e ticari olarak yaptırılmıştır. Firma kataloglarından alınan kaplama bilgileri Çizelge 3.5.'te verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** PVD kaplama katalog bilgileri

	Kaplama kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Sürtünme katsayısı	Mikro sertlik (HV)	Kaplama rengi
Ionbond (CrN)	1-4	0,40	2400-2600	Gümüş
Oerlikon Balzers Balinit Futura Nano (TiAlN)	Uygulamaya bağlı	0,30-0,35	3300	Mor- Gri

### 3.2.4 Pürüzlülük ölçümleri

Numunelere uygulanan işlemlerin yüzey pürüzlülüklerine etkisini belirlemek için pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Ölçümlerde; örnek (kesim) uzunluğu 0.8 mm ve örnek sayısı 5 olmak üzere ölçüm uzunluğu 4 mm olarak alınmıştır. Tüm pürüzlülük değerleri için 3 farklı ölçüm yapılmış ve bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınmıştır. Ölçümler için TR200 portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.4.).



**Şekil 3.4.** TR200 portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

İslah işlemi sonrasında numuneler, SiC su zımparası ve alümina solüsyonlar kullanılarak belirli bir pürüzlülük değeri elde edilmiştir. Bu şekilde PN işleminin pürüzlülüğe etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

PN sonrasında ise PVD kaplamaların daha iyi tutunabilmesi ve daha kaliteli bir kaplama elde edilebilmesi için pürüzlülük değerleri tekrar zımparalama ve parlatma işlemleriyle düşürülmüş ve PVD kaplamaların pürüzlülüğe etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

### 3.2.5 Sertlik ölçümleri

Sertlik ölçümleri Vickers yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Tüm ölçümlerde Mikrovickers sertlik ölçüm cihazı kullanılmış, 25 g yük ve 10 s bekleme ile ölçümler alınmıştır.

PVD kaplanmış numunelerin kaplama sertlikleri yüzey bölgesinden ölçülmüştür. Plazma nitrülenmiş numunelerde metalografik muayene için hazırlanan numunelerden sertlik dağılımları ölçülmüştür. Sertlik dağılımı ölçümlerinde yüzeyden itibaren 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150, 200 ve 400 µm mesafeden sertlik ölçümleri alınmıştır.

Her bir sertlik değeri için beş ayrı ölçüm yapılmış ve bunların aritmetik ortalaması alınmıştır. Ayrıca, ölçümlerin istatistik hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplanan bilgiler aşağıda listelenmiştir:

**Standart sapma,  $\sigma$**  : Veri değerlerinin aritmetik ortalamadan ( $\bar{X}$ ) farklarının karelerinin toplamının ortalamasının kareköküdür ( $\sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$ ).

**Standart hata** : Aritmetik ortalamada oluşan hatanın bir ölçüsüdür ( $\sigma/\sqrt{n}$ ).

**Varyasyon katsayısı** : Standart sapmanın ortalamaya göre yüzde kaçlık bir değişim gösterdiğini belirtir ( $(\sigma/\bar{X}).100$ ).

**Ranj** : Veri değerleri içerisinde en büyük ve en küçük değer arasındaki farktır ( $X_{maks} - X_{min}$ ).

### 3.2.6 Aşınma deneyleri

Aşınma deneyleri ball-on-disk cihazında kuru sürtünme şartlarında yapılmıştır. Sürtünme hızı 4,45 mm/s ve yük 5,82 N olarak belirlenmiştir. Veritabanının sıkışma durumu göz önüne alınarak veri alma aralığı 12 s seçilmiş, her turda aynı yerden veri

almak için de iz çapı 17 mm tutulmuştur. Deney boyunca aşınma ürünleri ortamdan uzaklaştırılmamıştır.

5,82 N için maksimum ve ortalama Hertz temas basınçları  $P_{maks} = 1,76$  GPa ve  $P_m = 1,16$  GPa olarak hesaplanmıştır.

### **3.2.7 Optik mikroskop çalışmaları**

Metalografik muayene için numuneler yüzeye dik yönde kesilmiş ve bakalite alınmıştır. Sırasıyla 180, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 no'lu su zımparası ile zımparalanmıştır. Daha sonra 1  $\mu\text{m}$  ve 0,3  $\mu\text{m}$ 'luk alümina parlatma solüsyonları ile parlatılmıştır. Dağlama işlemi için %3'lük Nital kullanılmıştır.

Clemex görüntü analiz sistemi ve Nikon LE150 marka optik mikroskop kullanılarak mikro yapı görüntüleri kaydedilmiştir. Islah ve PN işlemi görmüş numunelerden X200, PVD kaplanmış numunelerden X1000 büyütmede görüntüler alınmıştır.

Moticam 1000 görüntü analizi ve Nikon Optiphot marka optik mikroskop kullanılarak aşınma izleri de incelenmiştir. Aşınma izleri X100 büyütmede görüntülenmiştir.

Tüm optik mikroskop görüntüleri Bölüm 4'te verilmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 4.1 Pürüzlülük Değerleri

Deneysel çalışmalarda kullanılan 30 mm ve 28 mm çaplı malzeme boydan tornalanıp kesildikten sonra (ıslah işleminden önce) taşlamaya tabi tutulmuş ancak ıslah sonrası pürüzlülük değerlerinin ciddi şekilde değişmesinden ve bu değişimin önem arz etmemesinden dolayı pürüzlülük değerleri ölçülmemiştir.

Islah edilmiş numuneler taşlanmış ve pürüzlülükleri  $R_a = \sim 0,900 \mu\text{m}$  ölçülmüştür. Ardından SiC su zımparası ile zımparalanmış,  $1 \mu\text{m}$  ve  $0,3 \mu\text{m}$ 'luk alümina solüsyon kullanılarak parlatılmıştır. Bu aşamada yüzey pürüzlülükleri Q10 için  $R_a = \sim 0,029 \mu\text{m}$ , S10 için  $R_a = \sim 0,040 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.

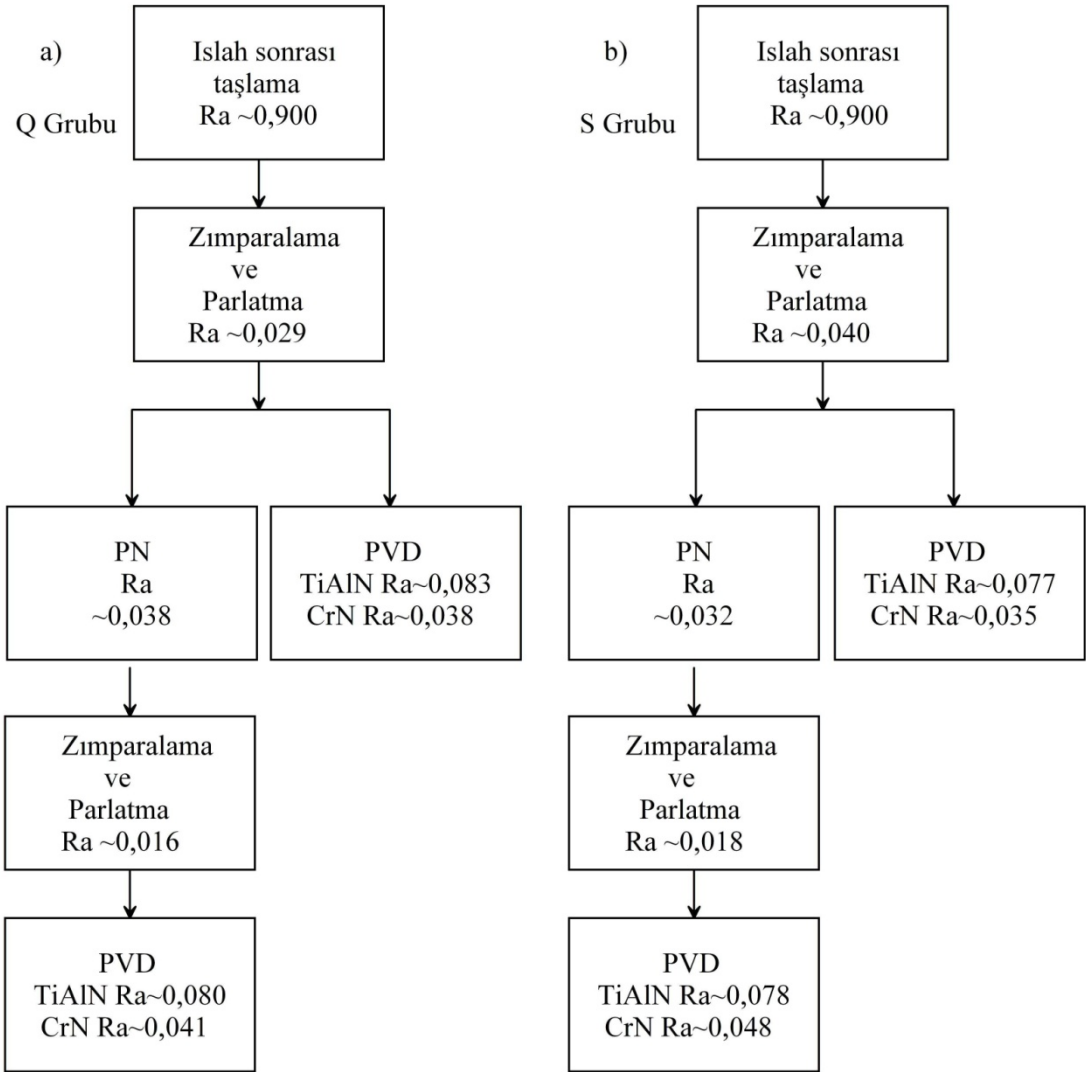
PN işlemi sonrasında numunelerin pürüzlülükleri Q20 için  $R_a = \sim 0,032 \mu\text{m}$ , S20 için  $R_a = \sim 0,038 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.

Q11 için  $R_a = \sim 0,038 \mu\text{m}$ , S11 için  $R_a = \sim 0,035 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Q12 için  $R_a = \sim 0,083 \mu\text{m}$ , S12 için  $R_a = \sim 0,077 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.

PN+PVD kaplama uygulanacak numunelerde PN işlemi sonrasında; çok az miktarda da olsa beyaz tabakanın ve gözenekli kısımların giderilmesi, aynı zamanda da pürüzlülüğün düşürülmesi ve düzgün bir difüzyon tabakası üzerine kaplama yapabilmek için yüzey zımparalanıp parlatılmıştır. PVD kaplama sertliklerine kıyasla yumuşak bir zemin (ıslah edilmiş vb.) üzerine yapılacak kaplama sertlik açısından uyumsuzluk yaratacak ve kaplamadan tam olarak faydalanılamayacaktır. Bu yüzden PN gibi bir geçiş bölgesi oluşturmak kaplamanın servis süresini uzatacaktır (Björk ve ark. 2001). Bu aşamada da SiC su zımparası ile zımparalama,  $1 \mu\text{m}$  ve  $0,3 \mu\text{m}$ 'luk alümina solüsyon kullanılarak parlatma işlemleri uygulanmıştır. Parlatma işlemi sonunda Q20 için  $R_a = \sim 0,016 \mu\text{m}$ , S20 için  $R_a = \sim 0,018 \mu\text{m}$  pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.

Q21 için  $R_a = \sim 0,041 \mu\text{m}$  ve S21 için  $R_a = \sim 0,048 \mu\text{m}$  olarak pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Q22 için  $R_a = \sim 0,080 \mu\text{m}$  ve S22 için  $R_a = \sim 0,078 \mu\text{m}$  pürüzlülük değerleri ölçülmüştür.

Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen işlemler ve bu işlemler sonucu ölçülen yüzey pürüzlülükleri Şekil 4.1.'de verilmiştir.



**Şekil 4.1.** Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen işlemler ve ölçülen yüzey pürüzlülükleri a) Q grubu b) S grubu

Pürüzlülük ölçümlerinde göze çarpan ilk nokta; gerek ıslah üzerine gerekse PN üzerine yapılan PVD kaplamalarda TiAlN kaplamaların yüzey pürüzlülüklerinin CrN

kaplamalardan daha yüksek olmasıdır. Björk ve ark. (1999) çalışmasında; AISI H13 çeliğini tuz banyosunda nitrülemiş, TiN, CrN ve TiAlN PVD kaplamaları ile sertleştirilmiş yüzeyler elde etmiş ve bu yüzeylerin yüksek sıcaklıkta alüminyum karşısındaki aşınma özelliklerini incelemiştir. TiAlN ve CrN kaplamaların pürüzlülükleri arasındaki bu fark Björk ve ark. (1999) tarafından da tespit edilmiştir.

Batista ve ark. (2001) tarafından PN üzerine PVD kaplamada ıslah üzerine PVD kaplamaya göre daha pürüzlü yüzeylerin oluştuğu bildirilmiştir. Bu çalışmada ise iki durum arasında ciddi bir fark gözlenmemiştir. Bu durum PN sonrası yüzey parlatma işleminin sonucu olarak değerlendirilebilir.

Çetin ve ark. (2007) AISI 420 çeliği kullanarak yaptıkları çalışmada;  $R_a = 0,020 \mu\text{m}$  pürüzlülüğe sahip temel malzeme üzerine 15 saat boyunca ve  $\text{H}_2/\text{N}_2$  (2/1) gaz oranlarında PN işlemi uygulamıştır. İşlem sonrası pürüzlülüğün  $R_a = 0,180 \mu\text{m}$  olduğunu bildirmişlerdir. Gaz oranları da göz önüne alındığında pürüzlülük artışı fazla olmamıştır.

Bu tez çalışmasında PN işlemi sonrasında pürüzlülüğün hemen hemen aynı kaldığı söylenebilir. PN işleminde  $\text{H}_2$  gazının saçılmayı arttırdığı bilinmektedir. Saçılma olayı da pürüzlülüğün artması ile sonuçlanmaktadır. Gaz oranları olarak  $\text{H}_2/\text{N}_2$  (1/4) seçildiğinden saçılmanın azalmasıyla pürüzlülük artışının sınırlandırıldığı söylenebilir.

#### **4.2 Sertlik Değerleri**

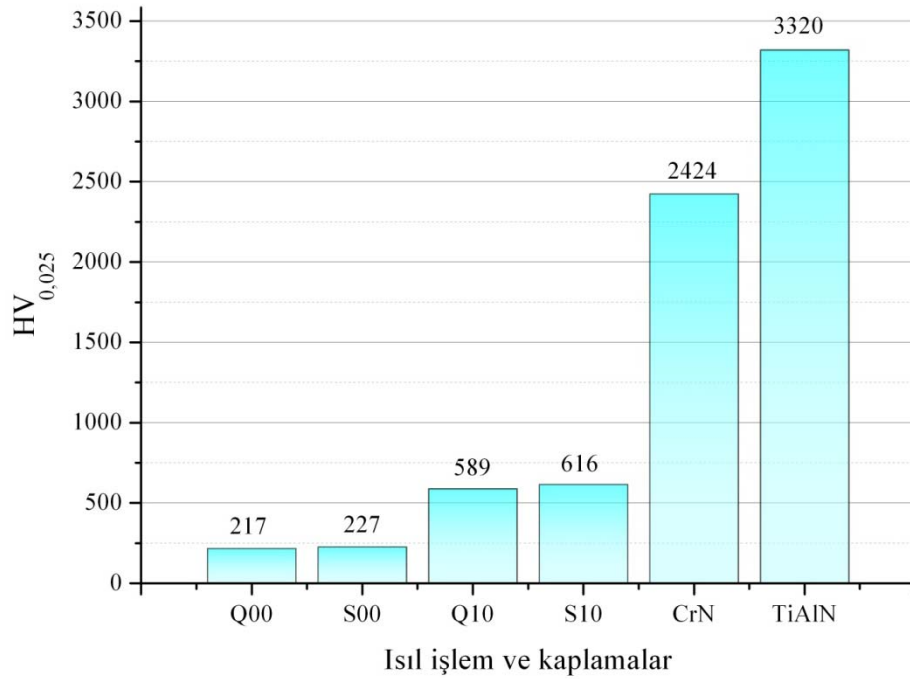
Q00 ve S00 kodlu numunelerin ortalama sertlik değerleri sırasıyla 217 ve 227  $\text{HV}_{0,025}$  olarak ölçülmüştür. Islah sonrasında ölçülen sertlik değerleri ise Q10 için 589  $\text{HV}_{0,025}$  S10 için ise 616  $\text{HV}_{0,025}$  'dir.

Kaplama sertlikleri numune yüzeyinden alınan ölçümlerle yapılmıştır. CrN sertliği 2424  $\text{HV}_{0,025}$  ve TiAlN sertliği 3320  $\text{HV}_{0,025}$  olarak ölçülmüştür. Kaplamaların yaptırıldığı firmaların kataloglarında kaplama sertlikleri CrN ve TiAlN için sırasıyla 2400-2600  $\text{HV}_{0,025}$  ve 3300  $\text{HV}_{0,025}$  olarak verilmiştir.

Başlangıç malzemesi, ıslah sonrası ve kaplama sonrası ölçülen sertlik değerleri, ölçümlerin istatistiki bilgileriyle beraber Çizelge 4.1.'de verilmiştir. Ayrıca aynı numunelerin sertlik değerleri çubuk grafik şeklinde gösterilmiştir (Şekil 4.2.)

**Çizelge 4.1.** Başlangıç malzemesi, ıslah sonrası ve kaplama sonrası numunelerin sertlik değerleri ve istatistiki bilgiler

Numune Kodu	Aritmetik Ortalama (HV <sub>0,025</sub> )	Standard Sapma	Standart Hata	Varyasyon Katsayısı	Ranj
Q00	217	4.80	2.14	2.21	12
S00	227	5.72	2.56	2.52	15
Q10	589	18.72	8.37	3.18	46
S10	616	16.39	7.33	2.66	36
CrN	2424	170.20	76.11	7.02	328
TiAlN	3320	180.05	80.52	5.42	353



**Şekil 4.2.** Başlangıç malzemesi, ıslah sonrası ve kaplama sonrası numunelerin sertlik değerleri

DIN 50 190/3 standardına göre nitrüleme derinliği, çekirdek sertliğinin 50 HV üzerindeki sertliğe karşılık gelen derinlik olarak kabul edilmiştir. Ölçülen değerlerde



interpolasyon yaparak nitrürleme derinlikleri belirlenmiştir. Örneğin; S20 için 400 µm derinlikteki sertlik 425 HV'dir.  $425+50= 475$  HV şeklinde nitrürleme derinliğinin sertliği hesaplanmış ve 150-200 µm aralığında ölçülen değerlerin interpolasyonu ile nitrürleme derinliği 160 µm olarak hesaplanmıştır. Q20 için aynı yöntemle 189 µm nitrürleme derinliği hesaplanmıştır.

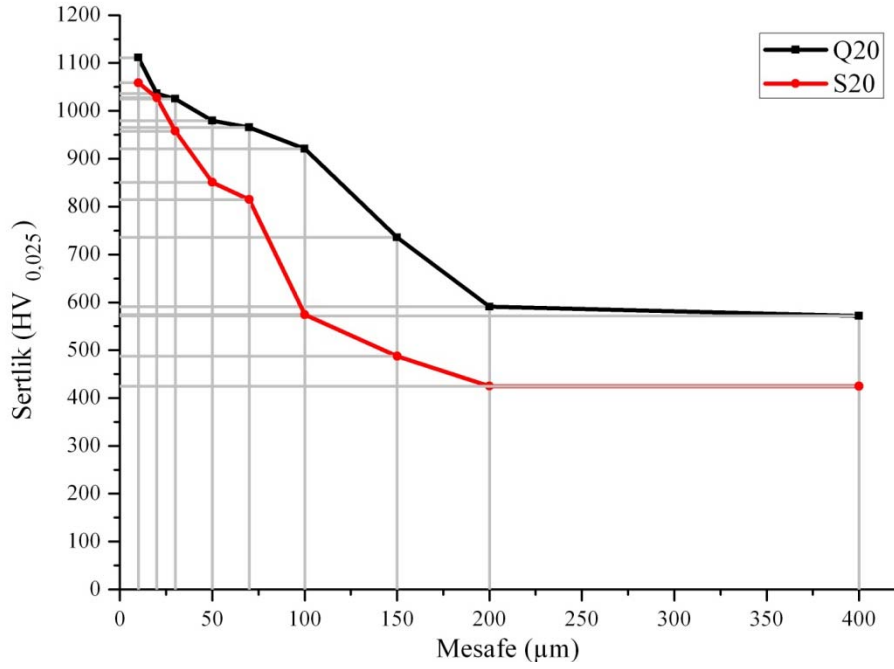
PN işlemi uygulanmış Q20 ve S20 numunelerin sertlik dağılımları ve ölçümlere ait istatistiki bilgiler Çizelge 4.2. ve Çizelge 4.3.'te verilmiştir. Yine Q20 ve S20 numunelerinin sertlik dağılımının eğrileri Şekil 4.3.'de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** PN işlemi uygulanmış Q20 numunesinin sertlik dağılımı ve ölçümlere ait istatistiki bilgiler

Mesafe (µm)	Aritmetik Ortalama (HV <sub>0.025</sub> )	Standard Sapma	Standart Hata	Varyasyon Katsayısı	Ranj
10	1111	33.07	14.79	2.98	86
20	1037	33.50	14.98	3.23	78
30	1025	53.89	24.10	5.26	151
50	980	16.32	7.30	1.67	43
70	966	12.52	5.60	1.30	28
100	921	41.61	18.61	4.52	116
150	736	22.43	10.03	3.05	54
200	591	14.48	6.48	2.45	40
400	572	23.33	10.43	4.08	56

**Çizelge 4.3.** PN işlemi uygulanmış S20 numunesinin sertlik dağılımı ve ölçümlere ait istatistiki bilgiler

Mesafe (µm)	Aritmetik Ortalama (HV <sub>0.025</sub> )	Standard Sapma	Standart Hata	Varyasyon Katsayısı	Ranj
10	1059	44.93	20.09	4.24	109
20	1028	39.23	17.55	3.82	90
30	958	29.71	13.29	3.10	68
50	851	49.91	22.32	5.87	120
70	815	71.95	32.18	8.83	155
100	558	14.18	6.34	2.54	37
150	488	24.31	10.87	4.99	62
200	425	27.06	12.10	6.37	64
400	425	8.26	3.70	1.95	21



**Şekil 4.3.** Q20 ve S20 numunelerin sertlik dağılımları

### 4.3 Mikroyapılar

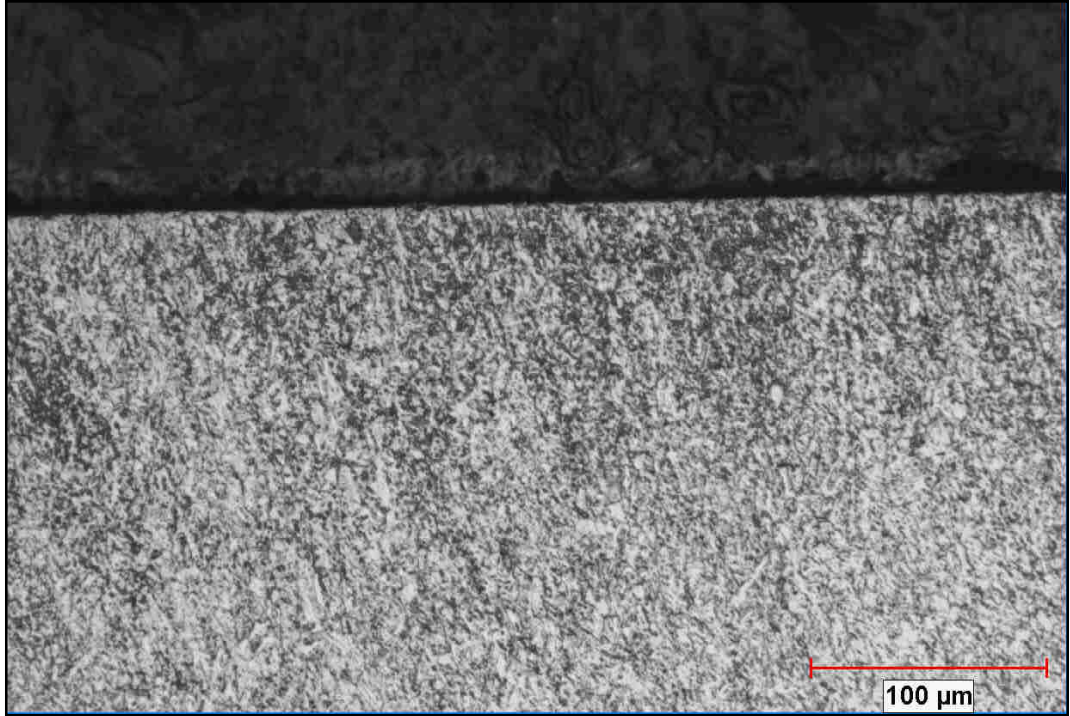
Sıcak iş takım çeliklerinde Cr, Mo, V gibi karbür yapıcı elementler bulunduğu başlangıç numunelerinde yoğun şekilde Cr, Mo ve V elementlerinin oluşturduğu karbür fazları görülmektedir (Şekil 4.4., Şekil 4.5.). İslah sonrası içyapılar başlangıç daha ince tanelerden meydana gelmektedir. Ayrıca Q10 numunesinin S10 numunesinden daha ince tanelere sahip olduğu Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.'de görülmektedir.

CrN kaplanmış numunelerde kaplama kalınlıkları 1 ila 2 µm arasında değişmekle birlikte düzgün bir dağılıma sahip olmadığı görülmüştür. TiAlN kaplamalarda ise 3,5 ila 5 µm arasında kaplama kalınlığı ölçülmüş olup CrN kaplamalara göre daha düzgün bir kaplama yüzeyi elde edilmiştir. PVD kaplanmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.8. - 4.15. aralığında verilmiştir.

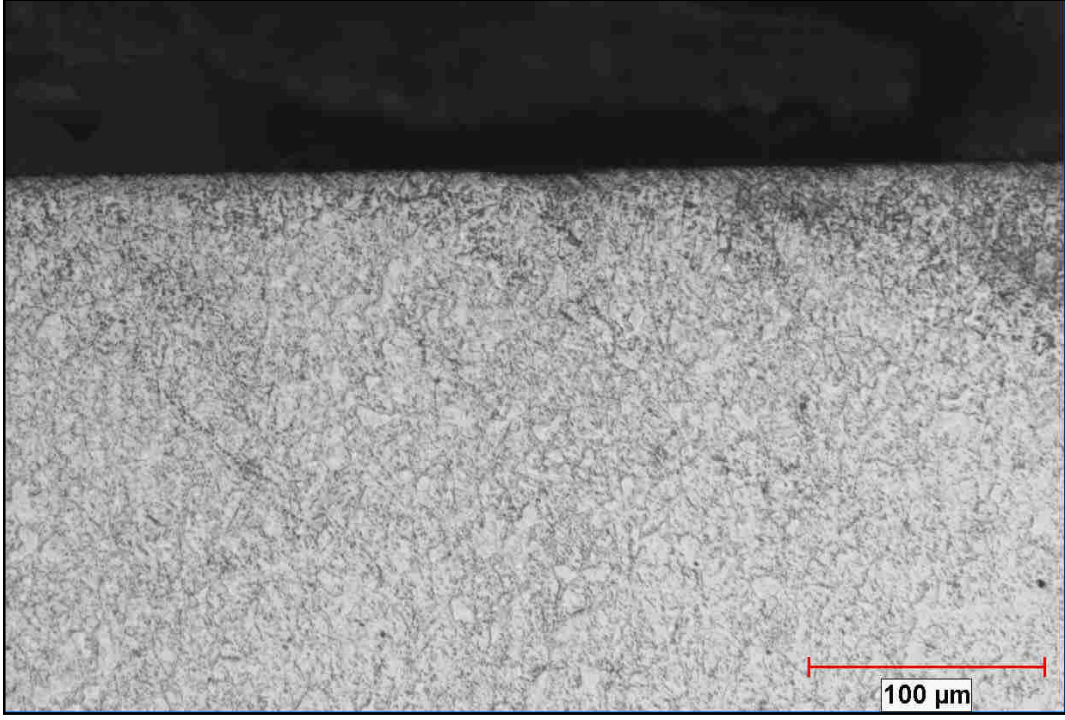
Beyaz tabaka, yüzeyden sıçratılan Demir atomlarının Azot atomlarıyla yüzeye yakın bölgede birleşerek Fe-N fazlarını ( $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N ve  $\gamma$ -F<sub>4</sub>N) oluşturması ile meydana gelir. Q20 ve S20 numunelerinde az miktarda beyaz tabaka oluşmuştur. Bunun sebebi olarak düşük işlem basıncı (250 Pa), çelik kompozisyonunda Cr gibi Azot'un afinitesinin

yüksek olduğu alaşım elemanlarının bulunması ve yüzeyde oluşan sıçratmanın etkisi gösterilebilir (Schacherl 2004, Çarkıt Aydın 2009). D2 çeliğine PN işleminin uygulayan Aydın ve ark. (2010) tarafından da yakın parametrelerde benzer beyaz tabaka özellikleri elde edilmiştir.

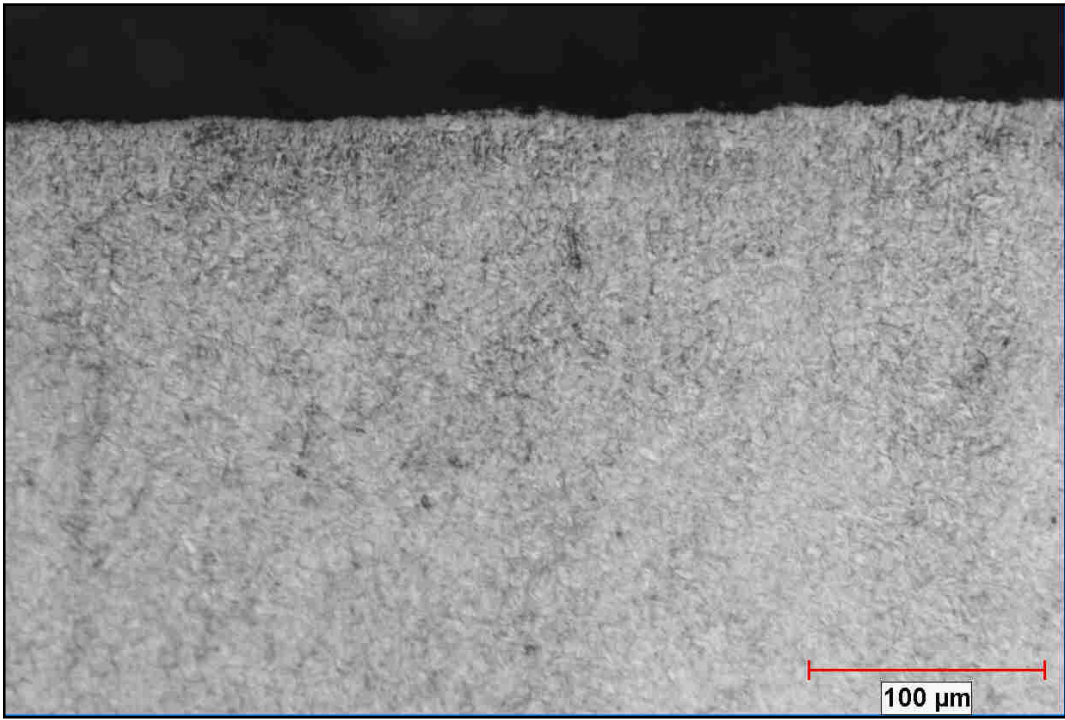
Her iki numunede de difüzyon bölgeleri belirgindir. Q20 ve S20 numunelerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.16. ve 4.17.'de verilmiştir.



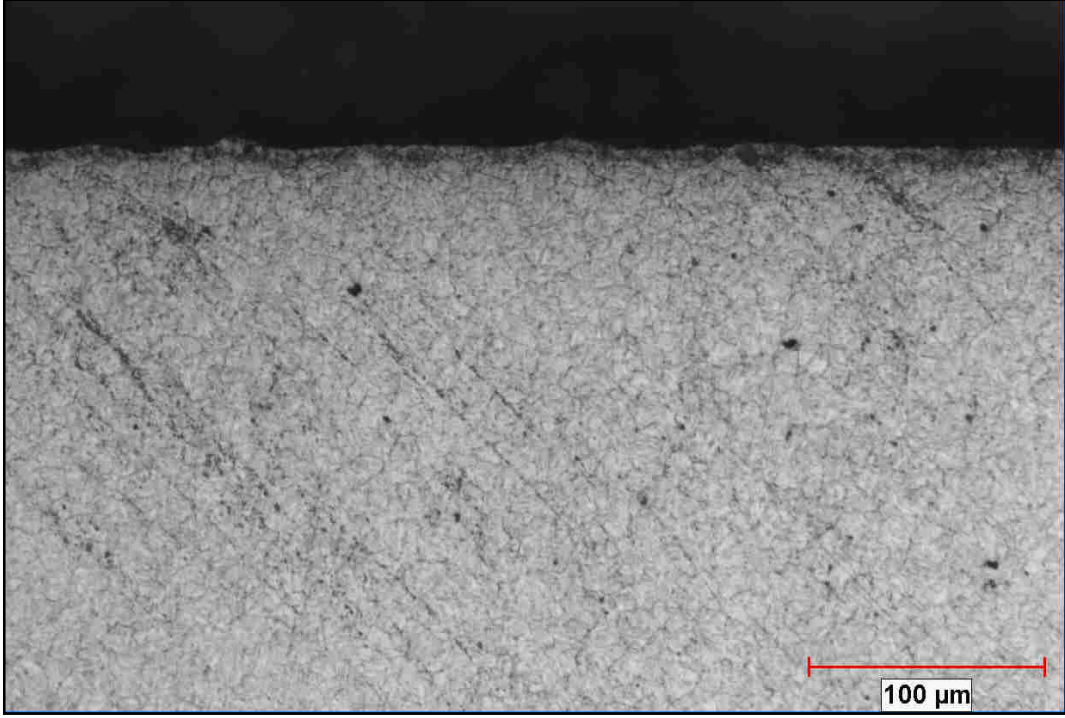
**Şekil 4.4.** Q00 numunesinin x200 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü



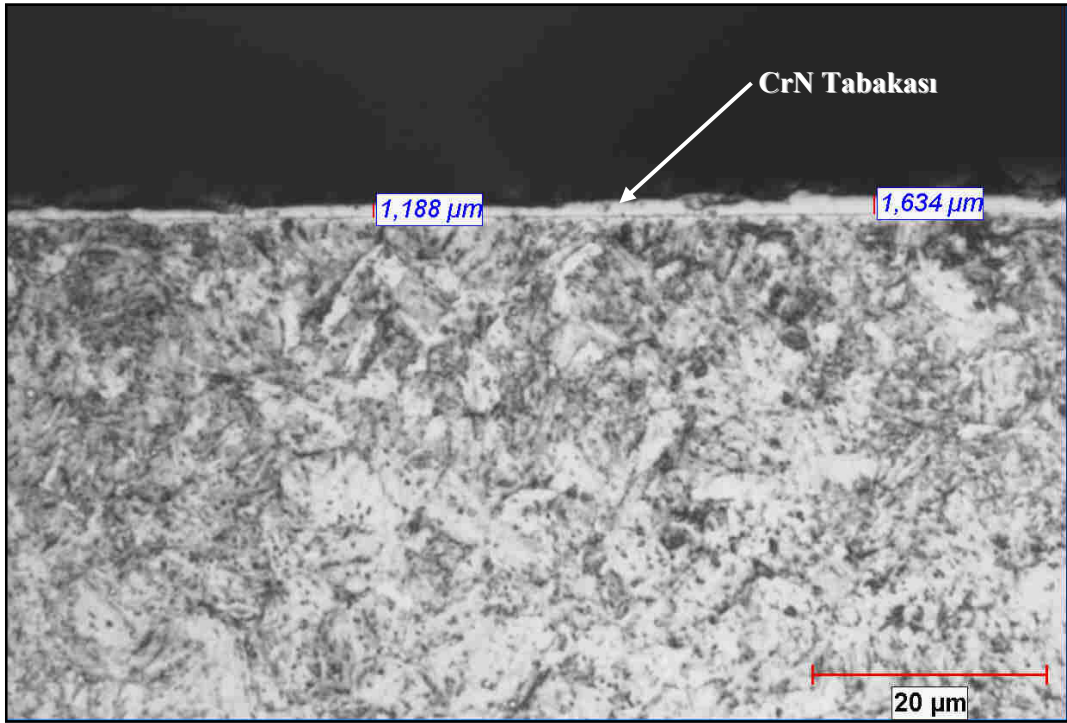
Şekil 4.5. S00 numunesinin x200 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü



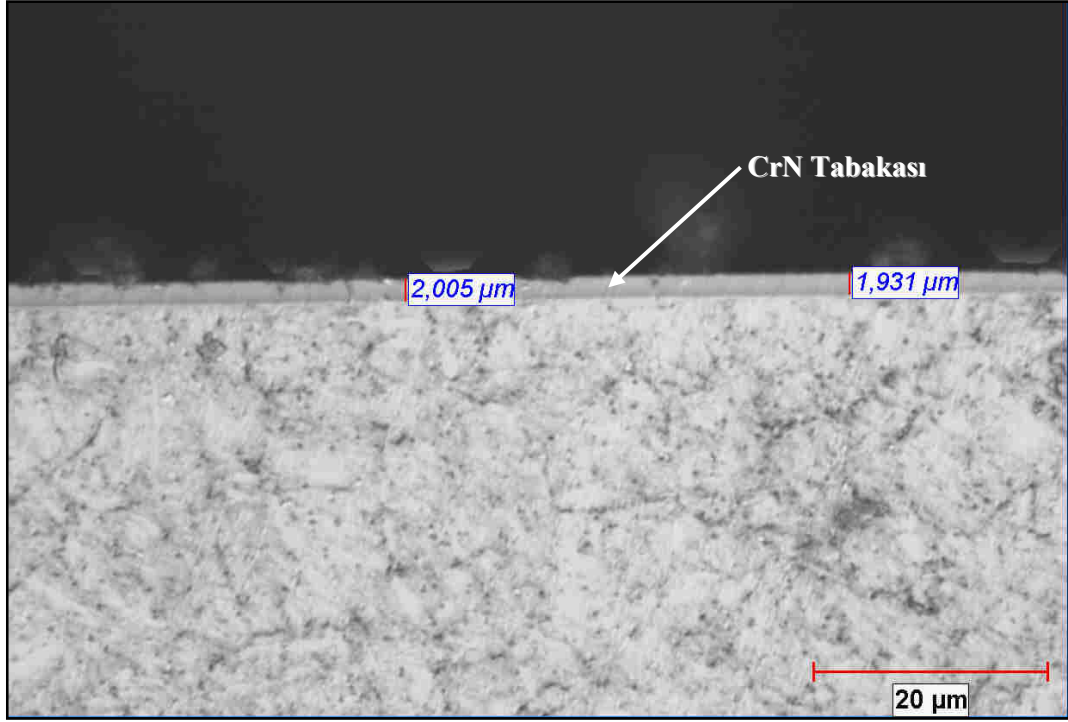
Şekil 4.6. Q10 numunesinin x200 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü



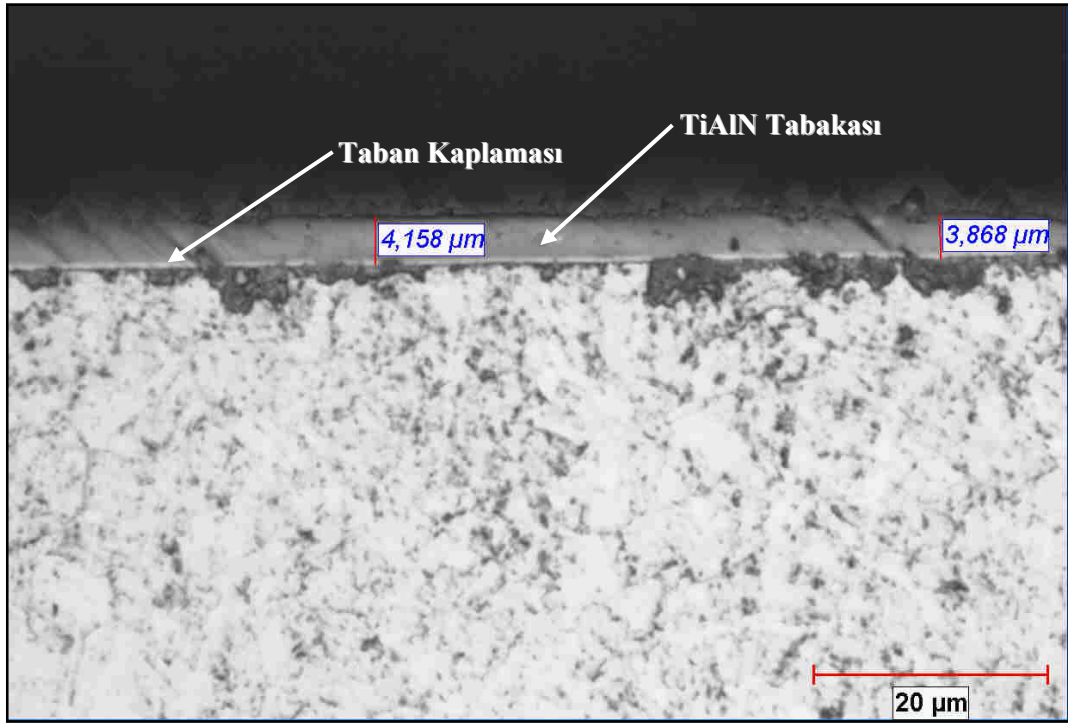
Şekil 4.7. S10 numunesinin x200 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü



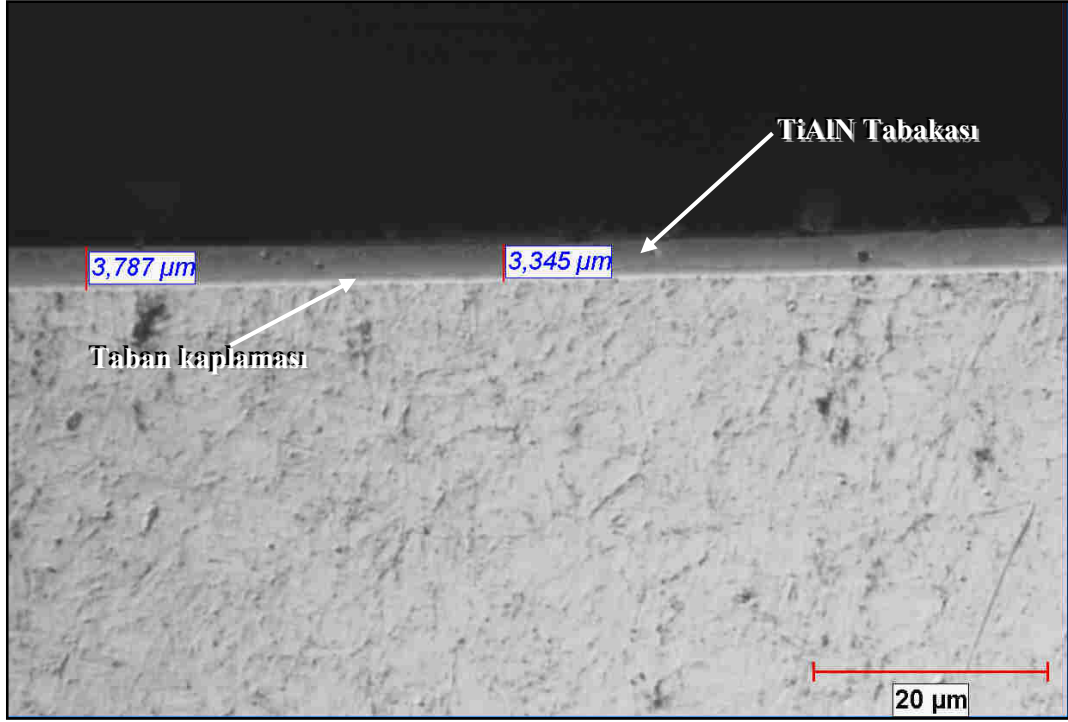
Şekil 4.8 Q11 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü



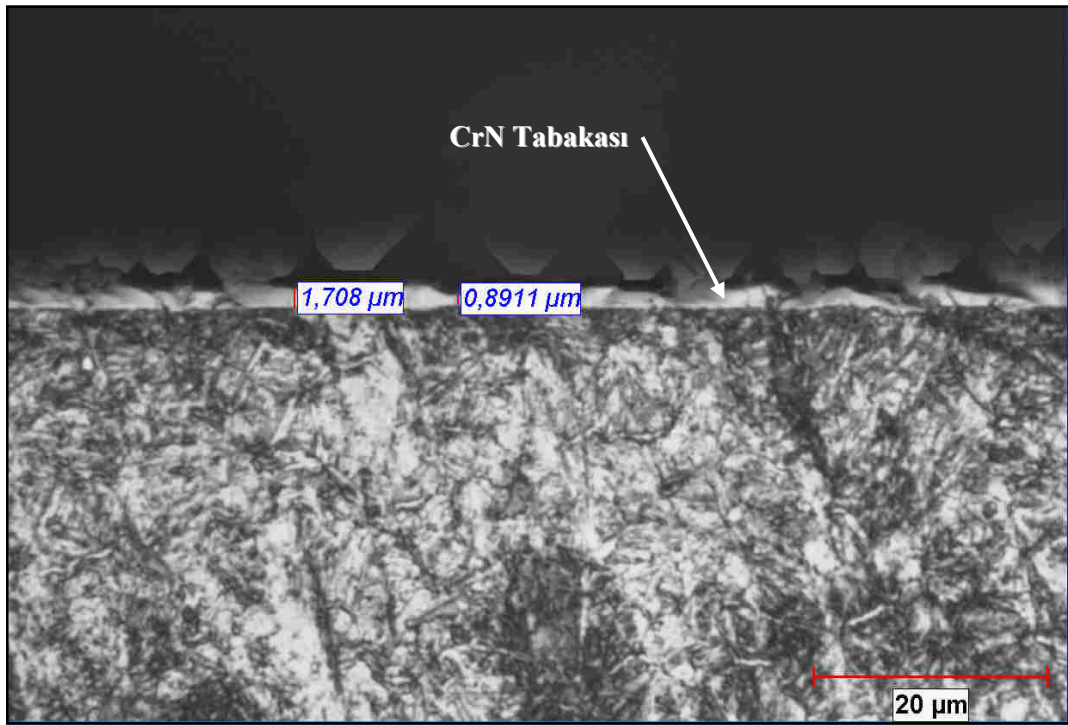
Şekil 4.9. S11 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü



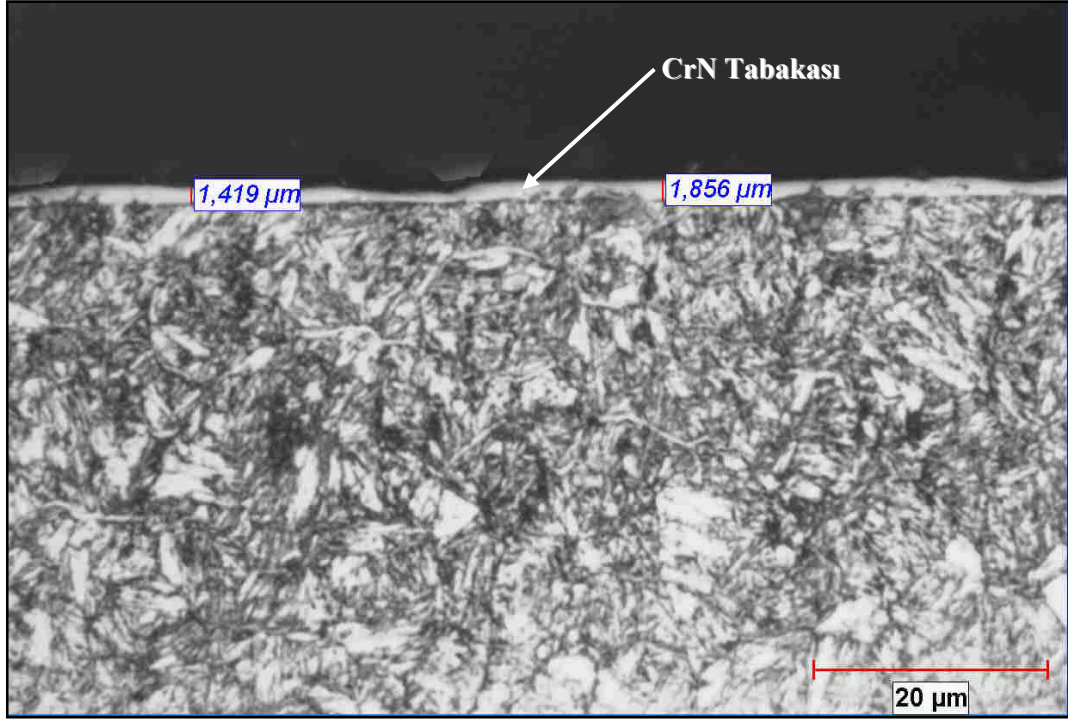
Şekil 4.10. Q12 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü



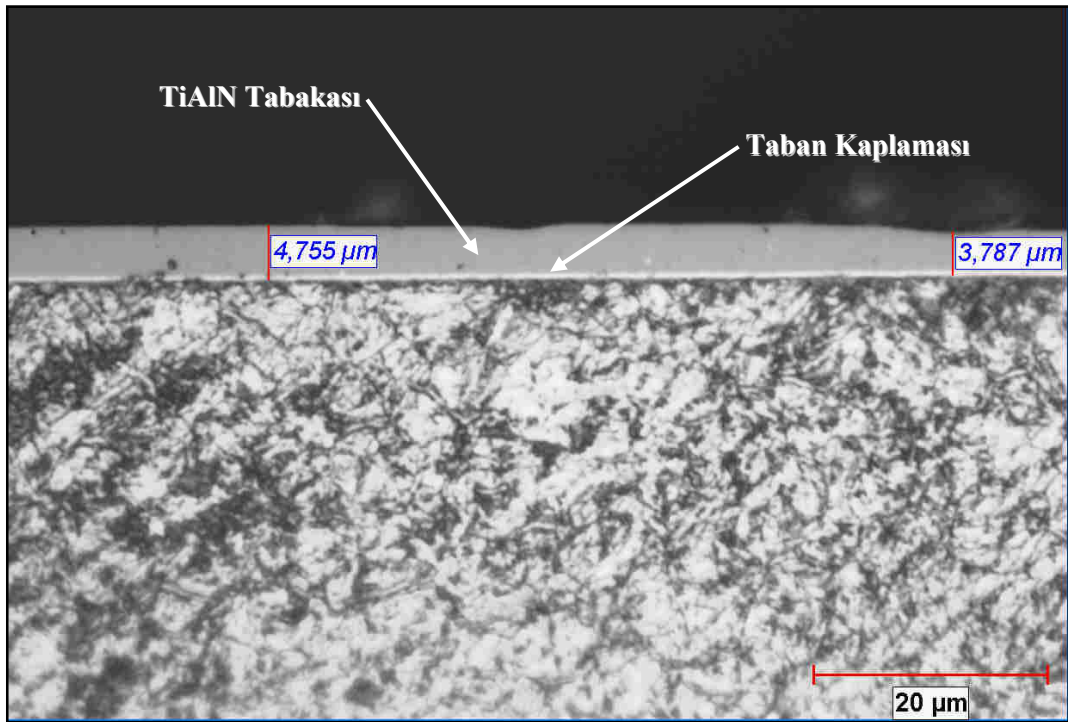
Şekil 4.11. S12 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü



Şekil 4.12. Q21 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü

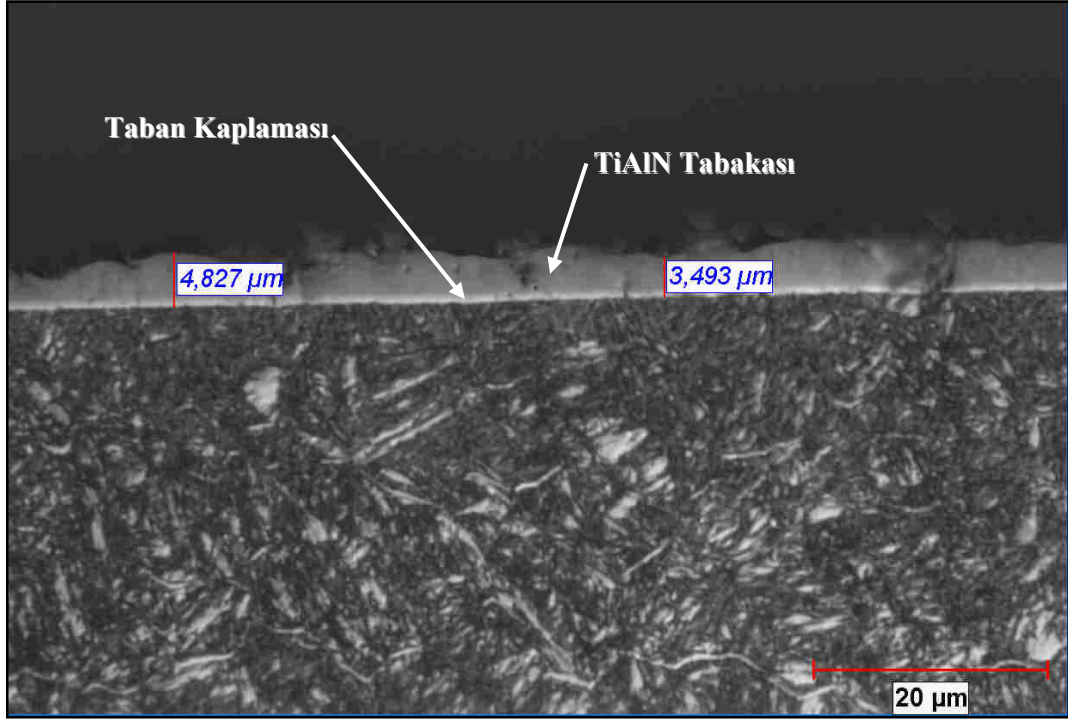


Şekil 4.13. S21 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü

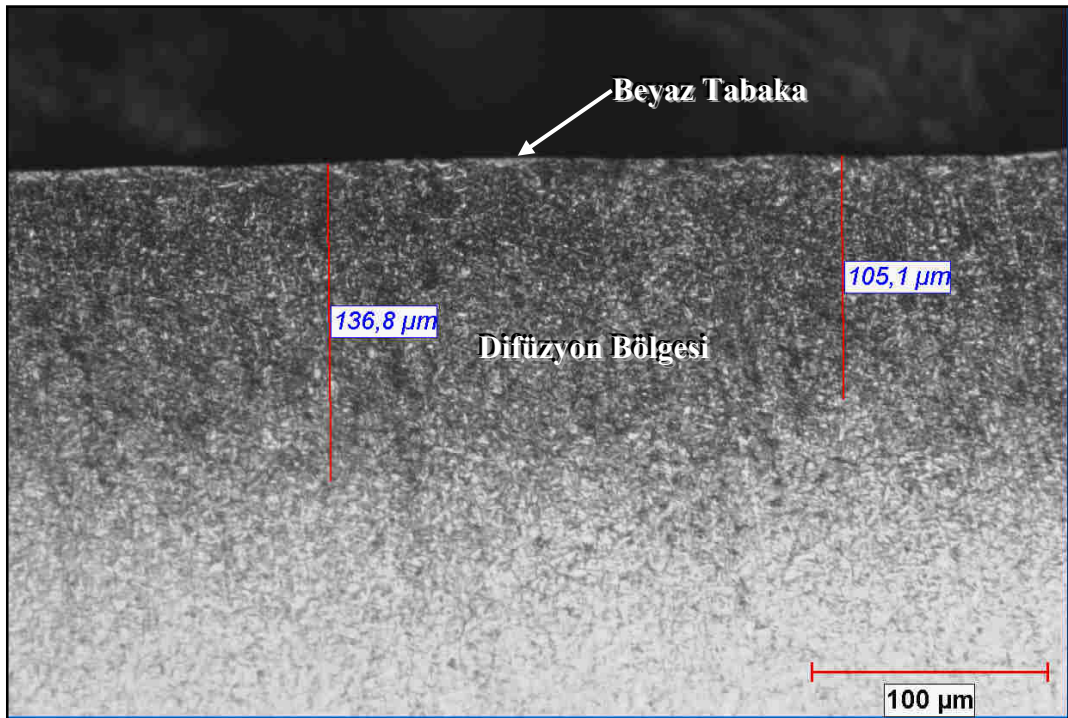


Şekil 4. 14. Q22 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü

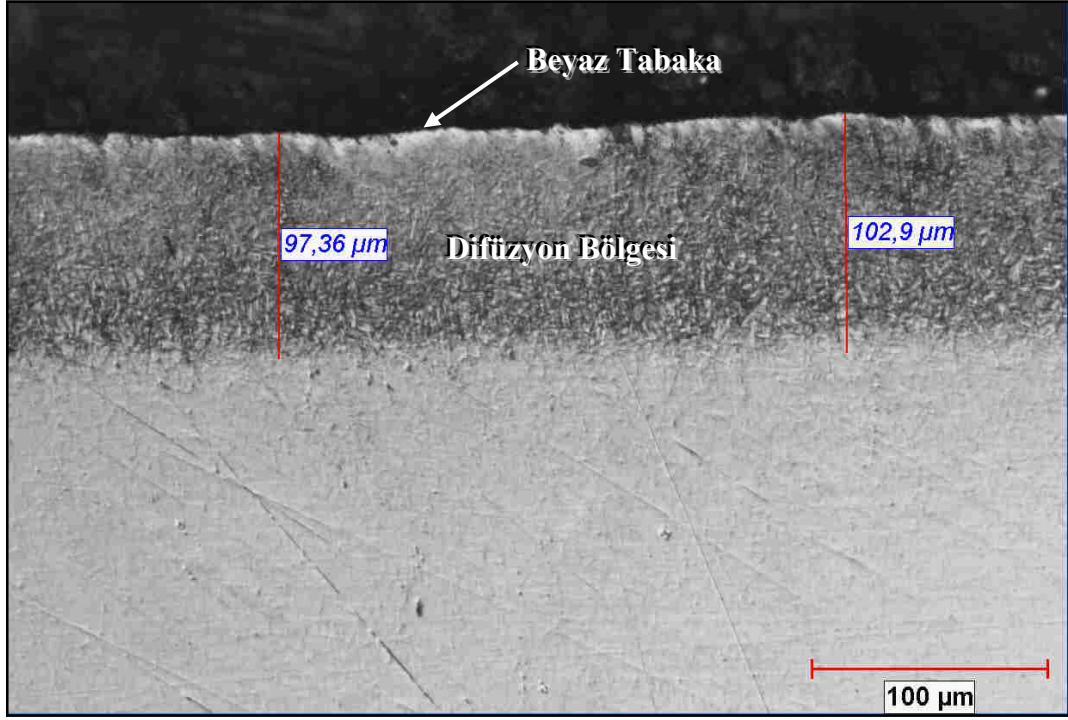




Şekil 4.15. S22 numunesinin x1000 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü



Şekil 4.16. Q20 numunesinin x200 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü



Şekil 4.17. S20 numunesinin x200 büyütmedeki optik mikroskop görüntüsü

#### 4.4 Aşınma Deneyi Sonuçlar

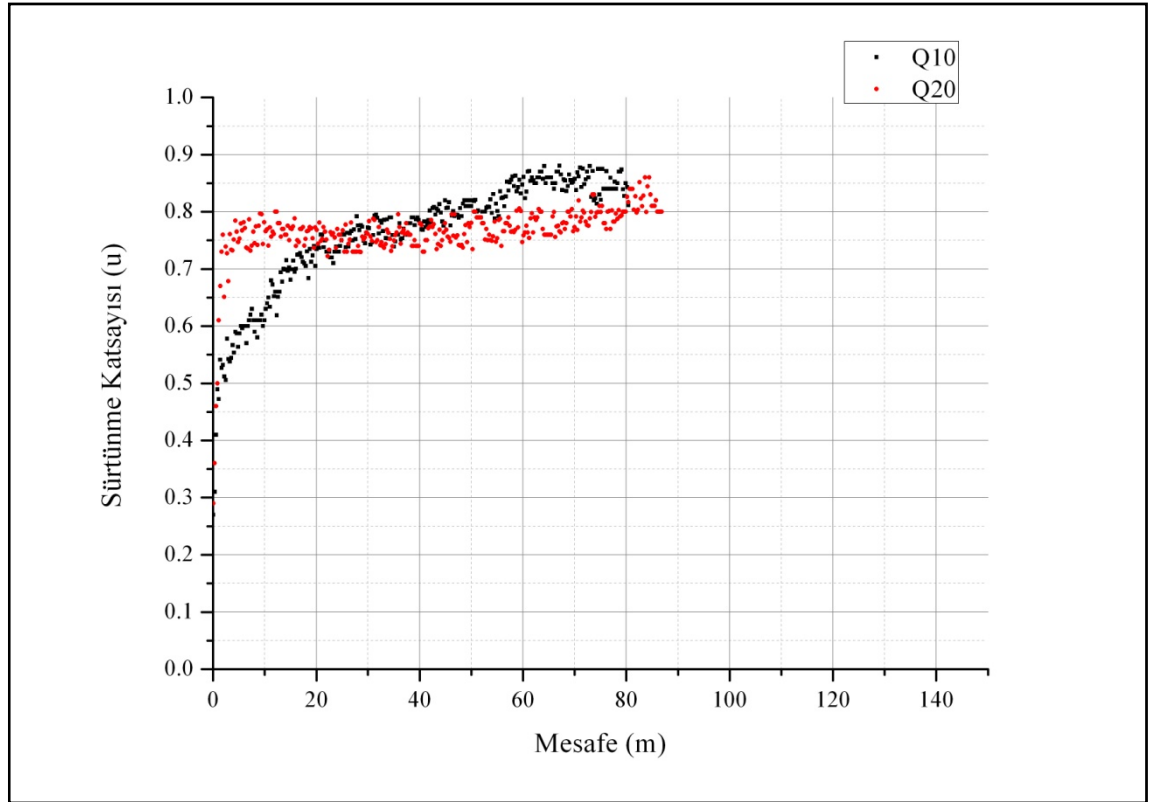
Tüm deney sonuçlarında deneyin başlaması ile rodaj süresince sürtünme katsayısındaki hızlı artış gözlenmektedir. Rodaj süresinin ardından genellikle sürekli rejim bölgesi izlenmekte ve sürtünme katsayısındaki hızlı değişimin durduğu ya da yavaşladığı görülmektedir. Deneyin devamında aşınma izinin derinleşerek sürtünme şartlarının bozulmasıyla düşük bir miktarda sürtünme katsayısının artışı gözlenmiştir.

Aşınma deney sonuçları sürtünme katsayısı – sürtünme mesafesi ( $\mu\text{-m}$ ) olarak Şekil 4.18. – Şekil 4.23. aralığında karşılaştırmalı şekilde verilmiştir.

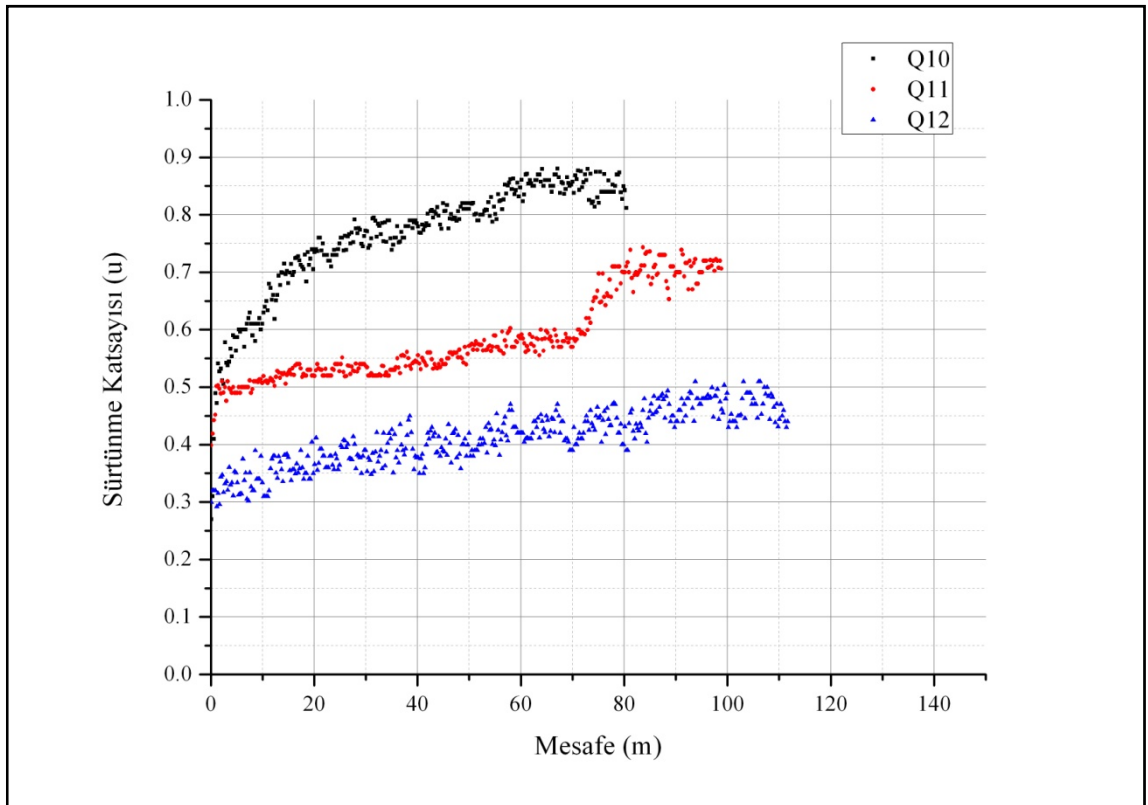
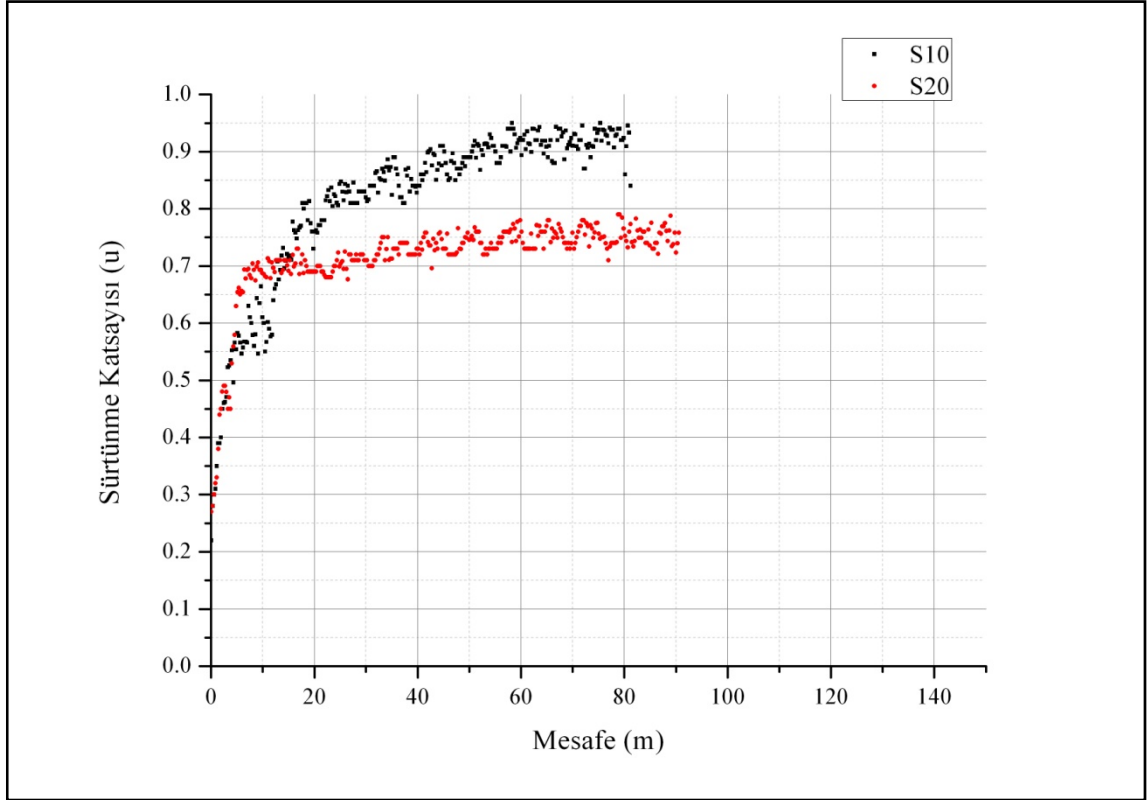
Genel olarak ıslah edilmiş ve PN işlemi görmüş numunelerin deneylerinde nitrürlenmiş bölgenin aşınmadaki olumlu etkileri görülmektedir. PN sonrasında sürtünme katsayısı düşmüştür. Ayrıca aşınma izlerine bakıldığında PN işleminin aşınmayı azalttığı da söylenebilir. Taktak ve ark. (2007) farklı çeliklerde PN ve kromlama işlemi uygulamış; oda sıcaklığında ve 500 °C'de PN işleminin başlangıç malzemesine göre sürtünme katsayısını düşürdüğünü bildirmişlerdir.

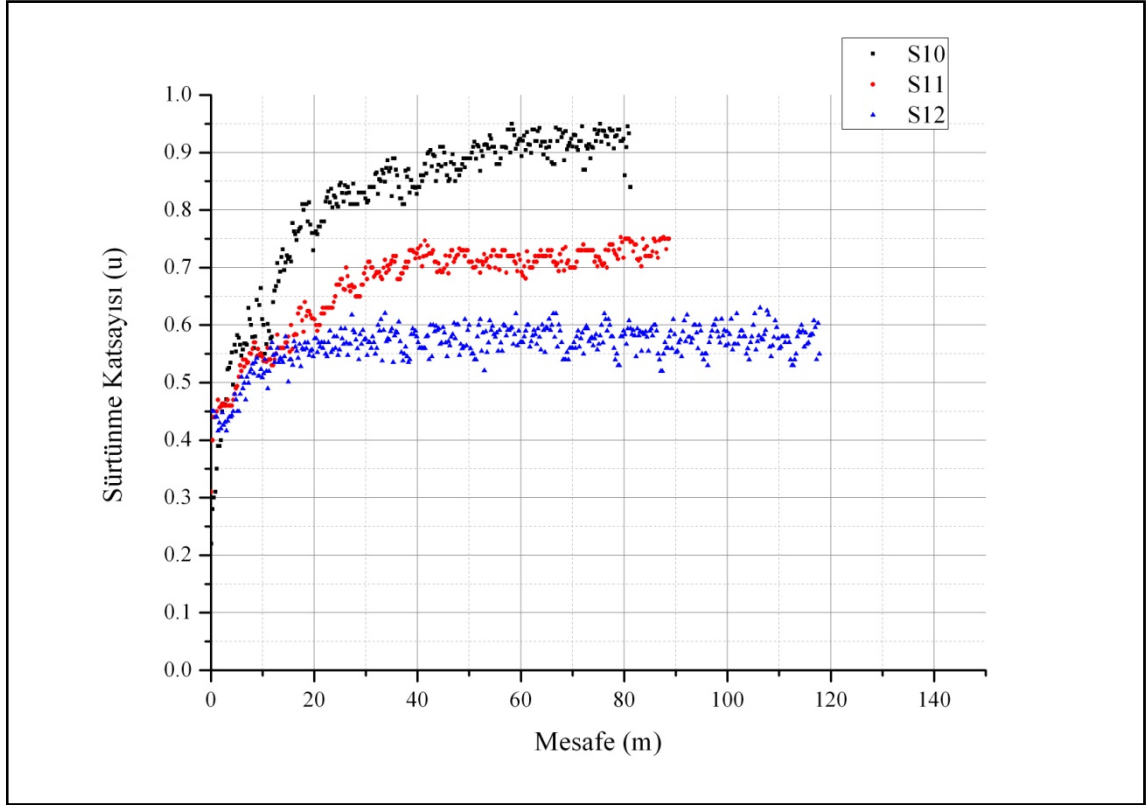
PVD kaplanmış numunelerin sürtünme katsayılar kataloglarda CrN için 0,40 TiAlN içinse 0,30-0,35 olarak verilmiştir. Gerek ıslah üzerine gerek PN üzerine yapılan kaplamalarda deney başlangıcında ölçülen sürtünme katsayıları katalog verileriyle uyum sağlamaktadır. TiAlN kaplamalarda sürtünme katsayısı 0,30-0,50 aralığında seyretmiş, 0,40'tan 0,70'lere varan bir trend izlemiştir. Uygulanan yük kaplama tabakalarını ciddi bir hasara uğratmamıştır. Bu durum aşınma izlerinden de anlaşılabilir. Bu durum aşınma izlerinden de anlaşılabilir.

Aşınma izlerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.24. – Şekil 4.35. aralığında verilmiştir.

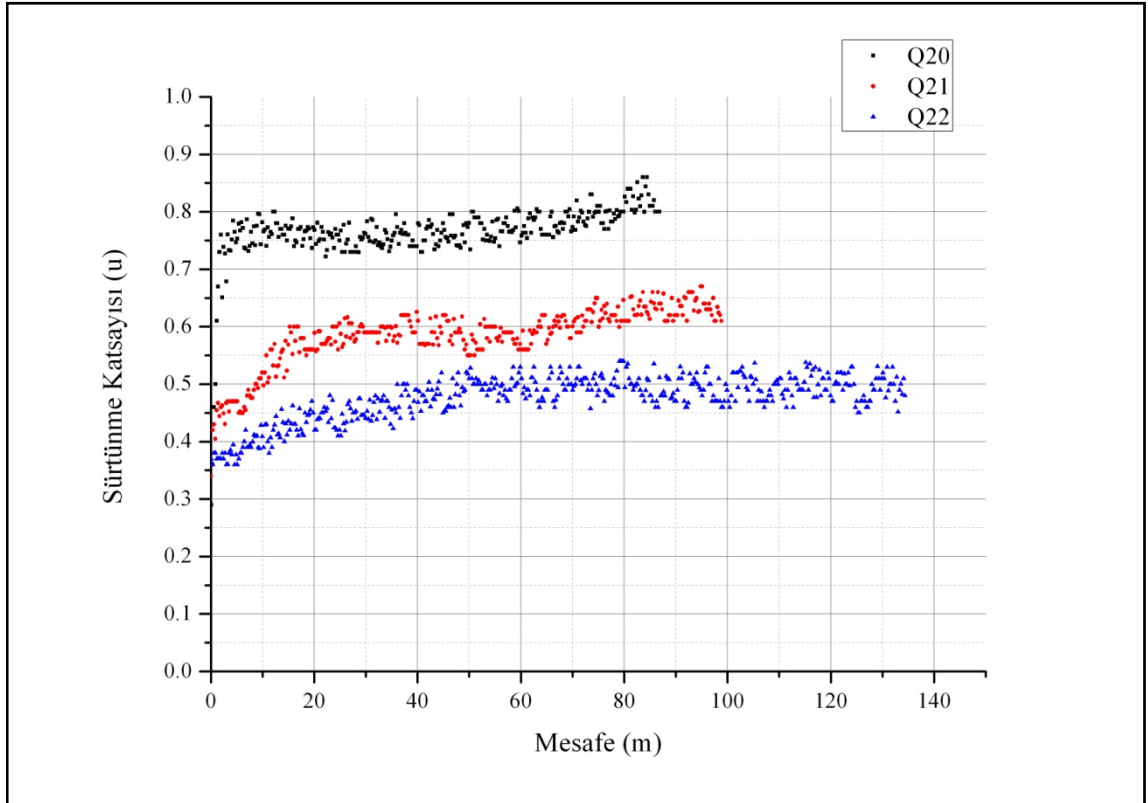


Şekil 4.18. Q10 – Q20 kodlu numunelerin aşınma deneyi sonuçları

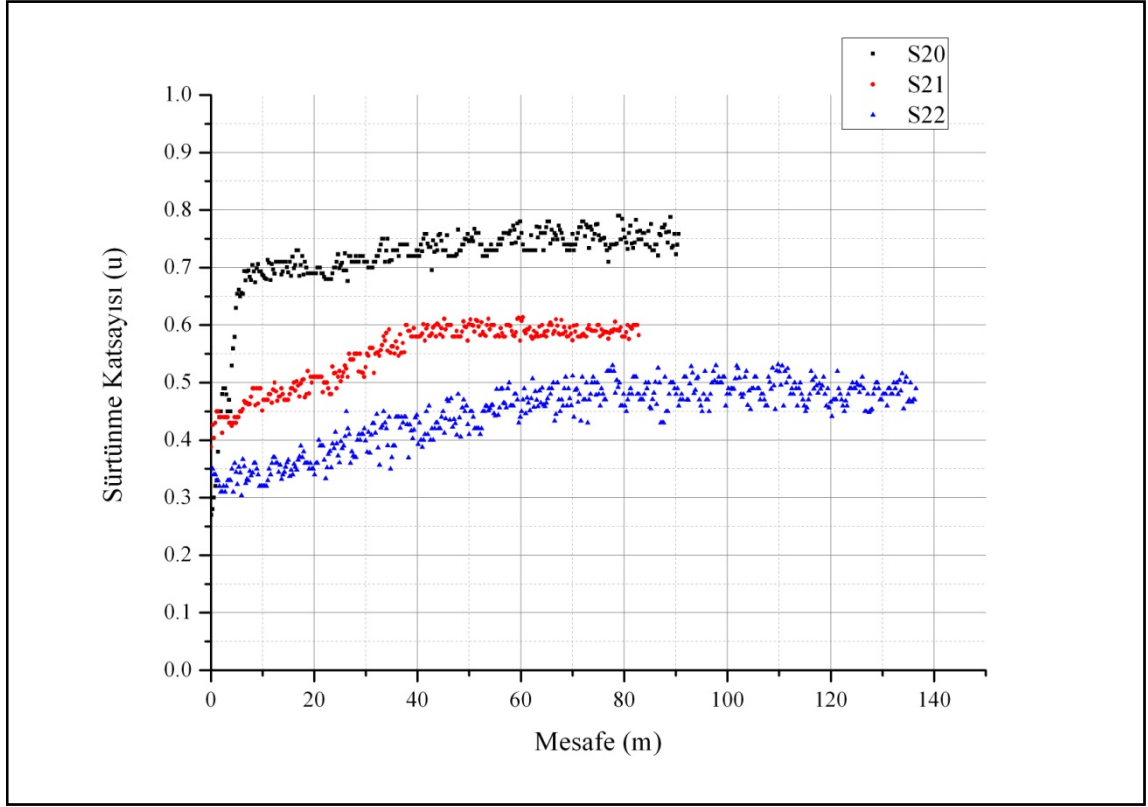




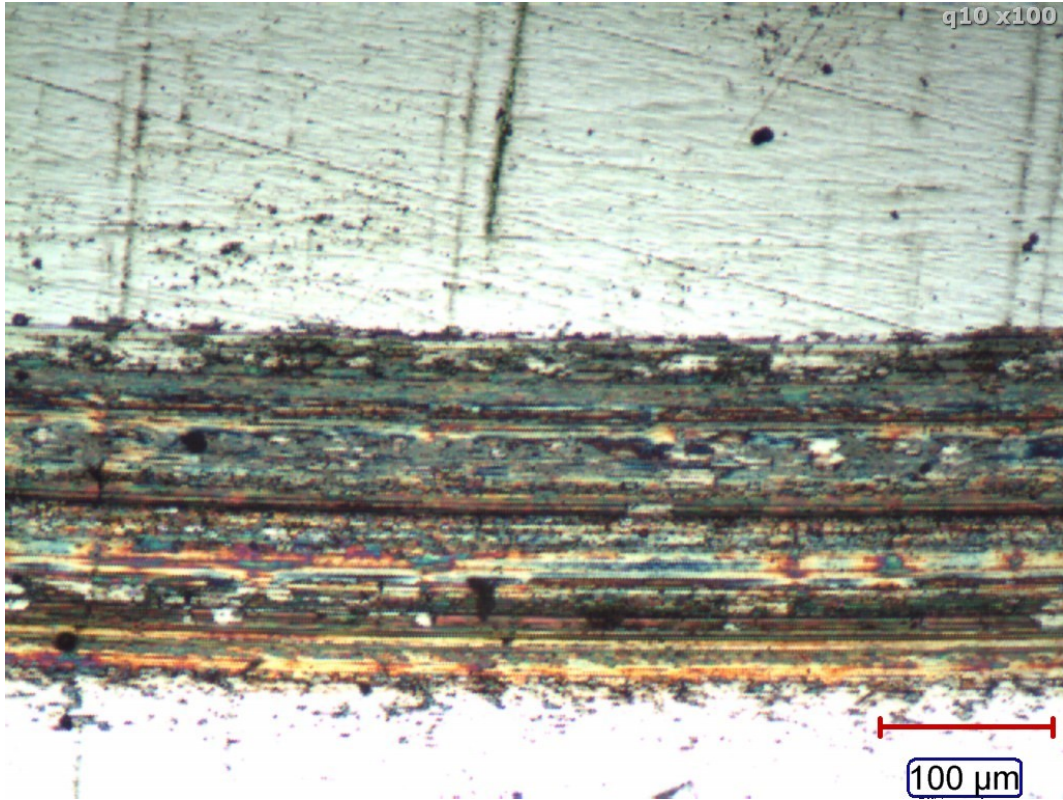
Şekil 4.21. S10 – S11 – S12 kodlu numunelerin aşınma deneyi sonuçları



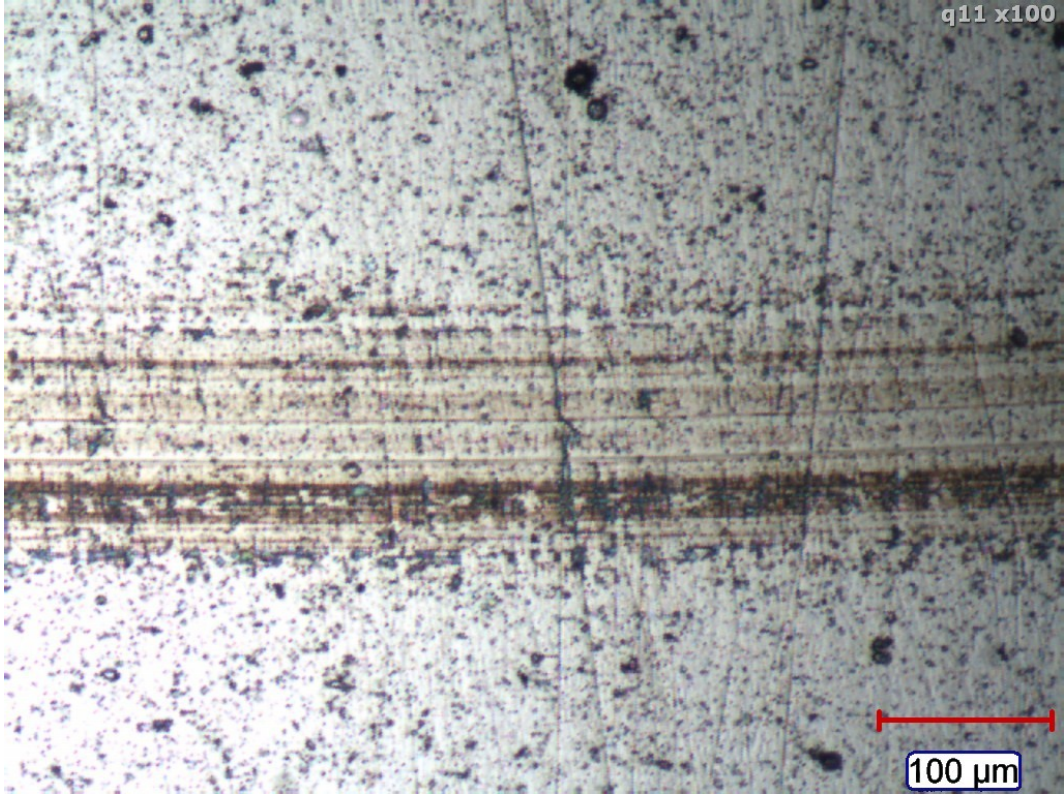
Şekil 4.22. Q20 – Q21 – Q22 kodlu numunelerin aşınma deneyi sonuçları



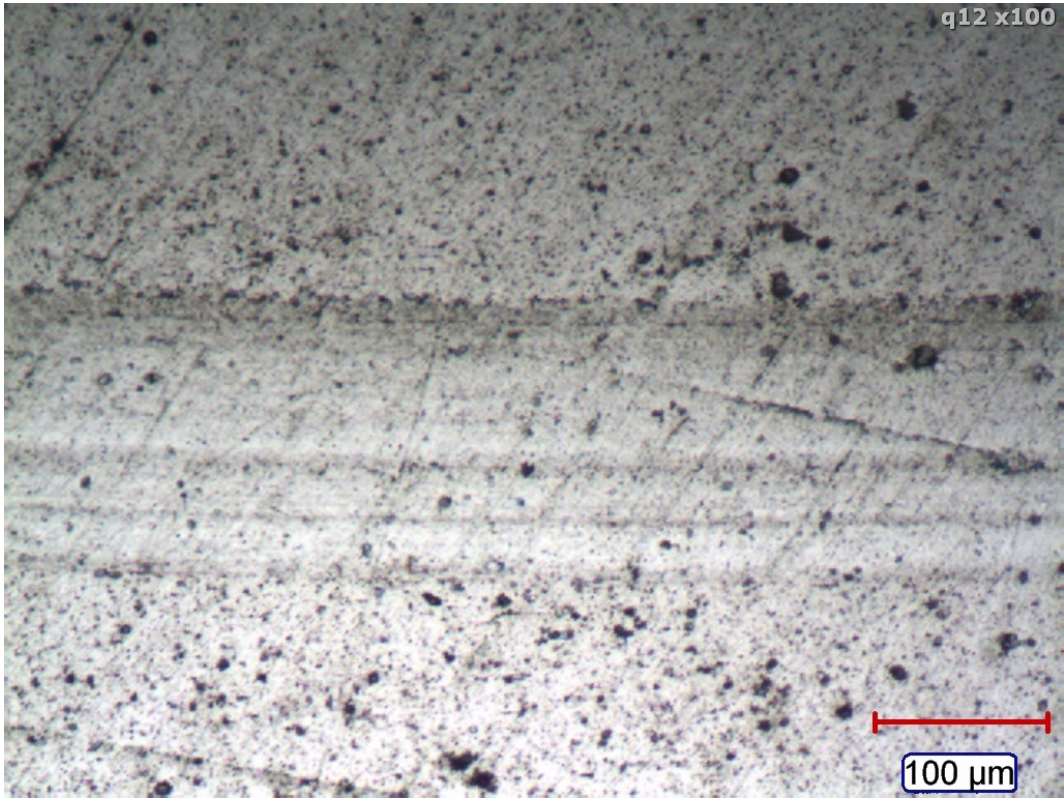
Şekil 4.23. S20 – S21 – S22 kodlu numunelerin aşınma deneyi sonuçları



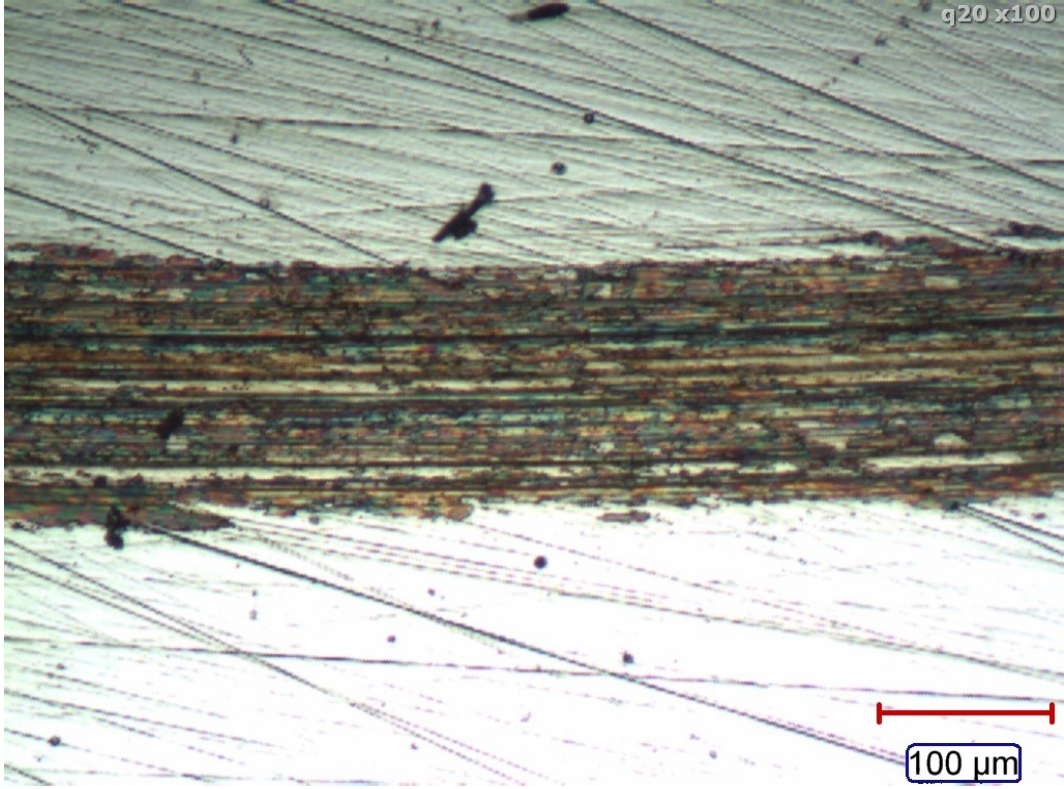
Şekil 4.24. Q10 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100



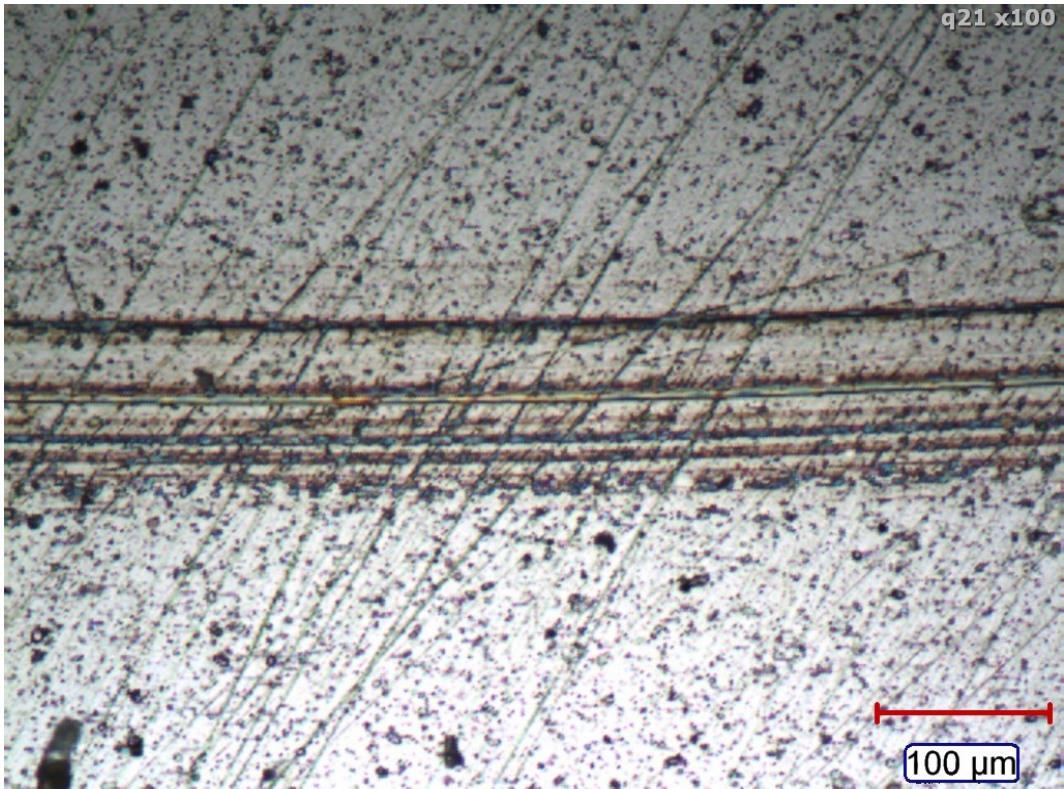
Şekil 4.25. Q11 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100



Şekil 4.26. Q12 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100

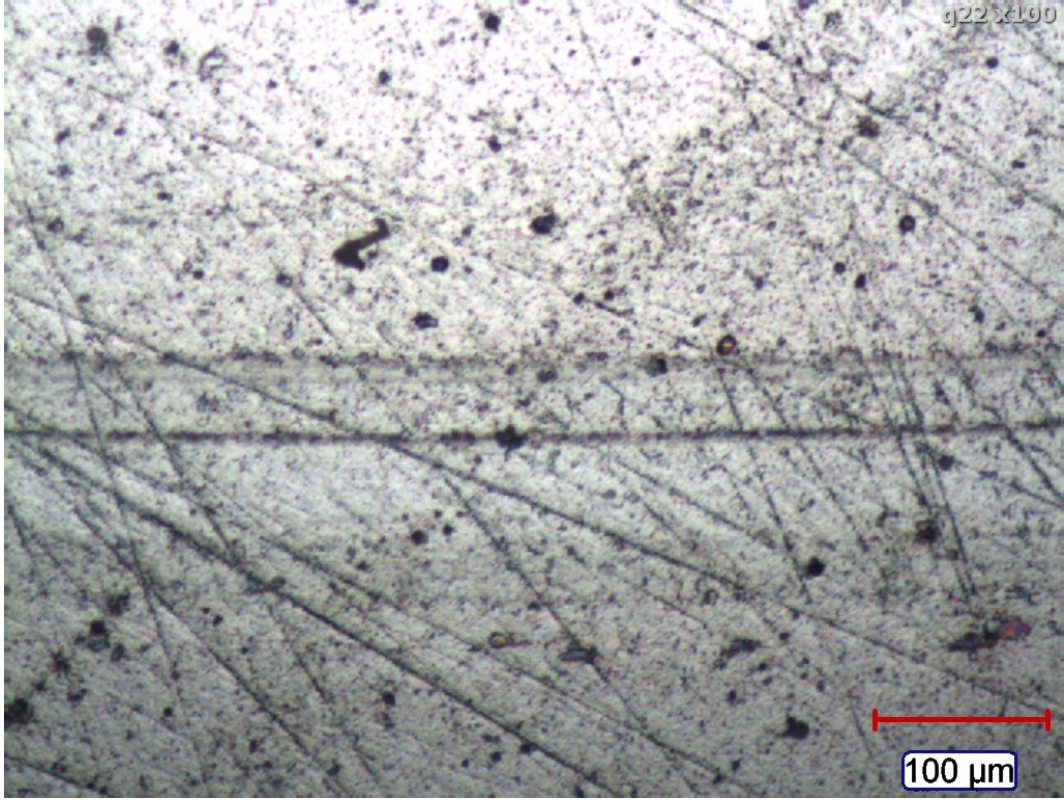


Şekil 4.27. Q20 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100

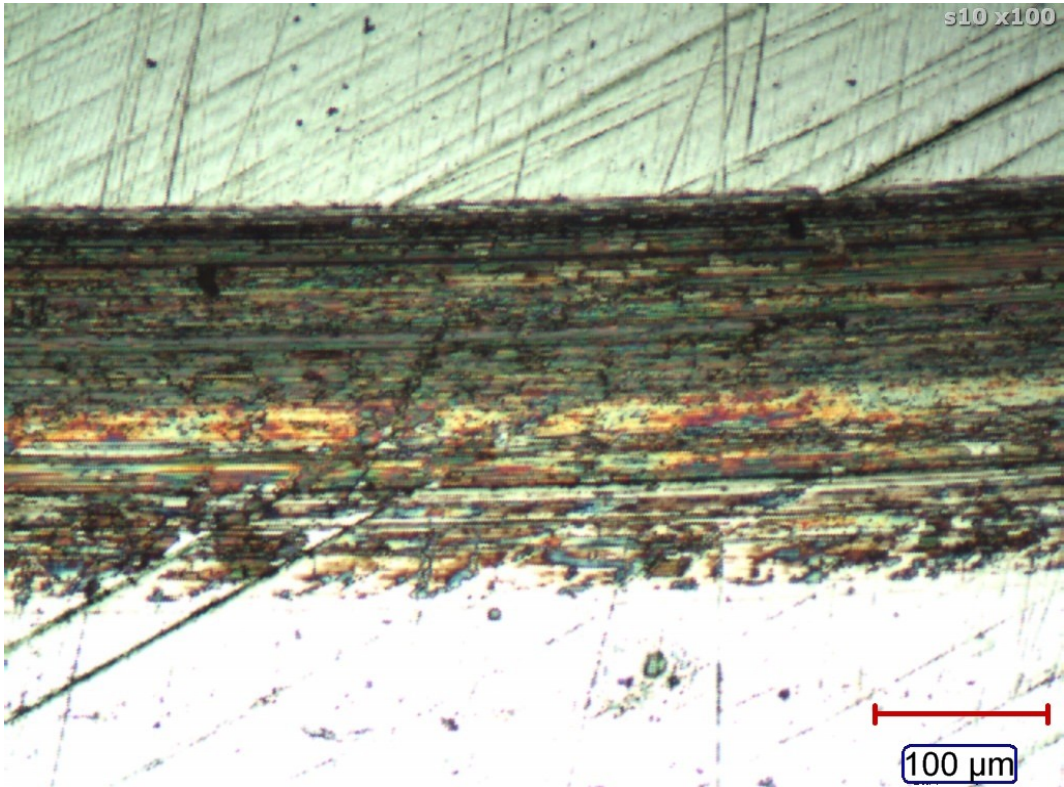


Şekil 4.28. Q21 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100

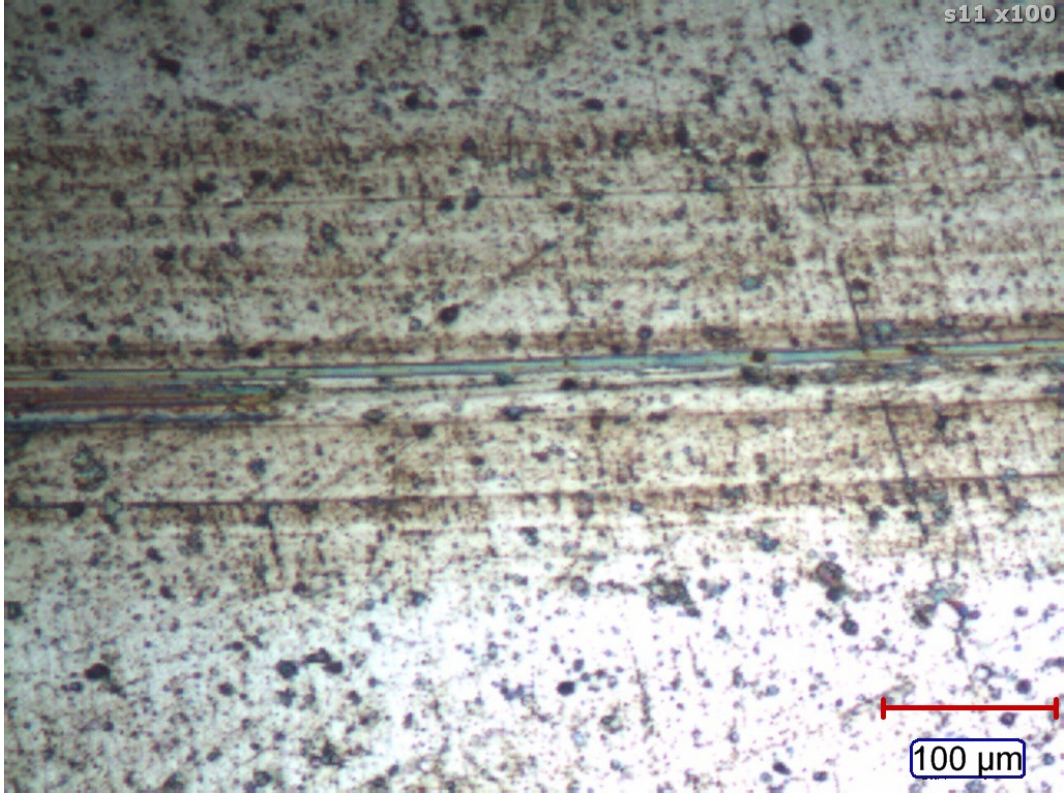




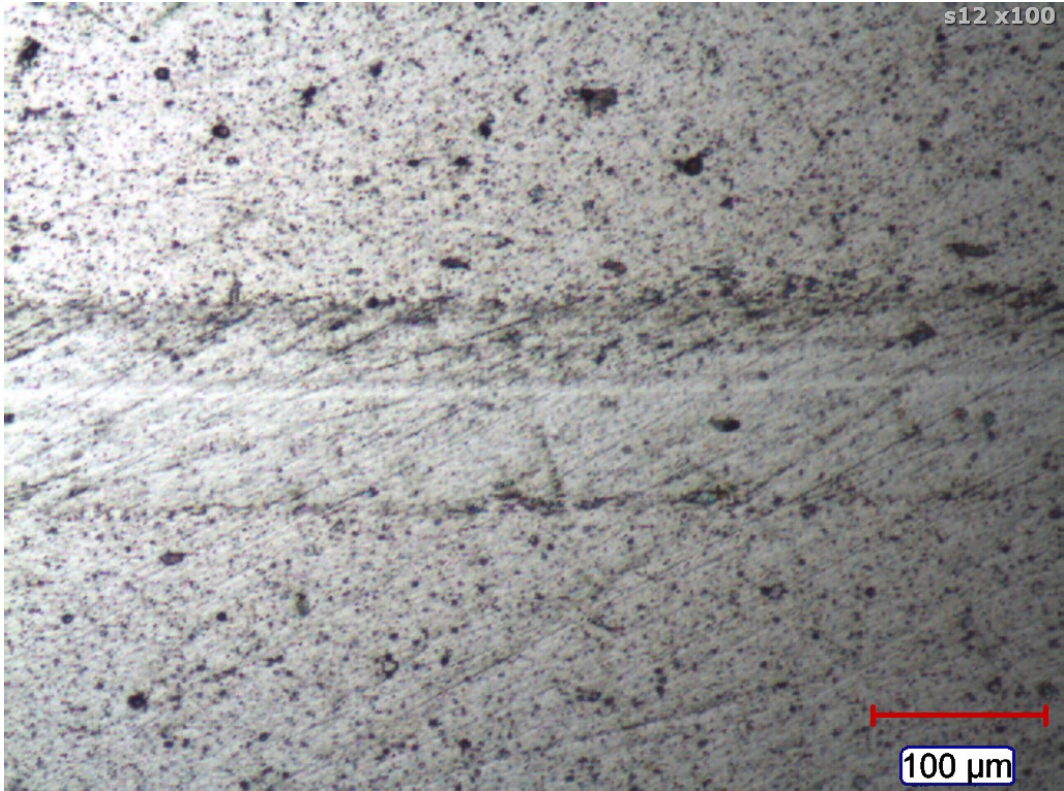
Şekil 4.29. Q22 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100



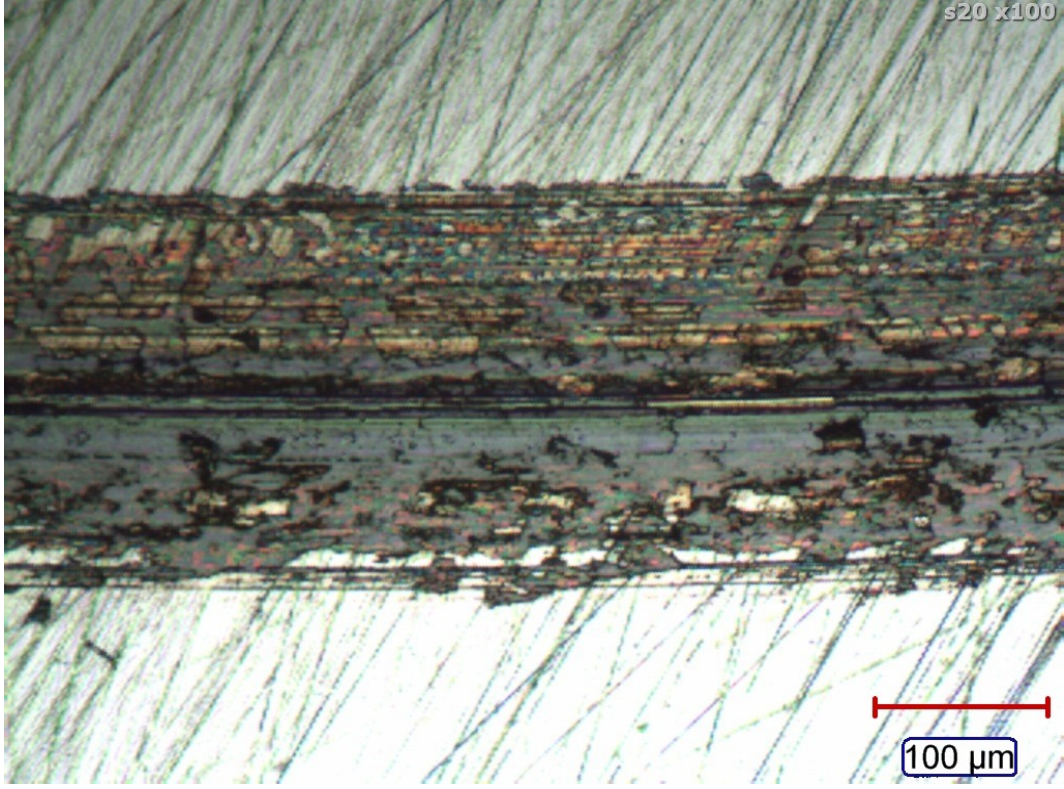
Şekil 4.30. S10 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100



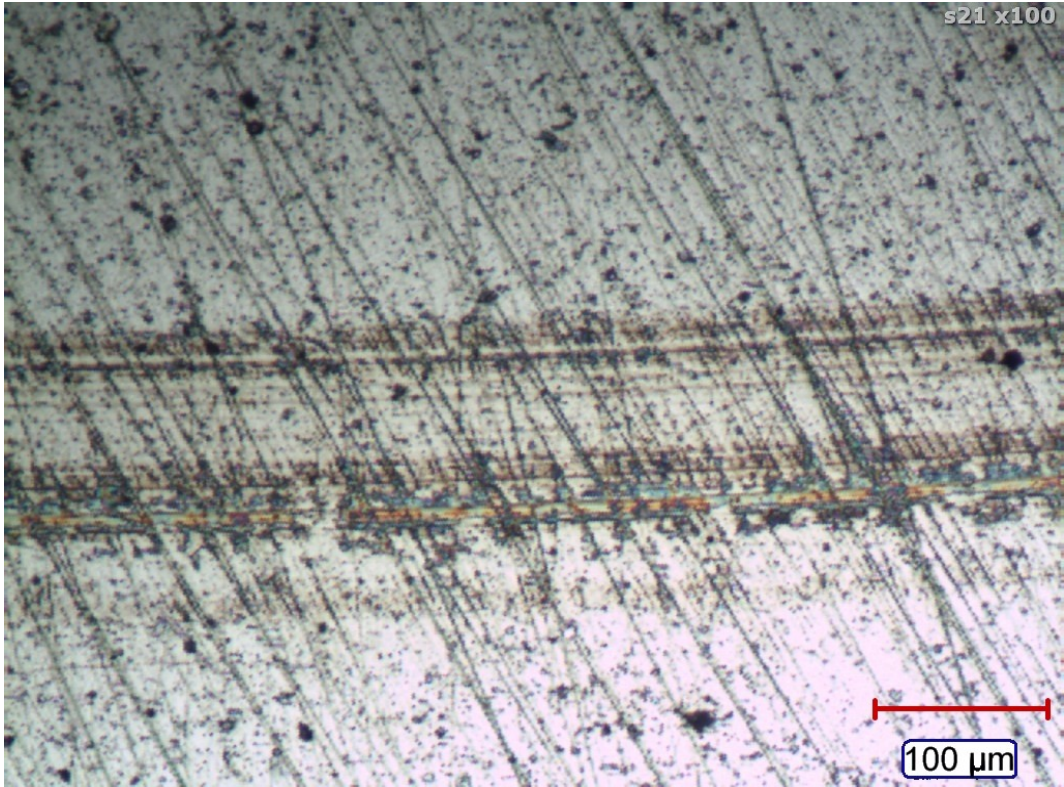
Şekil 4.31. S11 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100



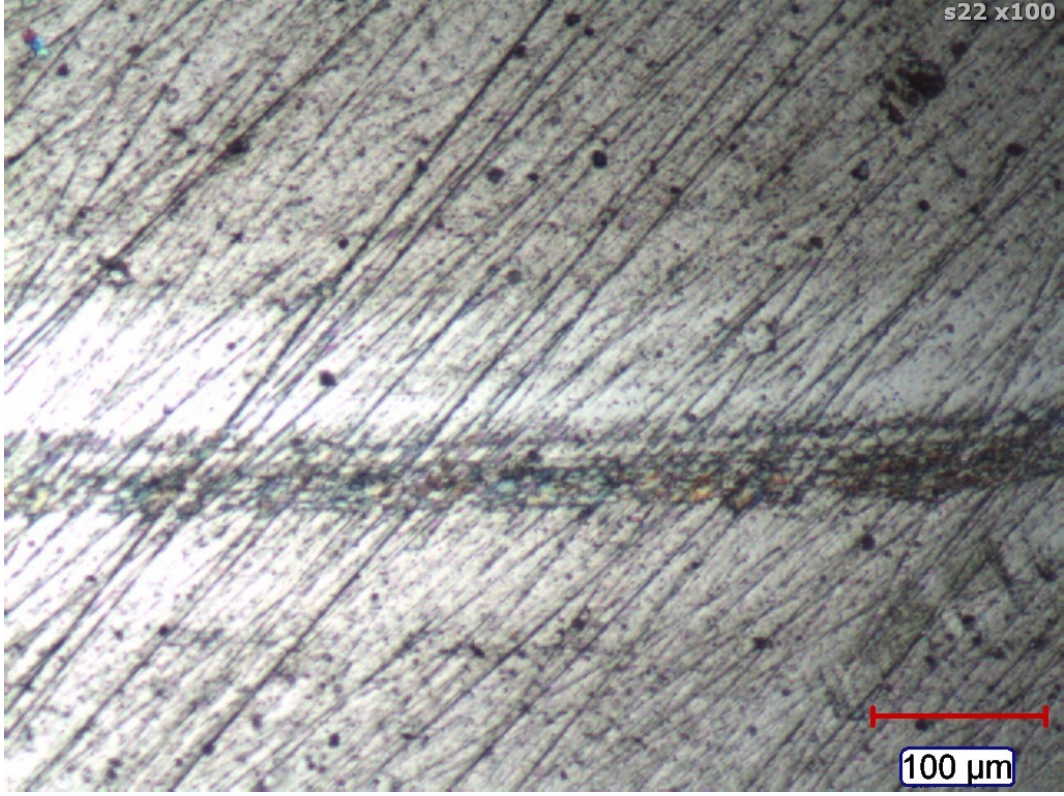
Şekil 4.32. S12 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100



Şekil 4.33. S20 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100



Şekil 4.34. S21 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100



**Şekil 4.35.** S22 kodlu numune aşınma izi optik mikroskop görüntüsü x100

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

- İki farklı sıcak iş takım çeliği üzerine PN ve PVD kaplama işlemleri başarıyla uygulanmıştır.
- PN üzerine PVD kaplama ile ıslah üzerine PVD kaplama arasında ciddi pürüzlülük farkları görülmemiştir.
- CrN kaplama TiAlN kaplamadan daha düşük pürüzlülük değerleri göstermiş ancak daha yüksek sürtünme katsayılarıyla daha fazla aşınma göstermiştir.
- Q grubu numunelerde PN üzerine PVD kaplamanın ıslah üzerine kaplamaya göre sürtünme katsayısının daha yüksek olduğu, S grubu numunelerde ise PN üzerine PVD kaplamaların sürtünme katsayısının daha düşük olduğu gözlenmiştir.
- Plazma nitrürlemenin her iki numunede de sürtünme katsayısını düşürdüğü ve aşınmayı azalttığı görülmüştür.
- Q kodlu numunelerin ıslah sonrası daha ince tanelere, PN sonrası daha yüksek sertliklere sahip olduğu ve deneylerde daha düşük sürtünme katsayıları gösterdiği tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Andrew, W. 2001.** Guide to wear problems and testing for industry. Edmondsbury Press Limited, UK, 171 pp.
- Anonim, 2001.** Surface engineering
- Anonim.1991.** ASM Handbook Volume 4 Heat treating. ASM International, USA, 2173 pp.
- Anonim.1992.** ASM Handbook Volume 18 Friction, lubrication, and wear technology. ASM International, USA, 1879 pp.
- Anonim.1994.** ASM Handbook Volume 5 Surface engineering. ASM International, USA, 2535 pp.
- Aydın, H., 2002.** İntermetalik faz aşılama yöntemiyle Al-Cu-Mg alaşımında aşınma diyagramının iyileştirilmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.
- Aydın,H., Saraçoğlu, M.H., Durmuş,A., Tutar, M., Bayram, A. 2010.** Plazma nitrürlemenin sac delme kalıplarında kullanılan zımbaların aşınma davranışı üzerindeki etkisi. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 07 – 08 Haziran 2010, Almira Hotel, Bursa.
- Babalık, F.C., 2000.** Makine elemanları ve konstrüksiyon örnekleri. Vipaş A.Ş., Bursa, 860 s.
- Batista, J.C.A., Godoy, C., Buono, V.T.L., Matthews, A. 2001.** Characterization of duplex and non-duplex (Ti,Al)N and Cr-N PVD coatings. *Materials Science and Engineering*, A336:39-51.
- Bayrak, Ö. 2007.** Plazma ile nitrürlenmiş CoCrMo implant malzemenin yapısal ve tribolojik özelliklerinin incelenmesi. *Y.Lisans Tezi*, Ata.Üni., Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü, Erzurum.
- Björk, T., Westergard, R., Hogmark, S. 2001.** Wear of surface treated dies for aluminium extrusion – a case study. *Wear*, 249: 316 – 323.
- Björk, T., Westergard, R., Hogmark, S., Bergströk, Hedenqvist, P. 1999.** Physical vapour deposition duplex coatings for aluminium extrusion dies. *Wear*, 225-229: 1123-1130.
- Budinski, K.G., 2007.** Guide to friction, wear, and erosion testing. ASM International, USA, 146 pp.
- Burakowski, T., Wierzchon, T. 1999.** Surface engineering of metals principles, equipment, technologies. CRC Press, USA, 592 pp.
- Çarkıt Aydın, G. 2009.** Plazma Nitrürlenmiş H11 sıcak takım çeliğinin aşınma davranışlarının incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, ERÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Kayseri.

**Çetin, A., Tek Z., Öztarhan, A., Artunç, N., 2007.** A comparative study of single and duplex treatment of martensitic AISI 420 stainless steel using plasma nitriding and plasmanitriding-plus-nitrogen ion implantation techniques. *Surface&coatings technology*, 201:8127-8130

**Davis, J.R. 2001.** Surface engineering for corrosion and wear resistance. ASM International, USA, 328 pp.

**Holmberg, K., Matthews, A. 1998.** Coatings tribology properties, techniques and applications in surface engineering. Elsevier, Amsterdam,442 pp.

**Hutchings, I.M. 1992.** Tribology: Friction and wear of engineering materials, CRC Press, Oxford: Butterworth Heinemann, 273 pp.

**İnçal, E. 2007.** PVD yönetimi ile kaplanan HSS takım çeliklerinin karakterizasyonu ve aşınma dayanımının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

**Karakan, M. 1998.** Gaz karışımlarının nitrürasyon işlemi üzerine etkisinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, ATAÜNİ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum.

**Karaoğlu, Y. 2006.** Bir aşınma test cihazının tasarımı ve imalatı. *Yüksek Lisans Tezi*, SAÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Sakarya.

**Korkmaz, E.E. 2009.** İyon implantasyonu ve plazma nitrüleme yöntemi ile yüzeyi sertleştirilmiş soğuk iş takım çeliklerinin içyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Doktora Tezi*, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

**Mahboubi, F.Abdolvahabi, K. 2006.** The effect of temperature on plasma nitriding behaviour of DIN 1.6959 low alloy steel. *Vacuum*, 81:239-243.

Nitrüleme ile ilgili teknik bilgiler, <http://www.ermir.com.tr/tr/technical.asp>, (Erişim tarihi: 30.05.2001)

**Oktay, G. 2007.** Katodik ark FBB yönetimi ile  $Ti_6Al_4V$  altlık malzemesi üzerine kaplanmış magnezyumun morfolojisine bias geriliminin etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislikte İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, İstanbul.

**Özdemir, U., Erten, M. 2003.** Plazma (iyon) nitrüleme yöntemi ve malzeme özellikleri üzerindeki etkisi. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, (2): s41-48.

**Özdemir, U.,Erten, M. 2005.** Plazma nitrüleme parametrelerinin değişen malzeme özellikleri üzerindeki etkisinin istatistiksel analizi. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, Cilt 2(Sayı 1): s37-45.

**Panjan, P., Cekada, M., Kirn, R., Sokovic, M. 2004.** Improvement of die-casting tools with duplex treatment. *Surface&coatings technology*, 180-181: 561-565.

**Polak, T.A., Wicox, G.D. 2003.** Handbook of surface treatments and coatings. Professional Engineering Publishing Limited. London, 132 pp.

**Schacherl, R.E., Graat, P.C.J. 2004.** The nitriding kinetics of iron-chromium alloys; the role of excess nitrogen: Experiments and modelling. *Metallurgical and Materials Transactions*,35A:3387-3398.

**Selçuk, B. 1994.** Borlanmış AISI 1020 ve 5115 çeliklerinin sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi. Doktora Tezi, ERÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kayseri.

**Sever, K., 2003.** Demir Dışı Metal ve Alaşımlarda İyonitrazyon ile Sertleştirme ve Sertleştirme Sonucu Oluşan Malzeme Özelliklerinin Tesbiti, *Yüksek Lisans Tezi*, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı, İzmir.

**Singh, G.P. ,Alphonsa, J. 2005.** Effect of surface roughness on the properties of the layer formed on AISI 304 stainless steel after plasma nitriding. *Surface & Coatings Technology*, 200; 5807–5811.

**Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W. 2005.** Engineering tribology. Elsevier, USA, 831 pp.

**Suh, N.P., Saka,N. 2004.** MIT tribology ders notları. Mitopencourseware, <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-800-tribology-fall-004/lecture-notes/> (Erişim tarihi: 04.05.2011).

**Şafak, H.E. 2008.** Yüzeyi PVD yöntemiyle kaplanmış metallerde tribolojik özelliklerin belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir.

**Takadoum, J. 2008.** Materials and surface engineering in tribology. Iste Ltd, UK, 242 pp.

**Taktak, Ş., Ülker, Ş., Güneş, İ. 2007.** High temperature wear and friction properties of duplex surface treated bearing steels. *Surface & Coatings Technology*, 202:3367-3377.

**Topçu, Ş. 2010.** Farklı şartlarda plazma nitrülenmiş çeliklerin aşınma davranışının belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, UÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

**Xi, Y., Liu, D., Han, D. 2007.** Improvement of corrosion and wear resistances of AISI 420 martensitic stainless steel using plasma nitriding at low temperature. *Surface & Coatings Technology*, 202:2577-2583.

**Yiğit, K., 1994.** Hidro-Abrasion muayene cihazı tasarım ve imalatı. *Yüksek Lisans Tezi*, U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mümin TUTAR  
Doğum Yeri ve Tarihi : Alanya / 1982  
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu  
Lise : Isparta Gazi Lisesi (Y.D.A.) / 2000  
Lisans : Pamukkale Üniversitesi – Otomotiv Öğretmenliği / 2008  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi – Makine Mühendisliği / 2011

Çalıştığı Kurum(lar) : Uludağ Üniversitesi / 2009-Devam

İletişim : mail@mumintutar.net

Yayımları :

Aydın, H., Bayram, A., Saraçoğlu, M.H., Durmuş, A., **Tutar, M.** 2010. Plazma Nitrürlemenin Sac Delme Kalıplarında Kullanılan Zımbaların Aşınma Davranışı Üzerindeki Etkisi. 5. *Otomotiv Teknolojileri Kongresi OTEKON'10*, Bursa, 43-50.