

Ti6Al4V Alaşımının Yüzeyinde Plazma Transferli Ark (PTA) Yöntemi ile Üretilmiş
Kompozit Kaplamaların Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması

Tuğçe Güleç

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2024

Investigation of Tribological Properties of Composite Coatings Produced By Plasma
Transferred Arc (PTA) Method on the Surface of Ti6Al4V Alloy

Tuğçe Güleç

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Mechanical Engineering

January 2024

Ti6Al4V Alaşımının Yüzeyinde Plazma Transferli Ark (PTA) Yöntemi ile Üretilmiş
Kompozit Kaplamaların Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması

Tuğçe Güleç

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği Uyarınca

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon - İmalat Bilim Dalında

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Koray KILIÇAY

Ocak 2024

ONAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Tuğçe GÜLEÇ'in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Ti6Al4V Alaşımının Yüzeyinde Plazma Transferli Ark (PTA) Yöntemi ile Üretilmiş Kompozit Kaplamaların Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Koray KILIÇAY

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. Koray KILIÇAY

Üye: Dr.Öğr.Üyesi Esad KAYA

Üye: Dr.Öğr.Üyesi Fatih BOZKURT

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Koray KILIÇAY danışmanlığında hazırlamış olduğum “Ti6Al4V Alaşımının Yüzeyinde Plazma Transferli Ark (PTA) Yöntemi ile Üretilmiş Kompozit Kaplamaların Tribolojik Özelliklerinin Araştırılması” başlıklı Yüksek Lisans /Doktora tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 06/02/2024

Tuğçe GÜLEÇ

İmza

ÖZET

Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımı yüzeyi plazma transferli ark (PTA) kaynak yöntemiyle hacimce farklı oranlarda karıştırılmış TiC ve C tozları ile alaşımlandırılmıştır. Kaplanmış ve işlemsiz numunelerin mikroyapıları optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım spektrometresi (EDS) ve X-ışınım kırınımı (XRD) analizleri ile incelenmiştir. Mikrosertlik değerleri yüzeyi alaşımlandırılmış numunelerde kaplama bölgesinden altlık malzemeye doğru ölçülmüş ve bu veriler ile mikrosertlik-mesafe grafiği oluşturulmuştur. Aşınma ve sürtünme yüzey özellikleri ASTM-G99 standartlarına göre pim-disk aşınma test metodu kullanılarak belirlenmiştir. Aşınma testi yapılan numunelerin yüzeyleri SEM ve EDS analizi ile incelenip aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.

Bu çalışma sonucunda PTA kaynak yöntemi ile yüzey özellikleri değiştirilen numunelerde kaplama bölgesi ile altlık malzeme arasında metalurjik açıdan iyi bir bağ oluşturulduğu ve yüzey mikroyapısının değiştiği bulgulanmıştır. Numuneler arasında sertlik değeri en fazla TiC tozu ile kaplanan numunede ölçülmüştür ve mikrosertlik değeri ana malzemeye göre ortalama 2 kat artırılmıştır. Sürtünme katsayısı en düşük numune grafit tozu ile kaplanan numune iken en yüksek aşınma direncine sahip numune ise titanyum karbür tozu ile kaplanmış numune olduğu tespit edilmiştir. Titanyum karbür ile kaplanan numunenin aşınma direncinde ana malzemeye göre yaklaşık 11.5 kat artış sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme ve Aşınma, Titanyum alaşımları, Plazma Transferli Ark (PTA).

SUMMARY

In this study, the Ti6Al4V alloy surface was alloyed with TiC and C powders mixed in different volume proportions by plasma transfer arc (PTA) welding method. The microstructures of coated and untreated samples were examined by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometry (EDS) and X-ray diffraction (XRD) analyses. Microhardness values were measured from the coating area to the substrate material in the surface alloyed samples and a microhardness-distance graph was created with these data. Wear and friction surface properties were determined using the pin-disk wear test method according to ASTM-G99 standards. The surfaces of the wear tested samples were examined with SEM and EDS and the wear mechanisms were determined.

As a result of this study, it was found that a good metallurgical bond was formed between the coating area and the substrate material in the samples whose surface properties were changed by the plasma transfer arc (PTA) welding method and the surface microstructure was changed. Among the samples, the hardness value was measured the highest in the sample coated with TiC powder, and the microhardness value was increased by an average of 2 times compared to the main material. It was determined that the sample with the lowest friction coefficient was the sample coated with graphite powder, while the sample with the highest wear resistance was the sample coated with titanium carbide powder. The wear resistance of the sample coated with titanium carbide increased approximately 11.5 times compared to the main material.

Keywords: Plasma Transferred Arc (PTA), Friction and Wear, Titanium alloys

TEŞEKKÜR

Çalıőmam boyunca bilgi ve deneyimlerini benden esirgemeyen, her türlü olanağı sağlayan ve bilgisiyle beni yönlendiren Doç. Dr. Koray KILIÇAY' a, deneysel çalıőmalarımnda yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Esad KAYA' ya teşekkür ederim.

Eğitim – öğrenim hayatım boyunca her konuda desteğini hissettiğim aileme ve sevgili eőime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI	3
2.1. Titanyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri.....	3
2.2. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	4
2.2.1. Ticari saf titanyum	5
2.2.2. α alaşımlar.....	6
2.2.3. $\alpha+\beta$ alaşımları	7
2.2.4. β alaşımları.....	7
2.2.5. Yakın α (near α) alaşımları	7
2.3. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Üretimi.....	7
2.3.1. Titanyum süngeri üretim prosesi.....	8
2.4. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları	9
3. TRİBOLOJİ	11
3.1. Sürtünme	11
3.1.1. Sürtünme teorileri	12
3.1.2. Sürtünmenin temel mekanizmaları	13
3.2. Aşınma	14
3.2.1. Aşınmanın temel mekanizmaları	15
<u>3.2.1.1. Abrasiv aşınma</u>	15
<u>3.2.1.2. Yorulma aşınması</u>	16
<u>3.2.1.3. Adheziv aşınma</u>	17
<u>3.2.1.4. Korozyif aşınma</u>	17
3.2.2. Aşınma deney yöntemleri	18
<u>3.2.2.1. Pim-disk deney yöntemi</u>	18
<u>3.2.2.1. Levha - kayış deney yöntemi</u>	19
<u>3.2.2.2. Dört bilye deney yöntemi</u>	19

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
4. YÜZEY ÖZELLİKLERİNİ GELİŞTİRME İŞLEMLERİ.....	21
4.1. Termokimyasal İşlemler.....	21
4.1.1. Borlama işlemi.....	21
4.1.2. Nitrüleme işlemi.....	22
4.1.3. Termal oksidasyon işlemi.....	23
4.2. Isıl İşlemler.....	23
4.2.1. Gerilme giderme.....	23
4.2.2. Tavlama.....	23
4.2.3. Çözeltiye alma ve yaşlandırma.....	24
4.3. Ergitilerek Yapılan Yüzey Kaplama İşlemleri.....	24
4.3.1. Lazer ile yapılan yüzey kaplama işlemleri.....	25
4.3.2. Elektron ışını ile yapılan kaplama işlemleri.....	26
4.3.3. Tozaltı kaynağı ile kaplama işlemi.....	29
4.3.4. Gaz tungsten ark (GTA) ile kaplama işlemi.....	29
5. PLAZMA TRANSFERLİ ARK KAYNAĞI (PTA) İLE KAPLAMA İŞLEMİ.....	31
5.1. PTA İşleminin Uygulanması.....	31
5.2. PTA işleminde ark oluşumu.....	32
5.3. PTA işleminde plazma oluşumu.....	33
5.4. PTA yönteminin işlem parametreleri.....	34
5.5. Plazma Transferli Ark Kaynak İşleminin Avantajları.....	37
6. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	40
7. MATERYAL VE YÖNTEM.....	48
7.1. Titanyum Alaşımları.....	48
7.2. Kaplama Tozları.....	49
7.3. Plazma Transferli Ark (PTA) Kaynak Makinesi.....	50
7.4. Mikroyapı İncelemeleri.....	51
7.5. Mikrosertlik Ölçümleri.....	53
7.7. Aşınma Testleri.....	53
8. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	56
8.1. Mikroyapı Sonuçları.....	55
8.2. Mikrosertlik Sonuçları.....	71
8.3. Aşınma Deneyi Sonuçları.....	73
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KAYNAKLAR DİZİNİ.....	79
-----------------------	----



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Titanyum süngerü üretim prosesi	8
3.1. Sürtünme kuvvetinin oluşumu.....	11
3.2. Dinamik (μ_d) ve Statik (μ_s) sürtünme katsayısı	11
3.3. Zaman ile sürtünme kuvvetindeki değişimler.	12
3.4. Sürtünme üzerindeki pürüzlülüğün etkisi.....	13
3.5. Abrasiv aşınmanın modları, b) Abrasiv aşınmanın mekanizmaları	16
3.6. a) Yorulma aşınmasının şematik gösterimi, b) Endüstriyel örneği	16
3.7. Adheziv aşınmanın temel mekanizma gösterimi	17
3.8. Korozif aşınmanın şematik gösterimi.....	18
3.9. Pim-disk cihazının şematik görünümü	18
3.10. Levha – kayış cihazının şematik gösterimi	19
3.11. Dört bilye deney cihazının şematik gösterimi	20
4.1. Lazer kaplama işlemi.....	25
4.2. Elektron tabancalarının şematik gösterimi	27
4.3. Yeniden ergitme ve füzyon yöntemlerinin şematik gösterimi	28
4.4. Paralel toz sağlayıcılı dört elektrotlu tozaltı kaynağı şematik olarak gösterimi.....	29
4.5. Gaz tungsten ark kaynağı şematik olarak gösterilişi	30
5.1. Plazma transferli ark kaynağının şematik ve çalışma prensibi.....	32
5.2. Pilot ark ve transfer olmuş arkın oluşumunun gösterimi.....	33
5.3. Gazın plazma haline gelmesinin şematik gösterimi	34
5.4. TIG ile PTA yöntemlerinin karşılaştırılması	38
7.1. Deney numunesinin şematik gösterimi.	49
7.2. Kaplama tozlarının SEM-EDS analizleri: a)C toz partikülleri (1000x), b)TiC toz partikülleri (1000x).....	50
7.3. PTA kaynak makinesi.....	51
7.4. Deney cihazları: a)Kesme cihazı, b)Zımparalama cihazı, c)Optik mikroskop.....	52
7.5. Hitachi Regulus 8230 model taramalı elektron mikroskobu.....	52
7.6. Mikrosertlik ölçüm cihazı.....	53

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.7. a)CSM Tribometer aşınma test cihazı, b)Mitutoyo SurfTest SJ-400 yüzey pürüzlüğü ölçüm cihazı.....	54
7.8. a)Aşınma kanalı derinlik-mesafe grafiği, b) Aşınma kanal alanı.....	54
8.1. PTA yöntemi ile kaplanan numunelerin görüntüleri.....	55
8.2. Ti6Al4V referans numunesinin optik mikroskop görüntüleri: a)500x, b)1000x.....	56
8.3. Ti6Al4V referans numunesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	56
8.4. 0C numunesinin optik mikroskop görüntüleri: a)50x, b)100x, c)1000x, d)Geçiş bölgesi 200x.....	57
8.5. 0C numunesinin SEM mikroyapı görüntüsü (500x).....	58
8.6. 0C numunesinin EDS analizi.....	59
8.7. 25C numunesinin optik mikroskop görüntüsü: a)50x, b)100x, c)1000x, d)Geçiş bölgesi 200x.....	60
8.8. 25C numunesinin SEM mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b)1000x.....	60
8.9. 25C numunesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	61
8.10. 50C numunesinin optik mikroskop görüntüsü: a)50x, b)100x, c)1000x, d)Geçiş bölgesi 200x.....	62
8.11. 50C numunesinin SEM mikroyapı görüntüsü (1000x).....	63
8.12. 50C numunesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	64
8.13. 75C numunesinin optik mikroskop görüntüsü: a)50x, b)100x, c)1000x, d)Geçiş bölgesi 200x.....	65
8.14. 75C numunesinin SEM mikroyapı görüntüsü (1000x.....	65
8.15. 75C numunesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	66
8.16. 100C numunesinin optik mikroskop görüntüsü: a)50x, b)100x, c)1000x, d)Geçiş bölgesi 200x.....	67
8.17. 100C numunesinin SEM mikroyapı görüntüsü (1000x).....	68
8.18. 100C numunesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	69
8.19. Tüm numunelerin XRD analiz sonuçları.....	70
8.20. Numunelerin ortalama mikrosertlik değerleri.....	71
8.21. İşlemsiz ve kaplamalı numunelerin mikrosertlik dağılımı.....	72
8.22. İşlemsiz ve kaplamalı numunelerin sürtünme katsayısı-mesafe diyagramı.....	73

ŞEKİLLER DİZİNİ**Sekil****Sayfa**

- 8.23. İşlemsiz ve kaplamalı numunelerin aşınma oranı-ortalama sürtünme katsayısı grafiği 74
- 8.24. Numunelerin aşınma kanalları ve aşınma kanallarının SEM-EDS analizleri 76



ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

2.1. Titanyum, alüminyum ve demir malzemelerin karşılaştırılması	4
2.2. Ticari saf titanyum grade bilgileri	6
5.1. PTA kaplama ile Stellite6 malzemesi için işlem parametreleri ve nüfuziyet.....	35
6.1. PTA yöntemi ile kaplama yapılan farklı altlık malzeme ve kaplama tozları	47
7.1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi.....	49
7.2. Numune adlandırma tablosu	50
7.3. PTA işlem şartları	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Simgeler****Açıklama**

Ti	Titanyum
Al	Alüminyum
V	Vanadyum
C	Karbon
°C	Celcius
E	Young Modülü

Kısaltmalar**Açıklama**

EDS	Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi
XRD	X Işını Kırınımı
SEM	Tarayıcı Elektron Mikroskobu
OM	Optik Mikroskop
TIG	Tungsten İner Gaz
ASTM	American Society for Testing and Materials
GTAW	Koruyucu gazaltı tungsten ark kaynağı
m	Metre
µm	Mikronmetre
mm	Milimetre
N	Newton

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Yüzeylerin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılan yüzey kaplama yöntemleri son yıllarda çok fazla araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Mekanik parçalarda temas sonucu oluşan aşınma malzeme kayıplarına neden olur ve bu olay istenmeyen bir durumdur (Gürgeç ve Özel, 2016). Bu parçalardaki aşınma zamanında belirlenemezse büyük hasarlara yol açabilecek bir arıza türüdür (Kılıçay, 2020).

Ayrıca sektörde kullanılan malzemeler kullanım alanlarına göre sürtünme, yorulma ve korozyon ile de karşı karşıya kalmaktadır. Bu maruziyetleri en aza indirmek veya ortadan kaldırmak için çeşitli biçimlerde yüzey kaplama işlemlerine gereksinim duyulmaktadır. Plazma Transferli Ark (PTA) kaynak yöntemi kullanılan alt malzemelerin yüzey kalitesini artırmak ve iyileştirmek hedefiyle uygulanmaktadır.

PTA yüzey alaşımlandırma işlemi çok yaygın olarak kullanılan bir kaplama türüdür. PTA yöntemi gemi yapımı, havacılık, uzay, nükleer ve elektronik endüstrileri başta olmak üzere birçok üretim tesisinde kullanılmaktadır (Özel vd., 2007). Yüzey kaplama işlemleri PTA kaynak yöntemi haricinde gaz tungsten ark (TIG veya GTAW), lazerle yüzey ergitme (LSM), MİG/MAG, lazer kaynak yöntemi, elektrik ark kaynağı ve oksijen-gaz tekniği ile de yapılmaktadır (Apay ve Gülenç, 2013). PTA yöntemi altlık malzeme yüzeyine çeşitli özelliklere sahip kaplama tozlarının ergitilmesi ile yapılır (Yıldız vd., 2017).

PTA ile yüzey alaşımlandırma tekniği diğer bir yöntem olan lazer kaynak tekniğine göre uygulanabilirliği daha kolay ve ucuz olduğu için tercih edilir. Ayrıca çeşitli karışımlardaki tozların ergitilerek kaplama işlemi yapılan plazma transfer ark kaynak yöntemi yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Topal, 2017). Altlık malzeme üzerine uygulanan yüksek enerji yoğunluğuna sahip plazma arkı malzemenin yüzeyini hızla eritir ve erimiş havuz bölgesinin içine kaplama tozları ilave edilir ve bu alaşımlandırılmış havuz hızla katılarak yüzey özellikleri değiştirilmiş tabaka elde edilir (Kılıçay, 2020). Yapılan kaplama işlemi sonucunda altlık malzeme ile ergitilen toz karışımı arasında iyi bir metalurjik bağ olması istenir.

Malzemenin yetersiz tribolojik özelliklerini iyileştirmek için yüzey kaplama işlemleri uygulanır. Kaplamanın sertliği arttıkça aşınma direncinin de artacağı düşünülse de yapılan çalışmalar sonucunda aşınma direncinin hem sertlik (H) hem de Young Modülü (E) ile ilişkili olduğu ve aşınma direncinin H/E veya H^3/E^2 ile karakterize edildiği bulgulanmıştır (Hou, 2013). H/E oranı malzemenin elastik gerilme duyarlılığıdır ve bu oranın artması iyi aşınma direncine karşılık gelmektedir ve H^3/E^2 oranı ise malzemenin plastik deformasyona direnme yeteneğidir (Hou, 2013). Kaplamada sıcak ve soğuk değişimi ile termal şok hatası meydana gelebilmektedir. Bu koşullarda, stres ve deformasyon oluşturan boyutsal değişime yol açan termal gradyan üretilir. Termal gradyan, sıcaklığın bulunduğu boyuttaki değişimi olarak adlandırılabilir. Son yıllarda, PTA kaynağı ve lazer sert kaplama gibi geleneksel olmayan kaplama işlemleri, aşağıdaki avantajları sundukları için tercih edilmektedir (Sudha vd., 2008).

- 1) Tortuda 'seyreltme etkisi' gibi daha düşük mikrokimyasal yeniden dağılım,
- 2) alt tabaka ile mükemmel bağlanma,
- 3) yoğun, hatasız tortu verme yeteneğidir.

Literatür araştırmaları farklı alaşım tozları ve altlık malzeme kullanılarak uygulanan PTA kaplama yöntemlerinin yaygın olarak kullanıldığını göstermiştir. Kullanılan farklı altlık malzeme ve tozlar kaplamanın mikroyapısını, mekanik ve tribolojik özelliklerini de etkilemektedir (Kılıçay, 2020).

2.TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARI

Titanyum ilk olarak 1971’ de İngiltere’ de keşfedilmiş ve keşfedildiği Manakara şehrinden esinlenerek adına “Menakirit” denilmiştir. Bu keşiften 4 yıl sonra Martin Heinrich Klaproth bu metalin yeni bir element olduğunu bulmuş ve “titanyum” adını vermiştir. Bu isim Yunan Mitolojisi’nde toprağın ilk oğullarının ismi olan “Titan” ‘dan gelmiştir. Titanyum doğada fazlaca bulunmaktadır. Ayrıca yapılan araştırmalar neticesinde güneşte ve göktaşlarında olduğu da keşfedilmiştir (İşler, 1999).

2.1. Titanyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri

Titanyum gümüşümsü metalik beyaz renktedir ve parlaktır. İşlenmesi ve elde edilmesi zor bir element olan titanyum düşük yoğunluk ($4,54 \text{ gr/cm}^3$) ve çok iyi şekillendirilebilirlik özelliklerine sahiptir ve çeliklerden daha iyi ergime derecesine sahip olan titanyum manyetik de değildir. Antimanyetik olan titanyum uçaklarda, deniz araçlarında ve tıbbi cihazlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Elastisite modülü 116 GPa ve ergime noktası 1668 °C olan titanyum, 400 °C’ye kadar olan sıcaklıklarda iyi korozyon direncine sahiptir. Titanyum alaşımlandırıldığında çekme dayanımı 1380 Mpa değerine kadar çıkmaktadır. Mekanik dayanımı yönünden incelendiğinde titanyum alaşımların direnci alüminyum alaşımına göre yaklaşık 2,5 kat daha fazladır. Titanyumun işlenebilirliği yüksek bir geçiş metalidir. Sıcak ve soğuk presleme ve kaynaklanabilirliği iyi olduğu için çok tercih edilmektedir. Isıyı iyi iletmesi de kullanım alanlarını genişletmektedir. Genellikle titanyum mineralleri çok çeşitli olarak doğada bulunurken ekonomik olarak en değerlileri ilmenit, rutil, anatas ve brokit mineralleridir (Yücel, 2018).

Titanyumun bazı mekanik özelliklerinin alüminyum ve demir ile karşılaştırılması Çizelge 2.1’ de verilmiştir. Burada görüldüğü gibi titanyumun mekanik özellikleri görece diğer metallere daha iyidir. Titanyum yüksek maliyete sahip olmasına karşın yüksek mukavemetinden dolayı içi dolu parçalar yerine kabuk malzeme şeklinde tasarlanabilmesi bu açığı kapatmaktadır.

Çizelge 2. 1. Titanyum, alüminyum ve demir malzemelerin karşılaştırılması (Özkan, 2019).

	Titanyum	Alüminyum	Demir
Yoğunluk (gr/cm ³)	4.54	2.70	7.86
Elastisite Modülü (GPa)	116	70	211
Ergime Noktası (°C)	1668	660	1538

Tek olumsuz yanı, dünyada en çok bulunan 9. element olmasına rağmen çıkartılması ve işlenmesi zor olan bir malzeme türüdür. Titanyumun dayanıklılığı fazla olduğu için uzun ömürlü bir malzemedir ve üretimden sonra üretilen parçanın bakım maliyetleri çok az olacağı için bu olumsuz yanını da telafi etmektedir.

Bu çalışmada titanyum alaşımlarından en yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V (%6 alüminyum, %4 vanadyum, %90 titanyum) alaşımı kullanılmıştır. İlk kullanılan titanyum alaşımı olan bu alaşım 1954 yılında Amerika’ da geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Ti6Al4V işlenebilirlik, yüksek korozyon direnci, tokluk, iyi derecede esneklik, ısı direnci, yüksek dayanım, biyoyumluluk ve kaynak edilebilme özelliklerine sahiptir (İşler, 1999).

Bütün bu özelliklerinden dolayı diğer titanyum alaşımları içinde kullanımı en çok tercih edilen alaşım türüdür. Ayrıca diğer titanyum alaşım türleri Ti6Al4V alaşımının geliştirilmesi ve aynı zamanda değiştirilmesi ile türetildiği bilinmektedir. Bu alaşım yaygın olarak türbin kanatlarında kullanılmak için üretilmektedir (Yücel, 2018).

2.2. Titanyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Allotropik bir malzeme olan titanyum yapısında sıkı düzen hekzagonal yapıda olan alfa fazı ve hacim merkezli kübik yapıda olan beta fazı içermektedir. 885 °C’ye kadar kararlı α (alfa) fazında olan saf titanyum malzeme, bu sıcaklıktan daha fazla ısı verildiğinde malzemenin yapısı kararlı alfa fazından β (beta) fazına dönüşmektedir.

Bu faz dönüşüm sıcaklığı “ β dönüşüm sıcaklığı” olarak adlandırılmaktadır. Bu sıcaklık α fazını kararlılaştıran karbon, oksijen ve azot gibi elementlerin etkisiyle yükselirken, alaşım elementleri ya da metal kalıntıların varlığı ile ya yükselmekte ya da azalma eğilimi göstermektedir. Ayrıca tüm alaşımın α fazında olduğu sıcaklığa “ α dönüşüm sıcaklığı” adı verilmekte ve iki dönüşüm sıcaklığı arasında malzemenin mikro yapısında α ve β fazı birlikte bulunmaktadır. Titanyumun ergime sıcaklığı olan 1668 °C’ye kadar beta fazı yapısına hakimdir.

Titanyum alaşımları α alaşımları, β alaşımları ve $\alpha+\beta$ alaşımları olarak üç grupta incelenmektedir. α alaşımlarında tüm yapıyı α fazı oluşturduğu halde β alaşımlarının yapısının büyük bir bölümünü β fazı oluşturmaktadır. Son olarak $\alpha+\beta$ alaşımları oda sıcaklığında ele alındığında α ve β fazlarının birlikte yer aldığı görülmektedir. Ayrıca yapı içeriğinde α fazının fazla β fazının nispeten daha az bulunduğu alaşımlar near-alpha alaşımlar olarak adlandırılmaktadır. Bu alaşımlar “süper-alfa” ya da “lean-beta” olarak da bilinmektedir (Jr., 2000).

2.2.1. Ticari saf titanyum

Ticari saflıkta titanyum %99.5 ile %98.635 oranında titanyum içerir ve korozyona olan direncinden dolayı yüksek dayanım gerektirmeyen ama korozif ortamlarda kullanımı tercih edilir. Titanyumun akma dayanımı, içerisine eklenen elementlere bağlı olarak 170 MPa ile 480 MPa arasında değişebilmektedir. Ayrıca demir ve oksijenin oranı arttıkça dayanımı da artmaktadır. Saf titanyumun oda sıcaklığında içyapısı %100 α fazında iken bileşimine farklı elementlerin ve özellikle demirin eklenmesi içyapıda β fazının görülmesinde etkili olur (Akyol, 2007).

Ticari saflıkta titanyum alaşımları ASTM standardına göre içerdiği saflık derecesi göz önüne alınarak sınıflandırılmıştır. Çizelge 2.2’ de ticari saf titanyumun her bir grade için genel malzeme özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2. 2. Ticari saf titanyum grade bilgileri (Akyol, 2007; Avcu, 2011).

ASTM STANDARDI	Akma Dayanımı (Mpa)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)		Katlı Elementleri (Ağırlıkça Max %)				
			Alfa (α)	Beta (β)	N	C	Fe	H	O
Grade 1	170	240	888	880	0,03	0,1	0,2	0,015	0,18
Grade 2	280	340	913	890	0,03	0,1	0,3	0,015	0,25
Grade 3	380	450	920	900	0,03	0,1	0,3	0,015	0,35
Grade 4	480	550	950	905	0,03	0,1	0,5	0,015	0,4

Verilen tablo incelendiğinde ticari saf titanyumun bütün seviyelerinde azot (N), karbon (C) ve hidrojen (H) yüzde ağırlıklarının aynı olduğu görülmektedir. Oksijen (O) ve demirin (Fe) yüzde ağırlıkları arttıkça akma ve çekme dayanımının da arttığı görülmektedir. Ayrıca grade seviyeleri arttıkça alfa ve beta dönüşüm sıcaklıkları, akma ve çekme dayanımı ile doğru orantılı olarak artmaktadır (Akyol, 2007).

2.2.2. α alaşımlar

α alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı β alaşımlarından daha dayanıklı olduğu bilinmektedir. Ayrıca az miktarda ara yer atomu içeren α fazı zengin alaşımlar tokluk ve süneklik özelliklerini çok düşük sıcaklıklarda bile korumaktadırlar (Metals, 1980).

α fazına sahip alaşımlar $\alpha+\beta$ alaşımları ve β alaşımlarından farklı olarak ısı işlemi ile sertleştirilememektedir. Tavlama işlemi veya yeniden kristalleştirme tavlama ile soğuk işlem sonrası artık gerilmeler yok edilebilmektedir. Dövme işlemi sırasında merkezde kırılmalar ve yüzey çatlaklarının oluşmasından dolayı dövülebilme kabiliyetlerinin çok düşük olduğu ve dövme sıcaklığı aralığının $\alpha+\beta$ ve β alaşımlarından daha dar olduğu bilinmektedir (Metals, 1980).

α alaşımlı malzemeyi hızlı soğutmak iğnemsiz α 'nın, fırında soğutmak ise plaklı α yapısının ortaya çıkmasına sebep olmaktadır (Askeland vd., 2010).

2.2.3. $\alpha+\beta$ alaşımları

$\alpha+\beta$ alaşımları, α ve β fazlarının da beraber bulunduğu alaşım çeşididir. Bu alaşımlar oda sıcaklığında β fazı içerme yzdesi 10 ile 50 arasındadır. Oda sıcaklığında β fazını çok az miktarda beta dengeleyicileri bile dengeleyebilmektedir. Ti6Al4V alaşımını en yaygın kullanılan $\alpha+\beta$ alaşımıdır. $\alpha+\beta$ alaşımları şekillendirilebilirler ve ısıl işlem ile sertleştirilme olanağına sahiptirler (İşler, 1999).

2.2.4. β alaşımları

β alaşımları, β fazını kararlaştırıcı alaşım elementleri içerirler. Diğer alaşımların aksine yzsek yoğunlukları, soğuk şekillendirilebilirlikleri, iyi sertleştirilebilirlik ve dövülebilirlik özellikleri bu alaşımlarda daha iyidir. Ayrıca yzsek sıcaklıklarda mukavemet özellikleri de $\alpha+\beta$ alaşımlarından daha yzsek değerdedir (İşler, 1999).

2.2.5. Yakın α (near α) alaşımları

Yapı içeriğinde α fazının fazla β fazının nispeten daha az bulunduğu alaşımlar near-alpha alaşımlar olarak adlandırılmaktadır. Bu alaşımlar ‘‘süper-alfa’’ ya da ‘‘lean-beta’’ olarak da bilinmektedir (Jr., 2000) .

Yzsek sıcaklığın gerekli olduğu uygulama alanlarında kullanılması uygun olan alfa yakın alaşımları aynı zamanda $\alpha+\beta$ alaşımlarının sahip olduğu yzsek mukavemete ve α alaşımlarında bulunan yzsek sürünme dayanımına da sahiptir. Alfa yakın alaşımlarının çalışma sıcaklığı yaklaşık 500-550 °C’ ye çıkabilmektedir. Yakın α alaşımlarına örnek olarak Ti-6Al-5Zr-0,5Mo-0,25Si ve Ti-8Al-1Mo-1V malzemeleri gösterilebilir (İşler, 1999).

2.3. Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının retimi

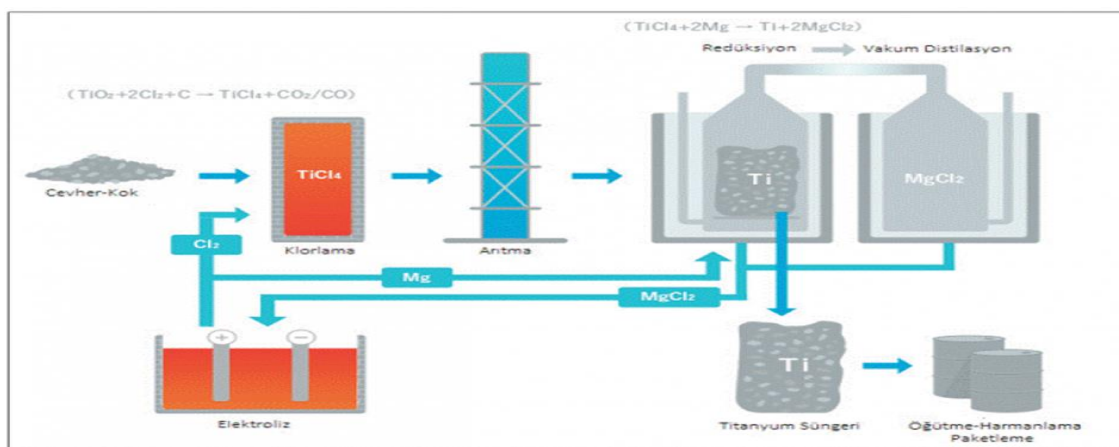
Titanyum ham madde halinden nihai parça halini alana kadar bazı işlemlerden geçer. Bu işlemler sırasıyla sünger metal diye adlandırılan hale getirilmesi, bu sünger metalin eritilerek ingot haline getirilmesi, oluşturulan ingotların işlenerek yarı mamül

haline getirilmesi ve son olarak da bu yarı mamulün talaşsız ve talaşlı imalat yöntemleri ile nihai parça haline getirilmesidir (Yücel, 2018).

2.3.1. Titanyum süngeri üretim prosesi

Minerallerin pek çoğunun yapısında titanyum bulunsa da bunlardan çok azı titanyumun üretilmesi için kullanılmaktadır. Bu minerallerden en çok kullanılanlar; İlmenit (FeTiO_3), rutil (TiO_2) ve lukoksen olarak sıralanmaktadır. Titanyumun elde edilmesi sırasında çok fazla sorun ile karşılaşmaktadır ve bu nedenle 20. Yüzyılın ikinci yarısından beri Kroll yöntemi kullanılmaktadır.

Kroll yöntemi William Kroll tarafından bulunmuştur ve yıllardan beri kullanılan yüksek enerji gerektiren ve çok maliyetli bir işlem olmasına rağmen yerini alabilecek daha iyi bir yöntem pek fazla bulunmadığı için yaygın olarak halen kullanılmaktadır. Bu yöntemde ilmenit veya rutil ile karbon yaklaşık 800°C iken üzerinden klor akımı geçirilmekte ve elde edilen TiCl_4 (titanyum tetraklorür) yoğunlaştırılmaktadır. Yoğunlaştırulup sıvı hale getirilen TiCl_4 damıtılarak saflaştırıldıktan sonra 800°C ' de vakum ya da koruyucu gaz altında atmosfer basıncında sıvı magnezyum ile karıştırılıp magnezyum klorür ve titanyum elde edilmektedir. Burada elde edilen titanyum gözenekli yapıda olduğu için 'titanyum süngeri' olarak da adlandırılmaktadır. Üretim prosesi Şekil 2.1' de verilmiştir. Bu titanyum süngeri tekrar belirli işlemlerden geçirilip titanyum külçeleri haline dönüşürler (Yücel, 2018).



Şekil 2.1. Titanyum süngeri üretim prosesi (Yücel, 2018).

Titanyum elde etmek için kullanılan diğ er bir y ontemde Hunter y ontemidir. Hunter y onteminde Kroll y onteminden farklı olarak $TiCl_4$, Mg yerine Na ile $230^\circ C$ ' de argon gazı ile karıştırılır. Sonraki adımda $TiCl_2$ tekrar Na ile tepkimeye sokulur ve sonuçta titanyum süngeri meydana gelir.

Titanyum s ngesine özel işlemler uygulanarak titanyum ingotları üretilir. Bu işlem için iki y ontem vardır. Bunlar li y ontemi ya da vakumla ısıtılarak saflaştırma y ontemidir. Titanyum sünger metali kırılıp presleme işlemleri yapıldıktan sonra tükenen elektrotlu vakum ark fırınında ergitilir. Titanyum metal parça preslendikten sonra elektrot olarak kullanılır ve vakum altında ergitilir ve bu ergiyik metal tekrar vakum altında katılaştırılır. Bu işlem daha saf bir titanyum elde etmek veya daha uniform bir yapı elde etmek isteniliyorsa tekrar ergitilip katılaştırılır ancak bu tekrarlanan işlem üretim maliyetini daha çok artıracaktır.

Titanyum üretmek için gerekli hammaddeler; alaşım elementleri, titanyum süngeri ve hurda malzemeler olarak sıralanabilmektedir (Yücel, 2018).

2.4. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

Titanyum 1952 yılında ilk uçuşunu yapmış olan DC-7 tipi uçağın kanatlarındaki motor bağlantı yerleri ve motorunda bulunan yanma odasında kullanılarak havacılık sektörüne ilk adımlarını atmıştır (İşler, 1999).

İlmenit ve rutil asıllı cevherler kağıt, kauçuk, kozmetik, seramik, deri, boya, tekstil, plastik ve mürekkep üretiminde kullanılmaktadır. Deniz suyu tatlılaştırma tesisleri, uçak-uzay sanayi, kompresör diskleri, askeri ya da ticari amaçlı üretilen uçakların jet motorlarındaki pervane kanatları, uçak iskeletleri, otomotiv, deniz araçları, kimyasal işlemler ve biyomedikal gibi alanlar da titanyumun sıklıkla kullanıldığı alanlardan birkaçıdır. Anti-toksik ve anti-alerjik oluşu, organik sıvılara dayanıklılığı ve tam olarak biyo uyumlu olduğundan dolayı tıpta kemiklerin birleştirilmesinde, dişçilik ve ortopedi gibi alanlarda implant malzeme olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca titanyum ilk kez 1960 yılında döküm olarak kimyasal madde pompaları ve vanalarında kullanılmıştır (İşler,

1999). Titanyum aynı zamanda korozyona karşı epey dirençlidir ve bu özelliği sayesinde kimyasal madde kullanılan işletmelerde işletme maliyetini düşürmektedir.

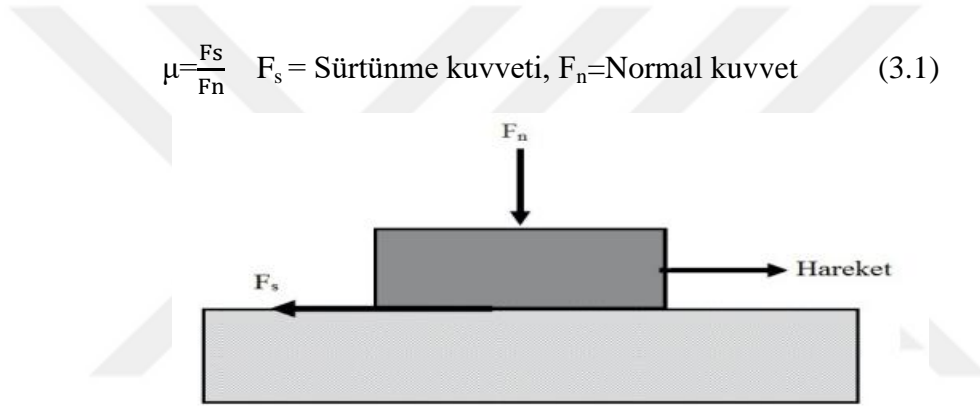
Dünyada kullanılan en güçlü ve dayanıklı 10 metal arasında yerini almaktadır. Titanyum dünyada en çok kullanılan malzemeler arasında yer almaktadır ve en fazla Çin'de ve Japonya'da üretilmektedir. Tüm bu özellikleri neticesinde titanyum alaşımlarının kullanımı her geçen sene daha fazla sektörde ve mühendislik uygulamalarında artış göstermektedir (İşler, 1999).



3.TRİBOLOJİ

3.1. Sürtünme

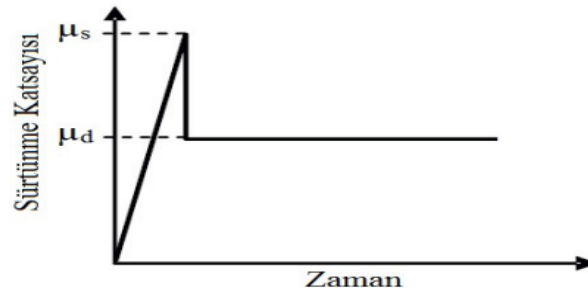
Temas halindeki iki cismin birbiri üzerinde hareket ettirilmesi sonucu temas eden yüzeyler arasında meydana gelen direnç kuvvetine sürtünme denir. Sürtünme kuvveti Şekil 3.1' de gösterildiği gibi tanımlanmaktadır. Sürtünme katsayısı normal kuvvetin sürtünme kuvvetine bölümü ile bulunmaktadır ve bu kuvvetin değeri 0 ile 1 arasında olmaktadır (Kılıçay, 2017).



$$\mu = \frac{F_s}{F_n} \quad F_s = \text{Sürtünme kuvveti}, F_n = \text{Normal kuvvet} \quad (3.1)$$

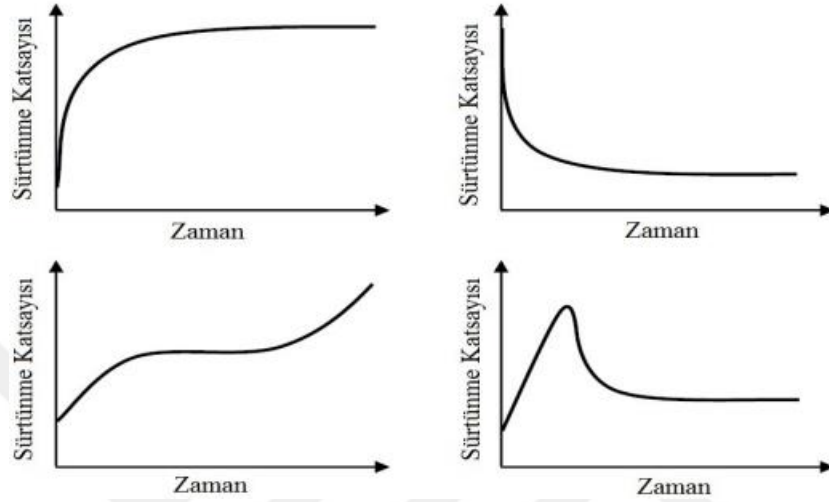
Şekil 3.1. Sürtünme kuvvetinin oluşumu (Kılıçay, 2017).

Statik sürtünme kuvveti hareketsiz bir cismin harekete geçebilmesi için yenmesi gereken kuvvet olarak tanımlanır. Harekete başlayan cismin hareketini devam ettirebilmesi için devamlı olarak yenmesi gereken kuvvet ise dinamik sürtünme kuvveti olarak tanımlanır. Dinamik sürtünme kuvveti şekil 3.2.' de görüldüğü gibi her zaman statik sürtünme kuvvetinden küçüktür (Kılıçay, 2017).



Şekil 3.2. Dinamik (μ_d) ve Statik (μ_s) sürtünme katsayısı (Kılıçay, 2017).

Malzemelerin temas halindeki yüzeylerinin maruz kaldığı yapısal değişikliklerden dolayı cilalama, amorflaşma, difüzyon, allotropik faz dönüşümü, kristalleşme, oksidasyon ve eritme gözlenebilir. Bütün bu nedenlerden dolayı şekil 3.3’ de verildiği gibi bir çok türde sürtünme davranışı görülebilir (Kılıçay, 2017).



Şekil 3.3. Zaman ile sürtünme kuvvetindeki değişimler (Kılıçay, 2017).

3.1.1. Sürtünme teorileri

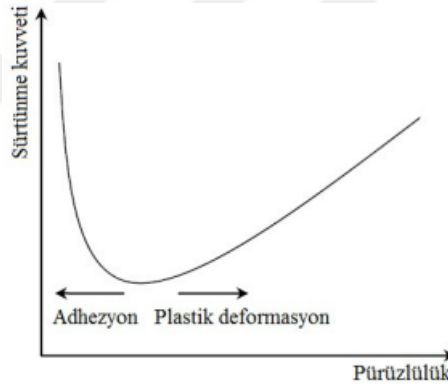
Mekanik sürtünme teorilerini Amontons ve Coulomb ilk olarak bulmuşlardır ve bu kanunlar aşağıdaki gibidir;

1. Birbiri ile temas halinde olan katı cisimler arasında, görünen temas alanından bağımsız sürtünme vardır.
2. Sürtünme kuvveti ile normal kuvvet doğru orantılıdır ve bu orantı sürtünme katsayısı olarak tanımlanır.
3. Kinetik sürtünme katsayısı kayma hızından bağımsızdır.

İlk iki yasa yüksek elastik malzemeler ya da çok sert malzeme için geçerli değilken metal malzemeler ile uyumludur. Hatta metal malzemeler için bile plastik akış eşiği temas basıncından yüksek olursa ilk yasanın tam aksine bir sonuç elde edilebilir (Kılıçay, 2017).

3.1.2. Sürtünmenin temel mekanizmaları

Amontons ve Coulomb sürtünme mekanizması ile ilgili çalışmalar yapan ilk araştırmacılar. Coulomb birbiri ile temas halinde olan yüzey pürüzlerinin mekanik olarak etkileşim halinde olmasının sonucu olarak metalik sürtünmenin meydana geldiğini öne sürmektedir. Kama şekilli pürüzlerin hareketini inceleyen Coulomb modeli, temas halinde olan iki yüzeyin konum değiştirirken ayrılmalarına ve daha sonra tekrar birleşmelerine sebep olur. Bu kama şekilli pürüzlerin konum değiştirme hareketi sırasında yüklemesi için iş yapılırken ilk konuma geri dönüş ile potansiyel enerjinin çoğu depolanır. Bu enerjinin sadece küçük bir kısmı kama şekilli pürüzlerin aşağı kaymasını sağlamak için kullanılır. Mekanik etkileşim teorisinden sürtünme işleminde enerji kaybedildiği için vazgeçilmiş ve enerji kaybı mekanizmasını da içeren bir sürtünme teorisi olmadığı görülmüştür (Kılıçay, 2017).



Şekil 3.4. Sürtünme üzerindeki pürüzlülüğün etkisi (Kılıçay, 2017).

Sürtünmeyi en aza indiren belirlenmiş en iyi pürüzlülük değeri, malzemelerin temas ettiği yüzey şartlarına ve yapısına bağlıdır. Adhesiv sürtünme bileşeni, temas eden yüzeylerin pürüzlülüğünün en az olması ve bunun sonucu olarak gerçek temas alanının da o kadar fazla olmasının sonucunda daha da yüksek olur. Plastik deformasyon, yüzeylerin pürüzlerindeki sayıların çokluğuna ve keskin yapılarına bağlı olarak artmaktadır. Şekil 3.4' de görüldüğü gibi yukarıda belirtilen iki durum arasında sürtünme katsayısının düşük olduğu optimum pürüzlülük vardır.

Sürtünme kuvveti iki bileşenden oluşmaktadır ve bunlar plastik deformasyon ile adhezyon kuvvetleridir.

$$F_t = F_d + F_a \quad (3.2)$$

Formül 3.1' de verilen F_d terimi temas halinde olan yüzeylerdeki pürüzlerin yumuşak yüzeyi kazınması ile deforme edilmesine bağlı iken, F_a terimi yüzeyler arasındaki adhesif bağlantı noktalarının ayrılması için gereken kuvvettir.

Isı enerjisi, optik enerji, mekanik enerji ve akustik enerji sürtünme işlemi sırasında harcanan enerjiler arasında yer almaktadır. Bu harcanan enerji miktarları çevre koşullarına, temas eden yüzeylerin malzeme cinsine ve temas hallerine göre değişmektedir. Bütün bunların neticesinde aşınma ile sürtünme arasında bir bağıntı olmadığı ve bazı durumlarda yüksek sürtünmede dahi yüzey aşınması olmamasının olası olduğu görülmüştür.

3.2. Aşınma

Birbiri ile temas halinde olan ve birbiri ile bağıntılı hareket eden parçalarda temas halindeki yüzeylerde sürtünme ile parçacık kopması ile kütle kaybının olması durumu aşınma olarak tanımlanır. Aşınmanın tam olarak önüne geçilememesine rağmen azaltmak için birçok çalışma yapılmaktadır. Aşınmanın neden olduğu kütle kaybı sonucunda temas halinde olan parçalarda şekil ve boyut kaybı olmaktadır. Aşınma çoğu mekanizma için istenmeyen bir durumdur. Aşınma çeşitli makine elemanları parçaları olan dişliler, kamalar ve yataklar gibi mekanizmalarda istenmez. Bunlar gibi makine elemanlarında aşınmanın neden olduğu malzeme kaybı sonucu hareketli mekanizmaların çalışmasında sorunlar meydana gelecek ve bunun sonucunda parça değişimi yapılmadığı takdirde mekanizmanın bozulmasına sebep olacaktır. Bu hareketli mekanizmalarda aşınmayı en aza indirmek için tribolojik temasların iyi tasarlanmış olması gerekmektedir. Malzeme yüzeylerinin parlatılması ve kalemin kağıtta bıraktığı iz gibi durumlarda mekanik olarak aşınma istenmektedir. Bu tip aşınmalar yararlı aşınmadır ve kontrol altında yapılmalıdır.

3.2.1. Aşınmanın temel mekanizmaları

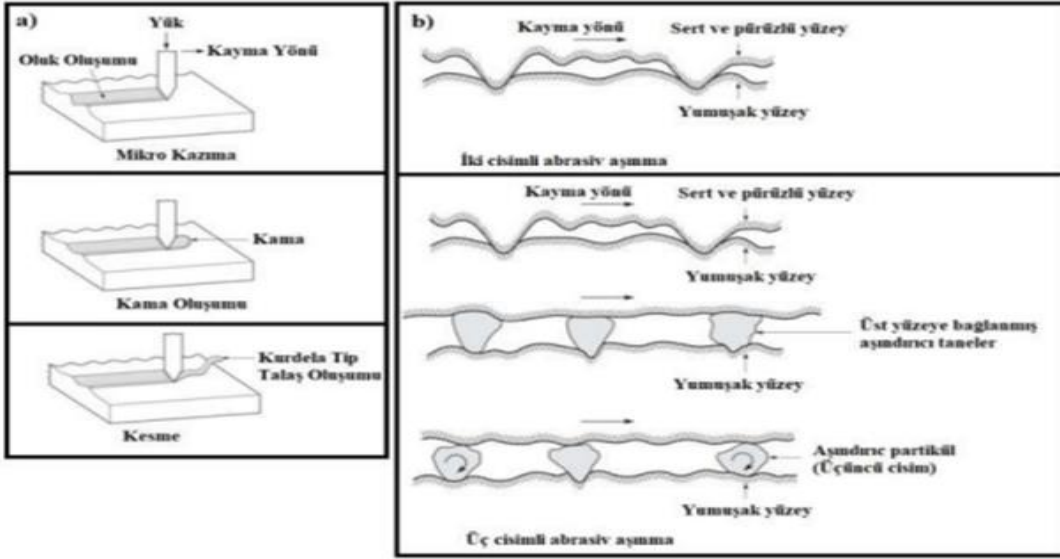
Aşınmanın dört temel mekanizması vardır. Bunlar; abrasiv aşınma, korozif aşınma, yorulma ve adheziv aşınmadır. Bu dört aşınma tipi dışında, erozif aşınma, oksidatif aşınma, yenme aşınması ve kavitasyon aşınması da aşınma mekanizmalarının daha iyi tanımlanması için gruplandırılmıştır.

3.2.1.1. Abrasiv aşınma

Temas halinde olan yüzeylerde aşınma sonucu malzeme kaybına neden olan aşınma türü abrasiv aşınmadır. Talaşlı imalatta parça işleme ve şekillendirmesi bu mekanizma sonucu oluşmaktadır. Bu aşınma mekanizmasında aşırı sert parçacıklar daha yumuşak yüzeye temas ederek kütle kaybına neden olmaktadır (Kaya, 2021).

Abrasiv aşınma, iki veya üç elemanlı olarak aşınma çiftinin davranışına göre ikiye ayrılmaktadır. Aşınma çiftlerinin sadece birbirleri ile etkileşimlerinin söz konusu olduğu mekanizmalar iki elemanlı abrasiv aşınma olarak adlandırılmaktadır. Üç elemanlı abrasiv aşınmada ise temas eden yüzeylerde üçüncü birleşen olarak yüzeylerden kopan partiküllerde temas bölgesine dahil olarak aşınmanın daha da çok olmasına sebep olmaktadır.

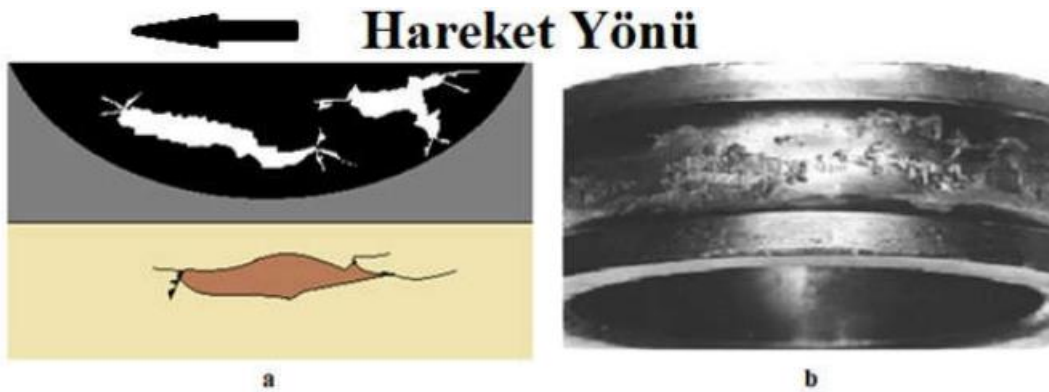
Abrasiv aşınma modları ve mekanizmaları Şekil 3.5' de gösterilmektedir. Temas eden yüzeyler arasındaki sertlik farklılığı ve temas sonucu oluşan basınç abrasiv aşınmayı etkileyen en önemli iki faktördür (Kaya, 2021).



Şekil 3.5. Abrasiv aşınmanın modları, b) Abrasiv aşınmanın mekanizmaları (Bhushan, 2013; Kaya, 2021).

3.2.1.2. Yorulma aşınması

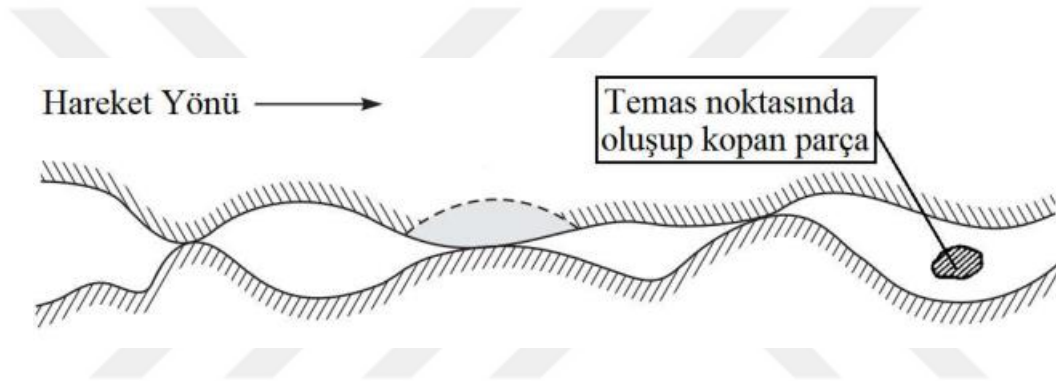
İki yüzey arasında tekrar eden zorlanmalar sonucu meydana gelen aşınma türüdür. Yorulma aşınmaları çevrim sayısına göre uygulanmış olan tekrarlı yük altında düşük veya yüksek çevrimli yorulma aşınma mekanizmaları meydana gelmektedir (Kaya, 2021). Yorulma aşınmasının gerçek bir iş parçası üzerindeki hali ve şematik olarak gösterimi Şekil 3.6' da verilmiştir.



Şekil 3.6. a) Yorulma aşınmasının şematik gösterimi, b) Endüstriyel örneği (Bhushan, 2013; Kaya, 2021).

3.2.1.3. Adheziv aşınma

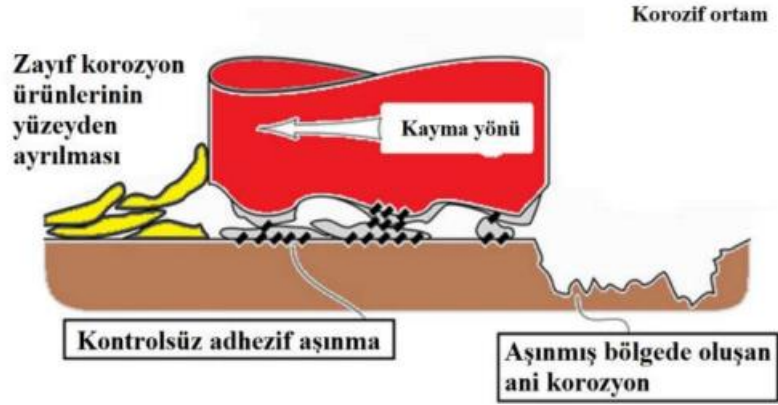
Birbiri ile temas halinde olan kayma hareketi yapan metal-metal çiftleri arasında adheziv aşınma meydana gelir. Bu yüzeyler arasında noktasal temas vardır ve bu temasın sonucu oluşan gerilmeler akma gerilmesine ya çok yakındır ya da geçmiş durumdadır. Bunun sonucunda atomlar arası bağlanmalar ortaya çıkar. Bu aşınma sonucu aşınan yüzeyler arasında soğuk kaynak ile malzeme transferi de meydana gelmektedir. Ara temas bölgesinde, kaymanın durmaması sonucunda temas eden noktalar küçük parçalar halinde kopar ve bu bölgede görülürler. Adheziv aşınma mekanizmasının şematik gösterimi Şekil 3.7' de verilmektedir (Kaya, 2021).



Şekil 3.7. Adheziv aşınmanın temel mekanizma gösterimi (Bhushan, 2013; Kaya, 2021).

3.2.1.4. Koroziif aşınma

Koroziif aşınma türünde temas eden yüzeyler çalışma ortamı ile etkileşimi sonucu önce yüzeylerinde oksitlenme sonucu bir tabaka oluşur ve daha sonra bu oluşan tabaka abrasiv aşınmanın etkisiyle hasara uğrar. Bu aşınma türünü engellemek için temas eden yüzeylere kaplama yapılmalı ve seçilen malzemeler reaksiyona girmeyecek şekilde seçilmelidir. Bu aşınma türü tribokimyasal aşınma veya korozyon aşınması olarak da tanımlanabilmektedir. Şekil 3.8' de koroziif aşınmanın şematik çizimi verilmektedir (Kaya, 2021).

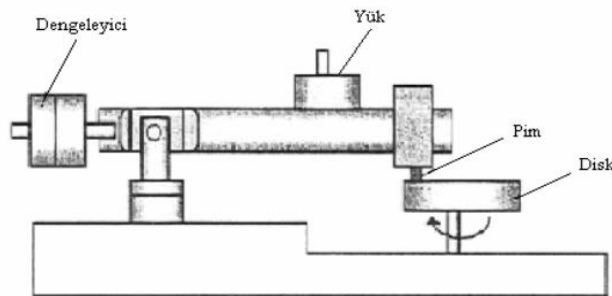


Şekil 3.8. Korozif aşınmanın şematik gösterimi (Kaya, 2021; Stachowiak ve Batchelor, 2014).

3.2.2. Aşınma deney yöntemleri

3.2.2.1. Pim-disk deney yöntemi

Aşınma deney düzeneklerinden en yaygın olarak kullanılanı pim-disk (disk üzerine pim) yöntemidir. Pim-disk deney düzeneği Şekil 3.9’ da şematik olarak verilmiştir. Aşınma numunesi olarak kullanılacak malzeme küre, koni ve silindir pim veya disk olabilmektedir. Döner disk birçok malzeme türünden yapılabilmektedir ama genel olarak metal bileşenlerden oluşmaktadır. Pimin temas noktası ile diskin merkezi arasındaki “r” radyal mesafeyi değiştirerek izafi kayma hızı ayarlanabilmektedir (Soydan ve Ulukan, 2003).

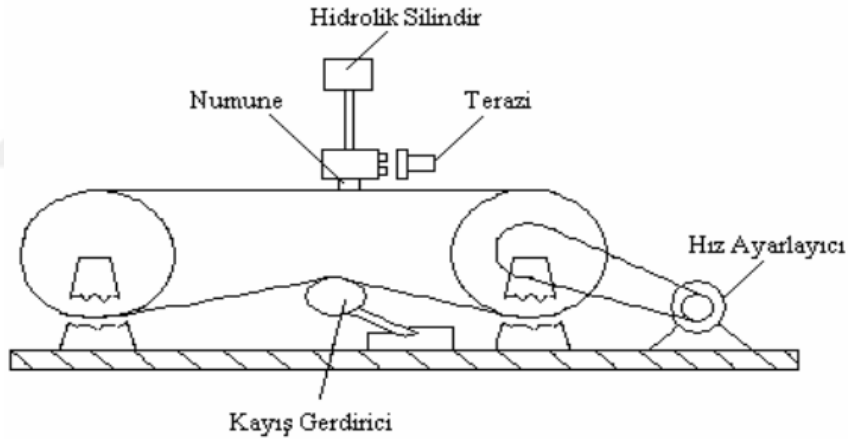


Şekil 3.9. Pim-disk cihazının şematik görünümü (Karaoğlu, 2006).

3.2.2.1. Levha - kayış deney yöntemi

Levha – kayış test cihazı, iki geniş silindir ve eğilebilen bir kayışın bu silindirlerin üzerinden geçirilmesi ile meydana gelen sistemdir. Kayışın hızı, hız ayarlı tek bir silindirin devri değiştirildiği durumda değişmektedir. Kayış birçok farklı malzeme türünde olabilir. Bunlar; lastik, kompozit malzeme veya çelik şerittir. Kayışın yüzeylerinden birine zımpara kağıdı veya aşındırıcı bir parça yerleştirilmesi ile aşındırmayı sağlayan yüzey elde edilmektedir (Karaoğlu, 2006).

Aşınma işlemi yapılacak olan test numunesi cihazda bulunan ve numune üzerine normal yük uygulayan bir hidrolik silindir yardımıyla kayış üzerine bastırılmaktadır. Bu işlem sonucunda kayış ve numune arasında oluşan sürtünme kuvveti sonucunda numunede deformasyon meydana gelmektedir (Karaoğlu, 2006). Şekil 3.10’ da levha–kayış cihazının şematik gösterimi mevcuttur.

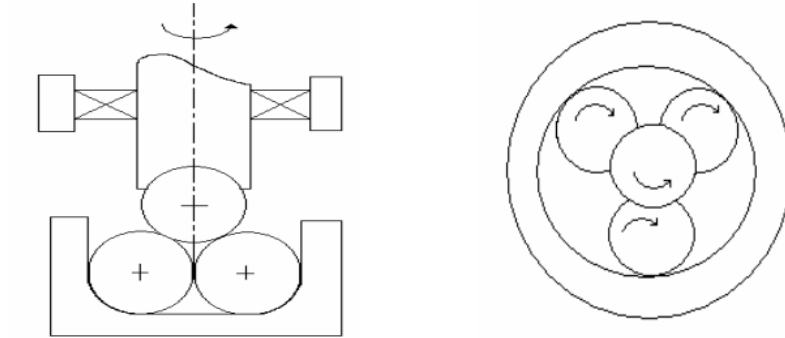


Şekil 3.10. Levha – kayış cihazının şematik gösterimi (Soydan ve Ulukan, 2003).

3.2.2.2. Dört bilye deney yöntemi

Dört bilye deney düzeneği aynı boyutlarda dört adet bilye kullanılarak yapılmaktadır. Kullanılan dört bilyeden üçü rahatça hareket edebilir durumda iken diğer bilye bir milin içerisi oyularak bu oyuk içerisine yerleştirilmiştir. Mil içerisine yerleştirilen bilye diğer üç bilyenin üzerine gelecek şekilde konumlandırılmıştır. Bilyelerin üzerindeki mil döndürüldüğünde, milin içerisine yerleştirilmiş olan bilye diğer üç bilye ile temas eder ve milin dönüş yönünün tam ters yönde bu üç bilyeyi hareket ettirir. Dönen bilyeler

üzerine gelen radyal yük çok az miktarda arttırıldığı takdirde temas alanlarındaki gerilmelerin artmasından dolayı yorulma ömründe çok fazla azalma meydana getirecektir (Karaoğlu, 2006). Şekil 3.11’ de dört bilye test düzeneği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Dört bilye deney cihazının şematik gösterimi (Soydan ve Ulukan, 2003).

4. YÜZEY ÖZELLİKLERİNİ GELİŞTİRME İŞLEMLERİ

Titanyum ve titanyum alaşımlarına kullanıldıkları sektörler ve bu sektörlerdeki kullanım yerlerine göre istenilen yüzey özelliklerinin elde edilmesi için çeşitli yüzey iyileştirme ve geliştirme işlemleri uygulanmaktadır. Bu yüzey modifikasyon işlemleri titanyum ve alaşımlarına iyi yorulma direnci, kolay işlenebilirlik, daha düşük elastisite modülü gibi istenilen kütleli özelliklerine sahip olmasını sağlamaktadır. Bu yüzey modifikasyon işlemlerini termokimyasal işlemler, ısıl işlemler ve kaplamalar olmak üzere üç grup altında toplanmaktadır (Özkan, 2019).

4.1. Termokimyasal İşlemler

Termokimyasal yüzey işlemleri malzeme yüzeyine başka bir element atomlarının difüzyon edilmesiyle yüzey özelliklerinin değiştirilmesi işlemidir. Bu işlem malzeme yüzeyine uygulanarak malzeme yüzeyinin oksidasyon, aşınma ve korozyona karşı direncini arttırmaktadır. Termokimyasal işlemlerden en yaygın olarak kullanılanları borlama, nitrüleme ve termal oksidasyondur (Özkan, 2019).

4.1.1. Borlama işlemi

Bor doğada boratlar borik asit ve boraks gibi bileşik olarak bulunmaktadır. Kimyasal olarak saf bir şekilde elde edilmesi zor olan bor, polimer, seramik, cam ve cam lifi üretiminde kullanılmaktadır. Elektrokimyasal ve kimyasal yollarla gerçekleştirilen borlama işleminde kimyasal işlem için aktifleştirici (indirgeyici) ve bir de bor ajanı olması gerekmektedir. Metal yüzeye geçişen elemental bor vermek kaydıyla bor ajanı ve aktivatör reaksiyona girmektedir.

Fiziksel ve kimyasal birçok borlama tekniği vardır. Bunlar; PACVD (plazma destekli kimyasal buhar biriktirme), CVD (kimyasal buhar biriktirme) ve PVD (fiziksel buhar biriktirme) olarak verilmektedir. Ayrıca kutu borlama olarak da adlandırılan bir yöntem vardır. Bu yöntemde hava içermeyen ortamda elemental borun veya bor içeren ajanların yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılması ile borun yüzeye geçmesi yolu

kullanılmaktadır. Diğer bir yöntem olan elektrokimyasal yöntemde metal bor tuzlarından oluşan eriyiklere daldırılır böylelikle bor indirgenir ve yüzeye geçişir (Özkan, 2019).

4.1.2. Nitrürleme işlemi

Nitrürleme işlemi azot içeren ortamda ve gaz/metal ara yüzünde oluşan tepkime sonucu altlık olarak kullanılan malzemeye azot atomlarının geçişi sonucu meydana gelmektedir. Bu işlem uygulandığı malzeme üzerinde aşınmaya dayanıklı ve sert yüzey elde etmek için yapılmaktadır. Titanyum esaslı malzemelerin nitrürlenmesinde iyon ışını, lazer, plazma ve gaz nitrürleme yöntemleri kullanılmaktadır (Güleryüz vd., 2015).

Plazma nitrürleme yönteminde altlık olarak kullanılan malzeme ile karşı elektrot arasında kapalı bir odada elektriksel potansiyel fark uygulanarak yapılmaktadır. Bu yöntemin maliyet ve çevre kirliliğini azaltma gibi avantajları bulunurken özel ekipmanlara ihtiyaç duyulması dezavantaj olarak sayılabilmektedir.

İyon ışını nitrürleme yönteminde N_2 ve Ar kullanılarak iyon ışını yardımıyla titanyum ve alaşımlarının yüzeyleri sertleştirilmektedir. Bu yöntem kullanılarak titanyum alaşımlarının yüzey sertleştirmeleri ile ilgili literatürde birçok çalışma mevcut bulunmaktadır.

Lazer nitrürleme yönteminde ise azot gazı ortamında numune malzemesinin yüzeyi 1 ile 1,5 μm derinliğinde odaklanmış lazer ışını yardımıyla eritilerek sert bir titanyum nitrür tabakası oluşturulmaktadır. Bu yöntemde kullanılan altlık malzeme ile sertleştirilen yüzey arasında çok iyi metalürjik bağlanma gerçekleşmektedir.

Son yöntem olan gaz nitrürleme yöntemi diğer yöntemlere göre sadece fırın ve azot gazı kaynağı kullanıldığı için daha avantajlıdır ve bundan dolayı kullanımının yaygın olduğu bilinmektedir. Ayrıca yüzeyi sertleştirilmesi istenilen malzeme kolayca sertleştirilebilmektedir (Güleryüz vd., 2015).

4.1.3. Termal oksidasyon işlemi

Oda sıcaklığında oksijen ile reaksiyonu sonucu titanyumun yüzeyinde oksitlenme ile doğal olarak birkaç nanometre kalınlığında oksit filmi oluşmakta ve bu film titanyumu korozyondan korumaktadır. Termal oksidasyon oksijen ortamında yüksek sıcaklıklarda titanyum ve alaşımları yüzeylerine oksijen atomlarının difüzyonu sonucu meydana gelmektedir. Plazma elektrolitik oksidasyon ile titanyum yüzeyinde çok iyi aşınma dayanımı sağlanmaktadır.

4.2. Isıl İşlemler

Titanyum ve alaşımlarına ısıl işlemler uygulanarak iç gerilmesi azaltılırken (gerilme giderme), yapısal ve boyutsal kararlılık, süneklik, işlenebilirlik olmak üzere tümünün artırılması (tavlama) gibi çeşitli özellikler kazandırılabilir. Ayrıca ısıl işlem ile malzemenin yorulma dayanımı ve kırılma tokluğu, mukavemeti (yaşlandırma ve çözeltiye alma) ve yüksek sıcaklıkta sürünme direnci gibi özellikleri geliştirilebilir. Bu ısıl işlemlerin tümü titanyum ve alaşımlarına uygulanamamaktadır. Alfa ve yakın alfa titanyum alaşımlarına tavlama ve gerilme giderme uygulanırken yarı kararlı β fazı içeren ticari β alaşımlarına yaşlandırma ile mukavemetlendirilebilir (Özkan, 2019).

4.2.1. Gerilme giderme

Titanyum ve alaşımlarına bazı şartlar altında iç gerilmeyi azaltmak için gerilme giderme yapılmaktadır. Bunlar; asimetrik plakanın dövülmesi veya şekillendirilmesi, kaynak ve katılma, soğutma sırasında meydana gelen atık termal gerilmeler, soğuk şekillendirme, doğrulma ve sıcak dövme işlemleridir. Gerilme giderme işlemi sonrası soğutma işlemi olarak havada veya fırın içinde soğutma yapılması gerekmektedir. Çünkü parçanın hızlı bir şekilde soğutulması iç gerilmeleri artırabilir (Özkan, 2019).

4.2.2. Tavlama

Tavlama işlemi, titanyum ve alaşımlarına işlenebilirlik, oda sıcaklığında çok iyi süneklik, yeterli kırılma tokluğu ve yüksek sıcaklık altında yapısal ve boyutsal kararlılık kazandırmak için uygulanmaktadır. Sektörde kullanılan birçok titanyum alaşımı tavllanmış

olarak kullanılmaktadır. Mil tavlama, dubleks tavlama, tripleks tavlama ve beta tavlama gibi yaygın kullanılan tavlama türleri bulunmaktadır. Genel olarak mil ürünlerine yapılan mil tavlama saçlar gibi çok fazla deformasyona maruz kalan ürünlerde soğuk veya sıcak işleminden dolayı mikroyapılarında izler oluşabilmektedir. Beta tavlama, dubleks tavlama ve tripleks tavlama fazların dağılımlarını, boyutlarını, şekillerini daha iyi kırılma tokluğu veya sürünme direnci için istenilen yapıya dönüştürür (Özkan, 2019).

4.2.3. Çözeltiliye alma ve yaşlandırma

Isıl işlemler titanyum ve alaşımlarının çoğuna yüksek dayanım ve süneklik kazandırmaktadır. Bu iki özelliğinde malzemeye sağlanabilmesi için çözeltiliye alma, su verme ve yaşlandırma işlemleri uygulanmaktadır.

Titanyumun β ve $\alpha+\beta$ alaşımlarına uygulanan çözeltiliye alma ve yaşlandırma işlemleri ile bu alaşımların mukavemetlerinde artış sağlanmaktadır. $\alpha+\beta$ fazında yapılan çözeltiliye alma işlemi ile yüksek dayanım ile süneklik bir arada sağlanabilmektedir. Ancak çözeltiliye alma sıcaklığı değişimi β fazı miktarının değişmesiyle birlikte yaşlandırma işleminin de değişmesine neden olmaktadır (Özkan, 2019).

4.3. Ergitilerek Yapılan Yüzey Kaplama İşlemleri

Malzeme yüzey özelliklerini iyileştirmek ve geliştirmek için kaplama işlemleri yapılmaktadır. Kaplama işlemleri ile malzeme yüzeyi malzemenin kullanım yerine göre daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Malzeme ömrünü de arttıran kaplama işlemi sonucunda malzemenin aşınma, dayanım, sertlik ve korozyon dirençleri iyileştirilmektedir.

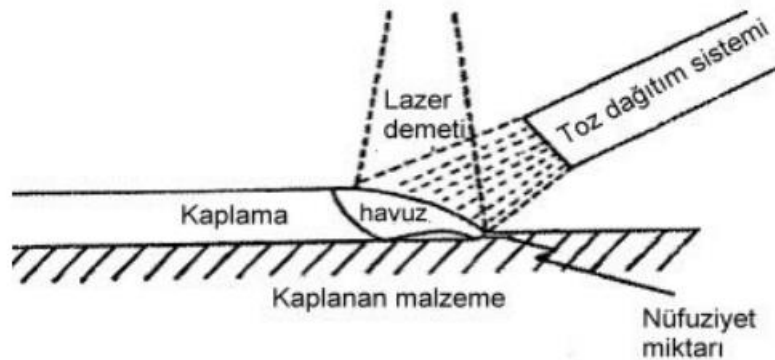
Genel olarak kullanılacak iş parçasının korozyon ve aşınmaya maruz kalabilecek dış yüzeyinin sert, iç yapısının ise yüklere karşı dirençli olması istendiği için sünek yapıda olması istenmektedir. Malzemelere bu özellikleri verebilmesi için birçok kaplama yöntem geliştirilmiş olsa da bazılarının ilk yatırım ve maliyetleri oldukça fazladır. Kaplama işleminde en önemli parametreler kaplama malzemesi ve ısı kaynağıdır. Bu parametreler göz önüne alınarak kaynak yönteminin kaplama işlemi yapılırken ısı kaynağı olarak

kullanılması ve kaplama malzemesi olarak da ilave metal ve alaşım ile kaplanması ile yeni kaplama yöntemleri ortaya çıkmıştır.

Ergitilerek yapılan yüzey kaplama işlemlerinde malzemenin hali hazırdaki yüzey özellikleri geliştirilmekte, yüzeyi sertleştirilebilmekte ve yoğun kullanım sonucu aşınmış malzeme yüzeyi tamiri yapılabilme hatta yüzeye daha iyi mukavemet özellikleri kazandırılabilir. Bu kaplama yöntemi gazaltı, tozaltı ve elektrik ark kaynak kullanılarak yapılmaktadır. Bu kaynak yöntemlerine ek olarak lazer ışını ve elektron ışını kaynak yöntemi de yüksek maliyetli olmasına rağmen tercih edilmektedir. Birçok avantajı bulunan bu yöntemin malzemede çarpılma ve bozulma, zarar gören yüzey hassasiyetinin tekrar düzeltilmesi için talaşlı imalata gerek duyulması gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Ulutan, 2007).

4.3.1. Lazer ile yapılan yüzey kaplama işlemleri

Lazerin ısı kaynağı olarak kullanıldığı lazerle yüzey kaplama yönteminde, yüzeye geçirilmek için kullanılacak olan metal hareketli olan alt tabaka üzerine tel besleme, toz püskürtme veya toz enjeksiyonu ile ince bir tabaka halinde aktarılmaktadır. Toz enjeksiyon yöntemi en etkili yöntem olarak kabul edilmektedir. Yüzey özellikleri iyileştirilmek istenen farklı birçok malzeme, lazer kaplama ile toz enjeksiyonu kullanılarak kaplanabilmektedir. Şekil 4.1’ de şematik lazer kaplama işlemi gösterilmektedir (Ulutan, 2007).



Şekil 4.1. Lazer kaplama işlemi (Kennedy vd., 2002).

Lazer ile yüzey kaplama işlemi birçok avantaja sahiptir:

- Lazer kullanıldığı için imalat süresi diğer işlemlere göre azalmaktadır.
- Yüksek güçteki lazer demeti ile yapılan lazer kaplama işleminde kaplanacak malzemenin küçük bir bölgesi ısıdan etkilenmektedir. Soğutma ve ısı ayarlarının düzgün yapılması ile ana metalin kaplanan yeri dışında içyapısında çok fazla bir değişiklik olmamaktadır.
- Bozulan iş parçalarının tamiratında lazer kaplama kullanılarak tamirat ile birlikte parçanın ömrünü de uzatmaktadır. Kritik alanlarda kullanılan pahalı parçaların uzun yıllar kullanılmasını sağlamaktadır.
- Lazer kaplama sayesinde parçalara farklı malzemeler eklenerek fonksiyonelliği artırılmaktadır.
- Manyetik algılayıcılar ve sensörler gibi parçaya akıllı özellikler kazandıracak küçük parçaların ana malzemeye yerleştirilmesine olanak tanımaktadır.
- Yapılan kaplama yüksek mukavemete sahiptir.
- Lazer sayesinde kaynak yapılması zor olan titanyum gibi malzemelerin birleştirilmesi kolay bir şekilde yapılabilmektedir (Ulutan, 2007).

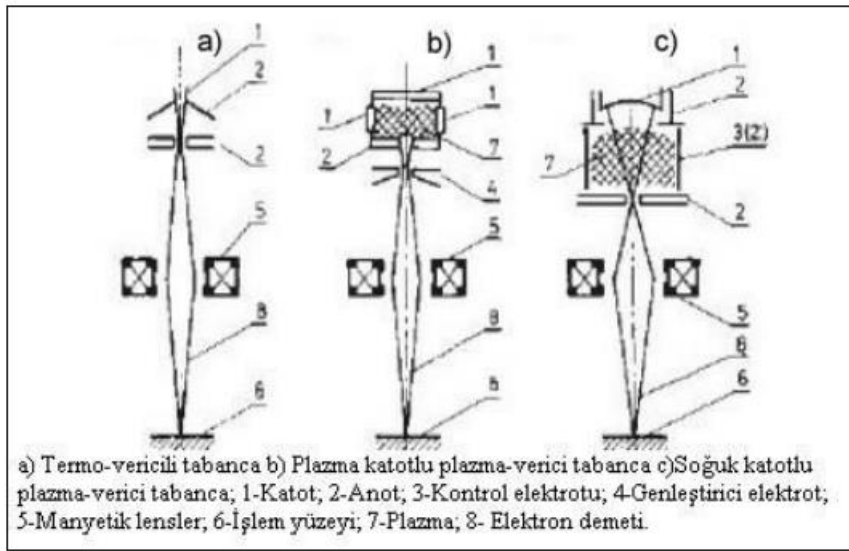
Avantajlarının yanında dezavantajları da vardır:

- Lazer ayarları çok hassas olduğu için kaplama kalitesi farklılık göstermektedir.
- Düşük verim ve ilk yatırım maliyeti başka bir dezavantajdır.
- Yapılan kaplama ile ana malzeme arasında yeterli bağ sağlanamamaktadır.
- Lazer kaplama işlemi için yetişmiş iş gücü yeterli değildir ve bu işlem için özel eğitimler gerekmektedir (Ulutan, 2007).

4.3.2. Elektron ışını ile yapılan kaplama işlemleri

Elektron ışını kaplama yönteminde tel veya toz malzemeler, yönlendirilmiş ve yoğunlaştırılmış elektron demetinin enerjisi ile eritilir ve böylece yüzey kaplama işlemi gerçekleşmektedir. İki farklı kaynaktan sağlanan elektrik enerjisi elektron demetinin elektrik enerjisini karşılamaktadır. Bu iki farklı kaynaktan birincisi gereken elektronu katottan sağlarken diğer kaynak ise bu elektrotların hızlandırılması için kullanılmaktadır. Bu iki özelliği taşıyan sistem elektron tabancası adı verilmektedir. Bu elektron tabancasının iki farklı çeşidi bulunmaktadır. Bunlardan birincisi; metal ya da metal

olmayan termo-katottan termal emisyon ile elektron sağlarken diğeri soğuk bir metal katot veya plazma katot plazma emisyonu ile sağlanmaktadır. Sekil 4.2’ de elektron tabancalarının şematik olarak gösterimi verilmektedir. Elektron tabancası kullanılarak buharlaştırılan kaplama malzemesi altlık malzemenin soğukluğunu muhafaza etmesi sayesinde yüksek saflıkta kaplama sağlanmaktadır.



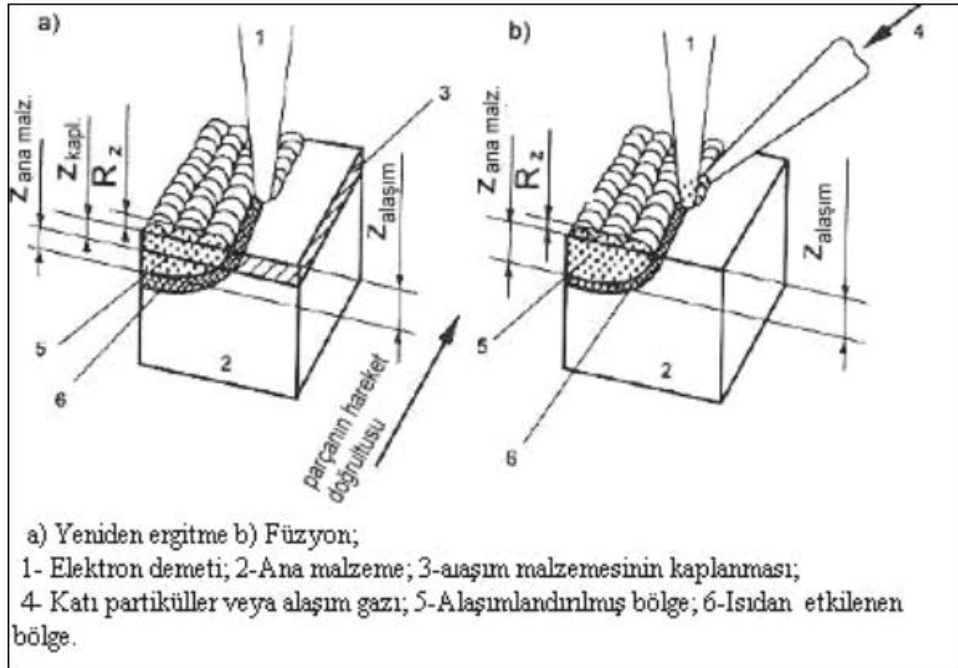
Şekil 4.2. Elektron tabancalarının şematik gösterimi (Burakowski ve Wierzchon, 1999).

Elektron demetiyle kaplama işleminde istenilen özelliklerde kaplama malzemesi bileşimi altlık malzeme üzerine yüksek mukavemet ile bağlanabilmektedir. Bu yüzey kaplama yöntemi sert yüzey oluşturma ve alaşımlandırma şeklinde olmaktadır. Alaşımlandırmada kullanılan malzemeler çözündürülerek kaplanacak malzeme içerisine geçişmektedir ve bu yöntemde kullanılan güç ve ısıtma süreleri sertleştirme de kullanılanlardan daha fazla olmaktadır. Alaşımlandırma işlemi sonucunda yüzey pürüzlülüğü bozulurken, tribolojik özellikler ve korozyon direncinde gelişmeler sağlanabilmektedir. Füzyon ve yeniden ergitme alaşımlandırmanın iki farklı yöntemidir.

Yeniden ergitmede kaplanacak yüzey ile alaşım malzemeleri belirli bir seviyede ergitilmektedir. Ergitilmiş tabaka ile kaplama tabakasının kalınlığı neredeyse aynı olmaktadır. Yüzeyin ve kaplama malzemesinin ergitilmesiyle kaplama malzemesi altlık malzemeyle tamamen veya kısmen bir karışım oluşturmaktadır. Kaplama sonucunda

soğuyan kaplama bölgesinde altlık ve kaplama malzemesinin kimyasal bileşim ve yapısından farklı yeni bir tabaka elde edilmektedir.

Füzyon yönteminde alaşımlandırma altlık malzemenin ergimiş havuzuna alaşım malzemesinin gaz partikülleri üflenerek veya katı partikülleri enjekte edilerek gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.3' de yeniden ergitme ve füzyon yöntemlerinin şematik gösterimi verilmektedir.

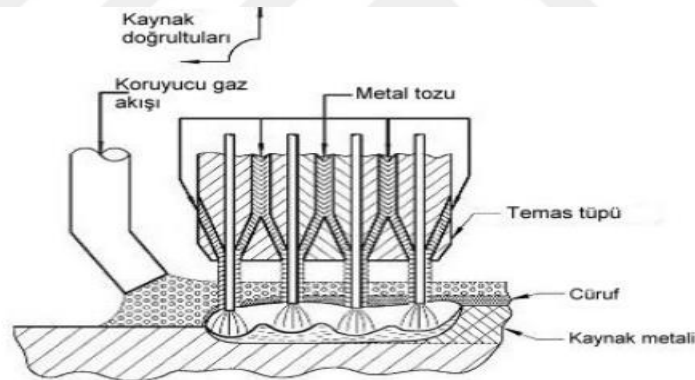


Şekil 4.3. Yeniden ergitme ve füzyon yöntemlerinin şematik gösterimi (Burakowski ve Wierzchon, 1999).

Sert yüzeyleştirme yönteminde elektron demetiyle ergitilen kaplama yüzeyde biriktirmektedir. Elektron demetine enjekte edilen kaplama malzemesi partikülleri veya bir tel ile bu işlem yapılmaktadır. Diğer yöntemlerin aksine bu işlemde seramik partiküller yüzeyde ergimemiş halde olabilmektedir. Ana malzemenin çok fazla ergimeye maruz kalmadığı bu yöntemde kaplama malzemesi yüzeyde çözünmemektedir ve ısı elektron demeti ile sağlanmaktadır (Ulutan, 2007).

4.3.3. Tozaltı kaynağı ile kaplama işlemi

Tozaltı kaynak yöntemi koruyucu olarak kullanılan granül ya da toz katmanının altında sürekli beslenen bir tel elektrot yardımıyla yapılmaktadır. Toz tabakasıyla tamamen kaplı olan ark bu koruyucu katman sayesinde çevresel şartlardan etkilenmeden yüksek akım değerleri kullanılabilir. Kalın kesitlerde kaynak işlemi kaynak havuzunun yüksek akımlar sayesinde malzemenin çok derinine nüfus etmesi ile kolaylıkla yapılabilmektedir. Koruyucu toz akışı, çeşitli kaynak hızları, tel kombinasyonları ve düşük akımlar yapılacak işleme göre kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Ark işlem sırasında görünmemektedir bundan dolayı güvenli bir işlem olmaktadır. Birden fazla tel ile doğru akım ve alternatif akım kullanılarak işlem yapmak mümkün olmaktadır. Yüksek kaynak metali birikmesi ilave teller ve alternatif akımı ile mümkün olabilirken, derin nüfuziyeti doğru akım sağlamaktadır (Ulutan, 2007). Şekil 4.4' de paralel toz sağlayıcılı dört elektrotlu tozaltı kaynağı şematik olarak gösterilmektedir.

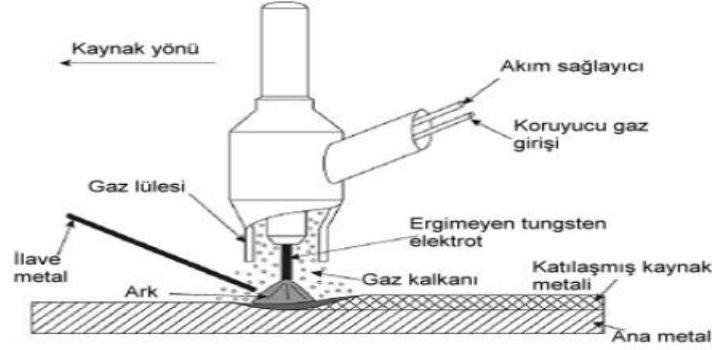


Şekil 4.4. Paralel toz sağlayıcılı dört elektrotlu tozaltı kaynağı şematik olarak gösterimi (Tuşek ve Suban, 2003).

4.3.4. Gaz tungsten ark (GTA) ile kaplama işlemi

Gaz tungsten ark kaynağı ile kaplama yönteminde koruyucu gaz olarak helyum veya argon kullanılmaktadır ve ark iş parçası ile ergimeyen tungsten elektrot arasında sağlanmaktadır. Ana malzemeyi eritmekte kullanılan arka gerekli görülürse ilave metal tel de kullanılmaktadır. Gaz tungsten ark kaynak işlemi mekanizma veya el ile yapılabilmektedir.

Yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılan tungsten elektrot, ark işleminde gerekli elektronların sentezini sağlamaktadır. Elektromanyetik alan ark bölgesinde meydana gelmektedir ve bu sayede parça ve elektron arasındaki koruyucu gazın belirli bir miktarı iyonlaşmaktadır. Böylelikle ark bölgesi içerisinde gaz plazma ya da iletken hale gelmektedir. Şekil 4.5’ de gaz tungsten ark kaynağı şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.5. Gaz tungsten ark kaynağı şematik olarak gösterilişi (Jandric vd., 2004).

Gaz tungsten ark (GTA) yönteminde altlık malzeme yüzeyinde alaşım tozları ergitilmektedir. Bu ergime işlemi altlık malzeme ve alaşım tozlarında aynı anda gerçekleşmektedir ve hızlı katılaşma sonucunda metalürjik olarak bağlanma sağlanmaktadır. Hızlı katılaşma sonucunda oluşan ince taneli mikroyapılarda sert karbür fazlar mevcuttur ve kaplama tabakası, aşınma direnci ve sertlik gibi özellikleri geliştirilmiş farklı ve yeni bir yapıdan oluşmaktadır.

GTA tekniği kullanılarak aşınmış yüzeyler ilave tel veya çubuk malzeme kullanılarak tamir edilebilmekte ve eskisine göre daha dayanıklı hale getirilebilmektedir. GTA işleminin yapılabilmesi için altlık malzeme ve kaplama malzemesine ön ısıtma uygulanması ve kaplama işlemi tamamlandıktan sonra gerilim giderme tavlama, talaşlı imalat ve ısıl işlem yapılması gerekebilmektedir. Delikler ve küçük alanlara kaplama yapılmasını sağlayan bu yöntem ile kaplamalar yüksek kaliteye sahip olmaktadır. Tüm bu avantajları yanında, işlemde kullanılan cihazların pahalı olması, koruyucu gaz varlığından dolayı çalışma alanı gerektirmesi, büyük alanlarda kullanılamaması ve işlemin yavaş olması dezavantajları arasında yer almaktadır (Ulutan, 2007).

5. PLAZMA TRANSFERLİ ARK KAYNAĞI (PTA) İLE KAPLAMA İŞLEMİ

Termal yüzey mühendisliğinde kullanılan plazma, maddenin üçüncü hali olan gaz atomlarının sıcaklığının daha da artırılması ile yüklü parçacıklara dönüşmesi sonucu elde edilmektedir. Isıtılmaya devam edilen maddenin gaz hali iyonize hale geçer. Bu durumda çekirdek çekiminden kurtulan elektron, serbest elektron bulutu meydana getirmektedir. Atomlardan bazıları nötr halde kalırken, diğerleri elektron kaybetmeleri sonucunda pozitif yüklenmektedirler. Oluşan nötr atom, elektron ve iyon karışımı plazma olarak adlandırılmaktadır (Chattopadhyay, 2004).

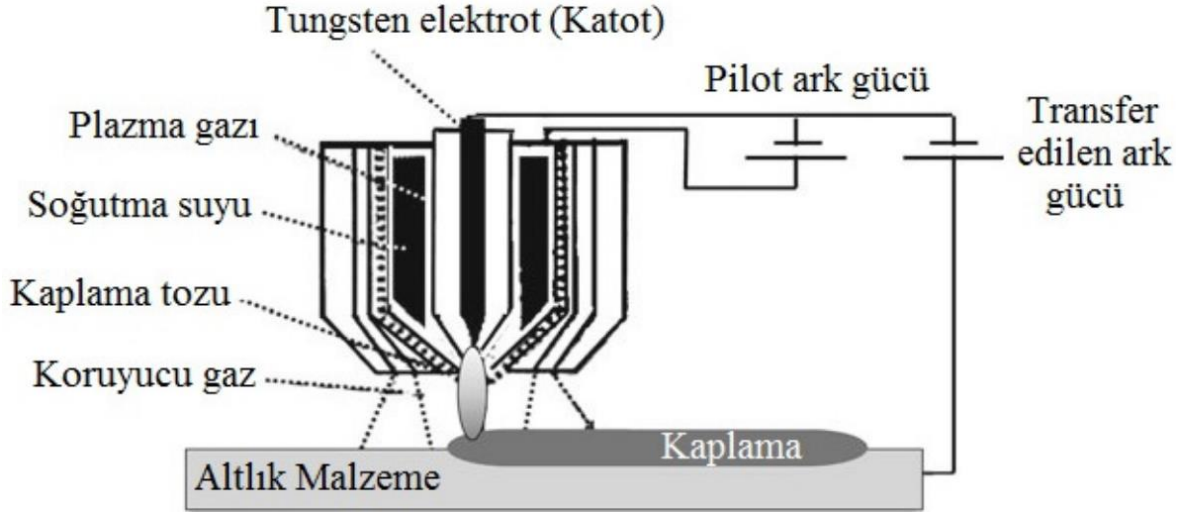
Plazma transferli ark kaynak yönteminin uygulanmasındaki kolaylık, uygulama öncesi altlık malzeme yüzeyine herhangi bir işlem yapılması gerekmemesi ve işlemin tek seferde yapılabilmesi, düşük ısı girdisi, düşük distorsiyon ve yüksek biriktirme oranı bu yöntemin avantajları arasında yer almaktadır (Buytoz, 2010; Sudha vd., 2008; Veinthal vd., 2013).

5.1. PTA İşleminin Uygulanması

Bu yöntemde elektrik devresinden, kaplama için gerekli enerji sağlanmaktadır ve bu durum diğer kaplama işlemlerinden bu yöntemi ayırmaktadır. Altlık malzeme torçtan aktarılan ark için genellikle anot görevi görmesine rağmen bazen katot olarak da görev yapmaktadır. Bu durumdan dolayı kaplama işlemi yapılacak olan altlık malzemenin elektrik iletme özelliğine mutlaka sahip olması gerekmektedir.

Şekil 5.1’ de plazma transferli ark kaynağının şematik resmi ve çalışma prensibi gösterilmektedir. Plazma torcundaki katoda gaz verilerek başlanan PTA işleminde nozul pilot ark oluşturur. Pilot arkında kullanılmak üzere güç kaynağından elde edilen farklı bir akım vardır. Pilot arkı iş parçası ile katot arasındaki boşluğu iyonize etmekte ve bunun sonucunda kolay oluşturulan bir ark ve iyi kontrol edilen ark akımı elde edilmesini sağlamaktadır. Negatif terminale bağlanan altlık malzeme ve anot arasında plazma ark sütunu meydana gelmektedir ve bu ark transfer edilen ark olarak adlandırılmaktadır. İş parçası ile transfer edilen ark arasında yüksek ısı oluşumu sonucunda kaplama tozu ve

altlık malzemenin erimesi ile havuz oluşmaktadır. Bu ergiyik karışım katılarak metalürjik açıdan iyi bağlanmış bir kaplama oluşmasını sağlamaktadır (Kılıçay, 2017).

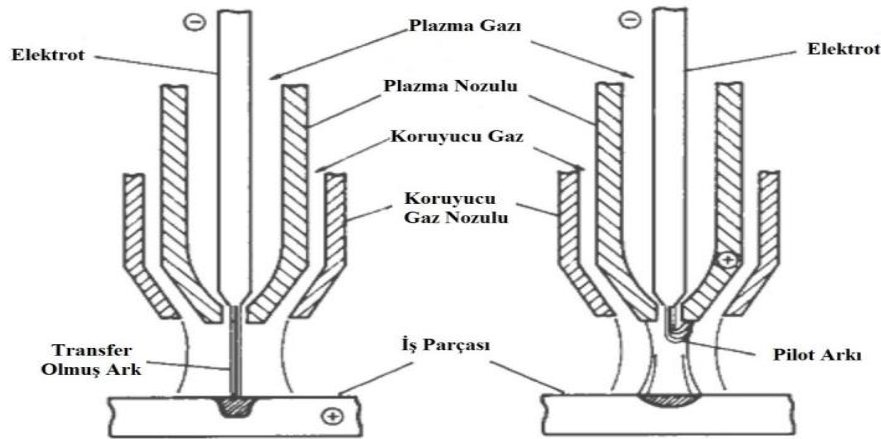


Şekil 5.1. Plazma transferli ark kaynağının şematik ve çalışma prensibi (Kılıçay, 2017).

5.2. PTA işleminde ark oluşumu

Bir plazma ark torcu, içinde tungsten elektrot ve küçük deliği olan bakır nozuldan oluşur. Bakır nozulda soğutma işlemi su ile yapılır. Nozul ile nozulun merkezindeki tungsten elektrot arasından plazma gazı dışarı çıkar. İş parçası ile elektrot arasında ark oluşur. Bu ark oluşumundan sonra iyonize haldeki gaz bakır nozuldan dışarı püskürtülür ve böylece basınçlı plazma jeti oluşturulmuş olur. Dış yüzeyi soğutulan ark sütunu yoğunlaşır ve içe doğru büzülür. Bu nedenle, sıkıştırılmış sütun içindeki sıcaklık ani bir şekilde 10.000 ile 30.000 K arasına yükselir.

Gaz, dairesel bir alandan geçer ve yüksek iyonlaşma seviyesine sahiptir. Bu gaz göreceli olarak yüksek bir enerji taşır; bu enerji, kaynak yapma ve iş parçalarının sertleştirilmesi gibi diğer ısı işlemlerde kullanılmaktadır (Gür, 2009). Transfer arkı ve pilot arkı olmak üzere uygulamalarda iki tür plazma arkı bulunmaktadır. Bu arkların nasıl oluştuğu, Şekil 5.2' de görsel olarak tasvir edilmiştir

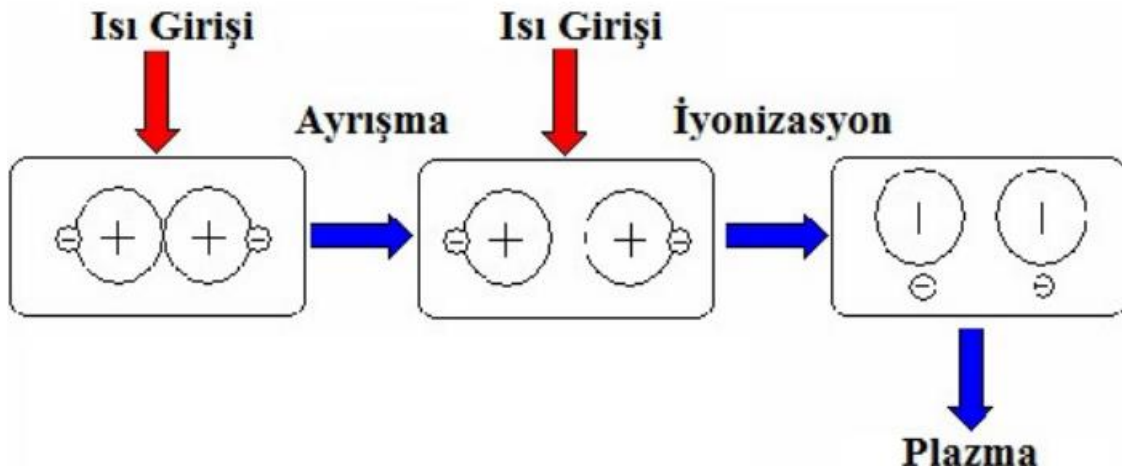


Şekil 5.2. Pilot ark ve transfer olmuş arkın oluşumunun gösterimi (Kılıçay, 2017; Samal, 2017).

- **Transfer olmuş ark:** Eğer elektrik akımı, bakır nozul ve tungsten elektrot arasındaki su soğutmalı bir düzlemde oluşturulursa gaz, bakır nozul ve elektrot arasında yanar ve gaz akışı ile nozulden dışarı atılır. Bu tür bir arklara pilot arkı veya transfer olmamış ark olarak adlandırılır. Bu yöntemle, ark elektriksel olarak malzemeye bağlanmaz, malzemeye plazma arkı geçişi olmaz (Kılıçay, 2017).
- **Pilot arkı:** Elektrik akımı, iş parçası ile tungsten elektrot arasında oluşturulur. Anot işlev görevini iş parçası görür, böylece malzeme üzerine plazma arkı doğrudan iletilir. Yüksek ısı akılarının oluşumu bu yöntemde sağlanmaktadır. Transfer edilmiş ark kullanıldığında, fiziksel ayrışma oldukça yüksek olabilir. Güçlü endüstriyel fırınlarda plazma ark boyutu birkaç santimetre ile bir metre arasında değişebilmektedir (Samal, 2017).

5.3. PTA işleminde plazma oluşumu

PTA kaynak yöntemi, plazma gazının elektrik ark yardımıyla ısındığı bir süreci içerir. Bu ısınan gaz, elektronlarını kaybederek iyonize bir hale geçer. Elektrik ark, gazı ısıttıkça iyonlaşma tekrarlanır ve sonuç olarak plazma elde edilir (Şekil 5.3). Kaynak işlemlerinde ve ısıl kesimde, bu plazma adı verilen ark, radyal yönde sıkıştırılır ve büzülerek enerji yoğunluğu artırılır (Gür, 2009).



Şekil 5.3. Gazın plazma haline gelmesinin şematik gösterimi (Gür, 2009; Kılıçay, 2017).

5.4. PTA yönteminin işlem parametreleri

Plazma ark kaynak işlem parametreleri dikkatle seçilmelidir çünkü kaynağın kalitesi birkaç işlem değişkenine bağlıdır. Kaynak havuzunun ve kaynak ağzının istikrarını sağlamak için bu parametreler özenle ayarlanmalıdır. Kaynak kalitesini etkileyen başlıca parametreler şunlardır: nozulun boyutu ve şekli, nozul ile iş parçası arasındaki mesafe, tungsten elektrodun konumu, kaynak akımı, tungsten elektrodun malzemesi ve boyutu, plazma gazının bileşimi ve akış hızı, koruyucu gazın bileşimi ve akış hızı ve kaynak ilerleme hızıdır (Wu vd., 2014).

PTA yönteminin uygulanmasında performans parametreleri kullanılan kaplama tozuna bağlı olarak değişebilir. Genel işlem parametreleri şunlardır: pilot ark akımı, toz besleme hızı, ark akımı, torç ile altlık malzeme arasındaki mesafe, plazma gaz akış hızı, koruyucu gaz akış oranı ve biriktirme hızı gibi faktörlerdir (Fauchais vd., 2014).

İşlem parametreleri arasında ark akımı en önemli etkiye sahiptir. Artan akım, kaynak nüfuziyetini, altlık malzemenin ısınmasını, erimesini, yapışmayı, kaplama verimliliğini ve boncuk genişliğini artırırken, kaplamadaki gözenekliliği azaltır. Bununla birlikte, yüksek akım kullanımı, boncuk kalınlığını azaltır ve aynı zamanda sertliği azaltan artan seyreltme etkisine yol açabilir. Bunlara ek olarak yüksek akımın karbür fazı üzerinde aşınma direncini azaltıcı etkisi vardır ve bu etki karbür fazının çözünmesine veya

ayrışmasına neden olabilir. Diğer taraftan, çok düşük akımlar kaplama tozlarının yetersiz erimesine yol açabilir (Fauchais vd., 2014).

Akım miktarı, genellikle iş türüne, sarf malzemesinin besleme hızına ve kaplama hızına bağlı olarak 80A ile 249A aralığında değişebilir. Akım değeri ne kadar yüksek ise biriktirme oranı da o kadar yüksek olur ve böylece verimlilik artar. Ancak, yüksek akım kullanımı, daha derin bir kaynak nüfuziyetine (Çizelge 5.1) yol açabilirken aynı zamanda altlık malzemenin aşırı ısınmasına ve çarpılmasına sebep olabilir. Bu nedenle, yüksek nüfuziyet seviyeleriyle birlikte kabul edilebilir çarpılma ve aşırı ısınma seviyelerini elde etmek için gerekli optimum akımı belirlemek önemlidir (R. Chattopadhyay, 2004).

Çizelge 5. 1. PTA kaplama ile Stellite6 malzemesi için işlem parametreleri ve nüfuziyet (Chattopadhyay, 2004).

Kaplama Alanı (mm ²)	Nüfuziyet (%)	İşlem Hızı (mm/s)	Akım (A)	Toz Biriktirme Oranı (g/dk)
7.5	5	4.9	163	17.5
	10	4	172	15
12.5	5	4.2	175	23
	10	2.7	185	17
	15	2.2	191	14
25	5	2.6	182	28.5
	10	1.8	194	18
	15	1.35	198	15

Pilot ark akımının, diğer işlem parametreleri değiştirilmediği sürece, kaplama üzerindeki etkisi çok az olur. Ancak pilot ark akımı, nüfuz eden ark akımının azaltılması gerektiği gibi durumlarda kaplama tozunun ısıtılması işleminde kullanılır. Düşük ergime sıcaklığına sahip kaplamalar ve yeteri kalınlıkta olmayan kaplamalarda altlık malzeme yüzeyine olan ısı transferi azaltılır. Düşük transferli ark akımı ve yüksek pilot arkı ile işlem yapılması plazma sprey yöntemine de benzerlik gösterir (Kılıçay, 2017).

Literatürde plazma gaz akışının artırılmasıyla oluşabilecek etkiler ile ilgili bilgiler mevcuttur. Yapılan çalışmalar sonucunda artan plazma gaz akış hızı ile nüfuziyetin azaldığı ayrıca nüfuziyetin artışı artan ısı transferiyle sağlandığı belirlenmiştir. Belirlenen

bu etki işlem hızına ve ark akımına bağlı olarak değişmektedir. Altlık malzemenin erime hızının ve ısı transfer hızının yüksek olması, artan plazma gaz akış hızı yardımıyla kaynak havuzundaki erimiş malzemeleri merkezden yanlara doğru iterek, bu erimiş havuzda türbülans oluşumuna neden olabilir ve böylelikle nüfuziyet artırılır (Fauchais vd., 2014).

Kaplama hızı ve akıma bağlı olan toz besleme oranı, belirli bir biriktirme genişliği ve kalınlığında kaplamanın hızına göre değişir. Yüksek hızlar elde etmek için daha yüksek besleme hızları kullanılır böylelikle istenilen kaynak boncuğu boyutu elde edilir (Çizelge 5.1). Toz besleme oranının artırılması nüfuziyeti ve verimliliği azaltırken, kaynak boncuk kalınlığını arttırmaktadır. Ancak belirli akımlarda yüksek toz kütlesi akışı tozlarda yetersiz erimeye de yol açabilmektedir (Chattopadhyay, 2004; Fauchais vd., 2014).

Altlık malzeme ile torç arasındaki mesafenin ve kullanılan akımın artması nüfuziyetin azalmasına neden olur. Ayrıca kaplama işlem hızının artması da nüfuziyeti azaltmaktadır. Böylece daha hızlı katılaştıran erimiş metal kaynak birikiminde takriben daha ince mikroyapıya sebep olabilmektedir. İşlem hızında en uygun olanı seçildiğinde erimiş metal havuzunun hemen önünde ark bağlantısı vardır. Ancak çok yavaş hız seçimi gözenekliliği artırırken yüksek hızlar ise füzyon yapışmasının azalmasına neden olabilmektedir. Kaplama hızı arttırıldığında kaynak boncuğunun kalınlığı ve genişliği azaltılmaktadır (Kılıçay, 2017).

Torç salınım genişliği, işlem anındaki bir salınımda erimiş metal havuzunun kontrollü bir şekilde katılaştırılması veya bu eriyik havuzun dış ortamdaki havaya maruz kalmayacak şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu salınım genişliği genelde 40 mm' nin üzerine çıkmaz (Fauchais vd., 2014).

En uygulanabilir nitelikleri sağlamak için, düşük nüfuziyet değerleri ve buna eşlik eden düşük füzyon değerleri idealdir. Nüfuziyet, belirli bir kalınlıktaki biriktirmenin oluşturulması sürecinde akımın artmasıyla artar. Tek tabakalı biriktirme uygulamalarında, kabul edilebilir seyreltme seviyesine ulaşmak için akımın belirli bir minimum değere ayarlanması gerekmektedir (Çizelge 5.1). Ancak, çok tabakalı biriktirmelerde, üst tabaka dışında, biriktirme kalınlığının oluşturulması için daha yüksek akımlar kullanılabilir. Üst tabakanın kabul edilebilir nüfuziyet seviyesine ulaşabilmesi için gerekli minimum akım

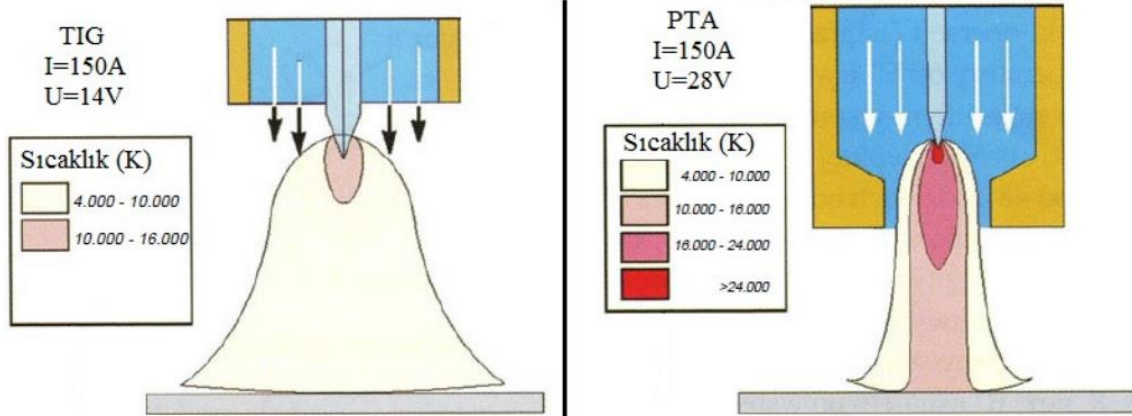
değeri kullanılır. Bu minimum akım değerlerinin artırılması, üretkenliğin artmasına olumlu bir katkıda bulunabilir (Chattopadhyay, 2004; Fauchais vd., 2014).

Daha büyük kaynak boncuklarının elde edilmesi için daha fazla akım gereklidir ve bu durum daha yüksek nüfuziyete yol açar. Büyük biriktirme bölgeleri için, çok katmanlı birikiminin kullanılması kalın tekli boncuk kullanılmasından daha uygun olabilmektedir. Altlık malzemedede daha kalın bir tabaka oluşturabilmek için kullanılan yüksek akım, biriktirilen bu katmanda taban yapısının bozulmasına ve daha fazla nüfuziyete neden olacaktır. Büyük tek kaynak boncuk boyutlarının elde edilmesi sırasında meydana gelen aşırı ısınma ve yavaş soğutma sonucunda, taneler ve çökelen karbürler daha büyük boyutlu hale gelebilir (Chattopadhyay, 2004).

5.5. Plazma Transferli Ark Kaynak İşleminin Avantajları

Arkın iş parçasına transferi ile yapılan plazma transferli ark kaynağı bu özelliği ile kaynaklı kaplamalara termal spreyci kaplamalardan daha çok benzemektedir. PTA yöntemini Tungsten İnerit Gaz (TIG) kaynağı ile karşılaştırdığımızda; TIG kaynağında daha az stabil, ısıdan etkilenen bölgesi daha büyük ve daha fazla nüfuziyet değerlerine sahip daraltılmamış bir ark kullanılır. Kullanılan biriktirme oranı ise 3 kg/saat veya bu değerden daha azdır.

Plazma transferli ark kaynağı, mekanik işlemlerde kullanılan harcamalar da dahil olmak üzere işletme ve yatırım maliyetleri, işlem verimliliği ve kalite açısından TIG kaynağı ve lazer kaynağı arasında bulunan bir kaynak çeşididir. Plazma kaynak, TIG kaynağına göre daha iyi kararlılık, yüksek konsantre ark, ısıdan etkilenen bölgenin az olması, dar ve temiz kaynak, daha fazla hassaslık ve elektrodun daha uzun kullanılması gibi bir çok üstün özelliğe sahiptir (Halina, 2013). PTA kaynağı ile TIG kaynağı arasındaki farkın şematik olarak gösterimi şekil 5.4' de verilmiştir.



Şekil 5.4. TIG ile PTA yöntemlerinin karşılaştırılması (Halina, 2013; Kılıçay, 2017).

Şekil 5.4 incelendiğinde izotermik çizgilerin farklılığı, plazma kaynak ile TIG kaynağı arasındaki işlem sırasında oluşan enerji transferindeki farkı göstermektedir. TIG kaynağında 10000 ila 16000 K değerleri arasındaki sıcaklıktaki bölge katodun yakınında bulunup işlem sırasında altlık malzemeye temas etmez iken, PTA yönteminde bu sıcaklıklardaki bir plazma jeti ile yüksek konsantrasyonlu plazma arkı altlık malzemeye ulaşmaktadır. PTA kaynağında ısıdan etkilenen bölgenin azalmasına neden olan 4000 ila 10000 K sıcaklığındaki bölge oldukça dardır. TIG kaynağında ise bu sıcaklıktaki alan daha fazladır ve eriyen yüzeyin daha fazla olmasına neden olur. Ark şekli ve sıcaklık dağılımı her iki yöntemde de uygulama alanı ve işlem verimliliği üzerinde etkiye sahiptir. Plazma kaynağında ulaşılması zor alanların ve karmaşık şekillerin kaynağının yapılabilmesi, ark uzunluğundaki değişikliklerden fazla etkilenmemesi ile mümkün olmaktadır. Bu özelliği sayesinde otomatik, robotik veya manuel kaynaklarda kullanımında avantaj sağlamaktadır. Ayrıca plazma kaynak yönteminin daha derin penetrasyon, dikiş bölgesinin dar olması ile ısıdan etkilenen bölgenin az olmasından dolayı altlık malzemedeki ısıl deformasyonun daha düşük olması sayesinde metalürjik saflık ve estetik, daha dar kaynak dikışı ve TIG kaynağına oranla yaklaşık 3 kat daha fazla güç yoğunluğu da avantajları arasında yer almaktadır (Halina, 2013).

Düşük nüfuziyet, kaynak yapılması zor malzemelere kaplama yapılabilmesi, düşük maliyet ile aşınma direncinin artırılması, kaynak sırasında ısıdan etkilenen bölgelerin daha az olması, birçok çeşitte kaplama malzemesi ile işlem yapılabilmesi ve yüksek verimliliği PTA yönteminin diğer kaynak yöntemlerine göre önemli üstünlükleridir (Kılıçay, 2017).

PTA kaynak yönteminde toz alaşımlarının kullanıldığı kaplama işlemlerinde diğer yöntemlere göre nüfuziyetin çok düşük olduğu görülür. Bu oran PTA yönteminde %5 iken diğer yöntemlerde %30' a kadar yüksek değerlere çıkabilmektedir. 4 mm çapında elektrot kullanılan ark kaynağında, 9 mm'ye kadar çıkan üç kaplama tabakası kalınlığı olabilmektedir. Bu tabaklardan en üstteki 3 mm' lik katman istenilen oranda aşınmaya dirençli yüzey bileşimini sağlamaktadır. Plazma kaynağında ise aşınmaya karşı dirençli tabakanın elde edilmesi ilk tabakada sağlanabilmektedir; bu yapının elde edilmesi enerji, zaman ve maliyet açısından tasarruf edilmesini sağlar (Kılıçay, 2017).

PTA işleminde kullanılan kaplama tozları; nikel, kobalt ve demir bazlı aşınmaya karşı dirençli alaşım tozlarıdır. Kaplama malzemeleri olarak ASTM elek boyutu yaklaşık - 100 ila +325 değerleri arasında değişen akışkan küresel tozlar kullanılır. Bu toz alaşımları gaz atomizasyonu ile de üretilir. Plazma transfer arkının oluşturduğu erimiş metal havuzuna eklenen sert karbürler ile metal matrisli kompozit malzemeler üretilebilmektedir. Bazı nükleer valflerde ise PTA işlemi uygulanması zorunludur. PTA işlemindeki düşük ısı girdisi değerlerinden dolayı bozulma diğer yöntemlere göre daha az olmaktadır (Chattopadhyay, 2004).

6. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kurt vd. (2007), PTA yöntemi kullanarak düşük karbonlu çelik olarak bilinen Ç1020 çeliğinin yüzeyini FeCr/FeCr+C karışım tozu ile kaplamışlardır. Yapılan çalışmada 6 farklı oranda FeCr ve C tozları kullanılarak altlık çelik malzemenin mikroyapısal, mekanik ve tribolojik özelliklerini geliştirmeye çalışmışlardır. Çalışmada Cr_xC_y formda bileşikler elde etmişlerdir. Yapılan analizler sonucu en yüksek sertlik değerine en yüksek oranda FeCr/C tozu içeren numunede ulaşmışlardır. Takviye oranının artışının sertliği lineer olarak değiştirdiğini bulgulamışlardır. Yüksek akım kaynaklı enerji girdisi nedeniyle tüm numunelerde martenzit fazı olduğunu gözlemlemişlerdir.

Sudha vd. (2008), PTA yöntemi ile AISI 304L paslanmaz çelik altlık malzeme üzerinde küresel Ni-Cr-B-Si tozları esaslı kaplamalar üretmişlerdir. Seçilen parametrelerle 7 mm kalınlığını kadar efektif kaplamalar üretilmiştir. Elde edilen kaplamaların heterojenik 3 farklı bölgeden oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bu bölgelerin sertliklerinin birbirinden farklı olduğunu gözlemlemişlerdir. Birinci bölgenin yapı olarak $\gamma Ni+Cr_2B$ ağırlıklı oluştuğunu ve sertlik değerinin 300 HV olduğunu, 2. bölgenin Cr_7C_3 , Cr_3C_2 ve Cr_2B fazların oluştuğunu ve 475 HV sertliğinde, 3. bölgenin iğnemsiz CrC oluşarak 700 HV sertliğinde olduğunu ve ara geçiş bölgesinin ortalama 760 μm kalınlığında olduğunu tespit etmişlerdir. Elde edilen bu geçiş bölgesinin TIG kaynağı yöntemine göre 4 kat daha düşük olduğunu saptamışlardır. Üretilen numunelerde Cr_2B , Cr_7C_3 ve Cr_3C_2 fazlarını ve mikroyapıdaki değişimlerin başlıca olarak Ni elementinin katılma ve soğuma sırasındaki yoğunluğuna bağlı değiştiğini tespit etmişlerdir.

Orhan vd. (2008), düşük karbonlu çelik olan AISI 1020 çeliğinin yüzeyine Ni/Ti tozlarını PTA yöntemini kullanarak kaplamışlardır. Numunelere Ni/Ti tozları ile kaplama işlemi yapılırken farklı oranlarda akım kullanmışlardır. Bu çalışma sonucu mikroyapı sonuçları incelendiğinde her iki numunenin de kaplama tabakalarında bir makro çatlığa ve gözenekli yapıya rastlamamışlardır. Mikrosertlik sonuçları incelendiğinde, altlık malzeme olarak kullanılan AISI 1020 çeliğinin mikrosertliği 210 HV değerinde ölçülmüş iken, yüksek akım değerine sahip numunenin akım yüksekliğinden kaynaklı ıslatma oranının yüksek olması sebebiyle sertliğinin diğer numuneye göre yaklaşık %15 daha fazla ve 690

HV olduğunu saptamışlardır. Bu kaplama işlemleri sonucunda farklı kalınlıklarda kaplama tabakaları elde etmişlerdir. Ni/Ti tozları ile kaplama esnasında, numunelerin kaynak bölgelerinde kullanılan akım değerinin yükselmesi ile kaplama tozlarının çözünme oranı artmıştır ve buna bağlı olarak kaplama genişliği ve nüfuziyetin arttığını saptamışlardır. Kaplama sonucunda tabakalar incelendiğinde tabakalarda dentritler ve karbürler içeren mikroyapıları gözlemlemişler ve dendritik yapıların arayüzeyden malzeme yüzeyine doğru yönlendirilerek katılaştığını belirlemişlerdir.

Gür vd. (2008), St-37 çeliği yüzeyini, yüksek Cr'lu FeCrC tozu ile PTA kaplama yöntemi kullanarak kaplamışlardır. Bu kaplama işlemini 100 ve 120 amperlik kaynak akımları kullanarak uygulamışlardır. PTA yöntemiyle kaplanan numunelerin aşınma testlerini pim-on-disk deney düzeneği ile 10N, 20N, 30N' luk yükler uygulayarak yapmışlar ve kayma mesafesi olarak 20 metre seçmişlerdir. Bu testler sonucunda 0,6 mm kaplama kalınlığı ve 120 A' lik akım değerine sahip numunenin aşınmaya karşı en iyi direnci verdiğini saptamışlardır.

Ulutan vd. (2010), çalışmalarında PTA yöntemini kullanarak paslanmaz çelik olan AISI 304 üzerine Cr_3C_2 ve %0-100 arasında değişen SiC toz karışımı ile kaplamışlardır. Değişen oranlardaki SiC' ün mikroyapı ve sertlik üzerine etkisini incelemişlerdir. Plazma transferli ark (PTA) yöntemiyle işlem yapılan tabakanın yüzey özellikleri SEM, OM, EDS, XRD ve mikrosertlik test cihazı ile incelemişlerdir. Bu testler sonucunda $Cr_3C_2 + SiC$ tozunu alt malzeme olan AISI 304 paslanmaz çeliği üzerine çatlaksız ve gözeneksiz bir şekilde kaplandığını ve alt malzeme ile toz arasında metalürjik olarak mükemmel bir bağ oluştuğunu saptamışlardır. Bu çalışma sonucunda PTA yöntemiyle üretilen kaplamaların mikrosertlik değerlerinde altlık malzemeye göre 2-3 kata varan artış gözlemlemişler ve SiC ilavesi artışı mikroyapıda oluşan $CrSi_2$, Cr_3Si ve Fe_5SiC gibi metalografik fazlarının oluşmasına sebep olduğundan dolayı mikrosertliği arttırdığı sonucuna varmışlardır.

Buytoz vd. (2010) AISI 304 çelik yüzeyini plazma transferli ark kaynak kaplama yöntemini kullanarak B4C-Ni-WC karbür ve element tozları ile alaşımlandırmışlardır. Bu alaşımlama sonucunda kaplama mikroyapısına göre herhangi bir makro ve mikro çatlak oluşmamıştır. Alaşımlama işleminden sonra katılama sonrası mikroyapıda Ni_4B_3 , ostenit (γ), $(Cr,W)_2B$, Cr_7C_3 ve $Fe_{23}(C,B)_6$ faz ve karbürleri meydana gelmiştir. Yapılan sertlik

deneyleri ile kaplama bölgesinde en yüksek sertliği 750 HV olarak ölçmüşlerdir. Aşınma testlerine tabii tutulan AISI304 paslanmaz çeliğin kaplanan yüzeyinin alt malzemeye göre aşınma direncinin oldukça yüksek olduğunu saptamışlardır.

Guoqing vd. (2013), AISI 304 L çeliğini altlık malzeme olarak seçmişler ve plazma transferli ark kaynağı yöntemini kullanarak yüzeyini nikel temelli Ni50 (Fe %29.03, Cr %61.71, Si %1.53, C %6.64, S %0.054, P%0.024) kaplama tozunu kullanarak kaplamışlardır. PTA yöntemini uygularken 160 A' lik akım değerini kullanmışlardır. Kaplama işlemi sonucunda kaplanan yüzeye tribolojik testleri uygulamışlar ve mikroyapısını incelemişlerdir. Aşınma testlerini 30 N, 70 N ve 120 N' lik yükler altında ve 30, 90 ve 180 dakika olarak üç farklı zaman aralığı kullanarak yapmışlardır. Bu test sonucunda SEM analizleri incelendiğinde düşük yük altında ve nispeten daha az süreyle aşınmaya maruz bırakılan kaplamalarda abrasiv aşınma, yüksek yüke maruz bırakılan numunelerde ise adheziv aşınmanın meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Uzun süreli aşınma testine tabii tutulan numunelerde ise yüklerin artırılmasıyla sırasıyla; adheziv aşınma, oksidasyon aşınması ve yorulma aşınmasının ortaya çıktığını bulmuşlardır.

Hou (2013), yaptığı çalışmada %2 ile %6 oranları arasında Mo içeren ve içermeyen FeCrBSi tozunu plazma transferli ark kaynağı kullanarak ağırlıkça %0.12C, %0.30Si ve %0.45Mn içeren düz bir çelik malzeme üzerine kaplamış ve Mo ilavesinin etkilerini gözlemlemiştir. Mikroyapı ve özelliklerini incelemiştir. Testler sonucunda Mo içermeyen kaplamanın (Fe, Cr)₂B, γ (Fe, Ni), Mo ve M₇(C,B)₃ ilavesi ile Fe₃Mo₃(C, B), M₂₃(C, B)₆, Mo₂(B, C) fazlarını içerdiğini bulmuştur. Ağırlıkça %0 ve ağırlıkça %2 Mo içeren FeCrBSi kaplamalar hipotektik bir yapıya sahip iken Mo ilavesini ağırlıkça %4' e ve ağırlıkça %6' ya çıkararak ötektik ötesi bir yapı elde etmiştir. Ayrıca en iyi mikroyapı özelliklerini ve en yüksek aşınma direncini %4 Mo katkılı alaşımda elde etmiştir ve kaplamanın Young modülü (E) ve termal şok direnci etkisini de incelemiştir. Kaplamaları incelediğinde sertliği en yüksek olan %4 Mo içeren alaşım olurken Young's Modulu bundan bağımsız olarak en fazla %6 Mo içeren alaşımda ölçmüştür. Bir malzemenin termal şok direncinin kırılma gerilimi, Young modülü, Poisson oranı, termal genleşme katsayısı, termal iletkenlik, ısı transfer katsayısı, termal yayılma, numune boyutu ve termal şokun süresine bağlı olduğunu bildirilmiştir. En iyi termal şok direncinin ağırlıkça %4 Mo katkılı kaplamada elde edilebileceğini göstermiştir.

Apay vd. (2013) yaptıkları çalışmada düşük karbonlu bir çelik olan AISI 1015 çeliği yüzeyini Plazma transferli ark kaynak yöntemini kullanarak kobalt bazlı süperalaşım olan Stellite 6 tozu ile kaplamışlardır. Kaplama işlemi yapılan yüzeyi XRD, SEM, EDS analizlerine tabi tutmuşlar ve mikrosertlik ölçümü ve aşınma testlerini uygulamışlardır. Mikrosertlik ölçümü 100 gr yük altında yapmışlar ve en büyük sertlik değerini 378 HV olarak ölçmüşlerdir. SEM analizi incelendiğinde kaplama bölgesinin dendritik yapıda olduğu, altlık malzemenin mikroyapısının ferrit ve perlit yapılarından oluştuğunu saptamışlardır. Ayrıca EDS sonuçlarını incelediklerinde kaplama tozunda bulunan Co ve Cr' nin altlık malzeme olan AISI 1015 çeliğin tabakasına geçişinin olduğunu ve XRD analizi verilerini incelediklerinde yapı içerisinde Co ve Cr elementleri ve Cr_7C_3 karbürleri tespit etmişlerdir. Aşınma deneyi sonucunda 40 N yük uygulanan numunedeki aşınma izlerinin ve kopan parça miktarının 10 N yük uygulanan numuneye göre daha fazla olduğunu bulgulamışlardır.

Yuan ve Li (2014), çalışmalarında ASTM A36 çelik levha üzerine yüksek hacim oranlı M_7C_3 (M=Cr, Fe) ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş Fe bazlı kompozit kaplamayı PTA yöntemi ile uygulamışlardır. Kaplama işleminde Cr_3C_2 ve Fe-CrNiBSi alaşımları olmak üzere iki tip toz kullanmışlardır. En yüksek sertlik değerine ve aşınma direncinin Cr_3C_2 kaplama tozu ile kaplama sonucu $(Cr,Fe)_7C_3$ karbürünün oluştuğu numunede elde etmişlerdir. $(Cr,Fe)_7C_3$ karbür miktarının en yüksek olduğu numunede ise aşınma oranının en düşük olduğunu bulgulamışlardır.

Ulutan vd. (2016), toz olarak FeCrC (Fe %29.03, Cr %61.71, Si %1.53, C %6.64, S %0.54, P %0.024) kullanarak plazma transferli ark yöntemiyle AISI 5115 çeliği yüzeyini kaplamışlardır. Altlık malzemeye FeCrC tozunu beş farklı akım (80, 90, 100, 110, 120 A) kullanarak nüfuz ettirmişlerdir. Kaplama işlemi sonucunda altlık malzeme olarak kullanılan AISI 5115 çeliğinin ferrit ve perlit fazlarından oluşan yapısının PTA kaplama işleminden sonra önemli oranda değiştiğini saptamışlardır. Kaplanan numunelere mikroyapı, mikrosertlik ve aşınma testleri uygulamışlardır. Sertlik ölçüm testleri sonucunda kaplanmış yüzeyin ana malzemeye göre sertlik oranının 5 kat arttığını ve aşınma deneyi sonucunda FeCrC tozu ile alaşımlandırılan yüzeyin aşınma direncinin 2.5 kat arttığını gözlemlemişlerdir.

Gürgeç ve Özel (2016), PTA kaplama yöntemi ile AISI 1020 çeliğinin yüzeyini FeW, FeB ve FeCrC ferro alaşım tozları ile 120A ve 160A akım değeri ve farklı ilerleme hızları kullanarak alaşımlandırmışlardır. Bu çalışmada PTA kaynak yöntemiyle FeB, FeCrC ve FeW tozlarını başarıyla ergiterek düşük karbonlu çelik olan AISI 1020 üzerini çok iyi kaplamışlardır. Daha fazla demirin kaplama yapısına nüfus etmesi, ilerleme hızının düşmesi ve ısı girdisi yoğunluğunun artması ile mümkün olduğunu belirlemişlerdir. Kaplama bölgesinin mikroyapısında M_7C_3 (M=Cr, Fe, W) karbürlerinin yüksek ısı girdisi ve düşük ilerleme hızına sahip numunede oluştuğunu ve $M_{23}C_6$ (M=Cr, Fe, W) karbürlerinin ise düşük ısı girdisi ve yüksek ilerleme hızına sahip numunede oluştuğunu tespit etmişlerdir. Mikrosertlik ölçüm sonucunda en yüksek sertlik değerini 1668 HV_{0,2}, en yüksek ortalama sertlik değerini ise 1063 HV_{0,2} olarak yüksek ilerleme hızına sahip numunelerden düşük ısı girdisine sahip numunede ölçmüşlerdir. Ayrıca en yüksek aşınma direncini de bu numunede elde etmişlerdir. En düşük aşınma direncini ise düşük ilerleme hızı ve ısı girdisi ile işlem yapılan numunede olduğunu tespit etmişlerdir.

Sigolo vd. (2016), AISI 4140 çelik üzerine Plazma transferli ark yöntemini kullanarak boronla modifiye edilmiş SM1B-süpermartensitik (C %0.0065, B %0.85, Cr %11.52, Ni %5.41, Mo %1.90, Si %0.09, Mn %0.40) ve SD3B-superduplex (C %0.105, B %2.72, Cr %20.23, Ni %7.25, Mo %3.13, Si %0.07, Mn %1.06) tozları ile kaplamışlardır. Bor içerikleri, bu kaplamaların korozyon direncine zarar vermeden sert borür oluşumunu indüklemek için seçmişlerdir. Süpermartensitik çelikte biraz daha belirgin oksidasyona rağmen, her iki kaplama da AISI 4140 çeliği üzerine başarıyla uygulamışlardır. Optik mikrografları incelediklerinde dendritik yapıyı SM1B için açıkça tanımlayabilirken, SD3B durumunda, dendritik olmasına rağmen, borürler birincil faz olarak oluşturulduğu için çok açık olmadığını görmüşlerdir. Vickers sertlik testleri sonucunda SD3B tozu kullanılan altlık malzemenin sertliği yaklaşık 3 kat arttığını ve yapılan aşınma testlerinde, SD3B kaplama, esas olarak yüksek oranda birincil M2B tipi borür oranı nedeniyle en yüksek aşınma direncini gösterdiğini bulgulamışlardır.

Yıldız vd. (2017), Hardox 400 çelik malzemesi yüzeyini PTA yöntemi kullanarak TiC, B₄C ve SiC tozları ve farklı oranlarda FeCrC toz karışımı kullanarak kaplamışlardır. FeCrC tozunun altlık malzeme üzerindeki etkisini mikroyapı testleri ile belirlemişlerdir.

Kaplama işlemi sonucunda mikroyapıda makro ve mikro çatlak oluşmadığını gözlemlemişlerdir. PTA ile kaplama sonucunda kaplama bölgesinde farklı karbür ve intermetalik bileşiklerin olduğunu tespit etmişlerdir. Altlık malzemesi olan Hardox 400 ün sertliği 319 HV iken, %70 oranında FeCrC kaplı numunede en yüksek sertlik değeri 969 HV değerini ölçmüşlerdir. Sertlik değerini, kaplama tozunda kullanılan karbür yapıcı elementlerin sert fazları oluşturması ve kaplama bölgesinde dendritik yapıların meydana gelmesinin artırmış olduğunu tespit etmişlerdir.

Topal (2017), plazma transferli ark kaynak (PTA) yöntemini kullanarak AISI1020 çelik yüzeyine Hardox450+FeW ile kaplamıştır. PTA yöntemi ile kaplama sırasında kullanılan 140 A akım ve 0.01 m/dk ilerleme hızı ile kaplama sonucunda oluşan mikroyapının çatlaksız ve pürüzsüz olduğunu tespit etmiştir. Yapılan mekanik deneylerden sertlik ölçüm testi sonucunda en yüksek sertlik değerini 651 HV olarak ölçmüştür. Aşınma testleri verileri ile en yüksek aşınma direncini ise aynı numuneden elde etmiştir. Kaplama tozundaki FeW' nin etkisi ile altlık malzemeye oranla tüm numunelerin aşınma dirençlerinde artış olduğunu tespit etmiştir.

Kılıçay (2020), 1.2842 soğuk iş takım çeliği üzerine PTA yöntemi ile tungsten karbür (WC) tozunu 3 farklı enerji girdisi ve ilerleme hızları kullanarak kaplama yapmıştır. Numunelerin mikroyapılarını incelemek için optik mikroskop, SEM, EDS ve XRD analizlerini kullanmıştır. Optik mikroskop ile inceleme sonucunda kaplamada herhangi bir mikroyapısal kusur tespit etmemiştir. Hacimsel olarak daha belirgin olan dendritik kolların yüksek enerji girdisi kullanılan numunede oluştuğunu ve daha düşük enerji girdisi kullanılan numunede ise bu dendritlerin belirginliklerinin en alt seviyede olduğunu gözlemlemiştir. EDS ve SEM analizleri incelediğinde kaplama işlemi sonrasında kaplama bölgesinde yüzeye geçişen W ve C elementlerini tespit etmiştir. Ayrıca Fe-W-C üçlü sistemini altlık malzemedeki demirin difüze olması sonucu oluştuğunu bulgulamıştır. Mikrosertlik verilerini incelediğinde 0.9 kJ/mm enerji girdisine sahip numunenin en yüksek sertlik değerine sahip olduğunu ve bu değer altlık malzemenin sertliğinden yaklaşık 5 kat daha fazla olduğu sonucuna varmıştır. Aşınma testi sonucunda kaplanan bölgenin altlık malzemeye göre aşınma oranının yaklaşık 7 kat azaldığını ve bu azalmanın sebebinin mikroyapıda oluşan sert karbürlerinin neden olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca

yapılan sürtünme deneyi sonucunda da en yüksek sürtünme katsayısını bu numunede elde etmiştir.

Zhao vd. (2021), PTA yöntemini kullanarak Ti6Al4V alaşım yüzeyini TiC ve Cr₃C₂ tozları kullanarak kaplamışlardır. Kaplama yüzeyinde gözenekli yapı gözlemlenmiştir ve kaplama tozu ile altlık malzeme arasında metalurjik olarak iyi bir bağ oluştuğunu tespit etmişlerdir. Kaplama yüzeyinde TiC dendritleri, α-Ti, β-Ti ve TiCr₂ fazlarının olduğunu belirlemişlerdir. Kaplama yüzeyinin mikrosertlik değerinin altlık malzemeye göre 4 kat arttığını ve aşınma direnci değerinin de yükseldiğini bulgulamışlardır. İşlemsiz Ti6Al4V yüzeyinde aşınma mekanizması abrasiv aşınma, kaplama sonucu oluşan yeni yüzeyde ise abrasiv ve adheziv aşınma gözlemlenmiştir.

Prabu vd. (2022), yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşım yüzeyini AlCrFeCuCoNi' den oluşan yüksek entropili parçacıklar ile kaplamışlardır. Kaplama yüzeyinin mikrosertliği, aşınma direnci ve faz oluşumunu incelemişlerdir. Alaşımlandırılan yüzeyin altlık malzemeye göre sertliğinin yaklaşık 2.2 kat arttığını ve aşınma direncinin de önemli oranda arttığını tespit etmişlerdir. Kaplama bölgesinde gözeneksiz bir yapı elde etmişlerdir. Kullanılan kaplama tozu, aşınma testi sırasında oksitlenmeyi arttırmıştır ve bu oksit film kaplama yüzeyi ile aşındırıcı parça arasında bariyer görevi gördüğü için sürtünmeyi azalttığını bulgulamışlardır.

Tez çalışması kapsamında plazma transferli ark kaynak yöntemi ile yapılan yüzey kaplama işlemleri incelenmiştir. Çizelge 6.1' de bu çalışmaların kısa bir özeti verilmiştir. Genel olarak literatür çalışmaları incelendiğinde, altlık malzemede çoğunlukla çelik malzemeler üzerine kaplama işlemi yapılırken son yıllarda nadir olarak titanyum alaşım ile çalışmalar yapılmıştır. Bu tez çalışmasında altlık malzeme olarak titanyum alaşımı ve kaplama tozu olarak daha önce kullanılmayan TiC ve C toz karışımı ile kaplama işlemi yapılmıştır.

Çizelge 6.1. PTA yöntemi ile kaplama yapılan farklı altlık malzeme ve kaplama tozları.

Altlık Malzeme	Toz Karışımı	Akım	Bulgular	Yazar
Ç1020 çeliği	FeCr/FeCr+C	130 A	Sertlik ana malzemeye göre yaklaşık 4 kat artmıştır.	(Özel vd., 2007)
AISI 1020 çeliği	Ni/Ti	100A-130A	130 A akım ile işlem yapılan numunede sertlik ana malzemeye göre yaklaşık 3 kat artmıştır.	(Orhan vd., 2008)
AISI 304 çeliği	Cr3C2/SiC	-	Sertlik ana malzemeye göre yaklaşık 2-3 kat artmıştır.	(Ulutan vd., 2010)
AISI 304 çeliği	B4C-Ni-WC	160 A	Sertlik ana malzemeye göre yaklaşık 3 kat artmıştır.	(Buytoz, 2010).
AISI 1015	Stellite 6	95 A	Sertlik ana malzemeye göre yaklaşık 2 kat artmıştır.	(Apay ve Gülenç, 2013)
1.2842 soğuk iş takım çeliği	WC	90 A -100 A	100 A akım ile işlem yapılan numunede sertlik ana malzemeye göre yaklaşık 5 kat artmıştır.	(Kılıçay, 2020)
Ti6Al4V	Ti/ Cr3C2	110A-130 A	TiC dendritleri, β -Ti, α -Ti ve TiCr2 fazları oluşmuştur.100 A akım ile işlem yapılan numunede sertlik ana malzemeye göre yaklaşık 4 kat artmıştır.	(Zhao vd., 2021)
Ti6Al4V	AlCrFeCuCoNi yüksek entropi parçacıkları	115 A	Sertlik ana malzemeye göre yaklaşık 2.2 kat artmıştır.	(Prabu ve Duraiselvam, 2022)

7. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımlı numunelerin yüzeyi plazma transferli ark kaynak yöntemi ve farklı kaplama tozları kullanılarak alaşımlandırılmıştır. Yüzey özellikleri değiştirilen numunelerin mikroyapı, aşınma ve sertlik özellikleri incelenmiştir. Yüksek lisans tez çalışması aşağıda belirtilen işlem sırasına göre yapılmıştır:

1. Bu çalışma için kullanılacak numuneler talaşlı imalat ile (80x20x10) mm³ ölçülerinde kesilmiştir. Numunelerin bir yüzeyine freze ile 3x1 mm²'lik kanallar açılmıştır.

2. Numunelerin üzerinde bulunan 3x1 mm²'lik kanallara alkol ile karıştırılan kaplama tozları konulup 200°C' de 120 dakika fırınlanmıştır.

3. Plazma kaynak makinesi ile numunelerin üzerinde ana malzeme ve kaplama tozları karışımından oluşan yeni özelliklere sahip bir bölge elde edilmiştir.

4. Hazırlanmış olan bu numunelerden yaş kesme yöntemiyle farklı boyutlarda numuneler kesilmiştir.

5. Kesilen numunelerin bir kısmı sertlik ölçümü ve mikroyapı incelemeleri için kullanılmıştır.

6. Kesilen diğer kısım numuneler de XRD analizinde kullanılmıştır.

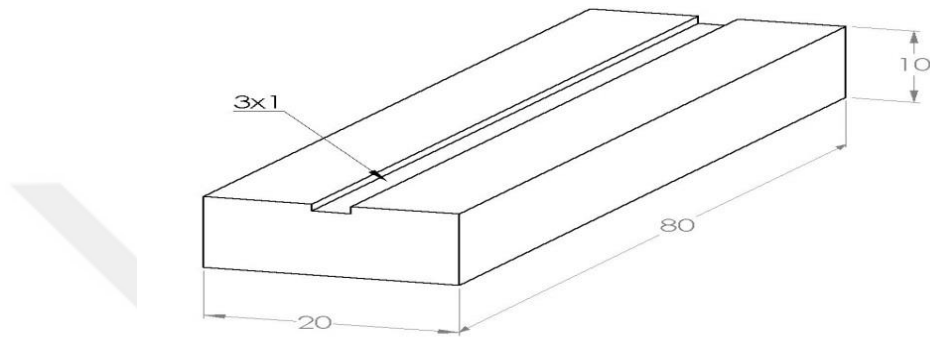
7. Kalan numunelere ise aşınma testi uygulanmıştır.

7.1. Titanyum Alaşımları

Bu yüksek lisans tez çalışması için titanyum alaşımlarından en yaygın kullanılan Ti6Al4V titanyum alaşımı seçilmiştir. Ti6Al4V alaşımına ait kimyasal bileşim tablosu Çizelge 7.1 'de verilmiştir. Bu titanyum alaşım, kaplama işlemleri için 10x20x80 mm³'lük boyutlara frezelenerek lama şeklinde numuneler elde edilmiştir. Numunelerin bir yüzeyine Şekil 7.1 'de gösterildiği gibi 3x1 mm²'lik kanallar açılmıştır.

Çizelge 7.1. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi.

Kimyasal bileşimi (%)								
Element	Ti	Al	Fe	V	N	C	O	H
%	89,733	5,86	0,173	4,08	0,005	0,008	0,140	0,001



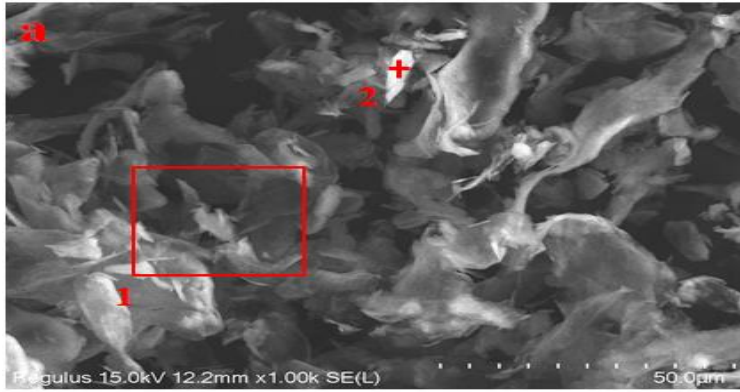
Şekil 7.1. Deney numunesinin şematik gösterimi.

7.2. Kaplama Tozları

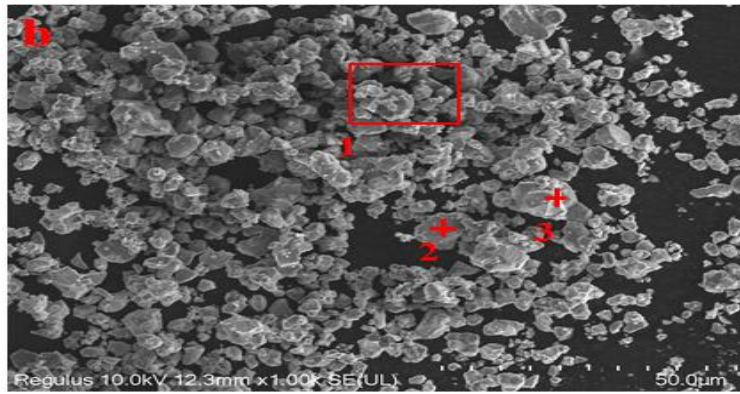
Titanyum alaşım numunelerinin yüzeylerine alaşımlandırma işlemi yapmak için grafit (C) ve titanyum karbür (TiC) tozları kullanılmıştır. Kullanılan tozların SEM-EDS analizleri Şekil 7.2' de verilmiştir.

Titanyum alaşımlı numunelerin yüzeyinde açılmış olan kanallar üzerine alkol ile karıştırılan kaplama tozları konulmuş ve 200 °C' de 120 dakika süre ile fırında bekletilmiştir. Yapılan fırınlama işlemi sayesinde PTA işlemi esnasında kaplama tozlarının koruyucu gazın etkisi ile yüzeyden ayrılması engellenmiştir.

PTA işleminde kullanılacak toz karışımları ve bu karışımların kullanıldığı numuneler aşağıda verilen tablodaki gibi adlandırılmıştır (Çizelge 7.2).



Element	Bileşim (% Ağırlık)	
	Alan 1	Nokta 2
C	100.00	100.00
Toplam 100.00		



Element	Bileşim (% Ağırlık)		
	Alan 1	Nokta 2	Nokta 3
C	19.87	25.73	22.29
Ti	80.13	74.27	77.71
Toplam 100.00			

Şekil 7.2 Kaplama tozlarının SEM-EDS analizleri: a)C toz partikülleri (1000x), b)TiC toz partikülleri (1000x)

Çizelge 7.2. Numune adlandırma tablosu.

Numune Adı	Karışım (% Ağırlık)	
	C	TiC
0C	0	100
25C	25	75
50C	50	50
75C	75	25
100C	100	0

7.3. Plazma Transferli Ark (PTA) Kaynak Makinesi

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, Plazma Transferli Ark (PTA) kaynak makinesi olarak Fronius marka PTA kaynak makinesi kullanılmıştır. PTW 1500 plazma torcu ile tungsten %2 toryumlu elektrot (\varnothing 3.2 mm) (Şekil 7.3) ve 90 amper akım değeri kullanılarak numunelerin yüzeylerine alaşımlandırma işlemi yapılmıştır. Argon gazı

koruyucu gaz ve plazma gazı olarak kullanılmıştır. Çizelge 7.3' de PTA kaynak işlem parametreleri verilmiştir.



Şekil 7.3. PTA kaynak makinesi.

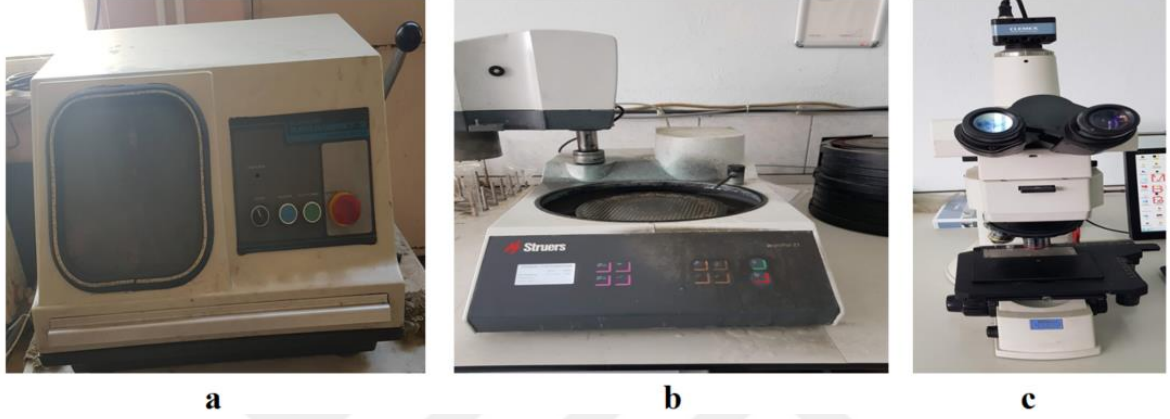
Çizelge 7.3. PTA işlem şartları.

Parametreler	Değer	Birim
Ark Akımı	90	A
Ark Voltajı	20-25	V
Koruyucu gaz akış oranı	10	l/dk
Plazma gazı akış oranı	0.5	l/dk
Kaynak ilerleme hızı	40	mm/s
Kaynak uzaklığı	2.5	mm

7.4. Mikroyapı İncelemeleri

PTA işlemi uygulanmış numuneler ve işlemsiz numune mikroyapı incelemeleri için ıslak kesme yöntemi kullanılarak Buehler Abrasimet 2 kesme cihazında (şekil7.4-a) 20x10x10 mm³ boyutlarında kesilmiştir. Islak kesim işlemi yapılmış bu numuneler yüzey mikroyapı incelemeleri için Struers Tegraforce 4500 parlatma ve zımparalama cihazı (Şekil7.4-b) kullanılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için numuneler ilk olarak kaba (220 grid) ve ince (600 grid) zımparalama ve daha sonra farklı incelikteki elmas solüsyon karışımları ile parlatma işlemi yapılarak hazırlanmıştır. Parlatma işlemi sonrasında

mikroyapı görüntüleri alabilmek için numunelere dağlama işlemi yapılmıştır. Numunelerin dağlama işlemi için 1 gr CuCl_2 +5 ml HCl+40ml saf etil alkolden oluşturulan çözelti kullanılmıştır. Zımparalama, parlatma ve dağlama işlemi uygulanan numuneler Nikon Clemex marka (şekil 7.4-c) optik mikroskobunda incelenmiş ve farklı büyötmelerde gerekli mikroyapı resimleri alınmıştır.



şekil 7.4. Deneğ cihazları: a)Kesme cihazı, b)Zımparalama cihazı, c)Optik mikroskop.

Dağlama işlemi yapılmış mikroyapı numuneleri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı ve Uygulama Merkezinde bulunan Hitachi Regulus 8230 model taramalı elektron mikroskobu (şekil 7.5) ile SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu mikroyapı numunelerinden yüksek büyötmeli görüntüleri alıp, numune mikroyapısı ile ilgili detaylı veriler elde etmek için kullanılmıştır. Bu mikroskop ile 1000x büyötmeye detaylı mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Kalitatif elementer analizi (EDS) ise detaylı mikroyapı görüntülerindeki belirli nokta ve bölgelerden yapılmıştır.

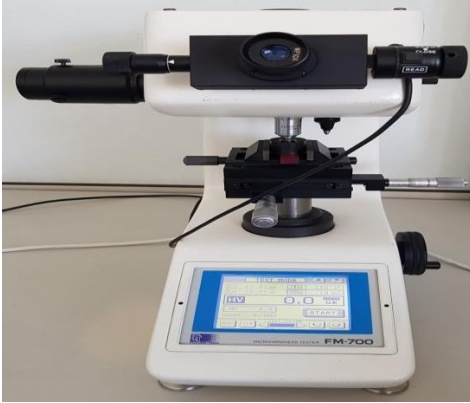


şekil 7.5. Hitachi Regulus 8230 model taramalı elektron mikroskobu.

PTA işlemi yapılmış numunelerinin yüzeylerinde oluşan fazlar Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi laboratuvarlarında bulunan Bruker Marka D 8 Advance model cihazında XRD analizi ile belirlenmiştir.

7.5. Mikrosertlik Ölçümleri

Yüzeyi alaşımlandırılan numunelerin bu işlemten sonra yüzey sertliğindeki değişimi ölçmek için Future Tech FM 700 marka mikrosertlik ölçüm cihazında (Şekil 7.6) Vickers mikrosertlik ölçümü 100 gf ($HV_{0.1}$) yük altında 10 saniye bekleme süresi ile yapılmıştır. Yüzeyi alaşımlandırılan numunede sertlik ölçümü yüzeyden altlık malzemeye doğru olacak şekilde 150 μm aralıklarla yapılmıştır. Ayrıca ölçüm işlemi ilk ölçümden 200 μm sağa ve 200 μm sola doğru olarak 3 kol halinde tekrarlanmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen sertlik değerleri diyagramı çizilmiş ve bu değerler karşılaştırılmıştır.

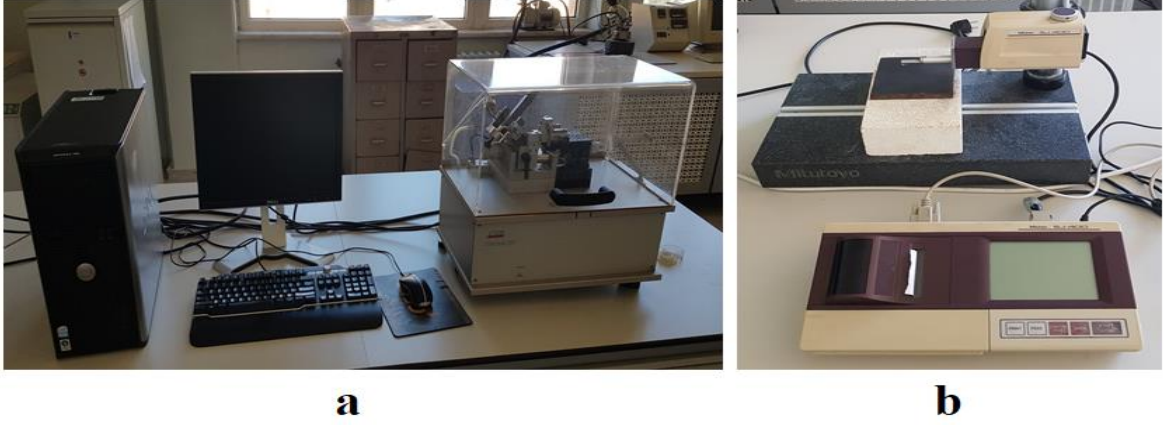


Şekil 7.6. Mikrosertlik ölçüm cihazı.

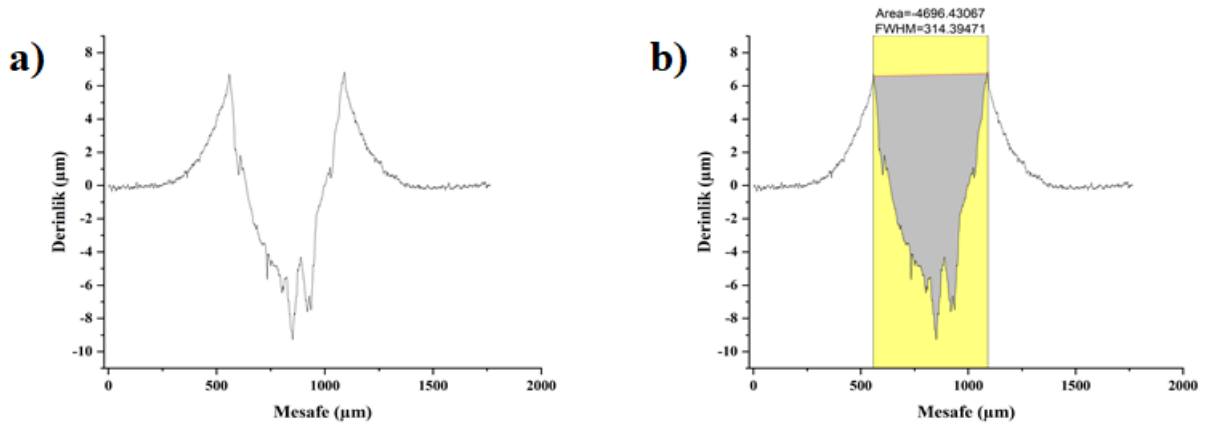
7.7. Aşınma Testleri

Yüzeyi alaşımlandırılan titanyum alaşımlı numunelere ASTM G99 deney standartlarında küre-disk aşınma geometrisi ile CSM Tribometer aşınma deney cihazında (Şekil 7.7-a) aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneyi sonrasında Mitutoyo SurfTest SJ-400 markalı profil ölçüm cihazı (Şekil 7.7-b) ile yüzey pürüzlülükleri değerleri ve profilleri ölçülmüştür. Sürtünme katsayısı değerleri, deney sırasında aşınma mesafesine bağlı olarak aynı anda kaydedilmiştir. Aşınma deneyi tam olarak kaplama işlemi yapılmış

bölgenin üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde küreselliği ve bileşimi sertifikalı 3mm çapındaki WC küreler aşındırıcı olarak kullanılmıştır. Aşınma deneyi esnasında ortam sıcaklığı 20°C, bağıl nem oranı %35-40, aşınma mesafesi 100 metre ve 5N yük altında 3 cm/s çevresel hız uygulanarak yapılmıştır. Aşınma deneylerinin ardından, yüzeyde meydana gelen aşınma izleri profilometre kullanılarak ölçülmüştür. Ölçülen kanalın grafiği Şekil 7.8’ de gösterilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçlarına dayanarak aşınmış yüzey kesit alanları değerlendirilmiş ve bu değerler temel alınarak aşınma oranları hesaplanmıştır. Deneysel sonuçları neticesinde hesaplanan sürtünme katsayıları, aşınma oranları ve aşınma kanallarının SEM mikroskopuyla incelenmesi ve EDS analizi sonucunda elde edilen veriler ile numuneler karşılaştırılmıştır.



Şekil 7.7. a)CSM Tribometer aşınma test cihazı, b)Mitutoyo SurfTest SJ-400 yüzey pürüzlüğü ölçüm cihazı.



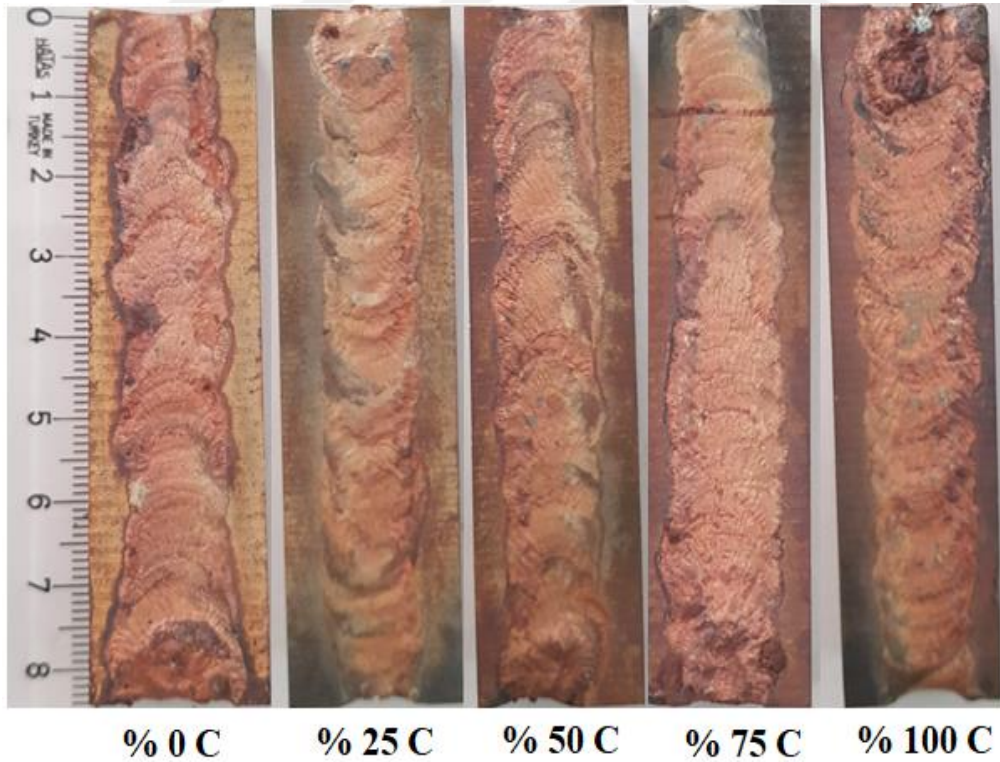
Şekil 7. 8. a)Aşınma kanalı derinlik-mesafe grafiği, b) Aşınma kanal alanı

8. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yüksek lisans tez çalışmasının bu başlığı altında mikroyapı, sertlik ve aşınma konularında elde edilen deneysel bulgular detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

8.1. Mikroyapı Sonuçları

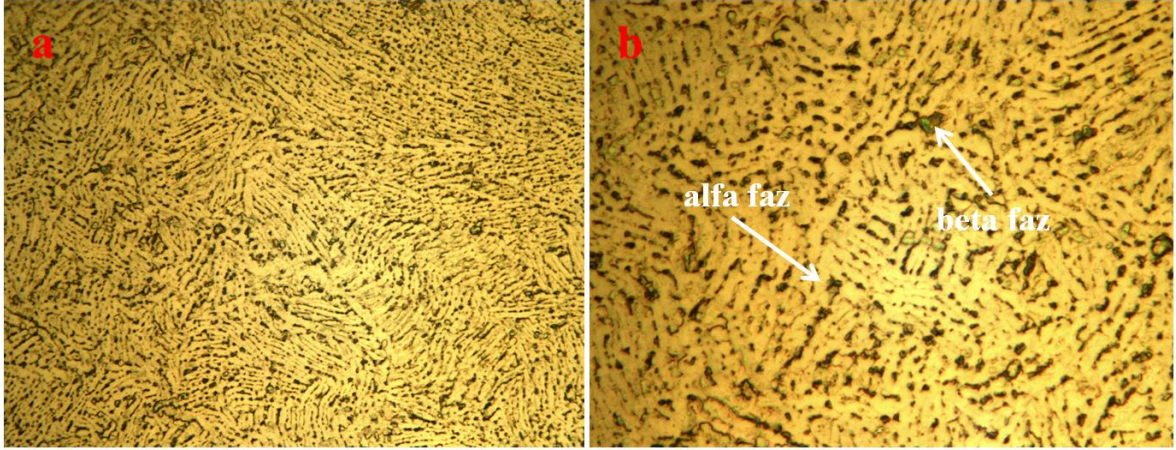
PTA işlemi sonucunda farklı kaplama tozlarının kullanılması, numunelerin mikroyapısını önemli ölçüde değiştirmiştir. İşlem sonrası gerçekleştirilen mikro ve makro incelemelerde alaşımlandırılan bölgede boşluk, çatlak, porozite gibi mikroyapısal kusurlar tespit edilmemiştir. Kaplama tozu olarak hacimce farklı oranlarda karıştırılmış TiC ve C tozları kullanılmıştır. Bu oranlar Çizelge 7.2 ile kaplama tozları başlığı altında verilmiştir. PTA ile 90 A akım kullanılarak kaplanmış numune görüntüleri Şekil 8.1' de gösterilmiştir.



Şekil 8.1. PTA yöntemi ile kaplanan numunelerin görüntüleri.

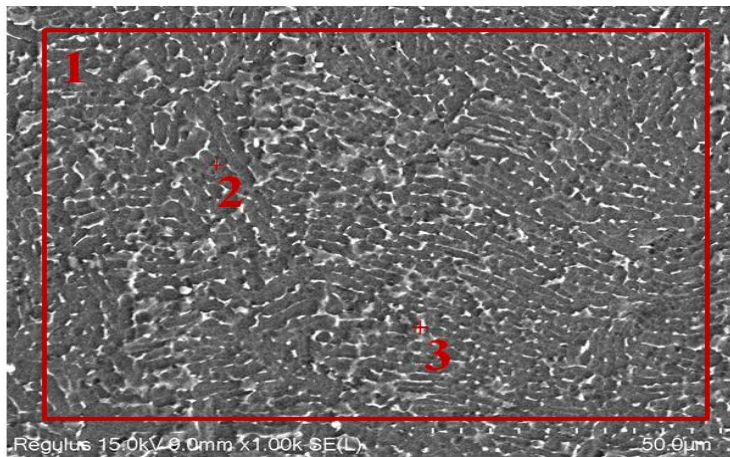
Bu kısımda, işlemsiz Ti6Al4V altlık malzemenin ve PTA ile yüzey alaşımlandırma işlemi yapılmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri verilmiş ve yorumlanmıştır. SEM görüntü ve EDS analiz sonuçları değerlendirilmiştir. XRD analiz sonuçları son bölümde tüm numuneler için karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde altlık malzeme olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımının optik mikroskop görüntüleri Şekil 8.2' de verilmiştir. Bu görüntü incelendiğinde, Ti6Al4V alaşımında koyu renkte gösterilen bölgelerin beta fazını açık renktekilerin ise alfa fazını gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 8.2-b).



Şekil 8.2. Ti6Al4V referans numunesinin optik mikroskop görüntüleri: a)500x, b)1000x

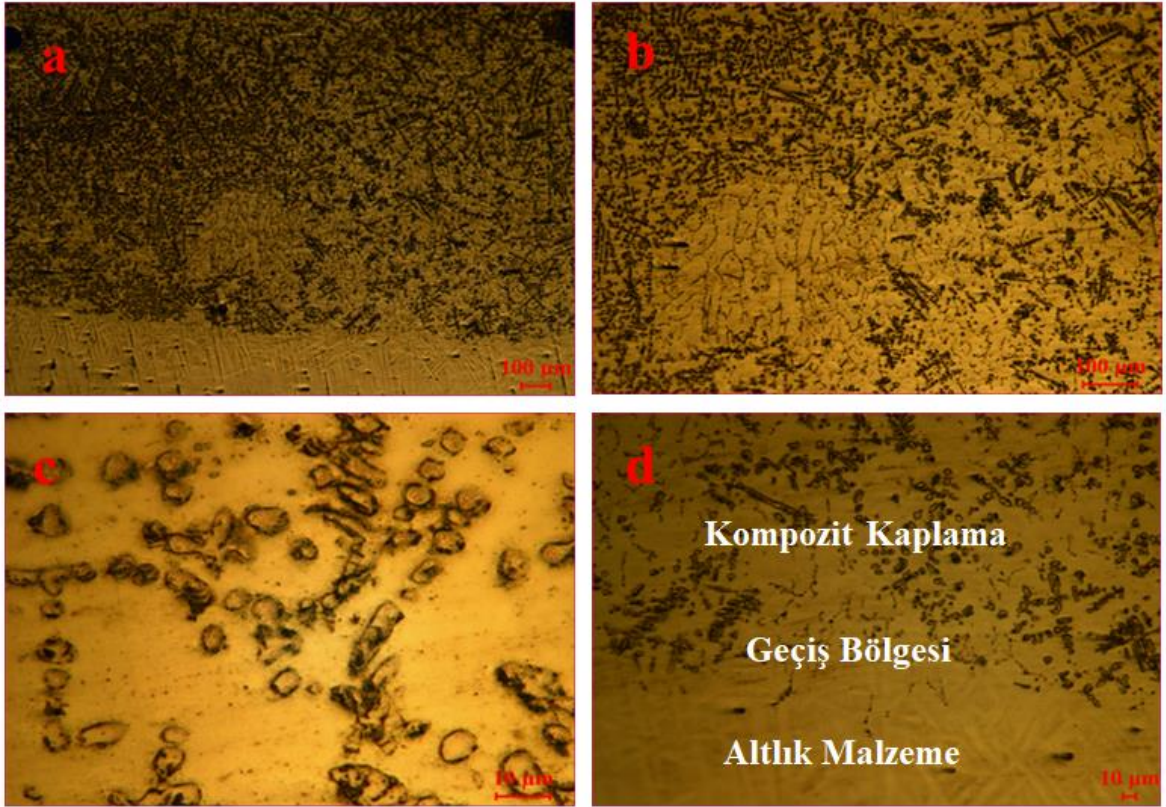
Ti6Al4V alaşımının SEM-EDS analizi Şekil 8.3' de verilmiştir. EDS analizi sonucunda Ti6Al4V alaşımının içerdiği elementler belirlenmiştir.



Element	Bileşim (% Ağırlık)		
	Alan 1	Nokta 2	Nokta 3
C	7.45	7.52	7.53
Al	7.18	7.65	8.58
Si	0.05	0.00	0.00
Ti	81.25	81.02	81.66
V	3.01	3.31	1.81
Cr	0.17	0.00	0.00
Fe	0.00	0.00	0.24
Cu	0.36	0.00	0.00
Zr	0.29	0.14	0.00
Nb	0.06	0.20	0.15
Mo	0.21	0.10	0.00
Sn	0.00	0.07	0.03
Toplam 100.00			

Şekil 8.3. Ti6Al4V referans numunesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

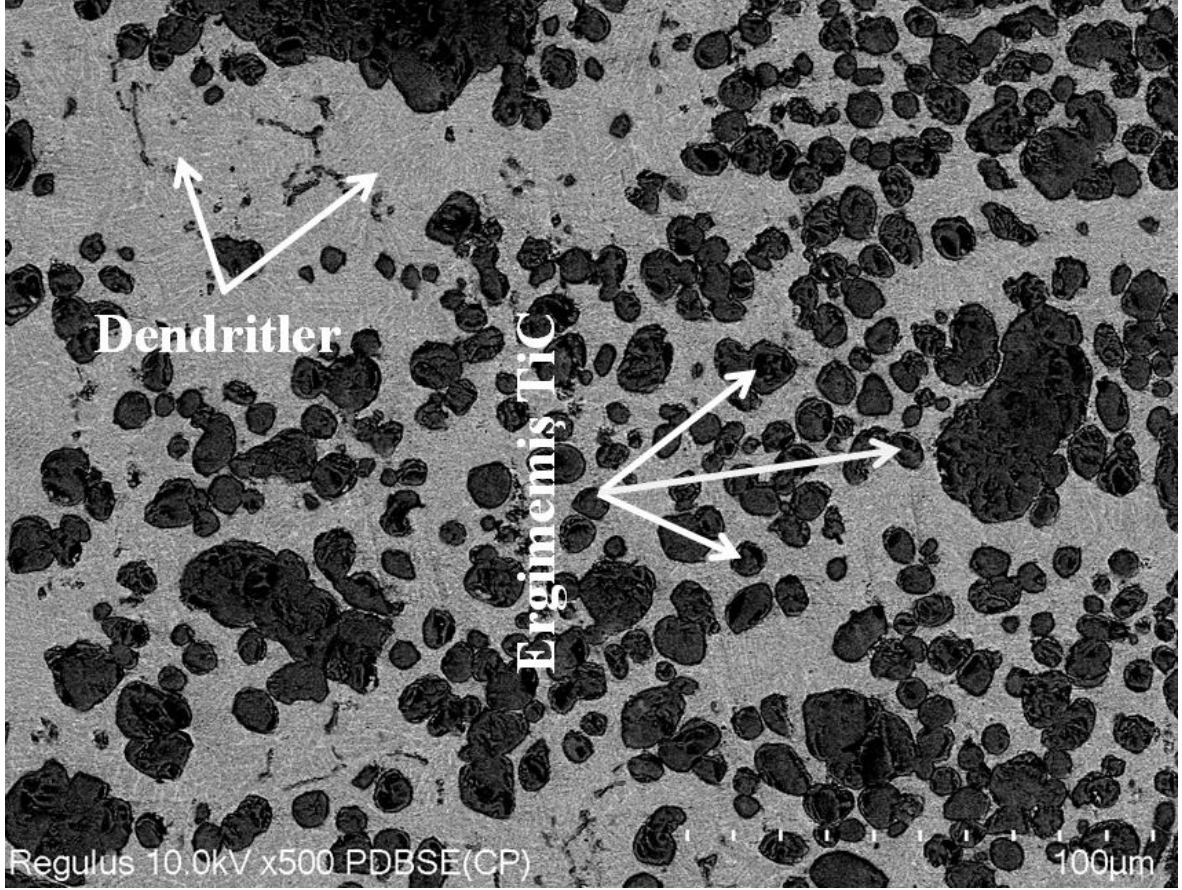
Bu bölümde titanyum karbür tozu kullanılarak alaşımlandırılmış 0C numunesinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 8.4' de verilmiştir. PTA ile alaşımlandırma işlemi sonucunda alaşımlandırılan tabakada mikroyapısal kusur gözlemlenmemiştir (Şekil 8.4-a). Alaşımlandırma sonucu oluşmuş yeni yapılar kaplama tabakası bölgesinde kısmen homojen olarak yayılmıştır. Altlık malzeme ile kompozit bölge arasında oluşan geçiş bölgesi belirgin bir şekilde görülmektedir ve bu bölgede kolonsal ve dendritik yapılar tespit edilmiştir (Şekil 8.4-d). Geçiş bölgesinden ana malzemeye doğru gidildikçe kolonsal yapı yerini düzlemsel yapıya bırakmaktadır. Alaşımlandırılan bölgeye doğru gidildikçe kolonsal yapıda başlayan katılaşma ana malzemenin tersine dendritik olarak devam etmiştir. Kapsama bölgesindeki dendritik yapıların yoğunluğu malzemenin soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 8.4. 0C numunesinin optik mikroskop görüntüleri: a)50x, b)100x, c)1000x, d)Geçiş bölgesi 200x

Titanyum karbür tozu ile alaşımlandırılan bu numunenin mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Seçilmiş olan PTA enerji girdisi çok yüksek sıcaklık sağlayamadığı için kompozit kaplamada bir miktar TiC tozları ergimemiş halde

kalmıştır (Şekil 8.5). Ergimemiş titanyum karbürler, kısmen çözülmüş, sinterlenmiş ve topaklaştırılmış kaplama tozu parçacıklarından meydana gelmiştir. Ayrıca ergimemiş TiC arasında Şekil 8.5’ de gösterildiği gibi dendritik yapılar tespit edilmiştir.

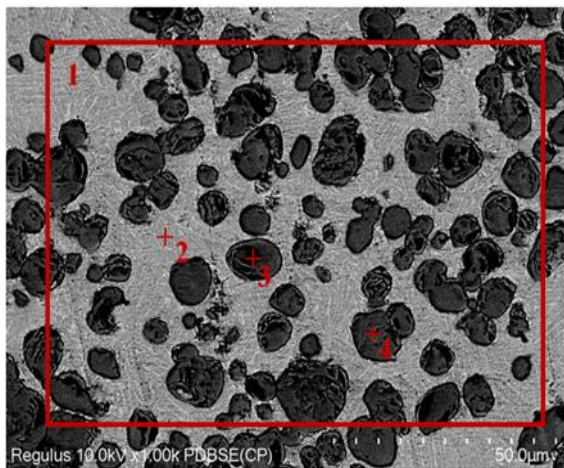


Şekil 8.5. 0C numunesinin SEM mikroyapı görüntüsü (500x).

Plazma transferli ark kaynak yöntemi kullanılarak alaşımlandırılan 0C numunesinin EDS analizleri incelenmiştir. Bu numunenin EDS sonucu şekil 8.6’ da verilmiştir. PTA işlemi sonucu numuneye büyük oranda C geçişi olmuş ve bu oran %4.22 değerine yükselmiştir. Bileşiminde %0.008 C bulunduran Ti6Al4V alaşımındaki bu artış alaşımlandırma işleminde başarılı olduğunu göstermektedir. PTA işlemi sırasında kaynak bölgesini atmosferden korumak için kullanılan yeterli miktarda argon gazı akış oranı sayesinde oksit ve benzeri yapılar kaplama bölgesinde tespit edilmemiştir. Ayrıca Ti6Al4V alaşımı ve TiC tozunun haricinde herhangi bir elementin analiz sonucunda tespit edilmemesi bu işlem yapılırken, literatürde daha önce bağlayıcı toz kullananların aksine (Orhan vd., 2008), bağlayıcı tozların kullanılmamasının bir sonucudur. Alaşımlandırma işlemi sonrasında kaplama bölgesinde görülen küreselimsi yapıların titanyum karbürden

oluştugu görülmüştür (Şekil 8.6). Bu yapılarda vanadyum ve alüminyum elementleri görülmemiştir (Şekil 8.6- Nokta 3 ve Nokta 4).

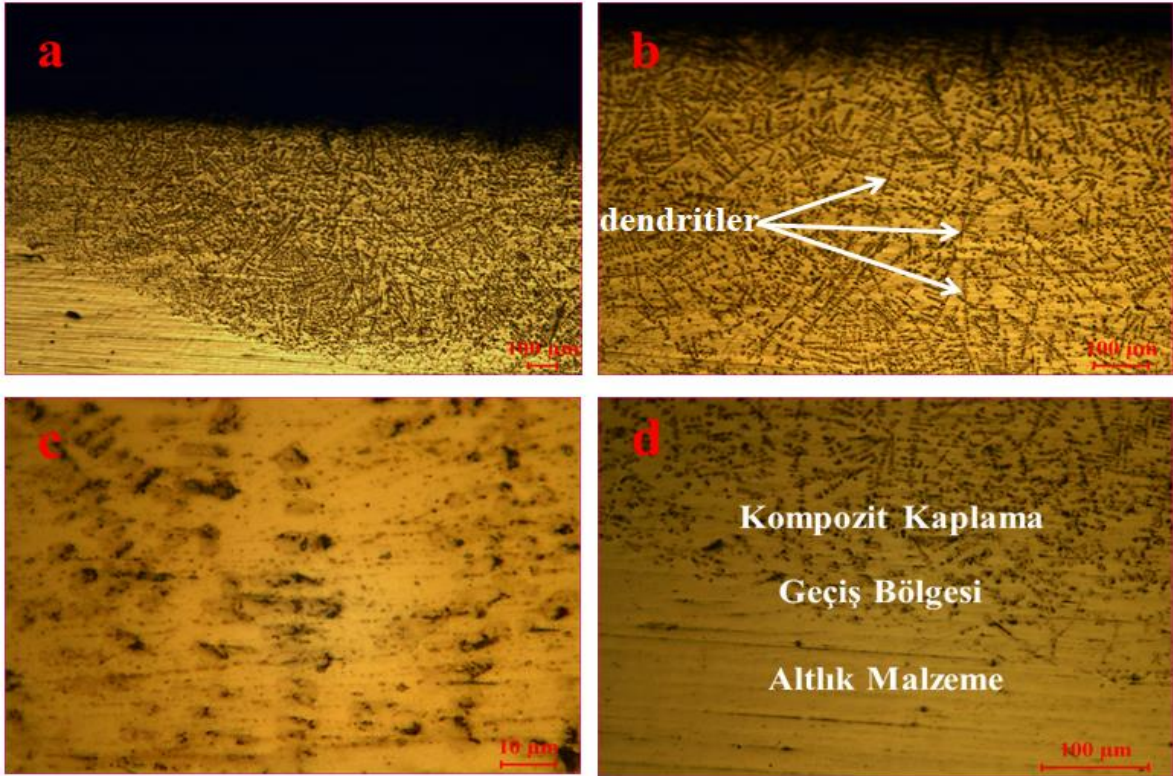
PTA ile kaplama işlemi sırasında altlık malzeme ile yüzeyinde kullanılan toz aynı anda eritilip katılaştırılmıştır. Böylece yeni katmanlar ergimemiş TiC içermektedir. Alaşımlandırma işlemi sonucunda oluşan ergimemiş TiC, fazla miktarda karbon ve titanyum elementi içermektedir. Bu oranlar Şekil 8.6; nokta 3 ve nokta 4 'te verilmiştir ve Ti miktarı yaklaşık %87 ve C miktarının yaklaşık %12 olduğu görülmektedir.



Element	Bileşim (% Ağı.)			
	Alan 1	Nokta 2	Nokta 3	Nokta 4
C	4.22	3.98	12.34	12.26
Al	3.87	6.77	0.00	0.00
Ti	88.14	86.19	87.66	87.74
V	3.76	3.06	0.00	00.00
Toplam 100.00				

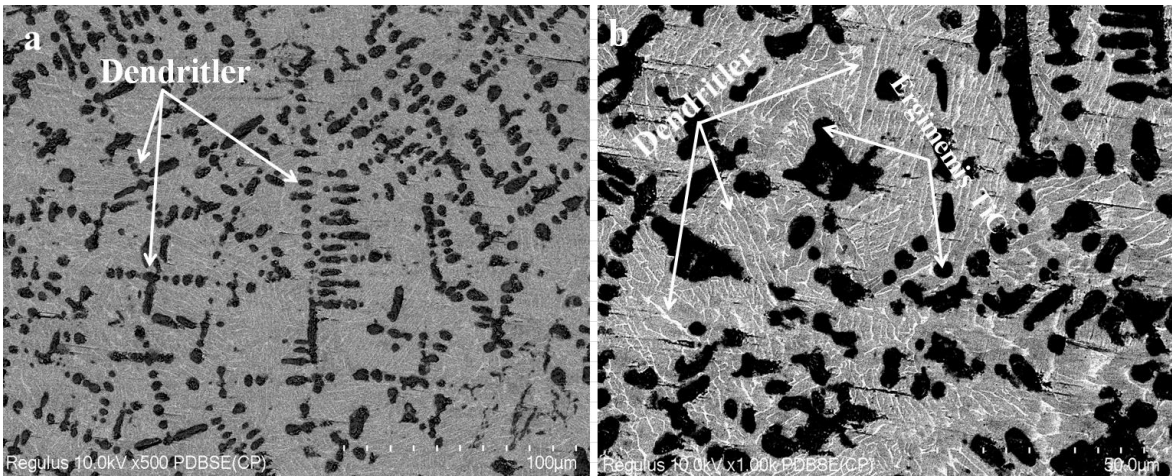
Şekil 8.6. 0C numunesinin EDS analizi.

Bu bölümde titanyum karbür ve grafit tozu kullanılarak alaşımlandırılmış 25C numunesinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 8.7' de verilmiştir. PTA ile alaşımlandırma işlemi sonucunda alaşımlandırılan tabakada mikroyapısal kusur gözlemlenmemiştir (Şekil 8.7). Kaplama işlemi sonucu oluşan yeni yapıların kaplama tabakasında homojen olarak yayıldığı görülmüştür. Şekil 8.7-d' de verilen görüntü incelendiğinde kaplama bölgesi ile ana malzeme arasındaki geçiş bölgesi belirgin halde görülmektedir ve bu bölgede kolonsal ve dendritik yapılar tespit edilmiştir. Kolonsal yapıların yoğun olduğu kaplama bölgesinden ana malzemeye doğru gidildikçe kolonsal yapı yerini düzlemsel yapıya bırakmıştır. Dendritik yapıların yoğunluğu malzemenin soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir. Soğuma hızından dolayı kaplama yapılan tabakada üçüncül dendritik kollar gözlemlenmemiştir.



Şekil 8.7. 25C numunesinin optik mikroskop görüntüsü: a)50x, b)100x, c)1000x, d)Geçiş bölgesi 200x

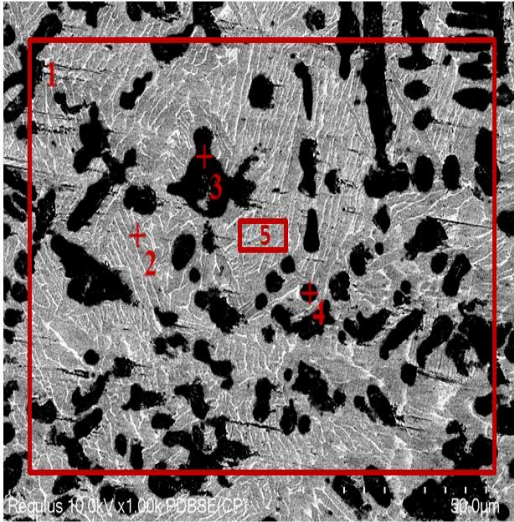
Titanyum karbür tozu ve grafit ile alaşımlandırılan bu numunenin mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Seçilmiş olan PTA enerji girdisi ile sağlanan yüksek sıcaklıkta TiC ve C tozları büyük oranda erimiştir ve az miktarda ergimemiş TiC tespit edilmiştir (Şekil 8.8-b). Ayrıca ergimemiş TiC haricinde yoğun olarak dendritik yapılar gözlemlenmiştir (Şekil 8.8-a,b).



Şekil 8.8. 25C numunesinin SEM mikroyapı görüntüsü; a) 500x, b)1000x

Plazma transferli ark kaynak yöntemi kullanılarak alaşımlandırılan 25C numunesinin EDS analizleri incelenmiştir. Bu numunenin EDS sonucu Şekil 8.9' da verilmiştir. PTA işlemi sonucunda numuneye büyük oranda C geçişi olmuş ve bu oran % 2.38 değerine yükselmiştir. Bileşiminde %0.008 C bulunduran Ti6Al4V alaşımındaki bu artış alaşımlandırma işleminde başarılı olduğunu göstermektedir. PTA işlemi sırasında kaynak bölgesini atmosferden korumak için kullanılan yeterli miktarda argon gazı akış oranı sayesinde oksit ve benzeri yapılar kaplama bölgesinde tespit edilmemiştir. Ayrıca Ti6Al4V alaşımı ve TiC tozunun haricinde herhangi bir elementin analiz sonucunda tespit edilmemesi bu işlem yapılırken bağlayıcı tozların kullanılmamasının bir sonucudur. Alaşımlandırma işlemi sonrasında kaplama bölgesinde görülen küreselimsi yapıların titanyum karbürden oluştuğu görülmüştür (Şekil 8.9; Nokta 3-4). Bu yapılarda vanadyum ve alüminyum elementleri görülmemiştir. Dendrit bölgeleri incelendiğinde (Şekil 8.9; Nokta 2- Alan 5) diğer noktaların aksine V ve Al tespit edilmiştir.

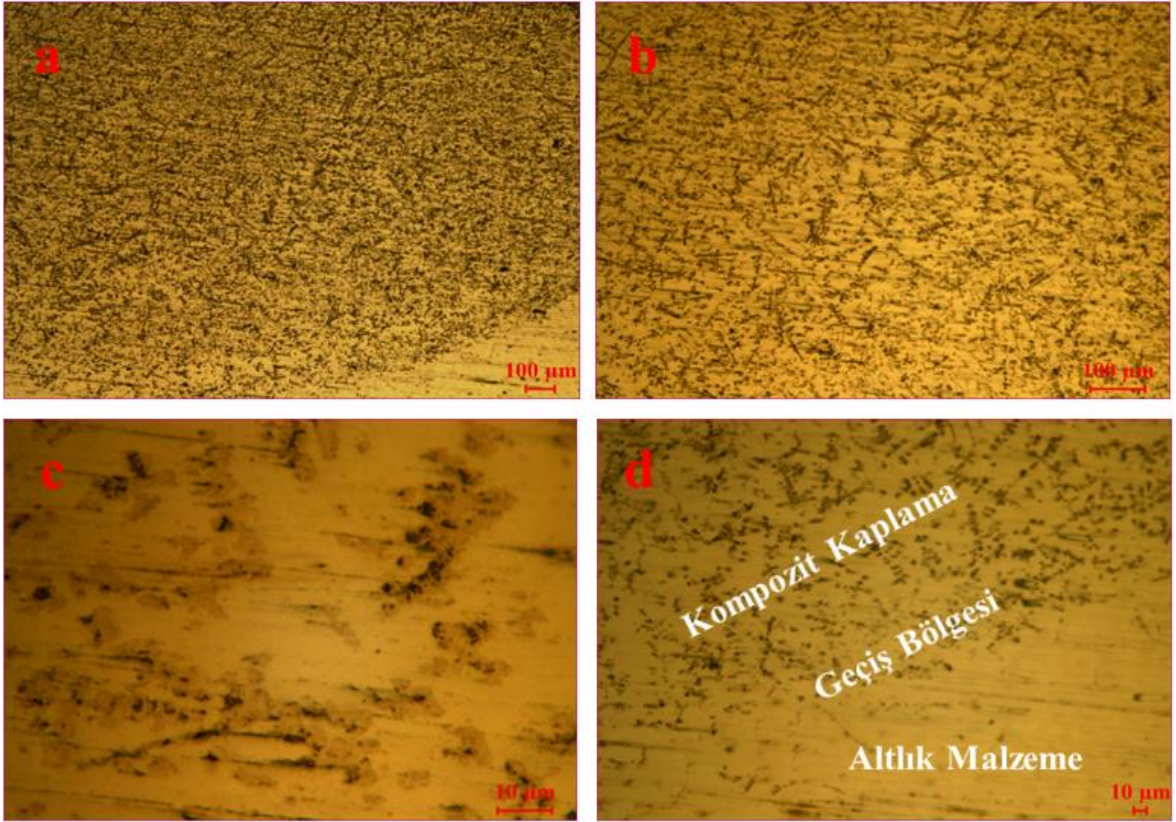
PTA ile kaplama işlemi sırasında altlık malzeme ile yüzeyinde kullanılan toz aynı anda eritilip katılaştırılmıştır. Böylece yeni katmanlar ergimemiş TiC içermektedir. Alaşımlandırma işlemi sonucunda oluşan ergimemiş TiC, fazla miktarda karbon ve titanyum elementi içermektedir. Bu oranlar Şekil 8.9; nokta 3 ve nokta 4 'te verilmiştir ve Ti miktarı yaklaşık %90 ve C miktarının yaklaşık %10 olduğu görülmektedir.



Element	Bileşim (% Ağ.)				
	Alan 1	Nokta 2	Nokta 3	Nokta 4	Alan 5
C	2.38	2.49	9.86	10.56	0.44
Al	5.42	7.61	0.00	0.00	7.09
Ti	88.45	87.03	90.14	89.44	88.50
V	3.75	2.87	0.00	00.00	3.98
Toplam 100.00					

Şekil 8.9. 25C numunesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.

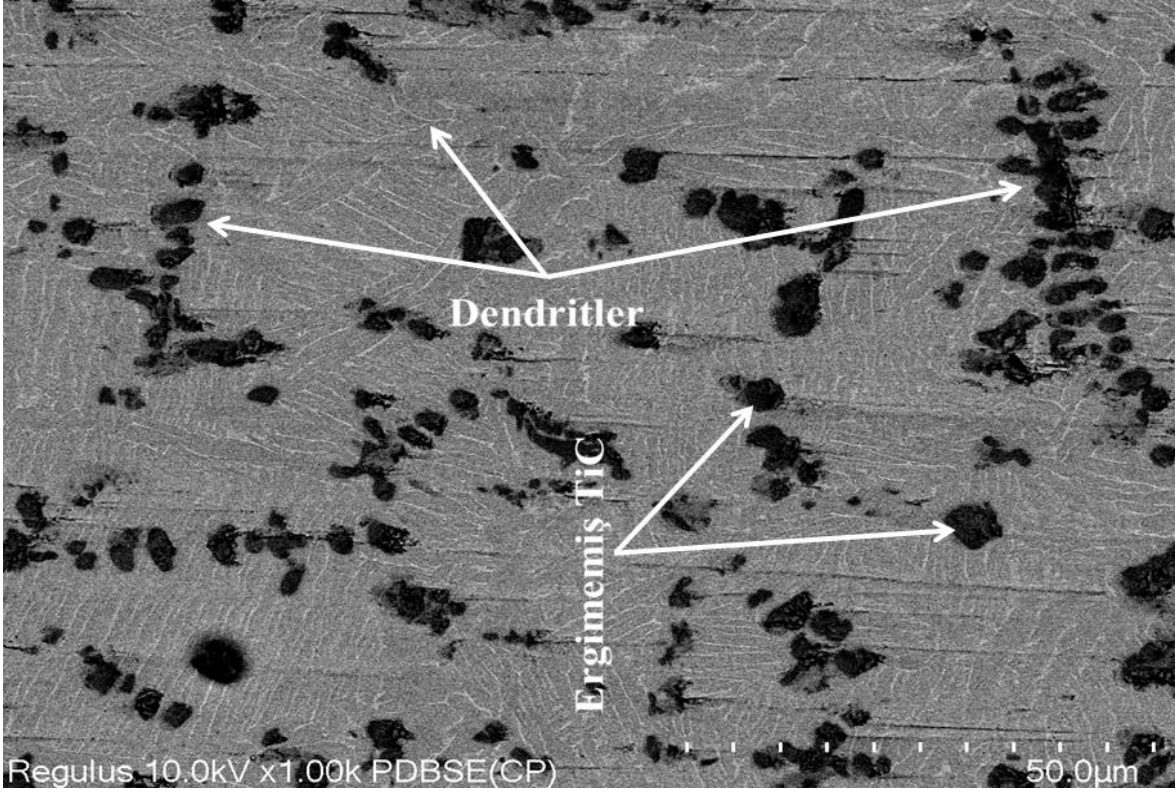
Bu bölümde titanyum karbür ve grafit tozu kullanılarak alaşımlandırılmış 50C numunesinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 8.10' de verilmiştir. PTA ile alaşımlandırma işlemi sonucunda alaşımlandırılan tabakada mikroyapısal kusur gözlemlenmemiştir (Şekil 8.10). Alaşımlandırma sonucu oluşmuş yeni yapılar kaplama tabakası bölgesinde homojen olarak yayılmıştır. Altlık malzeme ile kompozit bölge arasında oluşan geçiş bölgesi ince bir çizgi halinde görülmektedir ve bu bölgede kolonsal ve dendritik yapılar tespit edilmiştir (Şekil 8.10-d). Geçiş bölgesinden ana malzemeye doğru gidildikçe kolonsal yapı yerini düzlemsel yapıya bırakmaktadır. Alaşımlandırılan bölgeye doğru gidildikçe kolonsal yapıda başlayan katılaşma ana malzemenin tersine dendritik olarak devam etmiştir. Dendritik yapıların yoğunluğu malzemenin soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 8.10. 50C numunesinin optik mikroskop görüntüsü: a)50x, b)100x, c)1000x, d)Geçiş bölgesi 200x

Titanyum karbür tozu ve grafit ile alaşımlandırılan bu numunenin mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Seçilmiş olan PTA enerji girdisi ile sağlanan yüksek sıcaklıkta TiC ve C tozları büyük oranda erimiştir ve az miktarda

ergimemiş TiC tespit edilmiştir (Şekil 8.11). Ergimemiş titanyum karbürler, kısmen çözülmüş, sinterlenmiş ve topaklaştırılmış kaplama tozu parçacıklarından meydana gelmiştir. Ayrıca ergimemiş TiC haricinde yoğun olarak dendritik yapılar gözlemlenmiştir (Şekil 8.11).

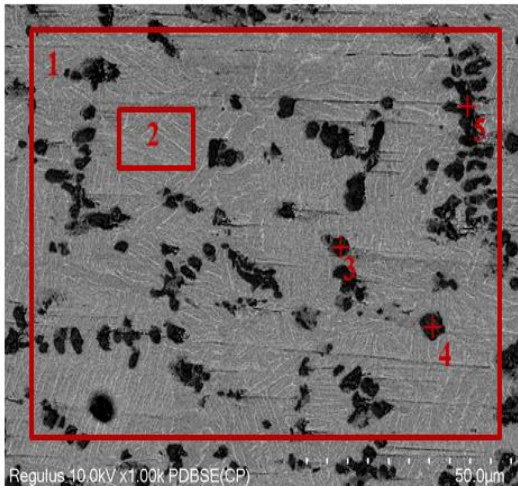


Şekil 8.11. 50C numunesinin SEM mikroyapı görüntüsü (1000x) .

Plazma transferli ark kaynak yöntemi kullanılarak alaşımlandırılan 50C numunesinin EDS analizleri incelenmiştir. Bu numunenin EDS sonucu şekil 8.12' de verilmiştir. PTA işlemi sonucunda numuneye büyük oranda C geçişi olmuş ve bu oran %1.17 değerine yükselmiştir. Bileşiminde %0.008 C bulunduran Ti6Al4V alaşımındaki bu artış alaşımlandırma işleminde başarılı olduğunu göstermektedir. PTA işlemi sırasında kaynak bölgesini atmosferden korumak için kullanılan yeterli miktarda argon gazı akış oranı sayesinde oksit ve benzeri yapılar kaplama bölgesinde tespit edilmemiştir. Ayrıca Ti6Al4V alaşımı ve TiC tozunun haricinde herhangi bir elementin analiz sonucunda tespit edilmemesi bu işlem yapılırken bağlayıcı tozların kullanılmamasının bir sonucudur. Alaşımlandırma işlemi sonrasında kaplama bölgesinde görülen küreselimsi yapıların titanyum karbürden oluştuğu görülmüştür (Şekil 8.12; Nokta 3-4). Bu yapılarda vanadyum ve alüminyum elementleri görülmemiştir. Dendrit bölgeleri incelendiğinde (Şekil 8.12;

Alan 2) diğer noktaların aksine V ve Al tespit edilmiştir. Dendrit kollarında Ti, C, Al ve V elementleri tespit edilmiştir

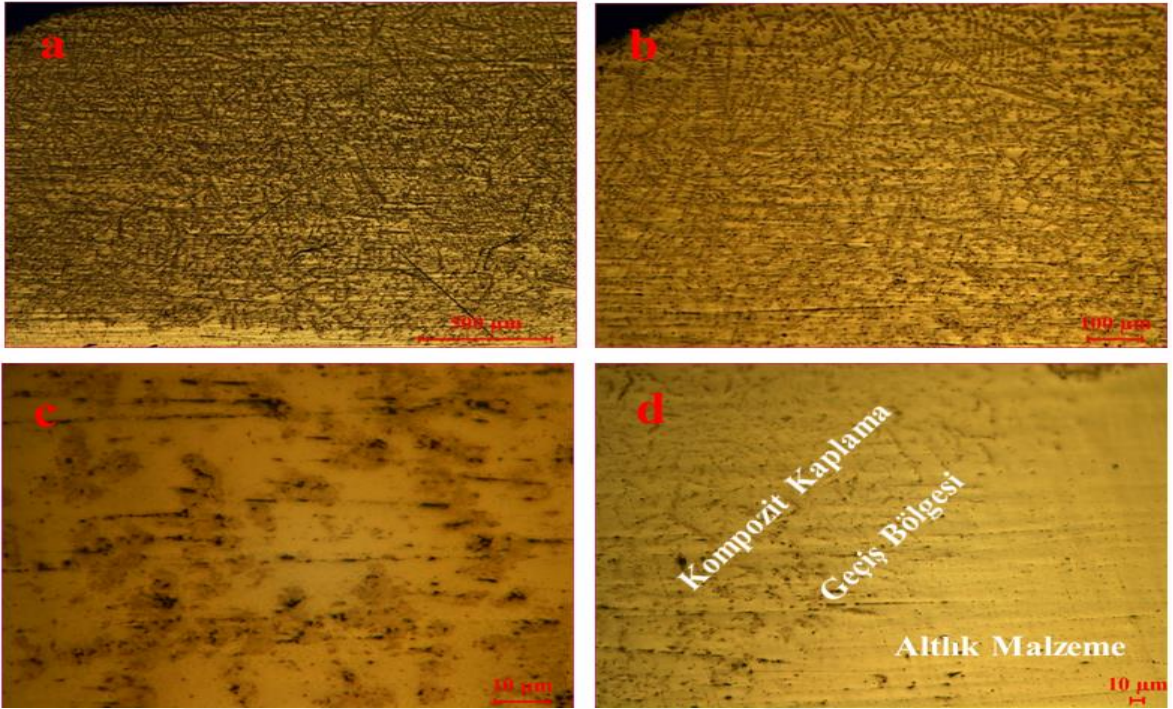
PTA ile kaplama işlemi sırasında altlık malzeme ile yüzeyinde kullanılan toz aynı anda eritilip katılaştırılmıştır. Böylece yeni katmanlar ergimemiş TiC içermektedir. Alaşımlandırma işlemi sonucunda oluşan ergimemiş TiC, fazla miktarda karbon ve titanyum elementi içermektedir. Bu oranlar Şekil 8.12; nokta 3ve nokta 4 'te verilmiştir ve Ti miktarı yaklaşık %85 ve C miktarının yaklaşık %14 olduğu görülmektedir.



Element	Bileşim (% Ağ.)				
	Alan 1	Alan 2	Nokta 3	Nokta 4	Nokta 5
C	1.17	0.44	14.66	15.49	15.11
Al	6.01	6.26	0.00	0.00	1.03
Ti	89.12	88.90	85.34	84.51	83.39
V	3.70	4.39	0.00	00.00	0.47
Toplam 100.00					

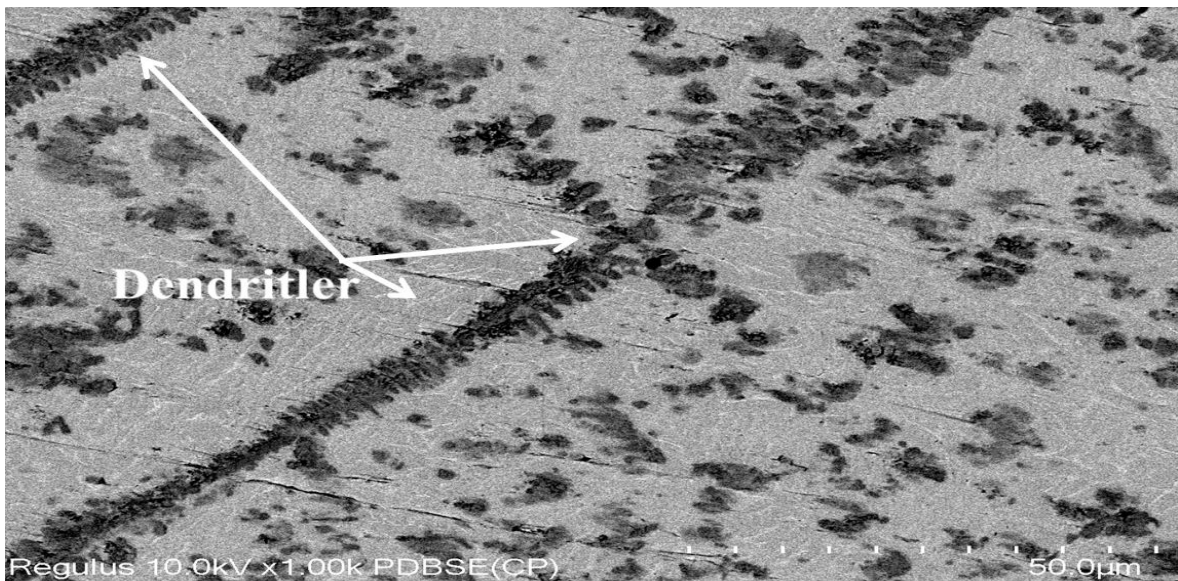
Şekil 8.12. 50C numunesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.

Bu bölümde titanyum karbür ve grafit tozu kullanılarak alaşımlandırılmış 75C numunesinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 8.13' de verilmiştir. PTA ile alaşımlandırma işlemi sonucunda alaşımlandırılan tabakada mikroyapısal kusur gözlenmemiştir (Şekil 8.13). Alaşımlandırma sonucu oluşmuş yeni yapılar kaplama tabakası bölgesinde homojen olarak yayılmıştır. Altlık malzeme ile kompozit bölge arasında oluşan geçiş bölgesi ince bir çizgi halinde görülmektedir ve bu bölgede kolonsal ve dendritik yapılar tespit edilmiştir (Şekil 8.13-d). Geçiş bölgesinden ana malzemeye doğru gidildikçe kolonsal yapı yerini düzlemsel yapıya bırakmaktadır. Alaşımlandırılan bölgeye doğru gidildikçe kolonsal yapıda başlayan katılma ana malzemenin tersine dendritik olarak devam etmiştir. Dendritik yapıların yoğunluğu malzemenin soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 8.13. 75C numunenin optik mikroskop görüntüsü: a)50x, b)100x, c)1000x, d)Geçiş bölgesi 200x

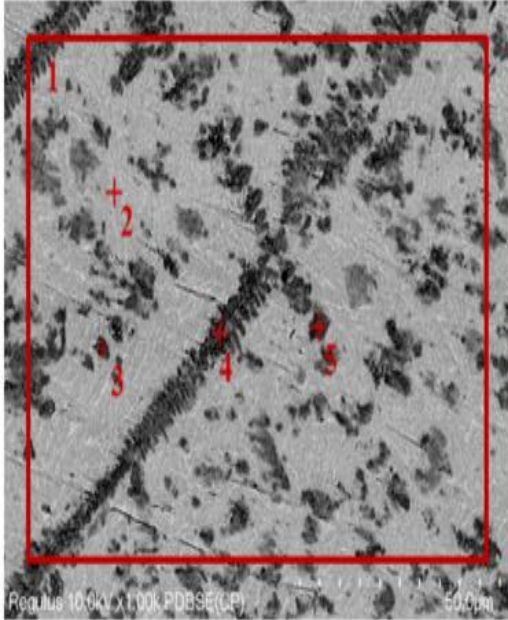
Titanyum karbür tozu ve grafit ile alaşımlandırılan bu numunenin mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Seçilmiş olan PTA enerji girdisi ile sağlanan yüksek sıcaklıkta TiC ve C tozları neredeyse tamamen ergimiştir. Ayrıca yoğun olarak dendritik yapılar gözlemlenmiştir (Şekil 8.14).



Şekil 8.14. 75C numunesinin SEM mikroyapı görüntüsü (1000x).

Plazma transferli ark kaynak yöntemi kullanılarak alaşımlandırılan 75C numunesinin EDS analizleri incelenmiştir. Bu numunenin EDS sonucu şekil 8.15' de verilmiştir. PTA işlemi sonucunda numuneye büyük oranda C geçişi olmuş ve bu oran % 1.74 değerine yükselmiştir. Bileşiminde %0.008 C bulunduran Ti6Al4V alaşımındaki bu artış alaşımlandırma işleminde başarılı olduğunu göstermektedir. PTA işlemi sırasında kaynak bölgesini atmosferden korumak için kullanılan yeterli miktarda argon gazı akış oranı sayesinde oksit ve benzeri yapılar kaplama bölgesinde tespit edilmemiştir. Ayrıca Ti6Al4V alaşımı ve TiC tozunun haricinde herhangi bir elementin analiz sonucunda tespit edilmemesi bu işlem yapılırken bağlayıcı tozların kullanılmamasının bir sonucudur. Ergimemiş TiC tespit edilmemiştir. Dendrit kollarında Ti, C, Al ve V elementleri tespit edilmiştir (Şekil 8.15; Nokta 2-3-4-5).

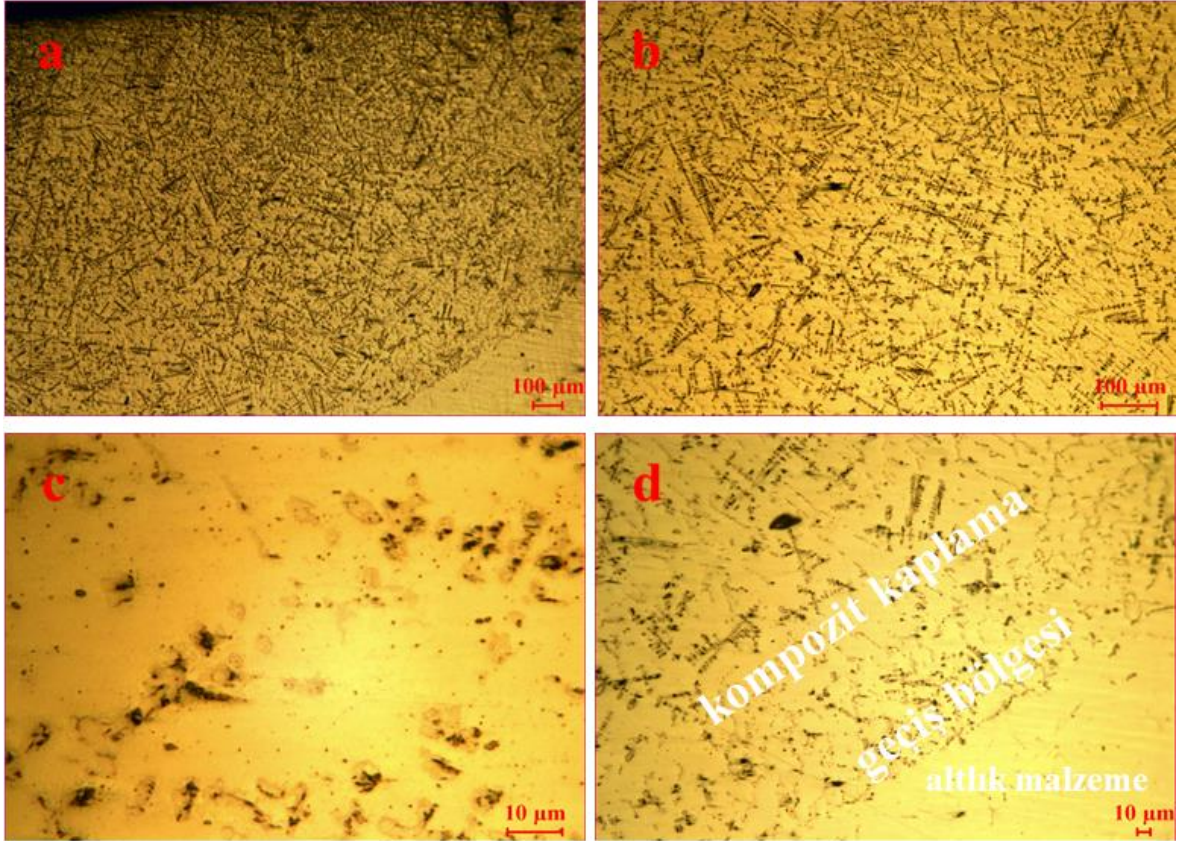
Alaşımlandırma işlemi sonrasında kaplama bölgesinde görülen birincil ve ikincil dendritler incelendiğinde titanyum oranının %87 ile %89 arasında değiştiği görülmüştür.(Şekil 8.15; Nokta 3-4-5). Dendritler arası bölge incelendiğinde (Şekil 8.15; Nokta 2) diğer noktaların aksine V ve Al oranında artış görülürken C oranının azaldığı gözlemlenmiştir.



Element	Bileşim (% Ağ.)				
	Alan 1	Nokta 2	Nokta 3	Nokta 4	Nokta 5
C	1.74	3.18	10.09	10.05	9.84
Al	5.73	6.75	0.92	0.83	0.85
Ti	89.05	87.16	87.66	88.12	89.23
V	3.48	2.91	1.33	0.99	0.09
Toplam 100.00					

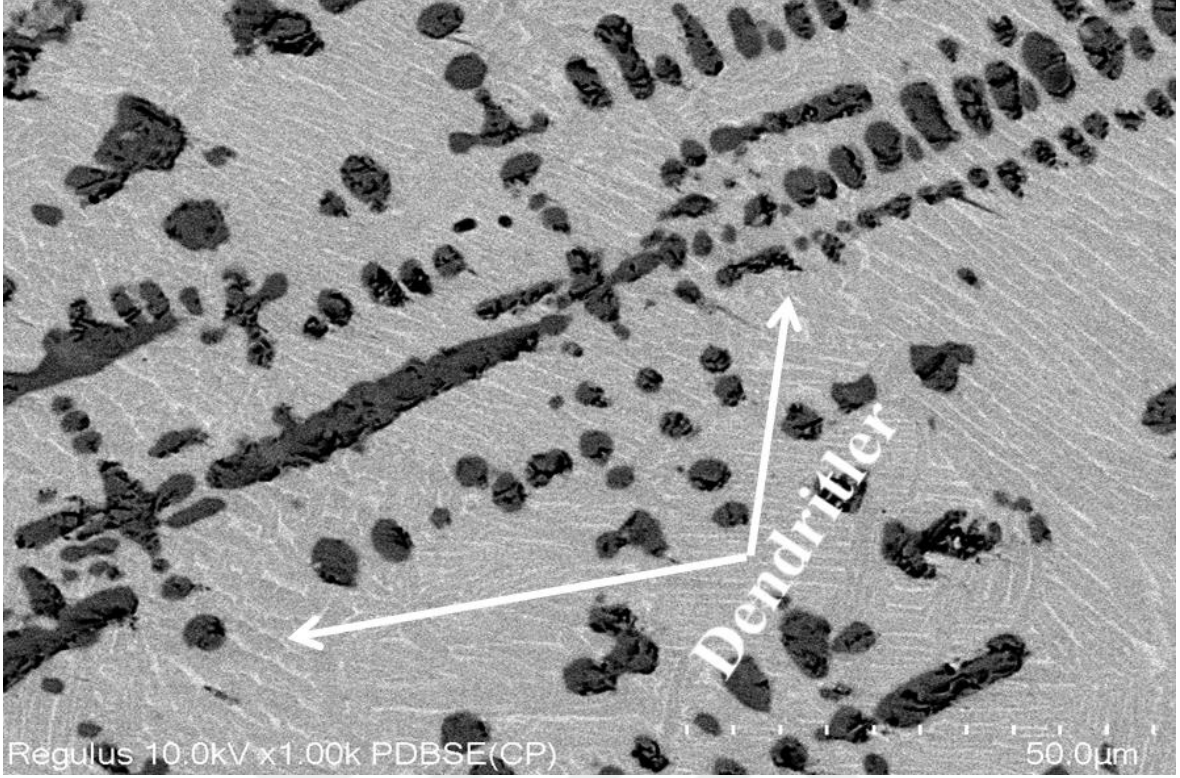
Şekil 8.15. 75C numunesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.

Bu bölümde grafit tozu kullanılarak alaşımlandırılmış 100C numunesinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 8.16' de verilmiştir. PTA ile alaşımlandırma işlemi sonucunda alaşımlandırılan tabakada mikroyapısal kusur gözlenmemiştir (Şekil 8.16). Alaşımlandırma sonucu oluşmuş yeni yapılar kaplama tabakası bölgesinde homojen olarak yayılmıştır. Altlık malzeme ile kompozit bölge arasında oluşan geçiş bölgesi ince bir çizgi halinde görülmektedir ve bu bölgede kolonsal ve dendritik yapılar tespit edilmiştir (Şekil 8.16-d). Geçiş bölgesinden ana malzemeye doğru gidildikçe kolonsal yapı yerini düzlemsel yapıya bırakmaktadır. Alaşımlandırılan bölgeye doğru gidildikçe kolonsal yapıda başlayan katılaşma ana malzemenin tersine dendritik olarak devam etmiştir. Dendritik yapıların yoğunluğu malzemenin soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir.



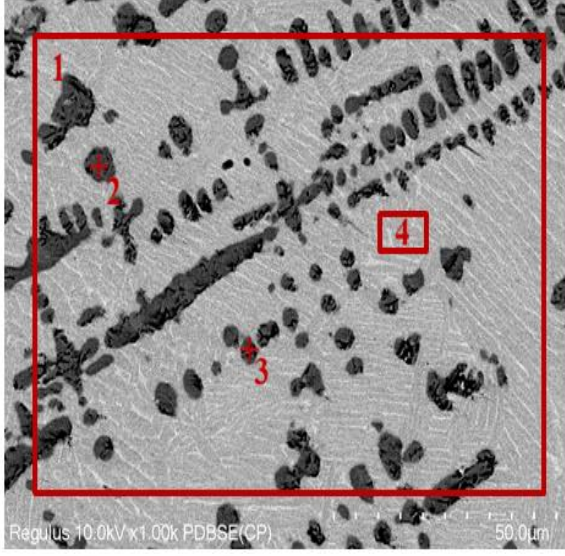
Şekil 8.16. 100C numunesinin optik mikroskop görüntüsü: a)50x, b)100x, c)1000x, d)Geçiş bölgesi 200x

Grafit tozu ile alaşımlandırılan bu numunenin mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Seçilmiş olan PTA enerji girdisi ile sağlanan yüksek sıcaklıkta C tozları tamamen ergimiştir. Ayrıca yoğun olarak dendritik yapılar gözlemlenmiştir (Şekil 8.17).



Şekil 8.17. 100C numunesinin SEM mikroyapı görüntüsü (1000x).

Plazma transferli ark kaynak yöntemi kullanılarak alaşımlandırılan 100C numunesinin EDS analizleri incelenmiştir. Bu numunenin EDS sonucu şekil 8.16' da verilmiştir. PTA işlemi sonucunda numuneye büyük oranda C geçişi olmuş ve bu oran % 1.66 değerine yükselmiştir. Bileşiminde %0.008 C bulunduran Ti6Al4V alaşımındaki bu artış alaşımlandırma işleminde başarılı olduğunu göstermektedir. PTA işlemi sırasında kaynak bölgesini atmosferden korumak için kullanılan yeterli miktarda argon gazı akış oranı sayesinde oksit ve benzeri yapılar kaplama bölgesinde tespit edilmemiştir. Ayrıca Ti6Al4V alaşımı ve C tozunun haricinde herhangi bir elementin analiz sonucunda tespit edilmemesi bu işlem yapılırken bağlayıcı tozların kullanılmamasının bir sonucudur. Dendrit kollarında Ti, C, Al ve V elementleri tespit edilmiştir (Şekil 8.18; Nokta 2-3-4). Alaşımlandırma işlemi sonrasında kaplama bölgesinde görülen birincil ve ikincil dendritler incelendiğinde titanyum oranının %89 oranında olduğu görülmüştür.(Şekil 8.18; Nokta 2-3). Dendritler arası bölge incelendiğinde (Şekil 8.18; Alan 4) diğer noktaların aksine V ve Al oranında artış görülürken C oranının azaldığı gözlemlenmiştir.



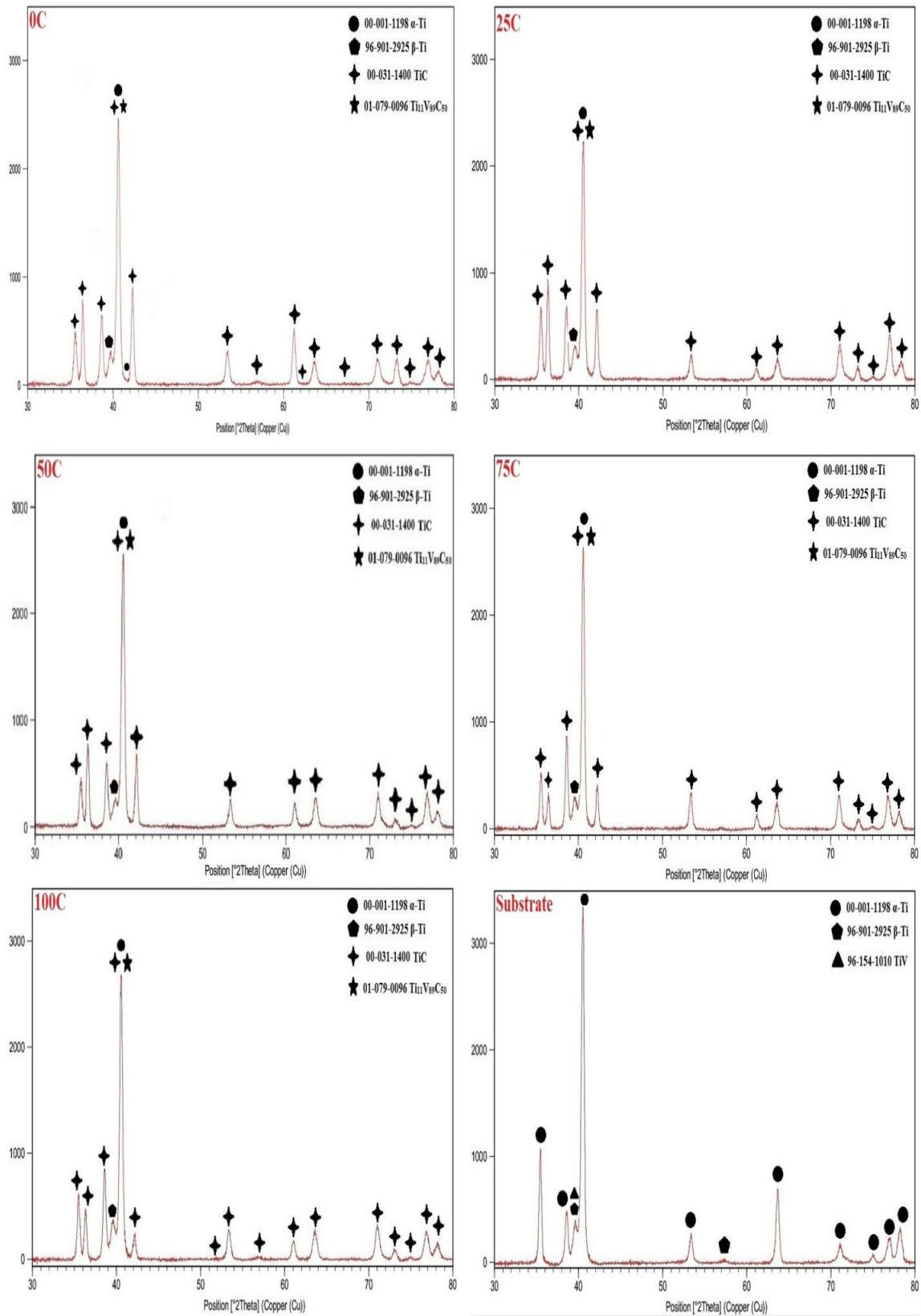
Element	Bileşim (% Ağ.)			
	Alan 1	Nokta 2	Nokta 3	Alan 4
C	1.66	7.85	8.18	0.34
Al	5.47	0.69	2.00	6.68
Ti	88.74	89.91	89.34	88.90
V	4.13	1.55	0.39	4.08
Toplam 100.00				

Şekil 8.18. 100C numunesinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.

SEM ve EDS analiz sonuçları tüm numuneler için karşılaştırıldığında 0C numunesinde ergimemiş TiC oranı fazla ve dendritik yapı miktarı çok az iken 100C numunesinde oldukça büyük ve çok fazla miktarda dendritik yapı tespit edilmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde işlemsiz ve kaplama işlemi yapılmış numunelerin XRD analiz sonuçları toplu bir şekilde yorumlanmış ve değerlendirilmiştir (Şekil 8.19). Kaplama işlemi yapılan numunelerde, XRD analizi sonucunda SEM ve EDS analizleri sonucunda da görüldüğü gibi TiC karbürlü bir yapı belirlenmiştir. TiC'lerin etrafına altlık malzemeden difüze olan vanadyum TiV-C üçlü sistemini oluşturmuştur. Bu analiz sonucunda temel fazın α -Ti fazından ve titanyum esaslı karbürlerden oluştuğu görülmüştür. XRD paternlerinin detaylı incelenmesiyle nadir olarak α -Ti ve β -Ti pik noktaları görülürken TiC pik şiddetleri daha sık görülmüştür. En şiddetli ve sık pik noktası 100C numunesinde tespit edilmiştir. En düşük TiC pik noktası ise 25C numunesinde elde edilmiştir (Şekil 8.19).

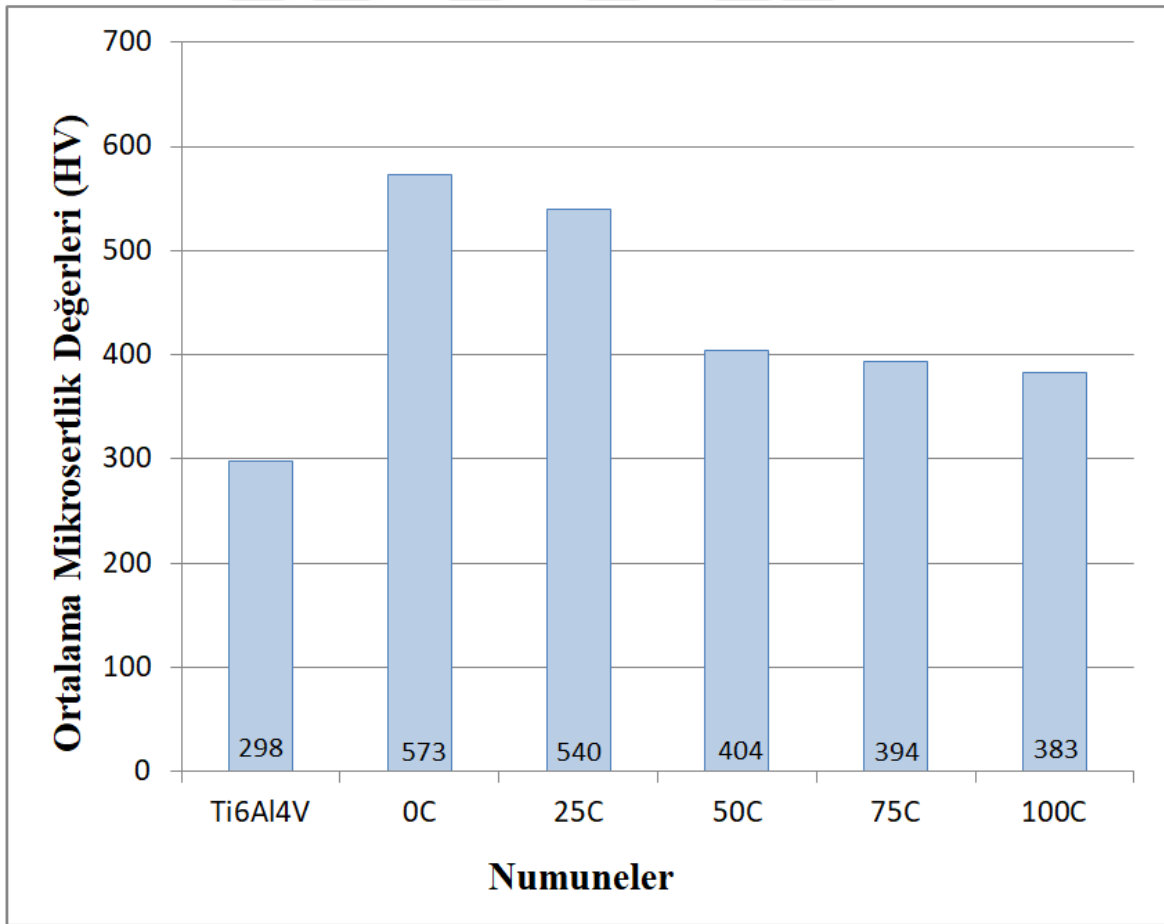
Kaplanmış diğer numunelerden farklı olarak 0C numunesinde fazlardan α -Ti fazı pik noktası görülmüştür. XRD sonucu belirlenen fazlar Ti11V89C50 (PDF 01-079-0096), α -Ti (PDF-00-001-1198), β -Ti (PDF 96-901-2925), TiC (PDF 00-031-1400) fazlarıdır. İşlemsiz numunede ise; α -Ti, β -Ti ve TiV fazları tespit edilmiştir.



Şekil 8.19. Tüm numunelerin XRD analiz sonuçları.

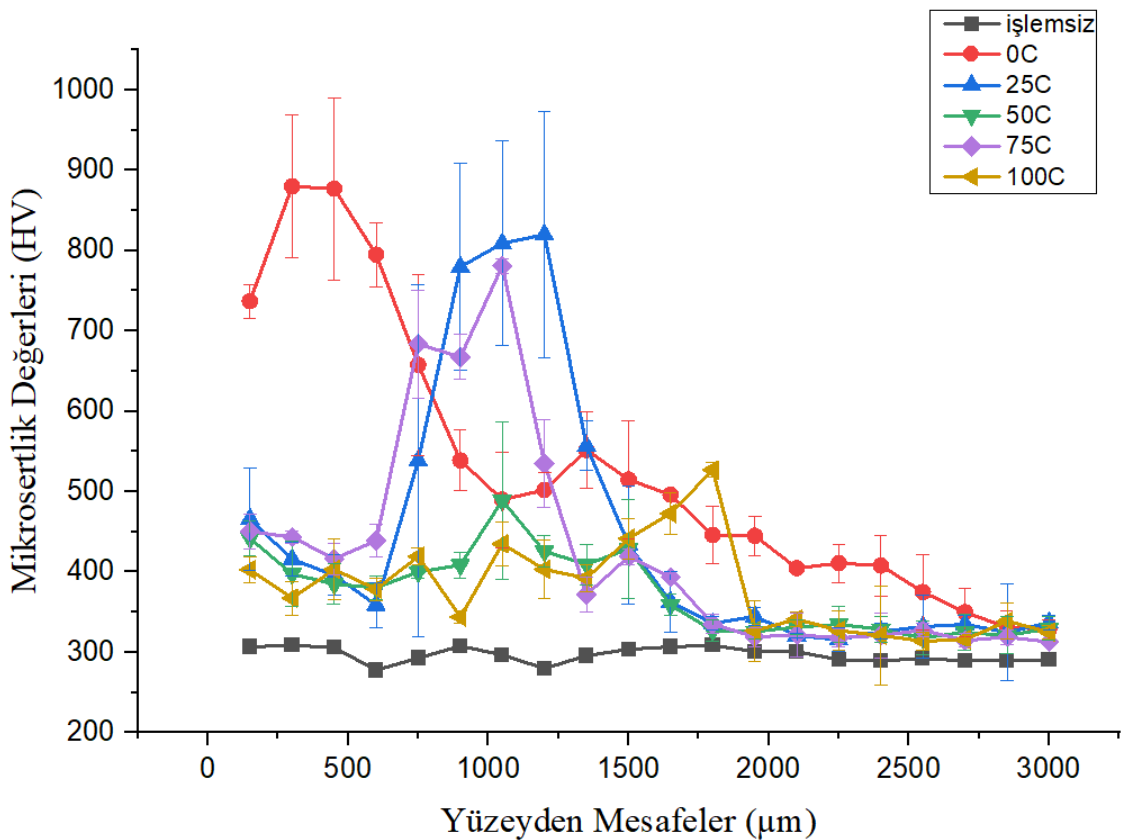
8.2. Mikrosertlik Sonuçları

PTA yöntemi ile alaşımlandırma işlemi yapılan ve alaşımlandırma işlemi yapılmamış olan numunelerin ortalama sertlik değerleri Şekil 8.20' de verilmiştir. İşlemsiz, 0C, 25C, 50C, 75C ve 100C numunelerinin ortalama sertlik değerleri sırasıyla 298 ± 11 HV_{0.1}, 573 ± 159 HV_{0.1}, 540 ± 172 HV_{0.1}, 404 ± 39 HV_{0.1}, 394 ± 46 HV_{0.1} ve 383 ± 32 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür. PTA ile yüzeyi alaşımlandırılan tüm numunelerin ortalama sertlik değeri Ti6Al4V' den yüksek çıkmıştır. Ergimemiş titanyum karbürlerin en fazla olduğu 0C numunesinde en yüksek ortalama sertlik değeri elde edilmiştir ve bu değer ana malzeme sertliğinden yaklaşık 2 kat daha fazladır. PTA ile yüzeyi alaşımlandırılan numuneler arasında en düşük ortalama sertlik değeri ise 100C numunesinde elde edilmiştir ve bu değer ana malzeme sertliğinden yaklaşık 1.2 kat daha fazladır.



Şekil 8.20. Numunelerin ortalama mikrosertlik değerleri.

Kaplama işlemi yapılmış ve işlemsiz numunelere ait mikrosertlik değerleri ve ölçülen mesafeler Şekil 8.21’ de gösterilmiştir. Yüzey alaşımlandırma işleminden sonra mikroyapıda oluşan farklı Ti ve C oranlarına sahip karbürlerin etkisi ile numunelerin kaplama yapılan bölgelerinde ana malzemeye oranla daha yüksek sertlik değerleri görülmüştür. Bazı numunelerde kaplama bölgelerindeki TiC gibi sert fazların çok fazla bulunmasından dolayı sertlik önemli ölçüde artmıştır. Ayrıca ısıdan etkilenen geçiş bölgelerinde de sertlik değerlerinin altlık malzemeye göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Sertlik değerleri geçiş bölgelerinde azalma göstermiştir. Ölçüm sırasında sertlik değerlerinde meydana gelen dalgalanmalar ve grafikte görüldüğü gibi ani yükselmeler kaplama bölgesinde oluşan karbürlerin (TiC) etkisi ile olmaktadır (Şekil 8.21). Ayrıca dendritik katılaşma farklılıklarından ve bu dendritler arası bölgenin daha yumuşak olmasından dolayı sertlik değerlerinde farklılıklar oluşmuştur. 0C numunesi sertliğini, kaplanmış yüzeyden ana malzemeye doğru yüzeyden 2750 μm ’ lik bir mesafeye kadar muhafaza etmiştir. Diğer kaplanmış numunelerde ise bu değer yaklaşık 2000 μm olarak tespit edilmiştir

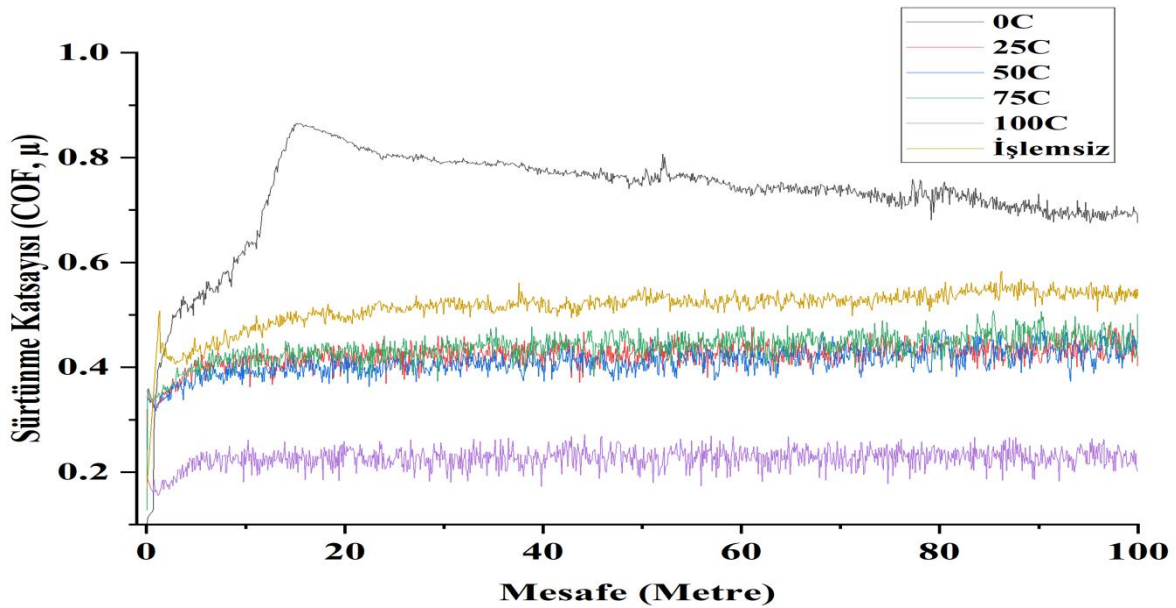


Şekil 8.21. İşlemsiz ve kaplamalı numunelerin mikrosertlik dağılımı.

8.3. Aşınma Deneyi Sonuçları

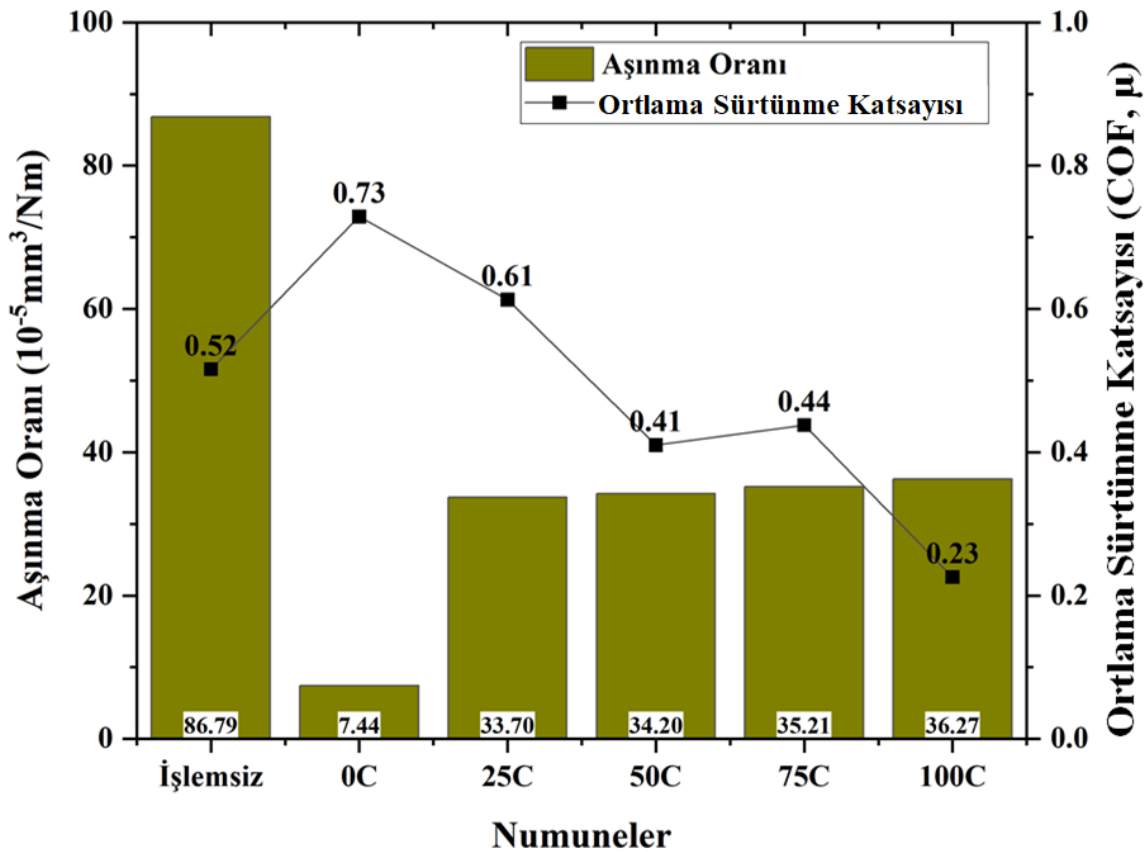
PTA yöntemi ile farklı oranlarda TiC ve C tozları karışımı kullanılarak yüzey kaplama işlemi yapılan Ti6Al4V alaşımının sürtünme aşınma davranışları bu kısımda incelenmiştir. WC aşındırıcı küre kullanılarak kuru şartlarda yapılan aşınma deneylerinde anlık olarak sürtünme katsayısı kaydedilmiştir. Bu deney sonrası kaplama bölgelerinde ve işlemsiz numune yüzeyinde meydana gelen kanalların yüzey pürüzlülüğü ölçülerek aşınma oranları hesaplanmıştır. SEM ve EDS analizleri ile aşınma kanallarındaki aşınma mekanizmaları tespit edilmiştir. Her bir kaplama için aşınma testleri sonuçları incelenip açıklanmıştır. Tüm kompozit kaplamalı numuneler işlemsiz numune ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 8.22’ de numunelere ait sürtünme katsayısı-mesafe grafiği verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde grafit tozu ile kaplanmış olan 100C numunesinde en düşük sürtünme katsayısı elde edilirken, TiC tozu ile kaplanmış 0C numunesinde en yüksek sürtünme katsayısı tespit edilmiştir. Aşağıda verilen grafik incelendiğinde; 25C, 50C ve 75C numunelerinin referans numuneye göre sürtünme katsayısı daha az iken 0C numunesinin sürtünme katsayısının daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca 0C numunesinde sürtünme katsayısı 20 metreden sonra stabil duruma geçmiştir. 0C numunesinde görülen pik noktası adhezyon aşınmasının varlığı sonucu oluşmuştur.



Şekil 8.22. İşlemsiz ve kaplamalı numunelerin sürtünme katsayısı-mesafe diyagramı.

Şekil 8.23' de verilen grafikte tüm numunelere ait aşınma oranı ve ortalama sürtünme katsayıları görülmektedir. Grafikte görüldüğü gibi 100C numunesinde grafit oranı arttığı için grafitin yağlayıcı etkisinden dolayı sürtünme katsayısı azalmaktadır. 0C numunesinde TiC oranının fazla olmasından dolayı aşınma performansında çok yüksek bir iyileşme elde edilmiştir. Aşınma oranı ve sürtünme katsayısında en efektif sonuçlar 50C numunesinde ortaya çıkmıştır. Belirli bir düzeyde sürtünme ve aşınma performansı istendiği zaman 50C numunesi efektif açıdan etkin bir numune olarak seçilebilir olması öngörülmüştür. 50C ve 75C numunelerinde sürtünme katsayısında ve aşınma performansında çok büyük bir etki görülmemiştir. En yüksek aşınma oranı işlemsiz numunede meydana gelmiştir. Bu sonuç kaplama işleminin başarılı olduğunu ve malzeme yüzeyini daha dirençli hale getirdiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 8.23. İşlemsiz ve kaplamalı numunelerin aşınma oranı - ortalama sürtünme katsayısı grafiği.

Şekil 8.24' de işlemsiz, 0C, 25C, 50C, 75C ve 100C numunelerine ait WC küre ile kuru sürtünme sonucu oluşan aşınma kanalları ve bu kanalların SEM ve EDS analiz

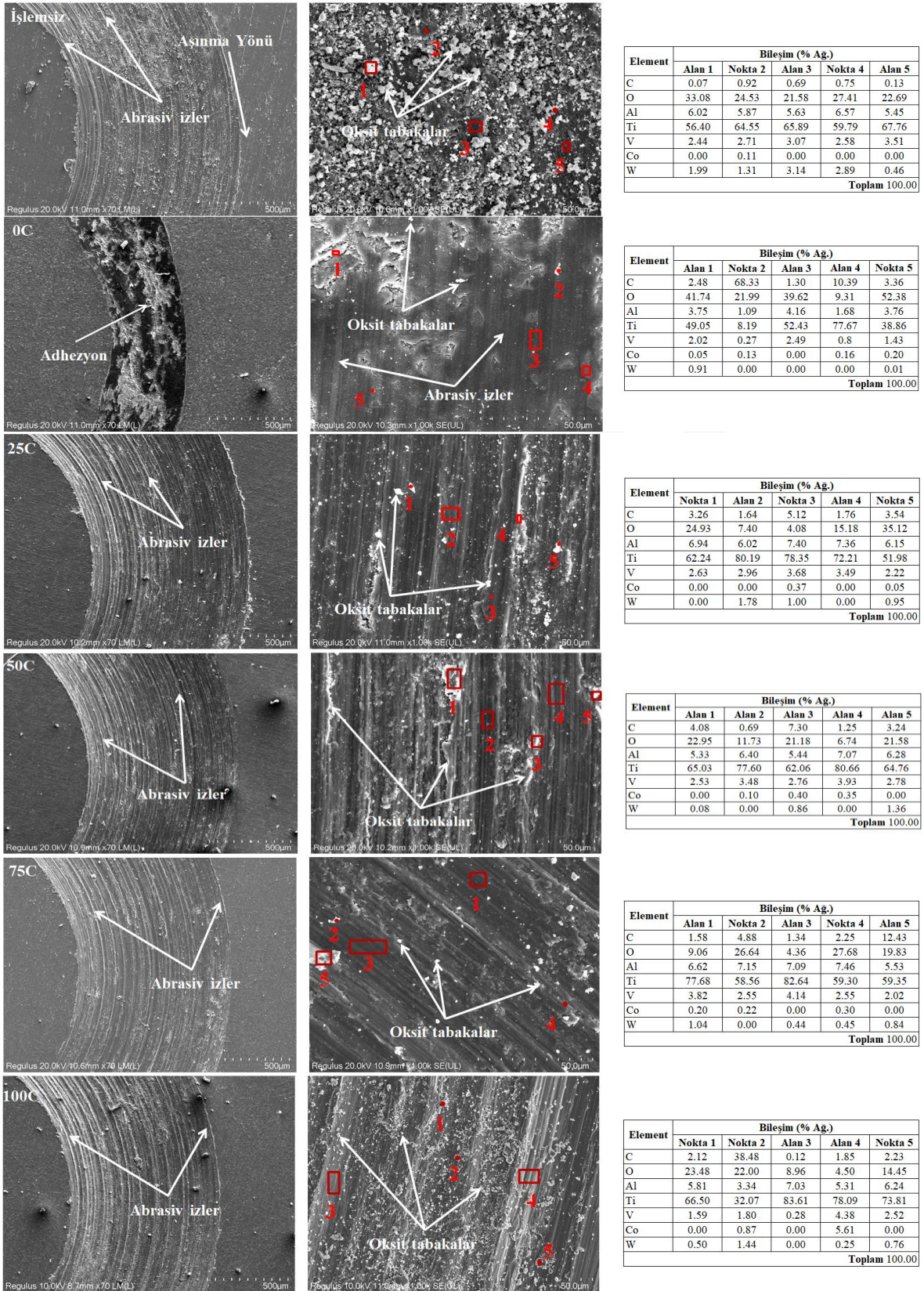
sonuçları verilmiştir. Aşınma oranı en düşük numune olan 0C numunesi dışında tüm numunelerde abrasiv aşınma izleri kanal üzerinde belirgin bir şekilde görülmektedir. İşlemsiz numunede beklenildiği gibi en geniş aşınma kanalı gözlemlenirken, en dar aşınma kanalı ise en sert numune olan 0C numunesinde tespit edilmiştir.

İşlemsiz numunenin sertliği düşük olduğu için abrasiv aşınma etkileri çok yüksek oranda görülmüştür. Aşınma deneyi sırasında oluşan çok fazla oksit tabaka kırılarak yüzeyden ayrılmıştır ve bunun sonucunda sürtünme katsayısı 0C numunesi hariç diğer numunelerden daha yüksek çıkmıştır. Kırılan oksit tabakalar aralarda kalarak 3. cisim gibi davranmış ve abrasiv aşınma etkilerini daha da şiddetlendirmiştir.

Abrasiv izler 0C dışındaki tüm numunelerde belirgin bir şekilde görülürken, en yüksek sertlik değerine sahip olan 0C numunesinde abrasiv izlerin görünürlüğü daha azdır. Oksit tabakaların kırılarak oluştuğu 0C numunesinde daha fazla sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Kırılarak oluşan oksit tabakalar sürtünmeyi bir miktar düşürmesine rağmen kaplama tozunda grafit olmadığı için sürtünme katsayısındaki düşüş o kadar da etkili olmamıştır. Ayrıca adhezyon aşınmasının oluşması da sürtünme katsayısını artıran başka bir etken olmuştur.

25C, 50C ve 75C numunelerinde benzer abrasiv izler ve benzer oksit tabakaları oluşmuştur. Oluşan oksit tabakaların bir kısmı kırılarak yüzeyden kopmuştur. Kopan oksit tabakalar ara yüzeyde üçüncü cisim gibi davranıp abrasiv aşınma oranını artırmıştır.

EDS analizleri incelendiğinde, oksit tabakaların en fazla görüldüğü numune 100C numunesidir ve en düşük sürtünme katsayısı bu numunede elde edilmiştir, bunun nedeni yüzeyden parçalanarak ayrılan zayıf tribo-oksit parçaların metal-metal temasını engellemesidir. 100C numunesinde, diğer numunelere göre oksit tabakaların miktarı daha yüksektir ve abrasiv aşınma direnci ise daha düşüktür ama kaplama tozundaki grafitin yağlayıcı etkisinden dolayı sürtünme katsayısında azalma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca oksit tabakalar daha geniş bölgelere yayılmıştır.



Şekil 8.24. Numunelerin aşınma kanalları ve aşınma kanallarının SEM ve EDS analizleri.

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, plazma transferli ark (PTA) kaynak yöntemi kullanılarak Ti6Al4V alaşımının yüzey özellikleri geliştirilmiştir. Yapılan işlem sonucunda numunelerde meydana gelen fazlar, mikrosertlik değişimleri ve tribolojik davranışlar incelenmiştir. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- TiC ve C kaplama tozları kullanılarak PTA kaynak yöntemi ile titanyum alaşım malzemenin yüzeyinde kompozit kaplamalar oluşturulmuştur ve yüzey özellikleri iyileştirilmiştir. Kaplama bölgesinde çatlak, gözeneklilik veya boşluk gibi mikroyapısal kusurlar tespit edilmemiştir. Kaplama tozu ile altlık malzeme arasında metalurjik olarak güçlü bir bağ oluşmuştur.

- PTA ile kaplama işlemi yapılan bölgeler incelendiğinde soğuma yönüne doğru dikey yönelmiş dendritik katılaşma olduğu tespit edilmiştir. Yetersiz ısı girdisi, TiC tozu ile kaplanan numunede ergimemiş titanyum karbürlerin kalmasına neden olmuştur. Dendritik yapı yoğunluğu kaplama tozunda kullanılan grafit oranı ile doğru orantılı olarak artmıştır. XRD analizleri sonucunda, genelde α -Ti yapısının görüldüğü referans numunede yüzey kaplama işlemi sonucunda TiC ve TiV-C üçlü sistemlerinin oluştuğu tespit edilmiştir.

- Tez kapsamında kullanılan referans numunenin mikrosertliği ortalama 298 ± 11 HV_{0.1} olarak ölçülmüştür. Yüzey geliştirme işlemi yapılan numunelerde bu sertlik değeri yapıda oluşan faz ve karbürlerden dolayı altlık malzemeye göre artış göstermiştir. En yüksek ortalama mikrosertlik değeri tamamen TiC tozu ile kaplanmış 0C numunesinde ölçülmüştür ve bu değer ortalama 573 ± 159 HV_{0.1} 'dır. Kaplama işlemi sonucunda titanyum alaşım malzemenin mikrosertlik değeri yaklaşık 2 kat artırılmıştır.

- Aşınma deneyleri sonucunda en düşük sürtünme katsayısı 100C numunesinde, en yüksek sürtünme katsayısı ise 0C numunesinde elde edilmiştir. 100C numunesinin sürtünme katsayısı grafitin yağlayıcı etkisinden dolayı azalmıştır. 0C numunesinde TiC oranının fazla olması aşınma oranını önemli ölçüde düşürmüştür.

Aşınma oranı ve sürtünme katsayısında en efektif sonuçlar 50C numunesinde elde edilmiştir. En yüksek aşınma oranı ise işlemsiz numunede ölçülmüştür ve bu sonuç kaplama işleminin başarılı olduğunu ve malzeme yüzeyini daha dirençli hale getirildiğini kanıtlamıştır. Aşınma deneyi sonucunda en geniş aşınma kanalları işlemsiz numunede, en dar kanal ise 0C numunesinde ölçülmüştür.

- Aşınma kanallarının SEM ve EDS analiz sonuçları incelendiğinde; kanal üzerinde en belirgin abrasiv aşınma izleri, çok fazla oksit tabakanın kırılarak numune ile aşındırıcı kürenin arasında kaldığı, işlemsiz numunede görülürken 0C numunesinde bu izlerin görünürlüğü azalmıştır. 0C numunesinde diğer numunelerden farklı olarak adhezyon aşınması oluşmuştur ve bu aşınma sürtünme katsayısını artıran başka bir etkidir. 25C, 50C ve 75C numunelerinde benzer abrasiv izler, benzer oksit tabakalar oluşmuştur. Oluşan oksit tabakaların bir kısmı kırılarak yüzeyden kopmuştur. Kopan oksit tabakalar ara yüzeyde üçüncü cisim gibi davranıp abrasiv aşınma oranını artırmıştır.

- Yapılan çalışmalar sonucunda, kullanılacak makine elemanında düşük sürtünme katsayısının gerekli olduğu durumlarda grafit oranı yüksek toz karışımı, yüksek aşınma performansı istenildiğinde ise titanyum karbür oranı yüksek toz karışımının kullanılması önerilmektedir. Ayrıca ortalama sürtünme katsayısı ve aşınma oranı elde etmek için yaklaşık olarak aynı oranlarda karıştırılmış grafit ve titanyum karbür tozlarının kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akyol, S. (2007). *Ti6Al4V Titanyum Alaşımının İşlenebilirliğinin Isıl İşlem Yardımıyla Arttırılması* İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi.
- Apay, S., & Gülenç, B. (2013). Kobalt bazlı tozların PTA yöntemiyle düşük karbonlu çelik üzerine kaplanması ve kaplama bölgesinin incelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 1(1), 77-87.
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2010). *The Science and Engineering of Materials* (6 ed.). Cengage Learning.
- Avcu, E. (2011). *Farklı büyüklüklere sahip aşındırıcı partikül karışımlarının Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına etkileri* [Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Kocaeli Üniversitesi Kütüphanesi.
- Bhushan, B. (2013). *Principles and applications of tribology*. A John Wiley & Sons, Ltd.
- Burakowski, T., & Wierzchon, T. (1999). *Surface engineering of metals*. CRC Press LLC (pdf form).
- Buytoz, S. (2010). Plazma transferli ark kaynak yüzey işlemiyle AISI 304 paslanmaz çelik yüzeyine WC-Ni-B4C kompozit kaplamasının mikroyapısal karakteristiği. *New World Sciences Academy*, 5(1), 35-47.
- Chattopadhyay, R. (2004). *Advanced thermally assisted surface engineering processes*. Kluwer Academic Publishers.
- Fauchais, P. L., Heberlein, J. V. R., & Boulos, M. I. (2014). *Thermal spray fundamentals*. Springer.
- Güleryüz, H., Atar, E., Seahjani, F., & Çimenoglu, H. (2015). An overview on surface hardening of titanium alloys by diffusion of interstitial atoms. *Diffusion Foundations*, 4, 103-116. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DF.4.103>
- Gür, A. K. (2009). *Plazma (PTA) yöntemiyle düşük karbonlu çeliğin yüzey modifikasyonuna koruyucu gazların etkisi* [Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Fırat Üniversitesi Kütüphanesi.
- Gürgenç, T., & Özel, C. (2016). PTA yöntemi kullanılarak FeCrC, FeB ve FeW alaşımlarıyla kaplanan AISI 1020 çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 221-232.
- Halina, P. S. (2013). Plasma welding: processes and equipment. *Welding International*, 28(9), 672-678.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Hou, Q. Y. (2013). Influence of molybdenum on the microstructure and properties of a FeCrBSi alloy coating deposited by plasma transferred arc hardfacing. *Surface & Coatings Technology*, 225, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.02.043>
- İşler, A. (1999). *Titanyum alaşımlarının ısıtma işlem ve mekanik özellikleri* [Yüksek Lisans İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi.
- Jandric, Z., Labudovic, M., & Kovacevic, R. (2004). Effect of heat sink on microstructure of three-dimensional parts built by welding-based deposition. *International Journal of Machine Tools Manufacture*, 44(7-8), 785-796. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.01.009>
- Jr., D. M. J. (2000). *Titanium: A Technical Guide*. ASM International.
- Karaoğlu, Y. (2006). *Bir aşınma test cihazının tasarımı ve imalatı* [Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Sakarya Üniversitesi Kütüphanesi.
- Kaya, E. (2021). *Farklı alternatif bağlayıcı metal matrisli kompozitlerin üretilmesi ve mekanik davranışları* [Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kütüphanesi.
- Kennedy, A., Sexton, L., Lavin, S., & Byrne, G. (2002). Laser cladding of aerospace materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(1), 63-68.
- Kılıçay, K. (2017). *Mikroalaşımli 38MnVS6 çeliğine uygulanan farklı yüzey ve ısıtma işlemlerin mekanik özelliklere etkilerinin araştırılması* [Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kütüphanesi.
- Kılıçay, K. (2020). Plazma transferli ark (PTA) yöntemi ile üretilen WC kompozit kaplamalarda enerji girdisinin mikroyapısal ve tribolojik özelliklere etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 251-264.
- Metals, A. S. f. (1980). *Properties and Selection Stainless Steels, Tool Materials & Special-purpose Metal* (9 ed., Vol. 3). ASM.
- Orhan, A., Gür, A. K., & Çalgülü, U. (2008). Ni/Ti tozlarının PTA yöntemiyle AISI 1020 yüzeyindeki kaplamalarının mikroyapı özellikleri. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 125-131.
- Özel, S., Kurt, B., & Somunkıran, İ. (2007). Plazma transfer ark yöntemiyle FeCr/FeCr+ C tozunun düşük karbonlu çelik yüzeyine alaşımlanması. *Selçuk University Journal of Engineering Sciences*, 6(1), 21-30.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Özkan, O. (2019). *Saf titanyum (CP-Ti) ve titanyum alaşımının (Ti-6Al-4V) yüzey özelliklerinin geliştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Kütüphanesi.
- Samal, S. (2017). Thermal plasma technology: The prospective future in material processing. *Journal of cleaner production*, 142, 3131-3150.
- Soydan, Y., & Ulukan, L. (2003). Triboloji: Sürtünme, Aşınma, Yağlama Bilimi ve Teknolojisi. *Teknoloji Araştırma ve Geliştirme Merkezi Teknolojik Yayınlar Serisi(1)*.
- Stachowiak, G., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering Tribology*. Elsevier Science.
- Sudha, C., Shankar, P., Rao, R. S., Thirumurugesan, R., Vijayalakshmi, M., & Raj, B. (2008). Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni-Cr-Si-B alloy on AISI 304L stainless steel. *Surface & Coatings Technology*, 202(10), 2103-2112. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.08.063>
- Topal, A. (2017). *Plazma transfer ark kaynak yöntemi kullanılarak AISI1020 çelik yüzeylerinin HARDOX450+ FeW ile kaplanması ve aşınma dirençlerinin tespit edilmesi* [Yüksek Lisans Tezi, Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Adıyaman Üniversitesi Kütüphanesi.
- Tušek, J., & Suban, M. (2003). High-productivity multiple-wire submerged-arc welding and cladding with metal-powder addition. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1-2), 207-213.
- Ulutun, M. (2007). *AISI 4140 çeliğinin yüzey sertleştirme işlemleri ve kaplama yöntemleri sonrası mekanik davranışlarının araştırılması* [Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kütüphanesi.
- Veinthal, R., Sergejev, F., Zikin, A., Tarbe, R., & Hornung, J. (2013). Abrasive impact wear and surface fatigue wear behaviour of Fe–Cr–C PTA overlays. *Wear*, 301(1), 102-108. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.01.077>
- Wu, C., Wang, L., Ren, W., & Zhang, X. (2014). Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling. *Journal of manufacturing processes*, 16(1), 74-85.
- Yıldız, T., Gür, A. K., Cengiz, M. H., & Taşkaya, S. (2017). Plazma transferli ark kaynak yöntemiyle Hardox 400 çelik malzemenin yüzeyinin farklı oranlardaki FeCrC tozuyla alaşımlandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 233-242.
- Yücel, M. B. (2018). *Dünyada ve Türkiye'de Titanyum*