

Plazma Sprey Gazlarının Tungsten Karbür Kaplama Özellikleri Üzerine Etkileri

Serkan Kaptan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül 2012

Effects of Plasma Spray Gases on Properties of Tungsten Carbide Coatings

Serkan Kaptan

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Metallurgical Engineering

September 2012

Plazma Sprey Gazlarının Tungsten Karbür Kaplama Özellikleri Üzerine Etkileri

Serkan Kaptan

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ

Eylül 2012

ONAY

Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Serkan Kaptan'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Plazma Sprey Gazlarının Tungsten Karbür Kaplama Özellikleri Üzerine Etkileri” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ

Üye : Prof. Dr. Remzi GÜRLER

Üye : Prof. Dr. Mustafa ANIK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Hakan GAŞAN

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

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

ÖZET

Tungsten karbür-kobalt kaplamalar yüksek aşınma direncinin gerekli olduğu pek çok endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. WC-Co kaplamaları uygulamak için plazma sprej gibi termal sprej işlemleri kullanılmaktadır. Fakat elde edilen kaplamaların özellikleri sprej parametrelerine göre büyük değişiklik göstermektedir.

Bu çalışmada plazma sprej işlemi ile uygulanmış WC-Co kaplamada birincil ve ikincil plazma gazlarının (Ar ve H₂) mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kaplama ana malzemesi olarak titanyum ve paslanmaz çelik kullanılmıştır. Kaplanmış numunelere aşınma, çekme ve sertlik testleri uygulanmış ve metalografik tekniklerle değerlendirilmiştir. Proses parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenerek, daha iyi performans özelliklerine sahip, dayanıklı kaplamaların geliştirilmesi amaçlanmıştır

Tez çalışmasının sonucunda; iyi performans için, parametre seçiminin uyumlu bir aralıkta yapılması gerektiği belirlenmiştir. Titanyum ve paslanmaz çelik ana malzemeler için test sonuçları benzerdir. Hidrojen gaz akışının artırılması daha düşük aşınma direncine sahip kaplama oluşumuna neden olmaktadır. Argon gaz akışının artırılması ile daha iyi aşınma direnci elde edilmektedir. İkincil fazların oluşumu sertlik, çekme mukavemeti ve aşınma direncini olumsuz etkilemektedir. Kaplamada yüksek tungsten monokarbür (WC) içeriği arzulanan bir durumdur. Gerçek kullanım şartlarında aşınmaya maruz kalacak tungsten karbür kaplamaların plazma sprej parametrelerinin seçiminde bu tez çalışmasından elde edilen bilgilerin kullanılması yararlı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Tungsten karbür kaplama, plazma sprej, aşınma, çekme, sertlik.

SUMMARY

Tungsten carbide-cobalt coatings have been widely used in many industries for applications where high wear resistance is required. Different kinds of thermal spraying techniques, such as atmospheric plasma spraying (APS) can be applied to deposit WC-Co coatings; however, the properties of such coatings strongly depend on the spraying parameters.

This study has sought to evaluate the influence of primary and secondary plasma gases (Ar and H₂) on the microstructure and mechanical properties of plasma-sprayed WC-Co coatings. Titanium and stainless steel were used as substrate material. Coated samples were subjected to abrasion, tensile and hardness tests, and evaluated by metallographic techniques. The effect of process parameters on microstructural and mechanical properties was reviewed to achieve more robust coatings with higher performance.

As a conclusion of the thesis it has been determined that for a better performance the parameter selection needs to be carried out at an appropriate range. The test results both for titanium and stainless steel substrates are similar. Increasing the hydrogen gas flow resulted in coatings with lower wear resistance. Increasing the argon gas flow allowed better wear resistance. The formations of secondary phases are detrimental to hardness, rupture and wear resistance. A coating with high tungsten monocarbide (WC) retention is desirable. It shall be useful to use information and experience, collected from this thesis while the selection of plasma spray process parameters of tungsten carbide coatings that are going to be exposed to wear.

Keywords: Tungsten carbide coatings, plasma spray, wear, tensile, hardness.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca her türlü desteklerini ve emeklerini benden esirgemeyen danışmanım Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ'ye, jüri üyelerim Prof. Dr. Remzi GÜRLER, Prof. Dr. Mustafa ANIK, Yrd. Doç. Dr. Osman Nuri ÇELİK, Yrd. Doç. Dr. Hakan GAŞAN'a, nitelikli bir çalışma olabilmesi için fedakarca saatlerini harcayan çalışma arkadaşlarım Seyit Fehmi DİLTEMİZ, Önder SAVAŞ, Ahmet TANGI, Fikri SELEK, tüm metal sprej atelyesi personeline ve son olarak sürekli yanımda durarak beni cesaretlendiren, ilham veren eşim Nazan KAPTAN ve motive eden biricik oğlum Alp KAPTAN'a en içten minnet duygularıyla teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
1. GİRİŞ	1
2. TERMAL SPREY VE TUNGSTEN KARBÜR KAPLAMALAR.....	3
2.1. Termal Sprey Prosesinin Avantajları ve Dezavantajları.....	5
2.1.1. Avantajlar	6
2.1.1.1. Çok geniş aralıkta malzemenin uygulanabilmesi.....	7
2.1.1.2. Düşük proses maliyeti.....	7
2.1.1.3. Geniş kaplama kalınlığı aralığı	7
2.1.1.4. Geniş uygulama aralığı	8
2.1.1.5. Ekipman fiyatı ve portatiflik	8
2.1.1.6. Ana malzemede düşük ısınma	8
2.1.1.7. Yeniden uygulanabilirlik	8
2.1.2. Dezavantajları.....	9
2.1.2.1. Düşük bağ mukavemeti	9
2.1.2.2. Porozite	9
2.1.2.3. Anizotropik özellikler	9
2.1.2.4. Düşük kapasite	10
2.1.2.5. Görülebilen yüzeyin kaplanması	10
2.2. Termal Sprey Karakteristikleri	10
2.3. Kaplama Yapısı	11

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.4. Kaplama Malzemeleri	12
2.5. Termal Sprey Uygulamalarının Kullanım Alanları	12
2.5.1. Aşınma direnci	12
2.5.2. Sürtünme kontrol.....	13
2.5.3. Korozyon direnci.....	14
2.5.4. Ölçüye getirme	14
2.5.5. Termal uygulamalar	14
2.5.6. Elektriksel uygulamalar	15
2.5.7. Sızdırmazlık kontrolü.....	15
2.5.8. Diğer uygulamalar.....	15
2.6. Termal Sprey Prosesleri.....	16
2.6.1. Alev sprej prosesleri	16
2.6.2. Elektrik ark sprej	18
2.6.3. Plazma sprej.....	18
2.6.3.1. Konvansiyonel plazma sprej.....	21
2.6.4. Sistem gereksinimleri	24
2.7. Kaplama Öncesi İşlemler.....	25
2.7.1. Temizleme	25
2.7.2. Yüzey pürüzlendirme.....	25
2.7.3. Maskeleme.....	26
2.7.4. Ön Isıtma	27
2.8. Tungsten Karbür Kaplamalar	28
2.8.1. Tungsten karbür	28
2.8.2. Sinterlenmiş karbür (WC-Co)	29
2.8.3. Tungsten karbür kaplamalar	31
2.8.4. Termal sprej ile tungsten karbür kaplama uygulamaları	32

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	37
3.1. Ön hazırlık	37
3.2. Plazma sprey işleminde kullanılan ekipman ve sarf malzemeler.....	37
3.3. Numune boyut ve ana malzemeleri	39
3.4. Test ve değerlendirme metotları.....	41
3.4.1. Voltaj ve yüzey sıcaklığı ölçümü	41
3.4.2. Mikroyapı değerlendirmesi	41
3.4.3. Faz analizi.....	43
3.4.4. Sertlik testi.....	43
3.4.5. Yüzey pürüzlülük ölçümü	43
3.4.6. Aşınma testi.....	44
3.4.7. Çekme testi	45
3.5. Kaplama işleminin uygulanması	46
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	48
4.1. Test ve değerlendirme sonuçları	48
4.1.1. Voltaj ve yüzey sıcaklığı ölçümleri	48
4.1.2. Mikroyapı değerlendirmesi	50
4.1.3. Faz analizleri	65
4.1.4. Sertlik ölçümleri.....	72
4.1.5. Yüzey pürüzlülük ölçümleri	76
4.1.6. Aşınma ölçümleri	79
4.1.7. Çekme testi	86

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR DİZİNİ	96

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Kaplama oluşumu (GE, 2010).....	3
Şekil 2.2. Tipik Termal Sprey Kesiti (AWS Committee, 1997).....	4
Şekil 2.3. Ana malzeme yüzeyine çarpma etkisi ile ergimiş veya yarı ergimiş parçacıkların şekil değişimi (Tucker, 1994).....	5
Şekil 2.4. Termal sprej mikroyapısı (Longo, 2004).....	6
Şekil 2.5. Termal sprej proses karakteristikleri (Crawmer, 2004a).....	11
Şekil 2.6. Toz alev sprej sistemi (Sulzer Metco, 2005).....	17
Şekil 2.7. Yüksek hızlı oksijen-yakıt sistemi (Sulzer Metco, 2005).....	18
Şekil 2.8. Elektrik ark sprej sistemi (Sulzer Metco, 2005).....	19
Şekil 2.9. Plazma ortamı (Evcin, 2006).....	19
Şekil 2.10. Plazma sprej tabancası (Sulzer Metco, 2005).....	21
Şekil 2.11. Plazma sprej uygulaması.....	22
Şekil 2.12. Temel kaplama sistemi (Sulzer Metco, 2005).....	24
Şekil 2.13. Tungsten (ITIA, 2010).....	28
Şekil 2.14. Hegzagonal kübik paket yapısına sahip tungsten karbür kristal yapısı (French et al., 1965).....	29
Şekil 2.15. WC-12Co Tozu (Buffalotungsten, 2010).....	30
Şekil 2.16. Plazma sprej prosesi ile kaplanmış WC-Co Kaplama (Davis, 2004)..	33
Şekil 2.17. Jet motor egzost flapları ve WC kaplamalı bölge.....	34
Şekil 2.18. Flaplarda birbiri üzerinde çalışan ve WC kaplamalı bölgeler.....	35
Şekil 3.1. a. Metco 9MC kontrol ünitesi b. Metco 9MP toz besleme ünitesi.....	38
Şekil 3.2. a. Metco 9MB-M plazma sprej tabancası ve b. monte edildiği ABB robot.....	38
Şekil 3.3. WC-114 kaplama tozunun taramalı elektron mikroskobu pikleri.....	39
Şekil 3.4. WC-114 kaplama tozunun taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (750X).....	39
Şekil 3.5. Denemelerde kullanılan kaplama numuneleri.....	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.6. Test işlemlerinde kullanılan kaplama aparatı	40
Şekil 3.7. Aşınma testi numuneleri a. Aşınma testi öncesi b. Aşınma testi sonrası.....	44
Şekil 3.8. Taber aşınma test cihazı.....	44
Şekil 3.9. Fırın içerisinde yapıştırıcı kürleşme işlemine tabi tutulmuş, fikstür yardımıyla çekme çubuğu haline gelmiş çekme test numunesi.....	45
Şekil 3.10. a. Kaplama işlemi öncesi tabancanın ayarlanması b. Kuponların üzerine kaplama uygulaması.....	46
Şekil 4.1. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı voltajda (V) ve parça sıcaklığında (°C) değişim	49
Şekil 4.2. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı voltajda (V) ve parça sıcaklığında (°C) değişim	49
Şekil 4.3. 1 numaralı 304 paslanmaz çelik numuneye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (1000X)	51
Şekil 4.4. 1 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede spot 1 ile gösterilen ve taban oksidi içeren bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri...	52
Şekil 4.5. 1 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede spot 2 ile gösterilen ve ergimemiş parçacık içeren bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri	52
Şekil 4.6. 1 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede spot 3 ile gösterilen ve gri renk tonuna sahip bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri.....	53
Şekil 4.7. 1 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede spot 4 ile gösterilen ve beyaz renk tonuna sahip bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri.....	53
Şekil 4.8. 18 numaralı titanyum numuneye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (1500X)	54
Şekil 4.9. 18 numaralı titanyum numunede spot 1 ile gösterilen ve taban oksidi içeren bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri	55

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.10. 18 numaralı titanyum numunede spot 2 ile gösterilen ve ergimemiş parçacık içeren bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri	55
Şekil 4.11. 18 numaralı titanyum numunede spot 3 ile gösterilen ve gri renk tonuna sahip bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri.....	56
Şekil 4.12. 18 numaralı titanyum numunede spot 4 ile gösterilen ve beyaz renk tonuna sahip bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri	56
Şekil 4.13. 6 numaralı titanyum numuneye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (2000X)	57
Şekil 4.14. 6 numaralı titanyum numunede spot 1 ile gösterilen ve taban oksidi içeren bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri	58
Şekil 4.15. 6 numaralı titanyum numunede spot 2 ile gösterilen ve oksit+gözenek içeren bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri	58
Şekil 4.16. a. 5 numaralı (304 paslanmaz çelik) ve b. 6 numaralı (Titanyum) test kuponlarında taban oksidi (200X).....	60
Şekil 4.17. Ergimemiş tanecik içeren 1 numaralı test numunesi (200 X)	61
Şekil 4.18. 1 numaralı ve b. 9 numaralı 304 paslanmaz çelik numunelerde % oksit+gözenek miktarı (200X).....	62
Şekil 4.19. a.12 numaralı ve b.18 numaralı titanyum numunelerde oksit+gözenek miktarı (200X)	63
Şekil 4.20. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı oksit+gözenekte % değişim	64
Şekil 4.21. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı oksit+gözenekte % değişim	65
Şekil 4.22. W, WC, W ₂ C ve W ₆ Co ₆ C fazları gösteren Rietveld analizi.....	66
Şekil 4.23. W ₄ Co ₂ C, W ₂ Co ₄ C ve W ₃ Co ₃ C fazları gösteren Rietveld analizi	66
Şekil 4.24. Kobalt bağlayıcı faz araması yapılan Rietveld analizi.....	67
Şekil 4.25. 3 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar	67

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.26. 4 numaralı titanyum numunede oluşan fazlar	68
Şekil 4.27. 1 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar	69
Şekil 4.28. 5 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar	69
Şekil 4.29. 9 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar	70
Şekil 4.30. 11 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar	71
Şekil 4.31. 13 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar	71
Şekil 4.32. 17 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar	72
Şekil 4.33. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı sertlikte değişim (R15N).....	74
Şekil 4.34. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı sertlikte değişim (R15N).....	75
Şekil 4.35. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı yüzey pürüzlülüğünde değişim (mikron/mm).	77
Şekil 4.36. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı yüzey pürüzlülüğünde değişim (mikron/mm).	78
Şekil 4.37. 14 numaralı numunenin aşınma testi öncesi taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (1000X).....	80
Şekil 4.38. 14 numaralı numunenin aşınma testi sonrası taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (1000X).....	80
Şekil 4.39. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı 304 paslanmaz çelik kuponlarda % aşınma	81
Şekil 4.40. Argon gaz akışı sabitken(47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı titanyum kuponlarda % aşınma	82
Şekil 4.41. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı bütün kuponlarda % aşınma.....	83
Şekil 4.42. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı paslanmaz çelik kuponlarda % aşınma	84

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.43. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı titanyum kuponlarda % aşınma	85
Şekil 4.44. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı bütün kuponlarda % aşınma	85
Şekil 4.45. 2 numaralı test numunesinde çekme testi sonrası kopma	87
Şekil 4.46. 2 numaralı test numunesinde çekme testi sonrası kopma (50X)	87
Şekil 4.47. 5 numaralı test numunesinde çekme testi sonrası kopma	88
Şekil 4.48. 5 numaralı test numunesinde çekme testi sonrası kopma (50X)	89
Şekil 4.49. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı çekme mukavemetinde değişim (MPa)	90
Şekil 4.50. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı çekme mukavemetinde değişim (MPa)	91

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Termal Sprey kaplamalar için aşındırıcı medya kullanarak yapılmış aşınma testi (Tucker, 1994)	13
Çizelge 2.2. Termal sprey proseslerinin karşılaştırılması (Sulzer Metco, 2005) ...	23
Çizelge 2.3. Bazı Sert Metallerin Özellikleri (Voyer et al., 1999).....	32
Çizelge 3.1. Tungsten Karbür kaplama numunelere ait metalografik numune hazırlama işlem parametreleri	42
Çizelge 3.2. Hidrojen ve argon gaz akışlarına bağlı tungsten karbür kaplama plazma sprej işlem parametreleri	47
Çizelge 4.1. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı voltajda (V) ve parça sıcaklığında (°C) değişim	48
Çizelge 4.2. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı voltajda (V) ve parça sıcaklığında (°C) değişim	48
Çizelge 4.3. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı taban oksidi	59
Çizelge 4.4. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı taban oksidi	59
Çizelge 4.5. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı ergimemiş tanecik değerleri	60
Çizelge 4.6. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı ergimemiş tanecik değerleri.....	61
Çizelge 4.7. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı kaplama yapısındaki (%) oksit+gözenek değerleri	62
Çizelge 4.8. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı kaplama yapısındaki (%) oksit+gözenek değerleri	62

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.9. Argon gaz akışına bağlı R15N sertlik değerleri	73
Çizelge 4.10. Hidrojen gaz akışına bağlı R15N sertlik değerleri	73
Çizelge 4.11. Argon gaz akışı (47,19 lt/dak) sabitken hidrojen gaz akışına bağlı aşınma testi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerleri (mikron/mm).....	76
Çizelge 4.12. Hidrojen gaz akışı sabitken argon gaz akışına bağlı aşınma testi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerleri (mikron/mm)	76
Çizelge 4.13. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı % aşınma	79
Çizelge 4.14. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı % aşınma	79
Çizelge 4.15. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı kaplamanın çekme mukavemeti değerleri (MPa)	86
Çizelge 4.16. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı kaplamanın çekme mukavemeti değerleri (MPa)	86
Çizelge 4.17. Çekme testi sonrasında kaplama kopma bölgeleri	88

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**Simgeler Açıklama**

γ Gamma

Kısaltmalar

WC: Tungsten mono karbür
WC-Co: Sinterlenmiş karbür veya sert metal
HVOF: Yüksek hızlı oksijen-yakıt yanma tip spreyleme
PVD: Fiziksel buhar biriktirme
CVD: Kimyasal buhar biriktirme
FGM: Değişken fonksiyonlu malzemeler
DC: Doğru akım
APS: Atmosferik plazma sprey
XRD: X-ışını kırınım spektrometresi
304: SAE 304 paslanmaz çelik
CP Ti: Ticari saflıkta (%99) titanyum
R15N Elmas konik uç ile 15 kg yük uygulanarak ölçülen sertlik değeri
HRc: Elmas konik uç ile 150 kg yük uygulanarak ölçülen sertlik değeri
HRa: Elmas konik uç ile 60 kg yük uygulanarak ölçülen sertlik değeri
F: Fahrenheit
C: Santigrat
kg/h: kilogram/saat
m/s: metre/saniye
mm/s: milimetre/saniye
MPa: Megapaskal
N: Newton
dev/dak: devir/dakika

1. GİRİŞ

Günümüzde sürtünme ve aşınmanın önemli rol oynadığı talaşlı imalat, metal şekillendirme, yataklar ve dişliler gibi uygulamalarda gelişmiş malzeme ihtiyacı vardır. Mevcut cihaz ve bileşenlerinin ömrünü uzatmak için yeni malzemeler araştırılmakta ve mevcut malzemelerin özellikleri geliştirilmektedir. Tungsten karbür bu gereksinimleri karşılayabilecek bir malzemedir (Bonny et al., 2004).

Tungsten karbür (WC) kaplamalar yüksek sertlik, korozyon direnci ve iyi aşınma özellikleri sebebiyle koruyucu sert kaplamalar olarak kullanılırlar. Plazma sprey, yüksek hızlı oksî-yakıt sprey (HVOF), kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) gibi proseslerle tungsten karbür kaplamalar elde edilebilir (Esteve et al., 1999). Tungsten karbür-kobalt esaslı malzemeler sinterlenmiş formları ile erozyon, sürtünme ve aşınma uygulamalarında özellikle termal sprey işlemleri ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Sert WC parçacıklar aşınmaya dirençli ana bileşeni oluştururken kobalt bağlayıcı, tokluk ve kohezyon sağlar. Sertlik, aşınma direnci ve mukavemet gibi özellikler; WC tane boyutu ve karbür faz ile bağlayıcı matrisin hacimsel % oranlarından, termal sprey kaplamalarda da poroziteden etkilenir (Lovelock, 1998)

Tungsten karbür malzemeler için seri üretim çok pahalıdır ve küçük parçalar ile sınırlıdır. Fakat pek çok aşınma uygulamasında önemli olan sadece temas yüzeyi özellikleridir. Bu sebeple termal sprey gibi kaplama işlemi uygulanmasının aşınmaya dirençli parça elde edilmesinde pek çok avantajı vardır (Voyer et al., 1999).

Tez çalışmasında, titanyum ve paslanmaz çelik kuponlar üzerinde plazma sprey kaplama parametrelerinden primer (argon) ve sekonder (hidrojen) gaz akış değerlerinin kaplama özellikleri üzerine etkisi araştırılarak kaplama özelliği açısından en uygun gaz akış değerlerinin bulunması hedeflenmiştir.

Denemelerde plazma sprey işlem parametrelerinden; kaplamanın özellikleri üzerinde etkili olacağı değerlendirilen primer gaz (argon) ve sekonder gaz (hidrojen) akışlarında değişiklikler yapılarak onsekiz farklı grup numune hazırlanmıştır

Numunelerin aşınma ve mekanik özelliklerinin anlaşılabilmesi için test ve değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Test ve değerlendirme metotları oluşturulurken, standartlardan, literatürden, teknik uygulama kılavuzlarından ve yoğun olarak saha tecrübelerinden yararlanılmıştır. Tez çalışmasında numuneler üzerine uygulanan test ve değerlendirme metotları:

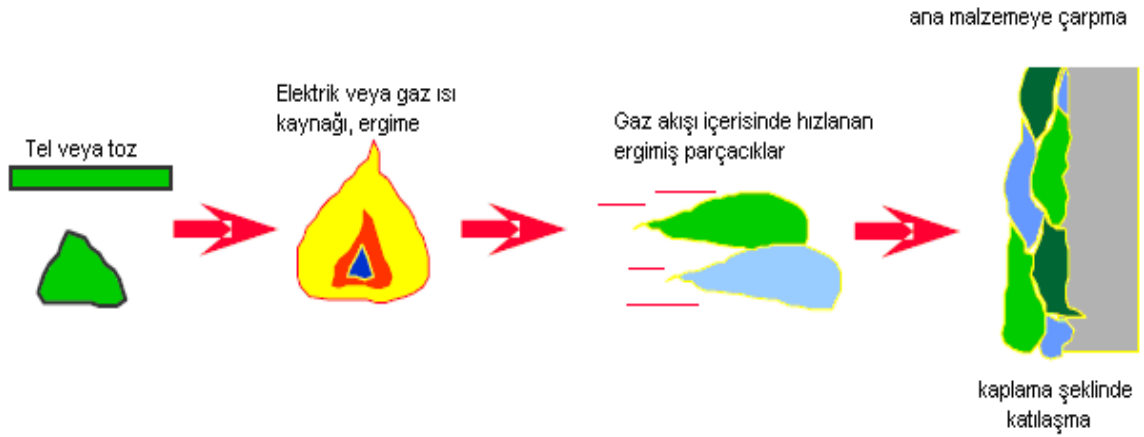
- Voltaj ve yüzey sıcaklığı ölçümleri
- Mikroyapı değerlendirmesi
- Sertlik testi
- Yüzey pürüzlülük ölçümleri
- Aşınma testi
- Çekme testi
- Faz analizi

şeklindedir.

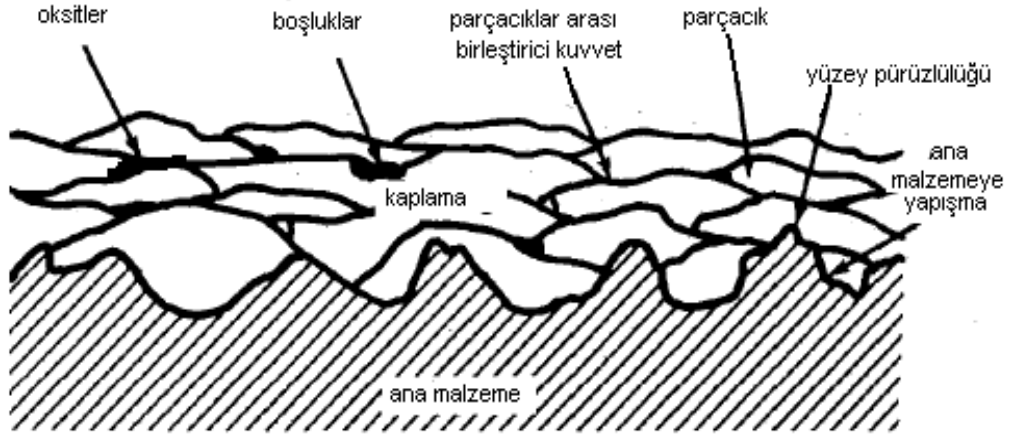
Test ve değerlendirme işlemleri sonucunda farklı plazma gaz akışlarından oluşan kaplama parametrelerinin kaplama mikroyapısı, aşınma ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Böylece kullanıma sunulacak aşınmaya dirençli kaplamalardan beklenen özelliklere göre uygun parametre aralığı seçimi mümkün hale gelmiştir.

2. TERMAL SPREY VE TUNGSTEN KARBÜR KAPLAMALAR

Termal sprej; metalik veya metalik olmayan yüzey kaplama malzemelerinin, ısı kaynağı ile ergimiş veya yarı ergimiş hale getirilerek daha önce hazırlanmış bir yüzey üzerinde kaplama oluşturabilmek amacıyla uygulandığı bir grup işlemin genel adıdır. Yüzey kaplama malzemesi toz, tel veya çubuk formunda olabilir. Termal sprej tabancası gerekli ısıyı yanıcı gaz veya elektrik arkı ile üretir. Kaplama malzemeleri ısıtıldığında yarı ergimiş hale gelir, işlemde kullanılan gazların yardımı ile hızlandırılır ve ana malzeme yüzeyine doğru taşınırlar. Parçacıklar yüzeye çarparak yassılaşırlar, ince plakalar oluştururlar, pürüzlü yüzeye ve birbirlerine yapışırlar. Püskürtülen parçacıklar ana malzeme yüzeyine çarparken soğurlar, katılaşır ve kaplamayı meydana getiren lamelli yapıyı oluştururlar. Her bir parçacığın tutunması, mekanik bağlanma veya bazı durumlarda metalürjik bağlanma ya da difüzyonla gerçekleşir. Parçacıkların hızının artması daha iyi bir tutunma dayanımı ve daha yüksek yoğunluk sağlar. Ana malzeme ile kaplama arasında iyi bir bağlanma sağlanması için ana malzeme yüzeyinin kaplama öncesi kumlama ile pürüzlendirilmesi, yağının alınması ve tamamen temizlenmesi son derece önemlidir. Şekil 2.1.'de termal sprej kaplama oluşumu ve Şekil 2.2.'de tipik termal sprej kaplama kesitleri görülmektedir (AWS Committee, 1997).



Şekil 2.1. Termal sprej kaplama oluşumu (GE, 2010)



Şekil 2.2 Tipik Termal Sprey Kesiti (AWS Committee, 1997)

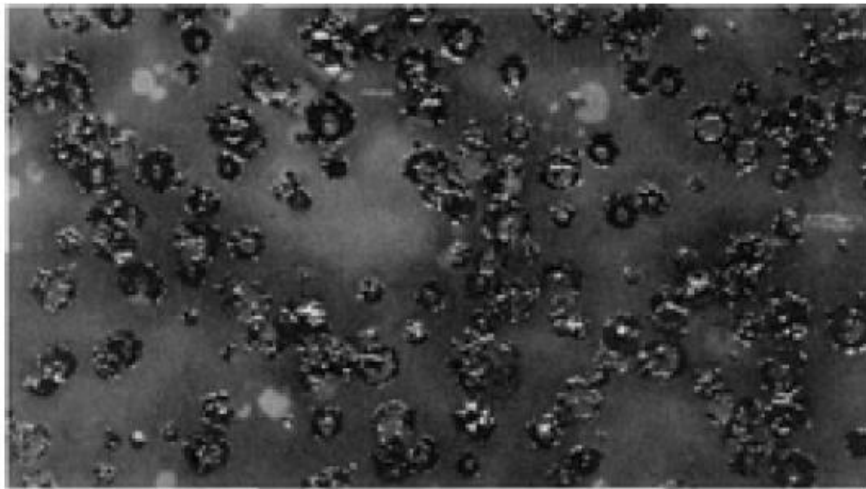
Termal sprej kaplama işlemi, çeşitli malzemeleri korozyondan korumak için çinko kullanımı amacıyla 1900'lerin başlarında keşfedildi. İlk kez termal sprej prosesinin alev sprej olarak 1911 yılında İsviçre'de kullanıldığı kabul edilir. Daha sonra 1950'li yıllarda patlamalı tabanca sprej tekniği geliştirildi. 1950'lerin sonları ile 1960'ların başlarında plazma sprej tabancasının geliştirilmesiyle, kaplama malzemesi olarak seramikler ve refrakter metaller gibi yüksek sıcaklık malzemelerinin kullanılması ticari olarak uygulanabilir hale geldi. Alev ve plazma spreje ilave olarak yüksek hızlı oksji-yakıt ve patlamalı tabanca sprej teknikleri ile günümüzde termal sprej işlemleri son derece zor ve yüksek beklenti gerektiren koşullarda dahi yaygın olarak kullanılmaktadır (Tucker, 1994).

Termal sprej kaplama, ana malzemeye kendinde olmayan özel bir yüzey kalitesi kazandırmak için uygulanır. Dolayısıyla parçanın mukavemeti ana malzeme tarafından sağlanırken, korozyon, aşınma direnci veya ısı direnç gibi nitelikleri kaplama sağlar. Bu sebeple termal sprej kaplamalar, havacılık ve enerji üretim endüstrilerinde gaz türbinlerinin yeni ve tamir edilmiş parçalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Weidmann, 2005).

Şekil 2.3.'te ergimiş parçacıkların yüzeye çarpması ve yüzeyde katılması sonucu oluşan değişik şekiller gösterilmektedir. Parçacıkların yüzeye bağlanma mekanizmaları tam anlaşılmış değildir fakat büyük oranda soğuyan ve büzülen parçacıkların mekanik kilitlemesiyle/bağlanmasıyla oluşur, bazen de metalurjik bağlanma ile gerçekleşir. Çoğu termal spreycaplamada yeterli bağlanma için yüzeyin pürüzlendirilmesi gerekir. Uygun ana malzeme ve kaplama kombinasyonu ile kaplama yapılmış birkaç örnekte ana malzeme ile kaplama arasında difüzyon veya bölgesel ergime sonucu birleşme görülmüştür. Ayrıca ana malzeme yüzeyi aşırı derecede temiz ise ve kaplama işlemi süresince herhangi bir oksidasyon belirtisi de yoksa Van der Waals bağları da etkili olur (Tucker, 1994).

2.1. Termal Sprey Prosesinin Avantajları ve Dezavantajları

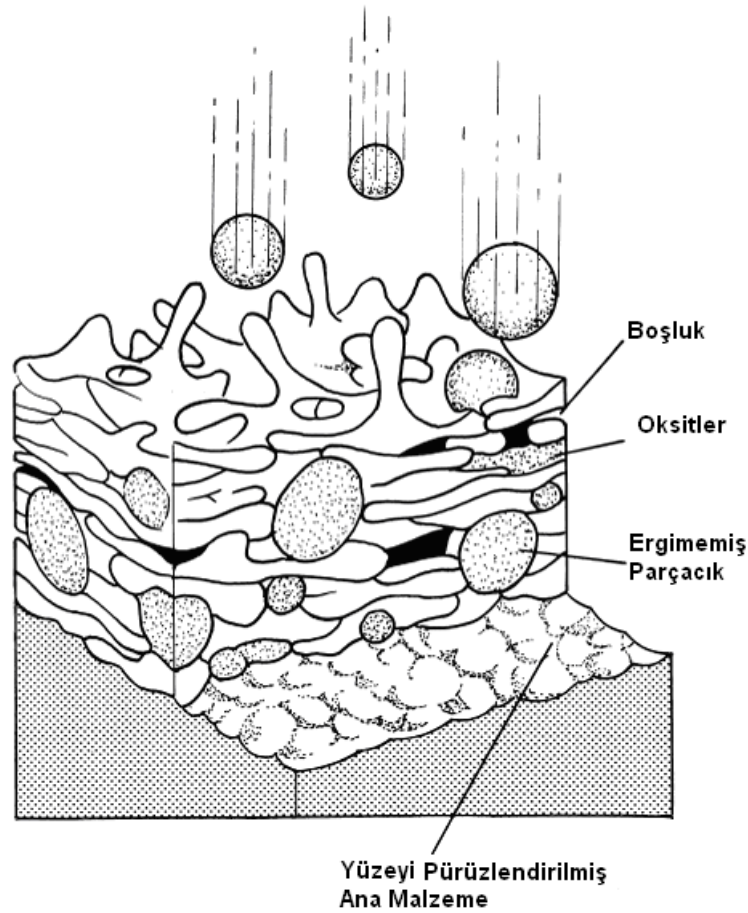
Termal spreycaplamalar eşsiz bir mikroyapı mimarisi oluşturur. Caplamalar değişik boyuttaki ergimiş veya yarı ergimiş taneciklerin muhtemelen saniyede bir milyon parçacık miktarda ana malzeme yüzeyine çarpması ve Şekil 2.4.'te gösterildiği gibi birbiri üzerine binmesi sonucu lamelli mikroyapıyı oluşturmaktadır. Bu eşsiz morfolojik mimari pek çok avantaj ve dezavantaj sunar.



Şekil 2.3. Ana malzeme yüzeyine çarpma etkisi ile ergimiş veya yarı ergimiş parçacıkların şekil değişimi (Tucker, 1994)

2.1.1. Avantajlar

Şekil 2.4.'te ki pek çok mikroyapısal hata, ekipman ve kaplama malzemesi seçimi ile açıklanabilir fakat kaplama yapısı üzerindeki ana etki proses adımından gelmektedir. Yassılaştırmış parçacıkların lamelli yapısından veya boşluklardan gelen özelliklerin sadece kaplama sonrası işlemlerle üstesinden gelinebilir. Porozite bazen avantaj sağlayabilir. Yüzey porozitesi yağlama sıvılarını tutarak yağ miktarı azaldığında yatak yüzeylerini yağlayabilir. Hızlı parçacık soğuması ve lamelli tanecik yapısı termal sprej kaplamaları diğer kaplamalardan ayırt eden özelliklerdir. Kırılganlık, sertlik, anizotropik özellikler ve yüksek iç gerilimler çok hızlı soğumadan ve parçacıkların yassılaştırmışından kaynaklanır. Uygun şekilde yapılmış termal sprej kaplamalar çeşitli avantajlar sunar (Longo, 2004).



Şekil 2.4. Termal sprej mikroyapısı (Longo, 2004)

2.1.1.1. Çok geniş aralıkta malzemenin uygulanabilmesi

Metaller, alaşımlar, karbürler, oksit ve oksit olmayan seramikler ve plastikler ile bunların kombinasyonu kaplama olarak uygulanabilir. Diğer rakip kaplama prosesleri bu kadar çok yönlü uygulanamaz. Sprey işlemi esnasında kimyasal reaksiyona uğrayarak bozulmadan ergiyebilen hemen hemen her malzeme kullanılabilir (Longo, 2004).

2.1.1.2. Düşük proses maliyeti

Saatte 1 ile 45 kg arası veya daha fazla kaplama biriktirme hızları elde edilebilir. Genelde tipik biriktirme hızları 2 ila 7 kg/saat arasındadır. Yüksek püskürtme ve biriktirme hızları göreceli olarak düşük proses maliyeti sunar (Longo, 2004).

2.1.1.3. Geniş kaplama kalınlığı aralığı

50 mikron ile 6,5 mm arası kalınlıkta kaplama uygulanabilir. Rakip kaplama prosesleri ile elde edilebilecek kalınlıklar aşağıda belirtilmiştir:

- Hiç ölçü değişmemesi ile çok az kalınlık aralığı: Yüze kalınlık oluşturmayan bir kaplama uygulanır. Örnekler: Difüzyon işlemi, nitrürleme, karbürleme ve iyon implantasyonu
- İnce filmler: 0,01 mikrona kadar kalınlık oluşturan kaplamalar. Örnek: CVD, PVD, sol-jel, elmasımsı film ve iyon kaplama
- Orta kalınlıkta kaplamalar: 0.01 ile 0.05 mikron arası kaplamalar. Örnek: PVD, elektrolitik kaplama, organometalik kaplamalar
- Kalın Kaplamalar: 50 mikron ile 6,5 mm veya daha fazla olan kaplamalar. Örnek: Termal sprej, kaynak, kladlama, bazı elektrolitik kaplamalar ve bazı PVD veya elektron ışık PVD kaplamalar (Longo, 2004).

2.1.1.4. Geniş uygulama aralığı

Termal sprey kaplamalar aşınma direnci, termal direnç, korozyon direnci, elektrik direnci ve iletkenliği, ölçüye getirme ve sızdırmazlık gibi pek çok amaçla uygulanabilir (Longo, 2004).

2.1.1.5. Portatiflik

Temel termal sprey ekipmanları göreceli olarak küçük ve portatiftir, parçanın bulunduğu yerde kaplama yapmaya müsaade eder. Vakum plazma sprey, entegre plazma sistemleri ve yüksek hızlı oksî-yakıt (HVOF) sistemleri buna dahil değildir (Longo, 2004).

2.1.1.6. Ana malzemede düşük ısınma

Termal sprey göreceli olarak soğuk bir işlemdir ve ana malzeme sıcaklığı genelde 150°C yi geçmez. Böylece çok yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemeler final ölçüsüne getirilmiş ve ısıl işlem görmüş parçalara, uygulandıkları parçanın özelliklerini değiştirmeden ve termal distorsiyon oluşturmadan uygulanabilirler (Longo, 2004).

2.1.1.7. Yeniden uygulanabilirlik

Çoğu durumda parçanın ölçülerini ve özelliklerini değiştirmeden, aşınmış ve hasarlanmış kaplamalar mekanik ve kimyasal olarak sökülüp tekrar kaplanabilir. (Longo, 2004)

2.1.2. Dezavantajları

Termal sprej kaplamaların dezavantajları da mevcuttur ve bunları anlamak önemlidir. Böylece yeterli performansın sağlanamayacağı durumlarda termal sprej kaplamalar seçilmez. Genelde problemler kaplama sınırlamalarının anlaşılmasından veya az anlaşılmasından kaynaklanır (Longo, 2004).

2.1.2.1. Düşük bağ mukavemeti

Kaplama ve ana malzeme bileşimine göre elektrolitik kaplama, kaynak ve buhar yoğunlaştırma işlemleri ile karşılaştırıldığında termal sprej ile elde edilen çekme mukavemeti düşüktür. (Longo, 2004).

2.1.2.2. Porozite

Kaplamalar gözeneklidir. Porozite yaklaşık %1'lik seviyelere kadar indirilebilir. Vakum plazma sprej ve HVOF kullanılarak porozite minimize edilebilir. Yüzey porozitesi sıvı organik kaplamalarla minimize edilebilir (Longo, 2004).

2.1.2.3. Anizotropik özellikler

Termal sprej kaplamalar anizotropiktir. Bu sebepten püskürtme yönüne dik yöndeki çekme mukavemeti püskürtme yönüne paralel çekme mukavemetine göre 10 kata kadar fazla olabilir. Genelde soğuk işlenmiş ve döküm malzemelere göre daha kırılgandır, eğer kaplama sonrası ısıl işlem yapılmamışsa darbe yüklemelerine dayanamazlar. Diğer tarafta kaynak işlemi ile darbe direncine en yüksek dayanımlı kaplamalar oluşturur (Longo, 2004).

2.1.2.4. Düşük kapasite

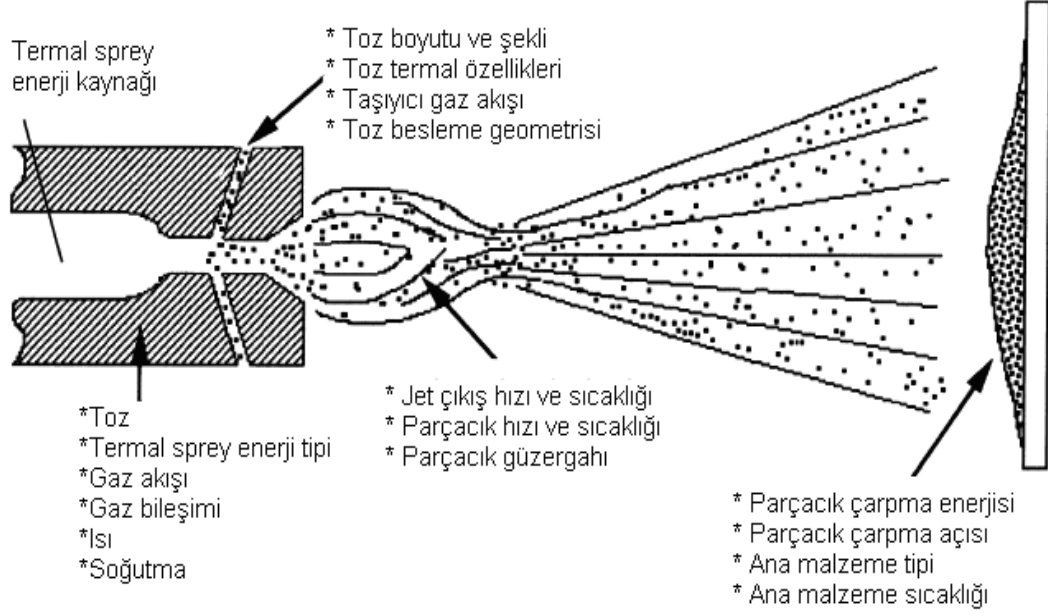
Termal sprey prosesleri seri üretime uygun değillerdir.

2.1.2.5. Görülebilen yüzeyin kaplanması

En önemli dezavantaj görülebilen ve ulaşılabilen yüzeylerin kaplanabilmesidir. Bu proseslerde sadece sprey tabancasının gördüğü alan kaplanabilir. Aynı zamanda boyut ile ilgili de sınırlamalar mevcuttur. Sprey tabancasının içine giremediği küçük, derin bölgeler kaplanamaz. Genelde yüzeye dik ($90^\circ \pm 20^\circ$) uygulamadan, açısal olarak sapmalar kaplama problemlerine sebep olur. Porozite artar ve kaplama bütünlüğü azalır (Longo, 2004).

2.2. Termal Sprey Karakteristikleri

Şekil 2.5.'de termal sprey işlemi için kaplama kalitesini etkileyen ana proses karakteristikleri vurgulanmıştır. Basit bir düşünce şekliyle bakıldığında bu proses toz kütlenin belirli bir zaman süresinde arzulan sıcaklığa getirildiği yüksek hızlı ısı işlemi olarak düşünülebilir. Prosesten kaynaklanan jetin içinde parçacığın kalma süresi uçuş süresi olarak adlandırılabilir, bu özellik gaz hızı ve toz parçacık özellikleri ile alakalıdır. Gaz hızı nozula gelen toplam gaz akışı, gaz özellikleri ve işlemde kaynaklanan enerji ile alakalıdır. Bu sebeple parçacık hızı, jet hızının bir fonksiyonudur; boyut, morfoloji ve kütle gibi parçacık özelliğine etki eder. Parçacığın sıcaklığı entalpi, hız, güzergah ve parçacığın fiziksel/termal özelliklerinin fonksiyonudur. Ortalama parçacık sıcaklığı ve hızı dağılımı bağlanma mukavemetini, poroziteyi ve oksitler gibi kaplama inklüzyonlarını belirler. Bu özellikle normal atmosferik şartlarda (örnek: havada) çok doğrudur. Özet olarak en son sıcaklık, hız ve parçacık dağılımının çevresel etkileşimi, jet hızı, jet sıcaklığı ve parçacık uçuş süresi ile alakalıdır ve kaplama mikroyapısını ile özelliklerini belirler (Crawmer, 2004a).



Şekil 2.5. Termal sprej prosesi karakteristikleri (Crawmer, 2004a)

Temellerinde farklı olmalarına rağmen alev, plazma ve elektrik ark sprej proseslerinde sıcak ergimiş parçacıklar aynı şekilde ana malzemeye çarpıp ve deforme olurlar. Termal sprej işlemleri arasında fiziksel farklılıklar; parçacık boyutu, hızı, sıcaklığı ve pek çok kaplama çeşitliliğine sebep olan jet sıcaklığıdır (Crawmer, 2004a).

2.3. Kaplama Yapısı

Termal sprej kaplamalar belli bir miktara kadar prosese bağlı porozite içerirler. Tipik olarak plazma sprej kaplamalarda yaklaşık %1-2 porozite görülür. Sprej tabancası yüzey üzerinde hareket ettikçe yaklaşık 10-20 mikronluk kalınlıklarda tabakalar halinde kaplama oluşur. Pasolar arası sürede tabakanın dış kısmında oksitler oluşabilir. Püskürtme esnasında oluşan ince tozlar ve ergimemiş parçacıklar kaplama içine hapsolabilir. Bu toz, sprej prosesi esnasında ana malzemeye yapışmayan kaplama

malzemesinden kaynaklanır. Sprey pasoları birden bu parçacıkları kaplama yüzeyine sürükler ve kaplama tabakalarında hapsolurlar (Sulzer Metco, 2005).

Katılaşma ve soğumadan dolayı termal sprej kaplamalarda yüksek iç gerilim mevcut olur. Sıcak parçacık soğurken küçülür ve kaplama içi gerilimi artırır. Bazen seramik kaplamaların ana malzemeye yapışması gerekli bağ mukavemetini sağlamaz. Bu gibi durumlarda bağ mukavemetini arttırmak için genelde NiAl veya NiCrAl alaşımlarından oluşan ana malzeme ile seramik kaplama arasında ara tabaka olarak davranan alt kaplama (bond coat) uygulanır (Sulzer Metco, 2005).

2.4. Kaplama Malzemeleri

Üç ana tip malzeme termal sprejde kullanılabilir:

- Polimerler, seramikler, intermetalikler, metaller ve alaşımları gibi tek faz malzemeler,
- Takviyeli polimerler, takviyeli metaller ve sermetler (WC/Co, Cr₃C₂/NiCr, NiCrAlY/Al₂O₃) gibi kompozitler,
- Değişken fonksiyonlu malzemeler (FGM) olarak bilinen tabakalı veya birden fazla özellik gösteren malzemeler.

2.5. Termal Sprej Uygulamalarının Kullanım Alanları

2.5.1. Aşınma direnci

Termal sprej uygulamaların en önemli kullanım alanlarından biri aşınma direncidir. Çoğu endüstri alanında hemen hemen aşınmanın her tipine karşı koymak için kullanılırlar. Kullanılan malzemeler yumuşak metallerden sert metallere, karbür esaslı seramiklerden oksitlere kadar değişir. Genelde kaplamaların aşınma direnci yoğunlukları ve kohezif mukavemetleri ile artar, bu yüzden HVOF ve patlamalı tabanca

gibi yüksek hızlı prosesler en yüksek aşınma direncini sağlar. Termal sprey kaplamaları diğer malzemelere göre değerlendirmek ve karşılaştırmak amacıyla pek çok laboratuvar çalışması yapılmıştır. Çizelge 2.1.'de aşınma örnekleri görülmektedir. Unutulmamalıdır ki laboratuvar testleri nadiren servis şartlarını karşılar. Bu sebeple bu testler sadece çalışma şartları için kaplama seçimine yardımcı olabilir (Tucker, 1994).

Çizelge 2.1. Termal Sprey kaplamalar için aşındırıcı medya kullanarak yapılmış aşınma testi (ASTM G 65 kuru kum/kauçuk disk testi, 50/70 mesh Ottawa silisyumu, 200 rpm, 30 lb yük, 3000 tur test süresi) (Tucker, 1994)

Malzeme	İşlem	Aşınma Hızı (mm ³ /1000 tur)
Karbaloy 883	Sinterlenmiş	1,2
WC-Co	Patlamalı Tabanca	0,8
WC-Co	Plazma Sprey	16,0
WC-Co	Süper Patlamalı Tabanca	0,7
WC-Co	HVOF	0,9

2.5.2. Sürtünme kontrol

Termal sprey kaplamalar bazı uygulamalarda yüzeye düşük sürtünme katsayısından yüksek sürtünme katsayısına kadar sürtünme özellikleri kazandırmak amacıyla kullanılır. Açıkça bu tür uygulamalarda yüzey topografisi çok önemlidir, eşleşen yüzeyde hasar veya aşınma meydana getirilmeden istenilen sürtünme katsayısını elde etmek için son makinalama teknikleri geliştirilmiştir. Örnek olarak tekstil endüstrisinde çok aşındırıcı sentetik fiberle başa çıkabilmek amacıyla sürtünme karakteristikleri ve yüzey topografyasını içeren uygulamalar mevcuttur. İstenilen sürtünme katsayısına bağlı olarak alümina gibi oksit kaplamalarla çok pürüzsüz ve hafif kaba özelliklere sahip yüzeyler elde edilebilir (Tucker, 1994).

2.5.3. Korozyon direnci

Alev spreyle uygulanmış alüminyum ve çinko kaplamalar sıkça köprüler, gemiler ve diğer yapılarda korozyon direnci amacıyla kullanılır. Bu tip uygulamalarda ana malzemenin anodik korunması oluşur. Korozyon direnci amacıyla kullanılan diğer kaplamalarda genelde aşınma direnci de mevcuttur, bu tip kaplamaların porozitesi göz önünde bulundurulmalı ve yüzeyi epoksi ile kaplanmalı ya da MCrAlY kaplamalarda olduğu gibi sinterleme işlemi yapılmalıdır (Tucker, 1994).

2.5.4. Ölçüye getirme

Termal spre yaygın olarak aşınmış parçaların yeniden ölçülerine getirilmesinde kullanılır. Zaman zaman aşınmış bölgeyi gidermek için düşük kalıntı gerilime sahip ve ucuz kaplama uygulanarak üstüne ince, aşınmaya karşı daha dirençli kaplama uygulanır. Termal spre kaplamalar ölçüye getirme amacıyla kullanıldıklarında özelliklerinin ana malzemeden farklı olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Kaplama parçaya ilave mukavemet kazandırmaz. Ayrıca parçanın yorulma mukavemetini de düşürebilirler (Tucker, 1994).

2.5.5. Termal uygulamalar

Plazma spre kaplamalar ve bazı diğer termal spre kaplamalar termal bariyer olarak kullanılabilir. Özellikle stabilize edilmiş zirkonyum kaplamalar gaz türbin yanma odalarında, sabit kanatçıklarda ve yanma silindirleri ile valflerinde etkinliği arttırmak ayrıca metal sıcaklığını ya da soğutma gereksinimini azaltmak amacıyla kullanılırlar. Lamelli ve poroziteli yapıları sebebiyle termal spre kaplamaların ısı iletkenlikleri anizotropik ve kaplandıkları malzemeye göre ciddi miktarda düşüktür (Tucker, 1994).

2.5.6. Elektriksel uygulamalar

Termal özelliklerde olduğu gibi lamelli ve poroziteli yapıları sebebiyle termal sprej kaplamaların elektrik iletkenlik özellikleri anizotropik ve uygulandıkları ana malzemeye göre düşüktür. Fakat elektrik iletkenliği ile birlikte aşınma direncinin istendiği durumlarda metalik veya iletken sermet kaplamalar kullanılır. Bu durumun tersine oksit termal sprej kaplamalar yalıtkan olarak kullanılır. Bu uygulamada önemli olan kaplama yüzeyini sızdırmaz hale getirerek yalıtkanlığı düşüren nemin kaplama içine nüfuziyetini engellemektir. Termal sprej kaplamalar aynı zamanda yüksek sıcaklık termokuplları elde etmek amacıyla da kullanılır. Çinko, kalay ve diğer metallerin elektrik ya da alev sprej tabakaları ile elektromanyetik veya radyo dalgalarının engellenmesi sağlanabilir (Tucker, 1994).

2.5.7. Sızdırmazlık kontrolü

Aşınabilir kaplamalar sızdırmazlık istenen bölgelerde kullanılabilir. Bu amaçla nispeten yumuşak olan nikel-grafit, alüminyum ve alüminyum-silisyum gibi kaplamalar kullanılır. Örneğin sabit bir kapağa sızdırmazlık kontrolü amacıyla aşınabilir kaplama uygulanır. Bu yüzeye sürten döner parça kaplamayı aşındırarak kendine bir yatak oluşturur, böylece döner parça ile sabit parça arası boşluk minimuma indirilerek sızdırmazlık kontrolü sağlanır (Tucker, 1994).

2.5.8. Diğer uygulamalar

Termal sprej kaplamalar nükleer yavaşlatıcı, katalitik yüzey elde etme ve sıcak izostatik preslerin yüzeyine film kaplanması gibi pek çok uygulamada da kullanılır. Ayrıca roket nozulu, döküm potası ve kalıp imali amacıyla da kullanılırlar (Tucker, 1994).

2.6. Termal Sprey Prosesleri

Termal sprej prosesleri alev sprej, elektrik ark sprej ve plazma sprej olmak üzere üç ana kategoriye ayrılır. Soğuk sprej daha sonra termal sprej proseslerine ilave olmuştur. Az miktarda ön ısıtma ve büyük miktarda kinetik enerji kullanır. Termal sprej prosesinin seçimini istenen kaplama malzemesi, kaplama performans gereksinimleri, maliyet, parça boyutu ve taşınabilirlik belirler. (Tucker, 1994).

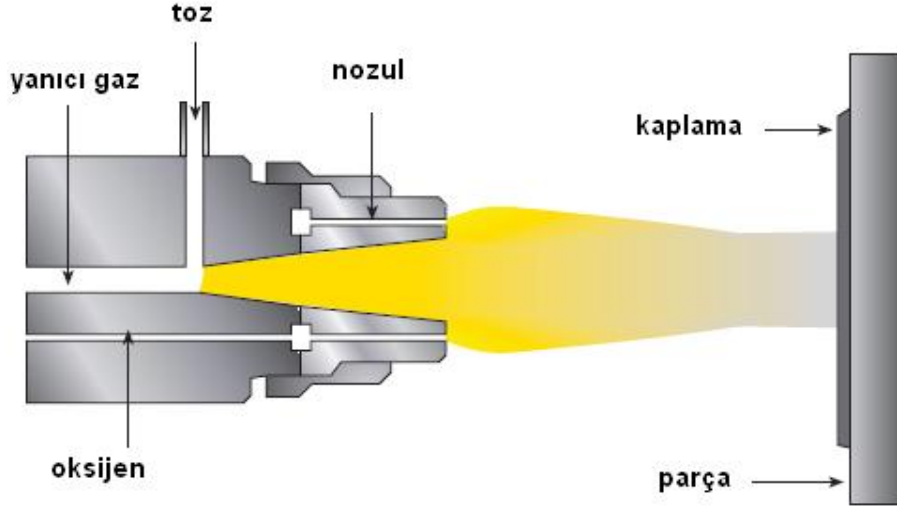
2.6.1. Alev sprej prosesleri

Alev sprej prosesleri düşük hızlı prosesler olan toz alev sprej, çubuk alev sprej ve tel alev sprej ile yüksek hızlı prosesler olan HVOF ve patlamalı tabanca yöntemlerini içerir.

Alev sprej prosesleri tüm termal sprej kaplamalar içerisinde en eski yöntemdir. Keşfi 1911 yılında İsviçre’de gerçekleşmiştir (Tucker, 1994). Kaplama malzemesi tel veya toz olabilir ve oksijen-yakıt karışımından oluşan gaz alevinin içine sürülür. Ergimiş ve atomize olmuş parçacıklar sprej tabancası nozulu ile yönlendirilen akışa dahil olurlar. Göreceli olarak düşük parçacık hızı nedeniyle, oksijene maruz kalma süresi uzadığından bu kaplamaların oksit miktarı bir miktar yüksektir. Tutunma dayanımı ve yoğunluk orta düzeydedir. Daha sonra yapılacak ergitme ile yoğunluk artırılabilir. Alev sprej kaplamalar, yapıların ve parçaların korozyon dayanımı, aşınmış şaftların yeniden boyutlandırılması gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır (Weidmann et al., 2005).

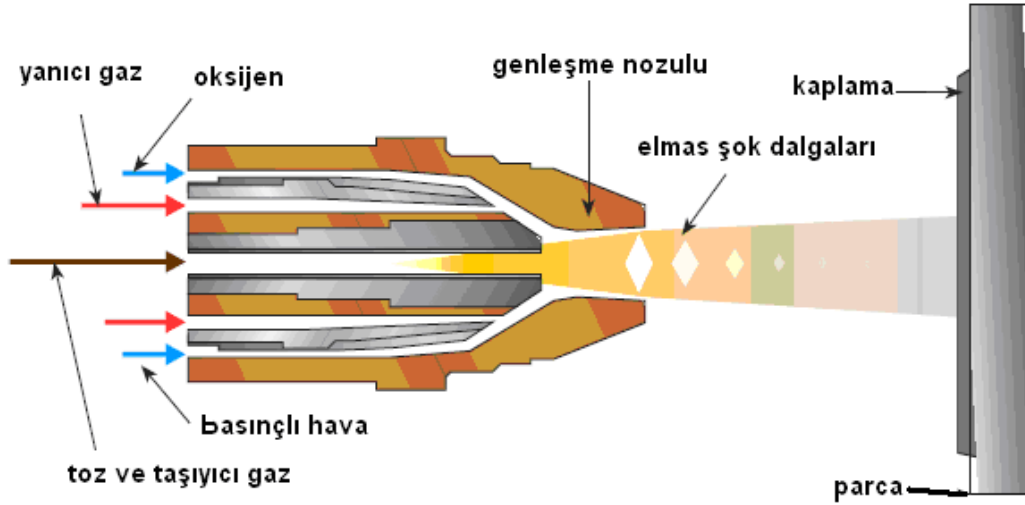
Toz alev sprej işleminde toz halindeki kaplama malzemesi oksijen-yanıcı gaz alevinin içine beslenir, burada ergir, alev ve basınçlı hava ile kaplanacak yüzeye taşınır. Şekil 2.6’da toz alev sprej sistemi gösterilmiştir. Yanıcı gazlar asetilen, propan veya hidrojen olabilir. Parçacık hızı diğer proseslere göre düşüktür (<100 m/s) ve kaplamanın bağ mukavemeti de yüksek hızlı proseslere göre düşüktür. Porozite yüksek olabilir ve

bu sebeple kohezif mukavemet düşüktür. Kaplama prosesi esnasında alevin çarpması sebebi ile ana malzeme yüzeyinin sıcaklığı biraz yüksek olabilir. (Sulzer Metco, 2005)



Şekil 2.6. Toz alev sprej sistemi (Sulzer Metco, 2005)

Yüksek hızlı oksji-yakıt (HVOF) prosesi roket teknolojisinden yararlanılarak 1980 lerin başında geliştirilmiştir. Yüksek hızlı oksji-yakıt prosesinde yanıcı gaz (hidrojen, propan, propilen gibi) ve oksijen 2600-3000°C arası bir yanma jeti oluşturmak için kullanılır. Yanma nozuldan önce bir odada çok yüksek basınçlarda gerçekleşir ve küçük bir çaptan (8-9 mm) çıkarken yüksek parçacık hızına sahip süpersonik gaz jetleri oluşur. Alev sprej prosesine göre mekanizma farklıdır ve tabancanın çıkışında jette genleşme olur. Proses sonucu oluşan kaplama çok yoğun ve iyi bağlanmış bir kaplamadır ki, bu da prosesi pek çok uygulama için cazip hale getirir. Yanıcı gaz olarak propan, propilen, asetilen, hidrojen ve doğal gaz kullanılabilir, aynı zamanda kerosen gibi sıvı yakıtlar da kullanılabilir. (Hermanek, 2004). Şekil 2.7’de HVOF prosesi gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Yüksek hızlı oksji-yakıt sistemi (Sulzer Metco, 2005)

2.6.2. Elektrik ark sprej

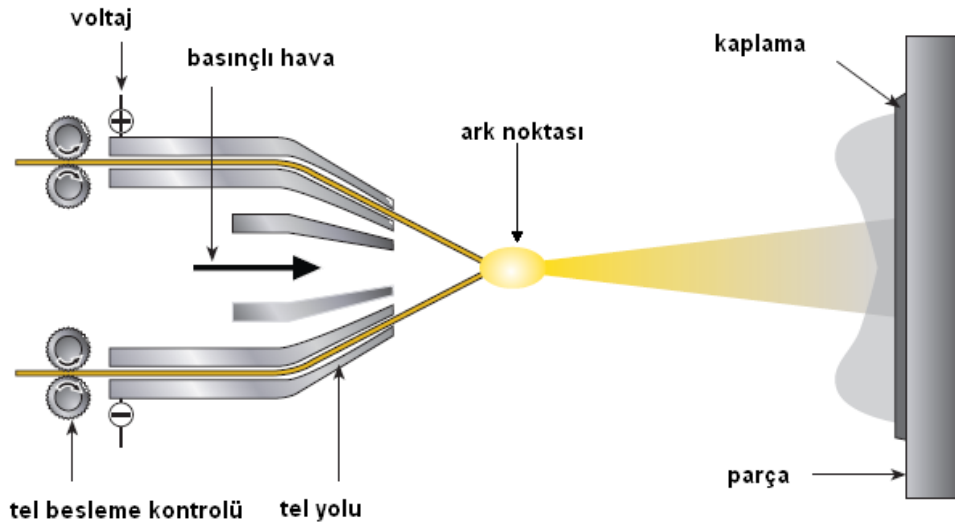
Elektrik ark sprej prosesinde (aynı zamanda tel ark sprej prosesi olarak da bilinir) iki harcanan tel elektrot yüksek akımlı (DC) enerji kaynağına bağlıdır ve tabancaya beslenirler. Tabancada birbirleri ile karşılaştıkları noktada iki telin ucu arasında ark oluşur, bu ark tellerin ucunu ertirir. Basınçlı hava yardımı ile ertirmiş metal parçacıklara ayrılır ve ana malzeme yüzeyine taşınır (Şekil 2.8) (Sulzer Metco, 2005).

Bu prosesin enerji etkinliği diğer termal sprej proseslerine göre yüksektir. Çünkü, giren bütün enerji metali ertirmek için kullanılır. Tellerin kesişim bölgesinin arkasında yüksek hızlı hava jetleri mevcuttur. Bu hava elektrik arkına sürekli beslenir ve ertirmiş metali ince parçalara ayırır. Aynı zamanda hava jeti parçacıkları ana malzeme yüzeyine taşır (Sulzer Metco, 2005).

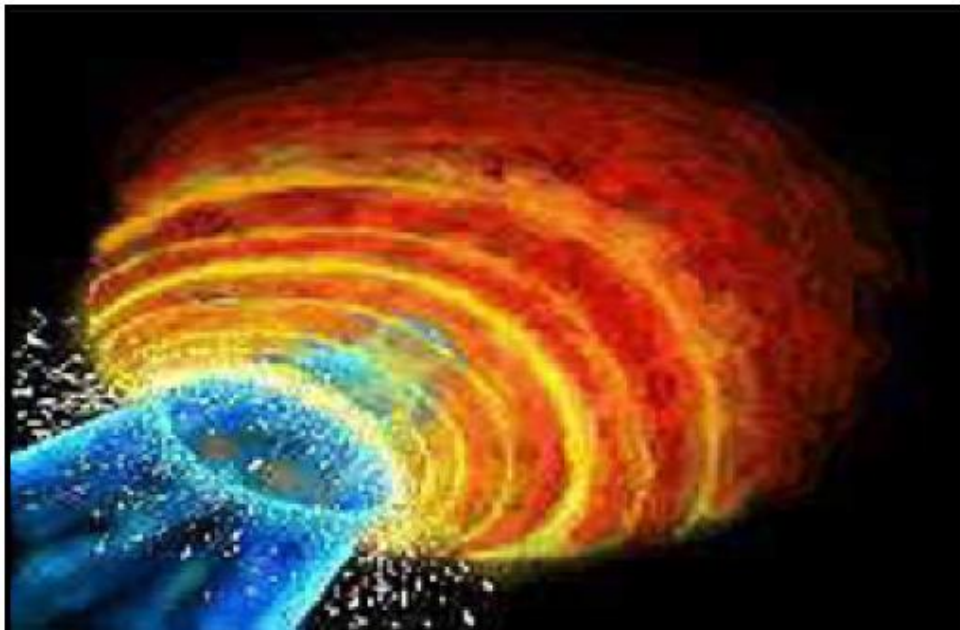
2.6.3. Plazma sprej

Maddenin katı, sıvı ve gaz hâlinden başka plazma olarak adlandırılan dördüncü bir hâli daha vardır. Plazma, yüklü parçacıklar içeren elektriksel açıdan iletken gazdır. Gaz atomları daha yüksek enerji seviyelerine doğru harekete geçirilirse dış yörünge

elektronlarının bazıları kopar ve pozitif yüklü iyon haline gelir. İyon ve serbest elektronların olduğu elektrik yüklü parçacık ortamına plazma denir. Plazma, eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulundurur. Şekil 2.9.'da plazma ortamı görülmektedir.

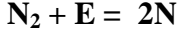


Şekil 2.8 Elektrik ark sprey sistemi (Sulzer Metco, 2005)

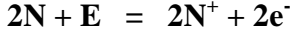


Şekil 2.9. Plazma ortamı (Evcin, 2006)

Azot gazı enerji girişı ile daha yüksek enerji seviyelerine doğru harekete geçirilirse;

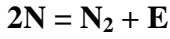
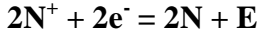


(Gaz halindeki azot +enerji, iki serbest azot atomu ortaya çıkarır)



(İki serbest azot atomu +enerji, iki azot iyonu ve 2 elektron ortaya çıkarır)

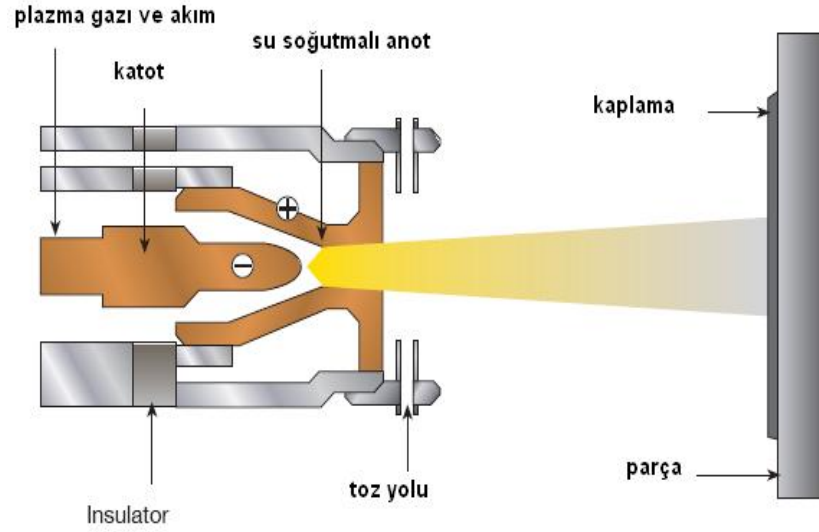
Bu işlemin tersi, plazma sprej de malzemelerin ergitilmesi için gerekli ısıyı ortaya çıkarır. Plazma sprej prosesinde gazların plazma formuna dönmesi için gerekli enerji elektrik deşarjı ile sağlanır. Bu enerji kesilirse serbest elektronlar ve iyonlar tekrar birleşir ve ortaya ısı ile ışık enerjisi çıkar.



Plazma sprej için gerekli plazma genelde argon, helyum, azot ve hidrojen gazların birinin veya karışımlarının kullanımı ile elde edilir. Termal sprej işleminde kullanılan plazma alevleri ile bilinen malzemelerin ergime sıcaklığının (ve buharlaşma sıcaklığının) çok üzerinde 7.000°C ile 20.000°C arası sıcaklık elde edilir. Plazma ile çok büyük miktarlarda enerji elde edilebilir. Azot ve hidrojen diatomik gazlardır. Bunların plazması monoatomik gaz olan argon ve helyuma göre daha yüksek enerji içerir. Doğru akımlı plazma sprej prosesi termal sprej prosesleri arasında sprej yapılan malzemeye göre inert gaz kullanması, yüksek gaz hızları ve çok yüksek sıcaklıklar sebebi ile en esnek olanıdır (Crawmer, 2004b).

Şekil 2.10.'da DC plazma sprej tabancası şematik olarak gösterilmiştir. Bütün DC plazma sprej tabancaları aksenal hizalı katot elektrot (%1 veya 2 toryumlu tungsten) ve anot nozul (oksijensiz saf bakır) içerir. Katodun tungstenden yapılmasının iki sebebi vardır: Birincisi ergime sıcaklığının yüksek olması (>3500°C), ikincisi ise iyi bir termiyonik yayıcı olması nedeniyle kolaylıkla elektronları serbest bırakarak ark deşarjını sağlamasıdır. Yüksek elektron akım yoğunlukları sebebi ile toryumlu tungsten uçlar ergime sıcaklığına yakın sıcaklıklarda çalışır, bu sebeple katodun ucu lokal olarak ısınır. Su soğutmalı bakır anot/nozul ark alanını darlaştırır ve stabilize eder. Ayrıca genleşen ısınmış gazları hızlandırır. Doğrudan su ile soğutulmaları sebebi ile yüksek

sıcaklıktaki arka dayanabilmesi, katodun yüksek ergime sıcaklığına sahip olması ve iletkenliği ile alakalıdır. DC akımlı plazma sprej sistemleri ergimeyi önlemek, katot ve nozul erozyonunu minimize etmek için su ile soğutulurlar. Plazmayı oluşturan gazlar tabancanın arka tarafından girer. Bu gazlar ark bölgesine gaz enjektöründen geçerek girer ve bu enjektör gaza vorteksli bir akış sağlar. Arkın etrafından ve içinden geçerken ark gazları ısıtılır. Isınan gazlar radyal ve aksenel olarak genişler, genişlerken hızlanır ve nozuldan çıkarlar. Ark bölgesindeki ve tabancanın nozul çıkışındaki basınç oranına bağlı olarak gazlar (plazma jet) ya ses altı hızlarda ya da ses üstü hızlarda genişler. Çoğu tabanca parçacık hızını arttıran ses üstü genişleme hızını sağlamak için yakınsak/ıraksak nozul kullanır. (Crawmer, 2004b)

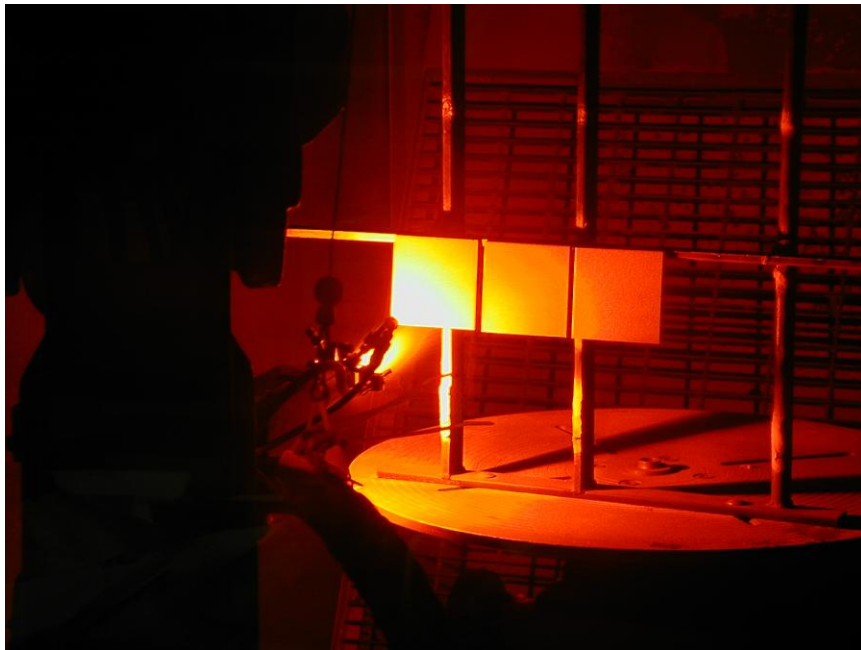


Şekil 2.10. Plazma sprej tabancası (Sulzer Metco, 2005)

2.6.3.1. Konvansiyonel plazma sprej

Konvansiyonel plazma sprej prosesi genelde hava ya da atmosferik plazma sprej (APS) olarak adlandırılır. (Şekil 2.11.) Tozun ısıtıldığı bölgede plazma sıcaklıkları 12.000°C ile 16.000°C arasında değişir. Plazma elde edebilmek için genelde argon veya argon hidrojen karışımı DC elektrik arkı ile aşırı ısıtılır. Toz kaplama malzemesi taşıyıcı

gaz (inert gaz) yardımı ile beslenir ve plazma jeti ile parçaya doğru yönlendirilir. Ana malzeme sıcaklığını 95-205°C arasında tutmak için soğutma ya da püskürtme hızının ayarlanması gibi düzenlemeler gerekebilir. Ticari plazma sprej tabancaları 20 ile 200 kW arasında çalışır. Püskürtme hızları tabanca tasarımına, plazma gazlarına, toz beslemeye ve boyut, dağılım, ergime noktası, morfoloji, yoğunluk gibi malzeme özelliklerine bağlıdır.



Şekil 2.11. Plazma sprej uygulaması

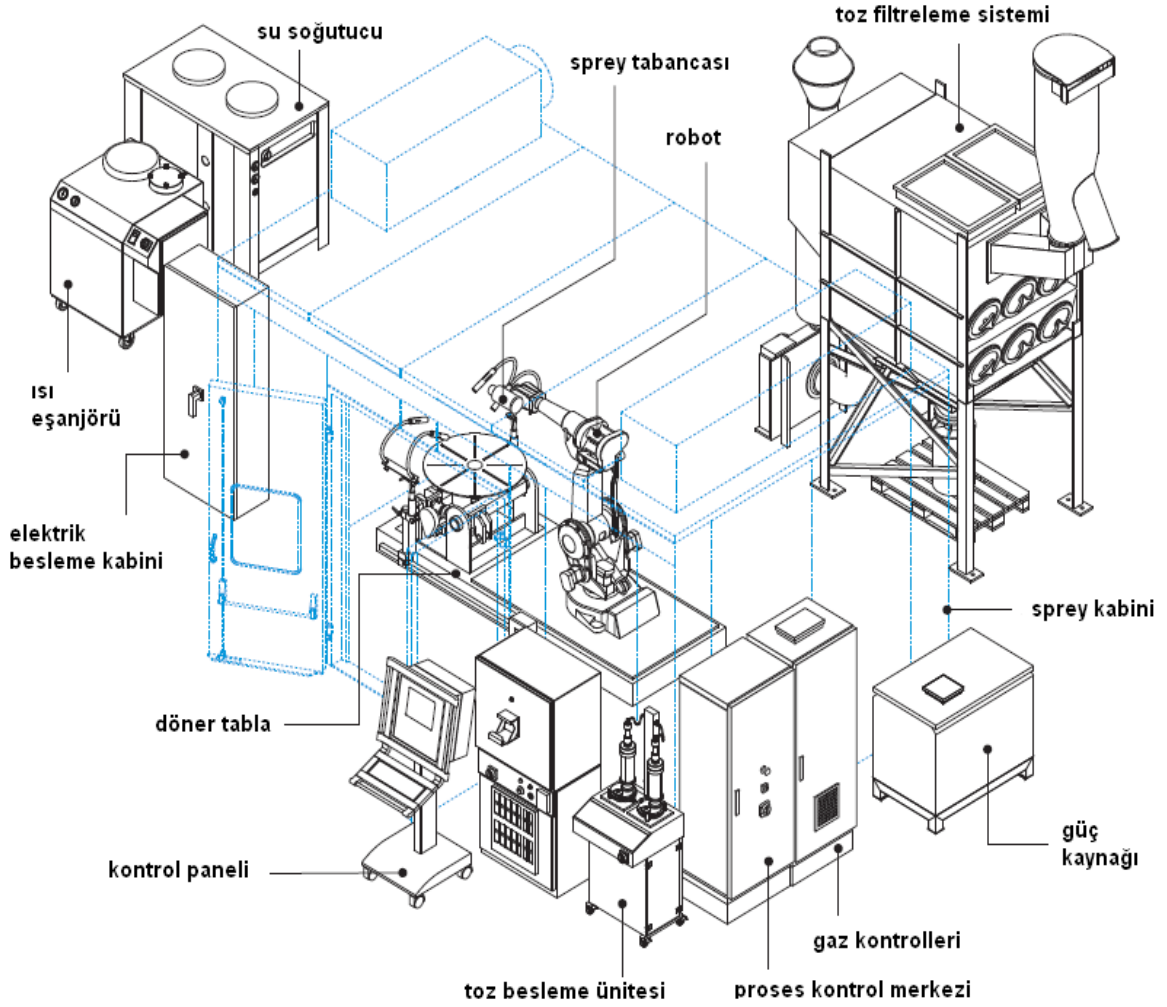
Çizelge 2.2.'de yaygın olarak kullanılan termal sprej prosesleri ile ilgili genel özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.2 Termal sprey proseslerinin karşılaştırılması (Sulzer Metco, 2005)

Özellik	Kaplama tipi	Toz Alev Sprey	HVOF	Elektrik Ark Sprey	Plazma Sprey
Gaz Sıcaklığı [°C]		3000	2500 - 3000	4000	12000 - 16000
Püskürtme Hızı [kg/h]		2 - 6	1 - 9	10 - 25	2 - 10
Parçacık Hızı [m/s]		50 ye kadar	700 e kadar	Yaklaşık 150	450 ye kadar
Bağ Mukavemeti [MPa]	Demir Esaslı Alaşımlar	14 - 21	48 - 62	28 - 41	21 - 34
[MPa]	Demir dışı Alaşımlar	7 - 34	48 - 62	14 - 48	14 - 48
[MPa]	Seramikler	14 - 34	---	---	21 - 41
[MPa]	Karbürler	34 - 48	83+	---	55 - 69
Kaplama Kalınlığı [mm]	Demir Esaslı Alaşımlar	0.05 - 2.0	0.05 - 2.5	0.1 - 2.5	0.4 - 2.5
[mm]	Demir dışı Alaşımlar	0.05 - 5.0	0.05 - 2.5	0.1 - 5.0	0.05 - 5.0
[mm]	Seramikler	0.25 - 2.0	---	---	0.1 - 2.0
[mm]	Karbürler	0.15 - 0.8	0.05 - 5.0	---	0.15 - 0.8
Sertlik [HRc]	Demir Esaslı Alaşımlar	35	45	40	40
	Demir dışı Alaşımlar	20	55	35	50
	Seramikler	40 - 65	---	---	45 - 65
	Karbürler	45 - 55	55 - 72	---	50 - 65
Porozite [%]	Demir Esaslı Alaşımlar	3 - 10	< 2	3 - 10	2 - 5
	Demir dışı Alaşımlar	3 - 10	< 2	3 - 10	2 - 5
	Seramikler	5 - 15	---	---	1 - 2
	Karbürler	5 - 15	< 1	---	2 - 3

2.6.4. Sistem gereksinimleri

Kaplama sistemlerinde sprej tabancasının yanında pek çok ekipman da gerekmektedir. Şekil 2.12.'de temel kaplama sistemi görülmektedir. Sprej kabini ses ve tozun proses çevresindeki alanı etkilemesini engeller. Kabinde enerji, gaz ve prosesin kontrolü ile izlenebilmesi için giriş noktaları mevcuttur. Genelde tabanca robot üzerine monte edilir. Kaplanacak parça ise genelde tabla veya döner tabla üzerine yerleştirilir. Silindirik parçaların kaplanması esnasında döner tabla kullanılması gerekir. Robot ve açılı hareket edebilen döner tabla konfigürasyonu ile çok karmaşık şekillere termal sprej uygulanabilir.



Şekil 2.12. Temel kaplama sistemi (Sulzer Metco, 2005)

Ana malzeme yüzeyine yapışmayan toz ve yanmadan kaynaklanan dumanın uzaklaştırılması için havalandırma sistemi mevcuttur. Havalandırma sisteminde tozların çevreye verilmesini engelleyecek şekilde filtre olmalıdır. Genellikle kaplama sistemlerinde ısınan ekipmanların (nozül, tabanca, elektrik kabloları, vb) soğutulması su ile yapılır. Ayrıca ana malzeme yüzeyinin fazla ısınmaması için de yardımcı hava kullanılabilir. Besleme ünitesi kendi üzerinde bulunmayan tabancalar için, ayrıca toz besleme üniteleri mevcuttur. Tozun tabancaya taşınması toz alev sprey prosesinde havayla, plazma sprey prosesinde ise kullanılan plazma gazı (argon vb.) ile olur (Sulzer Metco, 2005).

2.7. Kaplama Öncesi İşlemler

Termal sprey uygulama öncesi ana malzeme yüzeyinin uygun şekilde hazırlanması çok önemlidir. Kaplama öncesi yapılan işlemlerin yeterli olmaması kaplamanın kalitesini düşürür veya kaplamanın beklenenden daha kısa sürede hasarlanmasına ya da kalkmasına sebep olabilir.

2.7.1. Temizleme

Ana malzeme yüzeyinin hazırlanmasındaki birinci adım temizlemedir. Temizleme işlemi ile yüzeydeki nem, boya, yağ, gres, pas gibi kirler uzaklaştırılır. Ana malzeme yüzeyi ile kaplama arasında kalan kirleticiler metal-metal temasını düşürerek yapışmayı (bağlanma mukavemetini) düşürür.

2.7.2. Yüzey pürüzlendirme

Temizleme sonrası parça yüzeyinin kaplamaya hazırlanması için en önemli işlem yüzeyin pürüzlendirilmesidir. İyi bir kaplama yapışması elde edebilmek için en önemli adımdır. Yüzeyi pürüzlendirmek için kullanılan metotlar şunlardır:

- Kuru Kumlama
- Makinalama veya makro pürüzlendirme
- Bağ kaplama uygulaması

Sıklıkla bu metotların kombinasyonu kullanılır. Örneğin, kumlanmış yüzeyin üzerine bağ kaplama atılması veya makro pürüzlendirilmiş yüzeyin üzerine kumlama maksimum yapışma mukavemetini sağlar. Uygun şekilde temizlenmiş ve pürüzlendirilmiş yüzey ergimiş veya plastik hale gelmiş kaplama parçacıklarının çarpması sonucu oluşan ilk tabaka için kritik arayüzeyi oluşturur. Uygun şekilde hazırlanmış yüzey aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- Temizlik ana malzeme ile püskürtülen parçacıklar arasında atomlararası ve metalurjik etkileşimler sağlayan metal-metal temasını sağlar.
- Yüzey pürüzlendirme parçacık ana malzeme teması için yüzey alanını dolayısıyla atomik ve metalurjik etkileşimi artırır.
- Yüzey pürüzlendirme mekanik kilitleme için imkan sağlar.

2.7.3. Maskeleme

Kaplanacak hedef bölgenin civarındaki veya içindeki kaplanmayacak alanları maskelemek için pek çok metot kullanılır. Bunlar;

- Metal takım ile maskeleme
- Isıya dayanıklı bant ile maskeleme
- Maskeleme sıvıları kullanma
- Mantar ile maskeleme

Metal takım ile maskelemede takımın termal genişleme katsayısı önemlidir. Takımın parçaya veya kaplamaya göre hızlı soğuması veya ısınması kaplamayı etkiler. Metal takımların kaplanan bölge ile bağ kurmamasına dikkat edilmelidir. Bu sebeple metal takımların üzerine de bant veya maskeleme sıvısı ile maskeleme yapılabilir.

Isıya dayanıklı bant ile maskeleme yaygın kullanılan ve kullanışlı bir maskeleme metodudur. Fakat maskeleme için kullanılan bantın ana malzeme yüzeyine yapışma mukavemeti termal sprej işlemi esnasında oluşan basınç ve sıcaklıktan etkilenmeyecek kadar yüksek olmalı, bant proses esnasında maskelediği bölgeden kalkmamalıdır. Bantların termal sprej işlemi sonrası yüzeyden temizlenmesi kolaydır.

Maskeleme sıvıları uygulama açısından kolaylık sağlar, fakat kaplama işlemi esnasında ısınmaları, kaplama işlemi sonrası sökülmelerini zorlaştırır.

Mantarlar genellikle deliklerin maskelemesinde kullanışlıdır. Deliğin çapına uygun olarak kesilerek yerleştirilirler. Kaplama işlemi sonrası özellikle borularda bu tür maskeleme malzemesi veya artığı kalmadığında emin olunmalıdır.

2.7.4. Ön Isıtma

Termal sprej işlemi öncesi ana malzeme yüzeyine ön ısıtma uygulanması normal ve kabul edilen bir uygulamadır. Ön ısıtma ile yüzeydeki nem uzaklaştırılır, parçacıkların ilk çarptığı yüzeyin sıcak olması sağlanır. Genel bir kural olarak parça yüzeyine 100-150°C lik ön ısıtma uygulanması yüzeydeki nemi uzaklaştırmak için yeterlidir. Soğuk bir ana malzeme yüzeyine göre sıcak veya ılık yüzeye ergimiş veya yarı ergimiş parçacıklar çok daha iyi yapışırlar. Ön ısıtma sıcaklığına ulaşılır ulaşılmaz kaplamaya başlanmalıdır. Yüzeyin ön ısıtılması için gaz torcu kullanılabilir, genelde sprej tabancası ön ısıtma için kullanılır. Eğer ana malzeme ön ısıtmaya müsaade etmiyorsa parçalar nem miktarı %30 un altında olan kuru alanda oda sıcaklığında tutulabilir.

Ön ısıtma termal sprej öncesi iyi bir uygulama olmasına rağmen bazı malzeme gruplarında oksit oluşturma ihtimali ile tercih edilmez. Bu malzemeler alüminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımları, titanyum ve magnezyum alaşımlarıdır. Bu malzemelerde ön ısıtma oksit filmi oluşumunu artırır. Paslanmaz çelikler, süperalaşımlar ve nikel

alaşımlarının en iyi ön ısıtma sıcaklığı 100°C civarındadır. Ön ısıtma sonrası hemen kaplama işlemine başlanmalıdır.

2.8. Tungsten Karbür Kaplamalar

Tungsten (volfram) periyodik cetvelin 74 numaralı elementine verilen isimdir (Şekil 2.13.). Kimyasal sembolü W'dur. Endüstriyel uygulamalar açısından iyi özelliklere sahip bir metaldir. Karbondan sonra en yüksek ergime sıcaklığına sahip olmasının yanında mükemmel yüksek sıcaklık mekanik özelliklerine ve bütün metaller içinde en düşük genleşme katsayısına sahiptir. Tungsteni kaynatmak için yaklaşık 5700°C civarında sıcaklığa ihtiyaç vardır ve bu sıcaklık güneşin yüzey sıcaklığına karşılık gelir. 19.25 g/cm³ lük yoğunluğu ile en ağır metaller arasındadır. Bütün metaller arasında en düşük buhar basıncına sahiptir. (Lassner et al. 2009).

Nb	Mo	Tc
Ta	74 W 3.422°C	Re
Pa	U	Np

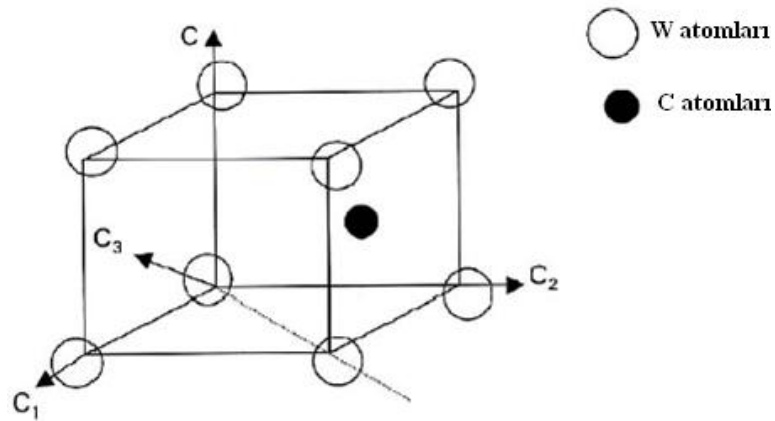
Şekil 2.13 Tungsten (ITIA, 2010)

2.8.1. Tungsten karbür

Tungstenin 1781'de keşfinden sonra tungsten karbürün sanayide kullanımı 150 seneyi bulmuştur. Tungsten karbür sertliği, yüksek ergime sıcaklığı ve yüksek aşınma direnci ile kullanışlı bir malzemedir. Bu özellikleri sebebi ile tungsten karbür

endüstriyel kaplamalara ihtiyaç duyulan uzun ömürlü takımlarda tercih edilen bir malzemedir (Exner, 1979).

Sertleştirilmiş karbürdeki ana faz monokarbürdür (WC). Birim hücrede iki atom içeren basit hegzagonal kristal yapısına sahiptir (Şekil 2.14.) ve 0,976'lık c/a oranı vardır. WC kristal yapısı polardır ve kristal yapı içindeki düzlemler üçgen şekilli kristal yapısını oluşturur. Bu kristal yapı sayesinde tungsten monokarbürün sertlik gibi pek çok özelliği anizotropiktir. Fakat sinterlenmiş malzemede tanelerin rastgele oryantasyonu sonucu anizotropi görülmez (Exner, 1979).

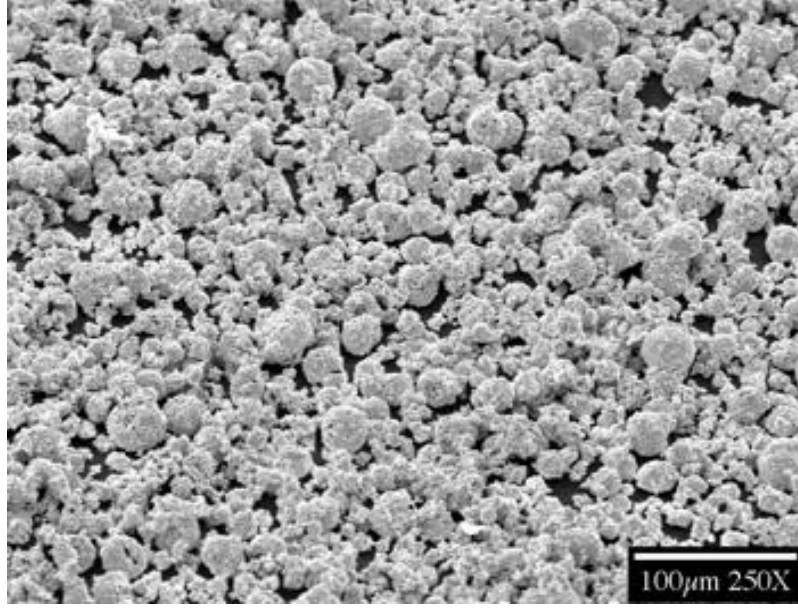


Şekil 2.14. Hegzagonal kübik paket yapısına sahip tungsten karbür kristal yapısı (French et al., 1965)

2.8.2. Sinterlenmiş karbür (WC-Co)

Tungstenin ana kullanımı sinterlenmiş karbür üretimidir. Genelde sert metal olarak adlandırılan sinterlenmiş karbür çok sert mono karbür (WC) taneciklerinin dayanıklı kobalt bağlayıcı matriks içinde sıvı faz sinterlemesi ile birleştirilmesi sonucu oluşur. Tungsten karbür ve bağlayıcı olarak kullanılan metalik kobalt sistemi sadece özellikleri ile değil aynı zamanda sinterleme davranışı sebebi ile de iyi bir sistemdir. Tungsten karbürün kobalt içinde yüksek sıcaklıkta iyi çözünmesi ve WC'ün sıvı kobalt bağlayıcı tarafından iyi ıslatılması sıvı faz sinterlemesi esnasında mükemmel

yoğunlaşma ve gözeneksiz yapı ile sonuçlanır (Şekil 2.15.). Bunun sonucu olarak yüksek mukavemetli, dayanıklı ve yüksek sertlikte malzeme elde edilir (Davis, 2004).



Şekil 2.15. WC-12Co Tozu (Buffalotungsten, 2010)

1920'lerin başlarında Osram Alman elektrik ampul şirketinin tungsten tellerin üretiminde kullanılan pahalı elmas çekme kalıplarının yerine alternatifler araştırması tungsten karbür üretiminin başlangıcı olarak kabul edilebilir. Bu denemeler sinterlenmiş karbürün keşfi ile sonuçlanmıştır. 1930'ların başlarında tungsten karbür-kobalt (sermet) malzemeler dökme demirin kesilmesinde ve işlenmesinde başarılı olarak kullanılmıştır, daha sonra firmalar çelik işleme takımlarına tungsten karbür-kobalt malzemeye ilave olarak titanyum ve tantalyumun karbürlerini ilave etmişlerdir. Titanyum karbür ve tantalyum karbürün ilavesi ile sert metallerin yüksek sıcaklık aşınma direnci, yüksek sıcaklık sertliği ve oksidasyon stabilitesi ciddi miktarda artmıştır (Davis, 2004).

Kobalt içeriği % 6-12 olan yapı içine bir miktar krom (% 4-12) ilavesi ile tungsten karbürler daha düşük sıcaklıklarda (540°C'nin altı) kullanılırlar, çünkü sıcaklık arttıkça tungsten karbürün yüksek sıcaklık sertliği ve oksidasyon direnci hızla düşer. Tungsten

karbür titanyum karbür kullanımında (TiC) hızlı bir artış vardır. TiC yüksek sıcaklık sertliğini yükseltir ve düşük sürtünme katsayısı sağlar. 1960'lerden 1980'lere kadar pek çok tungsten karbür kaplama plazma sprey prosesi ile uygulanmıştır (Davis, 2004).

2.8.3. Tungsten karbür kaplamalar

Günümüzde sürtünme ve aşınmanın önemli rol oynadığı makinalama, metal şekillendirme, yataklar ve dişliler gibi uygulamalarda gelişmiş malzeme ihtiyacı vardır. Mevcut cihaz ve bileşenlerinin ömrünü uzatmak için yeni malzemeler araştırılmakta ve mevcut malzemelerin özellikleri geliştirilmektedir. Tungsten karbür bu gereksinimleri karşılayabilecek bir malzemedir (Bonny et al., 2004).

Yumuşak bir malzeme üzerine uygulanan sert kaplama tribolojik olarak çok faydalı bir kombinasyondur. Yumuşak bir malzeme üzerindeki sert kaplama sert bir parçacıktan meydana gelebilecek çizilmeye karşı iyi bir koruma sağlar. Bu sebeple karbür kaplamalar abrasif ve erozif aşınmayı içeren uygulamalarda kullanılır (Lovelock, 1998).

Tungsten karbür kaplamalar yüksek sertlik, korozyon direnci ve iyi aşınma özellikleri sebebiyle koruyucu sert kaplamalar olarak kullanılırlar. Plazma sprey, yüksek hızlı oksijen-yakıt sprey (HVOF), kimyasal buhar biriktirme (CVD) ve fiziksel buhar biriktirme (PVD) gibi proseslerle tungsten karbür kaplamalar elde edilebilir (Esteve et al., 1999). Tungsten karbür-kobalt esaslı malzemeler sinterlenmiş formları ile erozyon, sürtünme ve aşınma uygulamalarında özellikle termal sprey işlemleri ile yaygın olarak kullanılmaktadır. Sert WC parçacıklar aşınmaya dirençli ana bileşeni oluştururken kobalt bağlayıcı tokluk ve kohezyon sağlar. Sertlik, aşınma direnci ve mukavemet gibi özellikler WC tane boyutu ve karbür faz ile bağlayıcı matriksin hacimsel % oranlarından, termal sprey kaplamalarda da poroziteden etkilenir (Lovelock, 1998). Tungsten karbürün kobalt içeriği ve bazı karbür ilavelerinin yanı sıra tungsten karbür tane boyutu ile oynayarak sert metallerin sertlik, tokluk, mukavemet, aşınma direnci ve termal iletkenliği değiştirilebilir. 1920'lerin ortasında tungsten karbür tane boyutu 2 ile 5 µm arasındayken günümüzde 0.15 ile 50 µm arasında değişebilmekte hatta çok özel

uygulamalarda 150 µm tane boyutu kullanılmaktadır. Çizelge 2.3.'de değişik sert metal bileşimleri için özellikler verilmiştir (Voyer et al., 1999).

Çizelge 2.3. Bazı Sert Metallerin Özellikleri (Voyer et al., 1999).

WC-Co ve WC-(W,Ti,Ta,Nb)C-Co Sert Metaller					
Bileşim (%)	Sertlik HV30	Basma Mukavemeti (N × mm ⁻²)	Kopma Mukavemeti (N × mm ⁻²)	Kırılma Tokluğu (MPa × m ^{1/2})	Termal Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ × K ⁻¹)
WC-4Co	2000	7100	2000	8.5	5.0
WC-6Co/S*	1800	6000	3000	10.8	6.2
WC-6Co/M**	1580	5400	2000	9.6	5.5
WC-6Co/C	1400	5000	2500	12.8	5.5
WC-25Co/M	780	3100	2900	14.5	7.5
WC-6Co-9.5 (Ti,Ta,Nb)C	1700	5950	1750	9.0	6.0
WC-9Co-31 (Ti,Ta,Nb)C	1560	4500	1700	8.1	7.2

S* = mikron altı; M** = ince/orta; C*** = kaba

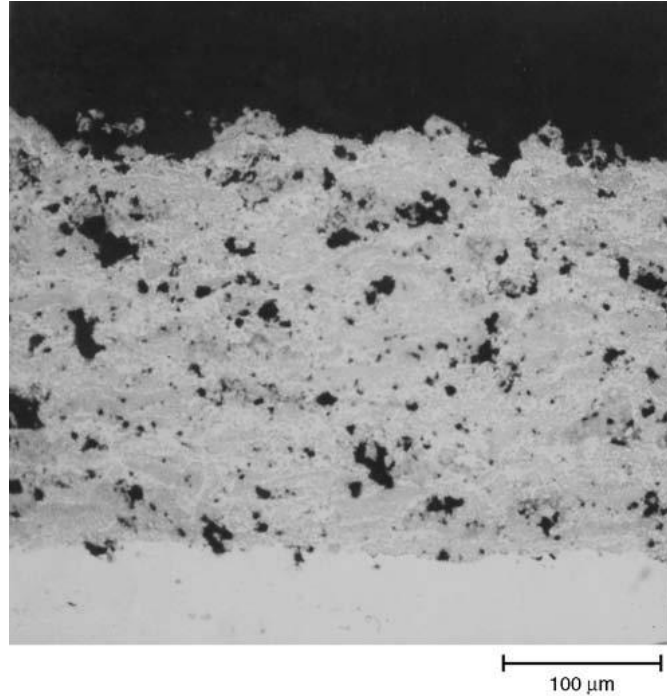
Tungsten karbür malzemeler için seri üretim çok pahalıdır ve küçük parçalar ile sınırlıdır. Fakat pek çok aşınma uygulamasında önemli olan sadece temas yüzeyi özellikleridir ve parçanın aşınma direncini belirler. Bu sebeple termal sprej gibi kaplama işlemi uygulanmasının aşınmaya dirençli parça elde edilmesinde pek çok avantajı vardır (Voyer et al., 1999).

2.8.4. Termal sprej ile tungsten karbür kaplama uygulamaları

Parça yüzeyinin tribolojik özellikleri yani diğer adıyla aşınma direnci ve sürtünme özellikleri çoğu durumda kullanım fonksiyonlarını belirler. Yüzey özelliklerini geliştirmek için termal sprej prosesleri ile sert, aşınmaya dirençli kaplamalar elde edilebilir. Bu kaplamaların kullanımı ile parçanın ömrünü, güvenilirliğini ve emniyetini

arttırmak mümkündür. Termal sprej ile uygulanmış kaplamaların kullanım alanlarını, ömürlerini ve davranışlarını belirleyebilmek için kaplama özellikleri, mikroyapı proses parametreleri ve kullanılan proses arasındaki ilişkileri iyi tespit etmek gerekir (Erickson et al., 2001).

Tungsten karbür yüksek sertlik, yüksek ergime noktası, aşınma direnci, termal şok direnci ve oksidasyon direnci gibi özellikleri bir araya getiren gelişmiş bir seramik malzemedir. Bu özellikler tungsten karbürü kesme ve aşınma direnci uygulamaları için ideal hale getirir. Sinterlenmiş tungsten karbür sermetler (kobalt bağlayıcı ile birlikte) abrasif ve erozif aşınmaya direnç istenen uygulamalarda sıkça kullanılır. Bu malzemeler plazma sprej (Şekil 2.16), yüksek hızlı oksijen-yakıt, soğuk sprej, ılık sprej, patlamalı tabanca gibi proseslerle uygulanabilir (Koutsomichalis et al., 2008).



Şekil 2.16. Plazma sprej prosesi ile kaplanmış WC-Co Kaplama (Davis, 2004)

Şekil 2.17 ve 2.18’de titanyumdan imal edilmiş jet motor parçası olan egzost dış flaplar üzerindeki tungsten karbür kaplama uygulanmış bölge gösterilmiştir. Burada

birbiri üzerinde çalışan flaplarda abrasif aşınma meydana gelmekte ve bu flapların bir biri üzerine çalışan bölgelerin her iki kısmına da 0,250-0,300 mm kalınlığında tungsten karbür kaplama uygulanmaktadır.



Şekil 2.17. Jet motor egzost flapları ve WC kaplamalı bölge



Şekil 2.18. Flaplarda birbiri üzerinde çalışan ve WC kaplamalı bölgeler

WC-Co tozlar yüksek sıcaklıktaki aleve maruz kaldıklarında WC'ün bozunması ve çözünmesi artar. Bu sebeple bu kaplamalarda lamelli şekilde çok fazlı mikroyapı oluşur. Bu yapı WC kristalleri, ikincil fazları (W_2C ve W) ve amorf kırılgen kobalt esaslı bağlayıcı fazı içerir (Sanchez et al., 2009). %6.13 C içeren WC'ün 24 GPa mikro sertliği vardır, %3.16 C içeren W_2C mikro sertliği 30 GPa civarındadır ve WC'e göre çok daha kırılgen'dir. W_2C 1250°C'nin altında yarı kararlıdır ve yavaş soğutulsa bile WC-Co yapı içinde genellikle yer alır. Yarı kararlı fazlar γ veya WC_{1-x} hızlı soğutma olursa oda sıcaklığında oluşabilirler. Bu sebeplerden dolayı WC-Co yüksek sıcaklık oksidasyonu/dekarbürizasyonu nedeniyle plazma sprej gibi termal sprej işlemi ile

uygulanması zor bir malzemedir. Yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen işlemlerde bazı karbürlerin kobalt matrisinde çözünmesi sebebiyle bileşimde değişim olabilir. Ayrıca WC-Co kaplamaların plazma sprey ile uygulaması esnasında H_2 ile reaksiyona girmesi sebebiyle WC'ün daha gevrek ve kırılabilir olan W_2C , WO_3 , $Co_xW_yC_z$ ve hatta tungstene dekarbürizasyonu ve oksidasyonu gerçekleşir (Lovelock, 1998).

Plazma sprey işlemi ile kaplama esnasında karbon kaybı mekanik özelliklerde ve aşınma direncinde düşüşe sebep olur. Yapı içinde oluşan ikincil fazlar sertlik, tokluk ve aşınma direnci özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Bu sebeple yüksek miktarda tungsten mono karbür (WC) içeren yapı istenir. Kaplama tozunun kimyasal özellikleri, tane boyutu, faz içerikleri ve karbür tane boyutu kaplama içindeki faz dağılımını belirler. Bu kaplamalarda iyi bir aşınma direnci için tercih edilen morfoloji iyi dağılmış ince ve sert karbür parçacıklardır (Sanchez et al., 2009).

Tungsten karbür kaplamalarda WC miktarı arttıkça aşınma direnci artar ve akma mukavemeti düşer. Uygulanan sprey prosesine bağlı parçacık sıcaklığı ve hızı çok fazla değişmektedir. Plazma spreydeki yüksek sıcaklıklar sebebiyle parçacık sıcaklıkları çok yüksektir ve tozlar neredeyse tamamen ergimiştir. Plazma sprey ile elde edilmiş kaplamalarda yüksek kalıntı çekme gerilimleri mevcuttur (Wielage et al., 2004).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, deneylerde kullanılan numuneler, bu numunelere uygulanan test ve değerlendirme yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Deneysel çalışmanın esasını;

- Farklı parametrelerle kaplanmış numunelerin elde edilmesi,
- Tüm bu numunelere belirlenmiş test ve ölçüm metotlarının uygulanması oluşturmaktadır.

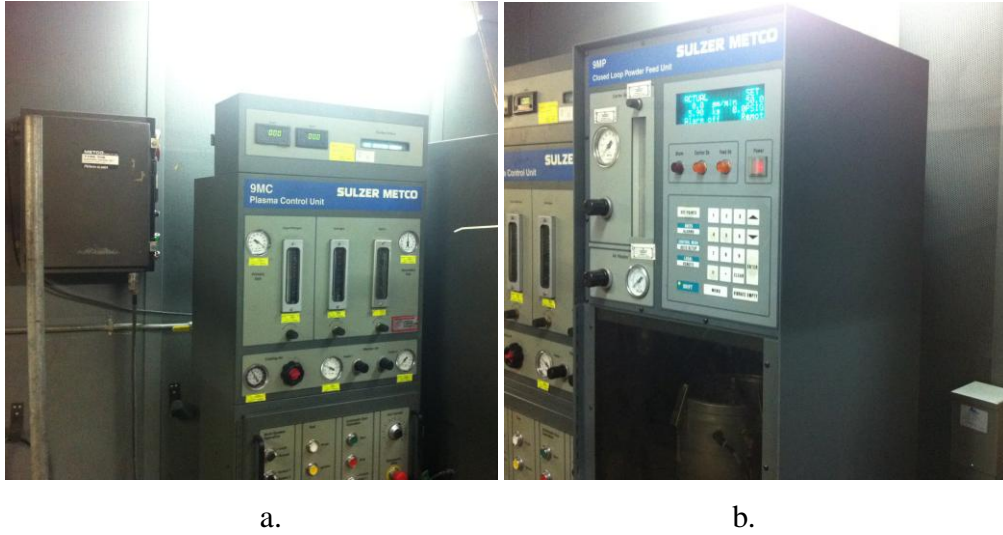
3.1. Ön hazırlık

Plazma sprey kaplama işleminde kaplamanın ana malzemeye daha iyi bağlanması amacıyla, numuneler kaplama işlemi öncesi kumlanmaktadır. Kumlama işleminin iki temel fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlar ana malzeme üzerinde bulunabilecek oksit, kir vb. malzemelerin uzaklaştırılması, kaplamanın tutunmasını sağlayacak pürüzlü bir yüzeyin elde edilmesi ve yüzey alanının artırılmasıdır. Bu amaçla numuneler kapalı emiş tipli bir üniteye 36 gritlik alüminyumoksit (Al_2O_3) ile kumlanmıştır. Kumlama parametreleri olarak; basınç 1,37 bar, mesafe 150-175 mm, açı 60-75 derece ve süre 45 sn/numune seti olarak seçilmiştir. Kumlama sonrası yüzeyin kirlenmesini önlemek amacıyla numuneler kumlama sonrası bekletilmeden 20 dakika içerisinde kaplanmıştır. Kumlama sonucu elde edilen yüzey pürüzlülük değeri 3.0-3,37 mikron/mm'dir.

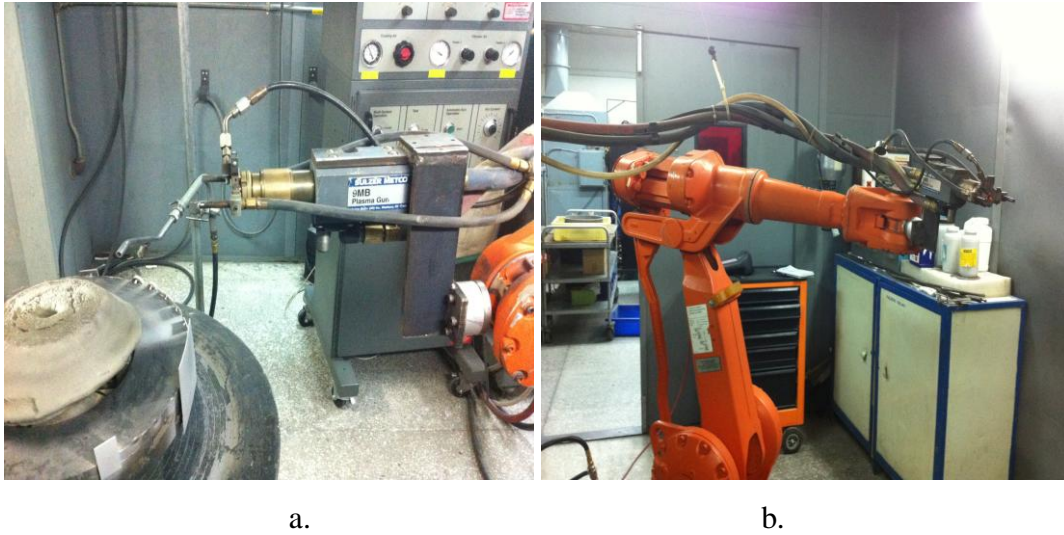
3.2. Plazma sprey işleminde kullanılan ekipman ve sarf malzemeler

Kaplama, Sulzer Metco firmasının ürünü olan kapalı kabin tipi 9M sistemi ile uygulanmıştır. Sistem, plazma parametrelerini kontrol eden Metco 9MC kontrol ünitesi, taşıyıcı gaz basınç ve debisinin yanında toz akış ve debisini de ayarlama yeteneğine sahip Metco 9MP toz besleme ünitesi (Şekil 3.1), Metco 9MB-M plazma sprey tabancası,

plazma tabancasının hareket ettirilebilmesi için ABB Robotech şirketinin robotu (Şekil 3.2) ve döner tabladan oluşmaktadır.



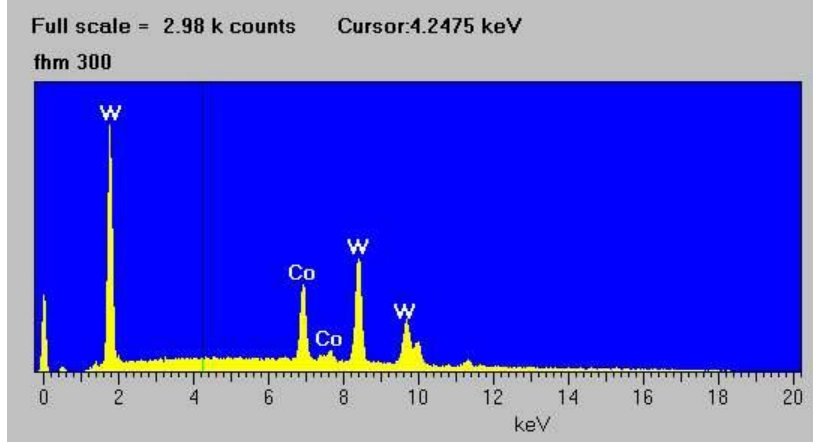
Şekil 3.1 a. Metco 9MC kontrol ünitesi b. Metco 9MP toz besleme ünitesi



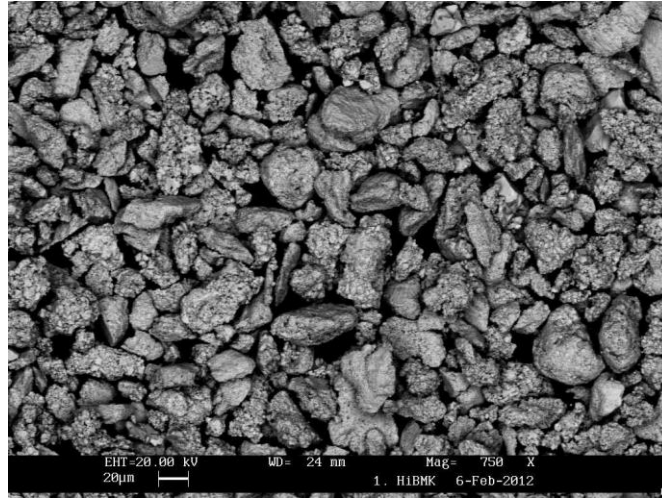
Şekil 3.2 a. Metco 9MB-M plazma sprej tabancası ve b. monte edildiği ABB robot

Tungsten karbür kaplama malzemesi olarak Praxair firmasına ait WC ve %12 kobalt içeren WC-114 (%12 Co, %5,3 C, geri kalan W) tozu kullanılmıştır. WC-114 kaplama tozu 15 μm -45 μm tane boyutu dağılımına sahiptir. Şekil 3.3'de taramalı elektron

mikroskobundan elde edilen elementel analiz pikleri ve Şekil 3.4' de 750 büyütmede kaplama tozu görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.3. WC-114 kaplama tozunun taramalı elektron mikroskobu pikleri

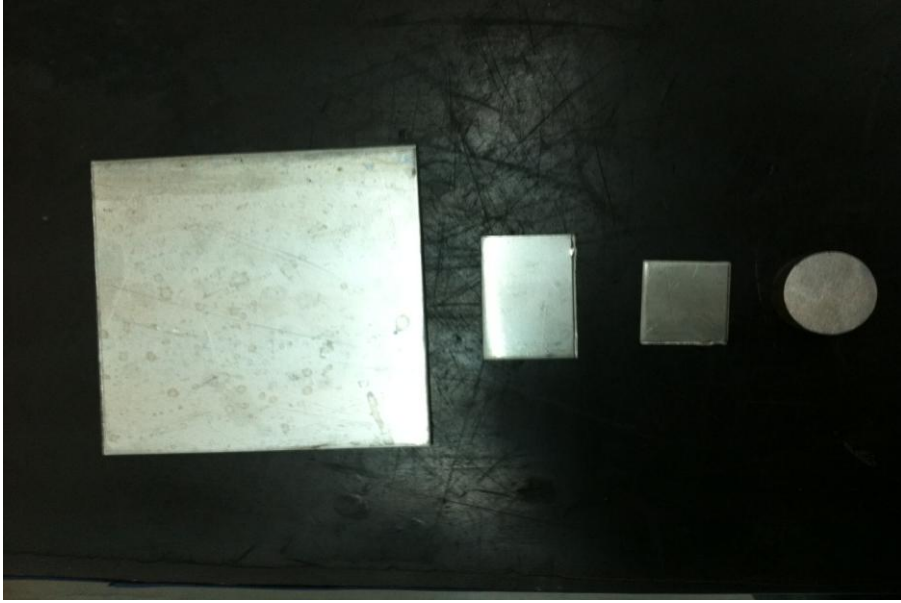


Şekil 3.4. WC-114 kaplama tozunun taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (750X)

3.3. Numune boyut ve ana malzemeleri

Test ve değerlendirme işlemlerini gerçekleştirebilmek amacıyla, (100 mm x 100 mm) kare, (25 mm x 25 mm) kare, (25 mm x 50 mm) dikdörtgen ve 25 mm çapında disk numuneler kullanılmıştır (Şekil 3.5). Numune boyutlarının seçiminde mikroyapı analizine hazırlanabilirlik açısından uygunluk, test cihazında kullanılabilirlik ve testle ilgili

standartlar göz önünde tutulmuştur. Ana metal olarak 304 paslanmaz çelik ve ticari saflıkta titanyum (CP Ti-%99) malzemeler kullanılmıştır. Daha sonra numuneler Şekil 3.6'da verilen test aparatına yerleştirilmiştir.



Şekil 3.5. Denemelerde kullanılan kaplama numuneleri



Şekil 3.6. Test işlemlerinde kullanılan kaplama aparatı

3.4. Test ve değerlendirme metotları

Plazma sprej sonucu elde edilen tungsten karbür kaplamaların özellikleri hakkında bilgilerin toplanabilmesi için öncelikle ihtiyaç duyulan test ve ölçüm yöntemlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapılan değerlendirmede, aşınma davranışları üzerinde kritik öneme sahip özelliklerin ölçülerek kaplanmış numuneler üzerinde bilgi elde edilmesi ve özellikle kıyaslama yoluyla kaplama parametrelerinin belirlenmesine çalışılmıştır.

3.4.1. Voltaj ve yüzey sıcaklığı ölçümleri

Plazma sprej işlemi esnasında ölçülen voltaj değeri oluşan plazma jetinin enerji içeriği dolayısıyla plazma sıcaklığı hakkında bilgi verir. Plazma içeriğinin voltaj değerleri kaplama işlemi esnasında 9MC kontrol ünitesinden takip edilmiştir. Ayrıca kaplama işlemi esnasında kuponların yüzey sıcaklığının belirlenmesi amacıyla Optris Minisight marka infrared ısı ölçer ile ölçümler yapılmıştır.

3.4.2. Mikroyapı değerlendirmesi

Kaplamanın ara yüzlerinde ve kendi içindeki mikroyapı içeriklerini belirlemek için 25 mm x 25 mm ölçülerinde kaplanmış numune gruplarının tamamında mikroyapı incelemesi uygulanmıştır.

Mikroyapı incelemesine tabi tutulacak numunelere, metalografik numune hazırlama adımlarından kesme, kalıplama, zımparalama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Kesme işlemi alüminyum oksit ince kesme diski kullanılarak Struers marka Secotom 10 model hassas kesme cihazında, düşük devir ve ilerleme hızlarında yapılmıştır. Kalıplama Buehler marka soğuk vakum kalıplama cihazında, vakum altında soğuk kalıplama tekniğiyle düşük büzülme değerine sahip, epoksi reçine kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zımparalama Buehler marka Phoenix 4000 model otomatik zımparalama parlatma cihazında otomatik

olarak düşük yük ve devir değerlerinde Struers marka silisyum karbür ve elmas disklerle kabadan inceye 3 kademedede gerçekleştirilmiştir. Parlatma, kaba ve ince olarak iki kademedede 3 µm ve 1 µm struers marka elmas süspansiyon kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İnce parlatma, düşük devir ve kuvvet ile Buehler marka titreşimli otomatik parlatma cihazında yapılmıştır. Çizelge 3.1’de numune hazırlama adımları verilmiştir.

Mikroyapı incelemesi ile elde edilen veriler:

- Kaplama gözenek miktarı,
- Kaplama oksit miktarı,
- Ana metal kaplama arası oksit (taban oksidi) değerlendirmesi,
- Kaplama katmanının ergimemiş parçacık, çatlak, vb. yapısal özellikleri şeklindedir.

Çizelge 3.1. Tungsten karbür kaplama numunelere ait metalografik numune hazırlama işlem parametreleri.

	Malzeme	Yük (N)	Devir (dev/dk)	Zaman (dk)	Tane boyutu	İlerleme Hızı (mm/s)
Kesme	Al ₂ O ₃	-	1800	-	-	0,015
Soğuk kalıplama	Epoksi	-	-	480	-	-
Kaba zımparalama	SiC	18	150	3	220 grit	-
İnce zımparalama	SiC	18	150	3	500 grit	-
İnce zımparalama	Elmas	18	150	3	600 grit	-
İnce zımparalama	Elmas	18	150	3	1200 grit	-
Kaba parlatma	Elmas	22	150	6	3 µm	-
İnce parlatma	Elmas	4	~5	120	1 µm	-

Tüm mikroyapı ölçümleri, Leo marka S440 model taramalı elektron mikroskobu, bu mikroskopla birlikte çalışan Oxford Instruments EDX dedektörü, Nikon marka optiphot

100 model optik mikroskop ve birlikte çalışan Nikon marka Ds Fi-1 model CCD sensörlü kamera kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.4.3. Faz analizi

Kaplamanın mekanik davranışlarında oluşan fazların etkilerini incelemek amacıyla 25 mm x 25 mm kare numunelerde Cu hedefli, Ni filtreli Bruker-D8 Advance marka x-ışını kırınım spektrometresi (XRD) ile faz analizi gerçekleştirilmiştir.

3.4.4. Sertlik testi

Tungsten karbür kaplamaların sertlik ölçümleri için Rockwell 15N sertlik testi uygulanmıştır. Ölçümler, 25 mm x 50 mm dikdörtgen numunelerde Wilson marka 4JR model Rockwell sertlik ölçüm cihazı kullanılarak elmas konik uç ile gerçekleştirilmiştir. Termal spreycaplama prosesinin doğası gereği ölçüm değerleri arasındaki fark büyük olduğundan, her bir kaplama katmanı için 8 ölçüm yapılmış ve ortalama değerler alınmıştır.

3.4.5. Yüzey Pürüzlülük Ölçümü

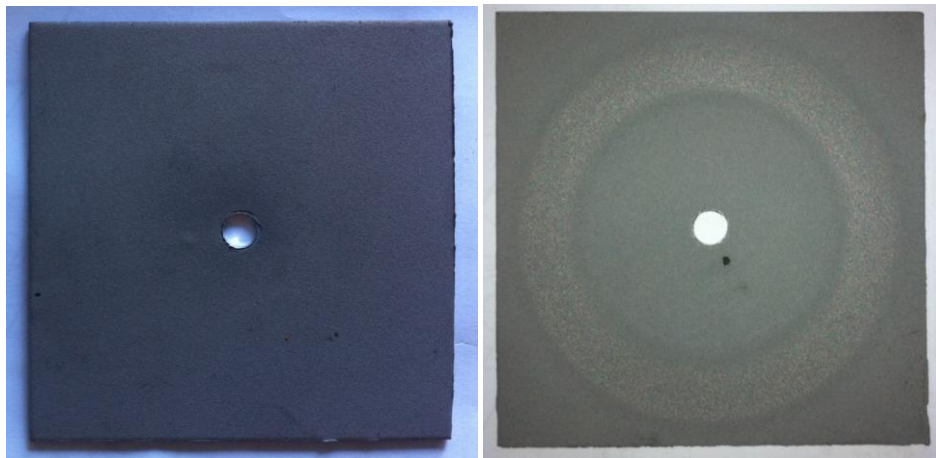
Tungsten karbür kaplamaların aşınma testi öncesi ve 10.000 turluk aşınma testi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri Diavite Model DH-5 profilmetre ile mikron/mm cinsinden ölçülmüştür. Ölçümlerde kurs mesafesi 4,8 mm, kesme değeri 0,80 mm dir. Her bir kaplama için beş ölçüm yapılmış ve ortalama değerler alınmıştır.

3.4.6. Aşınma testi

Tungsten karbür kaplama numunelerinin aşınma özelliklerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla Taber marka aşınma test cihazında (Şekil 3.7) CS-17 aşındırıcı disklerle 1000 gram yük uygulanarak 100 mm x 100 mm kare numuneler (Şekil 3.8) üzerinde aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma değerleri miligram olarak her bin turda bir ağırlık kaybı olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.7. Taber aşınma test cihazı



a.

b.

Şekil 3.8. Aşınma testi numuneleri a. Aşınma testi öncesi b. Aşınma testi sonrası

3.4.7. Çekme testi

Kaplamanın oda sıcaklığındaki ana metal veya diğer kaplama katmanlarıyla olan tutunma direnci mukavemetinin belirlenmesine yönelik olarak çekme testi uygulanmıştır.

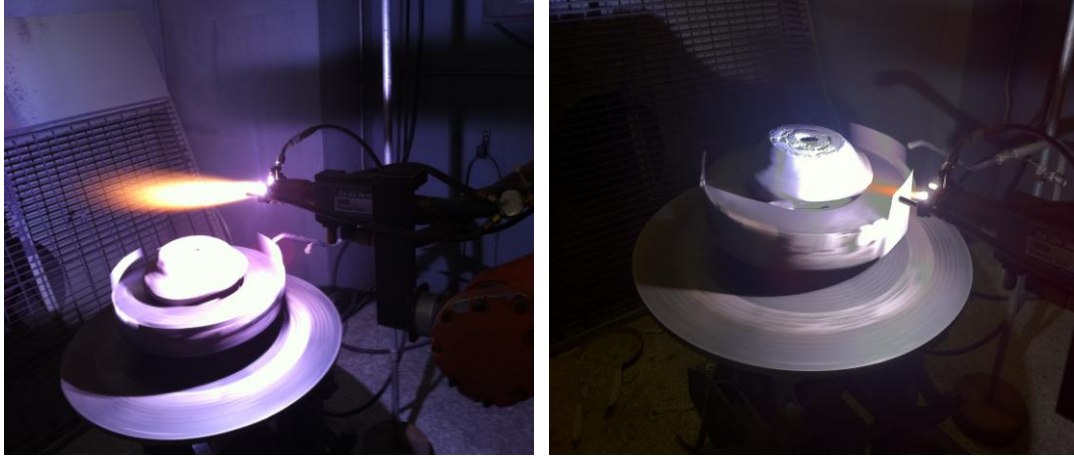
Tungsten karbür kaplama numunelerinin çekme direncinin ölçülmesi için, 25 mm çapındaki disk numunelere kaplama uygulanmış ve 3M firmasının epoksi esaslı EC 2086 yüksek mukavemetli yapıştırıcısı kullanılarak numune çekme çubukları arasına yerleştirilmiştir. Daha sonra bir fikstür yardımıyla numunenin aksel hizalanması yapılarak yapıştırıcının kürleşmesi için numuneler 185 °C sıcaklıkta fikstür içerisinde iki buçuk saat bekletilmiştir. Oda sıcaklığına fırın içerisinde soğutulan numuneler çekme test cihazında ASTM E8 standardına göre düşük hızda (1mm/dak) kopana dek çekilerek kopma yük değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen yük değerleri kesit alanına bölünerek çekme mukavemeti ve yüzey incelemesinin ardından kopma bölgeleri belirlenmiştir. Şekil 3.9'da çekme testi uygulamak için disk numunelerin fikstürle birlikte fırın içerisine yerleştirilmiş hali görülmektedir. Çekme testinde Instron marka 4206 model cihaz kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Fırın içerisinde yapıştırıcı kürleşme işlemine tabi tutulmuş, fikstür yardımıyla çekme çubuğu haline gelmiş çekme test numunesi.

3.5. Kaplama işleminin uygulanması

Denemeler esnasında tecrübelerle dayalı olarak başlangıç parametrelerinin seçimi gerçekleştirilmiştir. Test numuneleri hazırlanırken (Şekil 3.10) bütün plazma sprej parametreleri sabit tutulurken plazmayı oluşturan sekonder gaz (hidrojen) akışları değiştirilmiştir. Bu şekilde elde edilen 10 numune değerlendirildikten sonra, aşınma özellikleri açısından en uygun hidrojen gaz akış parametresi elde edilmiş ve bir sonraki grupta bütün plazma sprej parametreleri ve hidrojen gaz akışı sabit tutulurken plazmayı oluşturan primer gaz (argon) akışları değiştirilmiştir.



a.

b.

Şekil 3.10. a. Kaplama işlemi öncesi tabancanın ayarlanması b. Kuponların üzerine kaplama uygulaması

Çizelge 3.2’de 304 tipi paslanmaz çelik ve titanyum ana metaller üzerine uygulanan hidrojen ve argon gaz akışlarına bağlı plazma sprej işlem parametreleri görülmektedir. Çizelgede voltaj değerleri ayarlanabilen değerler olmayıp primer gaz argon ve sekonder gaz hidrojen akışlarına bağlı ölçülen ve plazma sıcaklığı hakkında bilgi veren değerlerdir.

Çizelge 3.2. Hidrojen ve argon gaz akışlarına bağlı tungsten karbür kaplama plazma sprej işlem parametreleri

Kupon No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Kupon Malzemesi	304	Ti	304	Ti	304	Ti	304	Ti	304	Ti	304	Ti	304	Ti	304	Ti	304	Ti
Argon Basıncı (bar)	6,89		6,89		6,89		6,89		6,89		6,89		6,89		6,89		6,89	
Argon Akışı (lt/dak)	47,19		47,19		47,19		47,19		47,19		35,39		58,99		70,79		82,59	
Hidrojen Basıncı (bar)	3,44		3,44		3,44		3,44		3,44		3,44		3,44		3,44		3,44	
Hidrojen Akışı (lt/dak)	0		2,36		4,72		7,08		9,44		2,36		2,36		2,36		2,36	
Amper (A)	450		450		450		450		450		450		450		450		450	
Voltaj (V)	40		60		67		72		77		55		64		68		70	
Nozul (Metco)	733		733		733		733		733		733		733		733		733	
Taşıyıcı Gaz (Argon) Basıncı (bar)	3,44		3,44		3,44		3,44		3,44		3,44		3,44		3,44		3,44	
Taşıyıcı Gaz (Argon) Akışı (lt/dak)	7,08		7,08		7,08		7,08		7,08		7,08		7,08		7,08		7,08	
Titreşim Hava Basıncı (bar)	1,37		1,37		1,37		1,37		1,37		1,37		1,37		1,37		1,37	
Toz Besleme Şaftı	B		B		B		B		B		B		B		B		B	
Toz Besleme Hızı (gr/dak)	45		45		45		45		45		45		45		45		45	
Mesafe (mm)	100		100		100		100		100		100		100		100		100	
Dönme Hızı (dev/dak)	120		120		120		120		120		120		120		120		120	
Tabanca Hava Jeti	Kapalı		Kapalı		Kapalı		Kapalı		Kapalı		Kapalı		Kapalı		Kapalı		Kapalı	
Soğutma Hava Açısı (°)	75		75		75		75		75		75		75		75		75	
Soğutma Hava Basıncı (bar)	4,13		4,13		4,13		4,13		4,13		4,13		4,13		4,13		4,13	
Ön Isıtma Tur Sayısı(1 tur=90 sn)	1		1		1		1		1		1		1		1		1	
Kupon İlk Kalınlık (mm)	1,473		1,473		1,473		1,473		1,448		1,524		1,498		1,498		1,498	
Toplam Atılan Tur Sayısı	20		10		10		13		13		14		14		14		15	
Son Kupon Kalınlık (mm)	1,727		1,702		1,676		1,702		1,702		1,752		1,727		1,727		1,727	
Kaplama Kalınlığı (mm)	0,254		0,229		0,203		0,229		0,254		0,228		0,229		0,229		0,229	
Parça Sıcaklığı (°C)	30-35		42-47		45-50		55-60		58-64		37-42		58-62		68-72		75-82	

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

4.1. Test ve Değerlendirme Sonuçları

Bu bölümde, bölüm 3’de bahsedilen deneysel çalışmalardan elde edilmiş sonuçlar üzerinde durulacaktır. Sonuçların yorumlanmasında; kaplama parametrelerinin ölçülen özellikler üzerindeki etkileri, numuneler arasında kıyaslama ve literatürde daha önce elde edilmiş sonuçlardan yararlanılmıştır.

4.1.1. Voltaj ve yüzey sıcaklığı ölçümleri

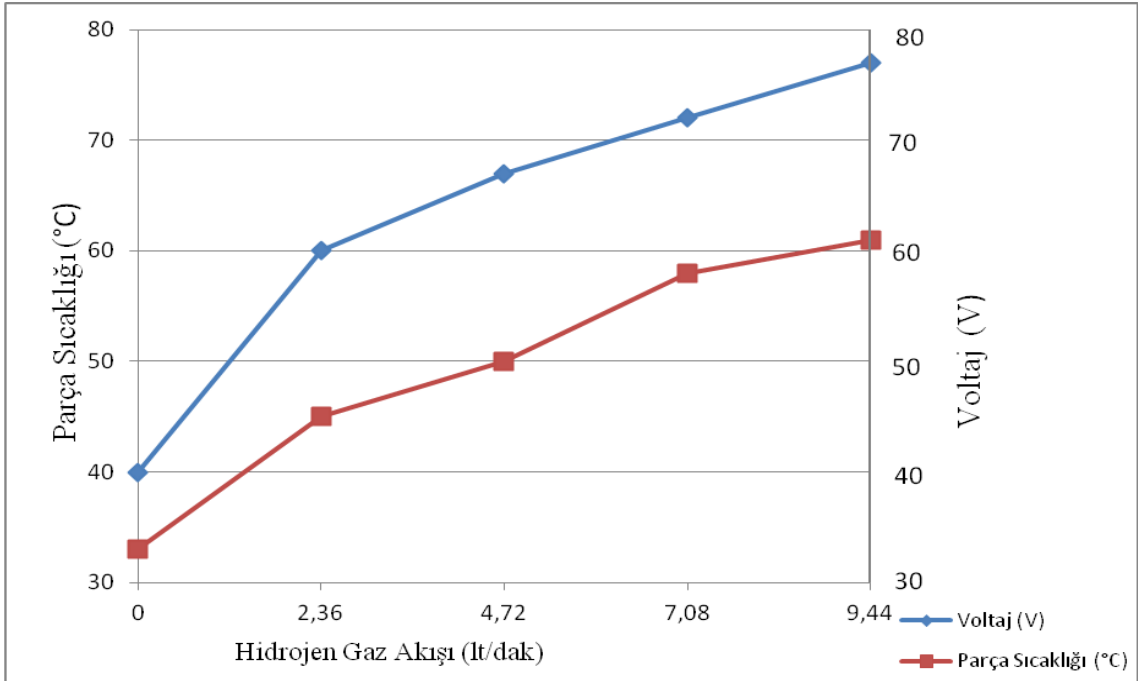
Plazma sprej işlemi esnasında ölçülen voltaj değeri oluşan plazma jetinin enerji içeriği dolayısıyla plazma sıcaklığı hakkında bilgi verir. Tungsten karbür kaplama tozlarının plazma sprej ile kuponlar üzerine uygulanması esnasında ölçülen voltaj ile kupon sıcaklık değerleri Çizelge 4.1 ve 4.2’de verilmiştir. Bu çizelgeler sonucu elde edilen grafikler ise Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı voltajda (V) ve parça sıcaklığında (°C) değişim

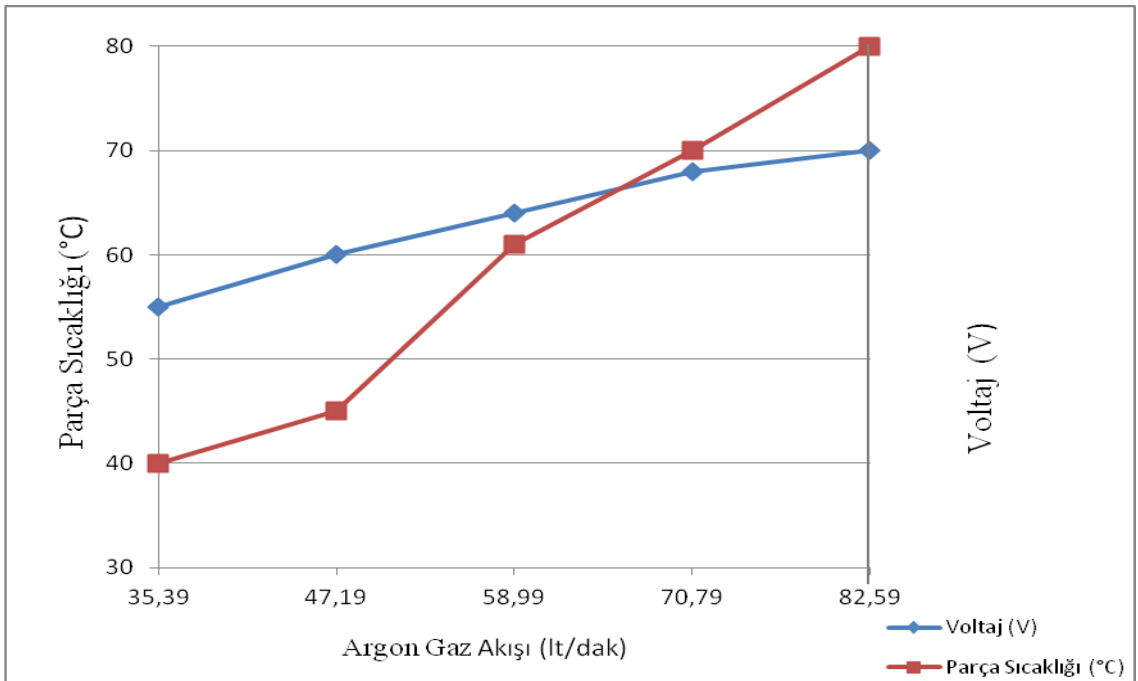
Hidrojen Gaz Akışı (lt/dak)	0	2,36	4,72	7,08	9,44
Voltaj (V)	40	60	67	72	77
Parça Sıcaklığı (°C)	33	45	50	58	61

Çizelge 4.2. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı voltajda (V) ve parça sıcaklığında (°C) değişim

Argon Gaz Akışı (lt/dak)	35,39	47,19	58,99	70,79	82,59
Voltaj (V)	55	60	64	68	70
Parça Sıcaklığı (°C)	40	45	61	70	80



Şekil 4.1. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı voltajda (V) ve parça sıcaklığında (°C) değişim



Şekil 4.2. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı voltajda (V) ve parça sıcaklığında (°C) değişim

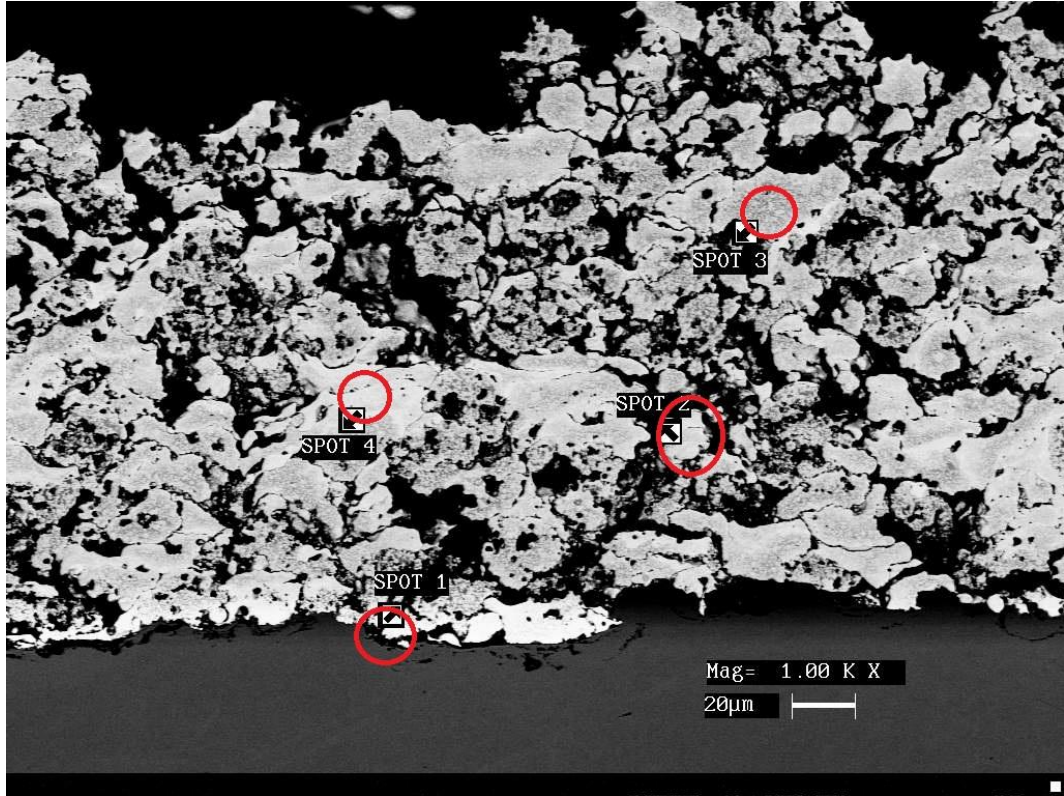
Her iki şekilde de görülebileceği gibi gaz akışlarındaki artış ile birlikte voltaj ve parça sıcaklığı değerleri artmaktadır. Bunun sebebi artan hidrojen ve argon gaz akışları ile birlikte plazma enerjisinin yükselmesidir. Şekil 4.1'den görülebileceği gibi hidrojen gaz akışındaki 2,36 birimlik artış argon gaz akışındaki 11,8 birimlik artışa göre plazma enerjisini ve parça sıcaklığını daha fazla arttırmaktadır. Hidrojen gaz akışı sıfır iken plazma enerjisi ve parça sıcaklığı düşüktür. Plazma jeti içine beslenen kaplama tozları iyi ergiyememektedir. Soğuk kaplama şartlarında elde edilen bu kaplama yapısı diğerlerine göre birbirine iyi bağlanamamış kaba bir yapıya ve daha düşük yoğunluğa sahiptir. Ayrıca mikroyapı bölümünde de belirtileceği gibi çok miktarda oksit+gözenek gibi yapısal hata içermektedir.

Şekil 4.2'den görülebileceği gibi argon gaz akışındaki 11,8 birimlik artışlar voltajı çok fazla arttırmasa da parça sıcaklığında ciddi miktarda artışa sebep olmaktadır. Argon gaz akışındaki artış ile birlikte plazma jetine giren parçacıkların hızı artmakta bu sebepten dolayı plazma jeti içindeki kalış süreleri azalmaktadır. Plazma jeti içinde kısa kalış süresi sebebiyle absorbe ettikleri ısı enerjisi azalmaktadır. Kaplama tozlarının ergimesinde harcanamayan bu plazma enerjisi ise parçanın ısınmasına sebep olmaktadır.

4.1.2. Mikroyapı değerlendirilmesi

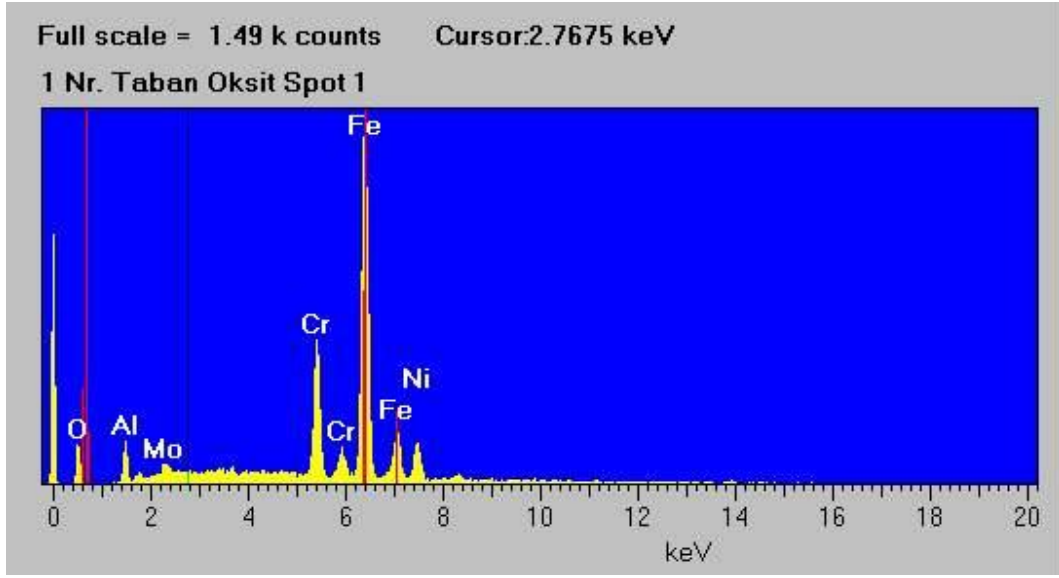
Metalografik inceleme numunesi olarak hazırlanan her bir kuponda önce genel kaplama görünümüne bakılmıştır. Yapılan incelemede kaplama yapısında çatlak, tabakalar şeklinde ayrılma ve kaplama-ana malzeme arası arayüzey kirliliği tespit edilmemiştir. Daha sonra kaplama numuneleri % oksit+gözenek, ergimemiş parçacık ve taban oksidi açısından değerlendirilmiştir. Ayrıca Şekil 4.3'de 1 numaralı paslanmaz çelik numunedan elde edilen taramalı elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir. Bu görüntülerde spot noktalarından elementel analiz sonuçları alınarak mikroyapıdaki % oksit+gözenek, ergimemiş parçacık, taban oksidi ve değişik renk tonlarında ki

bölgelerin bileşimleri incelenmiştir. Şekil 4.3’de spot 1 olarak verilen bölgede yapıda oluşan taban oksidi araştırılmış ve bu noktadan elde edilen taramalı elektron mikroskobu pikleri Şekil 4.4’de verilmiştir. Şekil 4.4’den görülebileceği gibi yapıda oksit varlığını gösterir oksijen piki ile birlikte numune ana malzemesini gösteren Fe, Ni, Cr, Mo gibi paslanmaz çeliğe ait pikler mevcuttur.

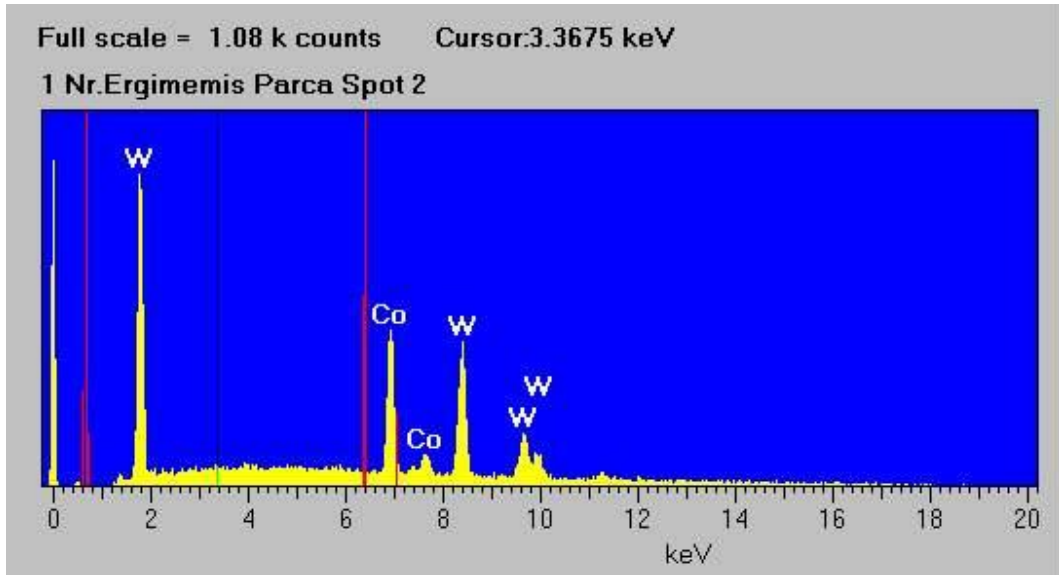


Şekil 4.3. 1 numaralı 304 paslanmaz çelik numuneye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (1000X)

Mikroyapı içinde ergimemiş parçacık olarak tespit edilen kusurlar genelde küreye benzer yapılardır, bu parçacıklar ısı etkisiyle yeterli seviyede ergimedikleri için çarpma etkisi ile yassılaşırlar. Şekil 4.3’de ki spot 2 olarak gösterilen bölgede ergimemiş parçacık araştırılmış ve bu noktadan elde edilen taramalı elektron mikroskobu pikleri Şekil 4.5’de verilmiştir. Şekil 4.5’de elde edilen pikler ile kaplama tozunun taramalı elektron mikroskobu pikleri (Şekil 3.3) birbirine benzerdir.



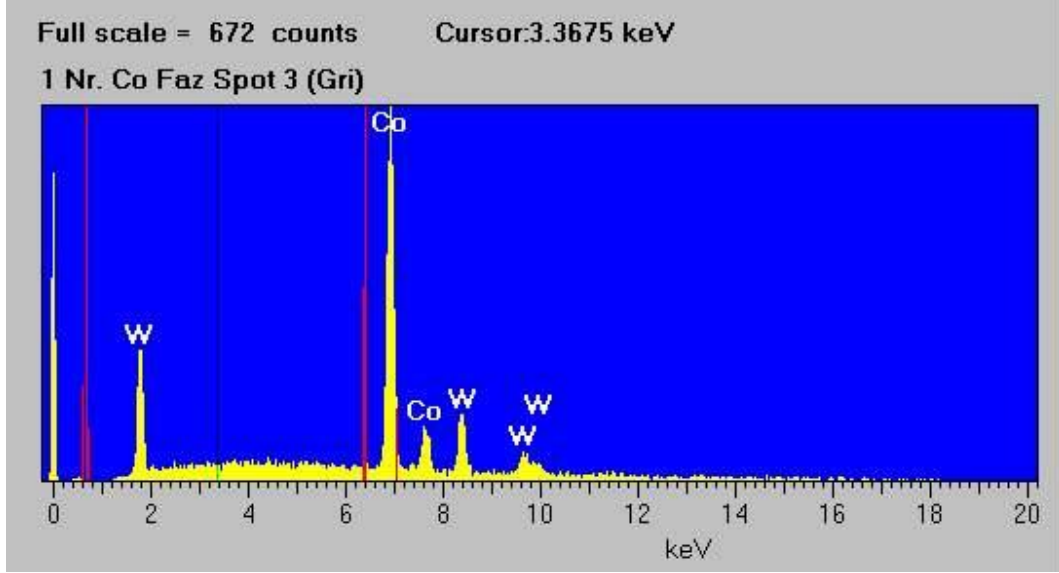
Şekil 4.4. 1 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede spot 1 ile gösterilen ve taban oksidi içeren bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri



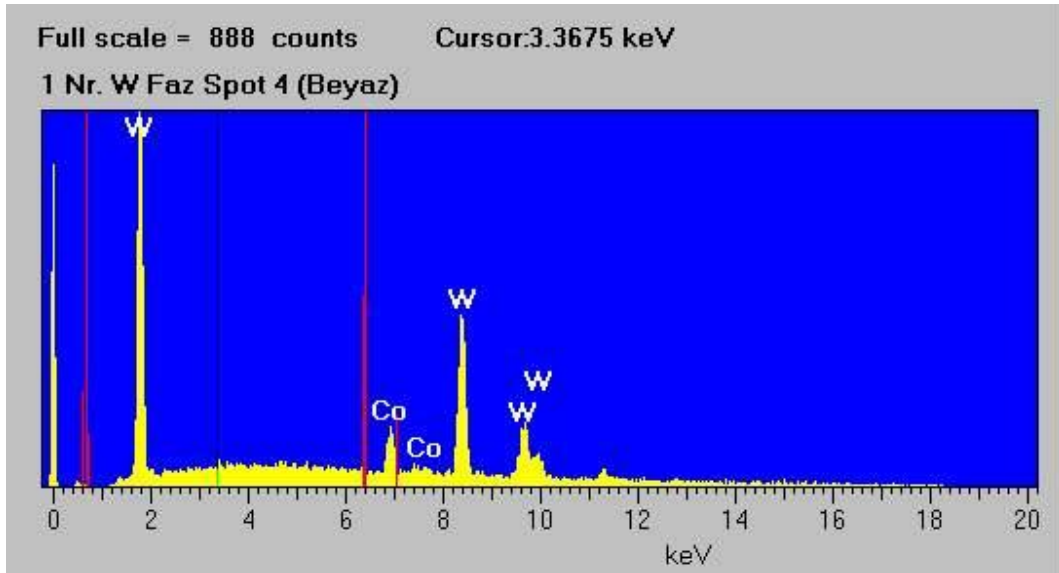
Şekil 4.5. 1 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede spot 2 ile gösterilen ve ergimemiş parçacık içeren bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri

Şekil 4.3’de farklı renk tonlarında bölgeler tespit edilmiş (spot 3 ve spot 4) ve bu bölgelere ait taramalı elektron mikroskobu pikleri Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.

Bu şekillerden görülebileceği gibi gri tonlu bölgeler kobaltça zengin fazları, beyaz tonlu bölgeler ise tungstence zengin fazları göstermektedir.

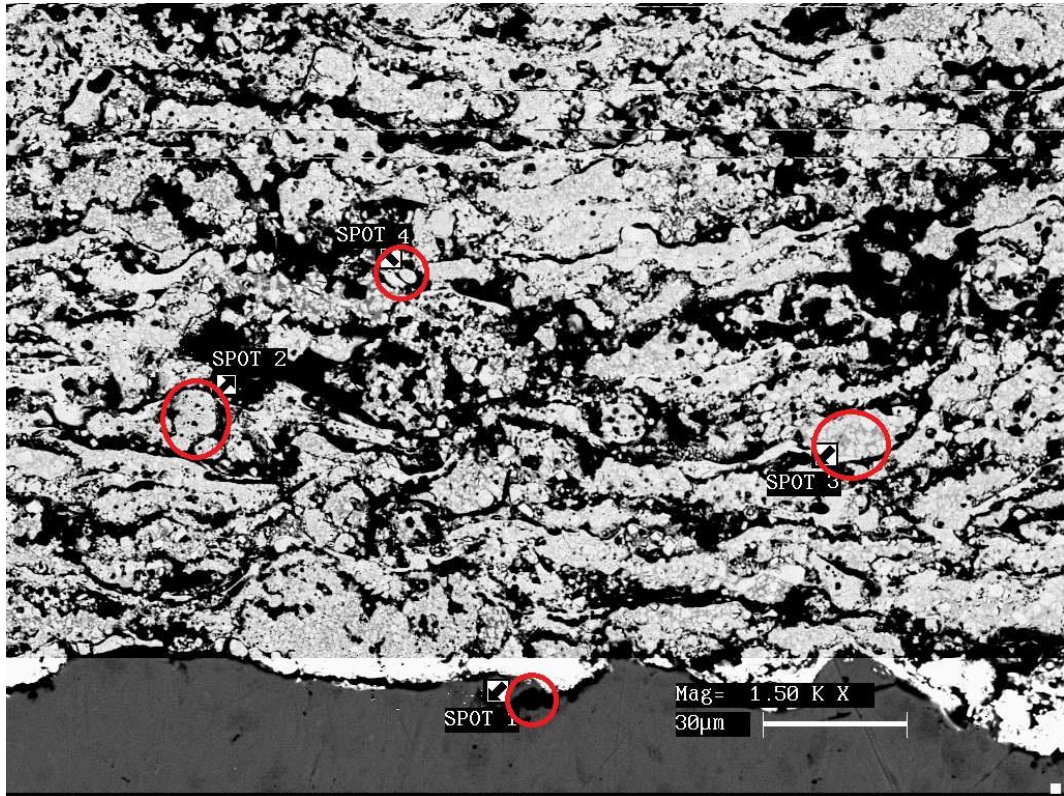


Şekil 4.6. 1 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede spot 3 ile gösterilen ve gri renk tonuna sahip bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri



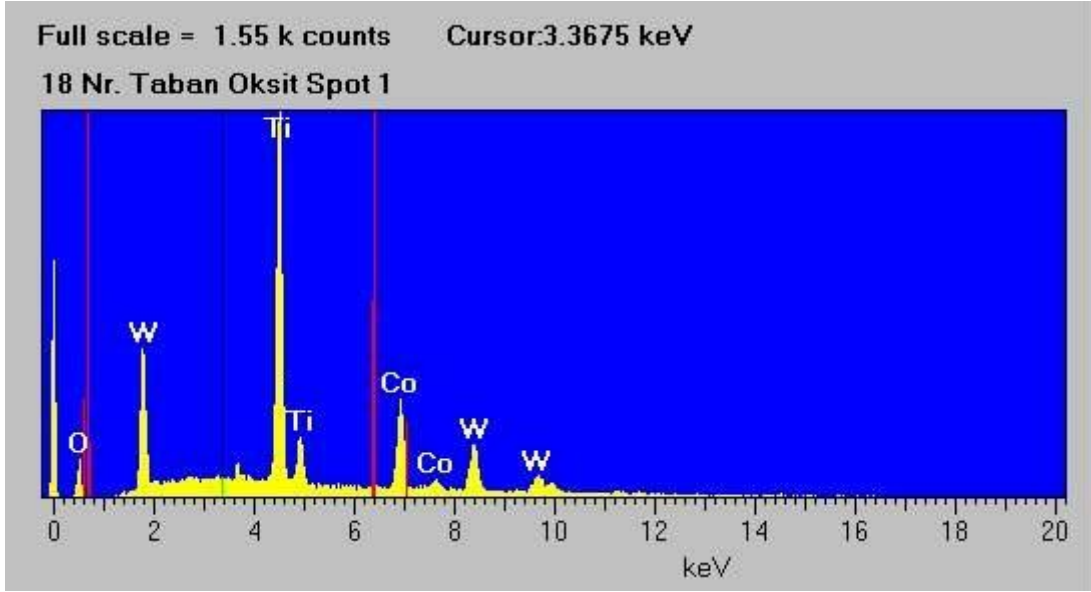
Şekil 4.7. 1 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede spot 4 ile gösterilen ve beyaz renk tonuna sahip bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri

Şekil 4.8’de ise 18 numaralı titanyum numuneden elde edilen taramalı elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.8’de spot 1 olarak verilen bölgede yapıda oluşan taban oksidi araştırılmış ve bu noktadan elde edilen taramalı elektron mikroskobu pikleri Şekil 4.9’da verilmiştir. Şekil 4.9’dan görülebileceği gibi yapıda oksit varlığını gösterir oksijen piki ile birlikte titanyum ana malzemeyi gösteren pikler mevcuttur. Şekil 4.8’de spot 2 olarak gösterilen bölgede ergimemiş parçacık araştırılmış ve bu noktadan elde edilen taramalı elektron mikroskobu pikleri Şekil 4.10’da verilmiştir. Şekil 4.10’da elde edilen pikler ile kaplama tozunun taramalı elektron mikroskobu pikleri (Şekil 3.3) birbirine benzerdir. Şekil 4.8’de farklı renk tonlarında bölgeler tespit edilmiş (spot 3 ve spot 4) ve bu bölgelere ait taramalı elektron mikroskobu pikleri Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir. Bu şekillerden görülebileceği gibi gri tonlu bölgeler kobaltça zengin fazları, beyaz tonlu bölgeler ise tungstence zengin fazları göstermektedir.

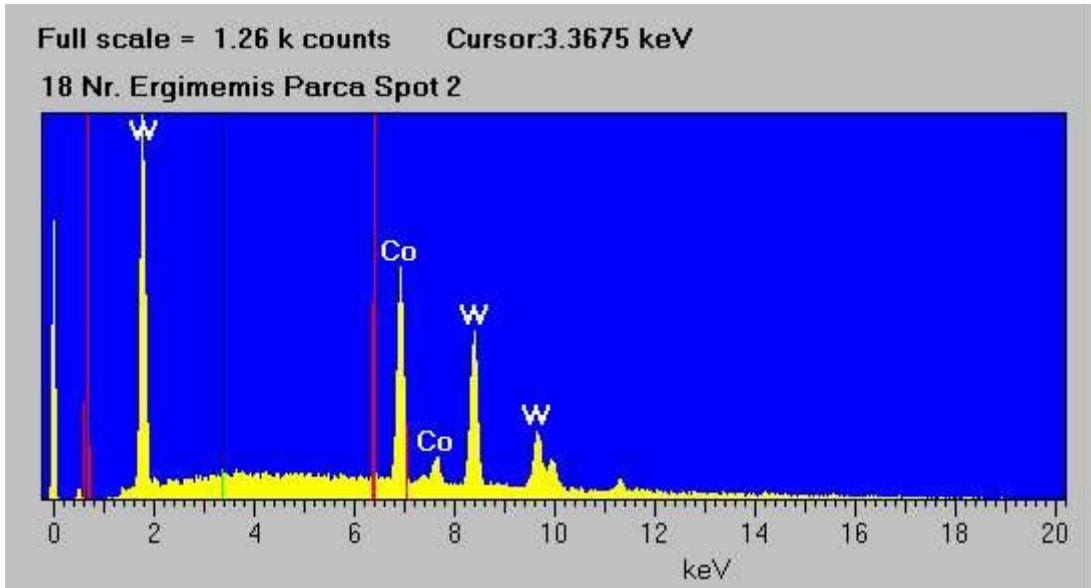


Şekil 4.8. 18 numaralı titanyum numuneye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (1500X)

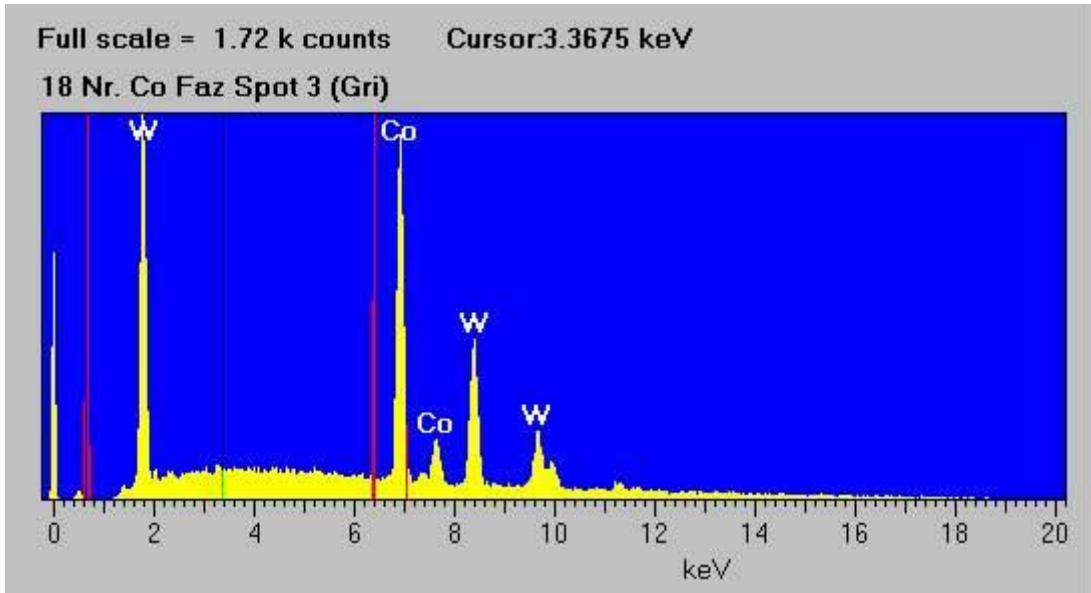
Titanyum ana malzemede elde pikler ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri 304 paslanmaz çelik malzemede elde edilenler ile benzerdir.



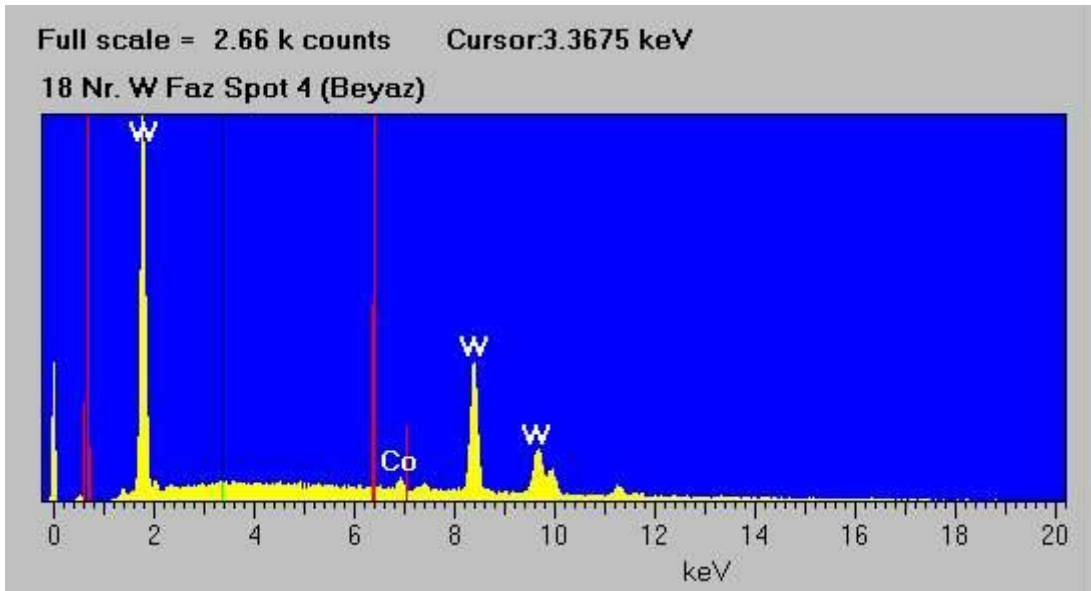
Şekil 4.9. 18 numaralı titanyum numunede spot 1 ile gösterilen ve taban oksidi içeren bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri



Şekil 4.10. 18 numaralı titanyum numunede spot 2 ile gösterilen ve ergimemiş parçacık içeren bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri

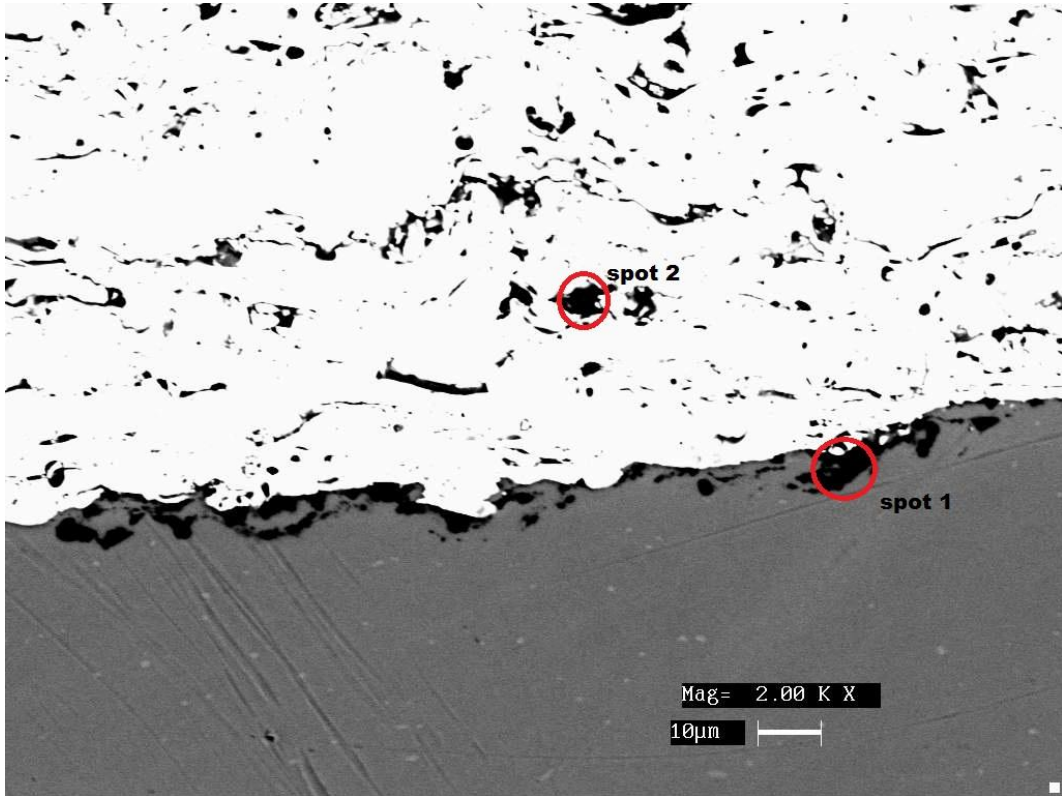


Şekil 4.11. 18 numaralı titanyum numunede spot 3 ile gösterilen ve gri renk tonuna sahip bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri

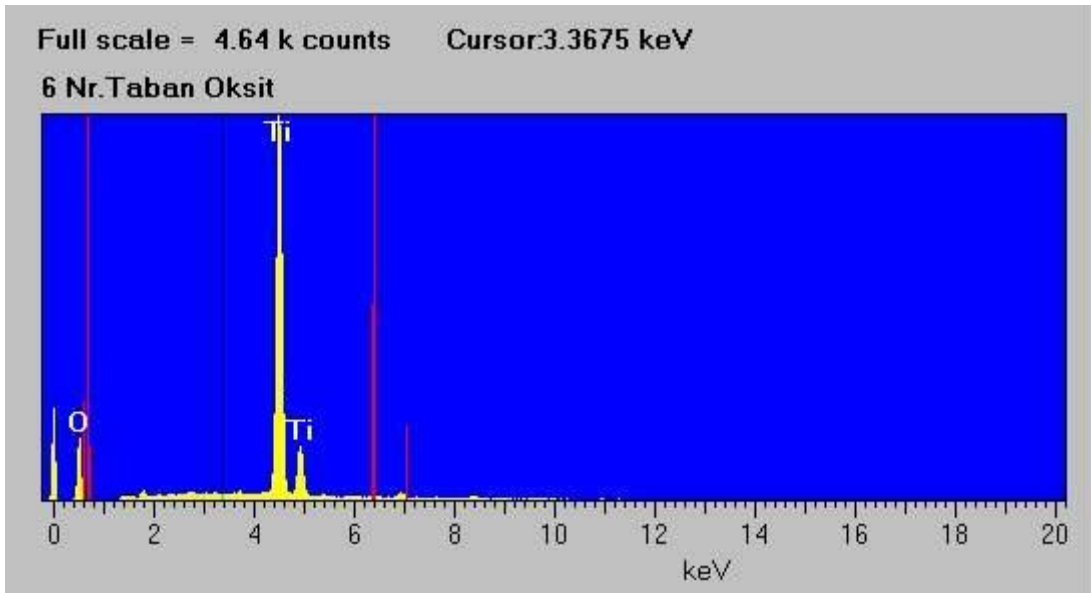


Şekil 4.12. 18 numaralı titanyum numunede spot 4 ile gösterilen ve beyaz renk tonuna sahip bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri

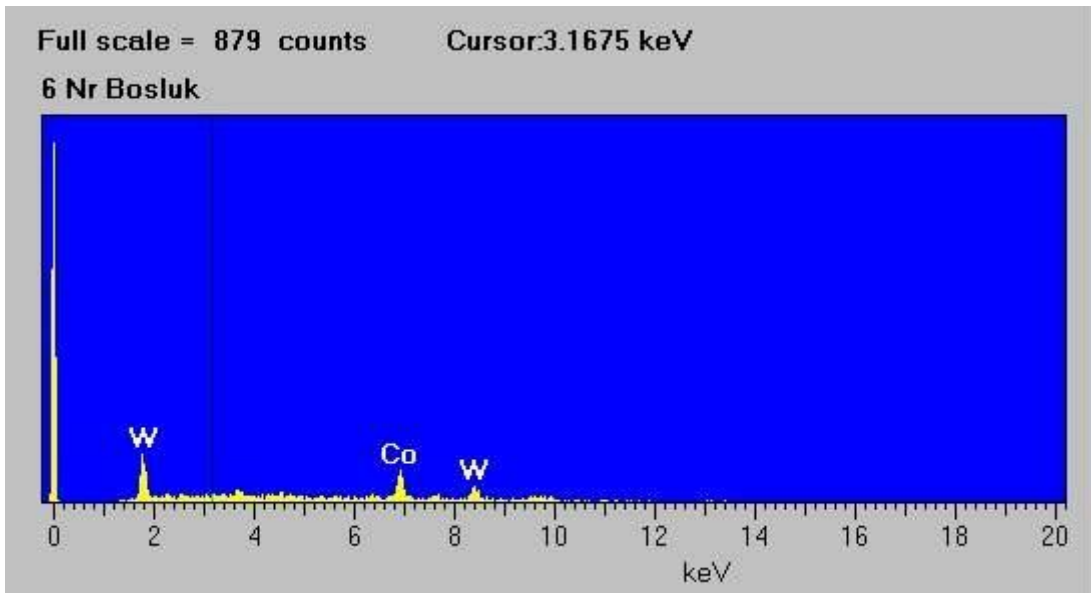
Şekil 4.13’de 6 numaralı titanyum numuneden elde edilen taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.13’de spot 1 olarak verilen bölgede yapıda oluşan taban oksidi araştırılmış ve bu noktadan elde edilen taramalı elektron mikroskobu pikleri Şekil 4.14’de verilmiştir. Şekil 4.14’den görülebileceği gibi yapıda oksit varlığını gösterir oksijen piki ile birlikte titanyum ana malzemeyi gösteren pikler mevcuttur. Şekil 4.13’de spot 2 olarak gösterilen bölgede oksit+gözenek araştırılmış ve bu noktadan elde edilen taramalı elektron mikroskobu pikleri Şekil 4.15’de verilmiştir. Oksit+gözenek içeren bölgede yapılan analizlerde oksijene rastlanmamıştır. Analiz sonucunda yapıda oksijene rastlanmaması ve piklerin çok zayıf olması sebebiyle bu bölgelerin boşluk yani gözenek olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 4.13. 6 numaralı titanyum numuneye ait taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (2000X)



Şekil 4.14. 6 numaralı titanyum numunede spot 1 ile gösterilen ve taban oksidi içeren bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri



Şekil 4.15. 6 numaralı titanyum numunede spot 2 ile gösterilen ve oksit+gözenek içeren bölgeye ait taramalı elektron mikroskobu pikleri

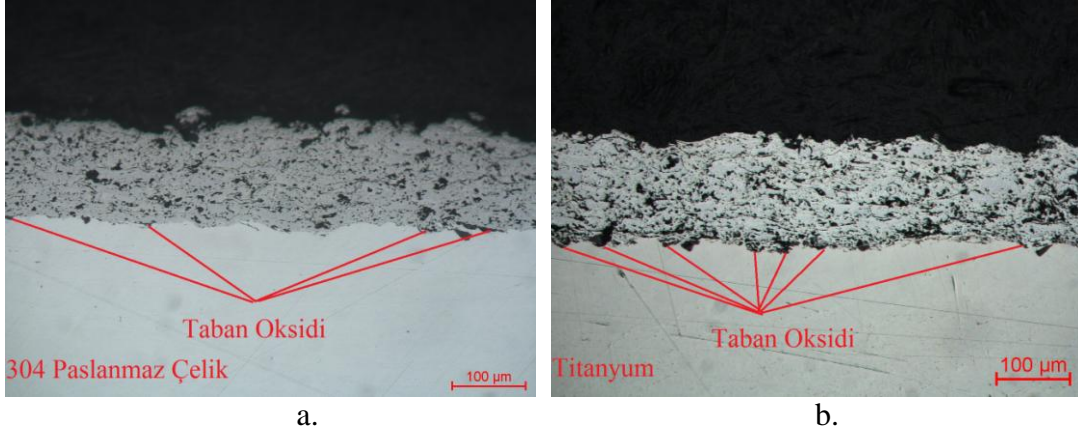
Plazma gaz akışlarına bağlı taban oksidi değerleri çizelge 4.3 ve 4.4'de verilmiştir. 304 paslanmaz çelik ve titanyum kuponlarda gaz akışına bağlı taban oksidi değişimi birbirine benzerdir. Sadece aynı gaz akışı parametrelerinde 304 paslanmaz çelik kuponlara göre titanyum kuponlarda daha fazla taban oksidi tespit edilmiştir. Ön ısıtma uygulanması sonucu titanyum ana malzemede daha fazla taban oksidi oluşmuştur. Bunun sebebi ise titanyumun paslanmaz çeliğe göre daha fazla oksitlenme eğiliminde olmasıdır. Şekil 4.16'da 5 numaralı (304 paslanmaz çelik) ve 6 numaralı (Titanyum) test kuponlarına ait taban oksidi görüntüleri verilmiştir.

Çizelge 4.3. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı taban oksidi

Hidrojen Gaz Akışı (lt/dak)	0	2,36	4,72	7,08	9,44
Test Numunesi ve numarası					
304 PÇ (1,3,5,7,9)	%5	%5-10	%5	%5	%10
Ti (2,4,6,8,10)	%5	%10	%10-20	%10	%10-20

Çizelge 4.4 Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı taban oksidi

Argon Gaz Akışı (lt/dak)	35,39	47,19	58,99	70,79	82,59
Test Numunesi ve numarası					
304 PÇ (11,3,13,15,17)	%10	%5-10	%10	%10	%5-10
Ti (12,4,14,16,18)	%10	%10	%5-10	%10	%5-10



Şekil 4.16 a. 5 numaralı (304 paslanmaz çelik) ve b. 6 numaralı (Titanyum) test kuponlarında taban oksidi (200X)

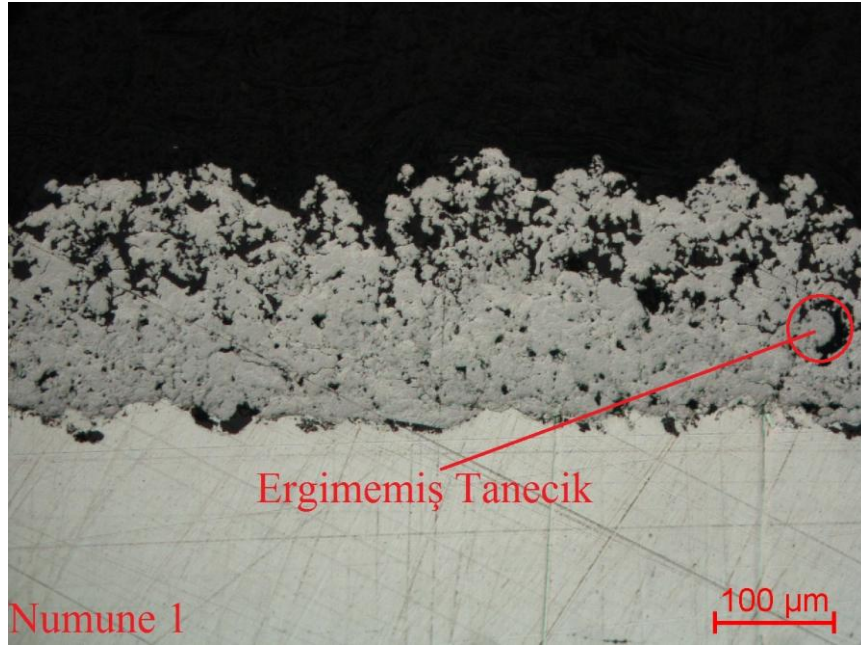
Çizelge 4.5 ve 4.6’da plazma gaz akışlarına bağlı ergimemiş tanecik değerleri verilmiştir. Genel olarak paslanmaz çelik ve titanyum kuponlarda ergimemiş tanecik miktarı düşüktür. Gaz akışı değişimlerine bağlı olarak ergimemiş tanecik değerlerinde çok belirgin bir değişim yoktur. Sadece argon gaz akışı 47,19 lt/dak iken hidrojen gaz akışının sıfır olduğu ve hidrojen gaz akışı 2,36 lt/dak iken argon gaz akışının 82,59 lt/dak olduğu kuponlarda ergimemiş tanecik görülmüştür. Hidrojen gaz akışının sıfır olduğu şartlarda plazma ısısı düşüktür. Argon gaz akışı ise yeterli ergimeyi sağlayacak ısıyı oluşturamamaktadır. Argon gaz akışının 82,59 lt/dak olduğu durumda ise plazma ısısı yeterli derecede yüksek olmasına rağmen argon gaz debisinin çok yüksek olması sebebiyle plazma içine beslenen tozlar hızlanmakta plazma jeti içinde kaldıkları süre azalmaktadır. Plazma jeti içinde kalış süresinin azalması sonucu eriyebilmeleri için gerekli ısıyı absorbe edememektedirler. Şekil 4.17’de 1 numaralı test numunesinden elde edilen görüntüde ergimemiş tanecik gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı ergimemiş tanecik değerleri (adet)

Hidrojen Gaz Akışı (lt/dak)	0	2,36	4,72	7,08	9,44
Test Numunesi ve numarası					
304 PÇ (1,3,5,7,9)	1	0-1	0-1	0-1	0-1
Ti (2,4,6,8,10)	1	0-1	0-1	0-1	0-1

Çizelge 4.6 Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı ergimemiş tanecik değerleri (adet)

Test Numunesi ve numarası	Argon Gaz Akışı (lt/dak)				
	35,39	47,19	58,99	70,79	82,59
304 PÇ (11,3,13,15,17)	0	0-1	0-1	0-1	1
Ti (12,4,14,16,18)	0-1	0-1	0	0-1	1



Şekil 4.17. Ergimemiş tanecik içeren 1 numaralı test numunesi (200 X)

Çizelge 4.7 ve 4.8’de plazma gaz akışlarına bağlı oksit+gözenek değerleri % olarak verilmiştir. Kaplama mikroyapısındaki oksit ve gözenek keskin bir renk farklılığı şeklinde birbirinden çok net olarak ayırt edilememektedir. Şekil 4.13 ve 4.15’den görülebileceği gibi yapılan taramalı elektron mikroskobu analizinde bu bölgelerin gözenek olduğu tespit edilmiştir. İncelenen mikroyapı numunelerinde oksit miktarı çok düşüktür. 1 ve 9 numaralı paslanmaz çelik test kuponlarına ait oksit+gözenek görüntüsü

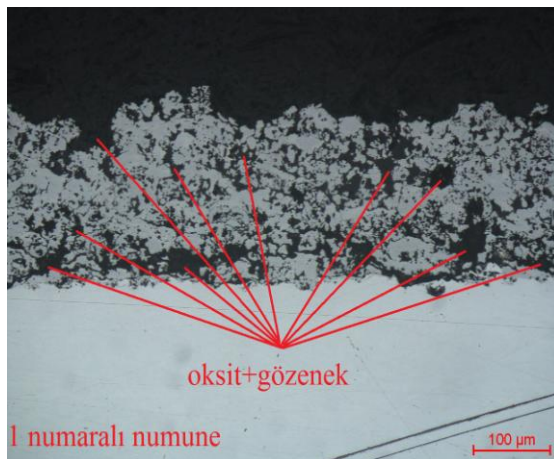
Şekil 4.18’de, 12 ve 18 numaralı titanyum test kuponlarına ait oksit+gözenek görüntüsü ise Şekil 4.19’da verilmiştir.

Çizelge 4.7. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı kaplama yapısındaki (%) oksit+gözenek değerleri

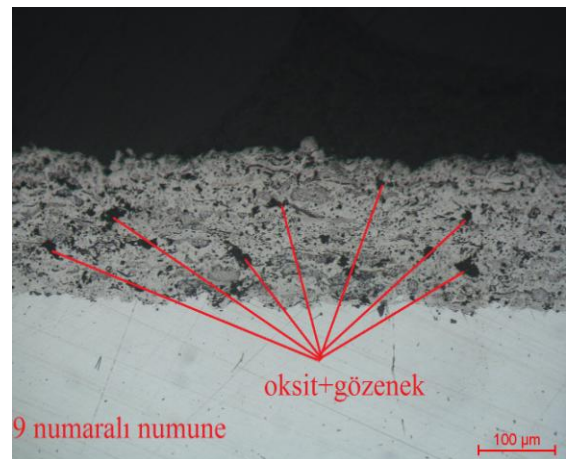
Hidrojen Gaz Akışı (lt/dak)	0	2,36	4,72	7,08	9,44
Test Numunesi ve numarası					
304 PÇ (1,3,5,7,9)	%27,57	%8,12	%7,24	%6,93	%5,53
Ti (2,4,6,8,10)	%28,09	%8,33	%7,54	%7,04	%5,99

Çizelge 4.8. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı kaplama yapısındaki (%) oksit+gözenek değerleri

Argon Gaz Akışı (lt/dak)	35,39	47,19	58,99	70,79	82,59
Test Numunesi ve numarası					
304 PÇ (11,3,13,15,17)	%8,37	%8,12	%8,1	%12,63	%14,98
Ti (12,4,14,16,18)	%7,82	%8,33	%8,23	%12,24	%14,07

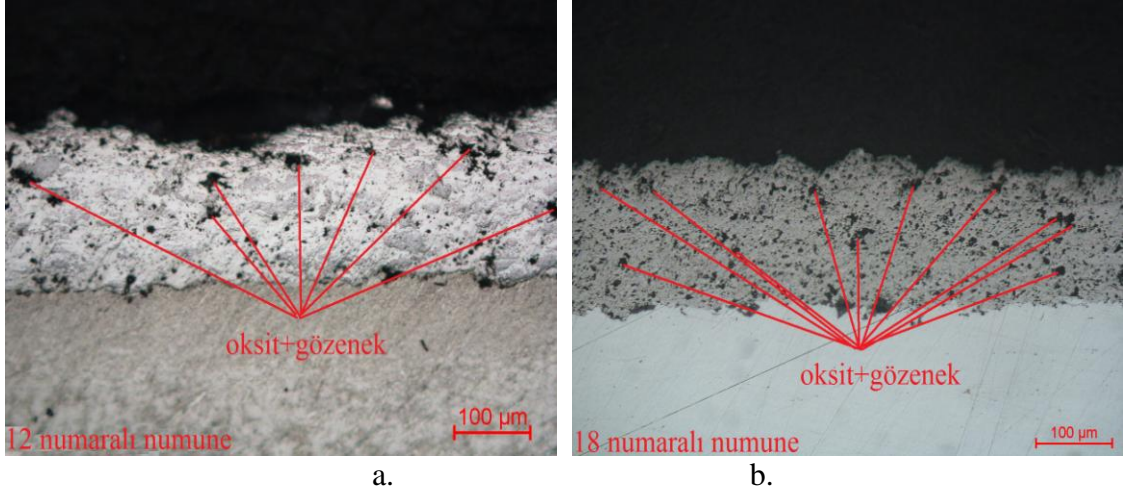


a.



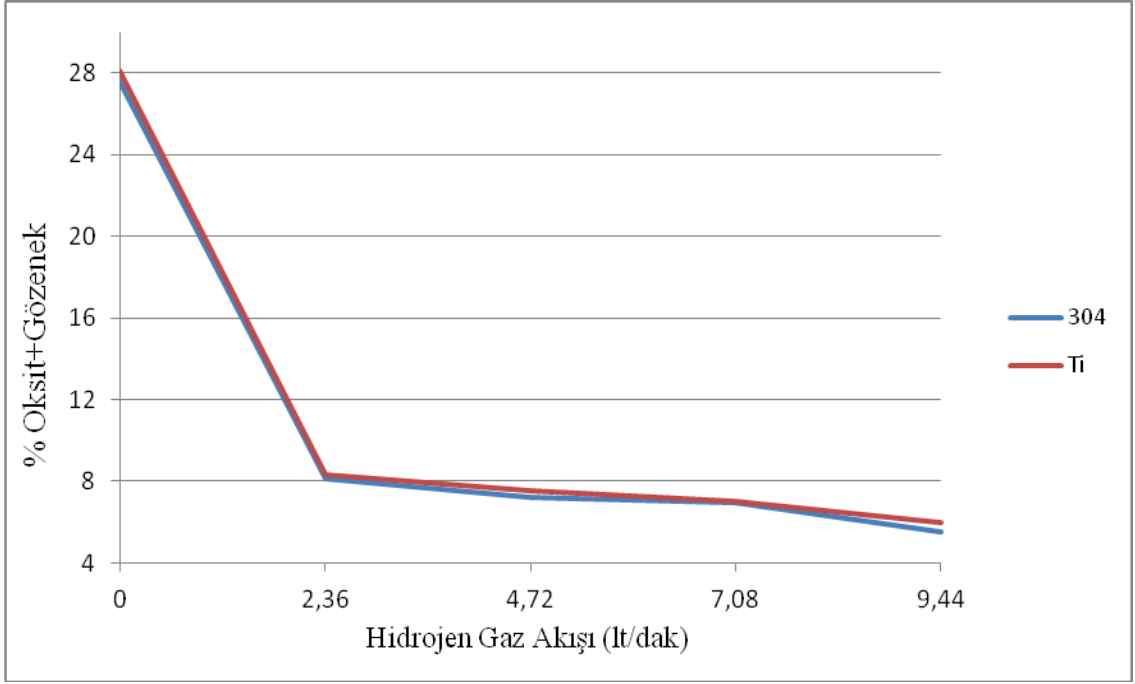
b.

Şekil 4.18. a. 1 numaralı ve b. 9 numaralı 304 paslanmaz çelik numunelerde % oksit+gözenek miktarı (200X)



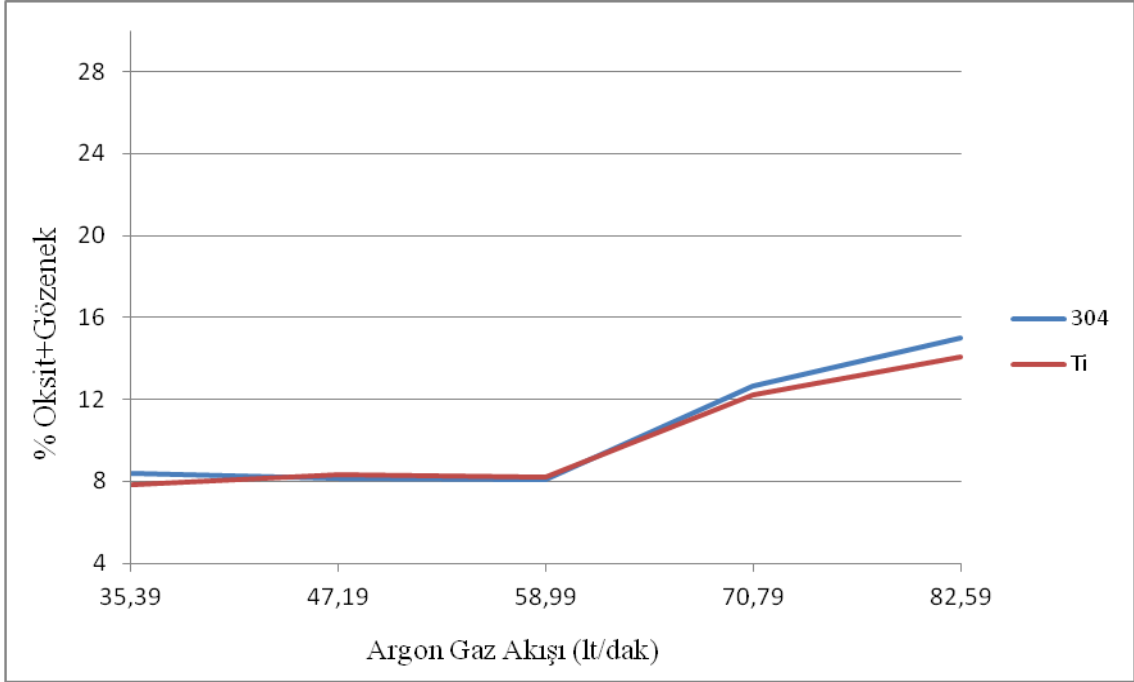
Şekil 4.19. a. 12 numaralı ve b. 18 numaralı titanyum numunelerde % oksit+gözenek miktarı (200X)

Şekil 4.20 ve 4.21’de titanyum ve paslanmaz çelik kuponlar için hidrojen ve gaz akış değişimlerine bağlı % oksit+gözenek değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.20’den görüldüğü gibi hidrojen gaz akışı ile birlikte kaplamadaki oksit+gözenek miktarı azalmaktadır. Hidrojenin sıfır olduğu paslanmaz çelik ve titanyum kuponlarda oksit+gözenek miktarı çok yüksektir. Bunun sebebi plazma enerjisinin ve ısısının düşük olmasıdır. Plazma ısısının düşük olması sonucu plazma jeti içine giren kaplama tozları yeterli miktarda erгийememekte ve büyük kaba taneler şeklinde kaplamayı oluşturmaktadır. Büyük taneler ve erгийememiş parçacıklar kaplama içinde gölgeleme oluşturmaktadır, bunun sonucu ise kaplamadaki gözenek miktarı yüksek olmaktadır. Oysa hidrojen gaz akışının artması ile plazma sıcaklığı artmakta, sıcak kaplama şartları elde edilmekte, plazma jeti içine giren kaplama tozları daha iyi erгийip daha plastik hale gelmektedirler. Bunun sonucu olarak daha düşük oksit+gözenek miktarına sahip, daha yoğun kaplamalar elde edilmektedir.



Şekil 4.20. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı % oksit+gözenek değişimi

Şekil 4.21’de argon gaz akışı ile birlikte ilk başlarda önemli bir değişim olmamakta daha sonra argon gaz akışının 58,99 lt/dak’dan 70,79 lt/dak ve 70,79 lt/dak’dan 82,59 lt/dak’ya çıkması ile birlikte oksit+gözenek içeriğinde artış meydana gelmektedir. Argon gazı ile birlikte plazma sıcaklığı yükselmesine rağmen argon gaz akışındaki yüksek artış sebebiyle plazma jeti içine giren kaplama tozları hızlanmakta, plazma jetinin içinde daha kısa süre kalmaktadır. Plazma jetinin içinde daha az kalmaları sebebiyle absorbe ettikleri ısı düşmekte ve plastisiteleri düşük daha büyük parçacıklar şeklinde kaplamayı oluşturmaktadırlar. Ayrıca bu hızlı ve büyük parçacıklar kaplama içinde gölgeleme meydana getirmektedir. Gölgeleme ve yetersiz ergime sebebiyle % oksit+gözenek miktarında artış olmaktadır.

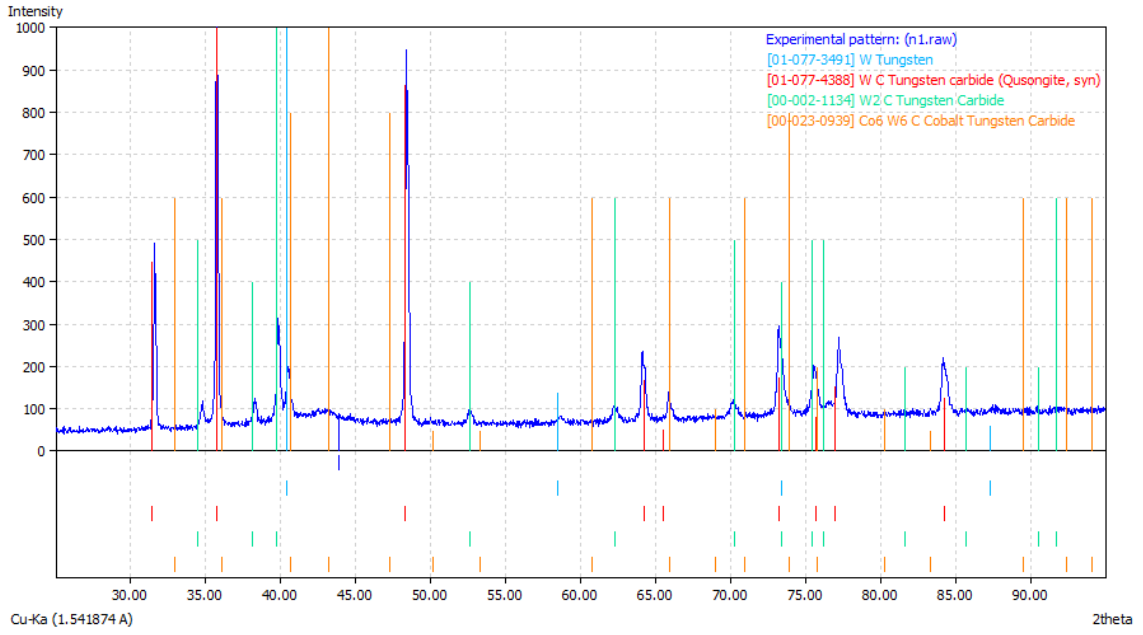


Şekil 4.21. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı % oksit+gözenek değişimi

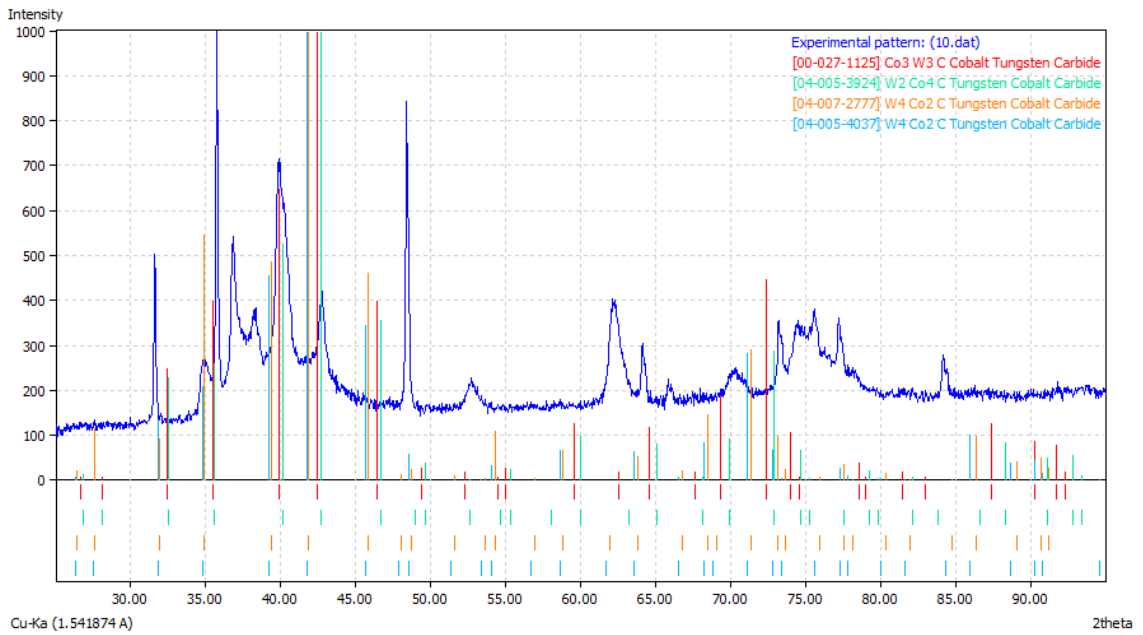
4.1.3. Faz analizleri

WC-Co yüksek sıcaklık oksidasyonu/dekarbürizasyonu nedeniyle plazma sprey gibi termal sprey işlemi ile uygulanması zor bir malzemedir. WC-Co tozlar yüksek sıcaklıktaki aleve maruz kaldıklarında WC'ün dekarbürizasyonu ve kobalt bağlayıcı faz içinde çözünmesi artar. Bu sebeple bu kaplamalarda lamelli şekilde çok fazlı mikroyapı oluşur. XRD sonuçlarının değerlendirilmesinde Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24'de verilen X-ışını difraksiyon patternleri kullanılmıştır. XRD uygulaması sonucunda Sanchez ve arkadaşlarının tespit ettiği gibi yapı WC kristalleri, ikincil fazları (W_2C ve W) ve kırılğan kobalt esaslı bağlayıcı fazı içermektedir. Ayrıca numunelere uygulanan XRD sonucunda kaplama yapılarında Lovelock ve arkadaşlarının tespit ettiği gibi WC, WC'ün dekarbürizasyonu sonucu oluşan W_2C ve W , WC'ün Co bağlayıcı faz içinde çözünmesi sonucu W_6Co_6C , W_4Co_2C , W_2Co_4C tespit edilmiştir. Şekil 4.24'den görülebileceği gibi kobalt XRD sonuçlarında tespit edilememiş yani kobalt bağlayıcı faz tamamen W_6Co_6C , W_4Co_2C , W_2Co_4C gibi fazlara dönüşmüştür. Şekil 4.25 ve 4.26'dan

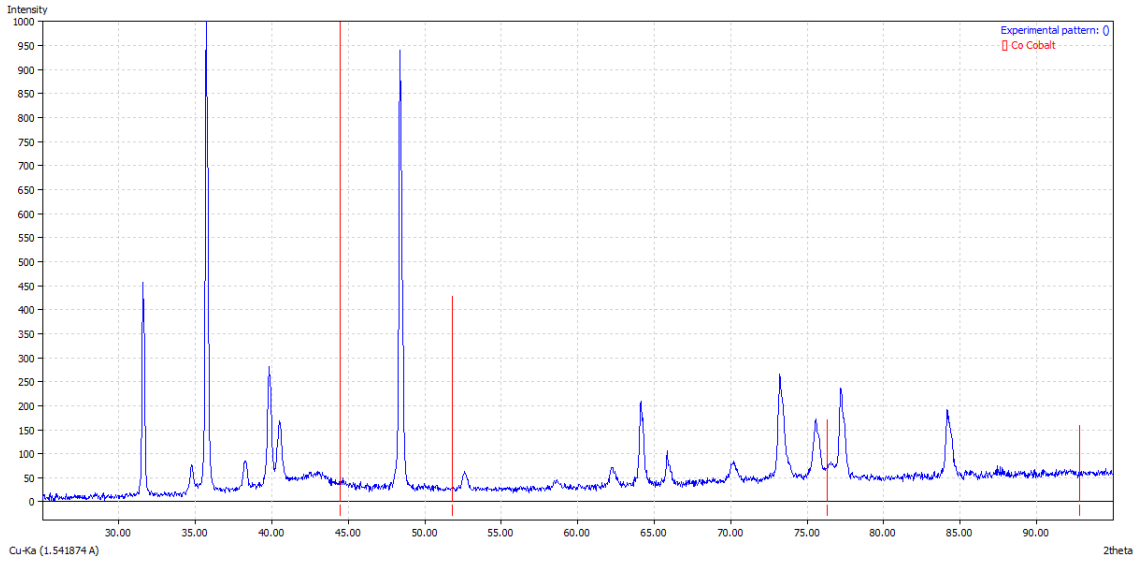
görülebileceği gibi aynı sprej parametreleri uygulanan 3 numaralı 304 paslanmaz çelik ve 4 numaralı titanyum kuponlarda oluşan fazlar aynıdır.



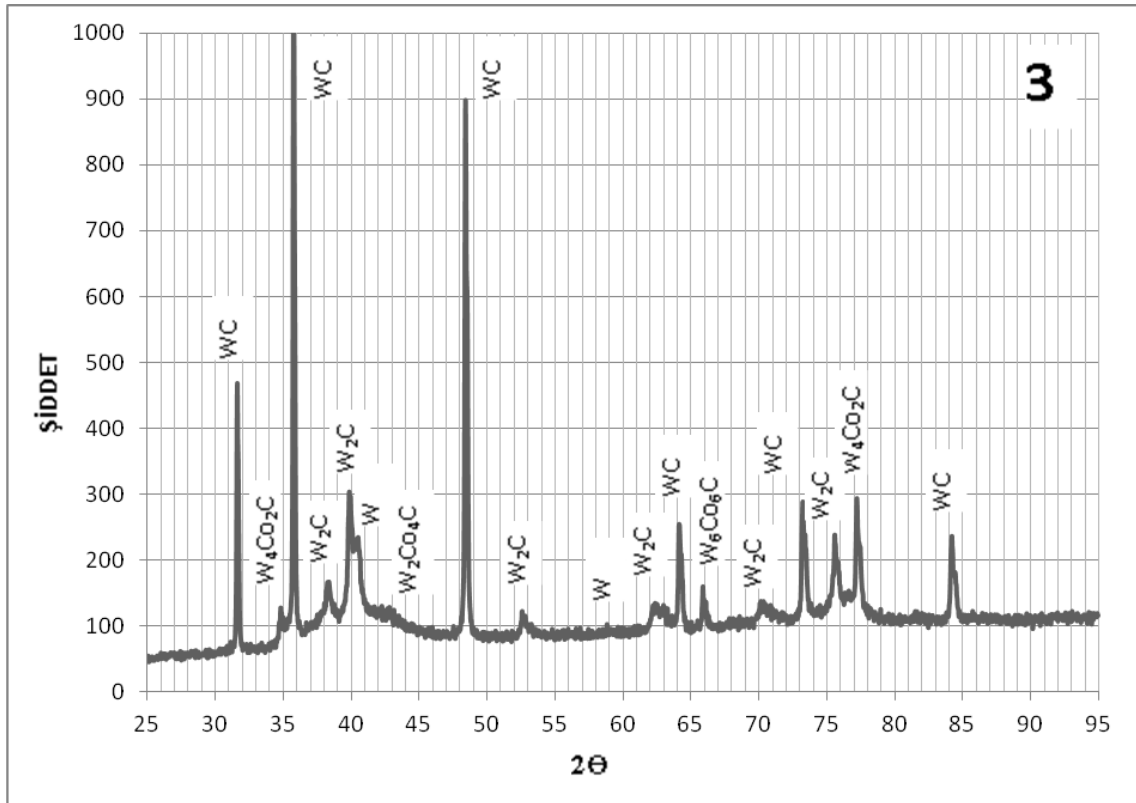
Şekil 4.22. W, WC, W₂C ve W₆Co₆C fazları gösteren X-ışını difraksiyon patterni



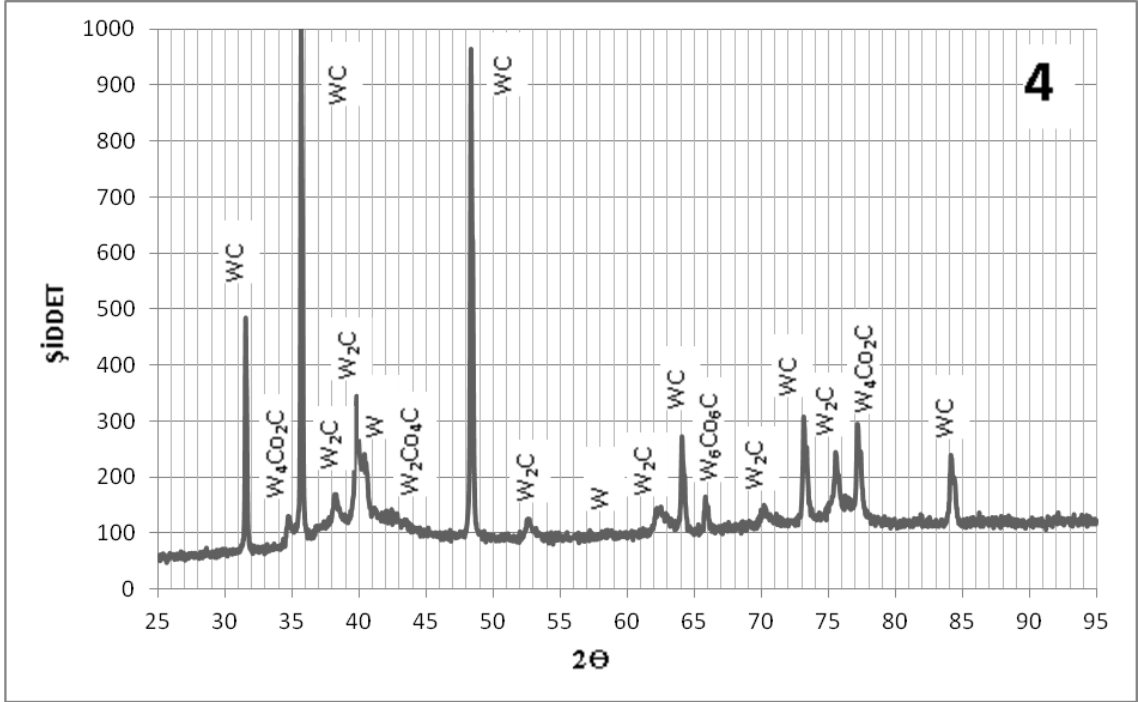
Şekil 4.23. W₄Co₂C, W₂Co₄C ve W₃Co₃C fazları gösteren X-ışını difraksiyon patterni



Şekil 4.24. Kobalt bağlayıcı faz araması yapılan X-ışını difraksiyon patterni

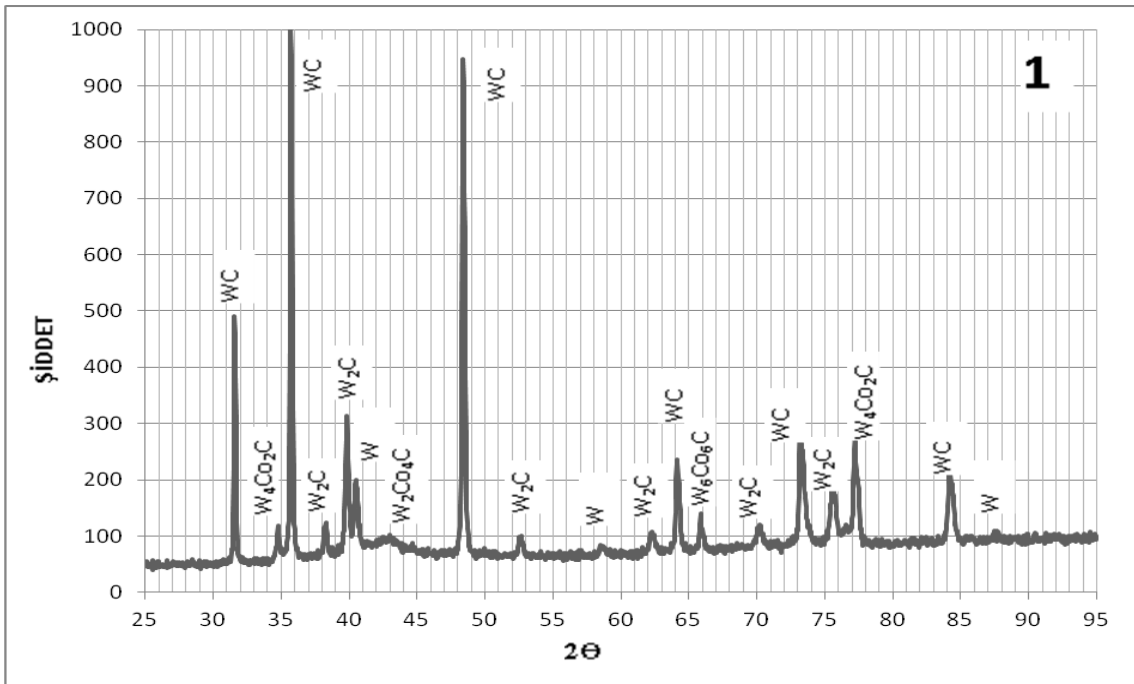


Şekil 4.25. 3 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar

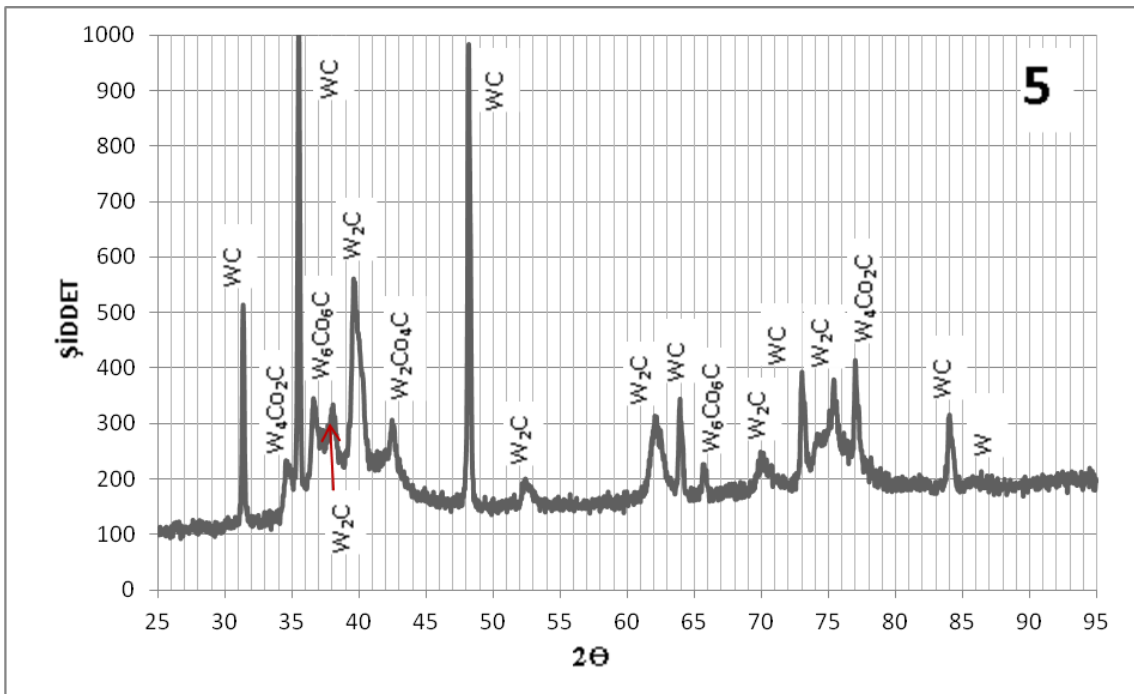


Şekil 4.26. 4 numaralı titanyum numunede oluşan fazlar

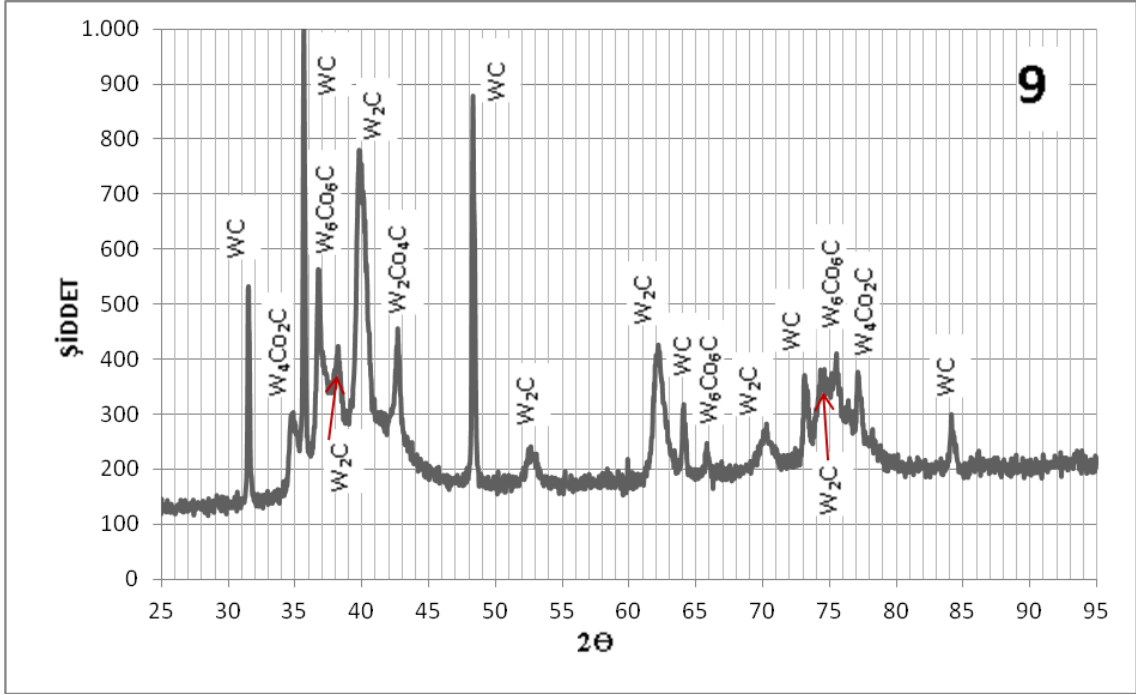
Şekil 4.27’de hidrojen gaz akışının sıfır olduğu 1 numaralı test kuponunun, Şekil 4.28’de hidrojen gaz akışının 4,72 lt/dak olduğu 5 numaralı test kuponunun ve Şekil 4.29’da ise hidrojen gaz akışının 9,44 lt/dak olduğu 9 numaralı test kuponunun faz dağılımlarını gösteren XRD grafikleri verilmiştir. Hidrojen gaz akışı ile birlikte XRD grafiklerinden görülebileceği gibi pikler birbiri ile iç içe girmeye başlamakta yani yapı amorflaşmaktadır. Ayrıca W_2C , W , Co_6W_6C , W_4Co_2C , W_2Co_4C fazlarına ait piklerin altındaki alan genişlemekte yani miktarları artmaktadır. Hidrojen gaz akışındaki artış ile birlikte plazmanın sıcaklığı yükselmekte, plazma sıcaklığı arttıkça kaplama yapısındaki WC ’ün dekarbürizasyonu ve Co bağlayıcı faz içindeki çözünmesi artmaktadır. Böylece yapıda istenmeyen kırılğan ikincil fazların miktarı artmaktadır.



Şekil 4.27. 1 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar (argon gaz akışı 47,19 lt/dak, hidrojen gaz akışı sıfır)

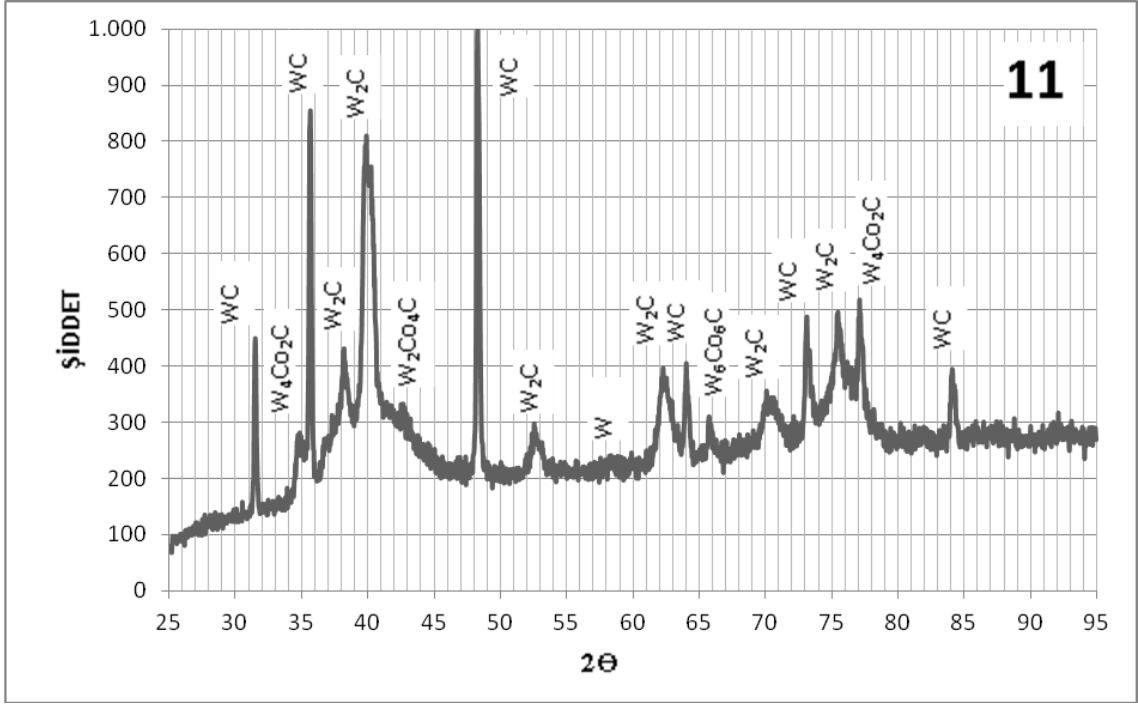


Şekil 4.28. 5 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar (argon gaz akışı 47,19 lt/dak, hidrojen gaz akışı 4,72 lt/dak)

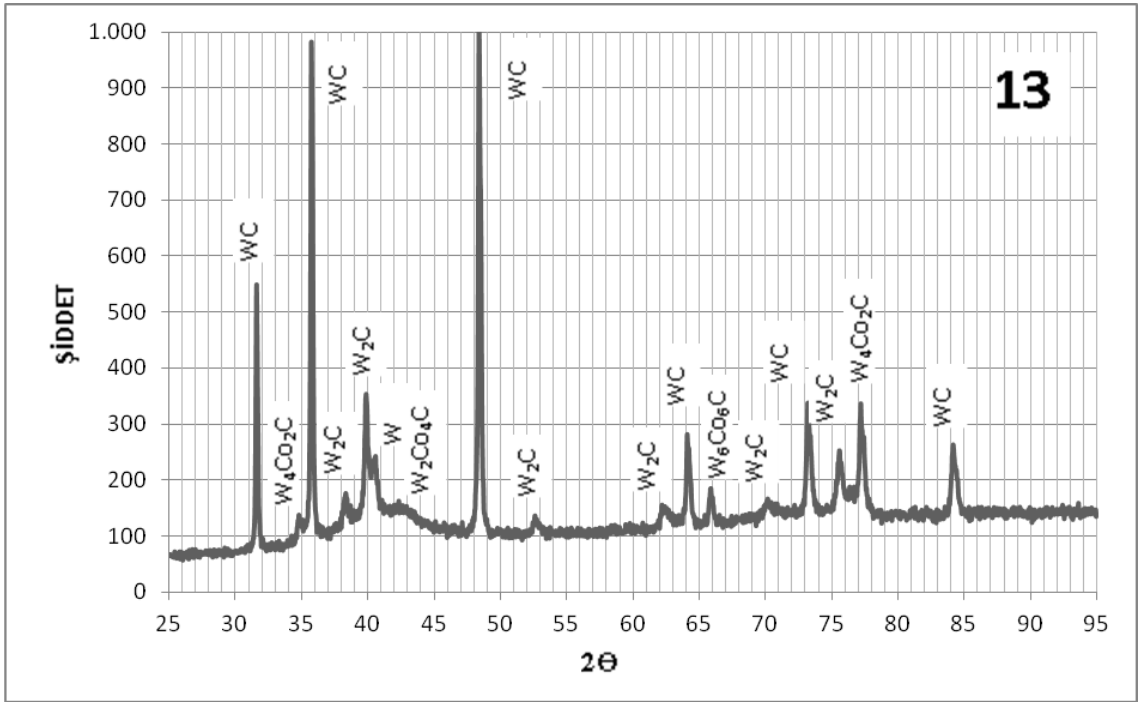


Şekil 4.29. 9 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar (argon gaz akışı 47,19 lt/dak, hidrojen gaz akışı 9,44 lt/dak)

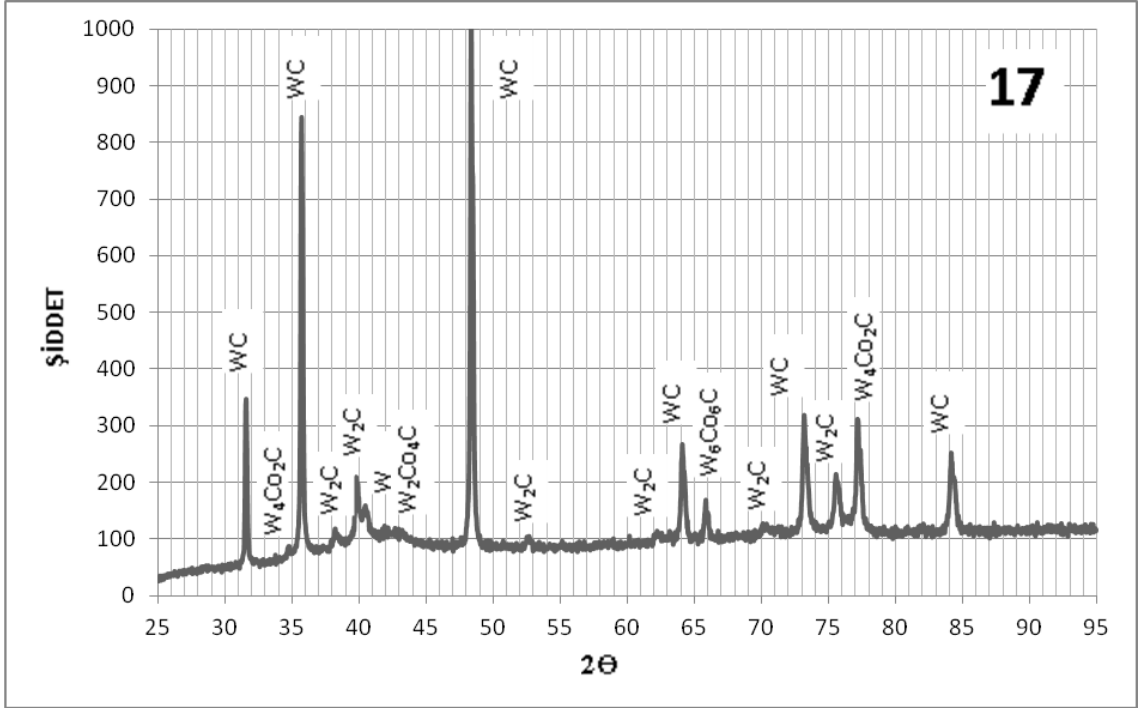
Şekil 4.30 argon gaz akışının 35,39 lt/dak olduğu 11 numaralı test kuponunun, Şekil 4.31’de argon gaz akışının 58,99 lt/dak olduğu 13 numaralı test kuponunun ve Şekil 4.32’de ise argon gaz akışının 82,59 lt/dak olduğu 17 numaralı test kuponunun faz dağılımlarını gösteren XRD grafikleri verilmiştir. Argon gaz akışı ile birlikte XRD grafiklerindeki pikler birbirinden ayrılmaktadır. Ayrıca W_2C , W , W_6Co_6C , W_4Co_2C , W_2Co_4C fazlarına ait piklerin altında kalan alan da küçülmekte, yani miktarları azalmaktadır. Bunun sebebi argon gaz akışındaki artış ile birlikte parçacık hızının artması, parçacıkların plazma jeti içinde kalış sürelerinin dolayısıyla plazmadan absorbe ettikleri ısının azalmasıdır. Parçacıkların daha az plazma ısısına maruz kalması sonucu kaplama yapısındaki WC’ün dekarbürizasyonu ve Co bağlayıcı faz içindeki çözünmesi azalmaktadır. Böylece yapıda istenmeyen kırılğan ikincil fazların miktarı argon gaz akışı ile birlikte yani hız ile birlikte azalmaktadır.



Şekil 4.30. 11 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar (argon gaz akışı 35,39 lt/dak, hidrojen gaz akışı 2,36 lt/dak)



Şekil 4.31. 13 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar (argon gaz akışı 58,99 lt/dak, hidrojen gaz akışı 2,36 lt/dak)



Şekil 4.32. 17 numaralı 304 paslanmaz çelik numunede oluşan fazlar (argon gaz akışı 82,59 lt/dak, hidrojen gaz akışı 2,36 lt/dak)

Wielage ve arkadaşlarının belirttiği gibi oluşan bu ikincil fazlar sertliği, çekme mukavemetini ve aşınma direncini düşürmektedir. Bu kaplamada yüksek WC içeriği istenen bir özelliktir. Daha düşük sıcaklıklar ve yüksek hızlar WC'ün dekarbürizasyonun ve bağlayıcı Co faz içerisinde çözünmesinin yani ikincil fazların oluşumunun önüne geçer.

4.1.4. Sertlik ölçümleri

Tungsten karbür kaplama numunelerinin her iki ana malzeme üzerindeki kaplamada argon gaz akışı sabitken (47,19) hidrojen gaz akışına bağlı ölçülen R15N sertlik değerleri çizelge 4.9'da, hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı ölçülen R15N sertlik değerleri çizelge 4.10'da verilmiştir. 1 ve 2 numaralı kuponlarda hidrojen gaz akışı sıfırdır, bu sebepten oluşan plazma ısı tungsten karbür

tozların ergimesini yeterli seviyede sağlayamamakta ve kaplama sertliği düşük çıkmaktadır. Ayrıca Şekil 4.18 ve 4.20'den görülebileceği gibi hidrojen gaz akışının sıfır olduğu durumda kaplama yapısı çok miktarda oksit+gözenek içermektedir. Oksit+gözenek miktarının yüksek olması da kaplama sertliğini düşürmektedir.

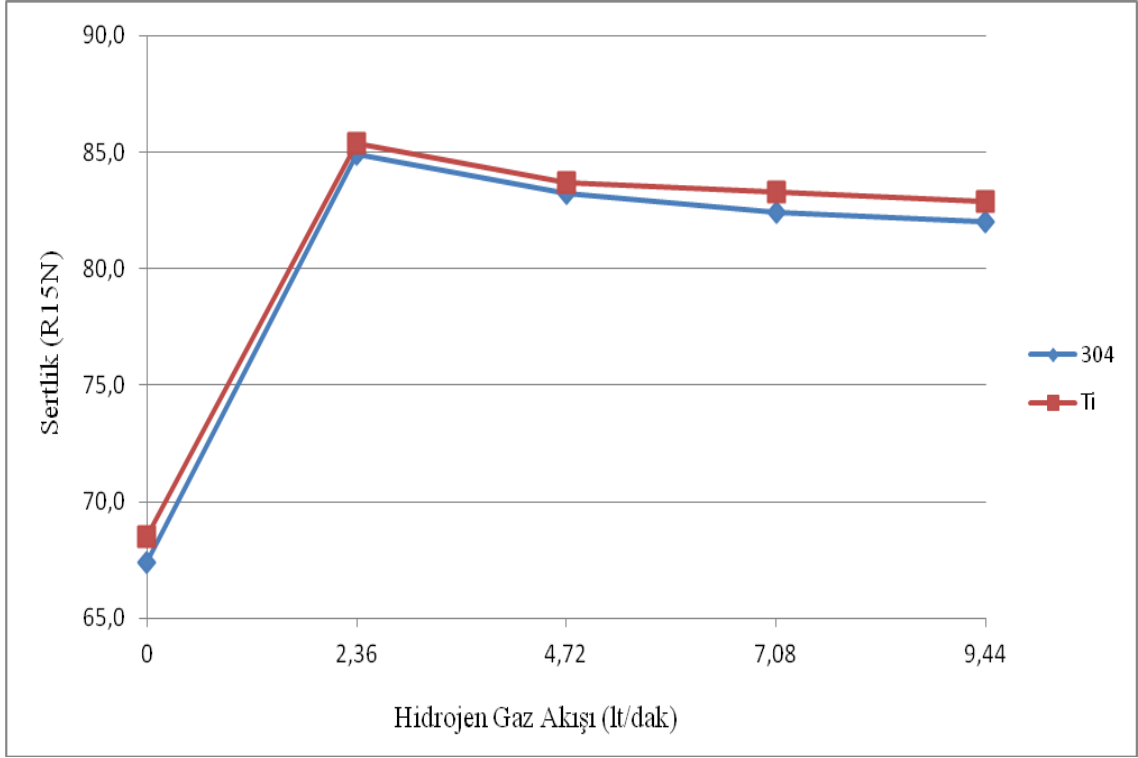
Çizelge 4.9 Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı R15N sertlik değerleri

Hidrojen Gaz Akışı (lt/dak)	0	2,36	4,72	7,08	9,44
Test Numunesi ve numarası					
304 (1,3,5,7,9)	67,4	84,9	83,2	82,4	82,0
Ti (2,4,6,8,10)	68,5	85,4	83,7	83,3	82,9

Çizelge 4.10 Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı R15N sertlik değerleri

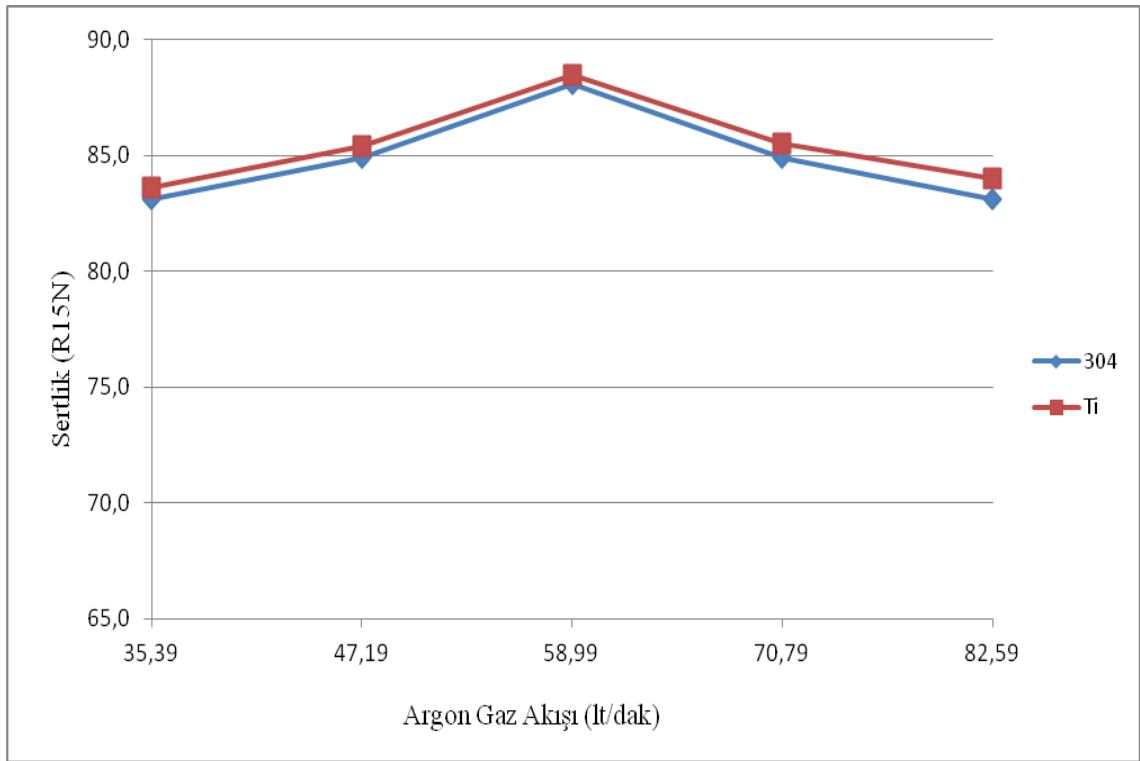
Argon Gaz Akışı (lt/dak)	35,39	47,19	58,99	70,79	82,59
Test Numunesi ve numarası					
304 (11,3,13,15,17)	83.1	84.9	88.1	84.9	83.1
Ti (12,4,14,16,18)	83.6	85.4	88.5	85.5	84.0

Gaz akışlarına bağlı sertlik değerlerinde değişim Şekil 4.33 ve 4.34'de görülmektedir. Sertlikteki değişim paslanmaz çelik ve titanyum kuponlar için benzerdir. Kaplama uygulamadan önce titanyum kuponların sertliği 62 Ra, 304 paslanmaz çelik kuponların sertliği ise 46 Ra ölçülmüştür. Şekil 4.33 ve 4.34'de görülen iki malzeme grubu arasındaki küçük fark, sertlik cihazındaki ölçüm esnasında titanyum ve 304 paslanmaz çeliğin uygulanan yük ile birlikte sertliklerine bağlı esneme farklılığından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.33. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı sertlikte değişim (R15N)

Hidrojen gazının sisteme girişi ve plazma ısısını yükseltmesi ile birlikte sertlikte ciddi miktarda yükselme meydana gelmektedir. Daha sonra hidrojen gaz akışının artması ile sertlikte hafif düşme gözlenmekte ve yatay seyir etmektedir. Yapıdaki oksit+gözenek miktarının azalmasına rağmen sertlikteki bu düşüşün sebebi Lovelock ve arkadaşlarının belirttiği gibi plazma sıcaklığının artması, dolayısıyla WC'ün ısı etkisi bozularak ve Co bağlayıcı fazı içinde çözünerek W_2C , $Co_xW_yC_z$ gibi daha kırılğan ve gevrek ikincil fazlara dönüşmesidir. Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29'dan görülebileceği gibi hidrojen gaz akışı ile birlikte ikincil fazların oluşumu artmaktadır. 1 ve 2 numaralı test numunelerinde oluşan ikincil fazların miktarının düşük olmasına rağmen sertliğinin düşük olmasının sebebi yüksek oksit+gözenek miktarıdır.



Şekil 4.34. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı sertlikte değişim (R15N)

Argon gaz akışı sabitken hidrojen gaz akışı değiştirilerek tungsten karbür kaplama uygulanan diğer kuponlarda elde edilen sertlik değerleri birbirine yakındır. Hidrojen gaz akışı sabitken argon gaz akış değişimine bağlı olarak sertlikte artış meydana gelmekte ve daha sonra sertlik düşmektedir. Şekil 4.30, 4.31 ve 4.32'den görülebileceği gibi argon gaz akışı ile birlikte ikincil fazların oluşumu azalmakta ve sertliğin yükselmesi beklenmektedir. Fakat yüksek argon gaz akışlarında kaplama yapısındaki oksit+gözenek miktarının yükselmesi (Şekil 4.19 ve 4.21) sertlikte düşüşe sebep olmaktadır.

4.1.5. Yüzey pürüzlülük ölçümleri

Tungsten karbür kaplama numunelerinin her iki ana malzeme grubu üzerindeki kaplamada aşınma testi öncesi ve 10.000 turluk aşınma testi sonrası hidrojen gaz akışına bağlı mikron/mm cinsinden ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri çizelge 4.11’de, argon gaz akışına bağlı mikron/mm cinsinden yüzey pürüzlülük değerleri çizelge 4.12’de verilmiştir.

Çizelge 4.11 Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı aşınma testi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerleri (mikron/mm)

Hidrojen Gaz Akışı (lt/dak)	0	2,36	4,72	7,08	9,44
Test Numunesi ve numarası					
304 (1,3,5,7,9)	9,39	5,88	5,14	4,59	4,26
Ti (2,4,6,8,10)	9,44	6,03	5,21	4,40	4,33
304* (1,3,5,7,9)	8,02	4,62	3,66	3,06	2,57
Ti* (2,4,6,8,10)	8,00	4,67	3,60	3,08	2,58

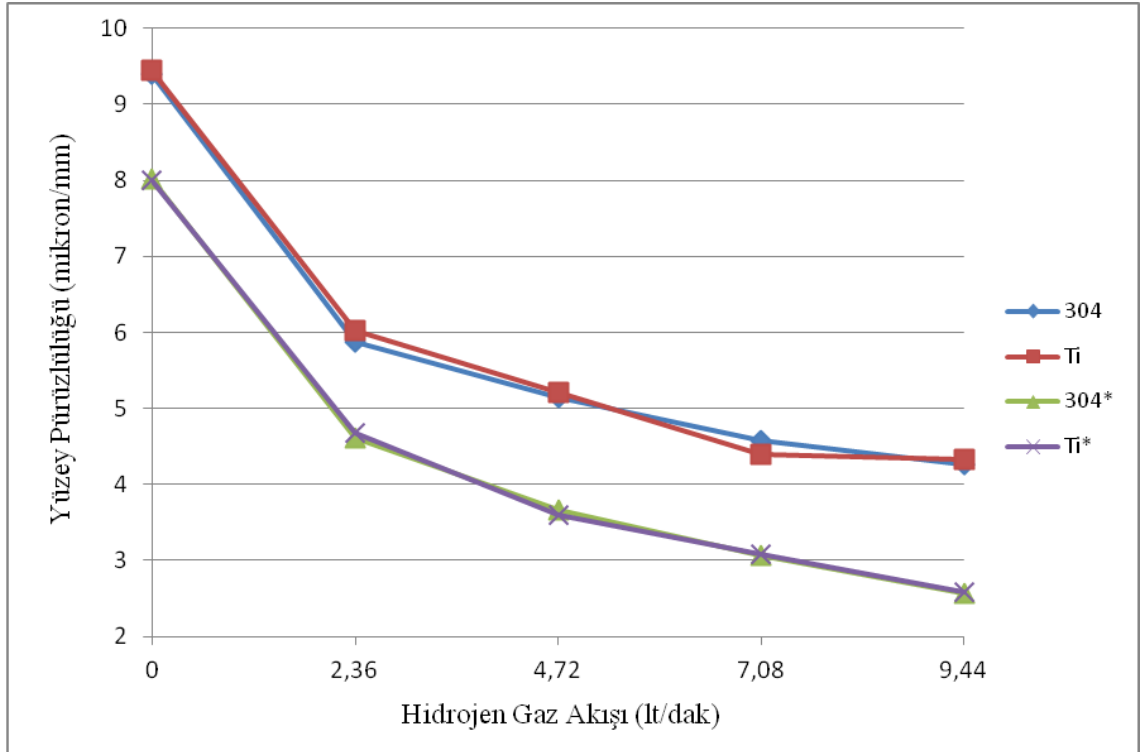
304* ve Ti* aşınma testi sonrası ölçüm değerleridir.

Çizelge 4.12 Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı aşınma testi öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değerleri (mikron/mm)

Argon Gaz Akışı (lt/dak)	35,39	47,19	58,99	70,79	82,59
Test Numunesi ve numarası					
304 (11,3,13,15,17)	5,37	5,88	6,49	6,81	7,02
Ti (12,4,14,16,18)	5,38	6,03	6,65	6,85	7,05
304* (11,3,13,15,17)	3,93	4,62	5,09	5,63	5,86
Ti* (12,4,14,16,18)	3,77	4,67	5,17	5,65	5,88

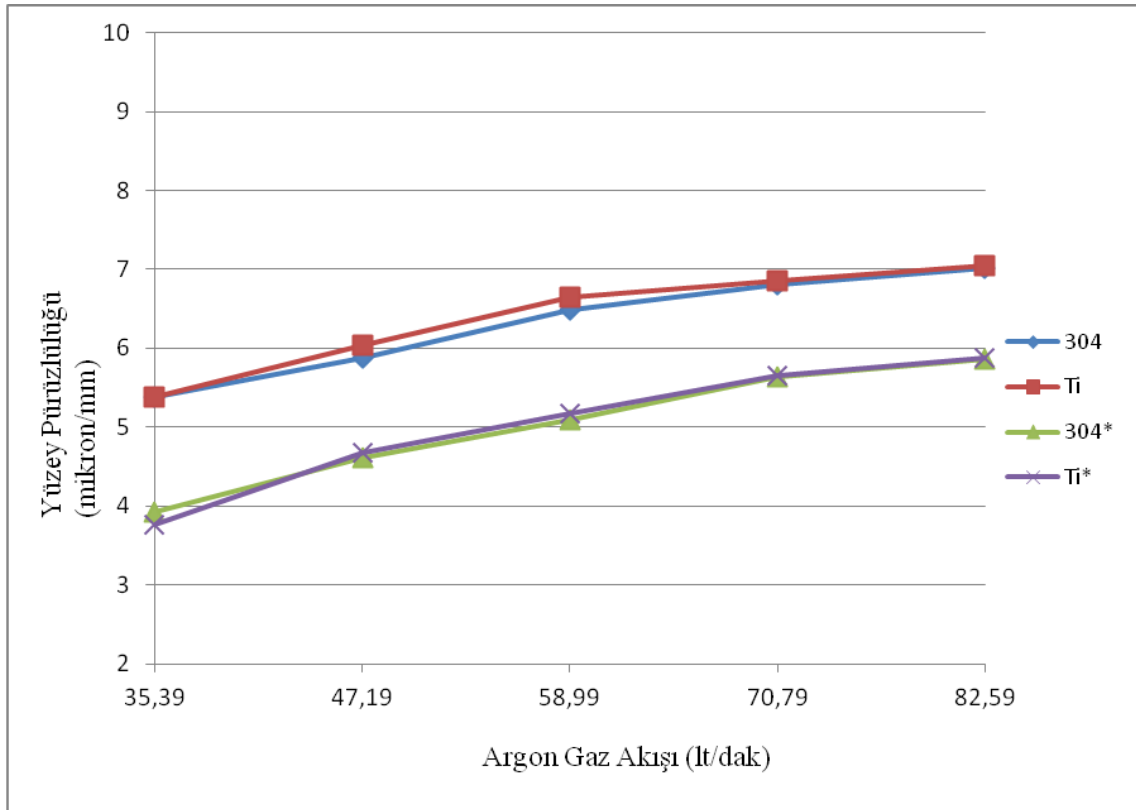
304* ve Ti* aşınma testi sonrası ölçüm değerleridir.

Şekil 4.35 ve Şekil 4.36’da gaz akışlarına bağlı yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişim verilmiştir. Şekil 4.35’de hidrojen gaz akış değeri arttıkça yüzey pürüzlülük değerleri azalmaktadır. Hidrojen gazı ile birlikte plazma sıcaklığı yükselmekte, sıcak kaplama şartları oluşmakta ve plazma jetinden çıkan parçacıklar kaba büyük parçacıklardan daha fazla ergimiş, plastisiteleri yüksek küçük parçacıklara dönüşmektedir. Bu iyi ergimiş plastisiteleri yüksek parçacıklar yoğun ve düşük pürüzlülüğe sahip kaplama yapısını oluşturmaktadır. Hidrojen gaz akışı sıfır iken hidrojen gazının olmaması sebebiyle plazma sıcaklığı düşüktür, soğuk kaplama şartları mevcuttur ve buna bağlı yetersiz ergime sebebiyle kaplama yapısı daha kabadır, daha fazla oksit+gözenek içerir, dolayısıyla hidrojen gazı olmaksızın elde edilen kaplama yapısı daha pürüzlüdür.



Şekil 4.35. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı yüzey pürüzlülüğünde değişim (mikron/mm). 304* ve Ti* aşınma testi sonrası ölçüm değerleridir.

Şekil 4.36'da argon gaz akış değeri arttıkça yüzey pürüzlülük değerleri artmaktadır. Argon gazı ile birlikte plazma sıcaklığının yükselmesine ve sıcak kaplama şartlarının oluşmasına rağmen argon gaz akışındaki yüksek artış sebebiyle plazma içine beslenen tungsten karbür kaplama tozlarının hızı artmakta, plazma jetini daha çabuk terk etmekte ve plazma içinde kalış süreleri azalmaktadır. Plazma jetinin içinde daha az kalmaları sebebiyle absorbe ettikleri ısı düşmekte ve plastisiteyi düşük daha büyük ergimiş parçacıklar elde edilmektedir. Ayrıca argon gaz akışındaki yüksek artış sebebiyle ergimiş parçacıkların hızı artmakta ve kaplanacakları yüzeye çarptıklarında daha fazla sıçramaktadırlar. Düşük plastisite ve yüksek hızdan kaynaklanan yüksek sıçrama sebebiyle argon akışındaki artış ile birlikte yüzey pürüzlülüğü artmaktadır.



Şekil 4.36. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı yüzey pürüzlülüğünde değişim (mikron/mm). 304* ve Ti* aşınma testi sonrası ölçüm değerleridir.

4.1.6. Aşınma ölçümleri

Aşınma değerleri her 1000 turda bir % ağırlık kaybı olarak ölçülmüştür. Bir tur süresi 1 saniyedir ve aşınma kuponlarında toplam 10.000 tur aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Aşınma ölçümleri Çizelge 4.13 ve 4.14’de verilmiştir.

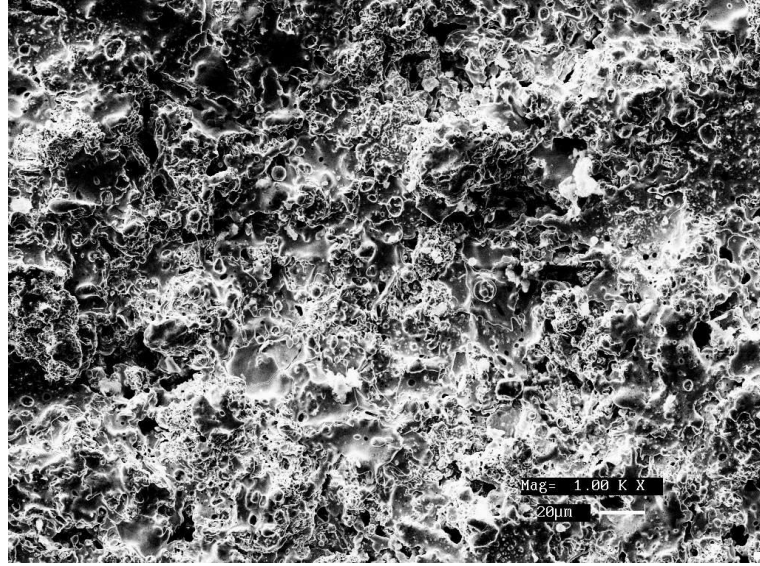
Çizelge 4.13. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı % aşınma

% Toplam Aşınma	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1000 Tur	0,309	0,321	0,081	0,086	0,112	0,114	0,131	0,136	0,150	0,159
2000 Tur	0,424	0,442	0,126	0,136	0,150	0,153	0,208	0,221	0,232	0,242
3000 Tur	0,522	0,546	0,154	0,166	0,184	0,189	0,262	0,280	0,287	0,299
4000 Tur	0,613	0,641	0,171	0,185	0,216	0,221	0,310	0,330	0,338	0,353
5000 Tur	0,695	0,724	0,186	0,202	0,243	0,249	0,354	0,376	0,383	0,401
6000 Tur	0,766	0,802	0,200	0,218	0,269	0,275	0,389	0,415	0,421	0,442
7000 Tur	0,825	0,863	0,213	0,232	0,294	0,301	0,418	0,445	0,454	0,477
8000 Tur	0,872	0,919	0,224	0,245	0,316	0,326	0,444	0,473	0,485	0,510
9000 Tur	0,916	0,967	0,234	0,258	0,337	0,350	0,467	0,497	0,512	0,541
10000 Tur	0,954	1,010	0,244	0,269	0,357	0,372	0,486	0,517	0,536	0,566

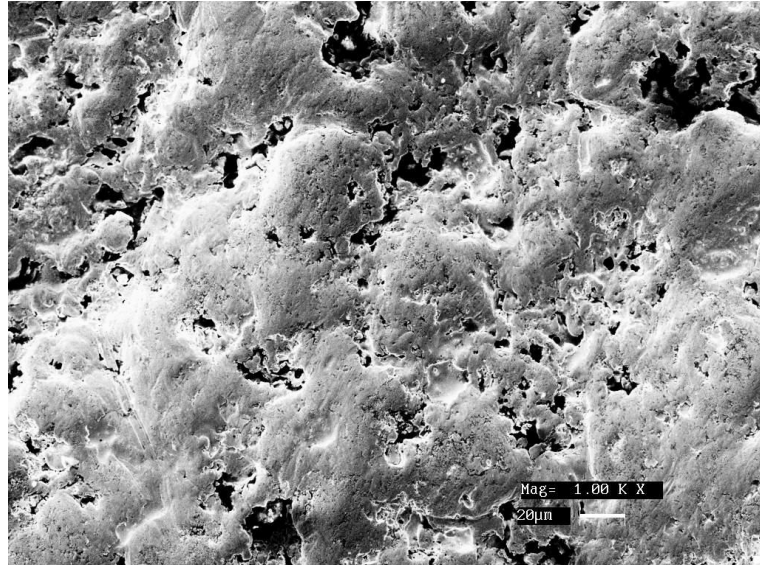
Çizelge 4.14 Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı % aşınma

%Toplam Aşınma	11	12	3	4	13	14	15	16	17	18
1000 Tur	0,127	0,142	0,081	0,086	0,077	0,084	0,074	0,082	0,075	0,081
2000 Tur	0,189	0,206	0,126	0,136	0,100	0,110	0,095	0,108	0,096	0,104
3000 Tur	0,230	0,251	0,154	0,166	0,119	0,133	0,112	0,130	0,111	0,124
4000 Tur	0,260	0,282	0,171	0,185	0,135	0,152	0,128	0,148	0,125	0,141
5000 Tur	0,287	0,312	0,186	0,202	0,149	0,166	0,139	0,161	0,135	0,154
6000 Tur	0,312	0,340	0,200	0,218	0,161	0,179	0,149	0,172	0,145	0,165
7000 Tur	0,336	0,366	0,213	0,232	0,173	0,191	0,157	0,182	0,154	0,174
8000 Tur	0,358	0,392	0,224	0,245	0,182	0,201	0,164	0,190	0,161	0,181
9000 Tur	0,379	0,415	0,234	0,258	0,190	0,210	0,170	0,196	0,167	0,188
10000 Tur	0,399	0,437	0,244	0,269	0,196	0,217	0,175	0,202	0,172	0,193

Şekil 4.37 ve 4.38’de 14 numaralı titanyum numunenin aşınma testi öncesi ve aşınma testi sonrası taramalı elektron mikroskobundan elde edilen yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.38’de aşınmanın abrasyonla gerçekleştiği görülmektedir.

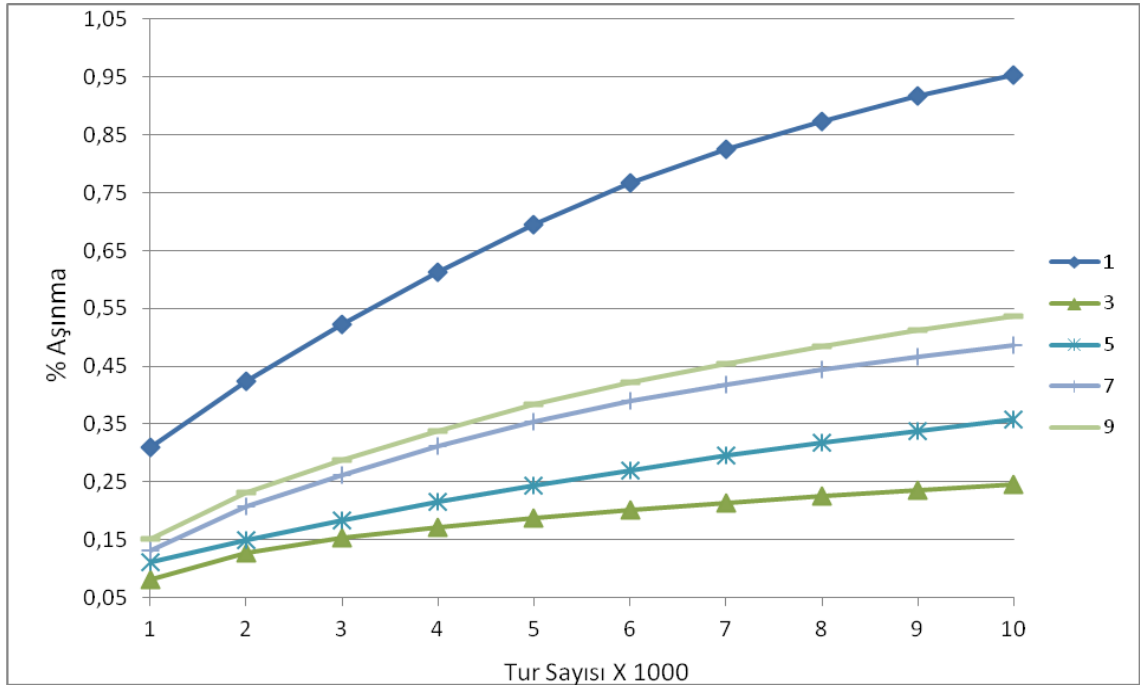


Şekil 4.37. 14 numaralı numunenin aşınma testi öncesi taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (1000X)

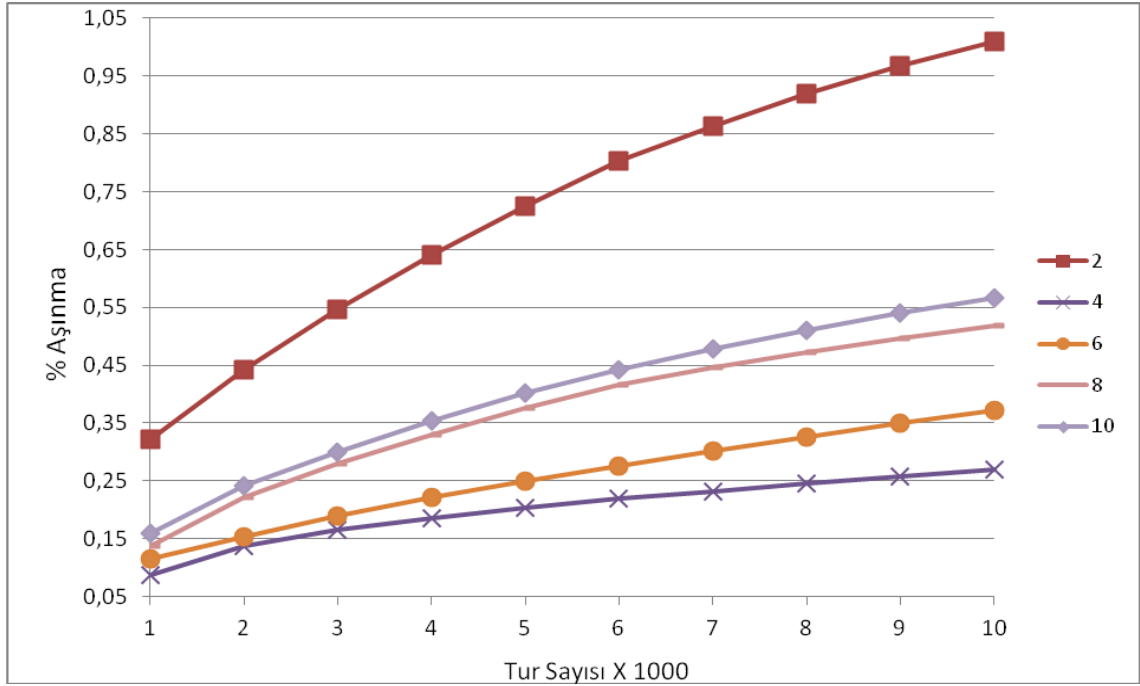


Şekil 4.38. 14 numaralı numunenin aşınma testi sonrası taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (1000X)

Şekil 4.39’da 304 paslanmaz çelik kuponlar için Şekil 4.40’da ise titanyum kuponlar için argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı kaplamanın aşınma davranışı gösterilmiştir. Şekil 4.39. ve 4.40’dan görülebileceği gibi argon gaz akışı sabitken en düşük aşınma değerleri hidrojen gaz akışının 2,36 lt/dak olduğu 3 ve 4 numaralı kuponlarda elde edilmiştir. Hidrojen gaz akışının sıfır olduğu 1 (304 PÇ) ve 2 (Titanyum) numaralı kuponlarda aşınma değerleri çok yüksektir. Bunun sebebi hidrojen gazı olmaması sebebiyle plazma enerjisinin çok düşük olması, soğuk kaplama şartlarının oluşması ve buna bağlı yetersiz ergime sebebiyle kaplama yapısının diğer kuponlara göre kaba ve yumuşak olmasıdır. Ayrıca Şekil 4.18 ve 4.20’den de görülebileceği gibi yapı bol miktarda oksit+gözenek içermektedir. Yapıdaki yüksek oksit+gözenek miktarı kaplamayı oluşturan taneciklerin birbiri ile bağlanmasını zayıflatmakta, bu tanecikler abrasif bir yük altında birbirlerine tutunamadıkları için yerlerinden daha kolay çıkmakta, sonuç olarak kaplama daha kolay aşınmaktadır.



Şekil 4.39. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı 304 paslanmaz çelik kuponlarda % aşınma

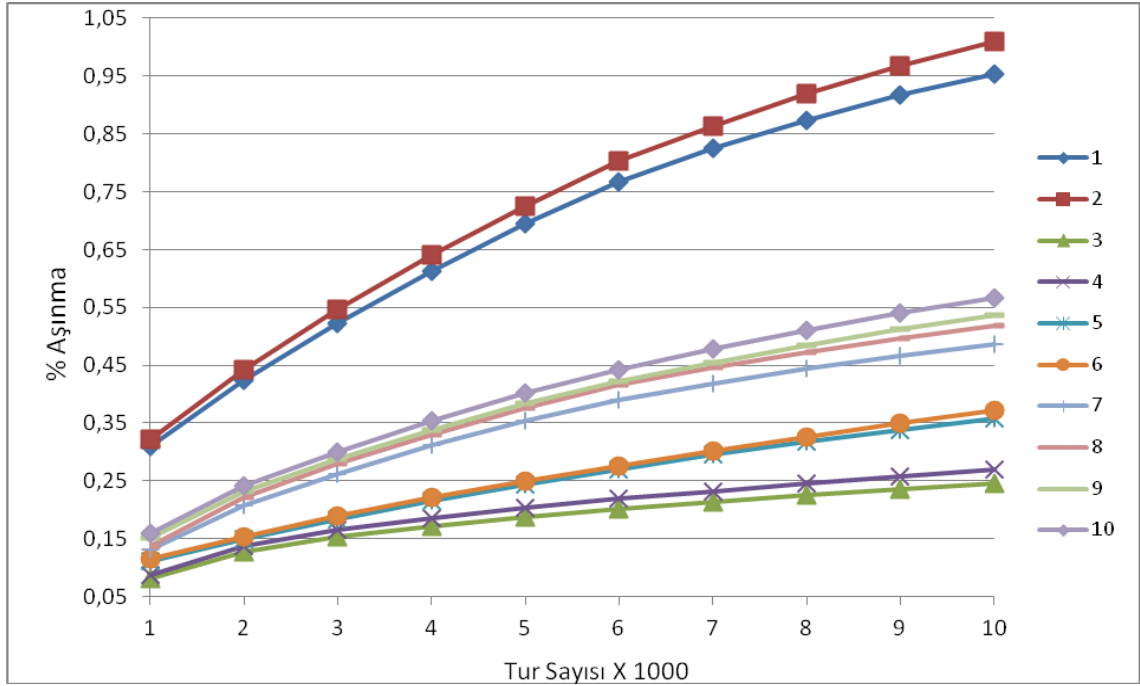


Şekil 4.40. Argon gaz akışı sabitken(47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı titanyum kuponlarda % aşınma

Hidrojen gaz akışı ile birlikte aşınma değerleri artmaktadır. Hidrojen gaz akışındaki artış ile birlikte plazma sıcaklığı artmakta, Şekil 4.27, 4.28 ve 4.29'dan görülebileceği gibi yapıdaki WC fazlar sıcaklık etkisiyle bozunarak kırılğan ve gevrek ikincil fazlara dönüşmektedir. Bu yapı WC kristalleri, ikincil fazları (W_2C ve W) ve amorf kırılğan kobalt esaslı bağlayıcı fazı içerir. Sanchez ve arkadaşlarının belirttiği gibi kaplama içinde oluşan gevrek ve kırılğan ikincil fazların miktarındaki artış ile birlikte kaplamanın aşınma direnci düşmektedir.

Şekil 4.41'den görülebildiği gibi hidrojen gaz akışına bağlı 304 paslanmaz çelik ve titanyum kuponlarda aşınma davranışı benzerdir. Titanyum kuponlarda aşınma biraz daha fazladır. Bunun sebebi titanyumun ısı iletim katsayısının ($21,9 W.m^{-1}.K^{-1}@300^{\circ}K$) 304 paslanmaz çeliğe göre ($14,9 W.m^{-1}.K^{-1}@ 300^{\circ}K$) daha yüksek olması nedeniyle kaplamayı oluşturan sıcak parçacıkların daha hızlı soğumasıdır. Arkadan gelen ergimiş taneciklerin soğuk taneciklere çarpması sonucu bağlanma daha zayıf olmaktadır. Hızlı

soğuma sonucu hem gevreklikleri artmakta hem de birbirleri ile etkileşimleri azalarak birbirlerine bağlanmaları zayıflamaktadır. Paslanmaz çelik numunelere göre titanyum kuponlarda bağlanmanın daha zayıf olması sebebiyle daha kolay aşınabilmektedirler.

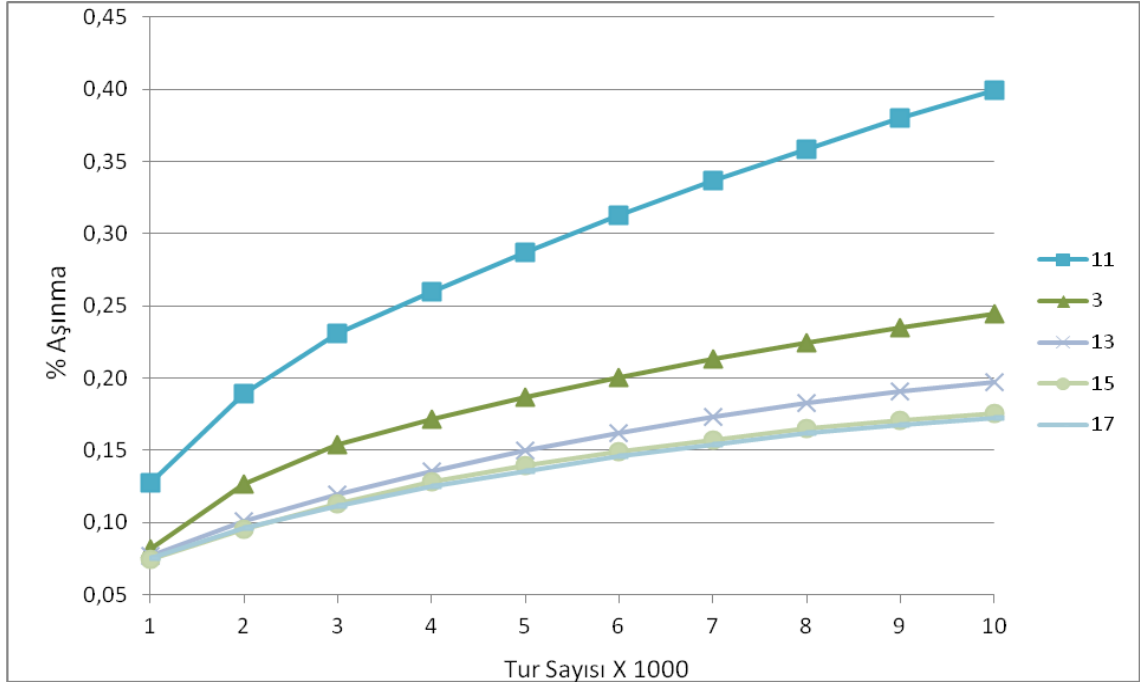


Şekil 4.41. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı bütün kuponlarda % aşınma

Birinci grup denemeler argon gaz akışı sabitken hidrojen gaz akışı değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Hidrojen gaz akışı değişimine bağlı birinci grup denemelerden elde edilen en düşük aşınma değerini veren hidrojen=2,36 lt/dak gaz akışı ikinci grup denemelerde sabit tutulmuştur. Argon gaz akışları değiştirilerek 304 paslanmaz çelik kuponlar için Şekil 4.42’de gösterilen, titanyum kuponlar için ise Şekil 4.43’de gösterilen aşınma değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.42 ve 4.43’den görülebileceği gibi argon gaz akışındaki artış ile birlikte kaplamadaki aşınma miktarı azalmaktadır. Argon gaz akışının 35,39 lt/dak’dan 47,19 lt/dak’ya, 47,19 lt/dak’dan 58,99 lt/dak’ya ve 58,99 lt/dak’dan 70,79 lt/dak’ya çıkması ile kaplamanın aşınma davranışında ciddi bir değişim

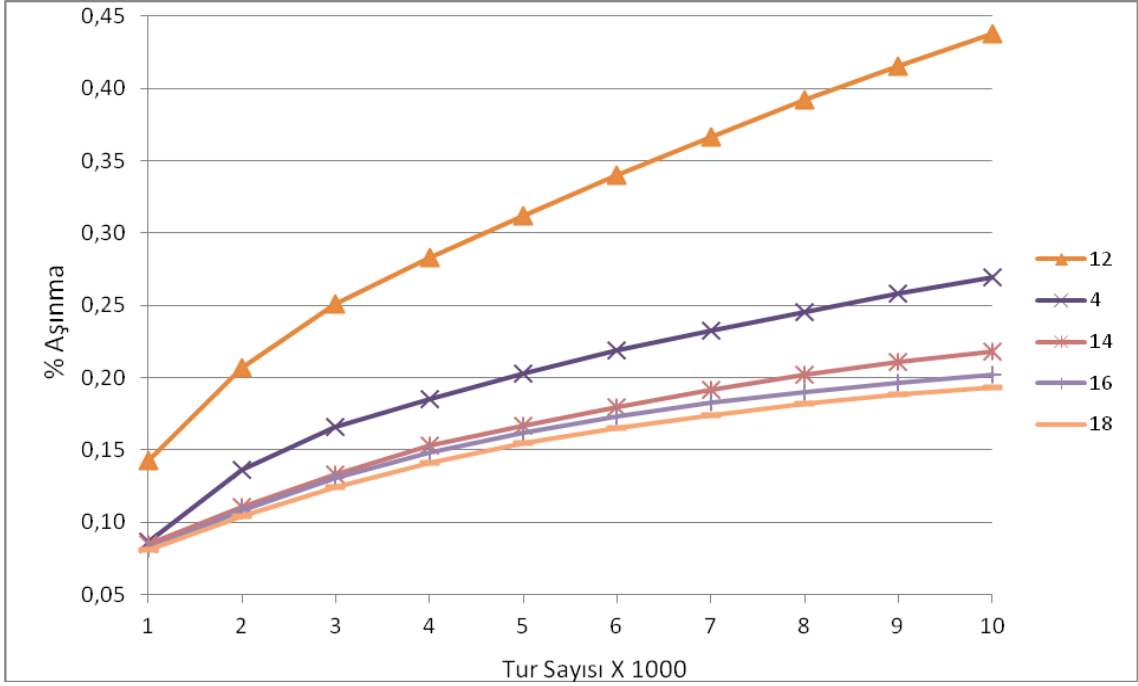
olmaktadır. Fakat 70,79 lt/dak ve 82,59 lt/dak argon akışlarında aşınma davranışı olarak bariz bir farklılık yoktur.

Hidrojen gaz akışı sabitken argon gaz akışındaki artış ile birlikte plazma sıcaklığının artmasına rağmen kaplamanın aşınma miktarı azalmaktadır. Bu da hidrojen gaz akışının artırılması sonucu elde edilen etkiden farklı olarak argon gaz akışı ile birlikte WC'ün bozunmadığı anlamına gelmektedir. Ayrıca hidrojen gaz akış miktarının düşük olması WC ve kobaltın hidrojen ile reaksiyonunu azaltmakta ve kırılgen fazlar oluşmamaktadır.

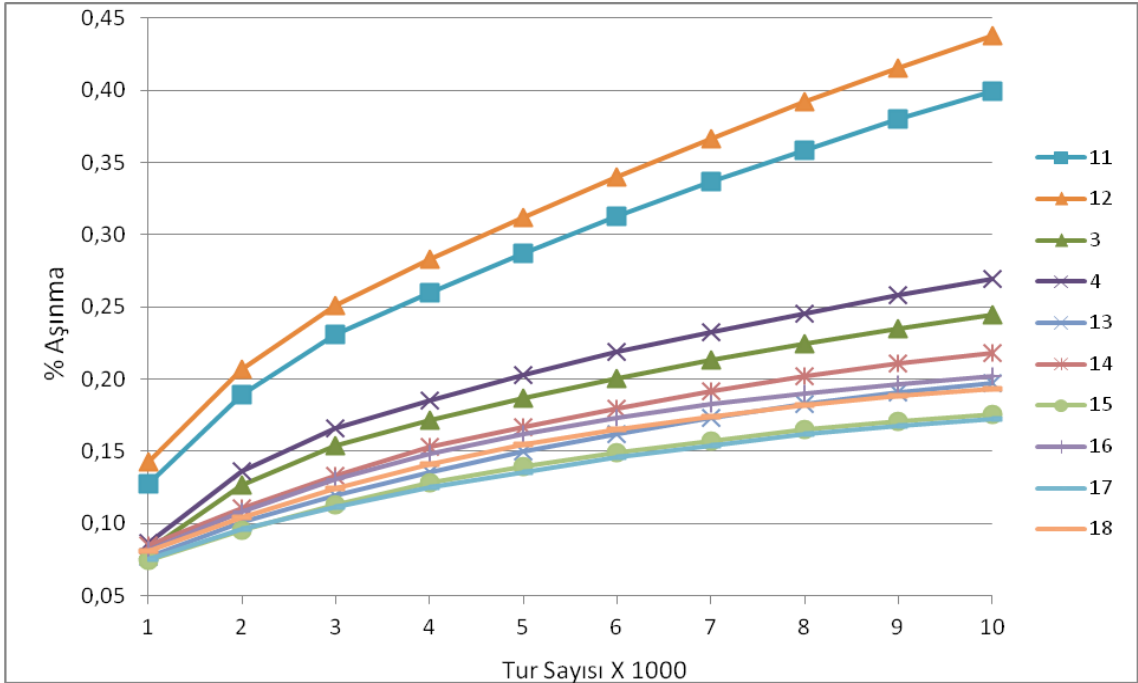


Şekil 4.42. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı 304 paslanmaz çelik kuponlarda % aşınma

Şekil 4.44'den görülebileceği gibi argon gaz akışına bağlı 304 paslanmaz çelik ve titanyum kuponlarda aşınma davranışı benzerdir. Titanyum kuponlarda aşınma miktarı biraz daha fazladır.



Şekil 4.43. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı titanyum kuponlarda % aşınma



Şekil 4.44. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı bütün kuponlarda % aşınma

4.1.7. Çekme testi

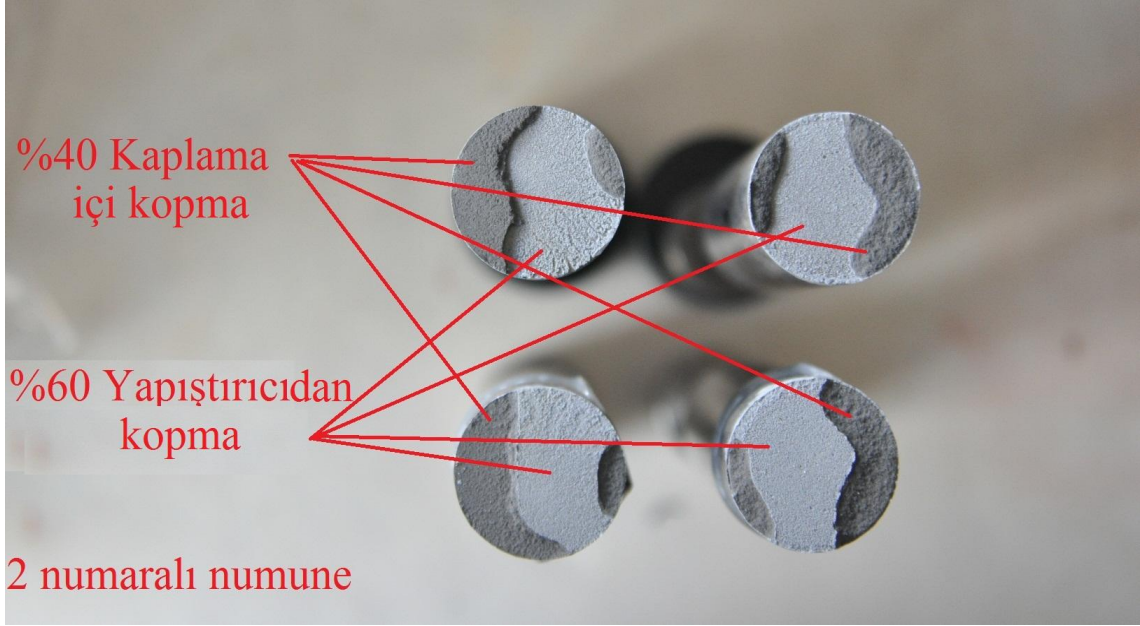
Çekme test sonuçları, kaplamanın kopma mukavemeti ve kopmanın kaplama içerisinde gerçekleştiği bölge olmak üzere iki yönden değerlendirilmiştir. Test sonucunda çizelge 4.15. ve 4.16'da verilen kopma mukavemetleri elde edilmiştir. Çizelge 4.17'de ise kaplamanın hangi bölgeden koptuğu belirtilmiştir. Paslanmaz çelik ve titanyum kuponlarda kopma genelde kaplama içindedir. Şekil 4.45 ve 4.46'da 2 numaralı test numunesinde çekme testi sonrası kopma kesidi (%60 yapıştırıcı-kaplama arayüzeyi, %40 kaplama içi) gösterilmiştir. Şekil 4.47 ve 4.48'de ise 5 numaralı test numunesi için çekme testi sonrası %100 kaplama içi kopma gösterilmiştir.

Çizelge 4.15. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı kaplamanın çekme mukavemeti değerleri (MPa)

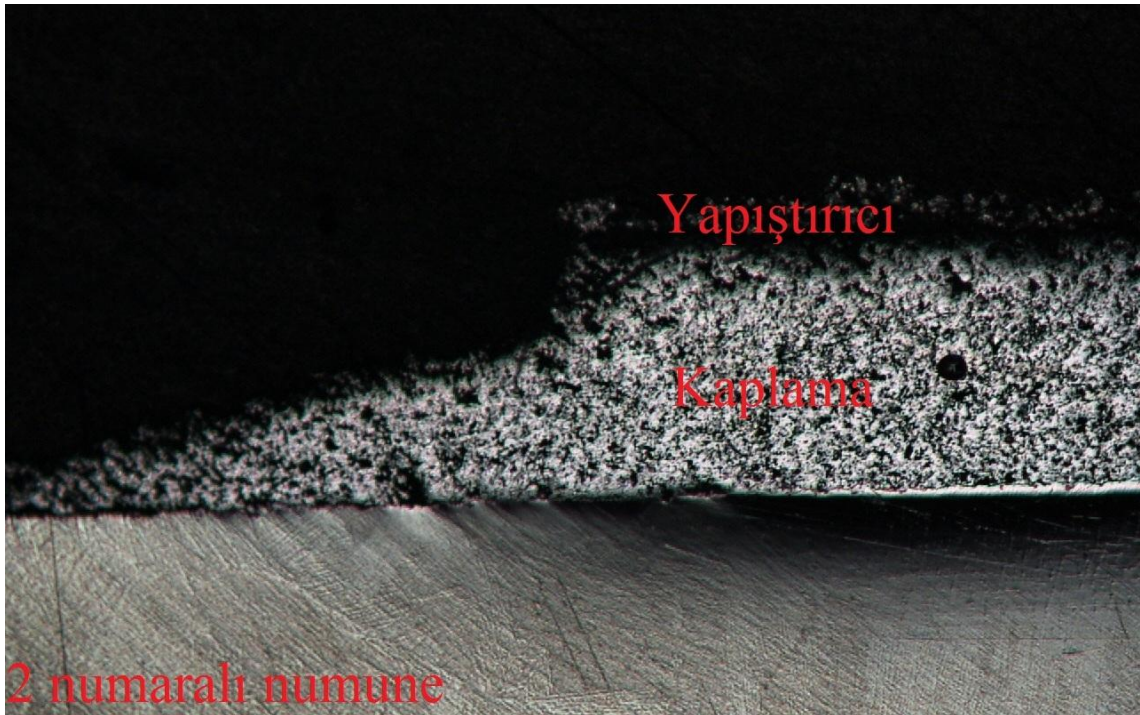
Hidrojen Gaz Akışı (lt/dak)	0	2,36	4,72	7,08	9,44
Test Numunesi ve numarası					
304 (1,3,5,7,9)	28,1437	58,0879	44,187	40,683	40,283
Ti (2,4,6,8,10)	23,8973	51,2666	40,902	38,514	36,778

Çizelge 4.16. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı kaplamanın çekme mukavemeti değerleri (MPa)

Argon Gaz Akışı (lt/dak)	35,39	47,19	58,99	70,79	82,59
Test Numunesi ve numarası					
304 (11,3,13,15,17)	48,2399	58,0879	64,5349	62,1084	46,2651
Ti (12,4,14,16,18)	44,9034	51,2666	62,586	60,1078	44,4323



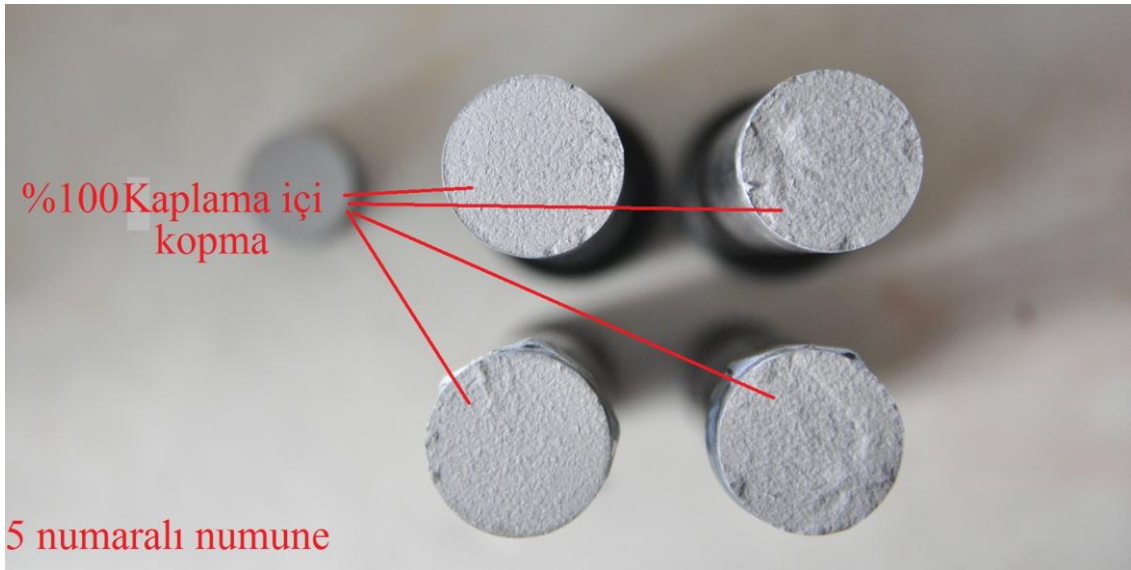
Şekil 4.45. 2 numaralı test numunesinde çekme testi sonrası kopma



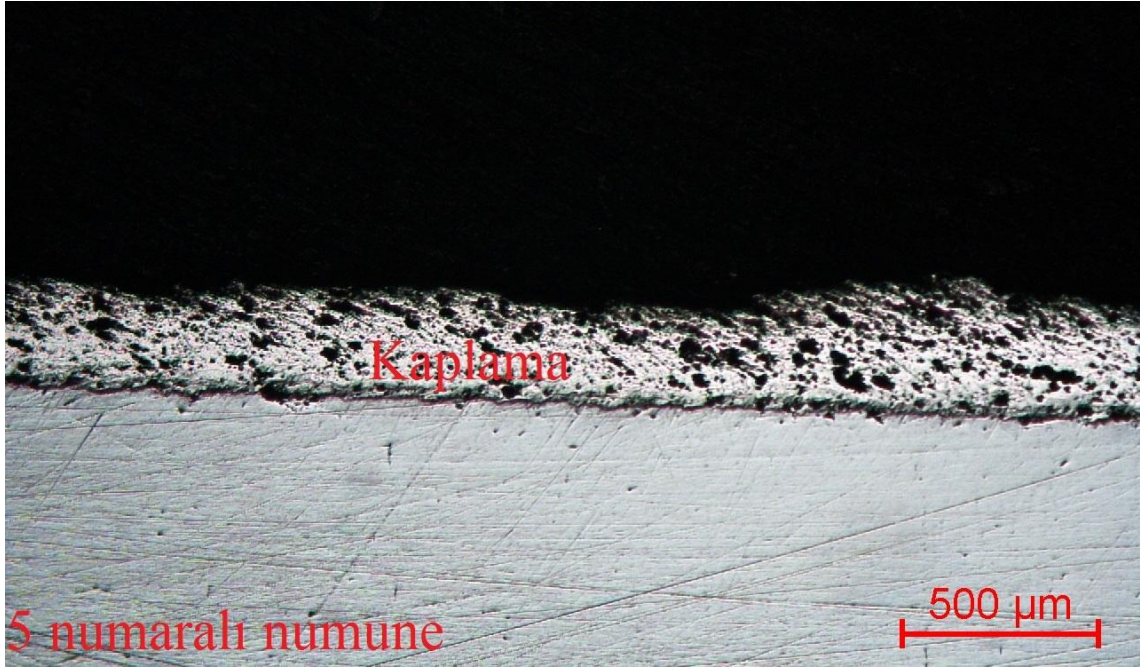
Şekil 4.46. 2 numaralı test numunesinde çekme testi sonrası kopma (50X)

Çizelge 4.17. Çekme testi sonrasında kopma bölgeleri

Test Numunesi	Kopma Bölgesi
1	%60 Yapıştırıcı kaplama arayüz+ %40 kaplama içi
2	%60 Yapıştırıcı kaplama arayüz+ %40 kaplama içi
3	%100 kaplama içi
4	%60 Yapıştırıcı kaplama arayüz+ %40 kaplama içi
5	%100 kaplama içi
6	%100 kaplama içi
7	%100 kaplama içi
8	%100 kaplama içi
9	%100 kaplama içi
10	%100 kaplama içi
11	%100 kaplama içi
12	%100 kaplama içi
13	%100 kaplama içi
14	%100 kaplama içi
15	%100 kaplama içi
16	%100 kaplama içi
17	%100 kaplama içi
18	%100 kaplama içi



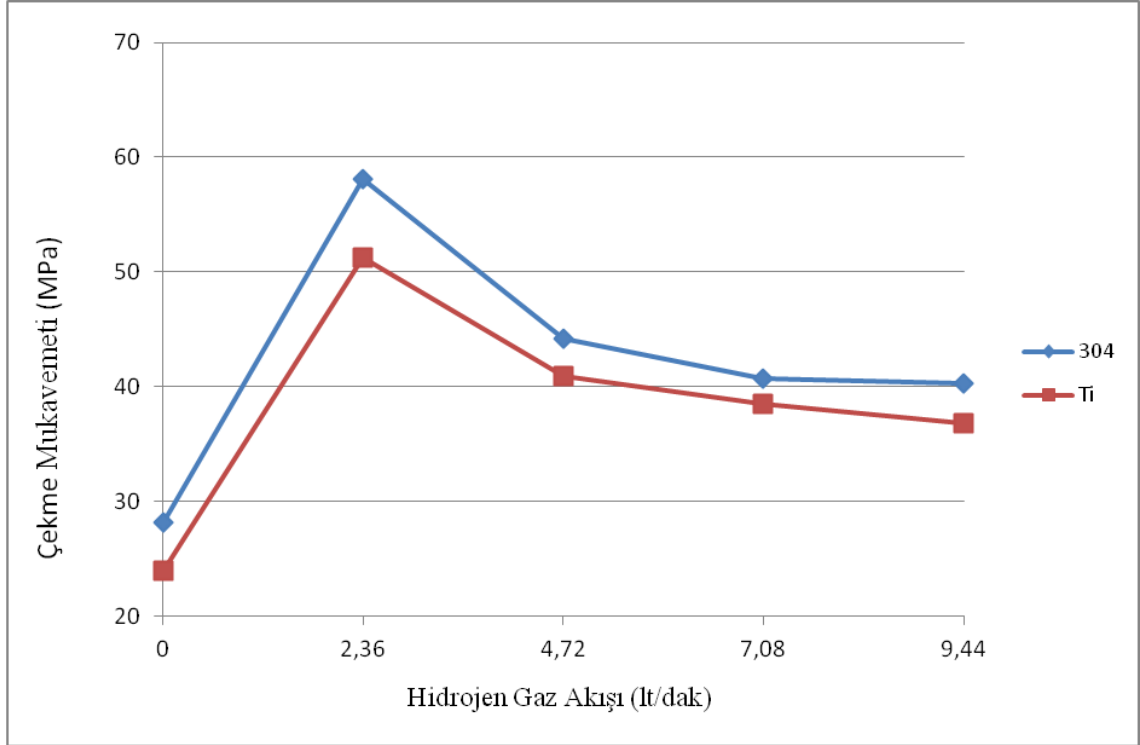
Şekil 4.47. 5 numaralı test numunesinde çekme testi sonrası kopma



Şekil 4.48. 5 numaralı test numunesinde çekme testi sonrası kopma (50X)

Şekil 4.49 ve 4.50’de hidrojen ve argon gaz akış değişimlerine bağlı olarak titanyum ve paslanmaz çelik kuponlar için çekme mukavemetindeki değişim değerleri gösterilmiştir. Şekil 4.49’da hidrojen gaz akış değeri sıfırken çekme mukavemeti düşük çıkmaktadır. Bunun sebebi soğuk kaplama şartları sebebiyle Şekil 4.20’den de görülebileceği gibi oksit+gözenek miktarının yüksek olmasıdır. Kaplama içindeki oksit ve gözenekler kaplama içindeki tanelerin birbirine bağlanmasını azaltmakta, kopma açısından zayıf bölgeler oluşturmaktadır dolayısıyla kaplamanın çekme mukavemeti düşük çıkmaktadır. Plazma sistemine hidrojen gazının girişi ile birlikte plazma ısı yükselmekte, sıcak kaplama şartları oluşmakta ve kaplama içindeki oksit ve gözenek miktarı düşmekte, dolayısıyla kaplama oluşturan tanelerin birbirine bağlanması artmakta ve kaplama çekme mukavemeti yükselmektedir. Daha sonra plazma sıcaklığının yükselmesi ile elde edilen grafik, Şekil 4.33’de verilen sertlik-hidrojen gaz akışı grafiği ile benzerdir. Kaplama sertliğini etkileyen oksit+gözenek miktarı ve ikincil fazların oluşumu gibi parametreler benzer şekilde çekme mukavemetini de

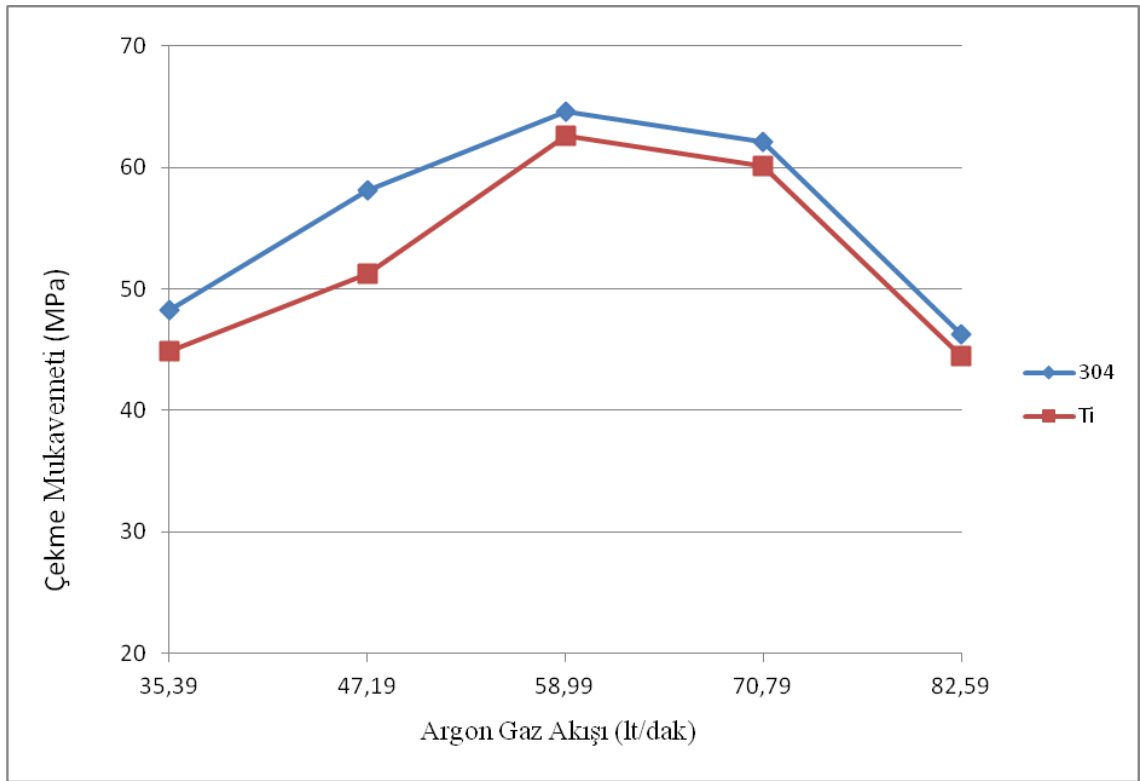
etkilemektedir. Hidrojen gaz miktarındaki artış ile birlikte sıcak kaplama şartları oluşmakta, oksit+gözenek miktarı düşmekte fakat gevrek ve kırılğan ikinci fazların oluşumu ile birlikte çekme mukavemeti değerleri düşmektedir.



Şekil 4.49. Argon gaz akışı sabitken (47,19 lt/dak) hidrojen gaz akışına bağlı çekme mukavemetinde değişim (MPa)

Şekil 4.50'den görüldüğü gibi argon gaz akışı ile birlikte kaplamanın çekme mukavemeti artmakta, argon gaz akış değerinin 58,99 lt/dak olduğu test numunesinde maksimuma ulaşmış ve daha sonra düşmektedir. Şekil 4.21'de gösterildiği gibi kaplama içindeki oksit+gözenek miktarındaki artış bu düşüşe sebep olmaktadır. Önce argon gaz akışındaki artış ile birlikte sıcak kaplama şartları oluşmakta, plazma ısısındaki artış sebebiyle birbirine daha iyi bağlanmış yapı elde edilmektedir. Daha sonra argon gaz akışının yüksek miktarlara çıkması ile plazma içine beslenen kaplama tozları hızlanmakta, plazma jeti içinde kalma süreleri azalmaktadır. Plazma jeti içindeki kalış

süresindenki azalma ile birlikte kaplanacak tozlara enerji transferi azalmaktadır. Yetersiz ergime ve yüksek hızın sebep olduğu gölgeleme sonucu oluşan oksit+gözenekteki artış, kaplamayı oluşturan tanelerin birbirine bağlanmasını zayıflatmakta, kaplamanın çekme mukavemetinde düşüş meydana getirmektedir. İdeal kaplama parametreleri, toz taneciklerinin büyük kısmının plazmanın sıcak merkezinde yer aldığı, uygun sıcaklık ve hızda kaplama yüzeyine, doğru bir açıyla ve sıklıkla çarptığı durumu sağlamalıdır. Elde edilen çekme mukavemeti-argon gaz akışı grafiği Şekil 4.34'de verilen sertlik-argon gaz akışı grafiği ile benzerdir. Kaplama sertliğini etkileyen parametreler benzer şekilde çekme mukavemetini de etkilemektedir.



Şekil 4.50. Hidrojen gaz akışı sabitken (2,36 lt/dak) argon gaz akışına bağlı çekme mukavemetinde değişim (MPa)

Şekil 4.49 ve 4.50'de titanyum kuponların çekme mukavemetleri 304 paslanmaz çelik kuponlara göre düşük çıkmaktadır. Bunun sebebi aşınma davranışına benzer

olarak titanyumun ısı iletim katsayısının ($21,9 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}@300^\circ\text{K}$) 304 paslanmaz çeliğe göre ($14,9 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}@ 300^\circ\text{K}$) daha yüksek olmasıdır. Paslanmaz çelik ana malzeme üzerine çarpan parçacıklar daha yavaş soğumaktadırlar. Bu sebeple birbirleri ile daha fazla etkileşimde bulunmakta ve birbirlerine daha iyi bağlanabilmektedirler. Ergimiş parçacıklar arasındaki bağlanmadaki artış da paslanmaz çelik kuponlarda çekme mukavemetinin titanyum kuponlara göre biraz yüksek olmasına sebep olmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada tungsten karbür kaplamaların özelliklerinin geliştirilmesi için önemli olduğu düşünülen plazma sprey kaplama parametrelerinden argon ve hidrojen gaz akışları incelenmiştir. Elde edilen veriler ve bu verilere dayalı öneriler aşağıda kısaca sunulmuştur:

-Kaplamanın performansı, tez çalışmasında incelenen gaz akış parametreleri ile büyük ölçüde değişkenlik göstermektedir.

-Kaplama sertliği; ölçüm metoduna bağlı olarak ana malzemelerde meydana gelen esneme sebebiyle ana malzeme sertliğinden etkilenmektedir.

-Sertlik hariç aşınma ve çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerde paslanmaz çelik kuponlarda daha iyi değerler elde edilmiştir. Bu durumun titanyumun ısı iletim katsayısının paslanmaz çeliğe göre daha yüksek olması sebebi ile ana metale çarpan ergimiş taneciklerin daha hızlı soğuması ve buna bağlı olarak taneler arası bağlanmanın daha zayıf olmasından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

-Argon ve hidrojen gaz akışlarındaki artış ile voltaj artmakta, plazma sıcaklığı yükselmekte ve sıcak kaplama koşulları oluşmakta, numune yüzey sıcaklığı artmaktadır. Hidrojen gaz akışının sıfırdan 2,36 lt/dak'ya çıkması parça sıcaklığını yaklaşık 10 °C arttırmakta, daha sonra hidrojen gaz akışındaki 2,36 lt/dak'lık artışlar parça sıcaklığını yaklaşık 5°C arttırmaktadır. Argon gaz akışındaki 11,8 lt/dak'lık artışlar parça sıcaklığını yaklaşık 10 °C arttırmaktadır

-Hidrojen gaz akışındaki artış ile birlikte daha yoğun, daha az gözenekli ve birbirine daha iyi bağlanmış yapı elde edilmektedir.

-Taban oksidi oluşumu plazma gazlarından belirgin şekilde etkilenmemektedir. Aynı kaplama parametrelerinde titanyumun oksitlenme eğiliminin daha yüksek olması sebebi ile titanyum kuponlarda taban oksidi daha fazla oluşmaktadır. Aynı parametrelerde işlem gören 5 ve 6 numaralı numunelerden 6 numaralı titanyum numunede 5 numaralı paslanmaz çelik numuneye göre taban oksidi bariz miktarda yüksektir.

-Plazma sıcaklığının düşük olduğu (hidrojen=0, argon=47,9 lt/dak) ve plazma ısısının plazma jetine beslenen kaplama tozlarına az iletilebildiği koşullarda

(hidrojen=2,36 lt/dak, argon=82,59 lt/dak) ergimemiş tanecik oranında artış görülmüştür.

-Hidrojen gazının olmadığı koşullarda (1 ve 2 numaralı numuneler) plazma sıcaklığının düşük olması sebebi ile kaplama içinde maksimum miktarda gözenek (%27-28) gözlenmiştir. Hidrojen gaz akışındaki artış ile gözenek miktarı % 8'lere daha sonra %5 civarına düşmektedir..

-Argon gaz akışının çok yüksek olduğu 15 ile 16 numaralı (argon=70,79 lt/dak) ve 17 ile 18 (argon=82,59 lt/dak) numaralı numuneleri içeren durumlarda sıcak plazma koşulları oluşmasına rağmen plazma jeti içine giren kaplama tozları yüksek debi etkisiyle plazma jeti içinde yeterli süre kalamamakta, yeterli seviyede eriyememekte ve gözenek miktarı %12-14 seviyesine çıkmaktadır.

-Hidrojen gaz akışı ile birlikte sıcak kaplama şartlarına bağlı olarak kaplama yapısında gevrek ve kırılğan ikincil fazların oluşumu artmaktadır. Hidrojen gaz akışının sıfır olduğu 1 ve 2 numaralı numunelerin XRD sonuçları ile karşılaştırıldığında 5 ve 6 numaralı numune sonuçları (hidrojen=4,72 lt/dak) ile 9 ve 10 numaralı numune sonuçlarında (hidrojen=9,44 lt/dak) piklerin altında kalan alanın hidrojen gaz akışı ile birlikte genişlediği ve piklerin birbirleri ile iç içe geçtikleri görülmektedir.

-Argon gaz akışının yüksek miktarlarda olması parçacıkların daha az ısınmasına yol açtığından ikincil fazların oluşumu azalmaktadır. Argon gaz akışının 35,39 lt/dak olduğu 11 ve 12 numaralı numunelere ait XRD sonuçlarında piklerin altında kalan geniş ve pikler birbirleri ile iç içe geçmiş iken argon gaz akışının 58,99 lt/dak olduğu 13 ve 14 numaralı numuneler ile argon gaz akışının 82,59 lt/dak olduğu 17 ve 18 numaralı numunelerin XRD sonuçlarında piklerin altında kalan alan küçülmekte ve pikler birbirinden ayrılmaktadır.

- Oluşan ikincil fazlar sertliği, çekme mukavemetini ve aşınma direncini düşürmektedir. Bu kaplamada yüksek WC içeriği istenen bir özelliktir. Daha düşük sıcaklıklar ve yüksek hızlar bozunmanın yani ikincil fazların oluşumunun önüne geçtiği belirlenmiştir.

-Hidrojen gaz akışı sıfırdan 2,36 lt/dak'ya çıkması ile sertlik değerleri yükselmekte, ancak daha sonra hidrojen gaz akışında ki 2,36 lt/dak'lık artışlarla WC'ün yüksek sıcaklıkta bozunması ve hidrojen ile reaksiyona girmesi sonucu kırılğan fazlar oluşmakta, sertlik değerlerinde düşüş meydana gelmektedir.

-Argon gaz akışı ile birlikte sıcak kaplama şartları oluşmakta, sertlik artmakta, argon akışının 58,99 lt/dak olduğu 13 ve 14 numaralı numunelerde maksimuma ulaşmakta, daha sonra argon gaz akışındaki artış ile birlikte kaplama içinde oksit+gözenek miktarı artmakta ve bu sebepten sertlikte düşüş meydana gelmektedir.

-Hidrojen gaz akışındaki artış ile kaplama yapısı daha iyi erimiş ve ince tanelerden oluşmakta, yüzey pürüzlülük değerleri azalmaktadır. Hidrojen gaz akışının sıfırdan 9,44 lt/dak'ya çıkması ile yüzey pürüzlülük değerleri 9'dan 4 mikron/mm'ye düşmektedir.

-Argon gaz akışı ile birlikte sıcak kaplama şartları oluşmasına rağmen, yüksek debi sebebiyle kaplama tozlarının plazma jeti içinde kalma süresinde azalma ve yüksek çarpma hızları sonucu meydana gelen sıçrama sonucu yüzey pürüzlülük değerleri artmaktadır. Argon gaz akışının 35,39 lt/dak olduğu 11 ve 12 numaralı numunelerde yüzey pürüzlülük değeri 5,30 mikron/mm civarı iken argon gaz akışının 82,59 lt/dak olduğu 17 ve 18 numaralı numunelerde 7 mikron/mm civarındır.

-Numunelerin çekme mukavemetleri ile sertlikleri doğru orantılı şekilde hareket etmektedir.

-Paslanmaz çelik ve titanyum numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinde plazma gaz akışları ile meydana gelen değişimler benzerdir ve ana malzemenin kaplama mekanik özelliklerine etkisi çok azdır.

-Mekanik özellikler ve mikroyapı açısından en iyi değerler 3 ve 4 numaralı kuponlar (Argon=47,19 lt/dak, Hidrojen=2,36 lt/dak) ile 13 ve 14 numaralı kuponlarda (Argon=58,99 lt/dak, Hidrojen=2,36 lt/dak) elde edilmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- AWS Committee, 1997, Thermal Spraying: Practice, Theory, and Application, American Welding Society Inc , 12-15
- Bonny K., P.De Baets, B.Lauwers, J.Vleugels, O.Van Der Biest, 2004, Characterization of Tribological Behaviour of Hardmetals, Proceedings of the 8th International Symposium on Tribology, p. 168-175
- Buffalotungsten, Kasım 2010, www.buffalotungsten.com
- Crawmer Daryl E., 2004a, Introduction to Coatings, Equipment, and Theory, Thermal Spray Technologies Inc., Handbook of Thermal Spray Technology, p. 43-46
- Crawmer Daryl E., 2004b, Thermal Spray Processes, Thermal Spray Technologies Inc., Handbook of Thermal Spray Technology, p. 47-53
- Davis J.R., 2004, Selected Applications, Handbook of Thermal Spray Technology , p.175-213
- Erickson. L. C.- Hawthorne H. M.- Troczynski, T. 2001, Wear 250, p. 569-575
- Esteve J., E.Martinez, G.Zambrano, P.Prieto, C.Rincon, H.Galindo, 1999, Mechanical and Tribological Properties of Tungsten Carbide Sputtered Coatings, Sociedad Mexicana de Ciencia de Superficies y de Vacío, Superficies y Vacío 9, p.276-279,
- Exner H.E. ,1979, Physical and Chemical Nature of Cemented Carbides, International Materials Review p.149-173.
- Evcin A. Yrd. Doç. Dr, 2006, Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi Kaplama Teknikleri Ders Notları
- French D. N. and D. A. Thomas, 1965, Hardness Anisotropy and Slip in WC Crystals, Transaction of the AIME, p.950-952
- General Electric, 2010, Orientation to Coating
- Hermanek Frank J., 2001, Thermal Spray Terminology and Company Origins, First Printing, ASM International, Materials Park, OH
- ITIA, Kasım 2010, International Tungsten Industry Association, www.itia.info

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Koutsomichalis A., N.M. Vaxevanidis, G. Petropoulos, A. Mourlas, S.S. Antoniou, 2008, Friction, Wear And Mechanical Behaviour Of Plasma Sprayed Wc–12% Co Coatings On Mild Steel, Proceedings of the 7th International Conference Coatings in Manufacturing Engineering, p. 259-268
- Lassner E., Wolf-Dieter Schubert, 2009, Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds, p.7
- Longo Frank N., 2004, Introduction to Processing and Design, Longo Associates, Handbook of Thermal Spray Technology , p.108-119
- Lovelock, H. L. de Villiers, 1998, “Powder/Processing/Structure Relationships in WC-Co Thermal Spray Coatings: A Review of the Published Literature,” Journal of Thermal Spray Technology, Volume 7, No. 3, p. 357–373
- Sanchez E., E. Bannier, M.D. Salvador, V. Bonache, J.C. Garcí’a, J. Morgiel, and J. Grzonka, 2009, Microstructure and Wear Behavior of Conventional and Nanostructured Plasma-Sprayed WC-Co Coatings, Journal of Thermal Spray Technology, Volume 19
- Sulzer Metco, 2005, Thermal Spray Overview
- Tucker R.C., 1994, ASM Handbook, ASM International Handbook Committee, Surface Engineering Volume 5, p.1445-1471
- Voyer J. and Marple B. R. , 1999, “Sliding Wear Behavior of High Velocity Oxy-Fuel and High Power Plasma Spray-Processed Tungsten Carbide-Based Cermet Coatings,” Wear, vol. 225–229, part 1, p. 135–145
- Weidmann E., Guesnier A., Duclos B., 2005, Metallographic preparation of thermal spray coatings, Struers Application Notes, www.struers.com, p.1-6
- Wielage B., H. Pokhmurska, A. Wank, G. Reisel, S. Steinhäuser, M. Woezel, 2004, Influence of Thermal Spraying Method on the Properties of Tungsten Carbide Coatings, Modern Wear and Corrosion Resistant Coatings Obtained by Thermal Spraying, Internat Conference, p.39-47