

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM ALAŞIMI VE BRONZU YÜZEYİNE OKSİT VE
KARBÜR BİLEŞİKLERİNİN PLAZMA SPREY YÖNTEMİYLE
KAPLANMASININ ARAŞTIRILMASI**

Serkan ÖZEL

**DOKTORA TEZİ
METALURJİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

ELAZIĞ, 2009

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ALAŞIMI VE BRONZU YÜZEYİNE OKSİT VE KARBÜR
BİLEŞİKLERİNİN PLAZMA SPREY YÖNTEMİYLE KAPLANMASININ
ARAŞTIRILMASI

Serkan ÖZEL

DOKTORA TEZİ
METALURJİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu tez, tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Doç.Dr. Hüseyin TURHAN

Üye: Prof. Dr. M. Mustafa YILDIRIM

Üye: Doç. Dr. Mustafa ÖKSÜZ

Üye: Doç. Dr. Ahmet HASÇALIK

Üye: Yard. Doç. Dr. Tülay YILDIZ

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tezin önerilmesinde ve çalışmalarım esnasında benden yardımını esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hüseyin TURHAN'a ve desteklerini esirgemeyen hocam Sayın Prof. Dr. M. Mustafa YILDIRIM'a da teşekkürlerimi bir borç bilirim. Deneylerimin yapılmasında benden yardımını esirgemeyen Türk Hava Yolları Teknik A.Ş. Müdürlüğü ile plazma kaplama biriminde çalışan teknik personeline ve Senkron Metal A.Ş.'ne teşekkürlerimi sunarım. Tezimin yazılması aşamasında manevi desteğini esirgemeyen arkadaşım, Yard.Doç.Dr. Furkan SARSILMAZ'a şükranlarımı sunarım. Ayrıca tüm çalışmalarımda yardım ve desteğini gördüğüm eşim Tuğba ÖZEL'e de teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER	II
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	V
TABLolar LİSTESİ.....	IX
ÖZET	X
ABSTRACT.....	XII
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	3
2.1. Alüminyum Alaşımları.....	4
2.1.1. Alüminyum-Bakır Alaşımı (AA 2024 Serisi).....	6
2.2. Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler	8
3. BAKIR VE BAKIR-ALÜMİNYUM ALAŞIMI.....	12
3.1. Bakır-Alüminyum Alaşımı (Alüminyum Bronzları).....	13
4. SERAMİK MALZEMELER	17
4.1. Oksit Seramikler	18
4.1.1. Alümina [Alüminyum Oksit (Al_2O_3)]	18
4.1.2. Titanyum Oksit (TiO_2)	19
4.1.3. Zirkonya (ZrO_2)	20
4.2. Oksit Olmayan Seramikler	22
4.2.1. Karbürler	22
4.2.1.1. Bor Karbür (B_4C)	22
4.2.1.2. Krom Karbür (Cr_2C_3)	24
4.2.1.3. Silisyum Karbür (SiC).....	25
5. ISIL PÜSKÜRTME KAPLAMA TEKNİKLERİ.....	27
5.1. Alevle püskürtme	28
5.1.1. Alevle Tel Püskürtme	30
5.1.2. Alevle Toz Püskürtme.....	31
5.2. Patlamalı püskürtme (D-Gun).....	32
5.3. Elektrik Ark Püskürtme	33
5.4. Plazma Püskürtme.....	34
5.5. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt (HVOF) Püskürtme	34

6. PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİ	35
6.1. Giriş.....	35
6.2. Plazma Püskürtme Sistemi	36
6.3. Plazma Gazları	39
6.3.1. Azot (N ₂).....	39
6.3.2. Hidrojen (H ₂).....	39
6.3.3. Argon (Ar) ve Helyum (He).....	40
6.4. Plazma Işını.....	41
6.5. Alt Malzeme yüzeyine Tozun Kaplanması	44
7. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	46
8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	49
8.1. Alt Malzeme Olarak Kullanılan Alüminyum Alaşımı ve Bronzu.....	49
8.2. Kaplamada Kullanılan Tozlar ve Karışım Oranları	50
8.2.1. Alüminyum alaşım alt malzeme yüzeyine kaplanan tozlar ve karışım oranları.....	50
8.2.2. Alüminyum bronz alt malzeme yüzeyine kaplanan tozlar ve karışım oranları	52
8.3. Kaplanacak Alt Malzemelerin Yüzeylerinin Pürüzlendirilmesi	54
8.4. Plazma püskürtme Sisteminde Numunelerin Kaplanması	55
8.5. Kaplanan Numunelere Uygulanan Mikrosertlik ve Çekme Testi	58
8.6. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri.....	60
8.7. Kaplanan Numunelere Uygulanan Isıl Genleşme Deneyi.....	60
9. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	62
9.1. Al alaşımı yüzeyine (AA 2024-T4) oksit kaplama	62
9.1.1. Mikroyapı İncelemesi.....	62
9.1.2. Mikrosertlik ve Çekme Dayanımı İncelemesi.....	77
9.1.3. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü	78
9.1.4. Isıl Genleşme İncelemesi	79
9.2. Al Alaşımı Yüzeyine (AA 2024-T4) Karbür Kaplama	80
9.2.1. Mikroyapı İncelemesi.....	80
9.2.2 Mikrosertlik ve Çekme Dayanımı İncelemesi.....	91
9.2.3. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü	93
9.2.4. Isıl Genleşme İncelemesi	94
9.3. Al Bronzu Yüzeyine (Cu alaşımı) Oksit Kaplama.....	95
9.3.1. Mikroyapı İncelemesi.....	95
9.3.2. Mikrosertlik ve Çekme Dayanımı İncelemesi.....	110
9.3.3. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü	112

9.3.4. Isıl Genleşme İncelemesi	113
9.4. Al Bronzu Yüzeyine (Cu alaşımı) Karbür Kaplama	114
9.4.1. Mikroyapı İncelemesi.....	114
9.4.2. Mikrosertlik ve Çekme Dayanımı İncelemesi.....	129
9.4.3. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü	131
9.4.4. Isıl Genleşme İncelemesi	132
10. GENEL SONUÇLAR	133
10.1. Sonuçlar	136
10.2. Öneriler	137
KAYNAKLAR	138
ÖZGEÇMİŞ.....	149

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Alüminyum-Bakır (Al-Cu) faz diyagramı	8
Şekil 3.1. Bakır-Alüminyum (Cu-Al) faz diyagramı	14
Şekil 5.1. Isıl püskürtme kaplama yönteminin şematik olarak gösterimi	28
Şekil 5.2. Tel veya çubuk ile gerçekleştirilen alevle püskürtme sisteminin şematik görüntüsü	30
Şekil 5.3. Alevle toz püskürtme ile gerçekleştirilen kaplama işlemi	31
Şekil 5.4. Alevle toz püskürtme sisteminin şematik görünüşü	31
Şekil 5.5. Patlamalı püskürtme sisteminin şematik olarak gösterilişi	32
Şekil 5.6. Silindirik altlık malzemesinin patlamalı püskürtme yöntemi ile kaplanması	33
Şekil 5.7. Elektrik ark püskürtme sisteminin şematik görünüşü	33
Şekil 5.8. HVOF püskürtme tabancasıyla birleştirmenin şematik gösterilişi	34
Şekil 6.1. Plazma püskürtme sistemi ile gerçekleştirilen kaplamaların genel yapısı	36
Şekil 6.2. Kontrol panelli atmosferik plazma püskürtme sisteminin şekli	37
Şekil 6.3. Atmosferik plazma püskürtme sisteminin güç kaynağı	37
Şekil 6.4. Atmosferik plazma püskürtme sisteminin toz besleme ünitesi	38
Şekil 6.5. Atmosferik plazma püskürtme sisteminin plazma tabancası	38
Şekil 6.6. İyonizasyon işleminin şematik gösterilişi	41
Şekil 6.7. Plazma ışınının sıcaklık dağılımı	42
Şekil 6.8. Argon ve azot gazı kullanılarak elde edilen plazma ışının sıcaklık dağılımı	43
Şekil 6.9. Plazma püskürtme işleminin şematik olarak gösterilişi	44
Şekil 6.10. Alt malzeme yüzeyine tozun çarpıp yassılaşması	45
Şekil 8.1. Al_2O_3 tozunun SEM fotoğrafı	51
Şekil 8.2. B_4C tozunun SEM fotoğrafı	52
Şekil 8.3. $ZrO_2 + \%8 Y_2O_3$ tozunun SEM fotoğrafı	53
Şekil 8.4. $Cr_3C_2 + \%7(NiCr)$ tozunun SEM fotoğrafı	54
Şekil 8.5. Yüzey pürüzlendirme cihazı	55
Şekil 8.6. Kaplama işleminin gerçekleştirildiği atmosferik plazma püskürtme sistemi	56
Şekil 8.7. Kaplanacak numuneler ve çekme deneyinde kullanılacak test kuponları	57
Şekil 8.8. Numuneleri çekme aparatı başlıklarına yapıştırmak için kullanılan sıkıştırma aparatı	58
Şekil 8.9. Çekme deney numuneleri için ısıl işlem fırını	59
Şekil 8.10. Dillon marka çekme cihazı	59
Şekil 8.11. M sistemine göre yüzey pürüzlülük profili	60
Şekil 8.12. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	60
Şekil 8.13. Isıl genleşme ölçümleri için dilatometre cihazı	61

Şekil 9.1. A1 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri	63
Şekil 9.2. A1 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.....	64
Şekil 9.3. A1 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri	65
Şekil 9.4. A1 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.....	65
Şekil 9.5. A2 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri	66
Şekil 9.6. A2 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.....	67
Şekil 9.7. A2 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri	68
Şekil 9.8. A2 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.....	69
Şekil 9.9. A3 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri	70
Şekil 9.10. A3 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.....	71
Şekil 9.11. A3 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri	72
Şekil 9.12. A3 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.....	72
Şekil 9.13. A4 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri	73
Şekil 9.14. A4 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.....	74
Şekil 9.15. A4 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri	75
Şekil 9.16. A4 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.....	76
Şekil 9.17. A grubu numunelere ait mikrosertlik grafiği	77
Şekil 9.18. A grubu numuneler ait yapışma mukavemeti değerleri	78
Şekil 9.19. A grubu numunelere ait alt malzeme ve kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri	79
Şekil 9.20. A grubu numunelere ait ısıl genleşme katsayı değerleri (250 °C’de)	80
Şekil 9.21. B1 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri.....	82
Şekil 9.22. B1 nolu numunenin tarama yöntemiyle elementel haritası.....	82
Şekil 9.23. B1 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi	83
Şekil 9.24. B2 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri.....	84
Şekil 9.25. B2 nolu numunenin tarama yöntemiyle elementel haritası.....	84
Şekil 9.26. B2 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi	85
Şekil 9.27. B3 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri.....	86
Şekil 9.28. B3 nolu numunenin tarama yöntemiyle elementel haritası.....	87
Şekil 9.29. B3 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi	87
Şekil 9.30. B4 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri.....	89
Şekil 9.31. B4 nolu numunenin tarama yöntemiyle elementel haritası.....	90
Şekil 9.32. B4 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi	90
Şekil 9.33. B grubu numunelere ait mikrosertlik grafiği	92
Şekil 9.34. B grubu numuneler ait yapışma mukavemeti değerleri	93

Şekil 9.35. B grubu numunelere ait alt malzeme ve kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri	94
Şekil 9.36. B grubu numunelere ait ısı genleşme katsayı değerleri (250 °C’de)	95
Şekil 9.37. C1 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri.....	97
Şekil 9.38. C1 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı	97
Şekil 9.39. C1 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri	98
Şekil 9.40. C1 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi	99
Şekil 9.41. C2 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri.....	100
Şekil 9.42. C2 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı	101
Şekil 9.43. C2 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri	102
Şekil 9.44. C2 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi	102
Şekil 9.45. C3 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri.....	103
Şekil 9.46. C3 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı	104
Şekil 9.47. C3 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri	105
Şekil 9.48. C3 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi	106
Şekil 9.49. C4 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri.....	107
Şekil 9.50. C4 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı	108
Şekil 9.51. C4 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri	109
Şekil 9.52. C4 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi	109
Şekil 9.53. C grubu numunelere ait mikrosertlik grafiği	111
Şekil 9.54. C grubu numuneler ait yapışma mukavemeti değerleri	112
Şekil 9.55. C grubu numunelere ait alt malzeme ve kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri	113
Şekil 9.56. C grubu numunelere ait ısı genleşme katsayı değerleri (250 °C’de)	114
Şekil 9.57. D1 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri	115
Şekil 9.58. D1 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı	116
Şekil 9.59. D1 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri	117
Şekil 9.60. D1 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.....	118
Şekil 9.61. D2 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri	119
Şekil 9.62. D2 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı	120
Şekil 9.63. D2 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri	121
Şekil 9.64. D2 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.....	122
Şekil 9.65. D3 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri	123
Şekil 9.66. D3 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı	124
Şekil 9.67. D3 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri	125

Şekil 9.68. D3 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.....	125
Şekil 9.69. D4 numunesinin optik mikroyapı görüntüleri	126
Şekil 9.70. D4 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.....	127
Şekil 9.71. D4 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri	128
Şekil 9.72. D4 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.....	128
Şekil 9.73. D grubu numunelere ait mikrosertlik grafiği	129
Şekil 9.74. D grubu numunelerde ara yüzeyde meydana gelen oksit tabakası	130
Şekil 9.75. D grubu numuneler ait yapışma mukavemeti değerleri.....	131
Şekil 9.76. D grubu numunelere ait alt malzeme ve kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri	132

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması	4
Tablo 2.2. AA2024 alüminyum alaşımının fiziksel ve kimyasal özellikleri	7
Tablo 3.1. Bakırın fiziksel ve mekanik özellikleri	13
Tablo 3.2. Bazı bakır-alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri	15
Tablo 4.1. Al_2O_3 'in fiziksel ve mekanik özellikleri	19
Tablo 4.2. TiO_2 'in fiziksel ve mekanik özellikleri	20
Tablo 4.3. $ZrO_2 + \%8 Y_2O_3$ 'in bazı fiziksel ve mekanik özellikleri	22
Tablo 4.4. B_4C 'ün fiziksel ve mekanik özellikleri	23
Tablo 4.5. Cr_2C_3 'ün fiziksel ve mekanik özellikleri	25
Tablo 4.6. SiC 'ün fiziksel ve mekanik özellikleri	26
Tablo 5.1. Yanıcı gazların ve oksijenin özellikleri	29
Tablo 6.1. Plazma gazlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri	39
Tablo 6.2. $Ar + N_2$ ve $Ar + H_2$ gaz karışımlarının plazma ısı değeri	40
Tablo 6.3. Argon ve Azot plazmasının en yüksek ve en düşük sıcaklıkları	43
Tablo 8.1. AA2024 Alüminyum alaşımı ve alüminyum bronzunun kimyasal bileşimi	50
Tablo 8.2. Al_2O_3 ve $Al_2O_3 + TiO_2$ tozunun özellikleri ve karışım oranları	50
Tablo 8.3. $Al + \%5 Cu$ ve B_4C tozunun karışım oranları	51
Tablo 8.4. B_4C tozunun kimyasal bileşimi	51
Tablo 8.5. B_4C tozunun fiziksel ve kimyasal özellikleri	52
Tablo 8.6. $ZrO_2 + \%8 Y_2O_3$ tozu ve Al_2O_3 tozunun karışım oranları	53
Tablo 8.7. $Cu + \%5 Al$ tozu ve Cr_3C_2 tozunun karışım oranları	54
Tablo 8.8. Al_2O_3 ve $Al_2O_3 + \% TiO_2$ oksit tozlarına ait kaplama parametreleri	56
Tablo 8.9. $Al + Cu + \%B_4C$ karbür karışımı tozlarına ait kaplama parametreleri	56
Tablo 8.10. $ZrO_2 + \% 8 Y_2O_3 + \% Al_2O_3$ oksit tozlarına ait kaplama parametreleri	57
Tablo 8.11. $Cu + Al + \%Cr_3C_2$ karbür karışımı tozlarına ait kaplama parametreleri	57

ÖZET

Doktora Tezi

ALÜMİNYUM ALAŞIMI VE BRONZU YÜZEYİNE OKSİT VE KARBÜR BİLEŞİKLERİNİN PLAZMA SPREY YÖNTEMİYLE KAPLANMASININ ARAŞTIRILMASI

Serkan ÖZEL

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı

2009, Sayfa: 149

Bu çalışmada, alüminyum alaşımı (AA2024-T4) ve Al bronz (Cu alaşımı) yüzeyine çeşitli oksit ve karbür tozları atmosferik plazma püskürtme yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Yüzeyde elde edilen kaplama tabakalarının; mikroyapı, sertlik, yüzey pürüzlülüğü, birleşme mukavemetleri ve ısı genleşme özellikleri incelenmiştir. Alüminyum alaşımı (AA2024-T4) yüzeyine Al_2O_3 ve Al_2O_3 içerisine farklı yüzdelerde ilave edilen TiO_2 tozları ile elde edilen oksit toz karışımları kaplanmıştır. Aynı alt malzeme yüzeyine (AA2024-T4) saf Al tozu içerisine % 5 Cu ilave edilerek karıştırılan Al + % 5 Cu toz karışımına farklı oranlarda bor karbür (B_4C) ilavesi ile elde edilen karbür toz karışımları da kaplanmıştır. Alüminyum bronz (Cu alaşımı) yüzeyine ise İtiryum oksit ilaveli Zirkonyum oksit ($ZrO_2+Y_2O_3$) tozu ve $ZrO_2+Y_2O_3$ tozu içerisine farklı yüzdelerde ilave edilen Al_2O_3 tozları ile elde edilen oksit toz karışımları kaplanmıştır. Aynı alt malzeme yüzeyine (Cu alaşımı) saf Cu tozu içerisine % 5 Al ilave edilerek karıştırılan Cu + % 5 Al toz karışımına farklı oranlarda krom karbür (Cr_3C_2) ilavesi ile elde edilen karbür toz karışımları da kaplanmıştır. Kaplanmış numunelerin kaplama yüzeyine dik olarak çıkarılan deney numunelerinden; mikroyapı ve sertlik incelemeleri, ayrıca kaplama esnasında kaplanmış olan çekme numuneleri ile kaplamanın birleşme mukavemet incelemeleri ve meydana gelen tabakanın yüzey pürüzlülüğü ile ısı genleşme özelliklerine bakılmıştır. Optik

mikroskop, elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dispersive X-ray (EDX) aracılığıyla mikroyapılar incelenerek değerlendirilmiştir. Yüzey durumunu belirlemek amacıyla yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıyla yüzey pürüzlülük değerleri (Ra) ölçülmüştür. Alt malzeme üzerine uygulanan kaplama işlemi sonrasında, numunelerin ısı genleşme katsayılarını tespit etmek amacıyla dilatometre cihazından faydalanılmıştır.

Alt malzeme (AA 2024-T4) yüzeyine gerçekleştirilen Al_2O_3 ve $Al_2O_3 + TiO_2$ kaplanarak elde edilen A grubu numunelerde, en düşük gözenek miktarı, sertlik miktarı, yüzey pürüzlülük değeri ve ısı genleşme katsayısı ile en yüksek yapışma mukavemet değeri % 40 TiO_2 'li numunede elde edilmiştir. Al+Cu ve Al+Cu+B₄C kaplanarak elde edilen B grubu numunelerde ise en yüksek gözenek miktarı ve sertlik değeri ile en düşük yüzey pürüzlülük değeri ve ısı genleşme katsayısı % 20 B₄C'lü ve en yüksek yapışma mukavemeti 48,08 MPa değeri ile B₄C ilavesiz numunelerde elde edilmiştir.

Alüminyum bronz (Cu alaşımı) alt malzeme yüzeyine gerçekleştirilen $ZrO_2 + \%8 Y_2O_3$ ve $ZrO_2 + \%8 Y_2O_3 + Al_2O_3$ kaplanarak elde edilen C grubu numunelerde, en yüksek gözenek miktarı ve yapışma mukavemet değeri ile en düşük yüzey pürüzlülüğü ve ısı genleşme katsayısı %20 Al_2O_3 ilaveli numunede, en yüksek sertlik değeri ise % 5 Al_2O_3 ilaveli numunede elde edilmiştir. Cu + % 5 Al ve Cu + % 5 Al + Cr_3C_2 kaplanarak elde edilen D grubu numunelerde ise en düşük gözenek miktarı ve yüzey pürüzlülüğü ile en yüksek sertlik değeri Cr_3C_2 ilavesiz Cu + % 5 Al ile kaplanan numunede elde edilmiştir. D grubu numunelerde ısı genleşme katsayısı tespit edilememiştir. Kaplama esnasında yüzeyde oluşan oksitlenmeden dolayı yapışma mukavemet değerleri standartlardan düşük değerlerde tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Plazma Püskürtme, oksit ve karbür kaplama, mikroyapı, yüzey pürüzlülüğü, ısı genleşme.

ABSTRACT

PhD Thesis

THE INVESTIGATION OF COATING OF OXIDE AND CARBIDE COMPOUNDS ON THE SURFACES OF ALUMINUM ALLOY AND BRONZE BY USING PLASMA SPRAY PROCESS

Serkan ÖZEL

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Metallurgy Education

2009, Page: 149

In this study, several oxide and carbide powders were coated on the aluminum alloy (AA2024-T4) and bronze surface by use of plasma spray process. Obtained coating layers were investigated according to microhardness, microstructural properties, surface roughness, bonding strength and also thermal expansion properties respectively. Different powder mixtures were tested coated on aluminum alloy (AA2024-T4) surface, such as Al_2O_3 , $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, $\text{Al} + 5\% \text{Cu}$ and $\text{Al} + 5\% \text{Cu} + \text{B}_4\text{C}$. In addition this, $\text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Cu} + 5\% \text{Al}$, $\text{Cu} + 5\% \text{Al} + \text{Cr}_3\text{C}_2$ powders were coated with different powder rates of aluminum bronze (Cu alloy) surface. In order to determine microstructure and hardness properties of coated layers, the samples were cross-sectioned perpendicular to the coating interface. All coated samples were subjected to bonding strength tests and surface roughness properties using Ra unit. A scanning electron microscope, also X-Ray (EDX) and an optical microscope were employed for the observations of the microstructure. Dilatometer was used for measuring the thermal expansion properties of coated samples. In order to determine surface roughness value (Ra) and quality, the surface roughness profilometer was used in this study. Furthermore, the dilatometer equipment was employed to measure the thermal expansion coefficient of samples after the coating process on the substrate.

The group of A samples which were coated by Al_2O_3 ve $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ on the substrate (AA 2024-T4), was determined lower porosity, lower hardness value, lower surface roughness value, lower thermal expansion coefficient and higher sticker effect (especially with 40% TiO_2 samples). The group of B samples which were coated by Al+Cu and Al+Cu+B₄C was performed the highest porosity, highest hardness value and also the lowest surface roughness value, thermal expansion coefficient (especially with %20 B₄C samples). Moreover the highest sticker effect (about 48,08 MPa) was obtained the samples without B₄C addition.

The group of C samples which were coated on the substrate of Al bronze with $\text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$ and $\text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ were obtained the highest porosity, the highest sticker effect and lower surface roughness and thermal expansion coefficient in addition this, highest hardness value was obtained from the samples of 5% Al_2O_3 content. The group of D samples which were coated by Cu + 5% Al and Cu + 5% Al + Cr₃C₂ was obtained lower porosity, lower surface roughness value. However, the samples coated by Cu + 5% Al without Cr₃C₂ addition was obtained the highest hardness value. The thermal expansion coefficient value could not be obtained on the group of D samples. During coating process, the highest sticker strength value was obtained in lower value because of surface oxidation.

Keywords: Plasma spray, oxide and carbide coating, microstructure, surface roughness, thermal expansion.

1.GİRİŞ

Son yıllarda etkinliği ve güvenilirliği geliştirilmiş; fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri daha üstün, daha hafif, daha ucuz ve yeni uygulamalar için istenen işlevlere dönük malzemeler tüm sektörlerin talepleri arasında yer almaktadır. Bu malzemelerin fiziksel özellikleri, dış etkilere ve korozyon etkilere karşı dayanıklılığı, yüzey özellikleri, hemen her uygulama için çok büyük önem taşımaktadır. Malzemenin kendisinin gerekli koşulları sağlayamadığı durumlarda, böyle malzemelere farklı bir malzeme dış yüzeye kaplanarak korozyon açısından uygun özellikler kazandırılmaktadır. Katı cisimlerin yüzeylerinden sürekli malzeme kaybı şeklinde kendini gösteren ve yüzeyin bozulmasına neden olan aşınma, çeşitli makine parçalarının ömürlerini ve performanslarını azaltan bir olaydır. Mekanik hareket yapan makine parçalarının yüzeylerinin, aşınmaya karşı özellikle dayanıklı olması istenmektedir.

Tribolojik uygulamalar için, yüzey mühendisliğinin kullanılmasında iki amaç hedeflenir. Bunlardan birisi, yüzey malzemesinin aşınma direncini arttırmak, diğeri ise yüzey malzemesinin sürtünme davranışını iyileştirmektir. Yüzeyin kimyasal bileşimi ya da mikroyapı değişimi sağlanarak istenilen mekanik özellikler sağlanabilir (Sarı ve Tülbentçi, 1997). Malzeme ve alaşımlarının korozyondan korunması bir dayanıklı bariyer tabaka ile sağlanır. Bu yüzden kaplama yoğunluğu çok önemlidir ve oksit tabakaları korozyon ortamı boyunca hareket edebilen yollar şeklinde tekrarlanır. Kaplama, metal malzemelerde korozyon ortamına dayanıklılığı ve malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek için çeşitli yöntemlerle çeşitli malzeme tozlarının, örneğin seramik tozlarının fiziksel ya da kimyasal olarak metallerin yüzeyine bağlanmasıdır. Kaplama işlemi çeşitli yöntemlerle (PVD, CVD, Alevle püskürtme, plazma püskürtme vb. ile) yapılabilmektedir (Bach ve Duda, 2000).

Isıl püskürtme, yüzeylerin aşınma ve korozyona karşı korunmasında endüstride geniş bir kullanım alanına sahip bir yöntemdir (Kahraman ve diğ., 2005; Mishra ve diğ., 2005; McGrann ve diğ., 1998). Isıl püskürtme en çok makine parçalarının kaplanmasında kullanılan bir yöntemdir. Aşınmış veya hatalı işlenmiş parçalar, söz konusu olan özel hizmete uygun bir metal seçilip yüzeye püskürtülür ve daha sonra eski ya da gerekli ölçülere getirilir. Son zamanlarda; uçak motoru parçalarında plazma püskürtme kaplamasının kullanım alanı sürekli artış göstermiştir. Ergitilmiş metalle yüzey kaplamacılığı, aşınmanın sorun olduğu her yerde geniş uygulama alanı bulmuştur. Isıl püskürtme; ince öğütülmüş metal, metal oksit veya plastiklerin, ergimiş veya yarı ergimiş durumda, uygun bir alt malzeme yüzeyine kaplanması ya da bir yapısal şekil oluşturmak üzere dolgu yapılması işlemidir (Bach ve Duda, 2000; Alpay, 2000).

Isıl püskürtme yöntemlerinden birisi olan plazma püskürtme yöntemi, 1960'lı yılların ortasından bu yana kullanılan endüstriyel amaçlı bir yöntemdir. Bu yöntem modern endüstri tarafından ihtiyaç duyulan yüksek performanslı yüzeylerin üretimi için faydalanılan en önemli teknolojilerden birisidir (Villat, 1986; Pamuk ve Çimenoglu; 1997). Kaplamaların plazma püskürtme ile oluşturulması çok önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu yöntem; metaller ve alaşımları, seramikler, sermetler ve bazı plastikler olmak üzere, geniş bir aralıktaki 300'den fazla malzemeye uygulanabilmektedir. Bu kaplamaların yaklaşık % 90'ı, önemli ölçüde aşınma direnci sağlamaktadır (Fang ve diğ., 2007; Zhao ve diğ., 2003).

Alüminyum bronzu oldukça iyi bir aşınma ve korozyon özelliği göstermesi, yeterli derecede ve kolay işlenebilirlikleri ve bir alaşımdan istenen pek çok özelliğe aynı anda sahip olması nedeni ile tercih edilmektedir (Yıldırım ve diğ., 2001a,b). Mevcut literatürde alüminyum alaşımı ve bazı bronzların yüzeylerinin kaplanması konusunda gerçekleştirilmiş bazı çalışmalar bulunmaktadır (Sharma ve diğ., 2009; Wang ve diğ., 2009; Arslan ve Kalemtaş, 2009; Khan ve Qureshi, 2009). AA2024 serisi alüminyum alaşımında ve alüminyum bronzunda gerçekleştirilmiş kaplama çalışmaları çok daha sınırlıdır (Sorrentino ve diğ., 2009; Collazo ve diğ., 2008; Xiaodong ve Xianming, 2008).

Mevcut literatürdeki bu boşluğu gidermek amacı ile bu tez çalışmasında; plazma püskürtme yöntemi kullanılarak, AA2024-T4 alüminyum alaşımının yüzeyine Al_2O_3 ve $Al_2O_3+TiO_2$ oksit tozları ve B_4C karbür tozları ile kaplanabilirliği araştırılmıştır. Alüminyum bronz (Cu alaşımı) yüzeyine $ZrO_2+Y_2O_3$ ve $ZrO_2+Y_2O_3+Al_2O_3$ oksit toz karışımları ve Cr_2C_3 karbür tozunun kaplanabilirliği araştırılmıştır. Elde edilen kaplama tabakalarının mikroyapısının ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerin nasıl değiştiğinin incelenmesi, alt malzemenin sertlik ve mukavemet özelliklerinin geliştirilip daha da iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Alüminyum metali, mühendislik uygulamalarında çeşitli olumlu özelliklerinden dolayı geniş kullanım alanı bulan bir elementtir. Bu özellikler; özgül ağırlığının düşük olması, iyi ısı ve elektrik iletkenliği göstermesi, kolay dökülebilir ve işlenebilir olması ve yaşlanabilirlik özellikleri sergilemesi şeklinde sıralanabilir. Günümüzde kullanılan hava araçlarının gövde yapılarının büyük bir kısmı alüminyum alaşımları kullanılarak imal edilmektedir. Alüminyumun uçak ve otomotiv sanayinde önemli rol oynaması, onun “stratejik” bir metal olarak görülmesine neden olmuştur. Alüminyum ve alaşımları bütün imalat sanayinin hemen her dalında; tarım, inşaat, kimya, gıda, ulaştırma, elektrik ve elektronik sektörlerinde giderek artan oranlarda kullanılmaktadır. Alüminyum ve alaşımlarını pek çok uygulama için uygun ve ekonomik kılan özelliklerin başında; görünümü, hafifliği, işlenebilirliği, fiziksel ve mekanik özellikleri ve hava, su, tuzlu su ve petrokimyasallar da dahil olmak üzere ve pek çok kimyasal madde ortamında yüksek korozyon dayanımı göstermesi gelir (Yurdakul ve diğ., 2002; Craig ve Anderson, 1995; Taban ve Kaluç, 2005). Uzay araçları da dahil hava taşıtları, sağlam binalar ve köprüler, elektrik nakil hatları, alçak ve yüksek gerilim bağlantıları ve diğer bir çok mühendislik uygulamaları için; alüminyum vazgeçilmez bir malzemedir. Alüminyum endüstrisinde; yeni alaşımların, teknolojik gelişmelerin, üretim yöntemlerinin, ürün tasarımının ve kalite kontrolünün iyileştirilmesi ya da artırılması için tüm dünyada araştırma-geliştirme çalışmaları devam etmektedir (Kurşun, 2006).

Ülkemizde alüminyum sanayi oldukça yeni olmasına rağmen, alüminyum ürünlerine olan talep ve buna bağlı olarak yurt içinde işlenen alüminyum ürünlerinin miktarı hızla artmaktadır. Alüminyum, berilyum ve magnezyumdan sonra en hafif metaldir. Alüminyumun elektrik iletkenliği bakırın iletkenliğinin % 60'ı kadar olmasına karşın, yoğunluğunun düşük olmasından ötürü, birim kütleye düşen iletkenlik bakımından bu metalin iletkenliği bakırdan daha iyidir (Oğuz, 1990; Tekin, 1984). Hafif metaller sınıfından olan alüminyum, bileşikler halinde yerkabuğunun % 8'ini oluşturur. Oksijen ve silisyumdan sonra doğada en çok bileşiği bulunan elementtir. 1886 yılında ABD’de Charles Martin Hall’in alüminyum oksidi elektrolitik işlemler sonucu elde etmesiyle, üretilip kullanılmaya başlanan alüminyum; daha sonra Fransa’da Paul Heroult tarafından elektroliz yöntemiyle geniş çaplı olarak elde edildi. Günümüzde de alüminyum, Hall–Heroult tekniği kullanılarak, elektroliz yöntemiyle üretilmektedir (Yıldırım ve diğ., 2001a; Büyükarıslan, 2006; Davis, 1990). Alüminyum alaşımları, imal usullerinin farklı ihtiyaçlarına uygun olarak üretim metotları esas alınarak plastik şekillendirilebilir işlem ve döküm alaşımları olmak üzere iki ana alt gruba ayrılabilir. Plastik deformasyonla şekillendirilen işlem görmüş alaşımlar, fiziksel özellikleri büyük ölçüde

değiştiren belirleyen, döküm alaşımlardan oldukça farklı mikroyapı ve bileşime sahiptir (Yıldırım ve diğ., 2001b).

2.1. Alüminyum Alaşımları

Alaşımlandırma yoluyla mekanik özellikleri iyileştirilmek için alüminyuma çeşitli alaşım elementleri ilave edilir. Mekanik özellikleri etkileyen en önemli alaşım elementleri; silisyum (Si), magnezyum (Mg), bakır (Cu) ve çinko (Zn)'dur. Alüminyumda tüm alaşım elementleri ağırlıkça % 0,1-0,4 demir (Fe) içermektedir ve alüminyumun elektrolizi sırasında hammaddeden gelen demirden kaynaklanmaktadır. Diğer alaşım elementleri sıklıkla bir veya birden fazla ana elementlerin kombinasyonu şeklinde kullanılır. Bunlar bizmut (Bi), bor (B), krom (Cr), kurşun (Pb), nikel (Ni), titanyum (Ti) ve zirkonyum (Zr)'dur. B, Pb ve Cr bileşimde yaklaşık % 0,5 oranında bulunurken, diğer elementlerin oranları genellikle % 0,1'den daha azdır. Özel amaçlı alüminyum alaşımlarında dökülebilirlik, işlenebilirlik, ısı iletimi, korozyon dayanımı ve çekme mukavemeti gibi özelliklerin geliştirilmesinde bu elementlerden yararlanılır (Kurt, 2005). Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında çeşitli sistemler vardır. En sık kullanılan alüminyum sınıflandırma sistemi American Aluminium Association (AA) sistemidir. Tablo 2.1'de AA sistemine göre alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması görülmektedir.

Tablo 2.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Davis, 1990).

(AA) Sistem Numarası	İlave alaşım elementi	
	İşlem Uyg. Al alaşımları	Döküm Al alaşımları
1xxx	% 99 saf Al	% 99 saf Al
2xxx	Cu	Cu
3xxx	Mn	Si + Cu + Mg
4xxx	Si	Si
5xxx	Mg	Mg
6xxx	Mg + Si	Kullanılmıyor
7xxx	Zn	Zn
8xxx	Diğer Elementler	Sn
9xxx	Kullanılmıyor	Diğer Elementler

-1xxx Serisi Alaşımlar:

Bu alaşımlar minimum % 99,0 alüminyum, yapı kirletici elementlerden (empürite olarak) de, silisyum ve demir içerirler. Bunlara, dayanımın artması için % 0.12 bakır ilavesi yapılabilir. Bu alaşımlar kademeli olarak haddelenerek sac levha veya folyo haline getirilip, kullanılırlar. 1100 alaşımının tavllanmış durumda çekme dayanımı 90 MPa' dır.

-2xxx Serisi Alaşımlar:

Bu seri alaşımlarının birçoğuna bakırın yanında magnezyum ve düşük miktarlarda diğeri elementler eklenir. 2xxx serisi alaşımları birim ağırlık dayanımının yüksek olması gereken uçak sanayi gibi alanlarda kullanılır. Bu alaşımlar katı eriyik mukavetlendirmesi ve çökelti sertleşmesi yoluyla dayanım kazanırlar. Endüstriyel uygulama alanı bulabilmiş en önemli alaşım 2024 alaşımıdır. 2024-T6 alaşımı % 4,5 bakır, % 1,5 magnezyum ve % 0,6 mangan bulundurur ve çekme dayanımı 442 MPa' dır.

-3xxx Serisi Alaşımlar:

Bu serinin en önemli alaşımı 3003' tür . Bu alaşım 1100 alaşımına % 1,25 mangan ilavesi ile oluşturulur. 3003 alaşımının tavllanmış durumda çekme dayanımı 110 MPa' dır. Bu da mangan katkısının dayanım artırdığını göstermektedir. Bu serinin alaşımları iyi işlenebilirliğin gerektiği yerlerde kullanılabilen genel amaçlı alaşımlardır.

-5xxx Serisi Alaşımlar:

Bu serinin ana alaşım elementi olan magnezyum katı eriyik mukavemetlendirmesi sağlar ve miktarı % 5' e kadar çıkabilir. Bu serinin endüstride kullanılan en önemli alaşımı 5052' dir. Bu alaşım % 2.5 Mg, % 0,2 Cr bulundurur ve tavllanmış durumdaki çekme dayanımı 193 MPa' dır.

-6xxx Serisi Alaşımları:

Bu alaşım, silisyum ve magnezyumun birlikte oluşturdukları seriyi temsil etmektedir. Magnezyum ve silisyum birleşerek Mg_2Si bileşimini oluşturur. Mg_2Si intermetalik bileşikler, çökelti sertleştirilmesi ile dayanım artışı sağlar. Bu alaşımda sertleşme, Mg_2Si metaller arası bileşiminin sıcaklık ile değişen çözünürlüğünden ileri gelmektedir. Bu bileşik alüminyum ile basit bir ötektik sistem oluşturur (Yıldırım ve diğ., 2001b; Sarsilmaz, 2008). En yaygın kullanılan alaşım 6061 alaşımıdır ve bu alaşım % 1,0 magnezyum, % 0,6 silisyum, % 0,3 bakır içerir. 6061-T6 alaşımının çekme mukavemeti 290 MPa' dır. Bu seri, otomotiv sektöründe genel amaçlı yapı elemanı olarak kullanılır.

-7xxx Serisi Alaşımlar:

Temel çöktiller $MgZn_2$ intermetalik bileşiminden oluşur. Çinkonun ve magnezyumun alüminyum içerisinde çözünebilirliği; yüksek yoğunluklu çöktillerin oluşmasını, bu da dayanımın oldukça yükselmesini sağlar. Bu serinin en önemli alaşımı 7075' tir ve bu alaşım %

5,6 çinko, % 2,5 magnezyum, % 1,6 bakır ve % 0,25 krom bulundurur. 7075-T6 alaşımının çekme dayanımı 504 MPa' dır. Çinkonun ana alaşım elemanı olarak ve bir miktar magnezyum ile birlikte kullanılması malzemenin ısıt işleme sertleştirilmesini sağlar. Bu alaşımlar tüm alüminyum alaşımları içinde en mukavemetli olanlarıdır ve ikinci dünya savaşı sırasında hava kuvvetlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Uçak gövdelerinin yapımında kullanılan 7075 alüminyum alaşımı çok yüksek mukavemete sahiptir. Al-Zn-Mg serisi alaşımlar orta mukavemetli ve çökelmeyle sertleşebilir konstrüksiyon malzemesidir. Bu seri yüksek dayanımın gerekli olduğu yerlerde kendisine uygulama alanı bulmaktadır (Sarsilmaz, 2008).

-Döküm Alüminyum Alaşımlarının Bileşimleri:

Döküm alüminyum alaşımlarının akıcılık, kalıba iyi doldurabilirlik ve besleyicilik gibi dökülebilirlik özellikleri; dayanım, süneklik ve korozyon dirençlerini de beraberinde getirir. Döküm alaşımlarının kimyasal bileşimi dövme alaşımlarının kimyasal bileşimlerinden farklıdır. Döküm alüminyum alaşımlarından pek çoğu ötektik reaksiyona neden olan düşük ergime noktaları, iyi akıcılık ve dökülebilirlik sağlayacak şekilde ve yeterince % 5-12 silisyum (Si). İçerir. Akışkanlık; sıvı metalin bir kalıba doğru, erken katılaşma olmadan akma yeteneğidir. Dökülebilirlik ise, alaşımdan iyi bir dökümün yapılabilirliğini gösterir. Alüminyum silisyum alaşımlarının özellikleri, α alüminyum matrisin katı eriyik mukavemetlendirmesi, β fazının dağılım mukavemetlendirmesi, ilk tane boyutu, şekli ve aynı zamanda ötektik oluşumu tayin eden katılaşmayla kontrol edilir. Kokil veya pres dökümdeki hızlı soğuma, tane boyutunu ve ötektik mikro yapı oluşumu incelterek genellikle dayanımı yükseltir. Belirli alaşımlarda mikro yapıyı ve dağılım mukavemetlendirmesi düzeyini iyileştirmek amacıyla bor ve titanyum katkıları yaparak tane inceltmek; ötektik yapıyı değiştirmek için sodyum veya stronsiyum kullanıp modifikasyon veya birincil silisyumun incelmelerini sağlamak ve nihayet mukavemeti artırmak için fosfor katkısı yapılır. Döküm alüminyum alaşımlarında % 0,3-1,0 magnezyum ilavesi çökelti sertleşmesine bağlı dayanım artışı sağlar. Bakır, bazı döküm alüminyum alaşımlarında % 1- 4 oranlarda bulunur. Özellikle yüksek sıcaklıklarda dayanım artışı sağlar.

2.1.1. Alüminyum-Bakır Alaşımı (AA 2024 Serisi)

Duralümin olarak da bilinen AA2024 alüminyum alaşımı, bakırlı bir işlem alaşımı olup alüminyum alaşımları arasında en sert, elastisite modülü ve mukavemet değerleri en yüksek olanlardan biridir. Bileşiminde % 4.5 Cu'n yanında % 1.5 Mg bulundurur. Bu alaşımın kullanım bulunduğu en önemli alan uçak ve uzay sanayi kollarıdır. Özgül mukavemet (Akma gerilmesi/yoğunluk) ve/veya özgül elastisite modülünün (Elastisite modülü/yoğunluk) önemli olduğu yerlerde, örneğin uçak ve uzay yapılarının dişli ve bağlantı elemanlarında, iskeletlerinde, süspansiyon parçalarında, uçak gövde ve kanatlarında, ortopedik taban, perçin ve çekici

tekerlekleri yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bazı askeri cihaz ve teçhizatlarda, dizel motor pistonlarında, uçak motoru silindir başlarında, jet motor pervanelerinde ve kompresör halkalarında kullanılırlar (Kalay ve diğ., 2004; Sanders ve diğ., 1983; Öksüz, 1996). Çözeltiye alma ısı işleminden sonra oda sıcaklığında doğal veya yapay olarak yaşlanır. İçinde magnezyum (Mg) bulunması nedeni ile üretimi özel yöntemler ile mümkün olmasına karşın, diğer ısı işleme tabi tutulabilen alüminyum alaşımlarına göre şekillendirilebilme yeteneği iyidir. Bu alaşımın iyi olan fiziksel ve mekanik özelliklerine karşılık korozyona karşı dayanımı zayıftır. Talaşlı işlenebilirlik özelliği iyidir. Direnç kaynağı hariç kaynak edilebilme kabiliyeti fazla iyi değildir (Atik ve diğ., 2001).

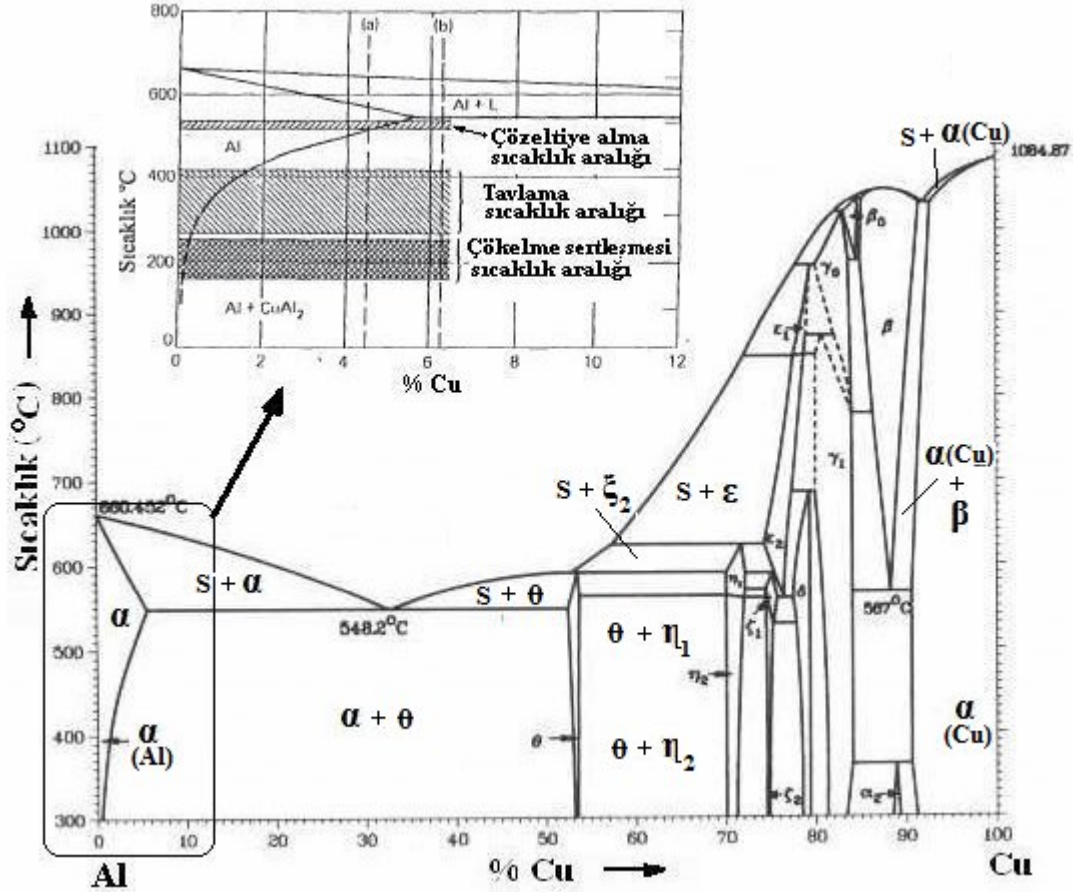
2XXX serisi Al alaşımlarının içerisinde en fazla kullanılan AA2024 alaşımının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2. AA2024 alüminyum alaşımının fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Ergime derecesi (°C)	500-640
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,77
Isıl iletkenlik (0-100 °C) (W/m°C)	151
Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	22,8
Elektriksel direnç (20 °C) (μΩcm)	5,7
Sertlik (Isıl İşl. değişimli) (HV)	50-140
Akma dayanımı (MPa)	325
Çekme dayanımı(MPa)	470
Kayma dayanımı (MPa)	280
Yorulma dayanımı (MPa)	90-125
% Uzama	20
Poisson Oranı ν (20 °C)	0,33

2XXX serisi Al alaşımları, ısı işlemle mukavemetleri arttırılabilen alaşım serilerindendir. 2024 alaşımı çözeltiye alma ısı işlemine tabi tutulduktan sonra doğal veya yapay yaşlandırma işlemi uygulanarak mukavemetleri arttırılabilmektedir. 490 °C’den suya çekildikten sonra oda sıcaklığında doğal yaşlanmaya bırakılacağı gibi, bunlara 120 °C’de tavlansak yapay yaşlandırma işlemine de uygulanabilmektedir. Al-Cu denge diyagramı Şekil 2.1’de verilmiştir. Bu diyagrama göre bakırın alüminyum içerisindeki çözünürlüğü 250 °C’ye kadar oldukça düşük olup, bu sıcaklıkta % 0,2’ dir. Alüminyum içerisinde maksimum bakır çözünürlüğü ötektik sıcaklık olan 548 °C’de, % 5,65’tir. % 0,2 ile % 5,65 Cu içeriğindeki Al-Cu alaşımı solvüs eğrisi üzerinde α katı eriyiği ve solvüs eğrisi altında α + Al₂Cu intermetaliklerinden oluşan yapıya sahiptir. Artan sıcaklık miktarı ile Al-Cu sisteminde α katı eriyik bölgesini

genişlemesi ile çökelme sertleşmesi uygulama olanağı artmaktadır. Bu nedenle % 0,2 ile % 5,65 arasında Cu içeren alüminyum alaşımı, çözeltiye alma işlemi uygulandıktan sonra su verilerek aşırı doymuş katı eriyik elde edilir. Bu katı eriyiğin doğal veya yapay yaşlandırılması ile alaşım mukavemetlendirilmektedir.



Şekil 2.1. Alüminyum-bakır (Al-Cu) faz diyagramı.

2.2. Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler

Alüminyum alaşımlarına çeşitli ısı işlemleri uygulanmaktadır. Bu alaşımlar için ısı işlemi genellikle, çökelme sertleşmesi gösterebilen dövme ve döküm alaşımlarının mukavemetini ve sertliğini arttırmak için uygulanan işlemlerle sınırlıdır. Alüminyum alaşımlarının mukavemetinin artırılması amacıyla yapılan ısı işlemleri; çözeltiye alma, su verme ve yaşlanma olarak gruplandırılabilir. Çözeltiye alma ısı işleminde fazların çözülmesi ve katı çözeltinin oluşturulması hedeflenmektedir. Su verme ısı işleminde aşırı doymuş yapının oluşturulması, yaşlandırma ısı işleminde de çözünen atomların oda sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıklarda çökmesi (çökelme sertleşmesi) istenmektedir (Yıldırım, 1987; Yurdakul

ve diğ, 2002). Alüminyum alaşımlarının ısıtıl işlem yapılabilen ve yapılamayan farklı alaşım serileri mevcuttur. Isıtıl işlem yapılabilen alaşımlarda, yaşlandırma ile dayanım artışı sağlanabilirken; ısıtıl işlem yapılamayan alaşımlarda ise katı eriyik, pekleşme, dağılım mukavemetlendirmesi yolu ile mukavemetlendirme sağlanır (Kurşun, 2006). Döküm veya biçimlendirilmek suretiyle elde edilen alüminyum ve alaşımlarının ısıtıl işlem durumları, ilave edilen bir veya birkaç harf ile tanımlanır.

Esasen 4 tür ısıtıl işlem göstergesi kullanılmaktadır. Bunlardan (O) tavlı ; (F) fabrikasyondan sonraki hali; (H) rekristalizasyon sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda yapılan plastik şekillendirme sonucu sertlik ve mukavemetin artışı, (T) ısıtıl işlem halini göstermektedir. (W) solüsyona alma ısıtıl işlemlerden sonraki kalıcı olmayan yapıyı göstermekle beraber, şayet zamanı verilmiş ise o takdirde belirli bir ısıtıl işlem ifade edilmiş olmaktadır.

Çeşitli ısıtıl işlemlerin niteliklerine ait açıklamalar aşağıda verilmiştir.

F: Fabrikasyondan sonraki hali (üretildiği gibi):

Bu hal; mukavemet veya sertliğini değiştirmek amacıyla hiçbir ilave işlem yapılmaksızın, imâl edildikten sonraki fiziksel yapısını belirtmektedir. Biçimlendirilen alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin hiçbir garantisi yoktur. Döküm hali için, örneğin 43-F işareti kullanılmaktadır.

O: Tavlı, yeniden kristalleşmiş olmuş hali:

Biçimlendirilebilen alüminyum alaşımlarının en yumuşak halidir.

H: Genellikle, yassı ürünler (levha/sac) için kullanılan bir gösterim şeklidir. Soğuk biçimlendirme (Yeniden kristalleşme sıcaklığının altında yapılan plastik şekillendirme) sonucu ve kısmi bir yumuşama elde etmek üzere ilave ısıtıl işlem yapıp yapılmamasına rağmen biçimlendirilebilen alüminyum alaşımlarında elde edilen mukavemet ve sertlik artışını ifade eder. H'dan sonra ekseriya iki veya daha fazla rakam vardır. İlk rakam, esas işlemleri ifade eder. Daha sonraki rakamlar, plastik şekillendirme sınırları içindeki nihai fiziksel özelliklerini belirtir. Bu rakamların ifade ettiği özellikler aşağıda belirtilmiştir:

H1: Plastik şekillendirme sınırları içinde sadece şekil verilmiştir. İkinci rakam, yapılan soğuk işlemi ifade etmektedir. Şöyle ki; 8 rakamı erişilebilen en sert hali ifade eder. Böylece (H18) Bu sonucu gösterir. En sert ile yumuşak arasındaki orta sertlik (H14) şeklinde ifade edilir. Aynı şekilde dörtte bir sertlik ise (H12) şeklinde belirtilir.

Üçüncü rakam, ekseriya ayrı özellikleri belirtmek için kullanılır. Şöyle ki; (H141), (H14) sağladığı aynı minimum özellikleri vermekle beraber maksimum değerler standart değerlere daha çok yakındır. Üçüncü rakam, (H14)'den daha farklı değerleri ifade etmekle beraber (H13) veya (H15)'in yerine kaim olacak ölçüde değildir. Çok sert özellikler, üçüncü

rakam olsun veya olmasın, ikinci rakam olarak (9) kullanıldığı zamanı belirtilirler. (H112) işareti "kontrollü" olarak, F-ısıtım işlem halinin garanti edilmiş mekanik özelliklerini gösterir.

H 2: Plastik şekillendirmeden sonra kısmi tav halini ifade eder. Alaşımın plastik şekil alma sonucu belirli bir mukavemet ve sertlik sağladıktan sonra kısmen tav yapılarak bu değerlerin istenen sınırlar içine indirilmesi demektir. Bu durum, ilk rakamın 2 olarak yazılması ile belirtilir. İstenen kalıcı mukavemet ve sertlik, (H1)' de olduğu gibi ikinci rakam ile belirtilir. Örneğin; H28 tam sert, H24 yarı sert olanı ifade eder. Oda sıcaklığında yaşlanma yumuşaması sağlayan alaşımların H2 hali H3 ün fiziksel özelliğine eşit olmaktadır. Diğer alaşımlar bahis konusu olduğunda, H2 hali yaklaşık olarak H1'in fiziksel özelliklerine eşit olmakla beraber, uzama kat sayısı biraz daha fazladır.

H3: Plastik şekillendirme ve daha sonraki kararlılık hali. Magnezyum ihtiva eden alüminyum alaşımları düşük sıcaklıklarda ısıtılmak suretiyle stabilize edilerek (kararlı hale getirilerek) mukavemetleri biraz azaltılırken, şekil alma özellikleri artırılmaktadır. Bu işlem yapılmazsa, bahis konusu değişiklik oda sıcaklığında çok uzun sürede meydana gelir. Bu işlem (H)'dan sonraki üçüncü rakam ile ifade edilmektedir. Plastik şekillendirme işlemi de (H)'dan sonraki iki veya ilk rakam ile ifade edilir.

W: Solüsyona alma ısıtım işleminden sonraki kalıcı olmayan yapıyı ifade eder. Bu hal doğal yaşlanmadan (natural aging) ötürü, yaşlanma süresinin verilmesi ile belirtilmiş olur. Örneğin 2024 W (1/2 saat), 7075 W (2 ay) vb.

I: F, O, H halleri dışında, yapıda stabilizasyon sağlanması amacıyla uygulanan ısıtım işlemleri belirtmektedir. Bu harf plastik şekillendirme yapılsın veya yapılmassın yapının kararlı hale gelmesi için uygulanacak ısıtım işlemi ifade eder. T harfinden sonra 2'den 9'a kadar rakam eklenebilir. Bu rakamlar uygulanacak belli başlı işlemleri gösterirler. 6061-T6 rumuzu alındığında, bahis konusu alaşım için esas işleme ilave olarak değişik özellikleri sağlayacak şekilde ayrı işlemlerin uygulanması istendiğinde bu esas rumuza ilaveler yapılmaktadır. Şöyle ki; 6061-T62'de olduğu gibi.

Oda sıcaklığında tabii yaşlanma, esas ısıtım işlemler yapılırken veya yapıldıktan sonra uygulanabilmektedir. Süre, metalurjik açıdan önem taşıyorsa o zaman kontrol edilir. Fakat aksi halde belirtilmemiş olur.

T: T, ısıtım işlem yapılarak elde edilen temperleme işlemlerini ifade eder. Isıtım işlemlerin değişik türleri, aşağıdaki harf ve rakam göstergeleriyle ifade edilmektedir.

T1: Sıcak işlemden sonra soğutulur ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir.

T2: Sıcak işlemden sonra soğutulur, soğuk işlemden geçirilir ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir.

T3: Çözeltiye alma ısı işlemi uygulanır, soğuk işlemden geçirilir ve doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir.

T4: Çözeltiye alma ısı işleminden geçirilir, doğal yaşlanma ile kararlı duruma getirilir.

T5: Sıcak işlemden sonra soğutulur ve yapay yaşlanma ile sertleştirilir (termik ısı işlemi).

T6: Çözeltiye alma ısı işleminden geçirilir ve yapay yaşlanma ile sertleştirilir (termik ısı işlem)

T7: Çözeltiye alma ısı işleminden geçirilir ve yapay aşırı yaşlanma yapılır (termik ısı işlem)

T8: Çözeltiye alma ısı işleminden, soğuk işlemden geçirilir ve yapay yaşlanma yapılır (termik ısı işlem).

T9: Solüsyona alma ısı işleminden geçirilir, yapay yaşlanma yapılır (termik ısı işlem) ve soğuk işlemden geçirilir.

T10: Sıcak işlemden soğutulur, soğuk işlemden geçirilir ve yapay olarak yaşlandırılır (termik ısı işlem) (Davis, 1990; Avallone ve diğ., 2006; 1998; Öksüz, 1996).

3. BAKIR VE BAKIR-ALÜMİNYUM ALAŞIMI

Dünyada üretilen bakırın büyük bir oranı, alaşımlanmamış durumda elektrik sanayinde kullanılır. Bu nedenle 19. yüzyılın sonundan başlayarak günümüze kadar, elektriği iyi ileten saf bakıra duyulan gereksinim gittikçe artırmıştır. Bakır üretimi kimyasal arıtma ve elektrolitik yoldan yapılmaktadır. Bakır daha çok elektrolitik arıtma, yani elektrik enerjisi yardımıyla elde edilmektedir. Elektroteknik ve bakır üretimi birbirlerini karşılıklı destekleyerek günümüze kadar büyük bir gelişme göstermişlerdir.

Dünya bakır tüketimi demir ve alüminyum tüketim miktarlarına göre daha azdır, ancak yer kabuğundaki bakır miktarı bu metallere nazaran çok daha az oranlarda bulunur. Dünyada son yüzyıl boyunca bakır meteline olan talebin büyük oranda artması ve bu metalin yer kabuğunda çok az miktarlarda bulunması, bakır sanayisinde etkili ve belirgin bir rekabetin ortaya çıkmasına yol açmıştır (Tekin, 1984). Demirden sonra teknikte en çok kullanılan bakırın kullanımı yılda 6.000.000 ton dolaylarında bulunmakta ve bunun yarısına yakın bir bölümü eski bakırlı metalik artıklardan (hurdalardan) kazanılmaktadır (Yıldırım ve diğ., 2001a).

Bakır ve alaşımları genellikle elektrik ve ısı iletkenliğinin istendiği yerlerde kullanılırlar. İyi yorulma direnci ve dayanımına sahip bakır ve alaşımları, üretimi kolay ve korozyon direnci üstün özellikte olan bir malzemedir. Genellikle manyetik değildirler. Saf bakır genellikle elektrik kontakları, kablo-tel ve elektrik akım şebekelerinde kullanılırlar. Bakır ve bazı alaşımları (pirinç, bronz, Cu-Ni) otomobil radyatörleri, ısı dönüştürücü sistemler, ev ısı sistemleri, güneş enerjisi panelleri ve çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadırlar (Davis, 1990).

Bakır ve alaşımları özellikle elektrik uygulamalarında, sert lehimleme işlemlerinde, çeşitli gaz kaynaklarında, ark ve direnç kaynaklarında kullanılabilir. Bu alaşımlarda yapıda ve yüzeyde hiç istenmeyen kalıcı şekil değişimleri oluşabilir. Bakır ve alaşımları başka şekillerde, yüzeylerde farklı kalınlıkta, renkli kimyasal organik maddelerle veya metallerle kaplanabilir. Ayrıca süsleme amaçlı olarak kullanılabilir (Matucha, 1996). Bakırın fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1’de sıralanmıştır. Bakır, bronz ve pirinç gibi alaşımları makine parçalarının sürtünen kısımlarında, düzlemsel yataklarda genişçe kullanılan malzemelerdir. Bu malzemeler için yüksek gerilme ve süneklik, yorulma gerilmesi ve aşınma direnci gibi özellikler önemlidir.

Tablo 3.1. Bakırın fiziksel ve mekanik özellikleri.

Ergime derecesi (°C)	1083
Kaynama derecesi (°C)	2325
Özgül ağırlık (g/cm ³)	8.9
Akma dayanımı (MPa)	70
Çekme dayanımı (MPa)	200
Sertlik (HB)	55-110
Uzama (%)	40
Elastik modülü (GPa)	120
Atomik kütle (g/mol)	63,57
Elektrik direnci (20 °C) ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)	0,01724
Isıl genleşme katsayısı ($10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	17

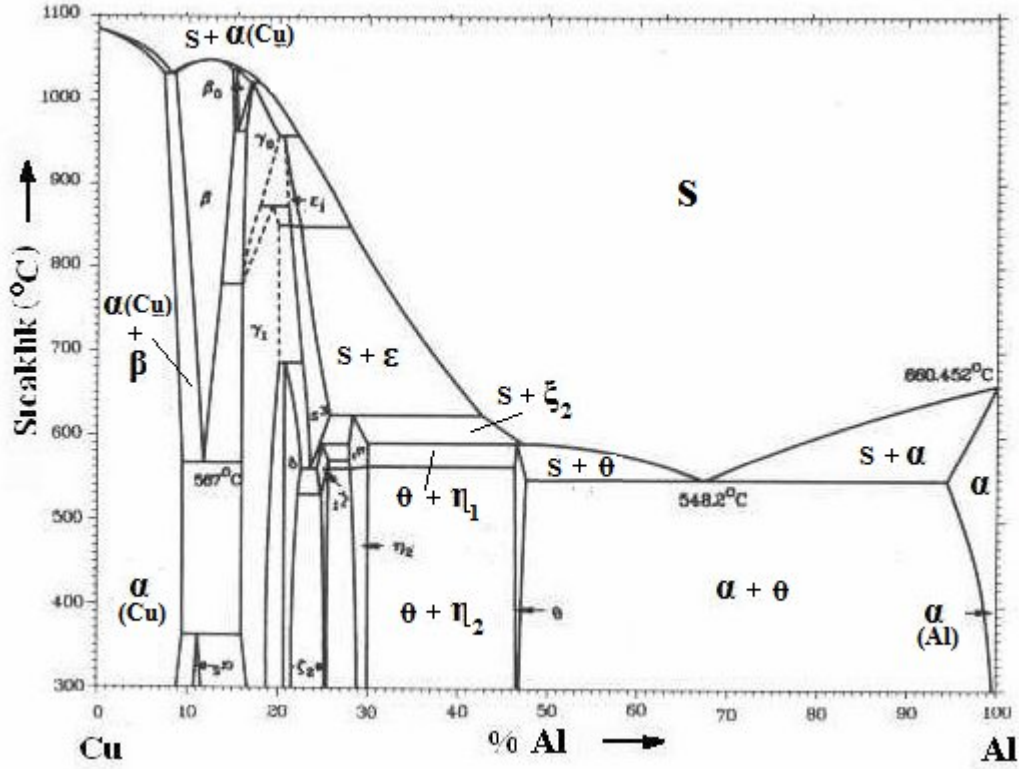
Günümüzde fiziksel, mekanik, tribolojik ve diğer özelliklerin iyileştirilmesi için ihtiyaç duyulan yapıyı elde etmek çok önemlidir. Deformasyonlu ısıtma işlemine dayanan birkaç plastik deformasyon ve sonrası tavlama ile alt mikro kristalli yapı elde edilebilir. Alt mikro ve tek kristalli malzemeler gerilme, sertlik ve yorulma gerilmesi gibi fiziksel ve mekanik özelliklerin tek bir kombinasyonu olarak bilinir (Sadyekov ve diğ., 1999).

3.1. Bakır-Alüminyum Alaşımları (Alüminyum Bronzları)

Bakırın alüminyumla yaptığı alaşımlara “Alüminyum Bronzları” adı verilir. Alüminyum bronzları, içinde % 4’ den %12’ ye kadar alüminyum ve değişik miktarlarda demir, mangan, nikel ve silisyum gibi ilave alaşım elementleri bulunduran bakır esaslı alaşımlardır (Yıldırım ve diğ., 2001b; Demiral ve Yaşar, 2006). Bu alaşımların en karakteristik tarafı, malzemeyi ısıtma sırasında yüzeyde koruyucu bir alüminyum oksit tabakasının meydana gelmesidir. Buna bağlı olarak alüminyum bronzları, orta yüksekliklerdeki sıcaklıklarda kullanılan bakır esaslı alaşımlar içerisinde en iyi olanıdır. Bakır-alüminyum alaşımları; deniz suyuna, sülfürik aside ve tuz çözeltilerine karşı direnci arttırmak için % 3-14 Al ilave edilerek elde edilir. Böylece aşınma ve oksidasyona karşı dirençleri iyi olur (Tulgar, 1971; Matucha, 1996; Turhan, 1998; Turhan ve diğ., 2001, Dubourg ve diğ., 2002). Diğer bronz alaşımlarına göre hafifliğinden dolayı uzay teknolojisinde geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Uçakların çoğu parçası alüminyum bronzundan yapılmaktadır (Liang ve diğ., 2000).

Korozyona karşı dayanıklı olan alüminyum bronzu pek çok makine parçasının ve aletin yapımında kullanılır. Altını andıran görünümü ve kararmaya karşı direnci sebebiyle kuyumculuk ve mimaride de kullanım alanına sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda yükseltgenmeye ve

özellikle seyreltik asitlerce korozyona dayanıklı olması sebebiyle, asitle temizleme donanımlarında ve seyreltik asitle teması gerektiren işlerde de emniyetle kullanılır. Yumuşak çelik ile karıştırılabilecek dayanıklılıkta olması nedeniyle; kağıt yapım makineleri, bağlantı vidaları, ağır hizmet dişli çarkları, metal biçimlendirme kalıpları, makine yatakları vb. teçhizatda kullanılır. Metalik ark işlemiyle kaynatılmaya ve özel eriticilerle lehimlenmeye uygundur.



Şekil 3.1. Bakır-Alüminyum (Cu-Al) faz diyagramı.

Şekil 3.1’de verilen faz denge diyagramında görüldüğü gibi, α katı eriyiğinin çözünürlük sınırı, 1035 °C ‘de % 7.4 Al ve 567 °C ‘de % 9.4 Al ‘dir. 1035 °C ‘de % 9 Al (β) fazının hakim olduğu noktanın başlangıcı, 567 °C ve % 11.8 Al ise ötektoid dönüşüm noktasıdır. Yavaş soğumada 567 °C’de α + γ₂ ötektoid yapısı meydana gelir. γ₂ fazı gevrek bir yapıya sahiptir. Dayanımın ve sünekliğin düşmesine neden olacaktır. Bu nedenle ticari alaşımlarda γ₂ fazı sünekliğe olan zararlı etkisinden dolayı bu fazdan kaçınılır (Topbaş, 1993).

Endüstriyel alanda, içerisinde % 12’ ye kadar alüminyum bulunan alüminyum bronzları çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Demiral ve Yaşar, 2006). Alüminyum tuncunun, alüminyum içeriği % 8’e kadar olanları, çekme yoluyla soğuk biçimlendirilerek, kimya tesislerinde ve yağ arıtımevlerinde kullanılan basınç kazanlarının ve ısı değiştiricilerin yapımında faydalanılmak üzere boru veya levha biçimine getirilebilir. Yüzde 8’den fazla

alüminyum içeren alaşımlarda demir ve mangan da bulunabilir. Soğuk çekme işlemine yatkınlığı az olan bu alaşımlar; sıcak çekme, kalıptan geçirme ve dövmeğe elverişlidir. Bu alaşımların nikelli olanları sağlamlık ve korozyona dayanıklılıkları gibi özellikleri dolayısıyla, örneğin gaz türbinlerinin kompresör paletlerinde kullanılır. Yüzde 10 civarında alüminyum içeren alaşımlar gemi pervaneleri gibi birçok sağlamve iyi korozyon dayanımı gerektiren malzemenin üretiminde tercih edilir. Tablo 3.2’de bazı Cu-Al alaşımlarının fiziksel özellikleri verilmiştir (Matucha, 1996).

Tablo 3.2. Bazı bakır-alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri (Erdoğan, 2001).

Numarası ve bileşim oranı (%)	Çekme day. (MPa)	Akma day. (Mpa)	% uzama A_5	Korozyon Direnci (§)	İşlenebilirlik (q)
608-Cu95, Al5	420	190	54	G-E	20
610-Cu92, Al8	345-560	210-390	64-24	G-E	20
613-Cu92.65, Sn0.35, Al7	490-600	210-410	41-35	G-E	20
614-Cu91, Fe2, Al7	534-625	230-420	45-31	G-E	20
619-Cu86.5, Fe4, Al9.5	645-1070	345-1020	30-19	G-E	-
623-Cu87, Fe4, Al10	525-690	245-365	34-21	G-E	50
630-Cu82, Fe3, Al10, Ni5	630-830	350-530	20-14	G-E	30
632-Cu82, Fe4, Al10, Ni5	630-740	315-370	24-20	G-E	30

G: iyi, E: mükemmel, F: zayıf, §: %100 bakır alaşımı 360 için esas alınmıştır.

Diğer ilave edilen alaşım elementlerinin alüminyum bronzlarına yaptığı etkiler ise şunlardır:

Mangan, mevcut oksijenin giderilmesinde oksit giderici bir görev üstlenir. Nikel, üstün korozyon direncinin sağlanmasında önem taşır. % 5 oranına kadar katılır ve çekme mukavemetiyle sünekliği artırır. Döküm alaşımlarına az miktardaki katkılar mekanik özellikleri iyileştirir. Kurşun, tornada mükemmel işlenebilme ve yatak olarak kayma özelliği verir. Bu nedenle dişli çarkları, volanların ve benzer parçaların dökümünde kurşun karkısı üstünlük kazandırır. Mikroyapı içinde ayrı fazda, en çok % 9 oranında bulunur ve yumuşaktır. Demir,

tane küçültücü etki yapar ve çekme dayanımını arttırır. Genelde demir sert bölgelere ve demir segregasyonuna neden olduğu için, belli oranı geçmesi istenmez. Silisyum ise çekme gerilmesinin yükseltilmesini ve daha iyi kesilmeyi sağlarken, döküme mükemmel akıcılık ve dökülebilirlik özelliği kazandırır. Silisyum katkısında dikkat edilmesi gereken en önemli nokta oksit filminin oluşmasıdır. Alaşım elementleri alüminyum bronzu içerisine ilave edilirken bu özellikler dikkate alınmalıdır (Matucha, 1996).

4. SERAMİK MALZEMELER

Seramik malzemeler, iyonik ve kovalent bağlarla bağlanmış, genellikle metallerle metal olmayan elementlerin oluşturduğu inorganik kimyasal bileşiklerdir. Seramik kelimesi, Yunanca'da pişirilmiş eşya anlamına gelen “keramas” kelimesinden gelmektedir. Seramik üretimi eski çağlardan beri gerçekleştirilmektedir. Arkeolojik buluntular seramik üretiminin M.Ö. 6500 yıllarından beri yapılmakta olduğunu ortaya koymuştur. Seramikler genel olarak; geleneksel ve mühendislik seramikleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Mühendislik seramikleri, geleneksel seramiklerden başlıca hammadde üretim yöntemleri ve mikro yapı açısından farklılıklar göstermektedir. Geleneksel seramikler doğal hammaddelerden üretilirken, mühendislik seramiklerin hammaddesi sentezleme yöntemi ile yapay olarak gerçekleştirilmektedir. Geleneksel seramikler kapsamına kil, çimento ve cam gibi «silikat sanayii» mamulleri girmektedir. Mühendislik seramikleri, geleneksel seramiklerden ayıran en önemli özellik ise, mühendislik seramiklerin pudra halinde çok ince tozlardan üretilibilmeleridir. Öyle ki, günümüzde üretilen ince seramiklerde bir mikronun altındaki tozlar kullanılmakta ve böylece tamamen yoğun yapıli seramikler üretilibilmektedir. Dolayısıyla ince seramiklerin mekanik özellikleri geleneksel seramiklerden çok üstün olmaktadır. Geleneksel seramiklerin mükemmel bir refrakter malzeme olduğu bilinmesine karşın, çok yüksek sıcaklık ve yükler altında kullanımları sınırlıdır. Oysa mühendislik seramiklerin saflık derecelerinin yüksek ve yapılarının çok kontrollü olması nedeniyle kullanım alanları çok geniştir (Erdoğan, 1998). Mühendislik seramikleri olan ileri teknoloji seramikleri, cinslerine göre başlıca oksit ve oksit olmayan seramiklerden oluşmaktadır. Oksit seramikler Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , BeO vb. seramiklerdir. Oksit seramikler, kristal yapılarından kaynaklanan oksitlenme direnci, kimyasal ve ısı kararlılık gibi özellikler gösterirler (Abalı, 2006). Oksit olmayan seramikler ise, karbürler (SiC , TiC , B_4C , ZrC vb.), nitrürler (Si_3N_4 , AlN , TiN , ZrN vb.), sülfürler (MoS_2 , CdS , ZnS vb.), silisitler (Mo_2Si , $TaSi_2$, WSi_2 vb.) ve borürler (TiB_2 , CaB_6 , ZrB_2 vb.) gibi seramiklerdir (Başman ve diğ., 2007; Erdoğan, 1998).

Seramik malzemeler farklı bileşiminde kristal ve cam yapıli fazları içermekte ve genellikle boşluk içermektedir. Bu farklı yapı bileşenlerinin miktarı ve dağılımları seramik malzeme özelliklerini önemli ölçüde etkilemekte ve belirlemektir. Örneğin yapıda mevcut düzenli fazların yerleşim düzenini değiştirmek yalıtkan olan seramik malzemeyi iletken hale getirmekte ya da bunun tersi olabilmektedir. Seramik endüstrisinin en önemli özelliği birçok endüstrinin temel taşlarından biri olmasıdır. Örneğin refrakterler; metalurji endüstrisi, aşındırıcılar, makine, takım ve otomobil endüstrisi, cam, inşaat, elektronik, otomobil endüstrisi, uranyum oksit yakıtlar; nükleer güç santrallerinin en önemli bileşenlerinden birisidir. Çeşitli

özel seramikler, bilgisayar ve diğer birçok elektronik devrelerin yapı bileşenleridir (Erdoğan, 1998; Hazar, 2004; Knotek, 2001).

Seramik Malzemelerin Kullanılmasının Başlıca Nedenleri:

- 1-) Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık,
- 2-) Kimyasal kararlılığın yüksek olması,
- 3-) Çok sert olmaları,
- 4-) Metallerden daha hafif olmaları,
- 5-) Hammadde olarak bol miktarda bulunması ve genellikle metallere kıyasla ucuz olması,
- 6-) Pahalı ve stratejik metallere ihtiyaç göstermemesi,
- 7-) Aşınmaya karşı dayanıklı olması,
- 8-) Oksitlenmeye karşı dirençlerinin yüksek olması,
- 9-) Sürtünme katsayısının düşük olması,
- 10-) Basma kuvvetinin yüksek olması,
- 11-) Düşük ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olması,

Bütün bu üstün özelliklere rağmen, seramik malzemelerin en önemli istenmeyen özelliği gevrek karakterde olmalarıdır (Akçıl, 1990).

4.1. Oksit Seramikler

Mühendislik seramiklerinin diğer bir kısmını oluşturan oksit seramikler alümina, zirkonya, magnezya ve berilya vb. seramik çeşitleridir. Oksit seramikler; yüksek sıcaklıkta kullanılması mümkün olan metal veya metaloid elementlerinin oksijenle yaptıkları bileşiklerdir. Oksit seramikler, iyonik bağlı olduklarından saydamlık, elektrik ve ısı iletimine direnç, diamanyetizma ve kimyasal kararlılık gibi genel karakteristiklere sahiptir. Bu özelliklerin yanı sıra yüksek elastiklik modülü, yüksek sertlik, gevreklik, refrakterlik, düşük termal genleşme ve korozyona karşı direnç gösterirler. Diğer taraftan oksit seramikler endüstride sert aşındırıcı olarak da kullanılmaktadır (Kaya, 2007).

4.1.1. Alümina [Alüminyum Oksit (Al_2O_3)]

Oksit esaslı seramik malzemelerin başında, yaygın olarak bulunması ve ucuz olması nedeniyle alümina (Al_2O_3) gelmektedir. Sert bir refrakter malzeme olan Al_2O_3 iyi korozyon direnci göstermektedir. Günümüzde kullanılan mühendislik seramik malzemeler grubu içerisinde Al_2O_3 'in payı % 85 olup, üzerinde en çok araştırma yapılan $Al_2O_3+TiO_2$ malzemeler bu gruba dahildir (Kaya, 2007). Ergime noktası 2000 ± 30 °C olan alüminyum oksit, yüksek sıcaklıklarda kimyasal maddelere ve mekanik yüklere karşı dayanıklı refrakter malzemelerden

birisidir. Doğal alümina, korundum halinde, fakat feldspat ve killerde olduğu gibi genellikle silikatlarla birlikte bulunur. Alümina aynı zamanda boksit, diasporit, kriyolit, silmanit, kyanit ve diğer birçok mineralin bileşiminde yer almaktadır. Saf alümina, düşük sıcaklıklarda birkaç şekilde bulunur. Fakat bütün bu şekiller; zaman, kristal boyutu ve atmosfer koşullarına bağlı olarak 750-1200 °C arasında α -Al₂O₃'e dönüşür. 1600 °C'nin üzerinde yapılan ısıtma bu dönüşümü hızlandırır. Al₂O₃'in α -fazına dönüşümü tersinir değildir. Yüksek sertliği ve aşınmaya karşı direnci nedeniyle; kesici takımlarda, parlatma sektöründe, iplik mekiklerinde, yüksek sıcaklıkta çalışan makine parçalarında, sprey nozullarında, ayrıca öğütme bilyesi ve laboratuvar malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yoğun yapılı alümina, buji üretiminde de kullanılmaktadır. Al₂O₃ ürünler slip dökümle, ekstrüzyonla, indüksiyon kalıbıyla, soğuk ve sıcak presle şekillendirilmektedir. Çok ince toz boyutuna sahip tamamen saf olan alümina, ancak sol-jel yöntemi ile üretilebilmektedir. MgO ilavesi Al₂O₃'in yoğunluğunun, % 99'un üzerine çıkmasını sağlamaktadır (Erdoğan, 1998). 1800-2000 HV sertlik değerine sahip Al₂O₃'in bazı fiziksel, mekanik ve ısı özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Al₂O₃'in fiziksel ve mekanik özellikleri.

Yoğunluk ρ (gr/cm ³)	3,95
Sertlik HV	1800-2000
Elastiklik Modülü E GPa	300
Kırılma Tokluğu K_{ic} (MPa.m ^{1/2})	3,5
Eğme Dayanımı R_E (N/mm ²)	200-600
Çekme Dayanımı R_m (N/mm ²)	200-250
Young's Modülü E (GPa)	375
Isıl İletkenlik χ (W/m.K)	18
Isıl Genleşme Katsayısı α (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	7
Isıl Şok Direnç Sınırı (°C)	200
Öz Direnç Ω (Ohm.cm)	>10 ¹⁴

4.1.2. Titanyum Oksit (TiO₂)

Titanyum, fiziksel ve kimyasal açıdan üstün özellikler gösteren bir metaldir. Ancak elde edilmesi ve işlenmesi çok zor olduğundan metal olarak kullanılması çok özel alanlarla sınırlanmıştır. Buna karşılık, gerek titanyum mineralleri gerekse titanyum oksidin (TiO₂) geniş kullanım alanları vardır. TiO₂ şu an için bilinen en beyaz boya maddesidir. Titanyumun mineralleri ve TiO₂ boya, kâğıt üretimi, seramik ve cam endüstrisi, uzay ve havacılık endüstrisi, askeri amaçlı sanayi ile tıp alanında geniş kullanım alanı bulur.

Titanyumun ilmenit ve titanlı manyetit minerallerinden rutil (TiO_2 bileşiği) üretilmektedir. Bu üretim 2 farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir. Bunlar;

1- Sülfat yöntemi ve

2- Klorit yöntemidir.

Sülfat yönteminde, % 45-65 TiO_2 içeren ilmenit ya da % 70-72 TiO_2 içeren cüruf kullanılmaktadır. Titanyumlu cüruf, genellikle demiri bol ilmenitlerin elektrotermal ergitilmesi ile demiri ayrıştırarak elde edilir. Eldeki cevher, sülfirik asitle çözülerek titanil sülfat ve demir sülfat açığa çıkarılır. Titan hidrolizle çöktelir. Yıkayıp filtre edildikten sonra TiO_2 elde etmek amacıyla kalsinize edilir. Demir sülfat atık olarak çıkar.

Klorit yönteminde ise, kullanılan cevherin TiO_2 içeriğinin çok yüksek olması gerekmektedir. Bu da rutil ve sentetik rutildir. Sentetik rutil; yüksek kaliteli ilmenitten redüksiyon yoluyla kimyasal olarak TiO_2 dışındaki maddelerin ayrıştırılması ile elde edilir. Daha sonra bu yüksek tenörlü cevherden 850-950 °C'de petrol kokuyla ve klor gazıyla işlenerek titanyum tetraklorür üretilir. Bundan da atmosferik ortamda ya da oksijen ortamında kalsinasyon yoluyla TiO_2 elde edilir. Yan ürün olarak klorik asit ve klor çıkar. Mevcut teknolojilerin karmaşık olması ile ürün fiyatları yüksektir, fiyatların yüksekliği de tüketimi sınırlamaktadır. 880 HV sertlik değerine sahip TiO_2 'in bazı fiziksel, mekanik ve ısı özellikleri Tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. TiO_2 'in fiziksel ve mekanik özellikleri.

Yoğunluk ρ , (gr/cm^3)	4
Sertlik (HV)	880
Poisson Oranı (ν)	0,27
Kırılma Tokluğu K_{ic} , ($\text{MPa.m}^{-1/2}$)	3,2
Isıl İletkenlik χ , (W/m.K)	11,7
Isıl Genleşme Katsayısı $\alpha(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	9,2
Young's Modülü (GPa)	282
Kayma Modülü G, (GPa)	90
Öz Direnç Ω , (ohm.cm)	10^{12}

4.1.3. Zirkonya (ZrO_2)

Oksit esaslı seramik malzemelerden olan zirkonya (ZrO_2) seramik kaplamaların yapıldığı ilk günden itibaren özellikle "Termal Bariyer Kaplama" olarak uçak ve uzay endüstrisi sahasında çok geniş bir kullanım alanı bulmuştur (William ve Miller, 1989). Zirkonya içeren

seramikler, ileri teknoloji malzemeleri olarak kabul edilmektedirler. Bunun nedeni ise, sahip olduğu çeşitli özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu özellikler;

- Ergime sıcaklığının yüksek olması,
- Asidik kimyasal maddelere, cürufa ve cama karşı direncinin yüksek olması,
- Korozyon, erozyon ve aşınmaya karşı dayanıklı olması,
- Düşük termal genleşme katsayısına sahip olması,
- Yüksek sıcaklıkta iyonik iletkenliğe sahip olmasıdır.

Zirkonya içeren seramik malzemeler kullanım alanlarına göre değişen ve endüstride kullanılan bir oksit bileşiğidir. Zirkonya içeren seramiklerin kullanım alanları şu şekilde sıralanabilir;

- Refrakter malzeme olarak,
- Isıtıcı eleman olarak,
- İzolasyon malzemesi olarak,
- Abrasiv olarak ve kesici aletlerin üretiminde,
- Ekstrüzyon kalıplarında ve aşınmaya dayanıklı makine parçalarında,
- Oksitlenmeye karşı ve termal bariyer amacıyla yapılan seramik kaplamalarda,
- Seramik filtre üretiminde,
- Yakıt hücrelerinde,
- Piezoelektrik ve elektro optik devrelerde, kapasitörlerde,
- Dizel ve ısı motorlarında, türbin kanatlarında kullanım alanı bulmaktadır (William ve Miller, 1989; Erdoğan,1998).

Zirkonya üç farklı yapıda bulunur. Bunlar monoklinik, tetragonal ve kübik yapılardır. Monoklinik yapı, oda sıcaklığında 1170 °C'ye kadar kararlı olup, bu sıcaklığın üzerinde yapı tetragonal yapıya dönüşür. Tetragonal yapıda 2370 °C'ye kadar kararlıdır. Bu sıcaklığın üzerinde yapı kübiktir. Monoklinik yapıdan tetragonal yapıya geçiş % 8 mertebesinde hacim değişikliği içerdiğinden teknolojiye sorun oluşturmakta ve bu faz dönüşümü sonucu seramik malzeme genellikle parçalanmaktadır. Bu durumu önlemek amacıyla yapıyı oda sıcaklığında kübik yapıda kararlı kılmak amacıyla zirkonyaya; (ZrO₂) CaO, MgO ve Y₂O₃ gibi oksitler katılır. Bu çalışmada kullanmış olduğumuz ve içerisine % 8 Y₂O₃ katılmış ZrO₂'nin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.3'de verilmiştir. Kübik yapıdaki zirkonyanın özellikleri zayıftır. Tetragonal zirkonyadan monoklinik zirkonyaya dönüşüm ise 850-1000 °C gibi düşük sıcaklıkta meydana gelir ve bu dönüşüm su verilmiş çeliklerde görülen martenzitik dönüşüm karakteristiğine sahiptir. Zirkonyada yer alan bu martenzitik dönüşümün önemi ve mekanik özellikleri geliştirmesi nedeniyle, tamamen kararlı kübik yapı yerine içerisine çökelti halinde monoklinik veya tetragonal faz içeren kısmen stabilize edilmiş zirkonya tercih edilmektedir.

Seramik matris içerisine çökelmiş veya disperse edilmiş zirkonyanın tetragonal yapıdan monoklinik yapıya dönüşümü sonucu seramik malzemelerin tokluğu ve mukavemeti artar. Toklaştırmanın asıl sebebi, faz dönüşümü esnasında meydana gelen hacim ve şekil değişikliğinden kaynaklanmaktadır (Toplan, 2008; Erdoğan, 1998).

Tablo 4.3. $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{Y}_2\text{O}_3$ 'in bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Yoğunluk ρ , (g/cm ³)	3,29
Elastik Dayanımı N_c MPa	900
Elastiklik Modülü E GPa	200
Kırılma Tokluğu K_{ic} (MPa.m ^{1/2})	13
Isıl İletkenlik χ (W/m.K)	2
Young's Modülü (GPa)	205
Isıl Genleşme Katsayısı α (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	10,3
Sertlik (kg mm ⁻²)	1300
Öz Direnç Ω , (ohm.cm)	>10 ¹⁰

4.2. Oksit Olmayan Seramikler

4.2.1. Karbürler

4.2.1.1. Bor Karbür (B₄C)

Yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sertlik, düşük yoğunluk (2.4 gr/cm³), kimyasal maddelere karşı üstün direnç ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle bor karbür günümüzde ileri teknolojinin önemli bir malzemesidir (Toplan, 2008). Bor karbür (B₄C), elmas ve kübik nitrür'den sonra gelen en sert malzemedir. Karbon miktarının sertliğine bağlı olan etkisi konusunda birbirinden farklı sonuçlar ileri sürülmektedir. Yüksek sıcaklık sertlik ölçümlerinde 1300 °C 'ye kadar olan sıcaklıklar için sertlikte bir azalma gözlenmemiştir. Basıncsız şartlar altında sinterlenmiş numunelerde 200 gr. yükle yapılan sertlik ölçümlerinde Vickers sertliği ortalama 2550 HV (25.5 GPa) olarak elde edilmiştir. Literatürde bor karbür bileşikleri için belirtilen sertlik değerleri 2000-7800 HV arasında değişiklik göstermekle birlikte, B₄C bileşimi için genel kabul görmüş Vickers sertliği 3200 HV (32 GPa) civarındadır (Karabaş, 2006). Sertlik ölçümünü en fazla etkileyen parametre parlatılmış yüzey kalitesi olup, yüzeyin mümkün olduğunca düz, pürüzlülüğün ise 0,1 mikrondan daha az olması şartı gereklidir. Bu değişkenin tam olarak kontrol edilememesinin, belirtilen sertlik değerlerinde de farklılıklara yol açması olasıdır. Bor karbür bileşiği içerisinde bor ve karbon yüzdesinin değişimi ile sertliğinde oluşabilecek değişiklikler de tam olarak açıklığa kavuşturulmuş değildir. Yüksek sertliğinden

dolayı bor karbürün aşınma direnci de oldukça yüksektir. Saf B_4C kristalleri metalik gri parlak renkte olup, yoğunluğu bileşiğin yapısında bulunan ve bileşimdeki oranı % 8-20 arasında değişebilen karbon miktarına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek sertliği ve ergime noktasının yanı sıra, bor karbürün mekanik özellikleri de oldukça öneme sahiptir. Özellikle mukavemet/yoğunluk oranı göz önüne alındığında B_4C ideal bir malzemedir. Kristal yapıdaki atomların kovalent bağlarla birbirine bağlı olması yüksek mukavemetin bir göstergesidir. Bor karbürün bazı fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 4.4'te verilmektedir. Bilinen bazı bor karbür bileşiklerinde B_4C için $2,52 \text{ gr/cm}^3$, $B_{13}C_2$ için $2,488 \text{ gr/cm}^3$ ve $B_{10.5}C$ içinse $2,465 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluk değerleri elde edilir (Mori, 2007; Raman ve diğ., 2005; Sarıkaya, 2003).

Tablo 4.4. B_4C 'ün fiziksel ve mekanik özellikleri.

Elastiklik Modülü E, (GPa)	306-460
Tokluk $K_{iç}$, ($\text{MPa m}^{1/2}$)	2,9-3,7
Sertlik H (HV)	3200
Yoğunluk ρ , (gr/cm^3)	2,5-2,52
Possion Oranı (ν)	0,14-0,22
Isıl Genleşme Katsayısı α ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	$4,73 \times 10^{-6}$
Isı İletim Katsayısı χ , (W/mK)	2
Young's Modülü (GPa)	460
Özgül Isı Q, (J/gK)	1,13

Bor karbürün kırılma enerjisinin çeşitli araştırmacılar tarafından 1,6 ile $1,9 \text{ J/m}^2$ gibi çok geniş bir aralıkta bulunacak şekilde literatürde verilmiş olması, bu büyüklüğün ölçümlerinde büyük hataların yapıldığını göstermektedir. Kovalent bağlı malzemeler için bağlanma modelinden giderek bor karbür için yapılan teorik hesaplamalar kırılma enerjisinin $11,8 \text{ J/m}^2$ olduğu ifade ederken, Griffith teorisi kullanılarak yapılan hesaplamalarda bu değer 14 J/m^2 olarak bulunmuştur.

Bor karbür bilinen en kararlı bileşiklerden birisidir. Standart oluşum entalpisi 9,3 ile $17,1 \text{ kcal/mol}$ arasındadır. Asit ve bazlar ile kolaylıkla reaksiyona girmez, fakat $\text{HF-H}_2\text{SO}_4$ ve HF-HNO_3 karışımlarında çok uzun sürelerde çözünüm gösterir. Ufak boyutlu bor karbür tozları nemli havada veya oksijen ile yavaşça oksitlenebilir ve taneciklerin yüzeyinde zamana bağlı olarak B_2O_3 , HBO_3 veya H_3BO_3 filmleri oluşur (Lee, 2000). Günümüzde ekonomik olarak bor karbür toz üretimi borik asitten hareketle yapılmaktadır. Ham madde olarak borik asit-petrol karışımlarının kullanılması halinde kullanılan fırın tasarımları, SiC üretim teknolojisinde kullanılan fırın tiplerinden oldukça etkilenmiştir. Bor karbürün sahip olduğu aşırı sertlik, onu metalurji sektöründe aşındırıcı toz olarak gündeme getirilmiştir. Boyut dağılımı 1-100 mikron

arası değişen tozlar WC ve diğer teknik seramiklerin taşlanması ve parlatılmasında kullanılır. Aşınmaya dayanıklı makine parçalarının üretiminde bor karbürün önemli bir yeri vardır. Kumlama ve su jeti kesme aletlerinin memeleri bu amaçlı kullanıma örnek olarak verilebilir. Bor karbür tozunun yüksek sertliğinin yanı sıra; yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk özelliklerinin de olması askeri amaçlı uygulamalarda zırh malzemesi olarak kullanımı da gündeme getirmiştir. Bor karbür esaslı bir zırh sisteminin alışlagelmiş sistemlere göre % 20 daha hafif olması, günümüz tank ve helikopter teknolojinde daha kolay hareket ve manevra yeteneği vermektedir. Bu nedenle bir askeri helikopterde alt kısımlar, motor kabini ve pilot kabinini yan yüzleri bor karbürle kaplanmaktadır. Ayrıca florürler ile aktive edilmiş bor karbür tozları çelik yüzeyine bor difüzyonu sağlamak için kullanılır. Bu işlem sonucunda çelik yüzeyinde 100-200 mikron kalınlığında çok sert ve aşınma direnci çok yüksek bir yüzey tabakası elde edilir. Bor karbürün en yaygın kullanıldığı alanlardan biri de nükleer enerji santrallerinde radyasyondan korunma amaçlı ve yakıt yükleme çubuğu olarak kullanımıdır (Sarıkaya, 2003).

4.2.1.2. Krom Karbür (Cr_3C_2)

Krom karbona karşı daha büyük bir afiniteye sahiptir. Krom karbür (Cr_3C_2) son derece sert olan refrakter bir seramik malzemedir. Genellikle sinterleme işlemine tabi tutulurlar. Ortorambik kristal yapısı ile gri renkte bir görünüme sahiptir. Cr_{23}C_6 ve Cr_7C_3 şeklinde diğer kompozisyonları mevcuttur. Krom karbür, metal malzemelerin yüzeylerinin sert olmasının, korozyona ve aşınmaya karşı dayanıklı olmasının istenildiği yerlerde ısıl püskürtme malzemesi olarak kullanılmaktadır. Mil yatakları, çontalar ve vanalar gibi yerlerde vanadyum karbür gibi diğer sinterlenmiş karbürlerle birlikte kapla işlemi yapılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda (1000-1100 °C) oksidasyonunun olmayışı, krom karbürün korozyon direncini arttırmaktadır.

Krom karbürün ısı genleşme katsayısı hemen hemen çeliğin ısı genleşme katsayısına eşittir. Mekanik streslerin kaplama tabakasında azalması tabakayı kuvvetlendirmektedir. Krom karbürün mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5. Cr₃C₂'ün fiziksel ve mekanik özellikleri.

Yoğunluk (gr/cm ³)	6,65-6,68
Young's Modülü (GPa)	373
Basma dayanımı (GPa)	4.138
Mol kütlesi (g/mol)	180,01
Kaynama noktası (°C)	3800
Ergiye noktası (°C)	1890 (Cr ₃ C ₂) 1665 (Cr ₇ C ₃) 1250 (Cr ₂₃ C ₆)
Isıl Genleşme Katsayısı α (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	11,2
Isıl İletkenliği (W/m.K)	189.77
Sertlik-VH (kg/mm ²)	1834

4.2.1.3. Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür (SiC) kuvvetli kovalent bağ yapısında yapay bir malzeme olup, E.G. Acheson tarafından 1891'de tesadüfen sentezlenmiştir. Al₂O₃'den daha sert ve ısıya daha dayanıklıdır. Ayrıca korozyona karşı yüksek dayanım gösterir. Bu yüzden yaygın olarak hem aşındırıcı hem de refrakter olarak kullanılır. Demir-çelik yapımında metalürjik katkı olarak da kullanılır, elektriksel özellikleri nedeniyle ısıtıcı elementlerde ve elektrik devrelerinde kullanılırlar. Silisyum karbür, 2000 °C'nin altındaki sıcaklıklarda; "β" formundadır. Bu durum; düşük sıcaklık yapısı olarak isimlendirilir. Dönüşüm sıcaklığını arttıran etkiler yok ise 2000 °C üzerinde sadece hegzagonal ve rombohedral tipler mevcuttur. Bu sıcaklıklarda SiC, "α" formundadır. SiC'ün temel yapısı tetrahedra'dır. SiC'ün farklı formları, SiC tetrahedralarının birbirlerinin üzerine yığılmaları ile oluşan tabakalar ve tekrarlayan SiC birimlerinin oluşturduğu bu tabakaların sayısı ile temsil edilir. Acheson firmında sentezlenen SiC kristallerinde, 4H, 6H, 15R veya 3C formları yaygın olarak görülür. Bunların dağılımı hammaddenin kalitesine ve üretim koşullarına göre değişir; H, R, C sırasıyla hegzagonal, rombohedral ve kübik yapıları rakamlar ise tabaka sayılarını göstermektedir (Toplan, 2008).

β-SiC'e ait olan 3C dışında diğer formların tamamı α-SiC'e aittir. En sık karşılaşılan 3C, 4H, 15R ve 6H tipleri X-ışınları difraksiyon teknikleri ile saptanabilirler. Silika ve kok karışımı olan hammadde elektrikli bir fırında (Acheson fırını) belli bir uzaklıkta sabitlenmiş ve araları grafitle bağlanmış elektrotlar arasında paketlenir. Kutuplar arasında elektrik geçirilerek fırın ısıtılır ve aynı zamanda tepkimenin olması sağlanır. Oluşum ısısı 528 kJ/mol SiC'dür. İğere bir ifade ile bu reaksiyon, büyük miktarlarda elektrik enerjisi harcayan endotermik bir reaksiyondur.

SiC'ün Kullanım Alanları;

- Aşındırıcı olarak,
- Deoksidasyon ve alaşım malzemesi olarak,
- Refrakter malzemesi olarak genellikle çubuk ve tüp şeklindeki ürünler olarak elektrikli fırınlarda kullanılabilirler.
- Sızdırmazlık elemanı olarak,
- Dökme demirin erimesi sırasında SiC ilavesi karbürizasyon ve silikanizasyona yardım eder. Aynı zamanda çekirdeklendirici görevini görerek dökme demirin kalitesini de artırır.
- Kaymalı yataklar SiC'ün kullanım alanlarından biridir. SiC'ün erozyon ve kimyasal direnci planlayıcıya değişik ortamlarda yatak konumu için bir fikir verir.

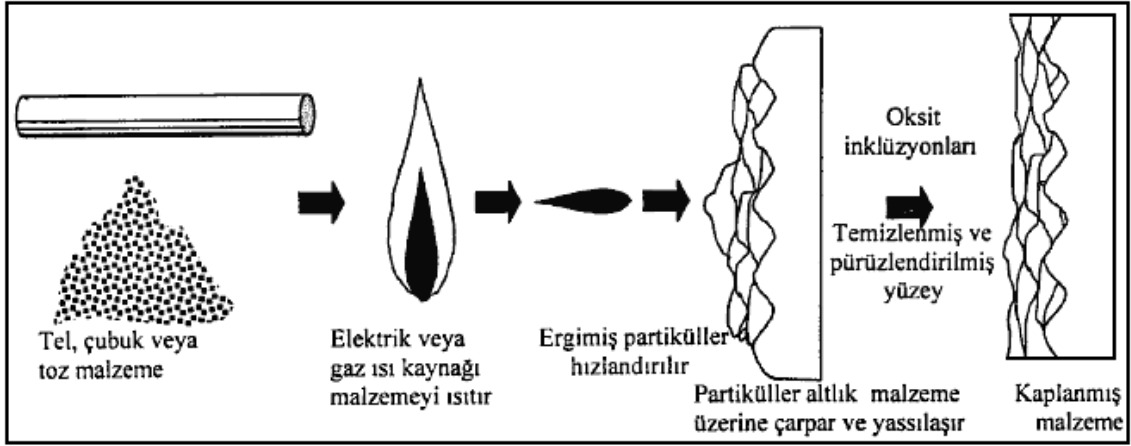
Tablo 4.6. SiC'ün fiziksel ve mekanik özellikleri.

Elastiklik Modülü E (GPa)	235-290
Kırılma Tokluğu K _{İÇ} (MPa m ^{1/2})	4,6
Sertlik (kg/mm ²)	2900-3100
Yoğunluk (gr/cm ³)	3.2
Poisson Oranı (ν)	0,14
Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	3,8-4,8 × 10 ⁻⁶
Isı İletim Katsayısı (W/cm°C)	3,6-4,9
Young's Modülü (GPa)	400
Ergime derecesi (K)	3103
Özgül Isı (j/KgK)	750

5. ISIL PÜSKÜRTME KAPLAMA TEKNİKLERİ

Isıl püskürtme yöntemi yüzeylerin aşınma ve korozyona karşı korunmasında endüstride geniş bir kullanım alanına sahip bir işlemdir (Kahraman, 2005; Mishra, 2005; Yilbas ve Arif, 2007). Son 20 yılda kullanılan tekniklere nazaran daha yeni bir kaplama yöntemidir. Bu yöntemin en geniş kullanım alanı, makine parçalarıdır. Yöntem, süper alaşımların özel kaplamalarında ve gaz tribün mühendisliğinde kullanılmaktadır (Lin, 2007). Aşınmış veya hatalı işlenmiş parçalar, söz konusu olan probleme göre seçilmiş metal püskürtülerek eski ya da gerekli ölçülerine getirilebilir. Isıl püskürtme cihazındaki işlem parametrelerindeki ve kullanılan malzeme bileşimindeki teknolojik ilerlemeler, yeni ve potansiyel uygulamaların çeşitliliğini de beraberinde getirmiştir. Son zamanlarda; uçak motoru parçalarında plazma püskürtme kaplamasının kullanımı büyük gelişme kaydetmiş olup, alan sürekli olarak genişlemektedir. Ergitilmiş metalle yapılan kaplama, aşınmanın sorun olduğu her yerde geniş uygulama alanı bulur. Isıl püskürtme işlemi; ince öğütülmüş metal, metal oksit veya plastikleri, ergimiş veya yarı ergimiş durumda, uygun bir alt malzeme üzerine tutunarak kaplanma veya bir yapısal şekil oluşturmak üzere yapılan bir dolgu yöntemidir. Isıl bariyer kaplama yüzey boyunca ısı akışını sınırlayan düşük ısı iletkenliğe sahip malzemelerden oluşur. Isıl bariyer kaplama uygulamaları ile ana malzemenin daha yüksek sıcaklıklarda kullanılmasına imkân sağlanır. Isıl bariyer kaplama olarak düşünülen malzemeler genellikle oksitler ve sonra karbür ve nitrürlerdir (Bach ve Duda, 2000; Alpay, 2000).

Isıl püskürtme kaplama teknikleri, tel veya toz halindeki kaplama malzemelerinin bir püskürtme tabancasında taşıyıcı, yanıcı ve yakıcı gazların eşliğinde püskürtülerek altlık üzerinde biriktirilmesi ve koruyucu tabakanın elde edilmesi esasına dayanan işlemlerdir. Isıl püskürtme torcu; yanıcı gazlar elektrik arkı veya plazma arkı ile kaplama malzemesini ergetmek için gerekli olan sıcaklığı elde eder (Smith, 1995). Toz püskürtmede ince parçacıklar yüksek ısı kaynağının içinden geçerek ergimiş ya da yarı ergimiş duruma gelirler. Ergiyen kaplama malzemesi kaplanacak olan parçanın soğuk olan yüzeyine püskürtülür. Yüzeye darbe etkisiyle çarpan tanecikler, düzleşmekte ve esas metale olan ısı transferi ile soğuyarak katılaşmaktadır. Birbirleri ile temas haline gelen bu tanecikler malzeme yüzeyinde kaplama tabakasını meydana getirmektedirler (Şekil 5.1). Kaplama genellikle mekanik bağlanma ve bölgesel olarak çeşitli sınıflarda kimyasal bağ kuvvetleri ile oluşmaktadır (Sarikaya, 2003). Bağlanmanın daha iyi olması için malzeme yüzeyi kaplama öncesinde yüzey pürüzlendirme işlemine tabi tutulur.



Şekil 5.1. Isıl püskürtme kaplama yönteminin şematik olarak gösterimi.

Metal püskürtme işleminin diğer yöntemlerden farklı bazı özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- 1) Alt tabakaya tutunma: Malzemeye uygulanan yöntemle ilgili olarak, kaplama ve alt tabaka arasındaki bağın kuvvetli olması çok önemlidir.
- 2) Bileşim ve distorsiyondan dolayı kaynak yolu ile kaplama işlemine uygun olmayan yüzeye kaplama yapılmasına olanak sağlar.
- 3) Püskürtülen dolgu, kaynak yöntemiyle kaplamaya göre daha ince tabakalar halinde uygulanabilir.
- 4) Çoğunlukla kararlı sıvı faz içeren malzemelere; metallere, seramiklere, karbürlere, kompozitlere ve plastiklere bu yöntem ile uygulanabilir.

Isıl püskürtme yöntemlerinin çeşitli özellikteki kaplamaların gerçekleştirilmesi amacıyla farklı ısı püskürtme yöntemleri geliştirilmiştir. Sıcaklık, partikül hızı, kullanılan gaz gibi kaplama tabakasının özelliklerini etkileyecek parametrelerin değiştiği bu yöntemler; alevle püskürtme, yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF), plazma püskürtme, patlamalı püskürtme, ark püskürtme vb. yöntemlerdir (Bach ve Duda, 2000; Kahraman ve Gülenç, 2002; McGrann ve diğ., 1998).

5.1. Alevle Püskürtme

Bu püskürtme sistemi, yüzeye kaplanması düşünülen tel veya tozların, püskürtme memesi içerisinde ergitilerek kaplanacak olan alt malzeme yüzeyine püskürtülmesi şeklinde çalışmaktadır. Yanıcı gaz-oksijen alevinde püskürtülen telin ergimesi için oldukça yüksek bir alev sıcaklığına ihtiyaç vardır. Bu da ancak oksijen-yanıcı gaz alevi ile sağlanabilmektedir. Alevle püskürtmede hava-yanıcı gaz alevi kullanılmaz. Yanıcı gaz genellikle asetilen olup

düşük ergime noktasına sahip malzemeler için bazen bütan/propan ve ince tozların püskürtülmesi durumunda hidrojen de kullanılmaktadır. Bütan ve propan gazlarının yerine tercihen asetilen gazının kullanılmasının nedeni, asetilenin daha yüksek alev sıcaklığına ve tutuşma hızına sahip olmasıdır (Hoff, 1995; Sarıkaya, 2007, Sarı ve diğ., 1999; Clare ve Crawmer, 1982). Diğer yandan depolanması zaten çok zor olan hidrojenin bu tür işlemlerde kullanımı hem tehlikelidir ve hem de en üst düzeyde güvenlik önlemlerinin alınmasını gerektirir (Yildirim, 1974). Asetilenin oksijenle oluşturduğu alevin en yüksek sıcaklığı 3200 °C ve propanın ise 2800 °C' dir. Düşük ergime sıcaklığına sahip metallerin püskürtülmesinde, daha çok propan gazı kullanılır. Fakat yüksek sıcaklıklarda ergiyen metallerin püskürtülmesi durumunda asetilen gazı kullanmak gerekir (Kahraman, 2000; McGrann ve diğ., 1998). Alevle püskürtme sisteminde kullanılan yanıcı gazların ve oksijenin özellikleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Yanıcı gazların ve oksijenin özellikleri.

Özellikler		Gazlar			
		Oksijen	Asetilen	Propan (LPG)	Hidrojen
Kimyasal gösterimi		O ₂	C ₂ H ₂	C ₃ H ₈	H ₂
Ticari saflık (%)		> 99,5	> 99	> 99,8	> 99,75
Özgül ağırlık (kg/m ³)		1,43	1,17	2,02	0,09
Özgül ısı değeri (kJ/m ³)		-	57120	93000	10750
En düşük tutuşma sıcaklığı (°C)	Hava ile	-	335	510	510
	O ₂ ile		295	490	450
Tutuşma Hızı (m/sn)	Hava ile	-	1,3	0,3	2,7
	O ₂ ile		13,1	3,7	8,9
En yüksek alev sıcaklığı (°C)	Hava ile	-	2325	1925	2095
	O ₂ ile		3180	2850	2525

Bir alevle püskürtme cihazında yanmanın kademeleri şunlardır.

- 1) Püskürtülen tel,
- 2) Yanıcı gaz-oksijen karışımının geçişi,
- 3) Basınçlı havanın geçişi,
- 4) Gaz karışımının yüksek bir hızla çıkışı,
- 5) Yanıcı gazların ayrıştığı bölge (CO ve H₂),
- 6) Açık renkli parlak koni (kızarmış karbon taneciklerinin oluşturduğu),
- 7) Primer yanma bölgesi (en yüksek sıcaklığın olduğu bölge, 3200 °C),
- 8) Sekonder yanmanın olduğu bölge (1100 °C ve 2000 °C arasındaki bölge).

Alevle spreyleme kaplamaları normal olarak yaklaşık 50 mikrondan birkaç milimetreye varan kalınlıklarda kullanılır. İhtiyaç duyulan kaplama kalınlığı, uygun kaplamanın seçiminde genellikle büyük rol oynar. Alevle spreyleme; yıpranmış parçaları kurtarmak, yüksek sıcaklık ve ortam sıcaklığında korozyonu önlemek için kullanılabilmesine karşın, işlemin en geçerli kullanım yeri aşınmaya maruz kalan parçaların kaplanmasıdır. Seramik veya metal kaplamalar gaz türbini motorlarında, yanma çemberlerinde, aktarma borularında kullanım alanı bulmaktadır (Kahraman, 2000; McGrann ve diğ., 1998).

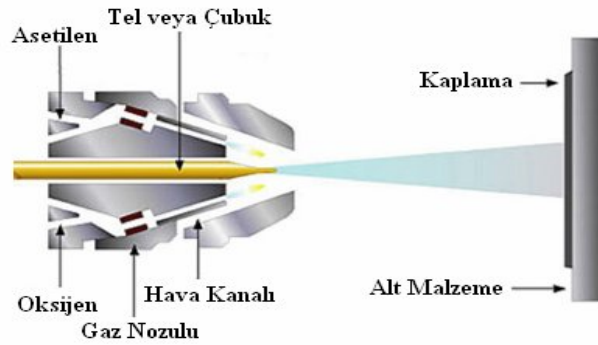
Alevle püskürtme yöntemleri, püskürtülen ilave metalin biçimi ve durumuna ve tabancanın özelliğine göre sınıflandırılırlar (Tucker, 1994, McGrann ve diğ., 1998). Bunlar;

- 1) Alevle tel püskürtme,
- 2) Alevle toz püskürtmedir.

5.1.1. Alevle Tel Püskürtme

Alevle tel püskürtmede; kaplanacak olan metal tel, sürekli bir şekilde makara ya da halkadan tabancaya iletilerek kaplama işlemi gerçekleştirilir. Diğer bir çeşit olarak da kesilmiş metal çubuklar kullanılır. Şekil 5.2’de tel veya çubuk kullanılarak gerçekleştirilen alevle püskürtme sisteminin şematik görüntüsü verilmektedir. Genel hatları ile bir tel püskürtme sisteminde şu kısımlar bulunmaktadır.

- 1) Alev püskürtme tabancası,
- 2) Malzeme yüzey kaynağı ve besleme aletine bağlantısı,
- 3) Oksijen ve yakıcı gaz ekipmanları, basınç manometresi ve akış ölçer,
- 4) Gerekğinde sıkıştırılmış hava kaynağı ve kontrol ünitesi,
- 5) İş parçasını bağlama aparatı.



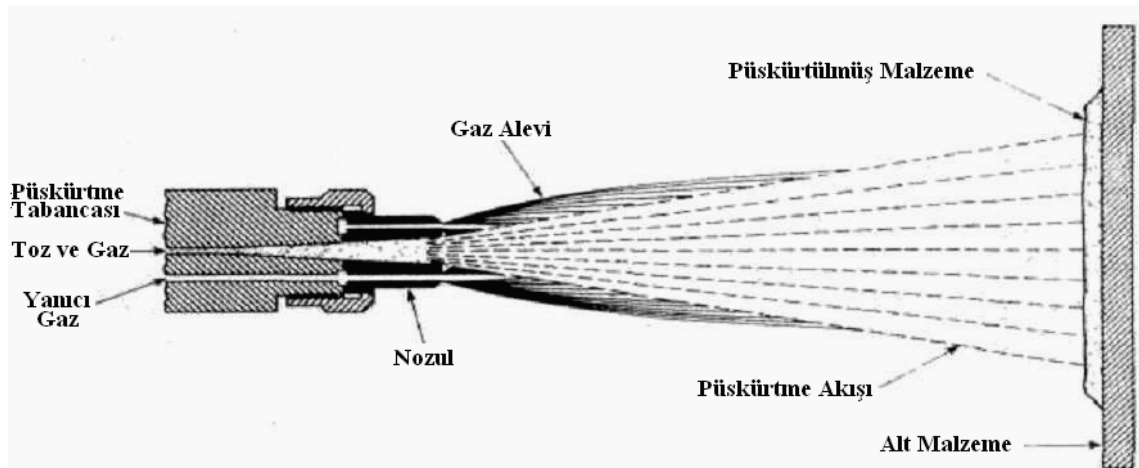
Şekil 5.2. Tel veya çubuk ile gerçekleştirilen alevle püskürtme sisteminin şematik görüntüsü
(www.sulzermetco.com).

5.1.2. Alevle Toz Püskürtme

Şekil 5.3'te bir altlık malzemeye, alevle toz püskürtme sistemi kullanılarak yapılan kaplama işlemi görülmektedir. Resimde görülen püskürtme torcu üzerinde bulunan silindirik kap içerisinde alt malzeme yüzeyine kaplanacak olan toz malzeme konmaktadır. Asetilen ve oksijen gazının yanması ile oluşan alev içerisinde toz haznesinden kaplanacak olan tozlar hava ile püskürtülmektedir. Burada eriyen tozlar malzeme yüzeyine püskürtülerek kaplama tabakası elde edilmektedir. Alevle toz püskürtme sisteminin şematik görünüşü Şekil 5.4'de verilmiştir.



Şekil 5.3. Alevle toz püskürtme ile gerçekleştirilen kaplama işlemi.



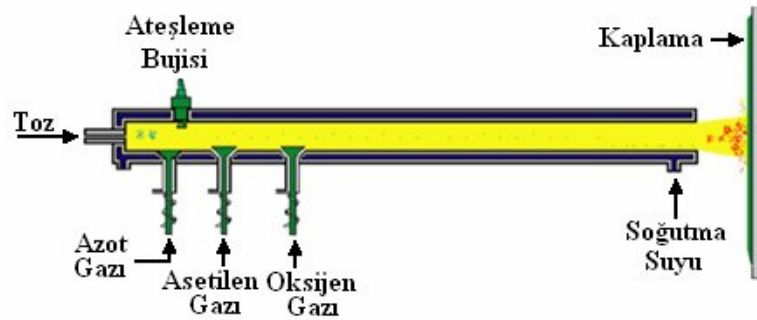
Şekil 5.4. Alevle toz püskürtme sisteminin şematik görünüşü (Tucker, 1994).

Metal tozları, seramik tozları ve seramik-metal toz karışımları, alevle toz püskürtme yöntemiyle püskürtülebilir. Metal tozları genellikle, aşınma ya da korozyon dirençli uygulamalar için tasarlanan sert alaşımlardır. Karbür ve borürler gibi çok sert metalik bileşikler,

aşınma dirençli tabakaların elde edilmesinde, kompozit kaplama oluşturmak için metal tozlarıyla harmanlanır ve alevle püskürtme sistemi ile malzeme yüzeyine kaplanır (Call, 1984). Alevle toz püskürtme sisteminde de ergiyen ve yarı katı hale gelen tozlar kaplanacak olan malzeme yüzeyine püskürtülürler. Tozlar malzeme yüzeyine çarptıkları anda yassılaşıp katman şeklinde tabakalı bir yapı olarak katılaşır.

5.2. Patlamalı püskürtme (D-Gun)

Patlamalı püskürtme yöntemi, silindire azotun taşıdığı tozla birlikte $C_2H_2 + O_2$ gazları kullanılarak bir seri patlamalarla ergimiş ve hızlandırılmış taneciklerin kaplanacak malzemeye yönlendirilmesiyle elde edilir. Şekil 5.5’de patlamalı püskürtme sisteminin silindirik şekli şematik olarak görülmektedir. Her patlamadan sonra, kapsül içine azot püskürtülerek temizleme yapılır ve işlem saniyede birkaç kez tekrarlanır. Patlamalı püskürtmeyle yüksek kalitede kaplamalar elde edilebilmektedir. Püskürtme sisteminde zerreciklerin yüksek hızlara çıkması, kaplanacak olan malzeme yüzeyinde yoğun ve yüksek bağlanma mukavemetine sahip kaplamaların oluşmasını sağlamaktadır. Patlamalı püskürtme sistemi uygulamasının kısmen pahalı olması, yöntemin en önemli dezavantajlarından birisidir. Ayrıca 140 desibel gibi tehlikeli ve yüksek gürültü oluşturması nedeniyle, özel ses yalıtımı ve patlamaya dayanıklı hücreler gerektirmesi; yöntemin diğer bir dezavantajıdır (Ulutun, 2007). Şekil 5.6’da ise, bir silindirik parçanın patlamalı püskürtme sistemi kullanılarak kaplanırken çekilmiş resmi görülmektedir.



Şekil 5.5. Patlamalı püskürtme sisteminin şematik görünüşü (Ulutun, 2007).

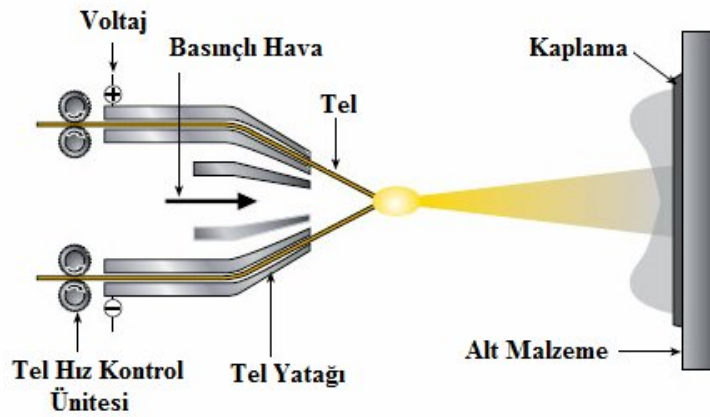


Şekil 5.6. Silindirik altlık malzemesinin patlamalı püskürtme yöntemi ile kaplanması.

5.3. Elektrik Ark Püskürtme

Bu yöntemde sistem içerisinde iki tel arasında sürekli bir ark meydana getirilmektedir. Bu telleri eritmek için gerekli olan ısı, elektrik arkı tarafından sağlanmaktadır. Meydana getirilen ark tel uçlarını eritmektedir. Ergitilen tel uçları Şekil 5.7’de görüldüğü gibi hızlı ama soğuk hava jeti tarafından atomize edilmekte ve daha sonra kaplamayı meydana getirmek üzere altlık malzemesi yüzeyine püskürtülmektedir. Bu işlemde kullanılan teller, tel ile alev püskürtme işleminde kullanılan tellerle benzerdir. Elektrik ark püskürtülmüş kaplamalar alevle püskürtülmüş kaplamalar ile kıyaslandığında çeşitli üstün özelliklere sahiptir (Hazar, 2004).

- 1) Çökelme hızı daha yüksektir.
- 2) Yüksek bağ mukavemetine sahiptir.
- 3) Kaplamanın maliyeti daha düşüktür.
- 4) Kaplamadaki oksit miktarı azaltılabilmektedir.



Şekil 5.7. Elektrik ark püskürtme sisteminin şematik görünüşü (www.sulzermetco.com)..

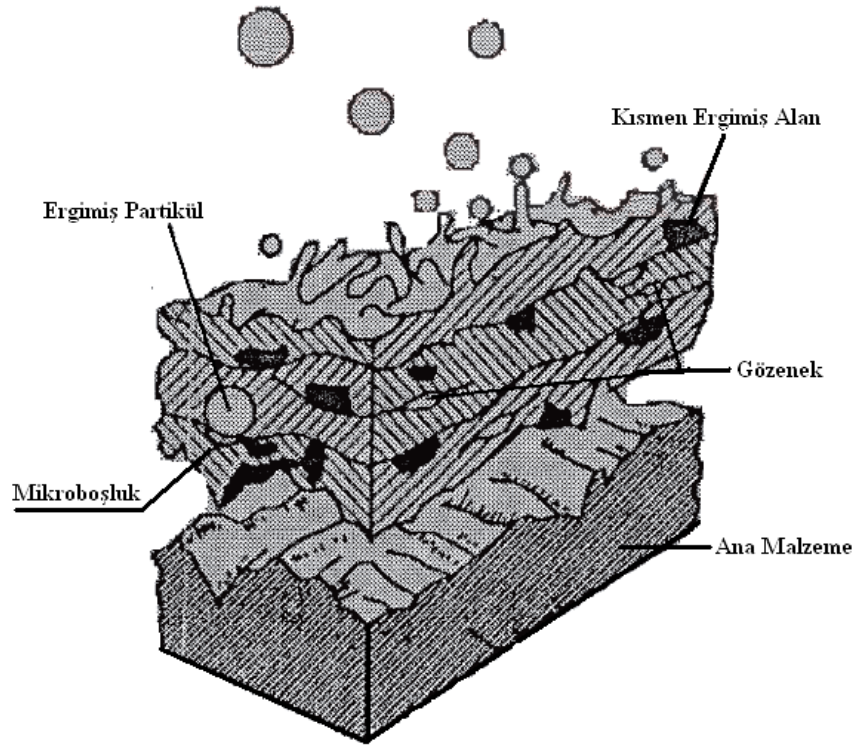
6. PLAZMA PÜSKÜRTME YÖNTEMİ

6.1. Giriş

Plazma terimi, ilk defa 1929'da Langmuir tarafından iyonlarına ayrılmış, eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulunduran yoğunlaştırılmış bir gaz olarak tanımlanmıştır. Yüksek sıcaklıkta ısıtılan gaz molekülleri önce atomlarına ayrılır, sonra atomlardan dış yörünge elektronlarının kopması sonucu pozitif yüklü iyonlar oluşur (Karadeniz, 1981; Erdoğan ve diğ., 2006). İyonlarına ayrılmış gaz olan plazma; iyon, elektron, uyarılmış atom, foton, nötr atom veya molekül içeren bir karışımdır. Plazma maddenin katı, sıvı ve gaz hallerinden oldukça farklılık göstermesinden dolayı maddenin dördüncü hali olarak kabul edilebilir. Bu haller arasındaki esas fark sahip oldukları enerjilerdir. Sıcaklık 8000 K üzerinde bulunursa, madde katı ve sıvı halini koruyamaz. Sıcaklığın 10000 K'in üzerine çıkmasıyla da bütün atomlar ve moleküller iyonlaşır. Plazma haline geçiş için gaz halindeki maddeye enerji vermek gerekir. Gerekli olan bu enerji; ısı, ışın, manyetik ve elektrik enerjisi şeklinde verilebilir (Kutbay ve Daşcılar, 2006).

Plazma püskürtme, 1960'lı yılların ortasından bu yana endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir yöntemdir ve modern endüstri tarafından ihtiyaç duyulan yüksek performanslı yüzeylerin üretimi için faydalanan en önemli teknolojilerden birisidir (Villat, 1986; Pamuk ve Çimenoglu; 1997). Isıl püskürtme yöntemlerinden bir tanesi olan plazma püskürtme yöntemi, alevle püskürtme yönteminin daha geliştirilmiş bir şeklidir. İkinci dünya savaşından sonra ark püskürtme yönteminde hızlı bir gelişme kaydedilmiştir. 1945 yılından itibaren Polonya, Slovakya ve Rusya'da püskürtme ile kaplama yöntemlerindeki gelişmeler devam etmiştir. Sovyet Sosyalist Cumhuriyetleri Birliği'nde püskürtme sisteminin on farklı ilk örneği geliştirilmiştir. İlk örneklerin geliştirilmesini takiben; % 10'u alevle püskürtme ve % 90'ı da ark püskürtme makinesi olmak üzere yılda 2000 adet püskürtme makinesi üretilmiştir. Alevle püskürtmede kullanılan oksijen-asetilenin, ark püskürtmede ise elektrik arkın düşük sıcaklıklara sahip olmasından dolayı bu yöntemlerde bazı sınırlamalar gelmiştir. Örneğin alevle püskürtme yönteminde 2700 °C'nin üstünde ergime derecesine sahip bir malzeme ergitilemez. Bu aşamada plazma püskürtme sistemi devreye girmektedir. Plazma püskürtme sisteminde alevle püskürtme sistemi ile gerçekleştirilen kaplama tabakalara göre daha yoğun kaplama tabakaları elde edilmektedir (Zhou ve diğ., 2000). Plazma püskürtme sisteminde koruyucu gaz altında püskürtme yapılmasından dolayı, hava ile ergiyen zerreciklerin teması ile oluşabilecek oksitlenmeler oldukça azalmıştır. Ticari plazma torçları ile 17000 °C'ye kadar ulaşan sıcaklıklar elde edilebilmektedir. Bu sıcaklık malzemenin ergime derecesinden çok yüksek olan bir

sıcaklıktır. Yapılan bir çok püskürtme uygulamasında, optimum sıcaklık değeri 6500-11000 °C aralığında seçilmektedir (Matejka ve Benko, 1989). Seramik ve yüksek ergime sıcaklığına sahip metal ve alaşımlarının kaplanabilmesine olanak sağlayan bu sistem uluslararası teknikler içerisinde önemli bir paya sahiptir. Sistemde kaplama tabakasının özellikleri çeşitli parametrelerin değiştirilmesine bağlı olarak değişmektedir. Bu parametreler; gaz akış oranları, elektrik akımı, gerilim ve toz besleme ayarları gibi çeşitli değişkenlerdir. Alt malzeme yüzeyinde oluşturulan kaplamaların yaklaşık olarak % 90'ı önemli ölçüde aşınma direnci sağlamaktadır (Fang ve diğ., 2007; Zhao ve diğ., 2003; Villat, 1986; Pamuk ve Çimenoglu; 1997). Şekil 6.1'de plazma püskürtme sistemi ile gerçekleştirilen kaplamaların genel yapısını ifade eden sistematik bir şekil görülmektedir.



Şekil 6.1. Plazma püskürtme sistemi ile gerçekleştirilen kaplamaların genel yapısı.

6.2. Plazma Püskürtme Sistemi

Plazma püskürtme sistemi çeşitli kısımlardan oluşan kompleks bir sistemdir. Güç kaynağı, toz besleme ünitesi, gaz tüpleri ve kontrol paneli, soğutma sistemi ve plazma torcundan oluşan bir sistemdir (Şekil 6.2).



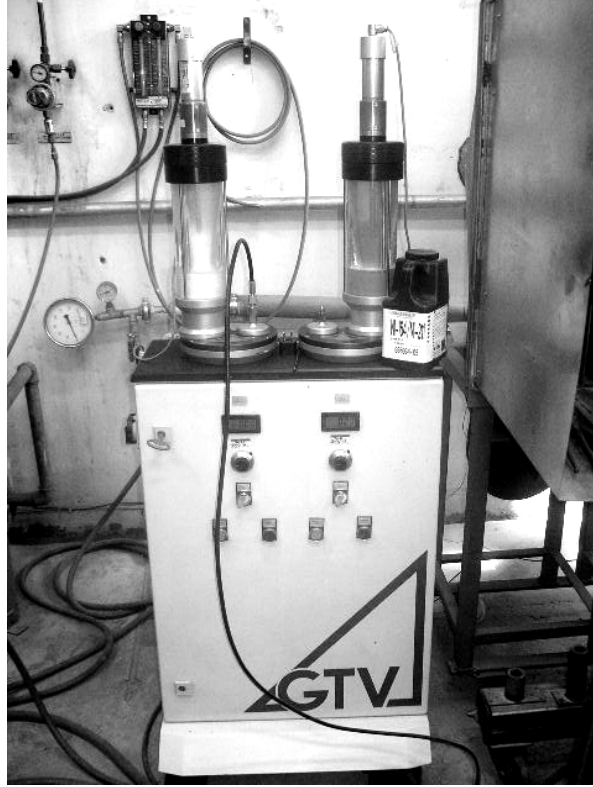
Şekil 6.2. Kontrol panelli atmosferik plazma püskürtme sisteminin şekli (www.sulzermetco.com).

Sistemin çalışabilmesi için gerekli olan elektrik enerjisi sağlayan güç kaynağı (Şekil 6.3), uygulanan kaplamaları özelliklerine etki etmektedir. Başlarda 40 kW gücünde olan güç kaynaklarının zamanla değerleri yükselterek 80, 120 ve 220 kW gücünde güç kaynakları üretilmeye başlanmıştır. Güç kaynaklarının değerlerindeki bu artış ile anot ile katot arasındaki potansiyel farkı artırır. Dolayısıyla katottan yayılan ve anoda doğru yönelen serbest elektronların hızında bir artış söz konusu olur. Bu artış püskürtme hızına etki eder. Kaplanacak olana tozların alt malzeme yüzeyine hızla çarpması yoğun bir yığılma sağlayarak kaplamaların kalitesini artırmaktadır (Bechtloff, 1985, Wang ve diğ., 2005).



Şekil 6.3. Atmosferik plazma püskürtme sisteminin güç kaynağı.

Kaplama esnasında malzeme yüzeyine kaplanacak tozların taşınmasını toz besleme ünitesi sağlamaktadır (Şekil 6.4). Farklı ebat ve şekle sahip tozların belirlenmiş olan oran ve hızlarda, malzeme yüzeyine püskürtme işlemini gerçekleştiren plazma tabancasına (Şekil 6.5) taşınmasını sağlamaktadır. Toz besleme ünitesinin parametreleri, en uygun sonucu elde etmek amacıyla tozları üreten firmanın belirlediği şeklide ayarlanıp uygulanmaktadır.



Şekil 6.4. Atmosferik plazma püskürtme sisteminin toz besleme ünitesi.



Şekil 6.5. Atmosferik plazma püskürtme sisteminin plazma tabancası.

6.3. Plazma Gazları

Plazma püskürtme sisteminde kullanılan başlıca gazlar Ar, He, H₂ ve N₂ ile birlikte az miktarda da havadır. Plazmanın oluşumunda bu gazlar kullanılmaktadır. Plazma gazları tek atomlu ve çift atomlu olarak iki temel grupta incelenir. İlk grupta argon ve helyum gazları, ikinci grupta ise azot ve hidrojen gazları bulunmaktadır. Uygulanan plazma gazlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 6.1’de verilmiştir. Plazma şeklini alacak olan gaz, plazma ışının hızı ve bu ışının sıcaklığının arzu edilen seviyede olmasına göre seçilmektedir.

Tablo 6.1. Plazma gazlarının fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikler		Plazma Gazları			
		Ar	He	N ₂	H ₂
Relatif Mol Ağırlık		39.944	4.0002	28.016	2.0156
Özgül Ağırlık (kg/m ³)		1.783	0.1785	1.2505	0.0898
Isıl İletim Katsayısı (W/mK)x10 ⁻³		16.3	143.6	23.8	175.4
Özgül Isı Kapasitesi (kJ/kgK)x10 ⁻³		511	5233	1046	14268
Ark Gerilimi (Volt)		40	47	60	62
İyonlaşma Potansiyeli (eV)	Başlangıç	15.70	24.05	14.50	13.50
	Bitiş	27.50	54.10	29.40	-
Plazma Arkı Sıcaklığı (K)		14000	20000	7300	5100

6.3.1. Azot (N₂)

Azot gazının ayrışma sıcaklığı 5000 K’de başlar ve bu sıcaklık 9000 K’e çıktığında % 95 oranında ayrışma meydana gelmiş olur. Azot atomlarının iyonlaşması ise 8000 K’de başlamaktadır. 15000 K sıcaklıkta azot atomlarının % 50’si, 20000 K sıcaklıkta % 95’i ve 22000 K sıcaklıkta da % 98’i iyonlaşmaktadır. Yüksek entalpi değerinden dolayı plazma ışını uzundur. Aynı sıcaklık değerinde (7000 K) diğer gazlarla kıyaslandığında azotun plazma içerisindeki ısı miktarının büyük olduğu görülmektedir. Azot ile elde edilen plazmada argon gazı ile elde edilen plazmaya göre tozu besleyecek torç ile çalışma parçası arasındaki mesafe daha büyüktür. Plazma torçlarında kullanılan azot gazı oksijenden uzak olmalıdır. Bunun nedeni ise zehirli olan azot oksitlerin oluşmasının önlenmesidir.

6.3.2. Hidrojen (H₂)

Hidrojen gazının ayrışması 2000 K dolaylarında başlar ve 6000 K’de tamamlanır. 25000 K sıcaklık değerinde hidrojen atomları tamamen iyonize olur. Hidrojenin ayrışması

azotun ayrışmasından daha düşük enerjide meydana gelmektedir. Hidrojen gazı diğer plazma gazlarıyla karşılaştırıldığında, ısı iletkenliğinin diğer gazların tümünden büyük olduğu görülmektedir. Hidrojen gazı kullanarak plazma torcu ile çalışma esnasında oksijenden uzak bir ortamın olması gerekmektedir. Bunun nedeni hidrojen ile oksijen karışımının patlayıcı bir etkiye sahip olmasıdır. Ayrıca, soğuk metalin yüzeyi üzerine plazma oluşumu için kullanılan hidrojen gazının çarpması sonucu su damlacıkları oluşmaktadır. Bu da plazma püskürtme ile kaplama esnasında istenmeyen bir durumdur.

6.3.3. Argon (Ar) ve Helyum (He)

Plazma püskürtme yöntemi ile kaplamada argon gazının plazma oluşumu için kullanılması üzerine birçok çalışma mevcuttur. Argon gazının iyonlaşma işlemi 9000 K sıcaklıkta başlamaktadır. İyonlaşma işlemi 22000 K sıcaklık değerlerine ulaşıldığında tamamlanmaktadır. Yukarıda belirtildiği üzere, ilk grup atomlarından argon ve helyumun entalpileri ikinci grup atomları olan azot ve hidrojen gazlarının entalpi değerlerinden oldukça düşüktür. Argon ve helyum gazları ile plazma ışınının oluşturulmasında düşük çalışma voltajı kullanılmaktadır. Ayrıca bu gazlarda kararlı elektrik ark sağlanır ve plazma durumunda transferleri kolaydır. Ar ve He gazları ile oluşturulan plazmanın sıcaklığı diğer gazlarla oluşturulan plazmanın sıcaklığından daha yüksektir. Plazma ışınları ise daha parlaktır. Lokal olarak püskürtmeye olanak sağlamaktadır. Helyum gazının ısı iletkenliği çok iyidir. Fakat çok pahalı ve değerli bir gazdır.

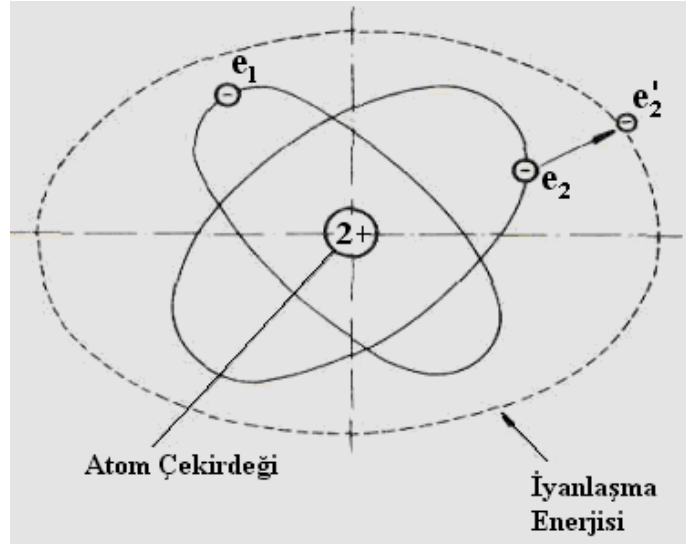
Plazma ışınının hızını ve entalpisini arttırmak için farklı oranlarda gaz karışımları kullanılmaktadır. Örneğin püskürtülmüş malzemenin ve ışının kinetik enerjisini arttırmak için argon ve azot gaz karışımının kullanılması uygundur. Azot gazının % 3 H₂ ile karıştırılması ile oluşan gaz karışımının plazma ışınının hızının artırılması amacı ile kullanımı uygundur. Plazma püskürtme ile kaplamalarda pasif (inert) bir gaz ortamının sağlanmasında genellikle argon ve hidrojen gaz karışımı kullanılmaktadır. Tablo 6.2’de Ar + N₂ ve Ar + H₂ gaz karışımlarının plazma ışını değerleri üzerine etkisi görülmektedir.

Tablo 6.2. Ar + N₂ ve Ar + H₂ gaz karışımlarının plazma ışını değerleri.

Özellikler	Plazma Gaz Karışımları	
	Ar + N ₂	Ar + H ₂
Argon İçeriği (%)	66	66
Toplam Akış Oranı (l/dak.)	35	35
Çalışma Akımı (A)	110	110
Çalışma Gerilimi (V)	40	65
Çıkış Gücü (kVA)	4.4	7.14

6.4. Plazma Işını

Plazma, iyonlarına ayrılmış, eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulunduran yoğunlaştırılmış bir gaz olarak tanımlanmıştır. Plazma arkında plazmanın elde edilmesi, kullanılan gazın iyonizasyonu ile gerçekleşmektedir. İyonizasyon işlemi, iki elektron ve bir atom ile Şekil 6.6’da açıklanmıştır.

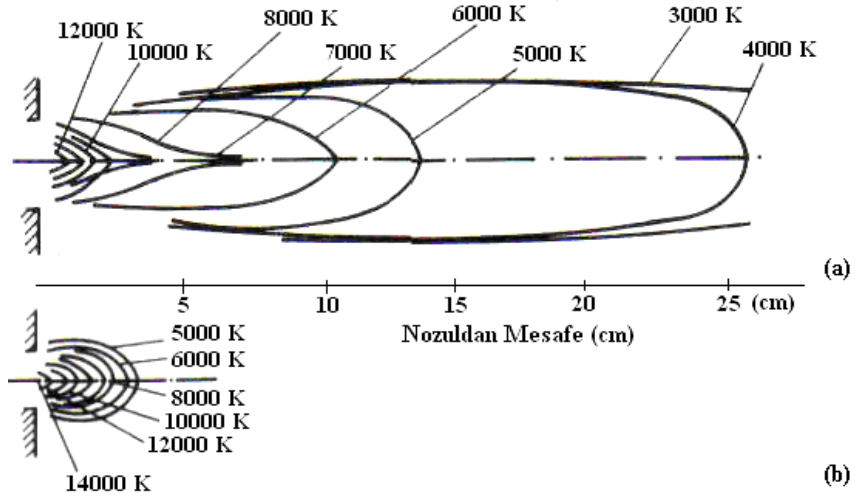


Şekil 6.6. İyonizasyon işleminin şematik gösterilişi.

+2 yüklü atom çekirdeği etrafında e_1 ve e_2 şeklinde iki elektron dönmektedir. Bu elektronlar E_1 ve E_2 enerjilerine sahiptir. Bu atom normal şartlarda yüksüz (nötr) durumdadır. Yeterli enerjiyi en küçük bir e_2 elektronu dış tarafa çıkmak için sağladığı anda Şekil 6.6’da görüldüğü gibi kendi yörüngesinden çıkar. Bu elektronun e_2' konumuna gelmesiyle atom iyonize olur (Matejka ve Benko, 1989).

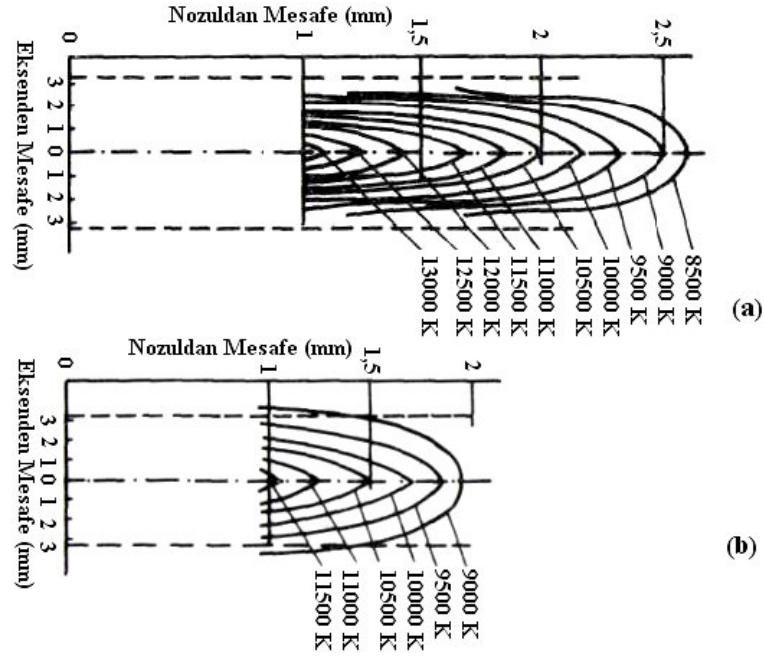
Plazma püskürtme sisteminde ise plazma ışınının elde edilmesi katot ve anot arasındaki ark ile başlamaktadır. Elektrik arkı plazma torcu içerisinde üretilir. Üreticinin (+) kutbunun bağlandığı iletken anot, (-) kutbunun bağlandığı iletken de katot adı verilir. Tungsten katot ve su ile soğutulması sağlanan bakır (Cu) anot arasında bir elektrik arkı meydana gelir. Bu meydana gelen ark sayesinde, genellikle plazma gazı olarak kullanılan gazın iyonize olması için gerekli enerji sağlanmaktadır. Gazlar elektrik ark vasıtasıyla iyonize olur (Bolelli ve diğ., 2006; Xiong ve diğ., 2004). Plazma gazının bu şekilde iyonize olması ile “plazma” elde edilir. Plazma ışınının hızı çıkış ağzında ses hızından çok daha hızlıdır ve plazma arkının merkezinde sıcaklık 15000 K değerine kadar ulaşır.

Plazma tabancasından çıkan plazma ışının sıcaklığı ve hızı bu ışının en önemli özellikleridir. Plazma ışınının sıcaklığı plazma püskürtmede kullanılan kaplama parametrelerine ve kullanılan gaza bağlı olarak değişim göstermektedir. Plazma ışınının tipik sıcaklık dağılımı Şekil 6.7’de verilmiştir.



Şekil 6.7. Plazma ışınının sıcaklık dağılımı (Matejka, 1989).

Plazma sıcaklığı merkezde 30000 K değerinden, 5000 K değerine uzanan bir sıcaklık dağılımı sergilemektedir. Şekil 6.7a’da gaz akış oranının 4,5 l/dak., nozul çapının 6 mm olduğu koşullardaki katmanlı (laminer) argon plazma ışını, Şekil 6.7b’de ise aynı şartlardaki çalkantılı (türbülanslı) argon plazma ışını görülmektedir. Katmanlı akışta sıcak gaz ışını ile havanın karışarak çalkantı oluşturması gerçekleşmediğinden, çok uzun sıcaklık izotermi elde edilmekte ve bu sıcaklık dağılımı önerilmektedir. Ayrıca kullanılan gazların plazma ışınının sıcaklık dağılımı olan etkisi de Şekil 6.8’de görülmektedir.



Şekil 6.8. Argon ve azot gazı kullanılarak elde edilen plazma ışının sıcaklık dağılımı (Matejka, 1989).

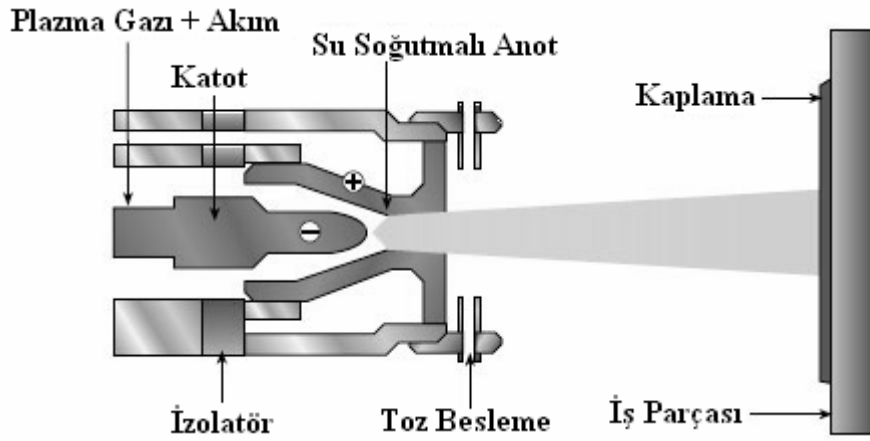
Şekil 6.8’de görülen sıcaklık dağılımlarındaki farklılık bir ve iki atomlu gazların farklı özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Argon ve azot gazlarındaki bu farklılık merkezdeki sıcaklıkta 1500 K değerinde bir oynamaya sebep olmaktadır. Ayrıca nozulun çıkışından itibaren sıcaklığın 10000 K civarlarında istenildiği bölge, 2 mm ve 2,5 mm mesafelerde değişmektedir. Kullanılan plazma gazının plazma ışınının sıcaklığı üzerine etkisi çeşitli şartlar için Tablo 6.3’te verilmiştir (Matejka ve Benko, 1989).

Tablo 6.3. Argon ve azot plazmasının en yüksek ve en düşük sıcaklıkları (Matejka ve Benko, 1989).

Çıkış Gücü (kW)	Sıcaklık (K)	Gaz Akış Oranı					
		15 l/dak.		30 l/dak.		60 l/dak.	
		Argon	Azot	Argon	Azot	Argon	Azot
5	T max.	11400	-	11750	-	12000	-
	T min.	8850	-	5600	-	3000	-
10	T max.	-	10900	12700	11040	13000	10540
	T min.	10750	7100	9600	6250	6600	5550
15	T max.	-	12370	14500	11990	14400	12180
	T min.	12000	7550	11000	6700	8750	5950
20	T max.	-	13830	-	14790	-	13100
	T min.	-	8250	-	7100	-	6200

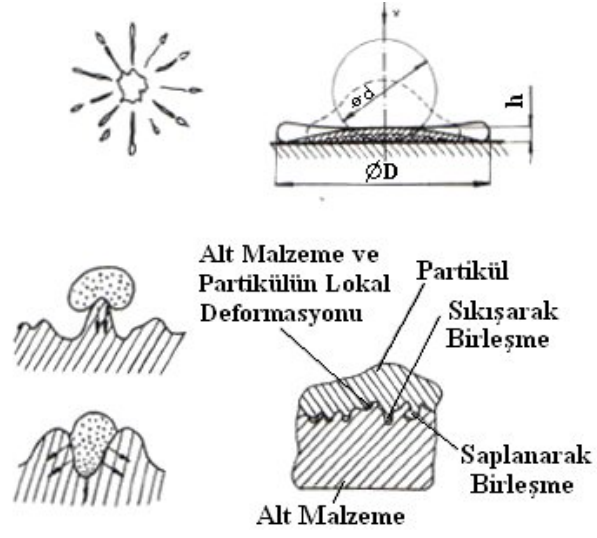
6.5. Alt Malzeme Yüzeyine Tozun Kaplanması

Plazma püskürtme sisteminde katot ve anot arasındaki ark ile $Ar + H_2$ gazının iyonize olması sonucu elde edilen plazma ışınının çok yüksek sıcaklık değerlerine ulaştığını belirtilmişti. Bu sıcaklık değerine ulaşan plazma, basıncın da etkisi ile alt malzeme yüzeyine doğru itilir. Plazma torcu sayesinde kaplanacak olan toz malzeme, plazma ışını içerisine gönderilerek yüksek sıcaklıkta ergimesi sağlanır ve kaplanacak olan alt malzeme yüzeyine püskürtülür. Püskürtme esnasında tozların hızı yaklaşık 300 ile 550 m/s arasındadır. Taneciklerin ulaşmış olduğu yüksek sıcaklık ve hız sayesinde, yüksek yoğunlukta alt malzemeye tutunan yüksek dayanımlı kaplamalar elde edilebilmektedir. Plazma püskürtme işleminin şematik olarak gösterilişi Şekil 6.9’da verilmiştir.



Şekil 6.9. Plazma püskürtme işleminin şematik olarak gösterilişi (Tucker, 1994).

Plazma püskürtme sisteminde kaplama kalınlıkları genellikle 0.05 ile 0.50 mm (0.002 ile 0.020 inç) arasında, kaplamaların dayanımları da 34 MPa (5000 psi) ile 69 MPa (10.000 psi) arasında değişmektedir (Tucker, 1994). Ergimiş damlaların büyük miktarı alt malzeme yüzeyine çarparak yassılaşır ve hızlı bir şekilde katılaşarak ($\approx 10^6$ K/s) katmanlı tabaka şeklinde bir yapı halini alır (Şekil 6.10). Kaplama tabakası birçok katmanlı yapıdan meydana gelmektedir (Zhang ve diğ., 2001). Bu özel yapıda katmanlı tabakalar arası ara yüzeyde zayıf bir bağlanma meydana gelmektedir. Tabakalar arası boşluklar ve ara yüzeyde meydana gelen çatlamlar, kaplama tabakasında çoğu kez ortaya çıkabilmektedir (Bolelli ve diğ., 2006).



Şekil 6.10. Alt malzeme yüzeyine tozun çarpıp yassılaşması.

7. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Modern teknolojiye malzemelerin fiziksel özellikleri, dış etkilere ve koroziv kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı, aşınmaya karşı yüzey özelliklerinin incelenmesi, hemen her uygulama için çok büyük önem taşımaktadır. Bu özellikleri kazandırmak amacı ile malzemelerin dış yüzeylerine çeşitli yüzey işlemleri uygulanmaktadır (Tusek, 2003). Bu yüzey işlemlerinin içerisinde yer alan ısıl püskürtme, yüzeylerin aşınma ve korozyona karşı korunmasında endüstride kaplama amaçlı geniş bir kullanım alanı bulmuş bir yöntemdir (Kahraman ve diğ., 2005; Mishra ve diğ., 2005; McGrann ve diğ., 1998).

Bakır alaşımları, genelde pahalı alaşımlar olmalarına karşın, bakırın yüksek elektrik ve ısıl iletkenliği gibi bazı cazip edici özelliklerinden dolayı bu metal yaygın olarak kullanılır. Alüminyum bronzları; oldukça iyi bir aşınma ve korozyon özelliği göstermeleri, yeterli derecede ve kolay işlenebilir olmaları ve bir alaşımdan istenen pek çok özelliğe aynı anda sahip olması nedeni ile tercih edilmektedir (Yıldırım ve diğ., 2001a,b). Mevcut literatürde alüminyum alaşımı ve bazı bronzların yüzeylerinin kaplanması konusunda gerçekleştirilmiş bazı çalışmalar bulunmaktadır (Riccardi ve diğ., 2006; Sobolev ve diğ., 1999; Arslan ve Kalemtaş, 2009; Khan ve Qureshi, 2009). AA2024 serisi alüminyum alaşımında ve alüminyum bronzunda gerçekleştirilmiş kaplama çalışmaları çok daha sınırlıdır (Sorrentino ve diğ., 2009; Collazo ve diğ., 2008; Xiaodong ve Xianming, 2008).

Riccardi ve arkadaşları (2006) yaptıkları çalışmada, düşük basınçlı plazma sprey tekniği ile Cu-Cr-Zr alaşımı alt malzeme yüzeyine kalın W kaplamalar gerçekleştirmişlerdir. Ara yüzey tabakası kullanılarak gerçekleştirilen kaplamalarda araştırmacılar; Al-Si, Ni-Al ve W karışı tozlarını kullanmışlardır. Kaplama için alt malzemenin optimum sıcaklığını tespit ederek, farklı püskürtme basınçları ile farklı kalınlıklardaki tabakaların ısıl iletkenlik, ısıl genleşme ve sertlik değerlerini incelemişlerdir. Yüksek kalınlık ve yoğunluğa sahip W kaplamalarda istenilen ısıl özellikler elde edilirken, numunelerde mekanik özelliklerin zayıf olduğunu tespit etmişlerdir.

Sobolev ve arkadaşları (1999) yaptıkları çalışmada, Cu alt malzeme yüzeyine HVOF püskürtme yöntemi kullanarak WC-Co tozu kaplamışlardır ve kaplama tabakasının matematiksel hesaplama yolu ile ısı transfer analizini çıkarmışlardır. Alt malzeme, ara yüzey ve kaplama tabakasındaki ergime ile katılaşmadaki ısıl reaksiyonları incelemişlerdir.

Xiaodong ve Xianming (2008) birlikte yaptıkları çalışmada; AA2024 alt malzeme yüzeyine sol-jel kaplama yöntemi kullanarak Si, C ve O ağırlıklı üç tip kaplama gerçekleştirmiş ve kaplama tabakasının SEM, EDS analizleri ile birlikte elektrokimyasal korozyon özelliklerini incelemişlerdir. AA2024 alüminyum alaşımı ile üç tip kaplama tabakasının % 3 NaCl

çözeltisine 2 saat süreyle daldırma işlemi sonrasındaki korozyon oranını karşılaştırdıklarında, korozyon etkilere dayanım açısından % 22 verim elde edildiğini tespit etmişlerdir.

Uozato ve arkadaşları (2003) yaptıkları çalışmada, AA383 alüminyum alaşımı yüzeyine atmosferik plazma püskürtme yöntemi ile Fe-C-Ni-Cr-Cu-V-B elementleri ile oluşturulan beş farklı tip toz karışımı kaplamışlardır. Kaplamanın mikroyapısı ile birlikte aşınma ve korozyon testleri uygulamışlardır. Korozyon testi sonucunda Ni miktarının artmasıyla, korozyon direncinin arttığını tespit etmişlerdir. Ni miktarındaki artış ile aşınma direnci azalmıştır. Bu araştırmacılar, molibden içerikli Fe-% 3 C tozu ile kaplanan numunenin en iyi aşınma direnci gösterdiğini tespit etmişlerdir.

Sarıkaya ve arkadaşları (2004), Al-% 12 Si ana malzemesi üzerine plazma püskürtme yöntemiyle Al-Si+B₄C kaplamalar hazırlamışlardır. Bu amaçla % 0-5-10-15-20-25 oranlarında B₄C içeren Al-Si alaşım tozunu, ana malzeme üzerine püskürtmüşlerdir. Optik mikroskop incelemeleri ile partiküllerin kaplama tabakası içerisinde homojen olarak dağıldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca takviye partikül oranının artmasıyla kaplama tabakasının mikrosertlik değerlerinin doğrusal bir artış gösterdiğini görmüşlerdir. WC-Co aşındırıcı bilye ile yapılan kuru kayma aşınma deneylerinde, en yüksek aşınma direncine % 20 B₄C içeren kaplama tabakalarında rastlamışlardır.

Habib ve arkadaşları (2006), alevle püskürtme yöntemi kullanarak paslanmaz çelik alt malzeme yüzeyine Al₂O₃ + TiO₂ tozlarını kaplamamışlar ve kaplama tabakasının sertlik, kırılma tokluğu ve aşınma direnci gibi özelliklerini araştırmışlardır. % 3, 13, 40 TiO₂ ilave edilen numunelerin incelemesi sonucunda; γ - Al₂O₃, α - Al₂O₃, TiO₂ ve Al₂TiO₅ bileşiklerinin oluştuğunu tespit etmişlerdir. TiO₂ miktarının artmasıyla sertliğin düştüğünü ve aşınma direncinin arttığını belirlemişlerdir.

Yılmaz ve arkadaşları (2007), AISI 304L paslanmaz çelik alt malzeme yüzeyine plazma püskürtme tekniği kullanarak Al₂O₃ + TiO₂ (Al₂O₃ – % 13 TiO₂, Al₂O₃ – % 40 TiO₂ ve Al₂O₃ – % 50 TiO₂) toz karışımları kaplamışlar ve mekanik özellikler üzerine TiO₂ ilave oranının etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarının incelenmesinde TiO₂ miktarının artmasıyla kırılma tokluğunun geliştiği ve sertliğin ise düştüğünü tespit etmişlerdir. Ayrıca kaplama tabakalarında γ - Al₂O₃, α - Al₂O₃, TiO₂ ve Al₂TiO₅ bileşiklerinin oluştuğunu tespit etmişlerdir.

Shanmugavelayutham ve arkadaşları (2006), paslanmaz çelik altlık malzemesi üzerine gaz tünel tip plazma püskürtme yöntemi ile ZrO₂ + Al₂O₃ tozlarını kaplamışlardır. Farklı oranlarda ilave edilen (% 20, 50, 80, 100) Al₂O₃ tozunun kaplama tabakasının özellikleri üzerine olan etkisini araştırmışlardır. Al₂O₃ oranının artmasıyla; gözenekliliğin azaldığını, sertlik arttığını ve yapışma dayanımının azaldığını tespit etmişlerdir. Kaplama tabakalarında γ - Al₂O₃ ve tetragonal-ZrO₂ bileşiklerini tespit etmişlerdir.

Saral ve arkadaşları (2008), Y_2O_3 stabilizeli ZrO_2 (YSZ) tozuna farklı oranlarda (% 0, 10, 20, 30, 50, 80 ve 100) Al_2O_3 ilave ederek paslanmaz çelik alt malzeme yüzeyine plazma püskürtme yöntemi kullanarak kaplamışlardır. METCO 3MB plazma püskürtme tabancası ile gerçekleştirilen kaplama tabakalarını 1000 ve 1200 °C'lik sıcaklıklarda, 5 dakika fırında ısıtma ve 2 dakika fırın dışında hava ile soğutma şeklinde bir çevrim, toplam 7 dakika olarak ısıl şok deneyine tabi tutmuşlardır. Yapılan termal şok testleri sonucunda Al_2O_3 ilavesi arttıkça; kaplamaların yüzey pürüzlülüğü değerleri ve termal şok dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir.

Kamal ve arkadaşları (2009), nikel esaslı süper alaşımlar (superni 75 ve superni 718) ve demir esaslı süper alaşım (superfer 800H) alt malzeme yüzeyine Cr_3C_2 -NiCr tozunu patlamalı püskürtme tekniği kullanarak kaplamışlardır. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin X-ray, FE-SEM/EDAX ve X-ray harita tekniği ile ergimiş tuz ($Na_2SO_4 + 25\% \text{ Ağ. } K_2SO_4$) ortamında 900 °C'de sıcak korozyon kinetiğini incelemişlerdir. İnceleme sonucunda $Cr_3C_2 - NiCr$ ile kaplanmış numunelerin, kaplanmamış süper alaşımlardan daha iyi sıcak korozyon direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Yukarıda verilen örneklerden de görüleceği gibi, bugüne kadar bu çalışmadakine benzer malzemelerin benzer koşullarda kaplanmasını inceleyen bir çalışma yapılmamıştır.

8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, plazma püskürtme yöntemi kullanılarak alüminyum alaşımı ve alüminyum bronzu yüzeyine kaplama işlemi yapılmıştır.

Alüminyum alaşımı olarak % 4-5 Cu içeren alüminyum alaşımı (AA2024-T4 serisi) kullanılmıştır. AA2024-T4 serisi alaşım yüzeyine;

a) Al_2O_3 ve Al_2O_3 içerisine farklı yüzdelerde ilave edilen TiO_2 tozları ile elde edilen oksit toz karışımlarının kaplanması,

b) Saf Al tozu içerisine % 5 Cu ilave edilerek karıştırılan Al + % 5 Cu toz karışımına farklı oranlarda bor karbür (B_4C) ilavesi ile elde edilen karbür toz karışımlarının kaplanması amaçlanmıştır.

Alüminyum bronzu olarak, içerisinde % 5 Al bulunduran bakır alaşımı kullanılmıştır. Alüminyum bronzu yüzeyine;

a) İtiryum oksit ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit ($ZrO_2+Y_2O_3$) tozunun kaplanması,

b) $ZrO_2+Y_2O_3$ tozu içerisine farklı yüzdelerde ilave edilen Al_2O_3 tozları ile elde edilen oksit toz karışımlarının kaplanması,

c) Saf Cu tozu içerisine % 5 Al ilave edilerek elde edilen Cu + % 5 Al toz karışımına farklı oranlarda krom karbür (Cr_3C_2) ilavesi ile sağlanan karbür toz karışımlarının kaplanması amaçlanmıştır.

Bu kaplamalar ile yüzeyde sert ve ısı bariyer özellikli kaplama tabakaları elde edilmiştir. Kaplamalar gerçekleştirildikten sonra kaplama tabakasının özelliklerinin incelenmesinde, yüzey pürüzlülüğü, dilatometrik ölçümler (boyca uzama ölçümleri), mikrosertlik ölçümleri, X-ışını analizleri, çekme mukavemet hesapları, optik mikroskop incelemeleri, SEM incelemeleri ve EDS analizleri gibi çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir.

8.1. Alt Malzeme Olarak Kullanılan Alüminyum Alaşımı ve Bronzu

Alüminyum alaşımı olarak kullanılan 2XXX serisi alaşım olan AA2024 alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 8.1’de verilmiştir. AA2024 alaşımı standart ve T4 ısıtılı işlemli olarak Ankara’da Ostim Sanayi Bölgesi’nden temin edilmiştir.

Alüminyum bronz alaşımı olarak % 5 Al ihtiva eden bakır alaşımı kullanılmıştır. Alüminyum bronz alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 8.1’de verilmiştir. Bronz malzeme de yine Ostim Sanayi Bölgesi’nden hazır döküm alaşımı olarak temin edilmiştir.

Tablo 8.1. AA2024 Alüminyum alaşımları ve alüminyum bronzunun kimyasal bileşimi.

Alaşımlar Elementleri	Cu	Mg	Fe	Ni	Zn	Si	Mn	Al
AA2024	3,8-4,9	1,2-1,8	0,5	-	0,25	0,5	0,3-0,9	Kalan
Cu Alaşımı	Kalan	-	2	2	-	-	-	5

8.2. Kaplamada Kullanılan Tozlar ve Karışım Oranları

8.2.1. Alüminyum alaşımı (AA2024-T4) alt malzeme yüzeyine kaplanan tozlar ve karışım oranları

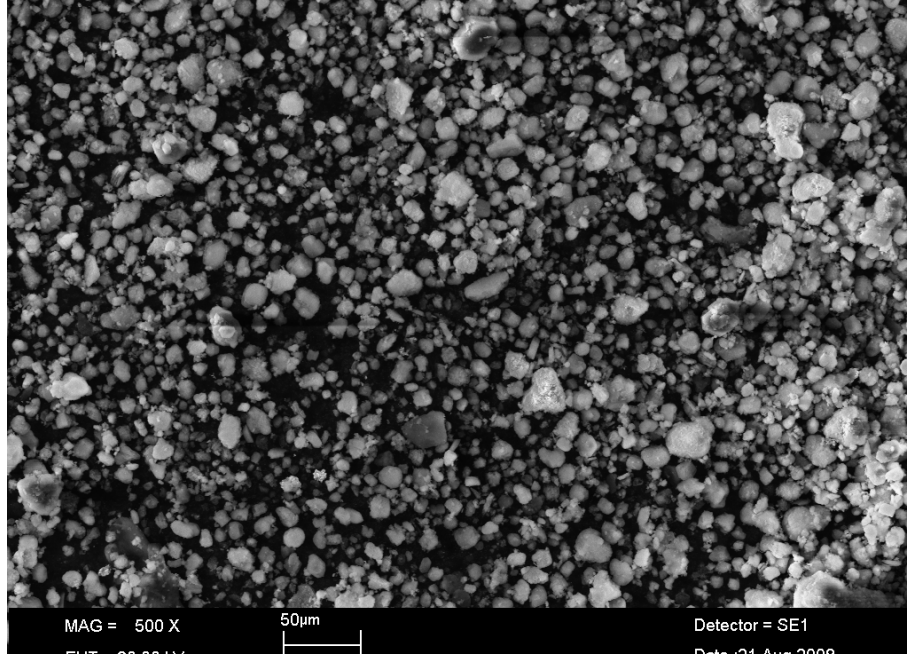
Alüminyum alaşımı (AA2024-T4) yüzeyine Al_2O_3 ve $Al_2O_3 + TiO_2$ oksit tozları ile Al + Cu içerisine farklı yüzdelerde karıştırılan B_4C karbür tozları kaplanmıştır. Al_2O_3 ve $Al_2O_3 + TiO_2$ tozları Sulzer Metco Firması tarafından üretilen standart tozlardır. Kaplanan bu oksit tozlarının karışım yüzdeleri, standart numaraları ve toz ebatları Tablo 8.2’de bir araya getirilmiştir. Al_2O_3 tozuna ait SEM fotoğrafı Şekil 8.1’de verilmiştir.

Tablo 8.2. Al_2O_3 ve $Al_2O_3 + TiO_2$ tozunun özellikleri ve karışım oranları.

Numune No	Kaplanacak Toz	Al_2O_3	TiO_2	Sulzer Metco Kodu	Toz Ebatı (μm)
A1	Al_2O_3	100	-	105NS	-45 +15
A2	$Al_2O_3 + \%3 TiO_2$	97	3	101NS	-45 +11
A3	$Al_2O_3 + \%13 TiO_2$	87	13	130	-53 +15
A4	$Al_2O_3 + \%40 TiO_2$	60	40	131VF	-45 +5

NS: Uluslararası deniz kuvvetleri standartı (Navy Standart)

VF: Çok ince (Very Fine)



Şekil 8.1. Al_2O_3 tozuna ait SEM fotoğrafı.

Alüminyum alaşımı (AA2024-T4) yüzeyine karbür tozu kaplanması için; Al + Cu toz karışımı, saf Al tozu içerisine saf % 5 Cu tozu ilave edilerek elde edilmiştir. Daha sonra, elde edilen Al + Cu toz karışımına farklı oranlarda B_4C tozu katılmıştır. Farklı oranlarda Al + % 5 Cu toz karışımı içerisine katılıp mekanik olarak karıştırılan B_4C tozunun karışım oranları Tablo 8.3’de gösterilmiştir. Karıştırma işlemi toz karıştırma cihazında 45 devir/dak.’da 45 dak. süreyle gerçekleştirilmiştir. Özel bir firması aracılığıyla yurt dışından getirtilen (Alfa Aesar) B_4C tozunun kimyasal bileşimi Tablo 8.4’te, fiziksel ve kimyasal özellikleri de Tablo 8.5’de verilmiştir. B_4C tozuna ait SEM fotoğrafı da Şekil 8.2’de verilmiştir.

Tablo 8.3. Al + %5 Cu ve B_4C tozunun karışım oranları.

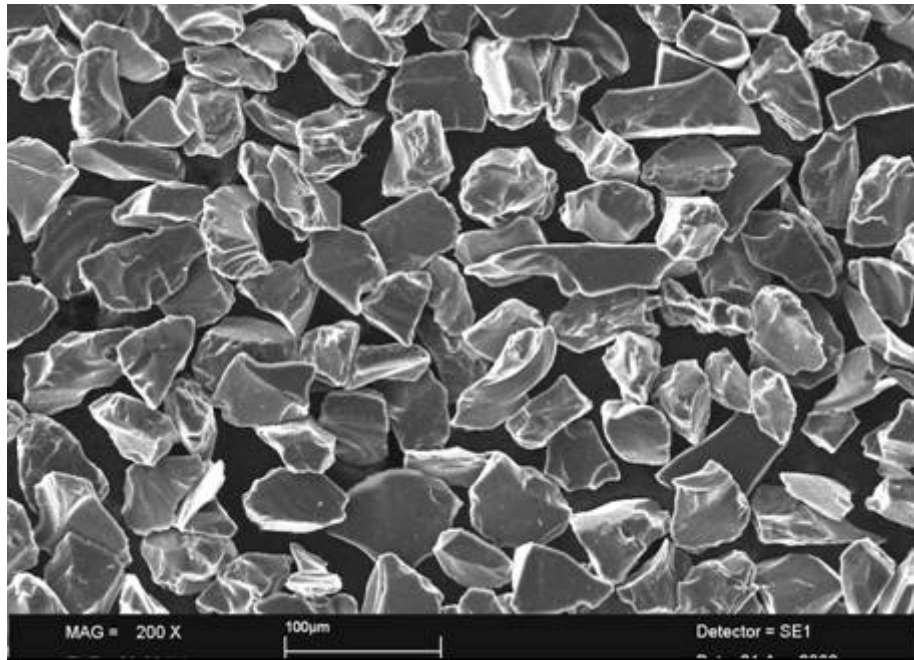
Numune No	Kaplanacak Tozlar	Al+%5Cu	B_4C
B1	Al + % 5 Cu	100	-
B2	Al + % 5 Cu + % 5 B_4C	95	5
B3	Al + % 5 Cu + % 10 B_4C	90	10
B4	Al + % 5 Cu + % 20 B_4C	80	20

Tablo 8.4. B_4C tozunun kimyasal bileşimi.

Alaşım Elementleri	B	C	B_2O_3	Fe	O	N	Si
B_4C	> 76	> 19.5	< 0.6	< 0.2	< 1	< 1	< 0.15

Tablo 8.5. B₄C tozunun fiziksel ve kimyasal özellikleri.

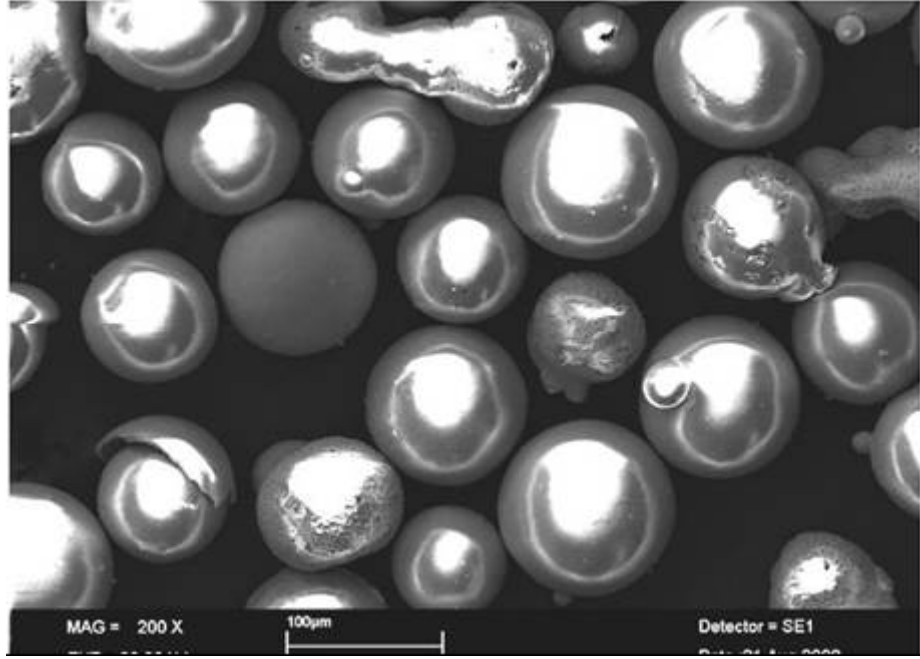
Formülü	B ₄ C
Yoğunluğu (g/cm ³)	2.52
Toz tane boyutu (mikron)	22-59
Ergime Sıcaklığı (°C)	2350
Kaynama Sıcaklığı (°C)	> 2500
Sertlik (Knoop)	2900
Elastik Modülü (GPa)	360-460
Isıl Genleşme Katsayısı (°C ⁻¹)	5.73x10 ⁻⁶



Şekil 8.2. B₄C tozuna ait SEM fotoğrafı.

8.2.2. Alüminyum bronz (Cu alaşımı) alt malzeme yüzeyine kaplanan tozlar ve karışım oranları

Alüminyum bronz (Cu alaşımı) yüzeyine % 8 Y₂O₃ ile stabilize edilmiş ZrO₂ (ZrO₂ + % 8 Y₂O₃) tozu ve ZrO₂ + % 8 Y₂O₃ tozu içerisine farklı yüzdelerde ilave edilmiş Al₂O₃ oksit toz karışımları kaplanmıştır. ZrO₂+ % 8 Y₂O₃ tozu, Sulzer Metco Firması tarafından üretilen standart bir tozdur. Bu toz 204 NS standardı ile 120 - 11 mikron boyutlarındadır ve Şekil 8.3'te SEM fotoğrafı verilmiştir. Al₂O₃ tozu % 99,98 saflığa sahip ve 44 mikron iriliğe sahiptir. Farklı yüzdelerde ZrO₂ + % 8 Y₂O₃ tozu içerisine katılarak mekanik olarak karıştırılan Al₂O₃ tozunun karışım oranları Tablo 8.6'da verilmiştir. Karıştırma işlemi toz karıştırma aparatında 45 devir/dak.'da 45 dak. süreyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.3. $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3$ tozunun SEM fotoğrafı.

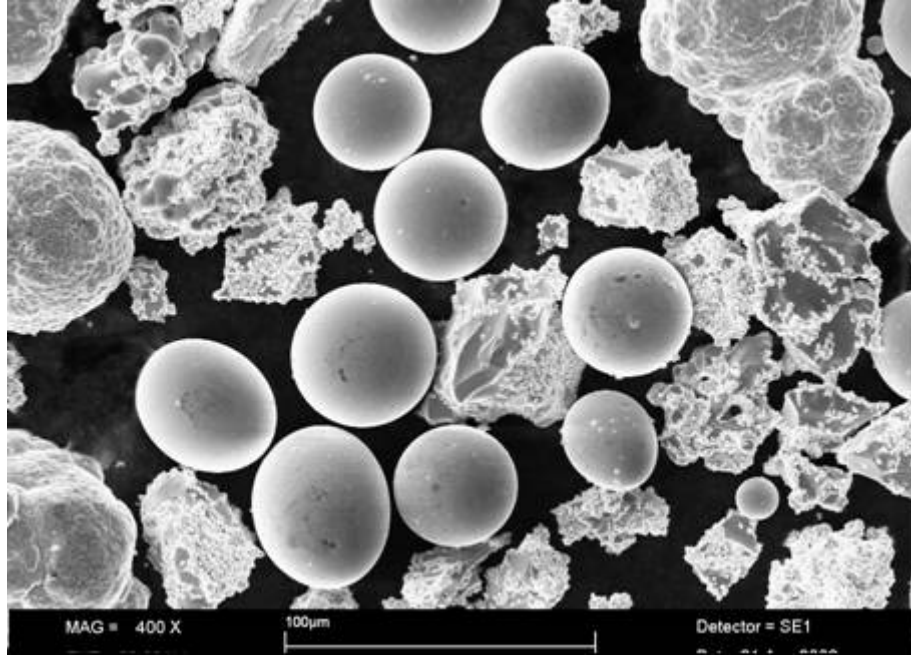
Tablo 8.6. $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3$ tozu ve Al_2O_3 tozunun karışım oranları.

Numune No	Kaplanacak Tozlar	$\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3$	Al_2O_3
C1	$\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3$	100	-
C2	$\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3 + \% 5 \text{ Al}_2\text{O}_3$	95	5
C3	$\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3 + \% 10 \text{ Al}_2\text{O}_3$	90	10
C4	$\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3 + \% 20 \text{ Al}_2\text{O}_3$	80	20

Alüminyum bronzu yüzeyine yapılacak olan karbür kaplamalar için öncelikle $\text{Cu} + \% 5 \text{ Al}$ toz karışımı hazırlanmıştır. Saf Cu içerisine $\% 5$ miktarda saf Al tozu katılarak toz karıştırma aparatı ile mekanik olarak karıştırılmıştır. Sulzer Metco Firması'na ait 430NS koduyla $\text{Cr}_3\text{C}_2 + \% 7 (\text{NiCr})$ karbür tozu ise Tablo 8.7'de verilen yüzdelerde $\text{Cu} + \text{Al}$ toz karışımı içerisine katılarak mekanik olarak karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi 45 devir/dak.'da 45 dak. süreyle gerçekleştirilmiştir. $\text{Cr}_3\text{C}_2 + \% 7 (\text{NiCr})$ karbür tozuna ait SEM fotoğrafı Şekil 8.4'te verilmiştir.

Tablo 8.7. Cu + % 5 Al tozu ve Cr₃C₂ tozunun karışım oranları.

Numune No	Kaplanacak Tozlar	Cu+%5 Al	Cr ₃ C ₂
D1	Cu + % 5 Al	100	-
D2	Cu + % 5 Al + % 5 Cr ₃ C ₂	95	5
D3	Cu + % 5 Al + % 10 Cr ₃ C ₂	90	10
D4	Cu + % 5 Al + % 20 Cr ₃ C ₂	80	20



Şekil 8.4. Cr₃C₂ + % 7 (NiCr) tozunun SEM fotoğrafı.

8.3. Kaplanacak Alt Malzemelerin Yüzeylerinin Pürüzlendirilmesi

Plazma püskürtme kaplaması uygulanacak malzemelerin yüzeyleri pürüzlendirme işlemine tabi tutulmuştur. Yüzey pürüzlendirme işlemi Şekil 8.5’te gösterilen cihazda yapılmıştır. İşlemde 60 grit’lik Al₂O₃ toz tanecikleri kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün en iyi şekilde elde edilmesi amacıyla, yüzey pürüzlendirme işlemi 90°’lik bir açı altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.5. Yüzey pürüzlendirme cihazı.

Kaplama yüzeyine iyi bir yapışmanın sağlanması için, öncelikle malzeme yüzeyinin yağ, pas ve kirden iyi bir şekilde arındırılmış olması lazımdır. Yağların yüzeyden uzaklaştırılması amacı ile, yağ çözücü kimyasal maddeler kullanılmıştır. Böylece, uygulanan pürüzlendirme işlemi ile kaplanacak malzemelerin yüzeyinde gerekli olan yüzey pürüzlülüğü sağlanmıştır.

8.4. Plazma Püskürtme Sisteminde Numunelerin Kaplanması

Numunelerin kaplama işlemi Türk Hava Yolları (THY) Teknik A.Ş. Revizyon Atölyeleri'nde ve Senkron Metal Firması bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemleri, Şekil 8.6'da verilen atmosferik plazma püskürtme sistemi kullanılarak yapılmıştır. Yüzeyi pürüzlendirilen numunelere atmosferik plazma püskürtme sistemiyle farklı oranlarda karıştırılan oksit ve karbür tozları, kaplanacak olan tozların üretici firmasının tespit etmiş olduğu en uygun parametreler kullanılarak kaplanmıştır. AA2024-T4 alüminyum alaşımı yüzeyine kaplanan Al_2O_3 ve $Al_2O_3 + \% TiO_2$ oksit tozlarına ait kaplama parametreleri Tablo 8.8'de, $Al + \% 5 Cu + \% B_4C$ metal/karbür toz karışımlarına ait kaplama parametreleri de Tablo 8.9'da verilmiştir.

Alüminyum bronzu yüzeyine kaplanan $ZrO_2 + \% 8 Y_2O_3$ ve $ZrO_2 + \% 8 Y_2O_3 + \% Al_2O_3$ oksit tozlarına ait kaplama parametreleri Tablo 8.10'da ve $Cu + \% 5 Al + \% Cr_3C_2$ karbür toz karışımlarına ait kaplama parametreleri Tablo 8.11'de verilmiştir. Kaplama esnasında çekme deneyi için hazırlanmış olan 25.4 mm (1 inch) çapındaki numuneler de her parametre için ayrı ayrı kaplanmıştır. Kapanacak numuneler ve çekme deney test kuponlarından örnek olarak Şekil 8.7'de verilen numuneler kullanılmıştır.



Şekil 8.6. Kaplama işleminin gerçekleştirildiği atmosferik plazma püskürtme sistemi.

Tablo 8.8. Al_2O_3 ve $\text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{TiO}_2$ oksit tozlarına ait kaplama parametreleri.

Değerler	105 NS Tozu	101NS Tozu	130 Tozu	131VF Tozu
Akım	500 A	500 A	500 A	550 A
Gerilim	65 V	65 V	70 V	75 V
Sprey Mesafesi	100 mm	100 mm	125 mm	90 mm
Plazma Gazı	80 l/dk Ar 15 l/dk H_2	80 l/dk Ar 15 l/dk H_2	80 l/dk Ar 15 l/dk H_2	100 l/dk Ar 15 l/dk H_2
Taşıyıcı Gaz	37 l/dk Ar	37 l/dk Ar	37 l/dk Ar	50 l/dk Ar
Nozul Çapı	7,8 mm	7,8 mm	7,8 mm	7,8 mm
Toz Besleme Oranı	48 g/dk.	54 g/dk.	38 g/dk.	24 g/dk.

Tablo 8.9. $\text{Al} + \text{Cu} + \% \text{B}_4\text{C}$ karbür karışımı tozlarına ait kaplama parametreleri.

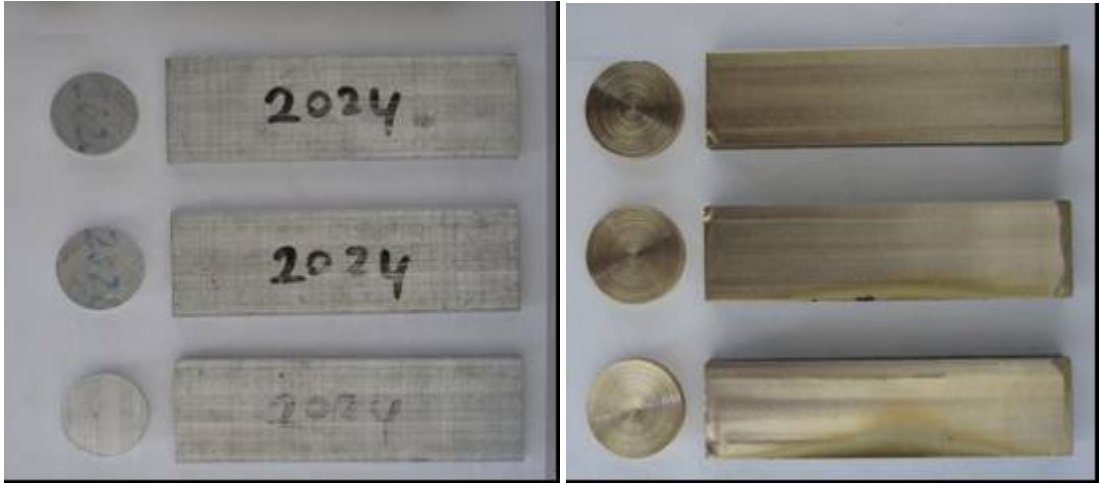
Değerler	$\text{Al} + \text{Cu} + \text{B}_4\text{C}$ Tozu
Akım	500 A
Gerilim	65 V
Sprey Mesafesi	125 mm
Plazma Gazı	150 l/dk Ar 10 l/dk H_2
Taşıyıcı Gaz	37 l/dk Ar
Nozul Çapı	7,8 mm
Toz Besleme Oranı	49 g/dk.

Tablo 8.10. $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{Y}_2\text{O}_3 + \% \text{Al}_2\text{O}_3$ oksit tozlarına ait kaplama parametreleri.

Değerler	$\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{Y}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ Tozu
Akım	600 A
Gerilim	70 V
Sprey Mesafesi	75 mm
Plazma Gazı	80 l/dk Ar 15 l/dk H_2
Taşıyıcı Gaz	37 l/dk Ar
Nozul Çapı	7,6 mm
Toz Besleme Oranı	45 g/dk.

Tablo 8.11. $\text{Cu} + \text{Al} + \% \text{Cr}_3\text{C}_2$ karbür karışımı tozlarına ait kaplama parametreleri.

Değerler	$\text{Cu} + \text{Al} + \text{Cr}_3\text{C}_2$ Tozu
Akım	400 A
Gerilim	70 V
Sprey Mesafesi	100 mm
Plazma Gazı	145 l/dk Ar 10 l/dk H_2
Taşıyıcı Gaz	37 l/dk Ar
Nozul Çapı	7,6 mm
Toz Besleme Oranı	53 g/dk.

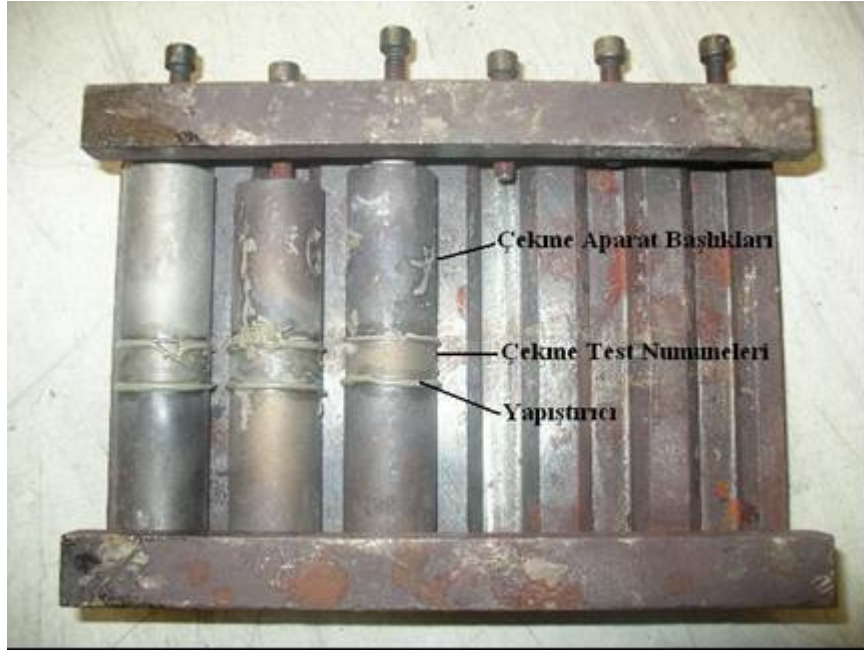


Şekil 8.7. Kaplanacak numuneler ve çekme deneyinde kullanılacak test kuponları.

8.5. Kaplanan Numunelere Uygulanan Mikrosertlik ve Çekme Testi

Kaplama sonrası numunelerin sertlik ölçümleri Future-Tech marka mikrosertlik cihazında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kaplama tabakalarından beş farklı bölgeden, 100 gf yük kullanılarak sertlik ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerin aritmetik ortalaması alınarak kaplama tabakasına ait mikrosertlik değeri Vickers (HV) cinsinden tespit edilmiştir.

Çekme deneyi için 25.4 mm (1 inch) çapında hazırlanarak kaplanan numuneler, çekme test aparatında kullanılan başlıklara, 3M firmasına ait Scotch-W tipi sıcakta sertleşen epoksi reçinesinden (epoxy) yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi kaplanan numunelerin hem alt kaplanmamış yüzeyine hem de kaplanmış üst yüzeyine, aynı dik eksende olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Yapıştırılan numuneler Şekil 8.8’de gösterilen aparat ile sıkıştırılarak fırınlanmaya hazır duruma getirilmiştir. Hazırlanan numuneler ısıtıl işlem fırınlarında (Şekil 8.9) 200 °C sıcaklıkta 2 saat bekletilerek yapıştırma işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 8.8. Numuneleri çekme aparatı başlıklarına yapıştırmak için kullanılan sıkıştırma aparatı.



Şekil 8.9. Çekme deney numuneleri için ısıtım fırını.

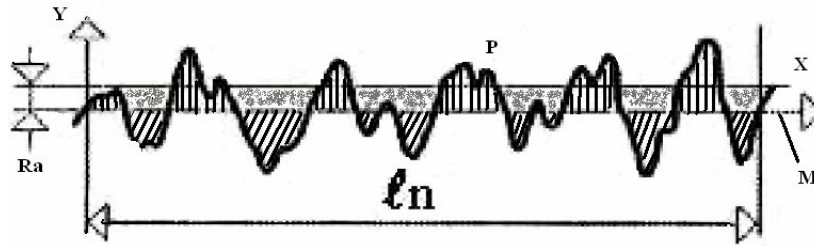
Yapıştırılan numuneler havada soğutulduktan sonra yapıştırma aparatından çıkartılarak, Dillon marka, 85 MPa kapasiteli çekme cihazında çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme deneyi sistemi Şekil 8.10’da verilmiştir.



Şekil 8.10. Dillon marka çekme cihazı.

8.6. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Yüzey pürüzlülüğünde ortalama yükseklik en önemli parametre olarak alınmaktadır. Pürüzlülük, yüzeye dik olan kesitte, belirli bir numune uzunluğu boyunca ölçülerek tespit edilmektedir. Yüzey pürüzlülük değerleri (R_a), Şekil 8.11’de gösterildiği gibi profil ortalama çizgisi esasına göre değerlendirilmiştir. R_a , M ortalama çizgisi ile etken profil altında kalan taralı alanın, örnek uzunluğa (l_n) bölünmesiyle elde edilen değerdir (Sarıkaya, 2003). Kaplama işlemi öncesi ve sonrası numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri Mitutoyo Surf-test-211 marka cihazla belirlenmiştir (Şekil 8.12).



Şekil 8.11. M sistemine göre yüzey pürüzlülük profili.



Şekil 8.12. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

8.7. Kaplanan Numunelere Uygulanan Isıl Genleşme Deneyi

Isıl püskürtme kaplamalarda alt malzeme ile kaplama malzemesinin ısıl genleşme katsayıları arasındaki farkın az olması, kaplama ve alt malzeme arasındaki uyumu o derece arttırmaktadır. Kaplama tabakasının alt malzemeye bağlanması kuvvetli olsa bile, kaplama tabakası ve alt malzeme arasındaki ısıl genleşme katsayılarındaki farklılık, kaplanan malzemenin ısısının yükseldiği durumlarda kaplama tabakasında büyük gerilmelere neden olmaktadır. Kaplama tabakasında meydana gelen bu ısıl gerilmeler çatlamalara sebebiyet

vermektedir. Bu çalışmada, ısı genleşme deneyi Setaram Labsys TMA marka dilatometre cihazında (Şekil 8.13) 10x10 mm ölçülerinde 1 mm kalınlığındaki kaplanmış olan numunelere uygulanmıştır. Isıl genleşme deneyleri 10g'lık yük altında, 10 °C/dak. ısıtma hızında ve 500 °C de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8.13. Isıl genleşme ölçümleri için dilatometre cihazı.

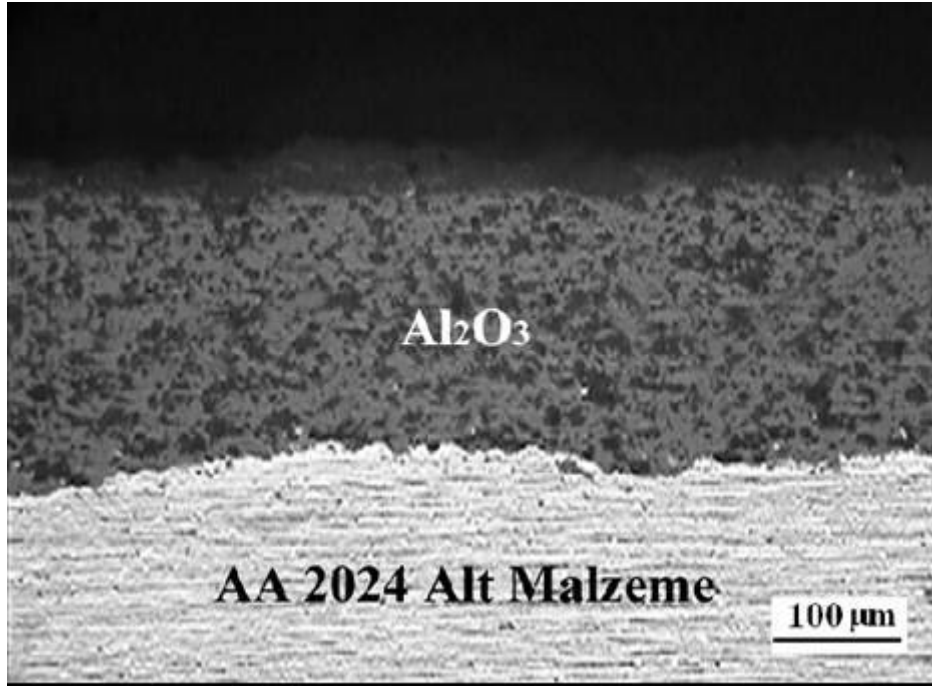
9. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

9.1. Alüminyum Alaşımı Yüzeyine (AA 2024-T4) Oksit Kaplama

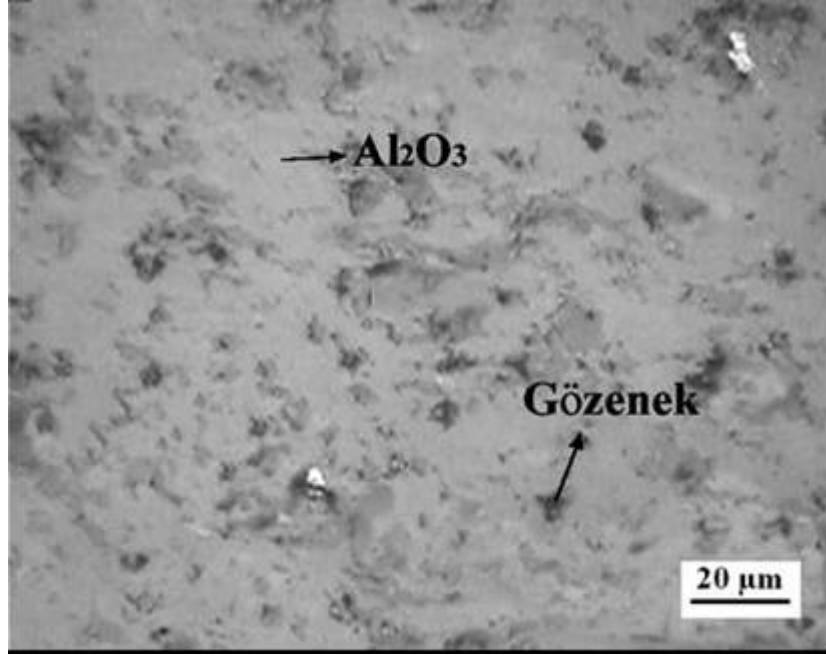
9.1.1. Mikroyapı İncelemesi

Alüminyum alaşımı (AA 2024-T4) yüzeyine Al_2O_3 ve $\text{Al}_2\text{O}_3 + \% 3 \text{ TiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \% 13 \text{ TiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \% 40 \text{ TiO}_2$ oksit tozlarının kaplanması atmosferik plazma püskürtme sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Alüminyum alaşımı yüzeyine yapılan plazma püskürtme kaplamalarda 200-250 μm arasında değişen tabaka kalınlıkları elde edilmiştir. Bu kaplama tabakalarının kalınlıklarındaki farklılık; kullanılan atmosferik plazma püskürtme sisteminin otomatik olmayıp, el kumandalı olmasından kaynaklanmaktadır. AA 2024 alüminyum alaşımı yüzeyine Al_2O_3 kaplanan A1 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.1’de verilmiştir.

Alüminyum numunesinin optik mikroyapı resimleri incelenirse; yapıda ısı püskürtme yöntemleri kullanıldığında, başka çalışmacıların araştırmalarında da belirttiği ve şekilden de görüleceği gibi, kaplama tabakasında gözenek oluşumu kaçınılmaz olmaktadır (Yılmaz ve diğ., 2007). Kaplama tabakasının bu şekilde gözenekli olarak bağlanması, yüzeye kaplama amacı ile verilen oksit bileşiklerinde süre azlığı nedeniyle, tam ergime ve sinterleşme sağlanamamasından ileri gelmektedir.



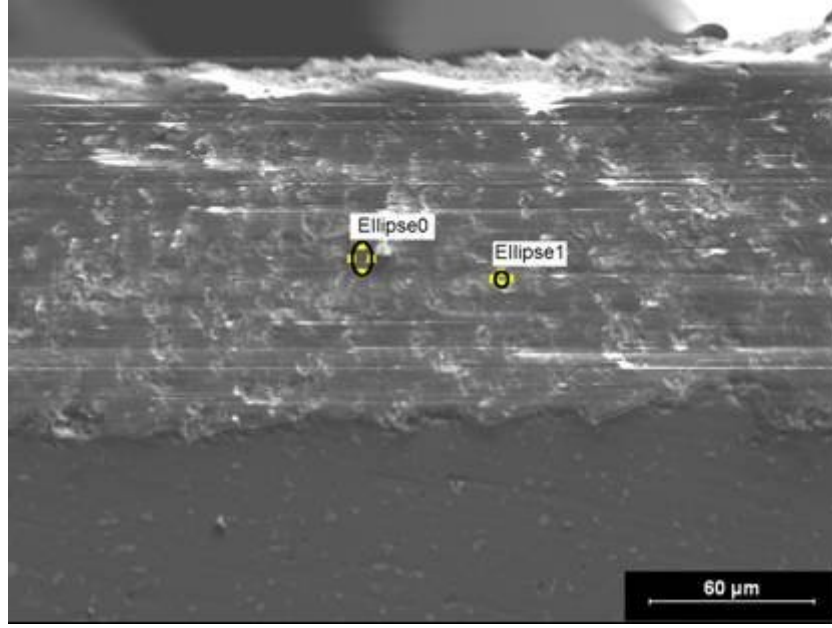
(a)



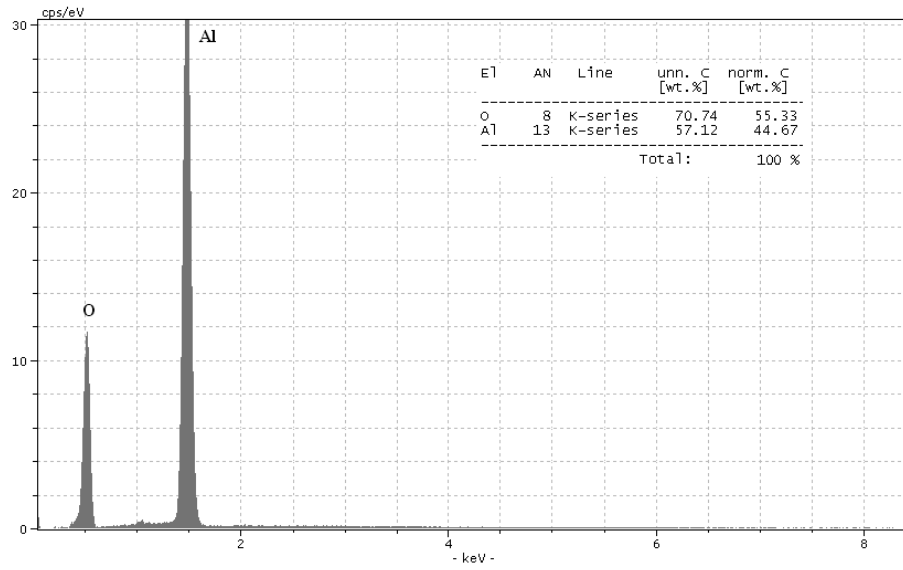
(b)

Şekil 9.1. Al numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kplama tabakası.

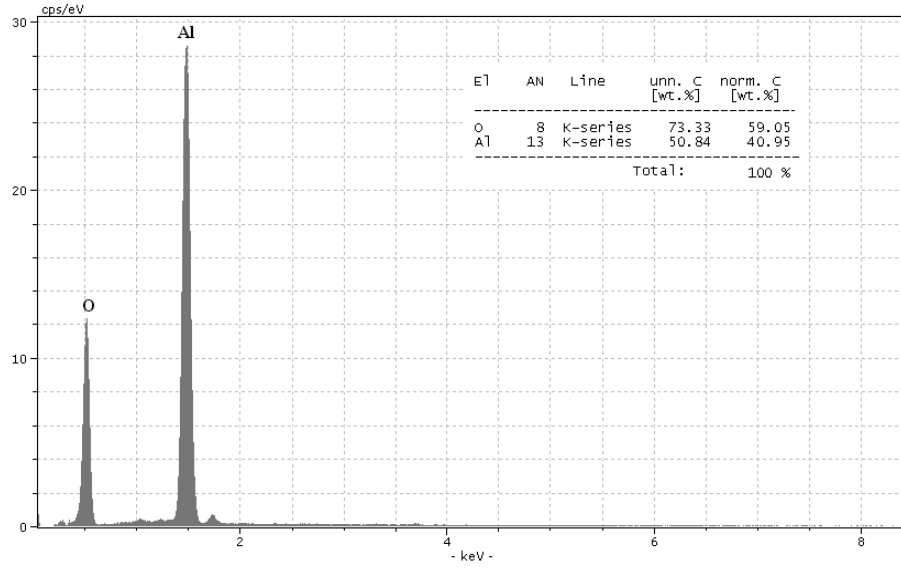
Şekil 9.2’de verilen SEM fotoğrafında, kaplama tabakasından alınan EDX analizlerinin yerleri görülmektedir. Şekil 9.3’te verilen EDX analizleri incelendiğinde, Al ve O elementlerinin her iki EDX bölgesinde de varlığı kolaylıkla anlaşılmaktadır. Şekil 9.4’de verilen XRD analize dayanılarak bu noktaların; kaplama amacı ile yüzeye ilave edilen alüminyum oksit (Al_2O_3) ile kaplanan sıcak haldeki alüminyumun çevre oksijeniyle birleşerek meydana getirdiği alüminyum oksit (Al_2O_3) bileşiğinden oluştuğu söylenebilir. Diğer yandan alınan XRD analizi (Şekil 9.4) oluşan alüminyum oksitlerin; yapıda γ , α , δ fazları şeklinde bulunduğunu göstermektedir.



Şekil 9.2. Al numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.

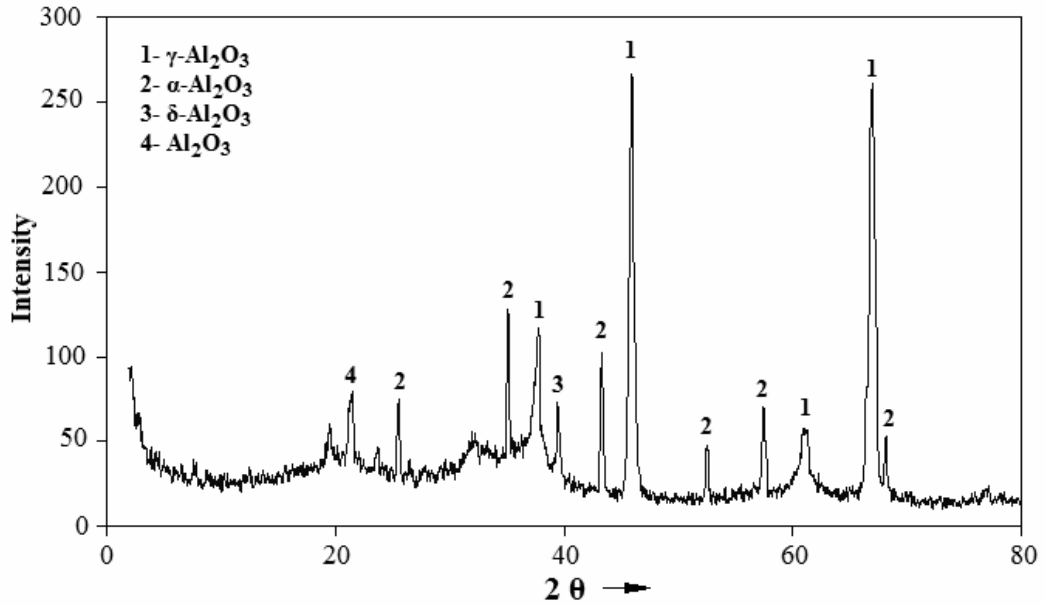


(a)



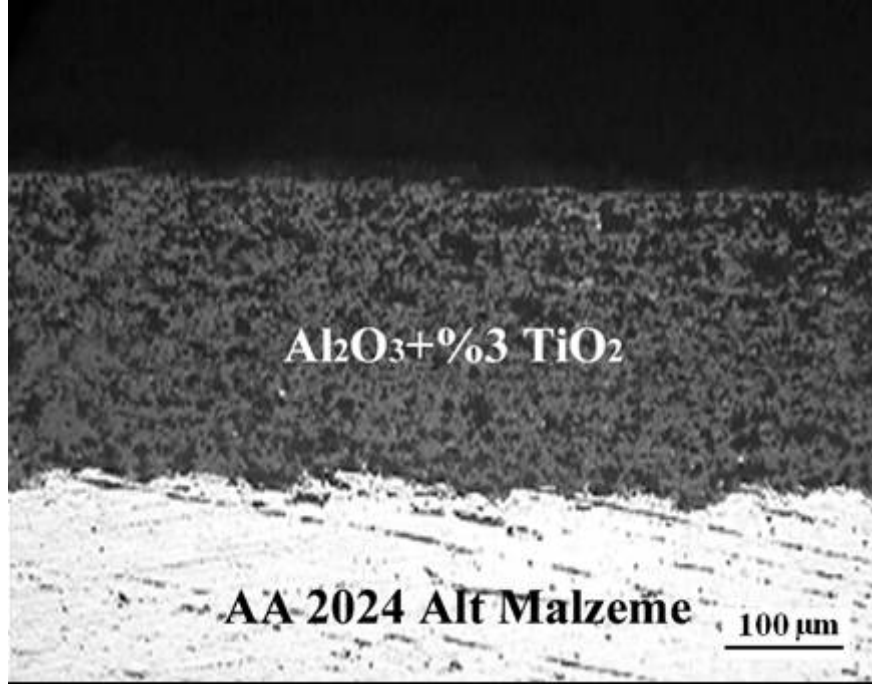
(b)

Şekil 9.3. A1 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri, a) 0 bölgesi, b) 1 bölgesi.

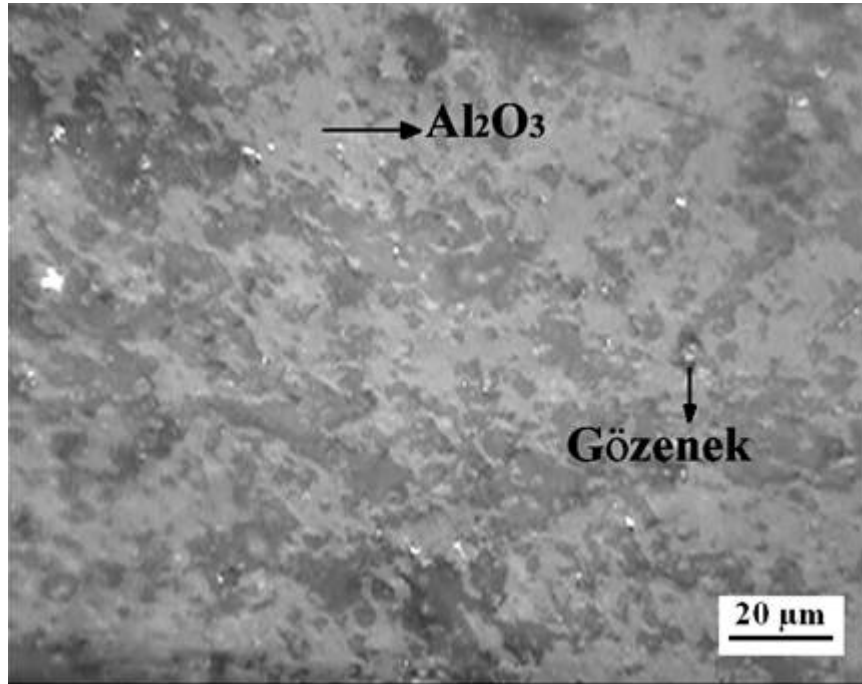


Şekil 9.4. A1 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

AA 2024 alüminyum alaşımı yüzeyine $\text{Al}_2\text{O}_3 + \% 3 \text{ TiO}_2$ kaplanan A2 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.5'te verilmiştir. A2 numunesinin optik mikroyapı resimleri incelendiğinde tabaka içerisinde yine, oksitlerin sinterlenmesinden ileri gelen, dikkate değer ölçüde kaplama tabakası içerisinde gözenekliliğin ve boşlukların varlığı dikkat çekmektedir. Ancak kaplanan malzemeye yakın olan bölgede, gözenek iriliğinde bir miktar azalma olmuştur.



(a)

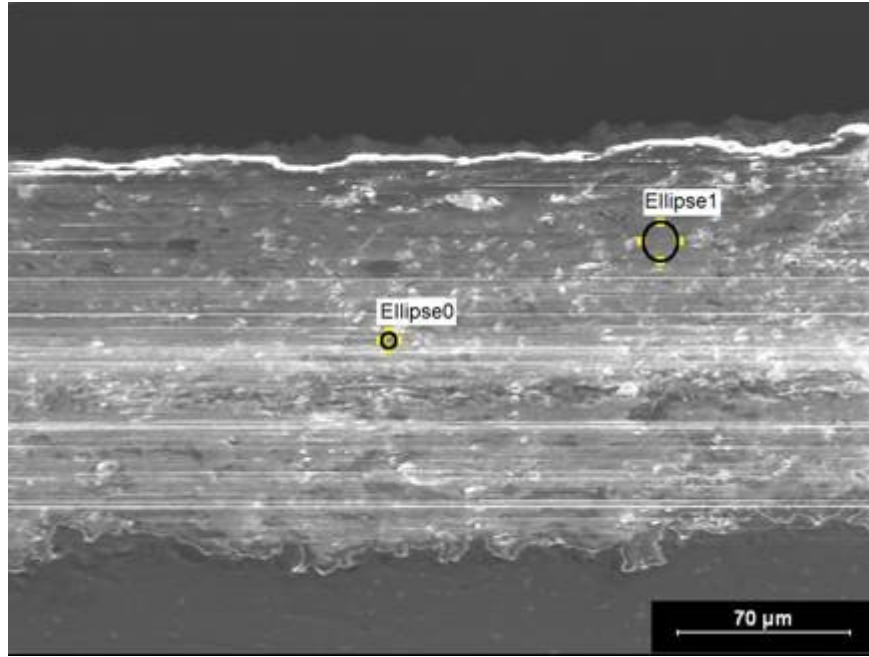


(b)

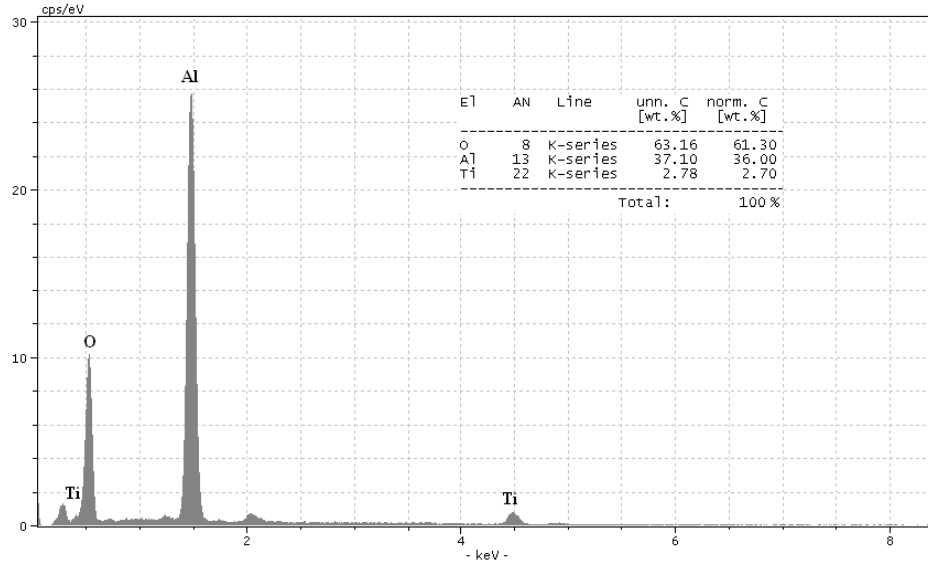
Şekil 9.5. A2 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kaplama tabakası.

Şekil 9.6’da verilen SEM fotoğrafında, kaplama tabakasından alınan EDX analizlerinin yerleri görülmektedir. Şekil 9.7’de verilen EDX analizleri incelendiğinde; EDX analizleri alınan her iki noktada da Al, Ti ve O elementlerinin varlığı görülmektedir. Şekil 9.7a’da verilen ve (0)

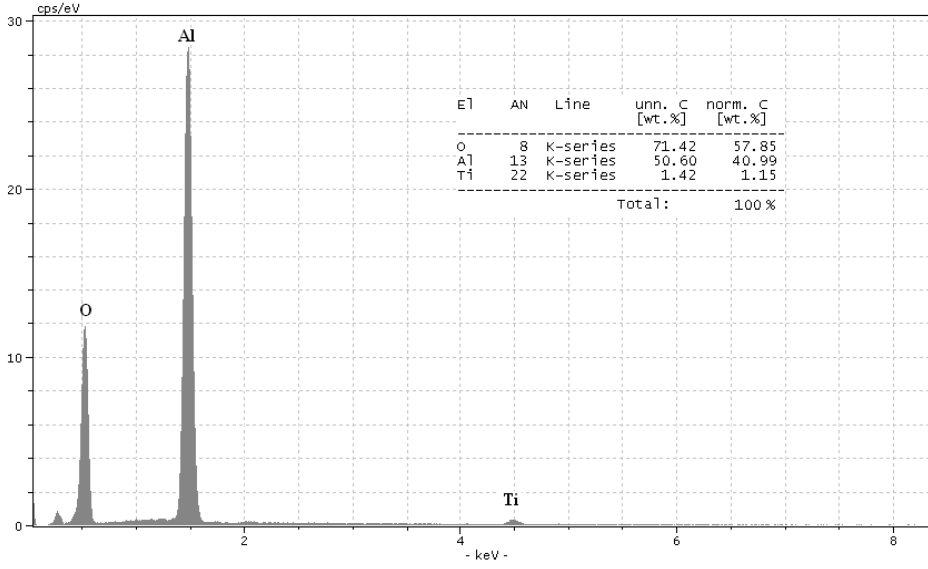
bölgesinden alınan EDX analizinde ilave edilen % 3 TiO_2 miktarı, % 2.70 Ti analiz değeri ile görülmekte ve bu da % 4.49 TiO_2 oranına denk gelmektedir. Şu halde bu noktada sinterlenme esnasında az oranda titanyum dioksit oluşumu söz konusu olmuştur. Diğer yandan % 36 olan Al oranı karşılığı, % 68,28 Al_2O_3 'ya karşılık gelmekte ve bu iki bileşiğin miktarları toplamı % 100'e ulaşmamaktadır. Buradan da, analize dahil edilmemiş olmasına karşın, analiz sonuçlarındaki oksijen fazlalığı göz önünde bulundurularak; AA2024 alaşımında bulunan bakır, magnezyum ve mangan elementlerinin de kaplama tabakası içerisinde oksitlerinin bulunabileceği sonucuna ulaşılmıştır. (1) bölgesinde de yine, yukarıdaki analizlerden; % 77,75 Al_2O_3 ve % 1,92 TiO_2 değerine ulaşılır ki, bu bölgede yine ana metal bünyesindeki diğer katkı metallerin oksitlerinin bulunduğu sonucu elde edilir. Her iki EDX analizinde de Al, Ti ve O elementlerinin bulunması, Şekil 9.8'de verilen XRD analize dayanılarak, bu noktalarda kaplama tabakasının Al_2O_3 ve TiO_2 bileşiklerinden oluştuğu doğrulanmaktadır. Diğer yandan her iki noktada da az oranda ana malzemeden kaplama tabakasına geçip oksitlenen Cu, Mn ve Mg metallerinin oluşturdukları CuO, Cu_2O , MnO ve MgO bileşiklerinin de oluştuğu düşünülmektedir.



Şekil 9.6. A2 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.

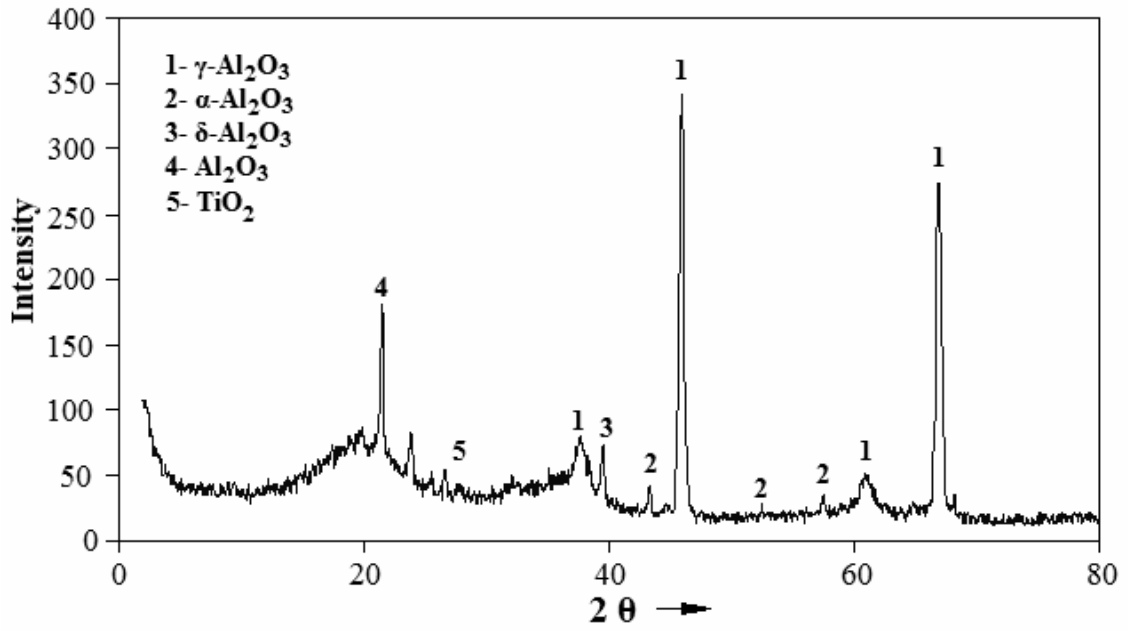


(a)



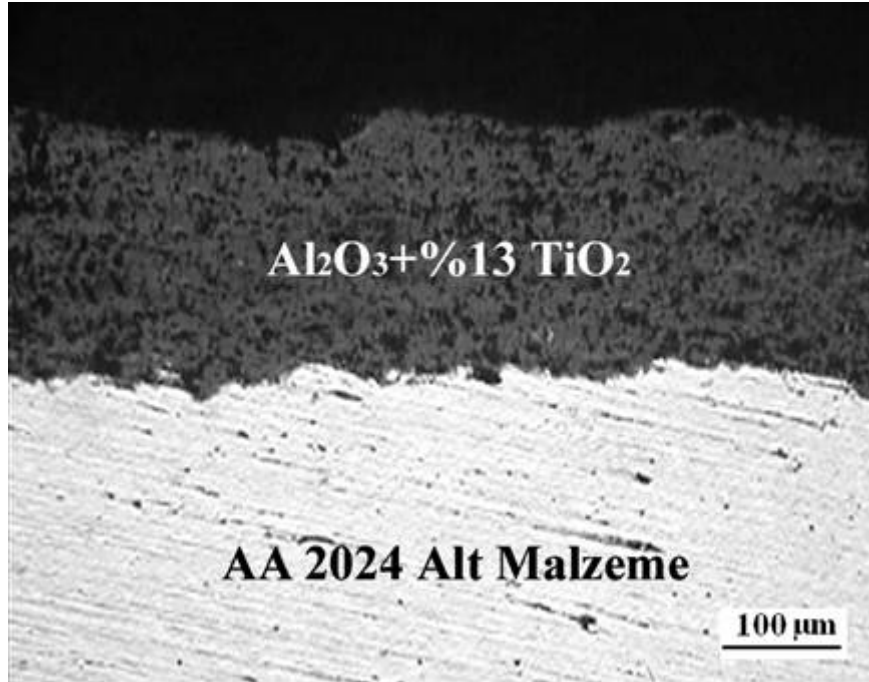
(b)

Şekil 9.7. A2 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri, a) 0 bölgesi, b) 1 bölgesi.

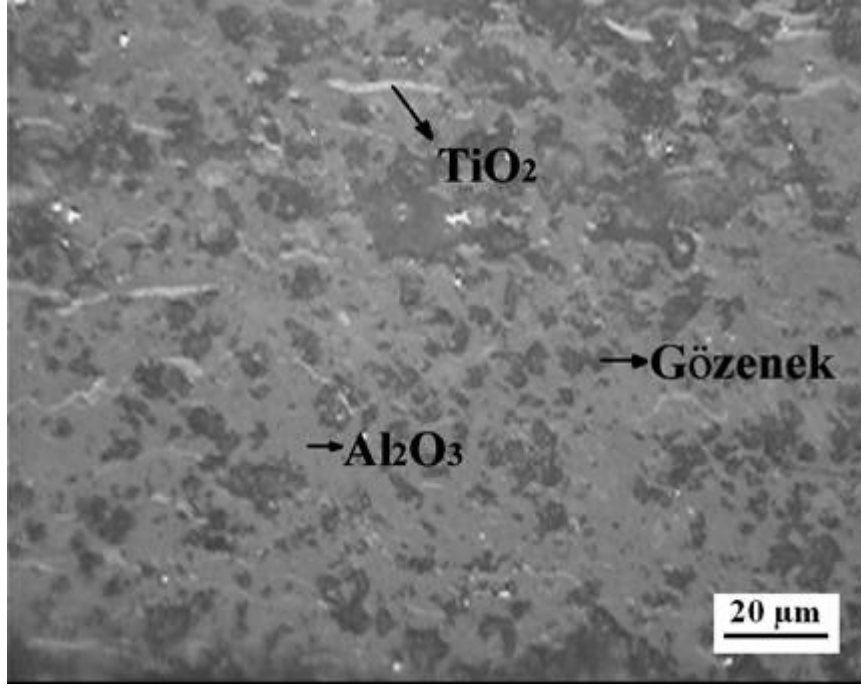


Şekil 9.8. A2 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

AA 2024 alüminyum alaşımı yüzeyine Al_2O_3 + % 13 TiO_2 kaplanan A3 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.9'da verilmiştir. A3 numunesinin optik mikroyapı resimleri incelendiğinde tabaka içerisinde gözeneklilik ve boşlukların bulunduğu; ancak sinterleşmenin önceki numunelere göre daha iyi ve oldukça homojen olarak gerçekleştiği görülmektedir.



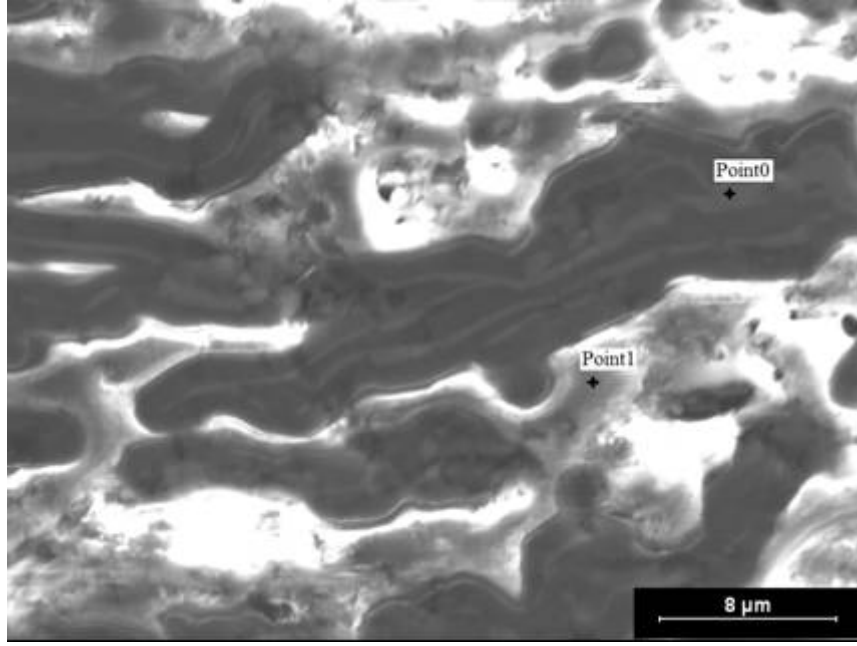
(a)



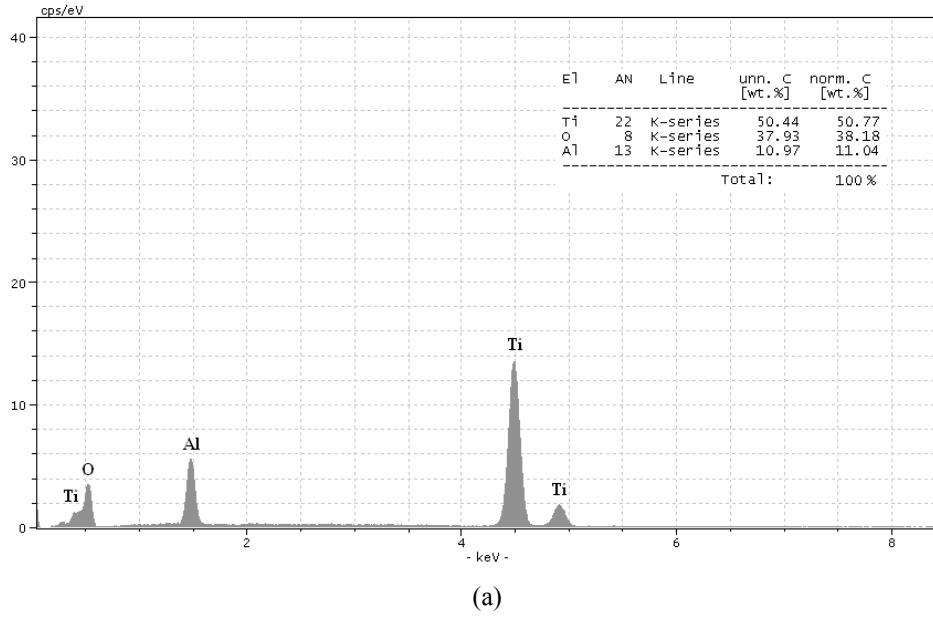
(b)

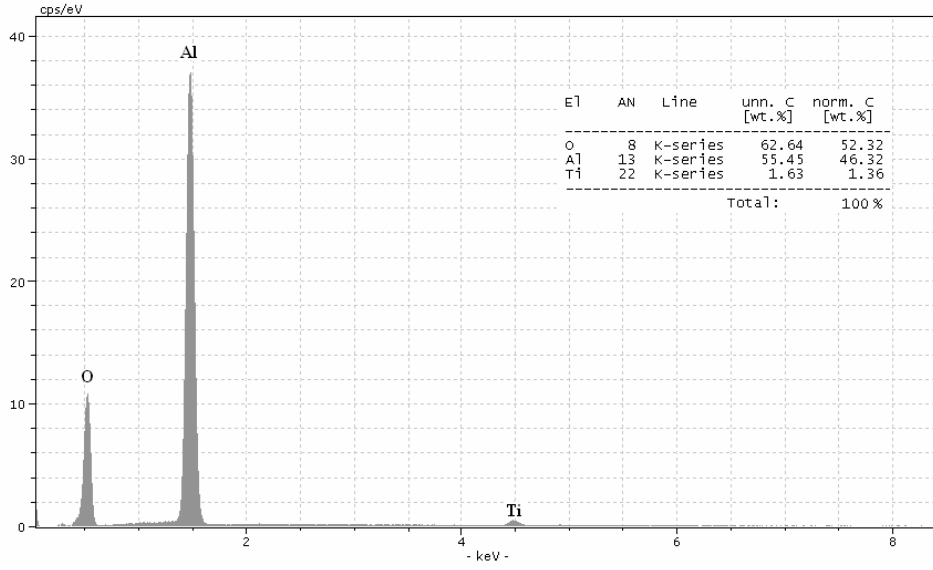
Şekil 9.9. A3 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kplama tabakası.

Şekil 9.10’da verilen SEM fotoğrafında, kaplama tabakasının EDX analizi alınan yerleri verilmiştir. Al_2O_3 içerisine ilave edilen TiO_2 miktarının artmasıyla, kaplama tabakasının mikroyapısında TiO_2 ’in, alüminyum oksit matris içerisinde dağılmış beyaz katmanlı tabakalar şeklinde bir yapı olarak yer aldığı görülmektedir (Şekil 9.9) . Şekil 9.11a’da verilen EDX analizi incelendiğinde; tabaka üzerinden alınan analizde (0 noktası) Ti ve O elementlerinin ve dolayısı ile titanyum dioksitin (TiO_2) % 84.74 gibi oldukça yüksek oranda bulunduğu açıkça görülmektedir. Bu katmanlı tabakanın Şekil 9.12’deki XRD analizinde verilen TiO_2 bileşiğinden oluşmuştur. Şekil 9.11b’de verilen, (1) noktasından alınan EDX analizi sonucunda da bu bölgenin, Al ve O elementlerinin meydana getirdiği alüminyum oksit (Al_2O_3) bileşiğinden oluştuğu; yapıda alüminyum oksidin de yine α ve γ fazları şeklinde bulunduğu ve ayrıca alüminyum ve titanyumu bir arada bulunduran başka bileşiklerin de yapıda oluştuğu görülmektedir. Başka araştırmacılar da yaptıkları çalışmalarla benzer sonuçlar elde etmişlerdir (Fervel ve diğ., 1999; Lina ve diğ., 2004).



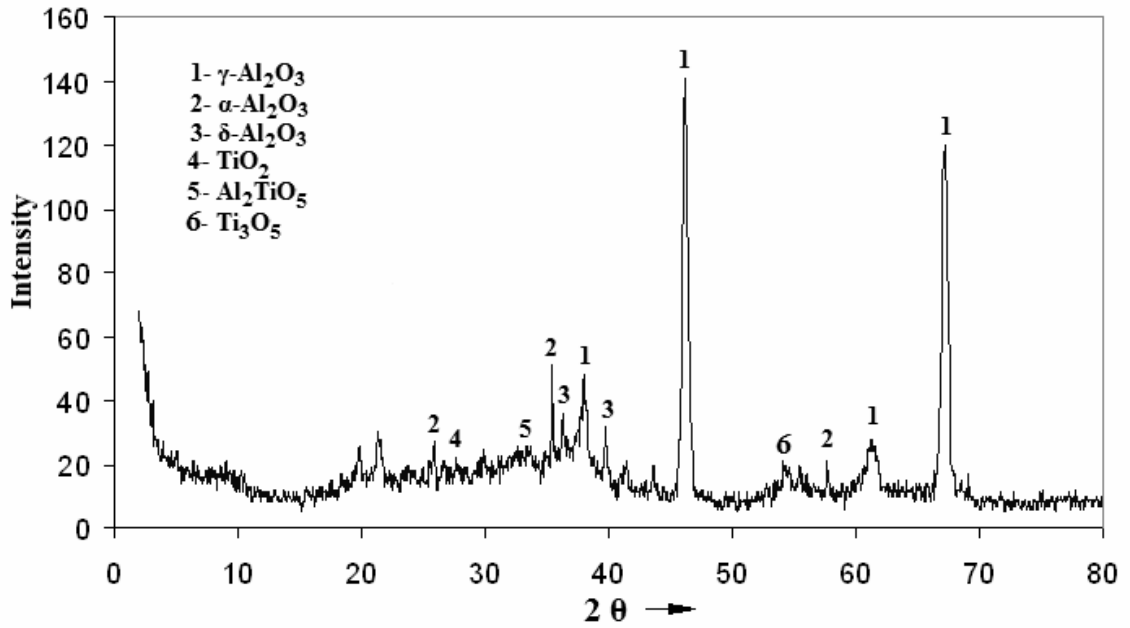
Şekil 9.10. A3 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.





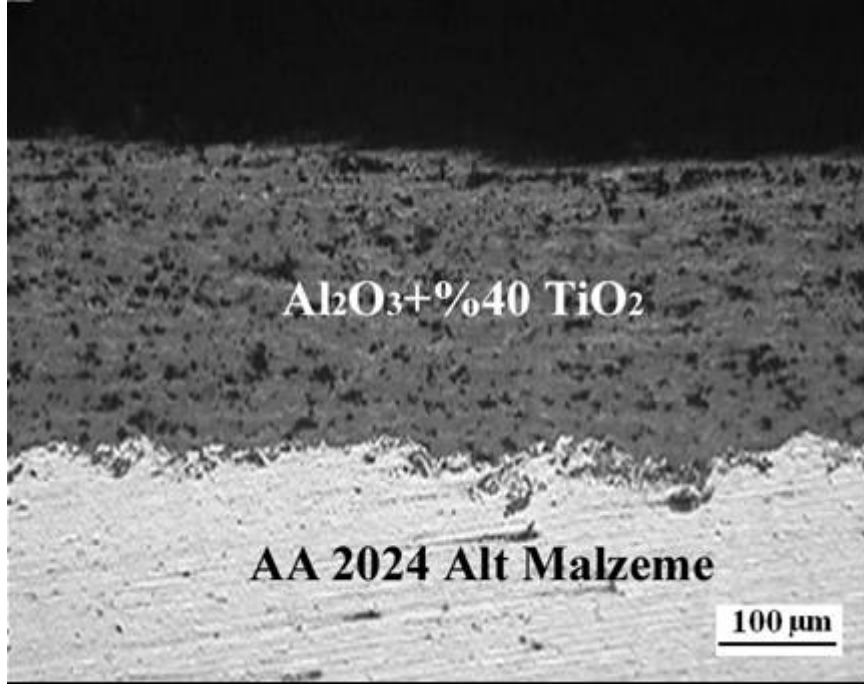
(b)

Şekil 9.11. A3 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz noktaları, a) 0 noktası, b) 1 noktası.

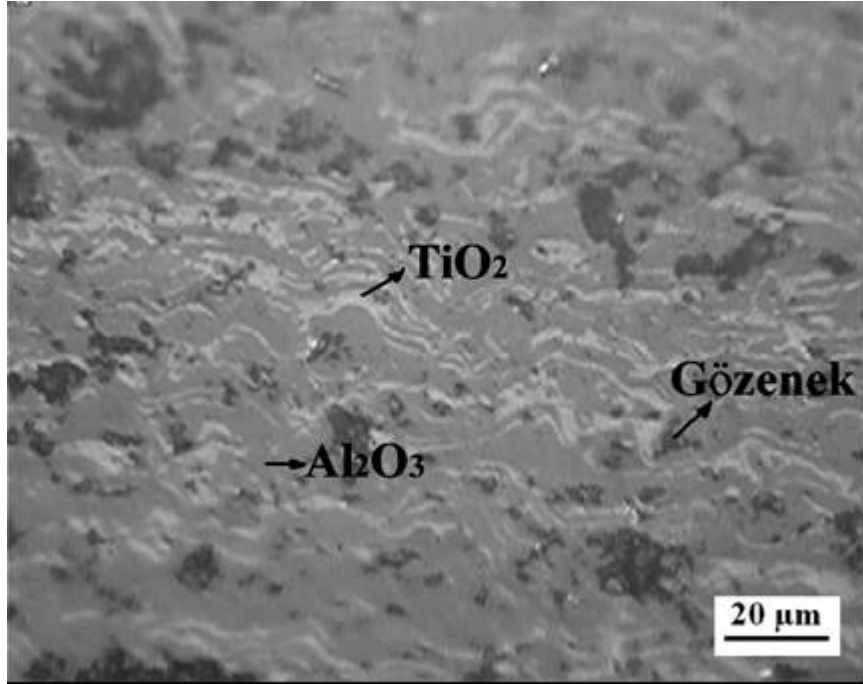


Şekil 9.12. A3 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

AA 2024 alüminyum alaşımı yüzeyine Al_2O_3 + % 40 TiO_2 kaplanan A4 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.13'te verilmiştir. A4 numunesinin optik mikroyapı resimleri incelendiğinde, yine burada sinterlemeden kaynaklanan, tabaka içerisinde gözeneklilik miktarının bir miktar daha azaldığı ve oksit tanelerinin birbirleriyle daha iyi bütünleştikleri görülmektedir.



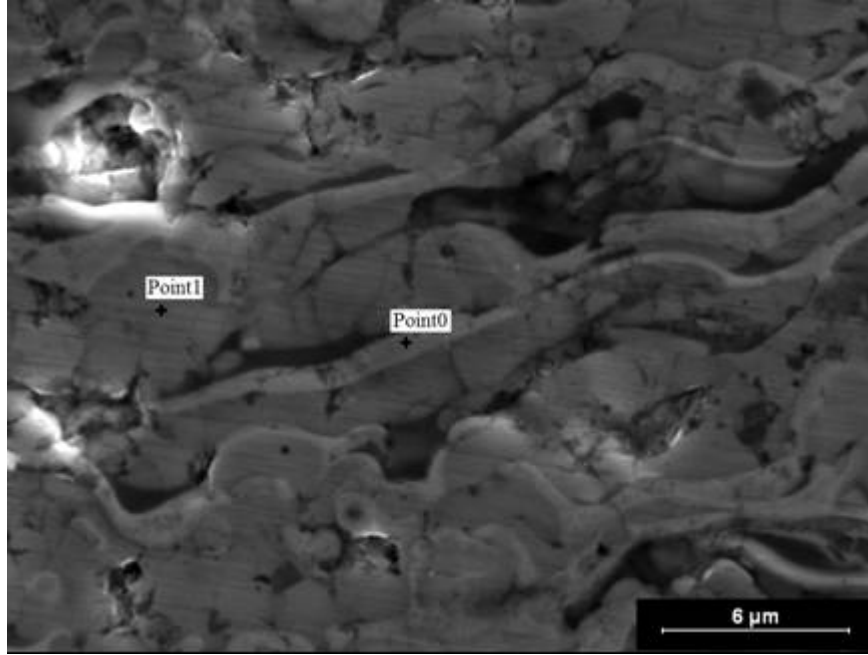
(a)



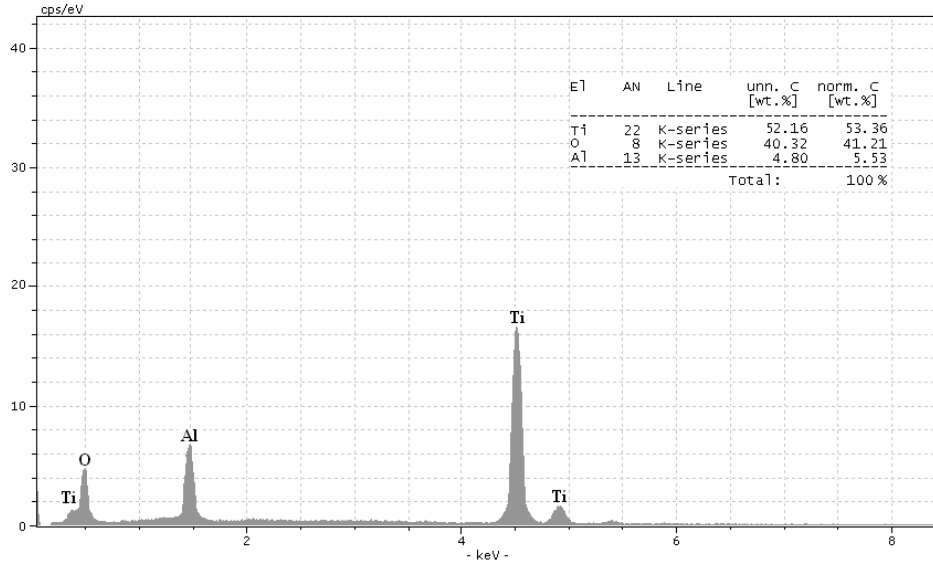
(b)

Şekil 9.13. A4 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kaplama tabakası.

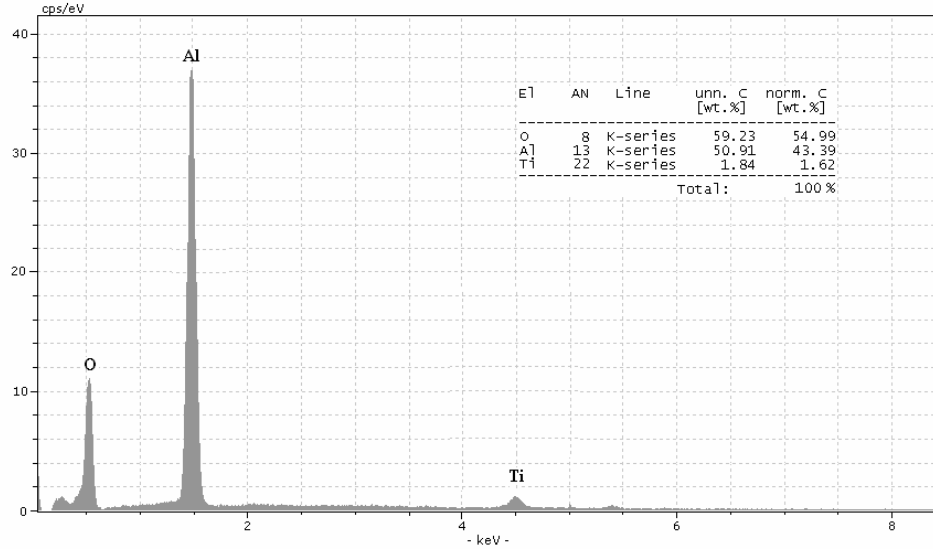
Şekil 9.14'te verilen SEM fotoğrafında, kaplama tabakasından alınan EDX analizlerinin yerleri görülmektedir. Al_2O_3 içerisine ilave edilen TiO_2 miktarının artmasıyla, kaplama tabakasının mikroyapısında oluşan beyaz katmanlı tabaka bölgesinin daha da artarak belirgin bir hale geldiği dikkat çekmektedir (Şekil 9.13). Şekil 9.15'te verilen EDX analizleri incelendiğinde, bu numunede de tabakalar üzerinden alınan analizde (0 noktası), Ti ve O elementlerinin yüksek miktarı ve buna bağlı olarak aşırı yüksek % 89,06 TiO_2 oranı açıkça görülmektedir. Bu tabakalı bölge, Şekil 9.16'da verilen XRD analizinde belirtildiği gibi, hemen hemen tamamen TiO_2 bileşiğinden oluşmuştur. (1) noktasından alınan EDX analiz sonucunda da bu noktanın, Al ve O elementlerinin yüksek miktarı ile % 43.39 Al ve dolayısı ile % 82.30 oranında Al_2O_3 bileşiğinden oluştuğu görülmektedir. Şu halde (1) noktası da Al_2O_3 açısından zengin bir karışım bulunmaktadır. Ayrıca Şekil 9.16'daki XRD analizinden de görüleceği gibi, kaplama tabakasından bunların dışında Al_2TiO_5 ve Ti_3O_5 ara fazları da meydana gelmiştir.



Şekil 9.14. A4 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.

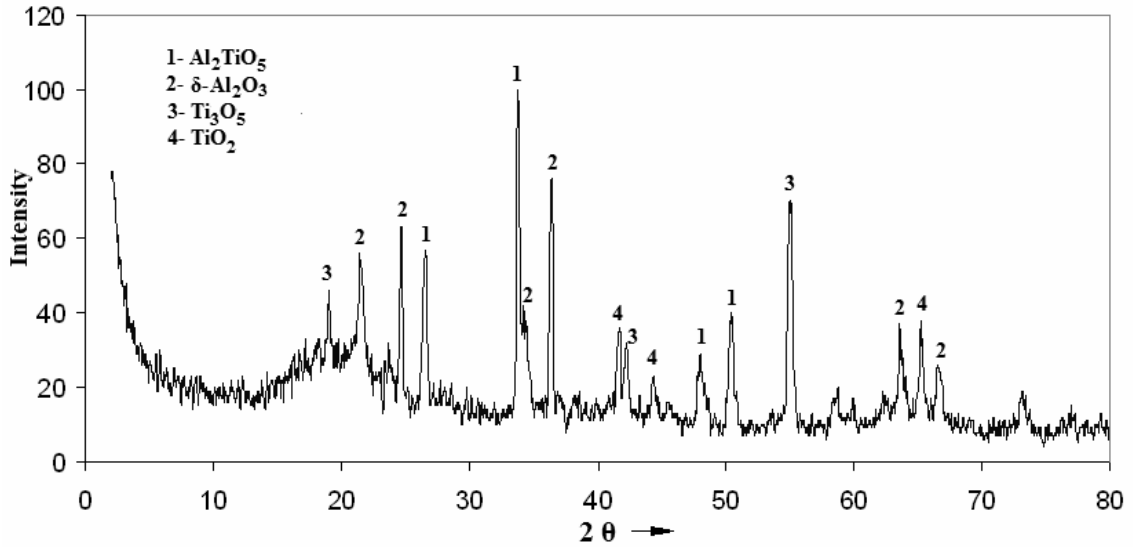


(a)



(b)

Şekil 9.15. A4 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz noktaları, a) 0 noktası, b) 1 noktası.



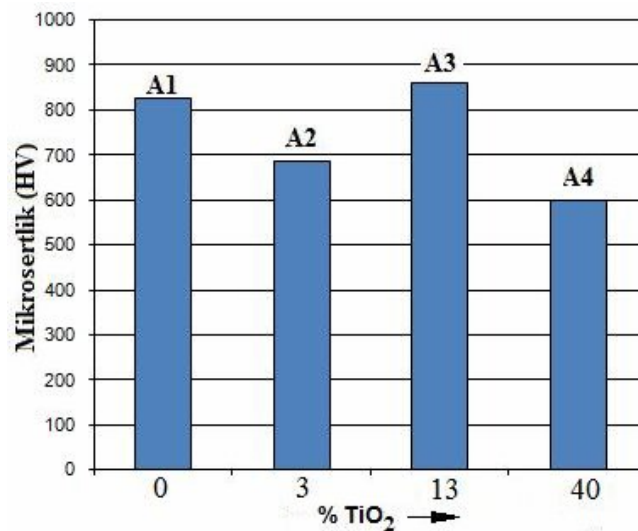
Şekil 9.16. A4 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

Isıl püskürtme yöntemlerinde, tabaka içerisinde gözenek oluşumu; literatür ışığında, yukarıda da belirtildiği gibi, kaçınılmaz olmaktadır. Dolayısı ile atmosferik plazma püskürtme yöntemi ile yapılan Al_2O_3 ve $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ toz kaplamaların tümünde gözenekler oluşmaktadır. Titanyum oksit bileşiğinin artmasıyla $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ sisteminin ergime sıcaklığı düşmektedir. Düşük sıcaklık, yüksek soğuma oranı ve püskürtülen partiküllerin nispeten düşük hızlarından dolayı, kaplamada gözenekli bir yapı oluşmaktadır. Habib ve arkadaşlarının (2006) da yaptıkları bir çalışmada belirttikleri gibi; gözeneklerin büyük bir çoğunluğu, üst üste gelen katmanlı tabakaların sınırlarında şekillenmektedir. Al_2O_3 tozu içerisine TiO_2 toz ilaveli numunelerde, ilave TiO_2 miktarının artmasıyla, sinterleşme oranı artmış ve gözenek miktarı azalmıştır. % 40 TiO_2 ilaveli numunede en düşük gözenek miktarı en sıkı bağlı yapı elde edilmiştir. Kaplama tabakalarından alınan optik mikroyapı resimleri incelendiğinde, Al_2O_3 ve $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ toz kaplamalarında TiO_2 oranının artmasıyla katmanlı tabakaların oluştuğu ve tabakalı bölgenin arttığı görülmektedir. Toz partiküllerinin yüzeye ark ark çarpmasıyla elde edilen katmanlı tabakalar, ısı püskürtme sistemi ile gerçekleştirilen kaplamaların karakteristik bir yapısı olarak ortaya çıkmaktadır. Numunelerde beyaz tabakalardan alınan analizlerden, bu bölgenin TiO_2 bileşiğinden oluştuğu açıkça görülmektedir. Mikroyapı içerisinde daha koyu gri renkteki kısımlardan alınan analizlerden de, yine bu bölgenin Al_2O_3 bileşiğinden oluştuğu görülmektedir. Bu bulgular mevcut literatürle büyük bir uyum göstermektedir (Lina ve diğ., 2004). XRD analizleri genel olarak incelendiğinde kaplama tabakalarında $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, Al_2TiO_5 ve TiO_2 bileşiklerinin oluştuğu görülmektedir. Literatürde $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'den ve az miktarlarda $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'den meydana gelen kaplamalarla ilgili çalışmalardan bahsedilmektedir. Plazma püskürtme kaplamada, $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'in erimesi ve daha sonra hızlı bir şekilde katılaşması esnasında,

α - Al_2O_3 'in düşük çekirdeklenme enerjisinden dolayı kaplama tabakası içerisinde γ - Al_2O_3 'in α - Al_2O_3 'e dönüşümü söz konusudur (Luo ve diğ., 2003). Al_2O_3 ve TiO_2 tozlarının karıştırılmasıyla elde edilen toz karışımında, toz partiküllerinin küçük ebatlara sahip olmasından dolayı iki oksit arasındaki yüzey temas alanı oldukça geniştir. Bu nedenle plazma püskürtme kaplama esnasında bu iki oksit tepkimeye girerek Al_2TiO_5 bileşiği oluşturmaktadır (Normand ve diğ., 2000). A3 ve A4 numunelerinde ilave edilen TiO_2 bileşiğinin artmasına bağlı olarak Al_2O_3 ile TiO_2 bileşiklerinin reaksiyon oluşturma ihtimali de artmaktadır. Bu nedenle A3 ve A4 numunelerinin XRD incelemelerinde Al_2O_3 ve TiO_2 bileşikleri ile birlikte Al_2TiO_5 ve Ti_3O_5 bileşiklerinin de oluştuğu görülmektedir.

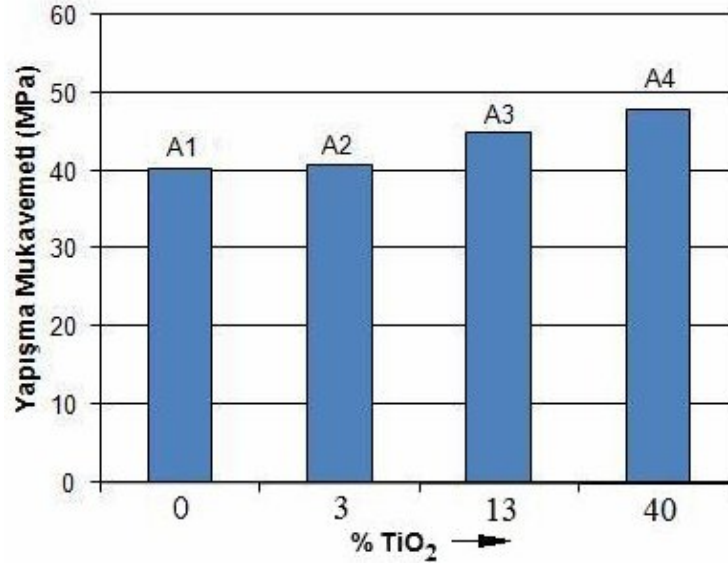
9.1.2. Mikrosertlik ve Çekme Dayanımı İncelemesi

A1, A2, A3 ve A4 nolu numunelere ait mikrosertlik grafiği Şekil 9.17'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde A1 numunesinde 800-1050 HV arasında değişen mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Bu değerler, Fervel ve arkadaşlarının (1999) plazma püskürtme yöntemi ile gerçekleştirdikleri çalışmada saf Al_2O_3 ile kaplı numunelerde elde ettikleri 900-1100 HV arasında değişen sertlik değerlerine benzemektedir. TiO_2 ilave edilen numunelerden yüksek sertlik değeri % 13 TiO_2 ilaveli A3 numunesinde görülmektedir. Gözenek miktarındaki düşme ve oksitlerin birbiriyle, yeni türde oksitler oluşturarak, daha iyi kenetlenmesine bağlı olarak; A3 numunesinde sertlik miktarı en yüksek seviyeye çıkmıştır. Fakat % 40 TiO_2 ilaveli A4 numunesinde TiO_2 'in sertliğinin Al_2O_3 'e göre düşük olmasından dolayı, gözenek miktarı düşmesine rağmen ilave edilen TiO_2 'in artmasıyla sertlik değerinin düştüğü görülmüştür (Yılmaz, 2007). En düşük sertlik miktarı % 40 TiO_2 ilaveli A4 numunesinde tespit edilmiştir.



Şekil 9.17. A grubu numunelere ait mikrosertlik grafiği.

A grubu numunelere ait çekme deneyi sonrası yapışma mukavemetini gösteren grafik Şekil 9.18’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde Al_2O_3 ile kaplanan A1 numunesinde 40,5 MPa değerinde bir yapışma mukavemeti elde edilmiştir. A2 numunesinin yapışma mukavemetinin A1 numunesine yakın bir değerde olduğu görülmektedir. Kaplama tabakasına ilave edilen % 13 TiO_2 miktarına sahip A3 numunesinde ise yapışma mukavemetinde bir artış gözlenmiştir. Bu artış ilave edilen TiO_2 miktarının artmasıyla ve diğer oksit bileşiklerinin de oluşmasıyla birlikte daha iyi bir sinterleşmenin sağlanması ve gözenek miktarının düşmesinden kaynaklanmaktadır. % 40 TiO_2 ilaveli A4 numunesinde en düşük gözenek miktarı ve TiO_2 ’in daha düşük sertlik değerine sahip oluşu ve alüminyum oksitle titanyum dioksitin kendi aralarında oluşturdukları diğer fazlara da bağlı olarak, en yüksek yapışma mukavemeti elde edilmiştir. Al_2O_3 içerisine ilave edilen TiO_2 miktarının artmasıyla kaplama tabakasının yapışma mukavemeti artmıştır.

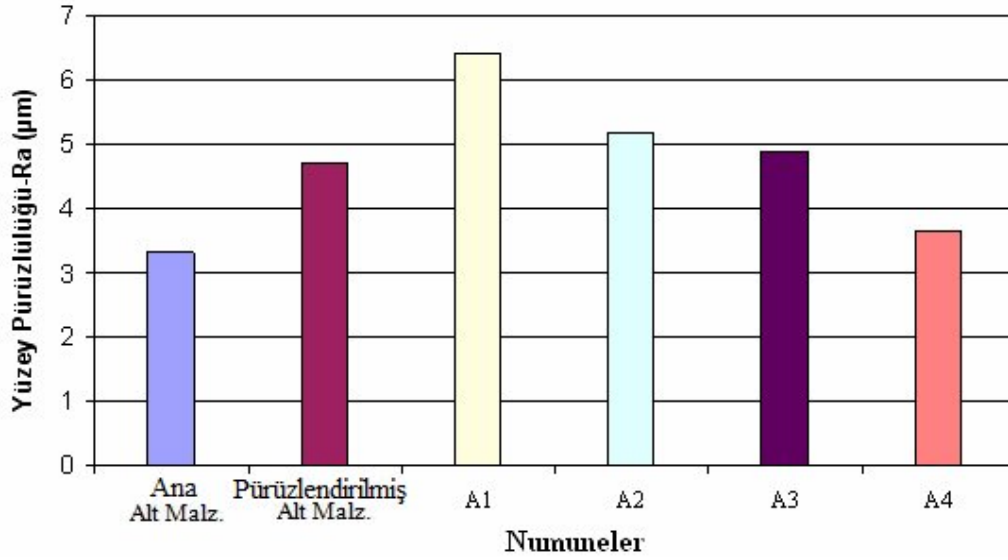


Şekil 9.18. A grubu numuneler ait yapışma mukavemeti değerleri.

9.1.3. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü

Numunelerin kaplama öncesi, yüzey pürüzlendirme işlemi sonrası ve kaplama sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Ölçümlerde, kaplama işlemi uygulanmamış numunede yüzey pürüzlülük değeri 3,324 μm ve yüzeyi sadece pürüzlendirilmiş numunede de 4,725 μm değerleri tespit edilmiştir. Numune yüzeyine yapılan kaplamalar ile A1, A2, A3 ve A4 numunelerinde farklı yüzey pürüzlülük değerleri tespit edilmiştir. Yüzeye Al_2O_3 kaplanan A1 numunesinde 6,408 μm pürüzlülük değeri elde edilmiştir. % 3 TiO_2 ilaveli A2 numunesinde 5,195 μm , % 13 TiO_2 ilaveli A3 numunesinde 4,881 μm ve % 40 TiO_2 ilaveli A4 numunesinde ise 3,655 μm yüzey pürüzlülük değerleri belirlenmiştir. Şekil 9.19’da görüldüğü gibi; Al_2O_3

içerisine ilave edilen TiO_2 miktarının artması ile yüzeyin pürüzlülük değeri düşerek yüzey kalitesi artmıştır.

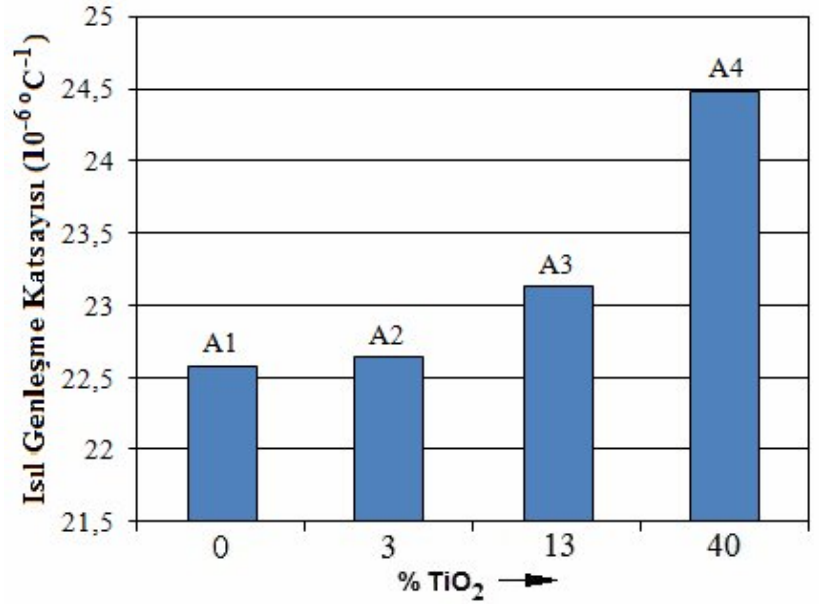


Şekil 9.19. A grubu numunelere ait alt malzeme ve kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.

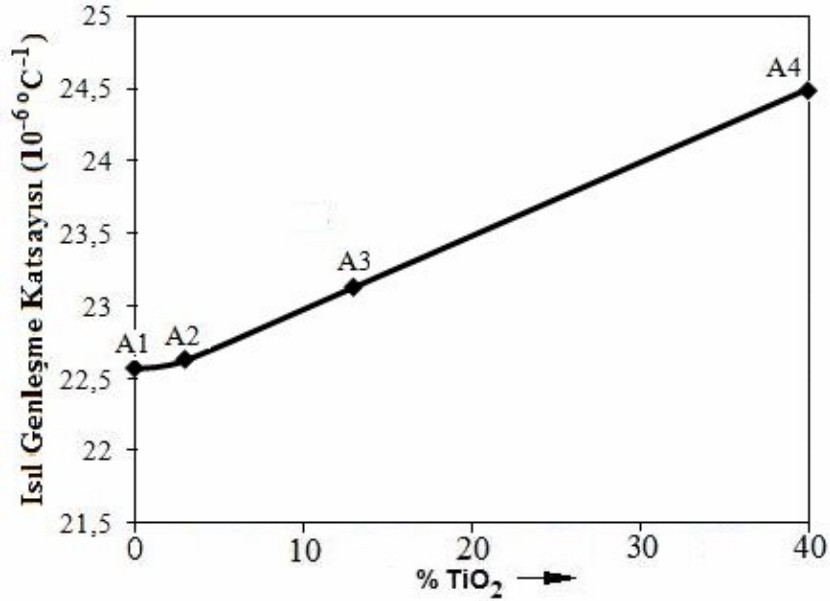
9.1.4. Isıl Genleşme İncelemesi

A grubu numunelerin ısı genleşme katsayı değerleri Şekil 9.20’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde A1 numunesinin en düşük değere sahip olduğu görülmektedir. Al_2O_3 bileşiğinin $7 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ gibi düşük bir ısı genleşme katsayısına sahip olmasına bağlı olarak Al_2O_3 ile kaplanan A1 numunesinde ısı genleşme katsayısı $22,574 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir. Plazma püskürtme ile gerçekleştirilen kaplamalarda gözenek miktarının artmasının, kaplamaların ısı genleşme katsayılarını düşürdüğü bilinmektedir. Buna bağlı olarak gözenek miktarının azalması ile ısı genleşme miktarı da artmaktadır (Sarıkaya, 2003; Khor ve diğ., 1999). Al_2O_3 içerisine ilave edilen TiO_2 ’in ısı genleşme katsayısının Al_2O_3 bileşiğine göre daha yüksek olması ($9,2 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) ve gözenek miktarının düşmesine bağlı olarak, ilave edilen TiO_2 miktarının artmasıyla A grubu numunelerin ısı genleşme katsayıları artmıştır. TiO_2 tozunun Al_2O_3 tozuna ilave edilmesi ile elde edilen A2, A3 ve A4 numunelerinin ısı genleşme katsayıları incelendiğinde, %3 TiO_2 ilaveli A2 numunesinde $22,634 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, %13 TiO_2 ilaveli A3 numunesinde $23,132 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ve %40 TiO_2 ilaveli A4 numunesinde ise $24,487 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ısı genleşme katsayıları tespit edilmiştir. A grubu numunelerde de ilave edilen TiO_2 bileşik miktarının artmasıyla gözenek miktarı azalmaktaydı. Gözenek miktarındaki bu azalma ve ilave edilen TiO_2 miktarının ısı genleşme katsayısının yüksek oluşuna bağlı olarak A4 numunesine

gidildikçe A grubu numunelerde ısı genleşme katsayısı artmaktadır. En yüksek ısı genleşme katsayısı %40 TiO₂ ilaveli A4 numunesinde elde edilmiştir.



(a)



(b)

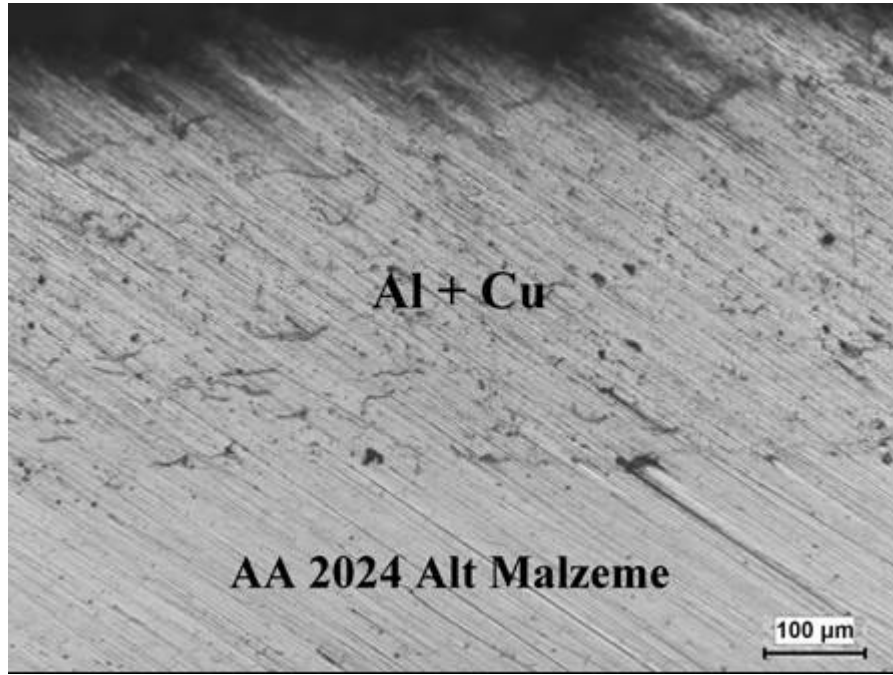
Şekil 9.20. A grubu numunelere ait ısı genleşme katsayı değerleri (250 °C’de).

9.2. Al Alaşımı Yüzeyine (AA 2024-T4) Karbür Kaplama

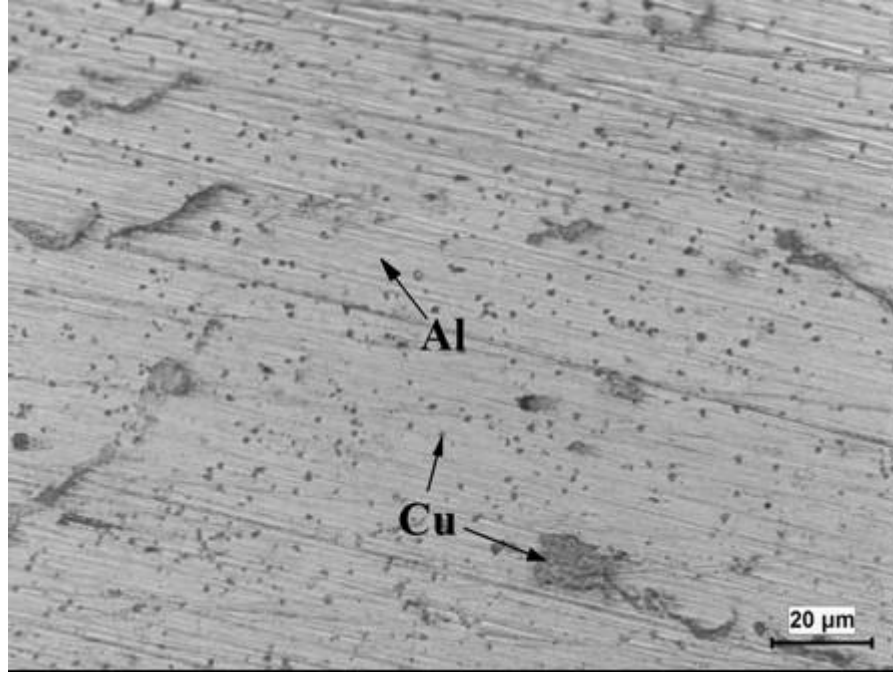
9.2.1. Mikroyapı İncelemesi

Alüminyum alaşımı (AA 2024-T4) yüzeyine Al + % 5 Cu ve Al + % 5 Cu + % 5 B₄C, Al + % 5 Cu + % 10 B₄C ve Al + % 5 Cu + % 20 B₄C karbür toz karışımlarının kaplanması atmosferik plazma püskürtme sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Alüminyum alaşımı yüzeyine

yapılan plazma püskürtme kaplamalarda 200-360 μm arasında değişen tabaka kalınlıkları elde edilmiştir. Bu kaplama serisinde de plazma püskürtme kaplama işleminin elle yapılması nedeniyle, yine üniform bir kaplama kalınlığı elde edilememiştir. AA 2024 alüminyum alaşımı yüzeyine Al + % 5 Cu kaplanan B1 numunesine ait optik mikroyapı resimleri şekil 21 a ve b’de verilmiştir. B1 numunesinin optik mikroyapı resimleri incelendiğinde gözenek oluşumunun çok az olduğu ve Al tozu içerisine katılan Cu tozunun kaplama tabakası içerisindeki dağılımı görölmektedir.



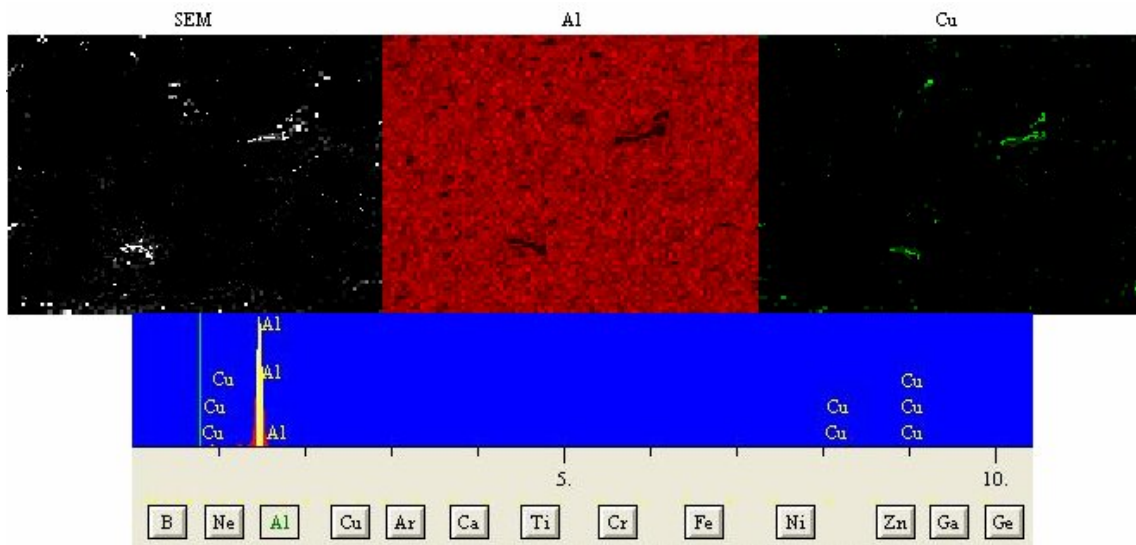
(a)



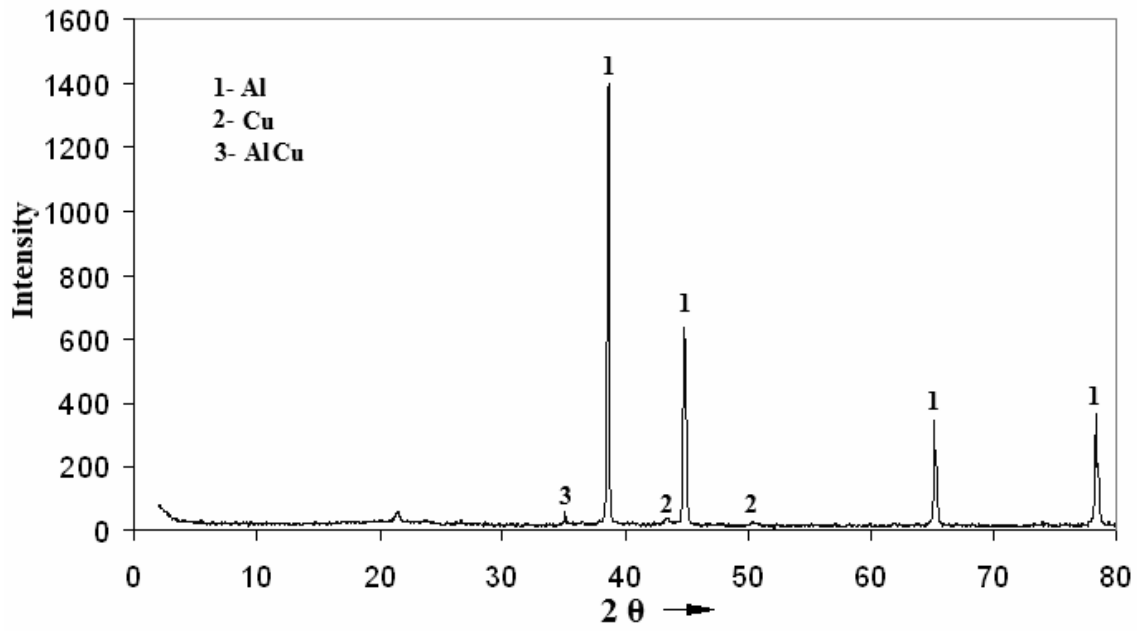
(b)

Şekil 9.21. B1 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kaplama tabakası.

B1 nolu numunenin kaplama tabakasından alınan element analiz haritası Şekil 9.22’de verilmiştir. Şekil 9.22’de verilen SEM fotoğrafının alındığı bölgeden alınan element taraması sonucu kaplama tabakasının Al ve Cu element dağılımı görülmektedir. Optik mikroyapı resmi ile bağlantılı olarak, element haritasında tespit edilen Al ve Cu elementleri ile Şekil 9.23’te verilen XRD analiz sonucuna göre B1 numunesinin kaplama tabakasında saf Al, saf Cu ve çok az miktarda AlCu bileşiğinin oluştuğu görülmektedir.

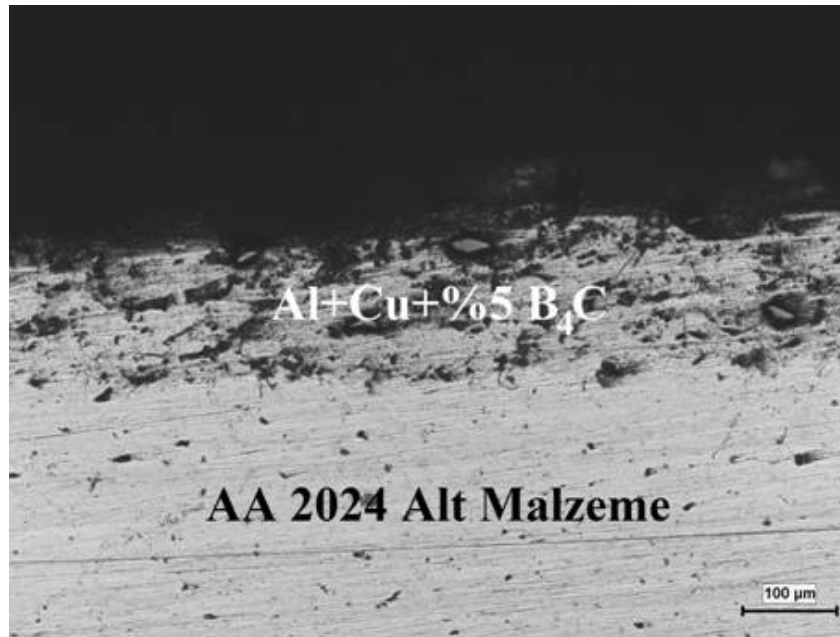


Şekil 9.22. B1 nolu numunenin tarama yöntemiyle elementel haritası.

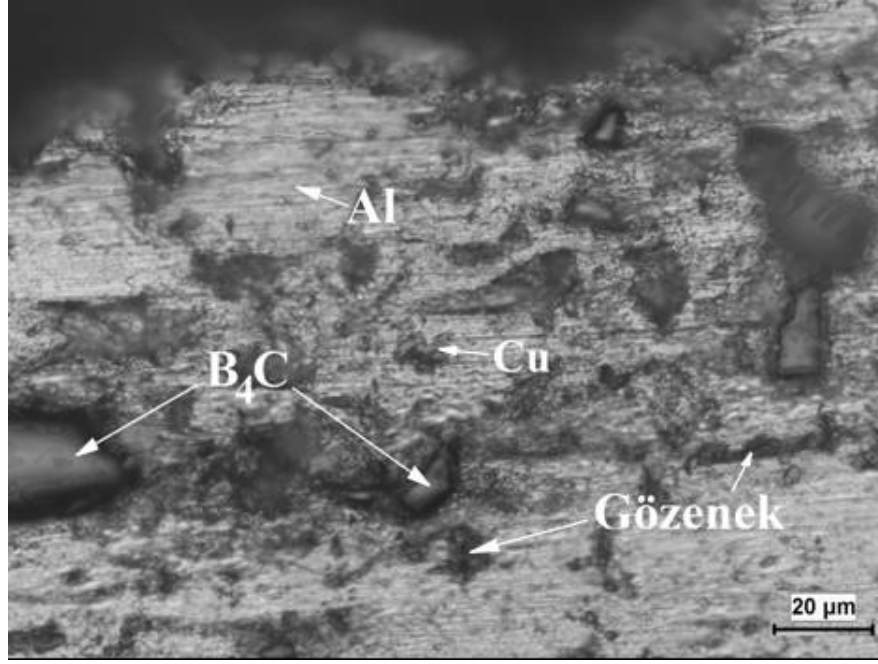


Şekil 9.23. B1 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

AA 2024 alüminyum alaşımı yüzeyine Al + % 5 Cu + % 5 B₄C tozu kaplanan B2 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.24a ve b’de verilmiştir. B₄C bileşiğinin kaplama tabakasına ilave edilmesi ile kaplama tabakasında gözenek miktarı artmıştır. Optik mikroyapı resmi incelendiğinde bu artış açık bir şekilde görülmektedir. % 5 B₄C ilave edilen B2 numunesinde kaplama tabakasında karbürlerin kısmi dağılımı görülmektedir.



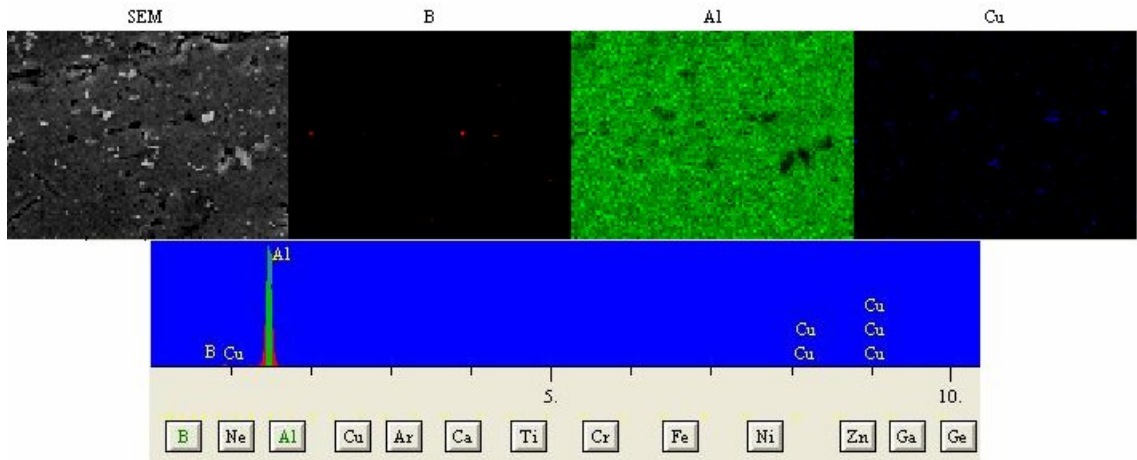
(a)



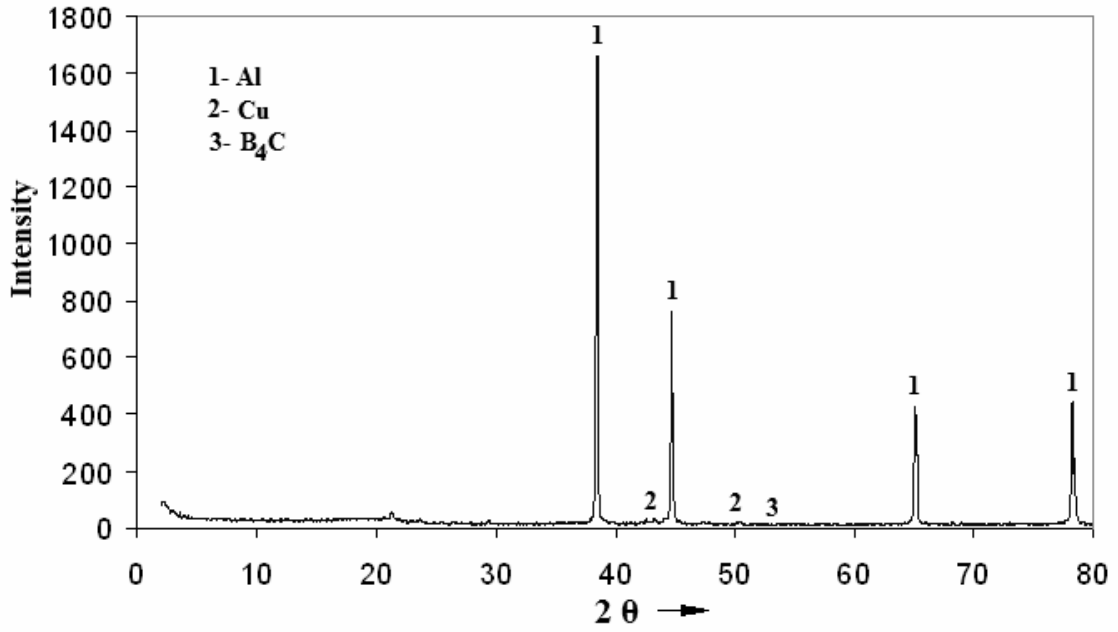
(b)

Şekil 9.24. B2 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kaplama tabakası.

B2 nolu numunenin kaplama tabakasından alınan element analiz haritası Şekil 9.25'te verilmiştir. Şekil 9.25'te verilen SEM fotoğrafının alındığı bölgede yapılan element taraması sonucu kaplama tabakasının Al, Cu ve B element dağılımı görülmektedir. Optik mikroyapı resmi ile bağlantılı olarak; element haritasında tespit edilen Al, Cu ve B elementleri ile Şekil B6' da verilen XRD analiz sonucuna göre B2 numunesinin kaplama tabakasında, karbür katkısının kaynak örtüsü gibi davranması sonucunda, bakır ve alüminyumun oksitlenmeleri engellenmiş ve yapıda saf Al, saf Cu ile birlikte B₄C bileşiğinin varlığı tespit edilmiştir.

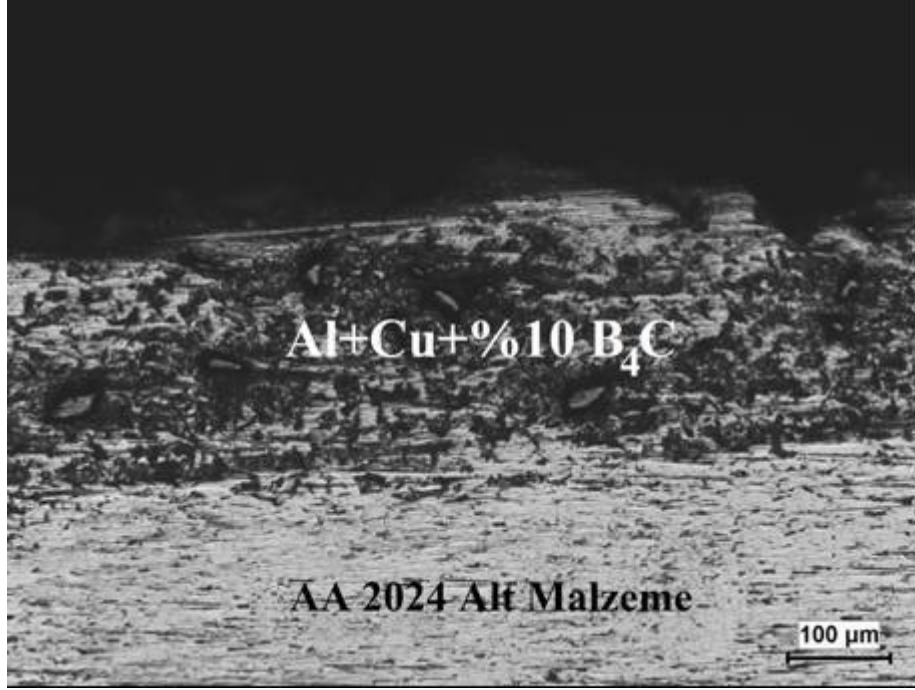


Şekil 9.25. B2 nolu numunenin tarama yöntemiyle elementel haritası.

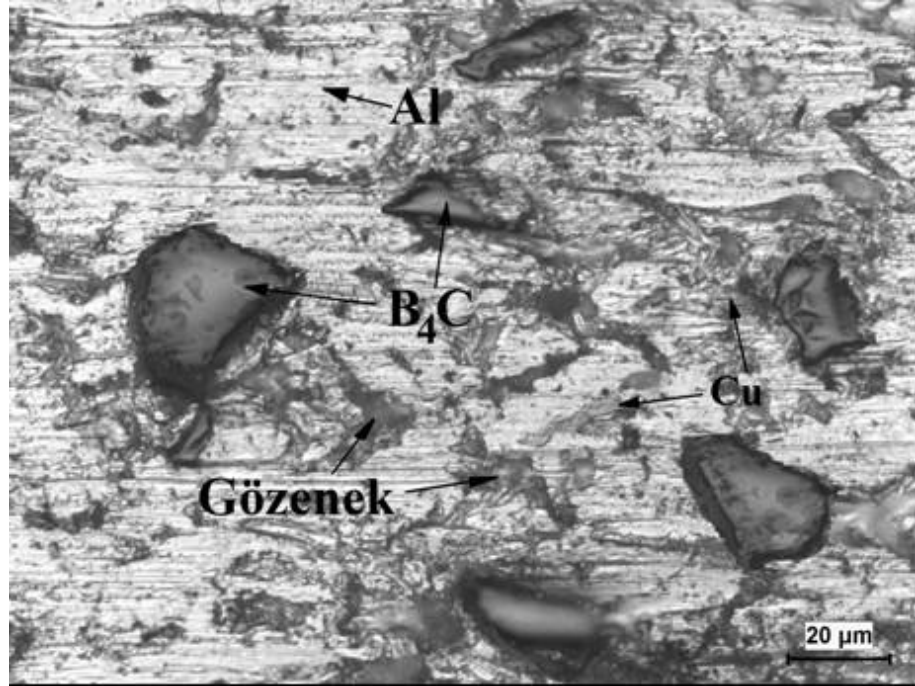


Şekil 9.26. B2 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

AA 2024 alüminyum alaşımı yüzeyine Al + % 5 Cu + % 10 B₄C tozu kaplanan B3 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.27’de verilmiştir. Optik mikroyapı resimleri incelendiğinde, B₄C bileşiğinin kaplama tabakasına ilave edilmesi ile kaplama tabakasında gözenek miktarının daha da arttığı görülmektedir. % 10 B₄C ilave edilen B3 numunesinde kaplama tabakasında karbürlerin kısmi dağılımı görülmektedir. Kaplama esnasında ilave edilen % 10’luk B₄C miktarının tamamının kaplama tabakasına geçmediği dikkat çekmektedir. Bunun ise karışım tozuna uygulanan kaplama parametrelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kaplama parametrelerinin standart tozlar için sabit olmasına karşın, farklı toz karışımları için kaplama parametrelerinin optimum değerinin bulunması gerekir. Kaplama esnasında toz besleme ünitesine yerleştirilen tozun fazla olması ve mevcut maddi olanakların yetersiz kalması, kaplama işleminin sıkıntılı koşullar altında gerçekleştirilmesine neden olmuştur. Ayrıca bor karbür bileşiği bir kaynak örtüsü gibi malzemenin oksijen alışverişini engellemiş, alüminyumla bakırın oksitlenmesinin önüne geçmiş ve böylece Al₂O₃, Cu₂O ve CuO’nun oluşması büyük ölçüde önlenmiştir.



(a)

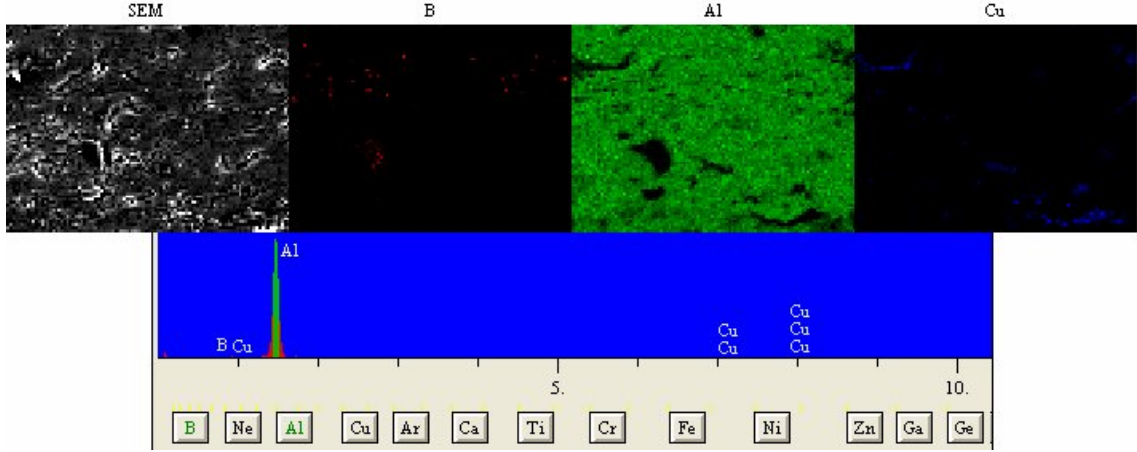


(b)

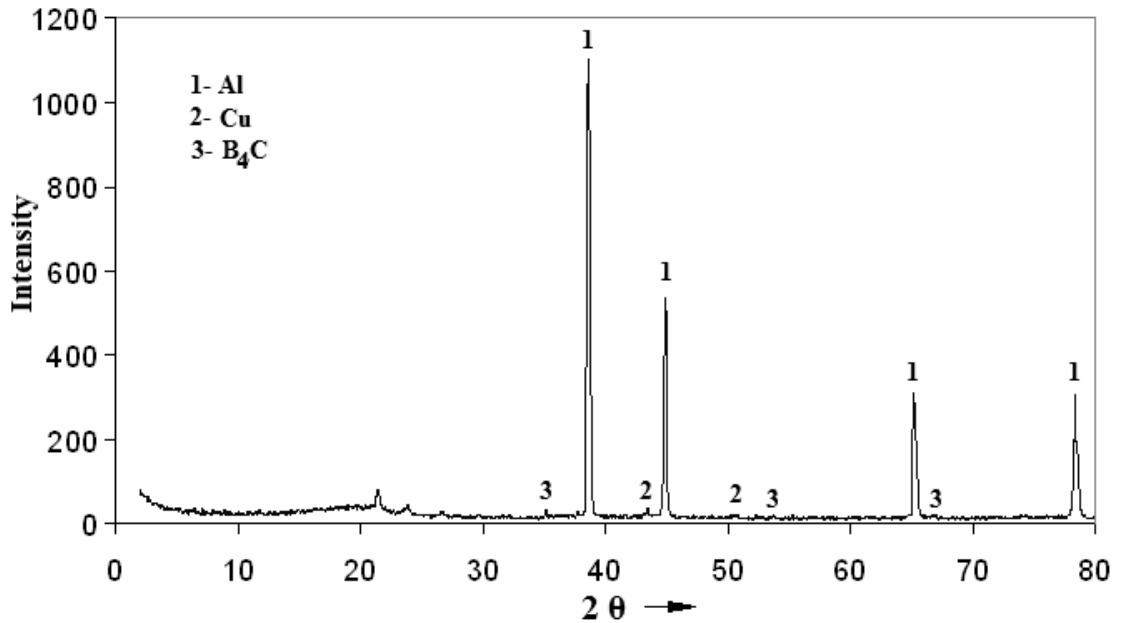
Şekil 9.27. B3 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kplama tabakası.

B3 nolu numunenin kaplama tabakasından alınan element analiz haritası Şekil 9.28’de verilmiştir. Şekil 9.28’de verilen SEM fotoğrafının alındığı bölgeden alınan element taraması sonucu kaplama tabakasının Al, Cu ve B element dağılımı görülmektedir. Optik mikroyapı

resmi ile bağlantılı olarak, element haritasında tespit edilen Al, Cu ve B elementleri ile Şekil 9.29’da verilen XRD analiz sonucuna göre B2 numunesinin kaplama tabakasında saf Al, saf Cu ve B₄C bileşiğinin varlığı belirlenmiştir. Bu numunede alüminyum ve bakırın, oksitlenmeden yapıda kalmasını, bor karbürün kaynak esnasında bu elementler için bir örtü görevi yapması sağlamıştır.



Şekil 9.28. B3 nolu numunenin tarama yöntemiyle elementel haritası.



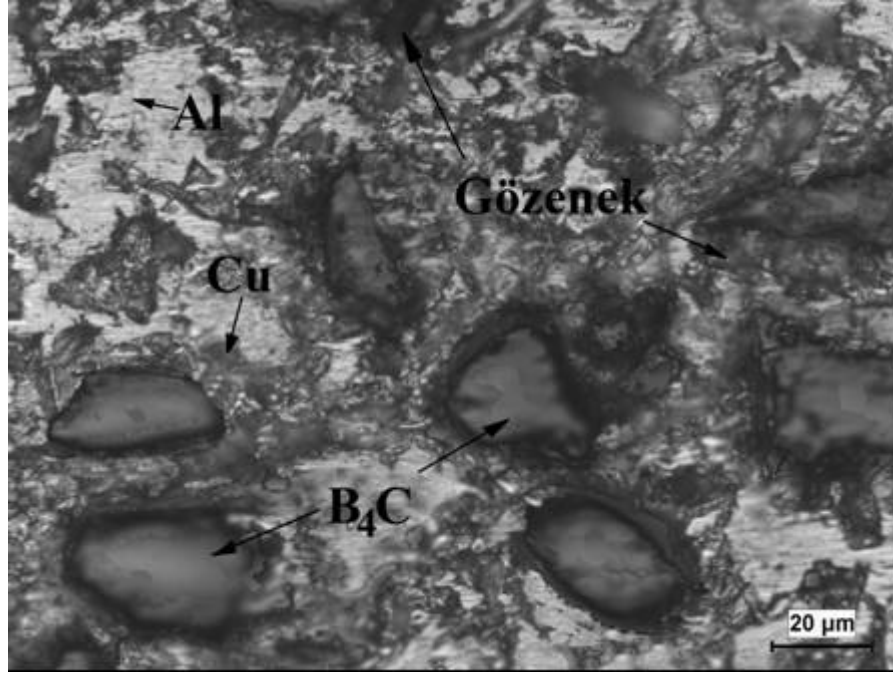
Şekil 9.29. B3 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

AA 2024 alüminyum alaşımı yüzeyine Al + % 5 Cu + % 20 B₄C tozu kaplanan B4 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.30’da verilmiştir. Optik mikroyapı resimleri incelendiğinde B₄C bileşiğinin kaplama tabakasına ilave edilmesi ile kaplama tabakasında gözenek miktarının % 10 B₄C ilaveli B3 numunesinde olduğu gibi arttığı görülmektedir. % 20 B₄C ilave edilen B4 numunesinde kaplama tabakasında karbürlerin dağılımı görülmektedir.

Aynı şekilde kaplama esnasında ilave edilen % 20'lik B_4C miktarının da tamamının kaplama tabakasına geçmediği görülmektedir. Bu geçişe kaplama parametrelerinin neden olduğu düşünülmektedir. Kaplama parametrelerinin standart tozlar için sabit olmasına karşın, farklı toz karışımları için kaplama parametrelerinin optimum değerinin bulunması gereklidir. Kaplama esnasında toz besleme ünitesine yerleştirilen tozun fazla olması ve mevcut maddi imkânların yetersiz olması, kaplama işleminin sıkıntı şartlarda gerçekleştirilmesine neden olmuştur.



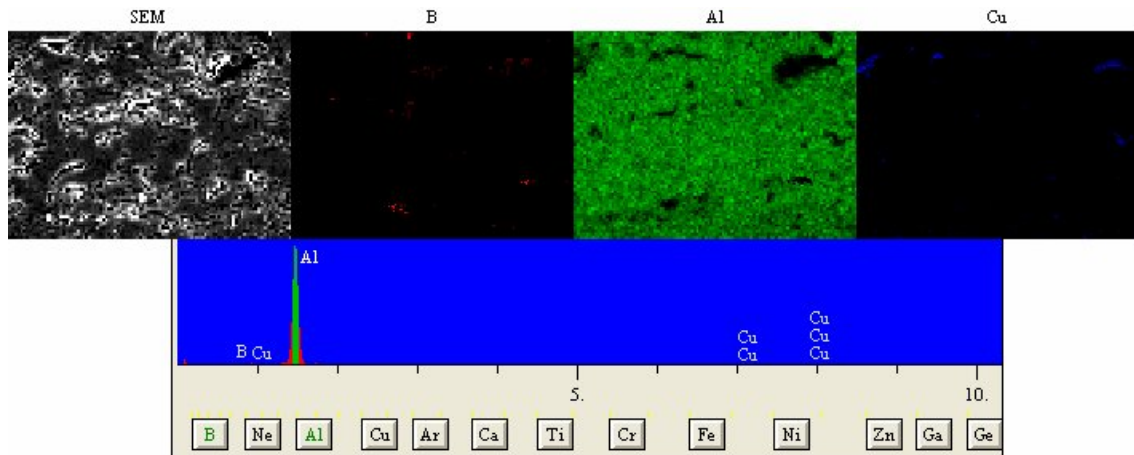
(a)



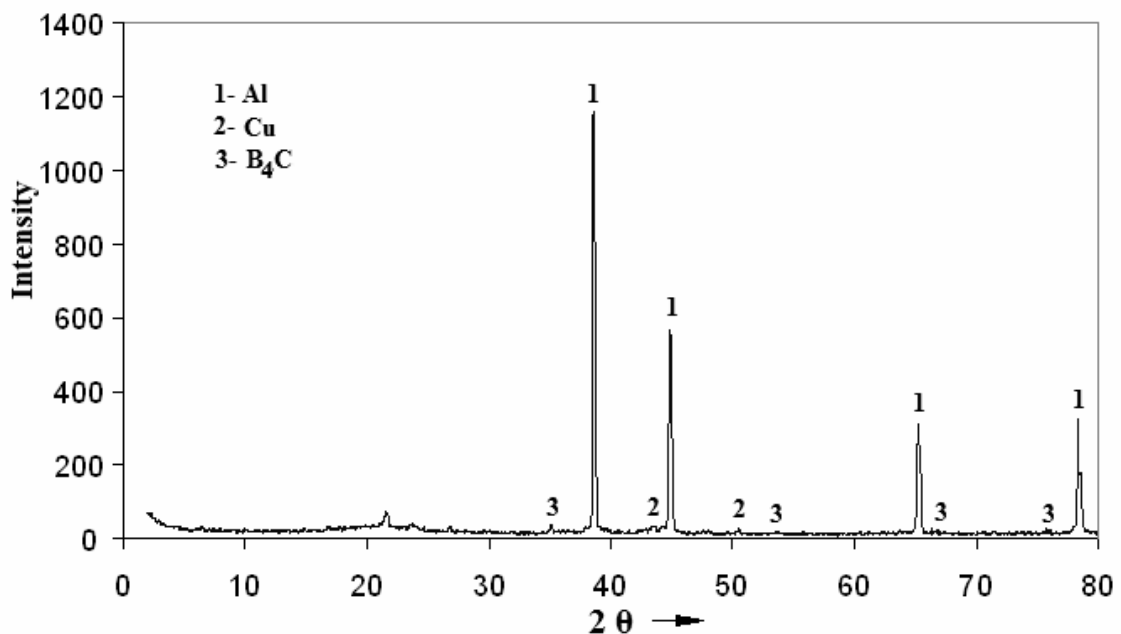
(b)

Şekil 9.30. B4 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kplama tabakası.

B4 nolu numunenin kaplama tabakasından alınan element analiz haritası Şekil 9.31’de verilmiştir. Şekil 9.31’de verilen SEM fotoğrafının alındığı bölgede yapılan element taraması sonucu kaplama tabakasının Al, Cu ve B element dağılımı görülmektedir. Optik mikroyapı resmi ile bağlantılı olarak, element haritasında tespit edilen Al, Cu ve B elementleri ile Şekil 9.32’ de verilen XRD analiz sonucuna göre B4 numunesinin kaplama tabakasinda saf Al, saf Cu ve B₄C bileşiğinin varlığı görülmektedir. Bu elementler ve bor karbür bileşiği, yapı içerisinde oldukça dengeli bir dağılıma sahip bulunmaktadır. Alüminyum ve bakırın, bu numunede oksitlenmeden yapıda kalmasını bor karbürün kaynak esnasında bu elementler için bir örtü görevi yapması sağlamıştır.



Şekil 9.31. B4 nolu numunenin tarama yöntemiyle elementel haritası.



Şekil 9.32. B4 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

B gurubu numunelerin optik mikroyapı resimleri incelendiğinde B1 numunesinde alt malzeme ile uyumlu bir kaplama tabakası elde edilmiştir. Al + % 5 Cu tozu ile kaplanan B1 numunesinde gözenek miktarı yok denecek kadar azdır. Saf Al tozu içerisine ilave edilen % 5 değerindeki Cu ile kaplama sonrasında XRD analizi ile tespit edilmiş AlCu bileşiği de oluşmuştur. B₄C bileşiğinin kaplama tabakası içerisine ilave edilmesi ile gözenek miktarının çoğaldığı görülmüştür. % 5 B₄C ilaveli B2 numunesinde bu gözenek artışı açıkça görülmektedir. B3 ve B4 numunelerinde de aynı şekilde sırasıyla % 10 ve % 20 B₄C ilavesi yapılmıştır. Karbür bileşiğindeki bu artışa bağlı olarak en yüksek gözenek miktarı % 20 B₄C ilaveli B4 numunesinde tespit edilmiştir. Sinterleşmenin de iyi olmadığı bor karburlu numunelerde, bor

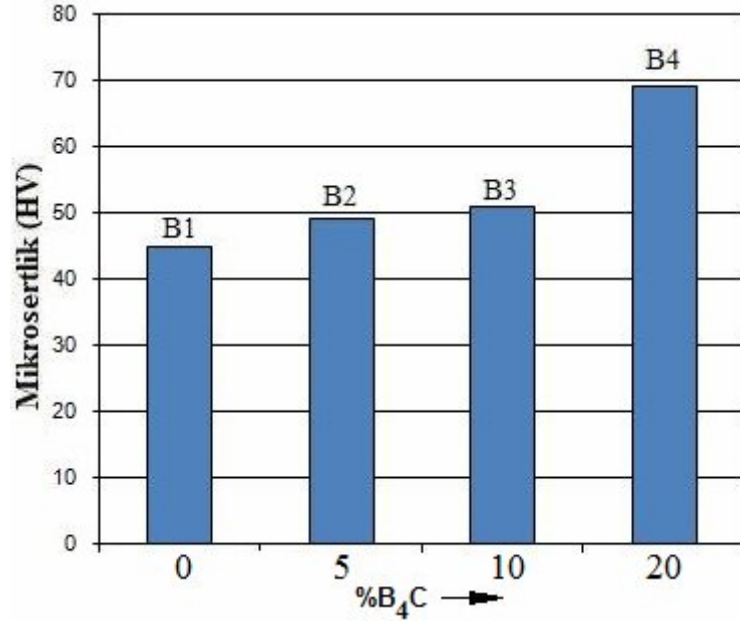
karbürün ergime sıcaklığının yüksek olması (2450 °C) olması nedeniyle yeterli mukavemete sahip bağlar oluşturulamamıştır. Buda kaplama tabakasının iri gözenekli ve boşluklu olarak ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Kaplama tabakalarından alınan SEM fotoğrafı ve bu bölgenin element haritalarına bakıldığında B1 numunesindeki, Al tozu içinde Cu tozunun dağılımı görülmektedir. B2, B3 ve B4 numunelerinde de, ilave edilen B₄C bileşiğinin kaplama tabakası içerisindeki dağılımı tespit edilmiştir. Bor elementinin EDX analizi ile tespit edilememesinden dolayı element haritası (MAP) yöntemi ile B₄C' ler tespit edilmiştir. Element haritaları incelendiğinde alüminyum alaşımı yüzeyine kaplanan Al + %5 Cu ve Al + % 5 Cu + % B₄C toz karışımlarının kaplama tabakası içerisinde dağılımı görülmektedir. Tozların mekanik olarak karıştırıldıktan sonra, alt malzeme yüzeyine plazma püskürtme sistemiyle kaplanması sonucu yüzeyde elde edilen tabakalarda Al + %5 Cu tozu ile kaplanan B1 numunesinde Cu elementinin dağılımı renkli olarak element haritası analizinde görülmektedir. Kaplama tabakasına B₄C ilave edilerek yapılan kaplamalarda B2, B3 ve B4 numunelerinin element haritalarında ise Cu elementi ile birlikte B₄C bileşiğinin oluşumunu sağlayan Bor (B) elementinin de dağılımı renkli olarak görülmektedir. Bor element dağılımının, %20 B₄C ilaveli B4 numunesine gidildikçe kaplama tabakasına ilave edilen B₄C miktarındaki artışa bağlı olarak arttığı görülmektedir.

XRD analizlerinde B1 numunesinde saf Al, saf Cu ve AlCu bileşiğinin varlığı tespit edilmiştir. B2, B3 ve B4 numunelerinde ise kaplama tabakası içerisinde saf Al, saf Cu ile B₄C bileşiği belirlenmiştir. XRD analizinde B₄C piklerinin çok düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin XRD incelemesinde kaplama tabakasından gelen diğer piklere ait ışınların çok kuvvetli olması ve B₄C pikini bastırmasının neden olduğu düşünülmektedir. Yapıdaki bakır ve alüminyumun çevre oksijeni etkisinde oksitlenmesini, bor karbürün çevreyle ilişkiyi kesici örtü etkisi sağlamıştır.

9.2.2. Mikrosertlik ve Çekme Dayanımı İncelemesi

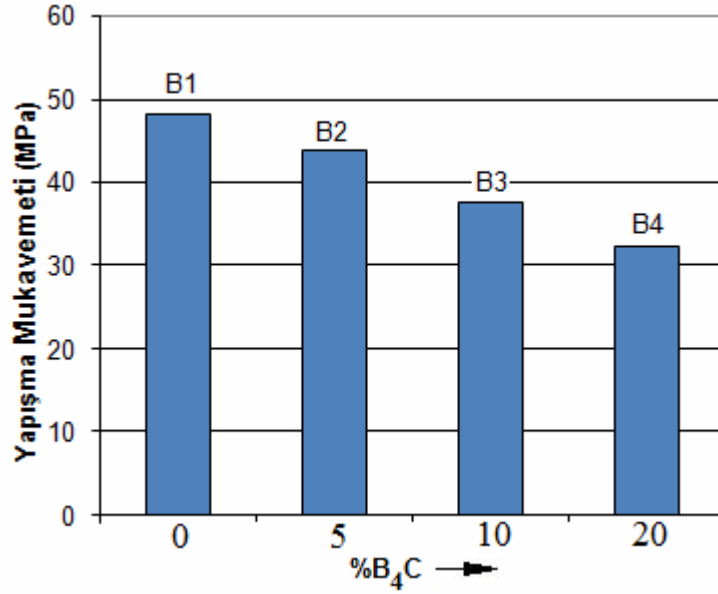
B1, B2, B3 ve B4 nolu numunelere ait mikrosertlik grafiği Şekil 9.33'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde Al + % 5 Cu ilaveli ve partikül (B₄C) takviyesiz B1 numunesinde ortalama 45 HV sertlik değeri tespit edilmiştir. B1 numunesinin sertlik değerinin düşük olmasına, plazma püskürtme sisteminde gerçekleştirilen kaplamalarda meydana gelen gözenekli yapı neden olmaktadır. % 5 B₄C ilave edilen B2 numunesinde, partikül takviyesinin etkisi ile 49 HV sertlik değeri tespit edilmiştir. Partikül takviye oranının artmasıyla, % 10 B₄C ilaveli B3 numunesinde 51 HV, % 20 B₄C ilaveli numunede ise 69 HV sertlik değerleri tespit edilmiştir. Kaplamalar sonrasında mikroyapı resimlerinden de anlaşılabileceği gibi kaplama tabakası gözenekli

bir yapıya sahiptir. Partikül takviye oranının artmasıyla gözenek miktarı artmıştır. Fakat ilave edilen B_4C partiküllerinin yüksek sertlik değerine sahip olması, partikül takviyesi ile sertliğin artmasına neden olmuştur. Sertlik ölçümleri sonunda en yüksek sertlik değerinin % 20 B_4C ilaveli B4 numunesinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 9.33. B grubu numunelere ait mikrosertlik grafiği.

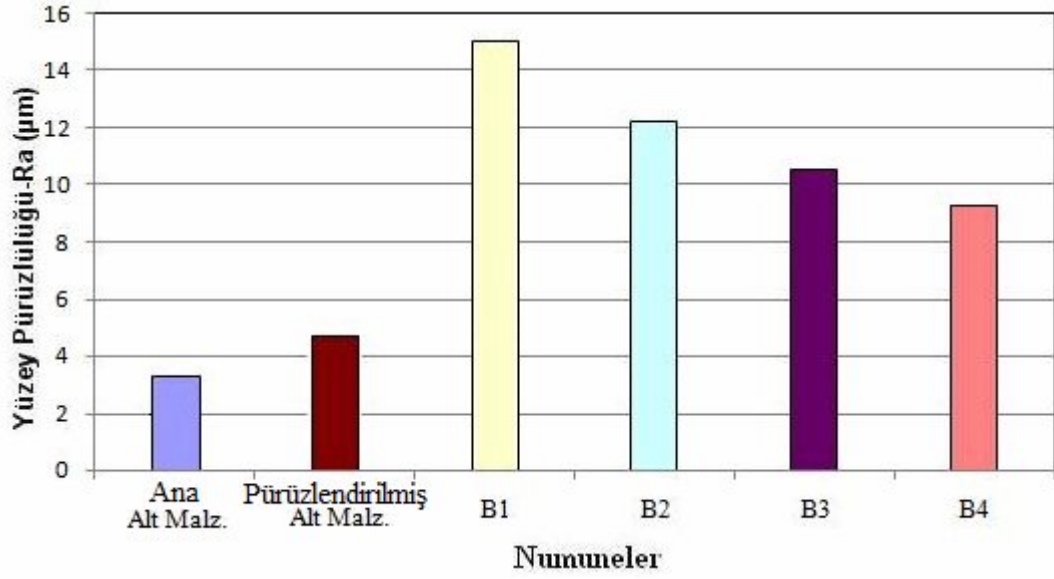
B grubu numunelere ait çekme deneyi sonrası yapışma mukavemetini gösteren grafik Şekil 9.34’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek yapışma mukavemetinin Al + % 5 Cu ile kaplanan B_4C takviyesi bulunmayan B1 numunesinde tespit edildiği görülmektedir. Al + % 5 Cu toz karışımına ilave edilen B_4C tozunun mikroyapı incelemelerinde gözenek miktarının arttırdığını söylemiştik. Gözenek miktarındaki bu artış, kaplama tabakasının alt malzemeye tutunmasını düşürmektedir. B_4C bileşiğinin ilavesi ile, metaller arasındaki atom alışverişi azaldığından, yapışma mukavemeti de düşmüştür. Ayrıca alt malzeme ile B_4C bileşiğinin ısı iletim katsayıları arasındaki farktan dolayı, kaplama tabakasının katılaşması esnasında farklı soğuma hızları meydana gelecektir. Buda kaplama tabakası içerisinde iç gerilmelere neden olacaktır. Bu nedenle B_4C ilave oranının artmasıyla yapışma mukavemeti de düşmektedir. B1 numunesinde elde edilen 48,08 MPa değerindeki yapışma mukavemeti, % 5 B_4C ilaveli B2 numunesinde 43,89 MPa değerine düşmüştür. Bu değer % 10 B_4C ilaveli B3 numunesinde 37,63 MPa, % 20 B_4C ilaveli B4 numunesinde ise 32,29 MPa değerine düşmüştür. Yapışma mukavemeti değerlerinin B_4C ilavesiz B1 numunesinde yüksek değerde olması, bu kaplamanın B2, B3 ve B4 nolu numunelere göre daha üstün olduğu anlamına gelmez, sadece bize kaplamanın kalitesi ve kullanımı esnasındaki verimi hakkında bilgi verir.



Şekil 9.34. B grubu numuneler ait yapışma mukavemeti değerleri.

9.2.3. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü

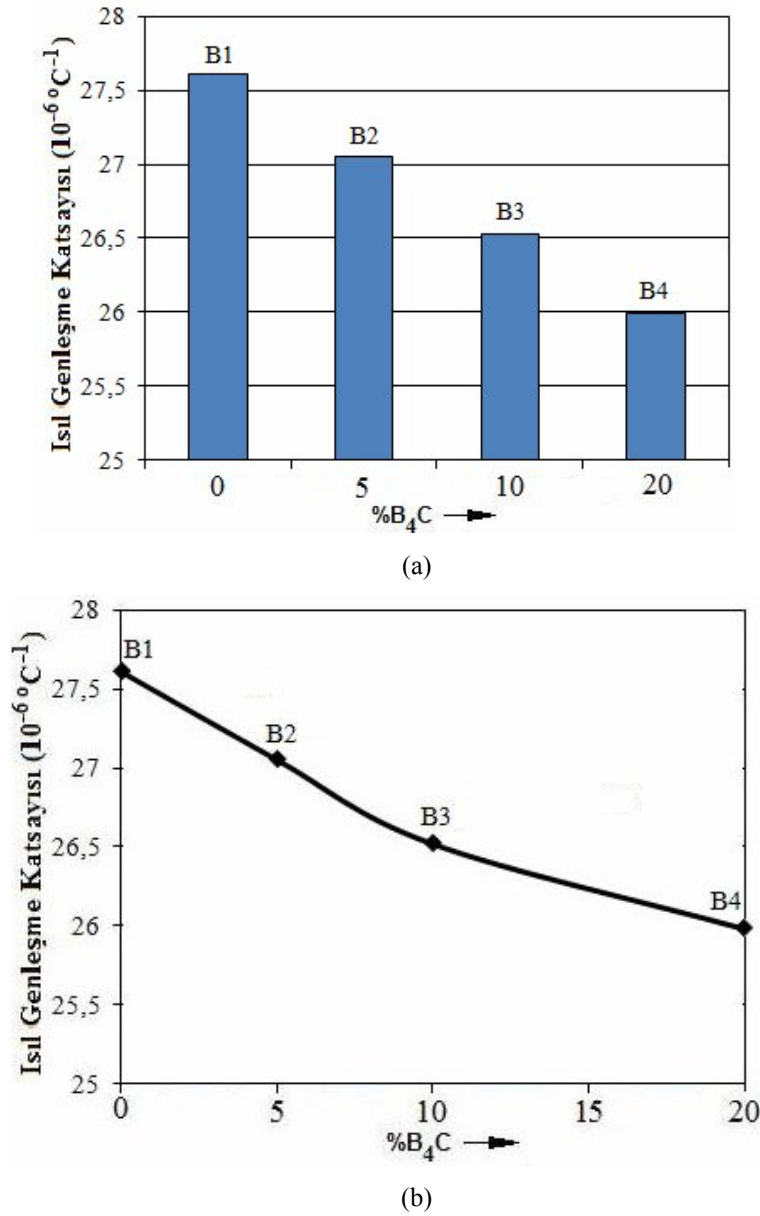
Numunelerin kaplama öncesi, yüzey pürüzlendirme işlemi sonrası ve kaplama sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Ölçümlerde, kaplama işlemi uygulanmamış numunede 3,324 μm , yüzeyi sadece pürüzlendirilmiş numunede ise 4,725 μm yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Numune yüzeyine yapılan kaplamalar ile B1, B2, B3 ve B4 numunelerinde farklı yüzey pürüzlülük değerleri tespit edilmiştir. Yüzeye Al + % 5 Cu kaplanan B1 numunesinde 15,07 μm pürüzlülük değeri tespit edilmiştir. B1 numunesinde elde edilen yüzey pürüzlülük değeri oldukça yüksek bir pürüzlülük değeridir. % 5 B₄C ilave edilen B2 numunesinde 12,19 μm , % 10 B₄C ilaveli B3 numunesinde 10,55 μm ve % 20 B₄C ilaveli B4 numunesinde ise 9,31 μm yüzey pürüzlülük değerleri tespit edilmiştir. Şekil 9.35’de görüldüğü gibi Al + % 5 Cu içerisine ilave edilen B₄C miktarının artması ile yüzey pürüzlülük değeri düşerek yüzey kalitesi kısmen artmıştır. B4 nolu numunede B1 numunesine kıyasla daha düşük pürüzlülük miktarı tespit edilmiştir. Dolayısı ile, artan bor karbür miktarı ile kaplama tabakasında daha iyi bir kenetlenme ve sinterleşme meydana gelmektedir.



Şekil 9.35. B grubu numunelere ait alt malzeme ve kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.

9.2.4. Isıl Genleşme İncelemesi

B grubu numunelerin ısı genleşme katsayıları Şekil 9.36’da verilmiştir. Grafik incelendiğinde B1 numunesinin en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. İlave edilen B₄C bileşiği $4,73 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ gibi düşük bir ısı genleşme katsayısına sahiptir. B₄C tozunun Al + %5 Cu toz karışımına ilave edilmesi ile elde edilen B2, B3 ve B4 numunelerinin ısı genleşme katsayıları incelendiğinde, düşük ısı genleşme katsayısına sahip B₄C miktarının artmasıyla ısı genleşme katsayısı düştüğü görülmektedir. %5 B₄C ilaveli B2 numunesinde $27,056 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, %10 B₄C ilaveli B3 numunesinde $26,524 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ve %20 B₄C ilaveli B4 numunesinde ise $25,987 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ısı genleşme katsayıları tespit edilmiştir. Gözenek miktarının, kaplamaların ısı genleşme katsayılarını düşürdüğü bilinmektedir. B₄C bileşiğinin artması ve buna paralel olarak gözenek miktarının artması ile kaplanmış B grubu numunelerin ısı genleşme katsayıları düşmüştür. En düşük ısı genleşme katsayısı %20 B₄C ilaveli B4 numunesinde elde edilmiştir.



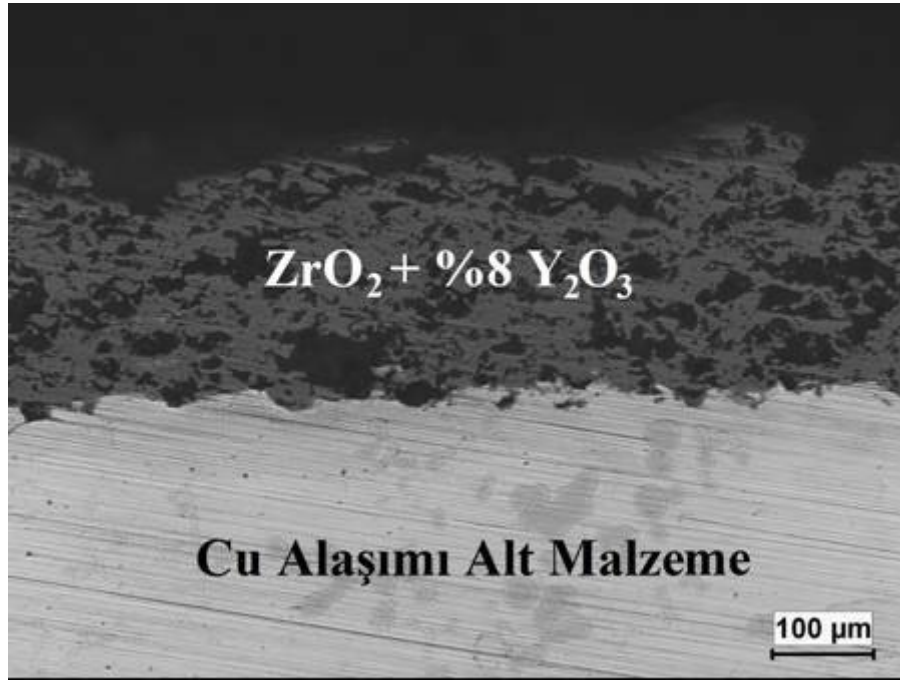
Şekil 9.36. B grubu numunelere ait ısıl genleşme katsayı değerleri (250 °C’de)

9.3. Alüminyum Bronzu Yüzeyine (Cu alaşımı) Oksit Kaplama

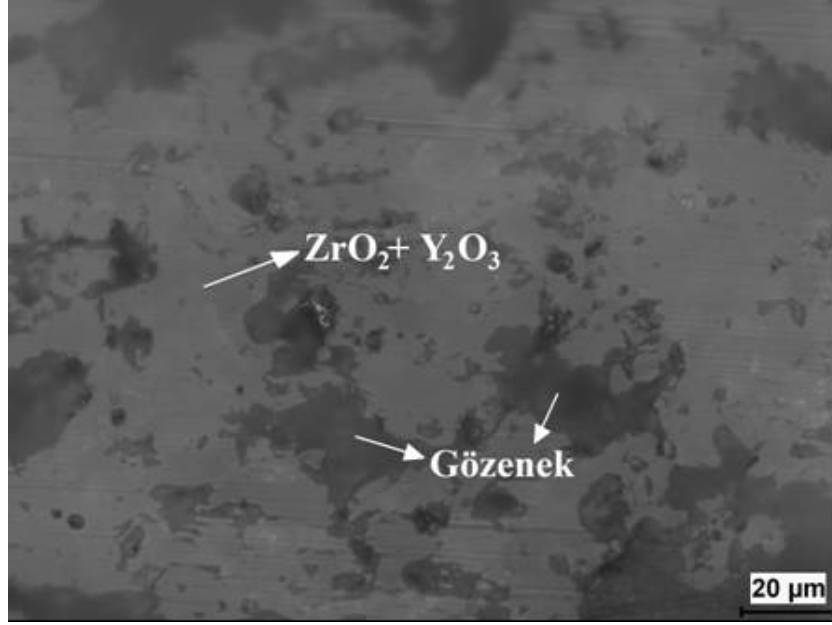
9.3.1. Mikroyapı İncelemesi

Alüminyum bronz (Cu alaşımı) yüzeyine $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3$ ve $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3 + \% 5 \text{ Al}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3 + \% 10 \text{ Al}_2\text{O}_3$, $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3 + \% 20 \text{ Al}_2\text{O}_3$ oksit tozlarının kaplanması işlemi, atmosferik plazma püskürtme sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Plazma püskürtme yöntemi ile alüminyum bronz yüzeyine yapılan oksit kaplamalarda yaklaşık olarak 210 μm kalınlığında tabakalar elde edilmiştir. % 10 Al_2O_3 ilave edilerek gerçekleştirilen kaplamada ise, yaklaşık 100 μm kalınlığında bir tabaka elde edilmiştir. Bunun sebebi de plazma

püskürtme kaplama yönteminin otomatik değil de, elle yapılmış olması ve operatör yeteneğiyle doğrudan ilişkili olan elle yapılan kaplamalarda üniform kalınlıklı tabakalara ulaşamamasıdır. Alüminyum bronzu yüzeyine $ZrO_2 + \% 8 Y_2O_3$ kaplanan C1 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.37’de verilmiştir. C1 numunesinin optik mikroyapı resimleri incelendiğinde tabaka içerisinde geniş hacimli gözeneklerin olduğu görülmektedir. Ergime sıcaklıkları oldukça yüksek olan bu bileşiklerle yapılan kaplamalarda kaplama süresinin azlığı nedeniyle, sinterleşme ve kenetlenme etkileri yetersiz kalmaktadır.



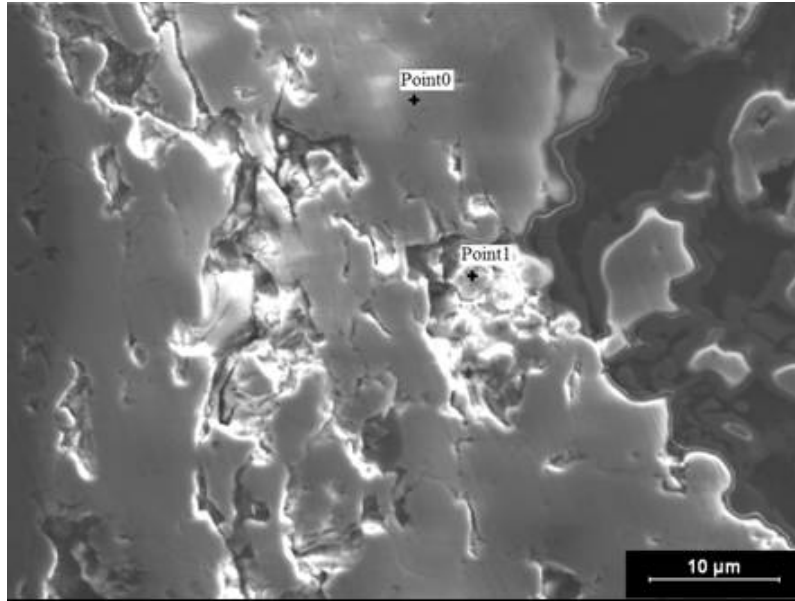
(a)



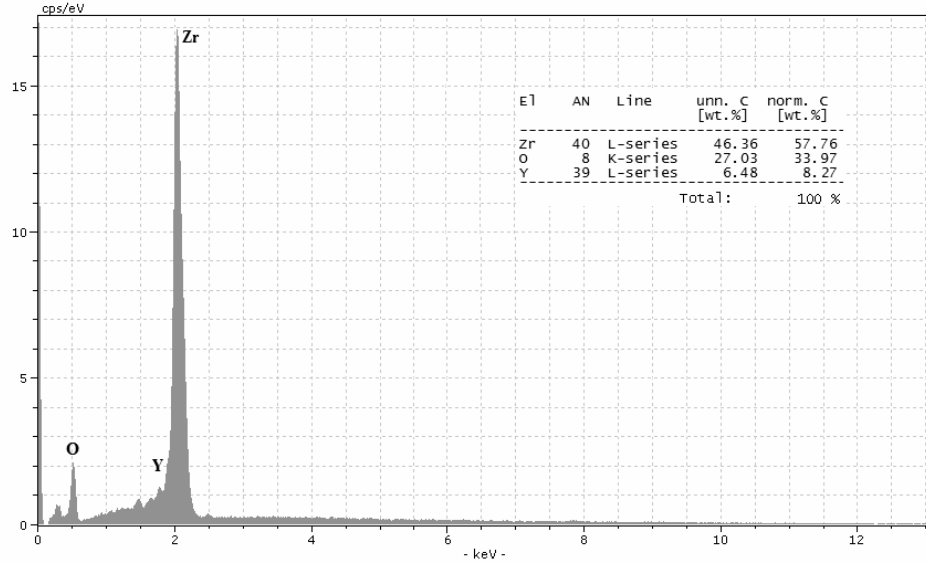
(b)

Şekil 9.37. C1 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kaplama tabakası.

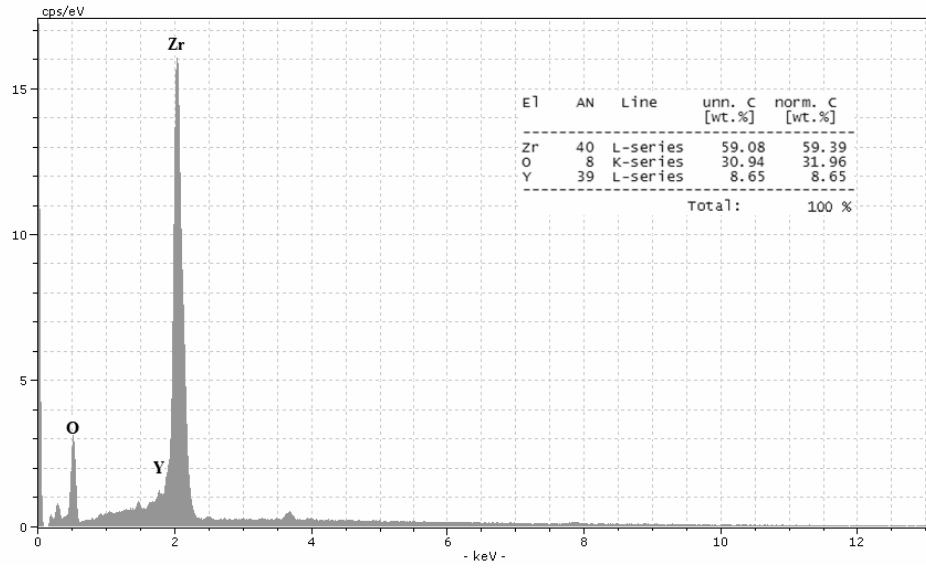
Şekil 9.38’de verilen SEM fotoğrafında, kaplama tabakasından alınan EDX analizlerinin yerleri görülmektedir. Şekil 9.39a ve b ’de verilen EDX analizleri incelendiğinde % 8 Y_2O_3 ilave edilmiş ZrO_2 ile kaplanmış C1 numunesinde Zr, Y ve O elementleri tespit edilmiştir. Şekil 9.40’da verilen XRD analize dayanılarak bu noktaların yüzeye kaplanan ZrO_2 ve Y_2O_3 bileşiklerinden oluştuğu ve zirkonyum oksidin yüzeyde hakim yapı olarak bulunduğu söylenebilir.



Şekil 9.38. C1 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.

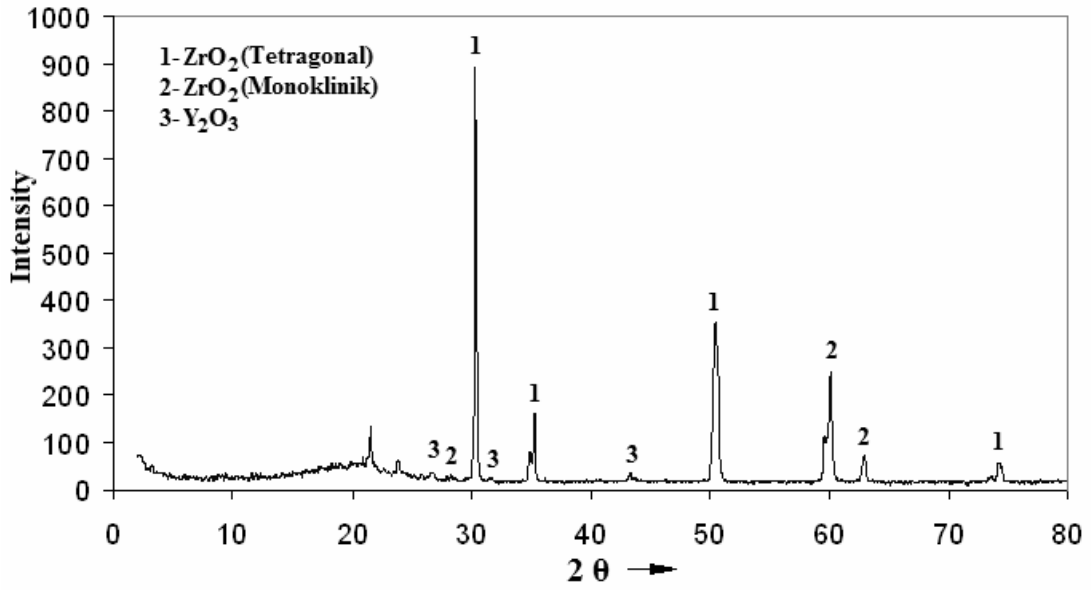


(a)



(b)

Şekil 9.39. C1 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz noktaları, a) 0 noktası, b) 1 noktası.

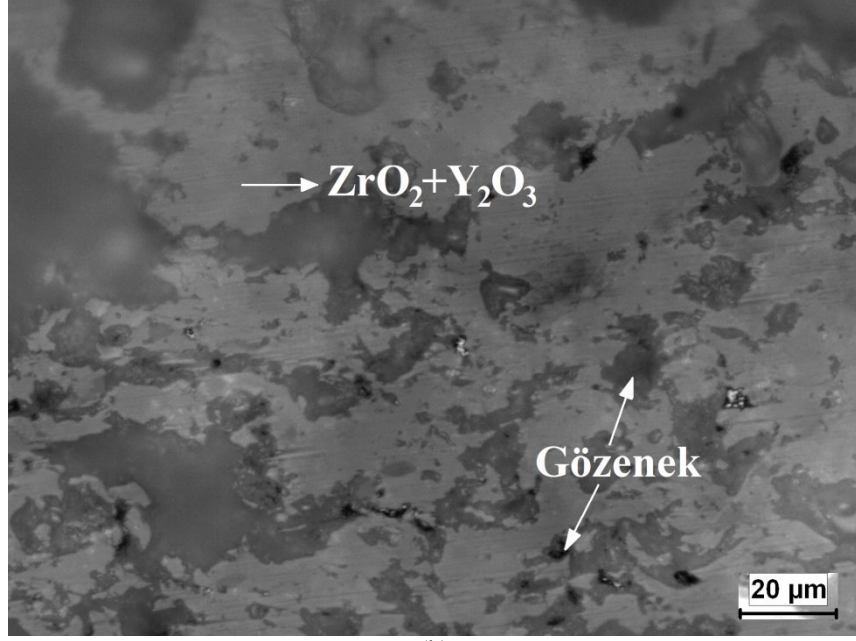


Şekil 9.40. C1 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

Alüminyum bronzu yüzeyine ZrO_2 + % 8 Y_2O_3 + % 5 Al_2O_3 kaplanan C2 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil C5 de verilmiştir. C2 numunesinin optik mikroyapı resimleri (Şekil 9.41) incelendiğinde tabaka içerisinde geniş gözeneklerin oluştuğu görülmektedir.



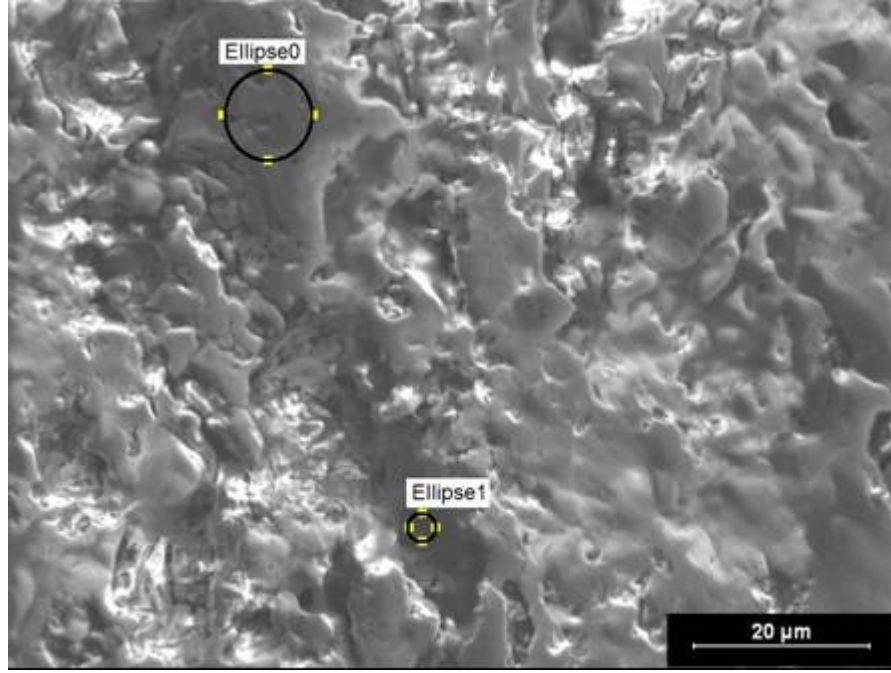
(a)



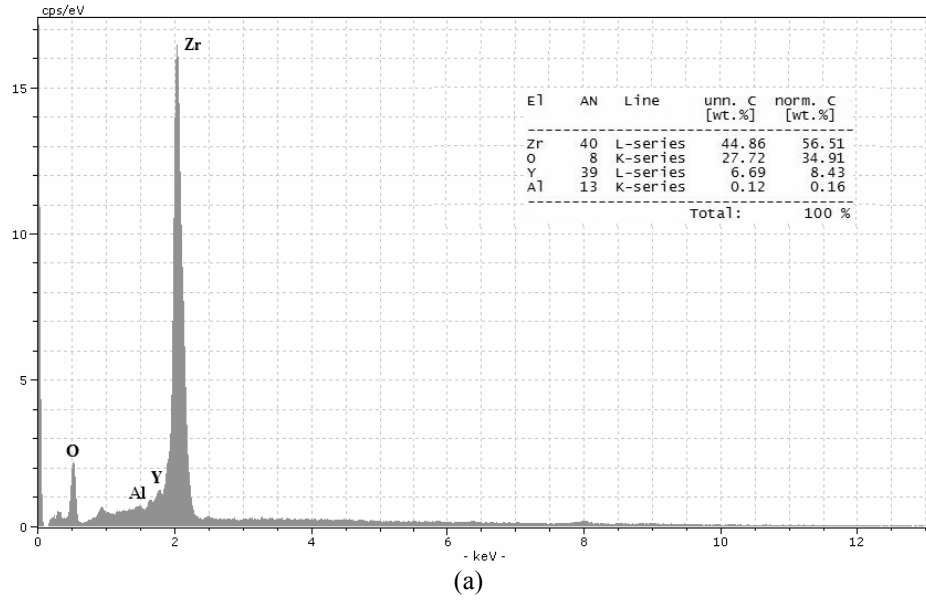
(b)

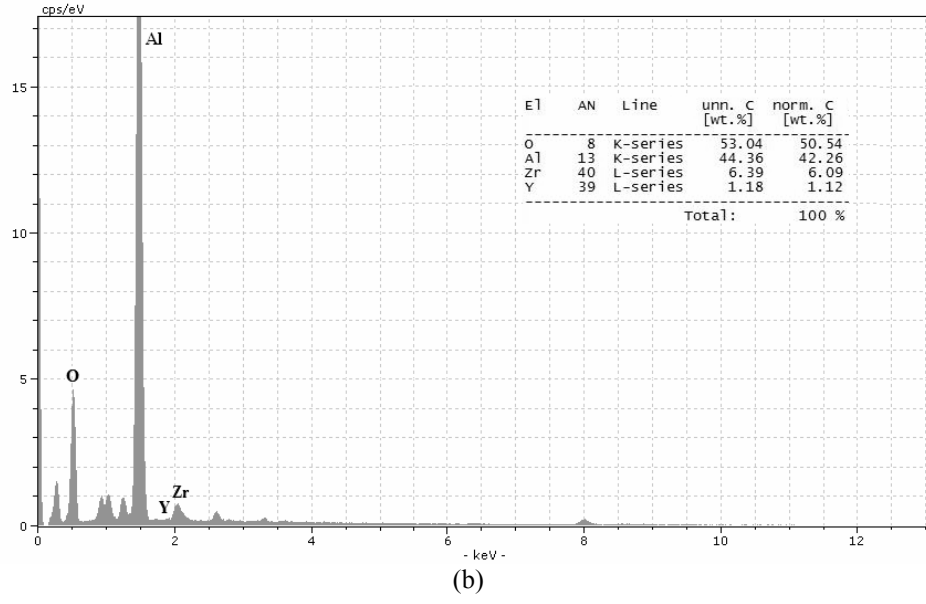
Şekil 9.41. C2 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kaplama tabakası.

Şekil 9.42’de verilen SEM fotoğrafında, kaplama tabakasından alınan EDX analizlerinin yerleri görülmektedir. Şekil 9.43’te verilen EDX analizleri incelendiğinde % 8 Y_2O_3 ilave edilmiş ZrO_2 içerisine % 5 Al_2O_3 ilave edilerek kaplanmış C2 numunesinde Zr, O, Y ve Al elementleri tespit edilmiştir. Şekil 9.43a’da verilen (0) bölgesinin EDX analizinde ağırlıkça % 56.51 Zr, % 34.91 O ve % 8.43 Y tespit edilmiştir. Dolayısı ile (0) bölgesinde; % 66.42 ZrO_2 , % 10.71 Y_2O_3 bulunmaktadır. Bu da bu noktada itriyum oksit açısından çok az bir yoğunlaşma olduğunu ve bu noktayı büyük ölçüde bu iki bileşiğin oluştuğunu ortaya koymaktadır. Şekil 9.43b’de verilen (1) bölgesinden alınan EDX analizinde % 50.54 O, % 42.26 Al ve % 6.09 Zr elementleri tespit edilmiştir. XRD analizi incelendiğinde (1) bölgesinin yoğun olarak 80.15 oranında Al_2O_3 ve ayrıca % 7.16 oranında ZrO_2 bileşiklerini içerdiği görülmektedir. Mevcut ZrO_2 bileşikleri, Şekil 9.44’deki XRD analizinden de görüleceği gibi, yapıda tetragonal ve monoklinik kafes sistemlerine sahip iki farklı modifikasyonda ortaya çıkmaktadır.

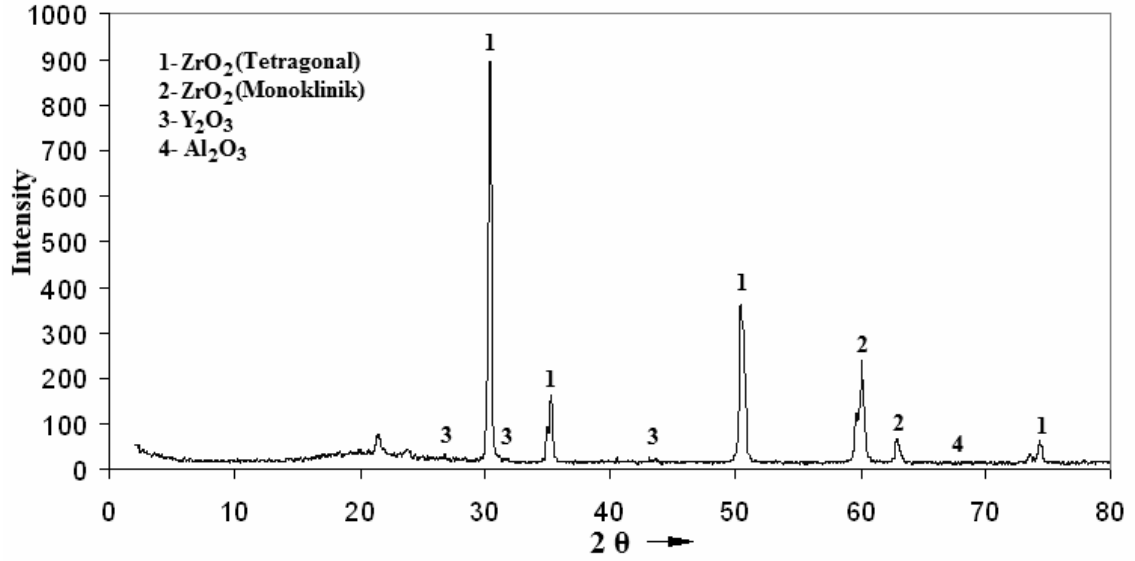


Şekil 9.42. C2 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.





Şekil 9.43. C2 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri, a) 0 bölgesi, b) 1 bölgesi.

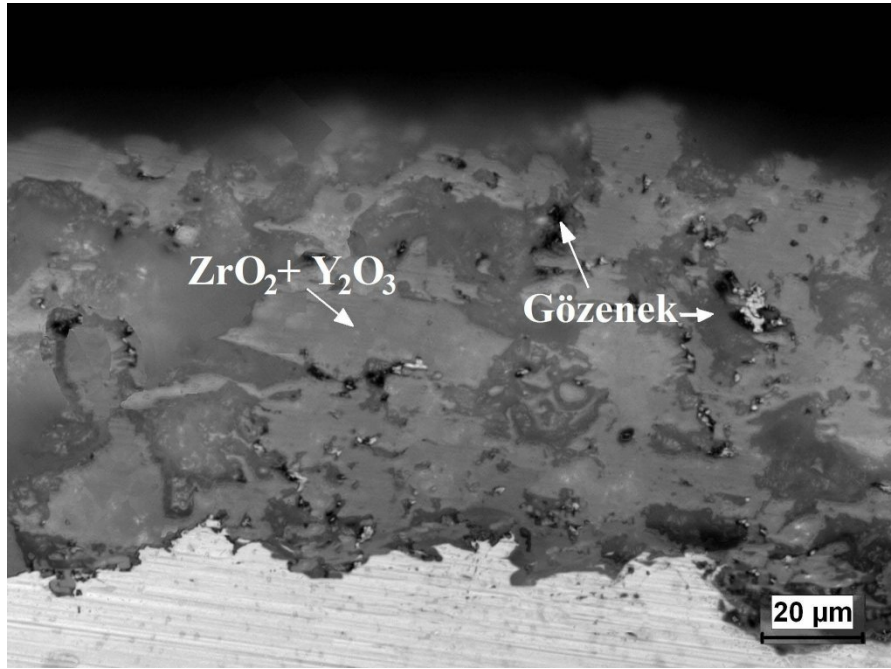


Şekil 9.44. C2 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

Alüminyum bronzu yüzeyine ZrO₂ + % 8 Y₂O₃ + % 10 Al₂O₃ kaplanan C3 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.45’de verilmiştir. C3 numunesinin optik mikroyapı resimleri incelendiğinde tabaka içerisinde geniş hacimli gözeneklerin olduğu görülmektedir.



(a)

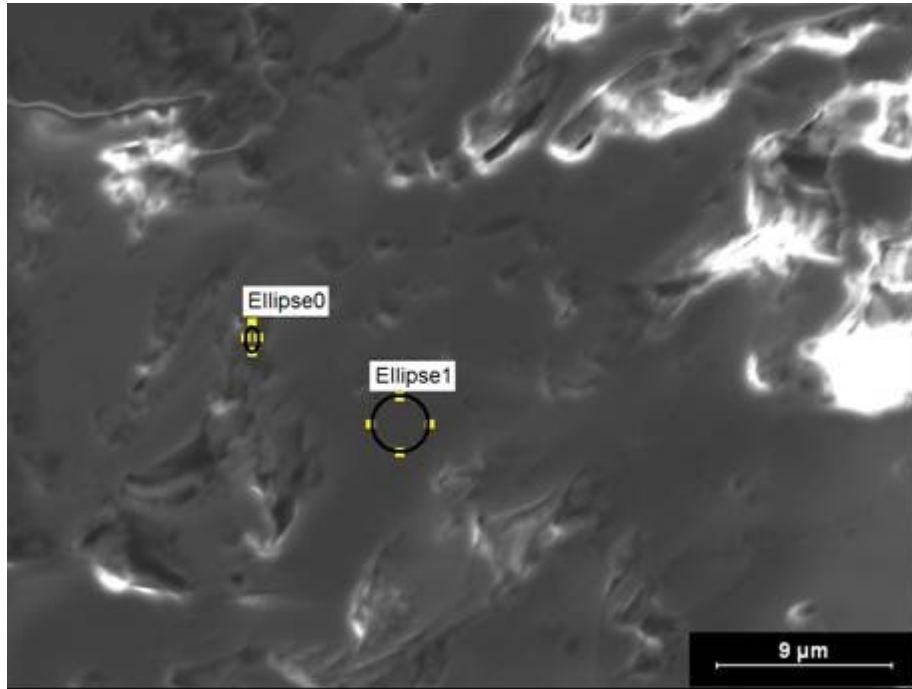


(b)

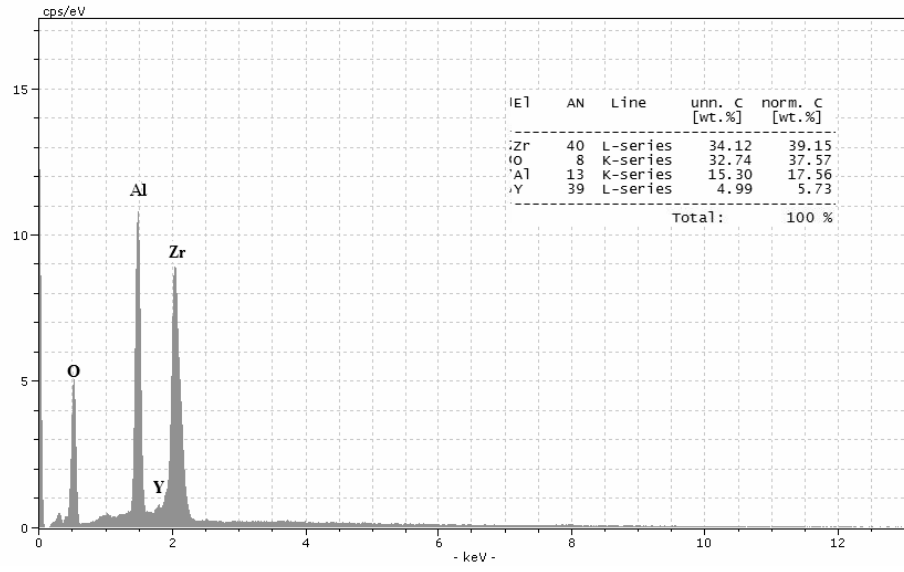
Şekil 9.45. C3 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kaplama tabakası.

Şekil 9.46’da verilen SEM fotoğrafında, kaplama tabakasından alınan EDX analizlerinin yerleri görülmektedir. Şekil 9.47’de verilen EDX analizleri incelendiğinde % 8 Y_2O_3 ilave edilmiş ZrO_2 içerisine % 10 Al_2O_3 ilave edilerek kaplanmış C3 numunesinde Zr, O, Al ve Y elementleri tespit edilmiştir. Şekil 9.47a’da verilen (0) bölgesinin EDX analizinde

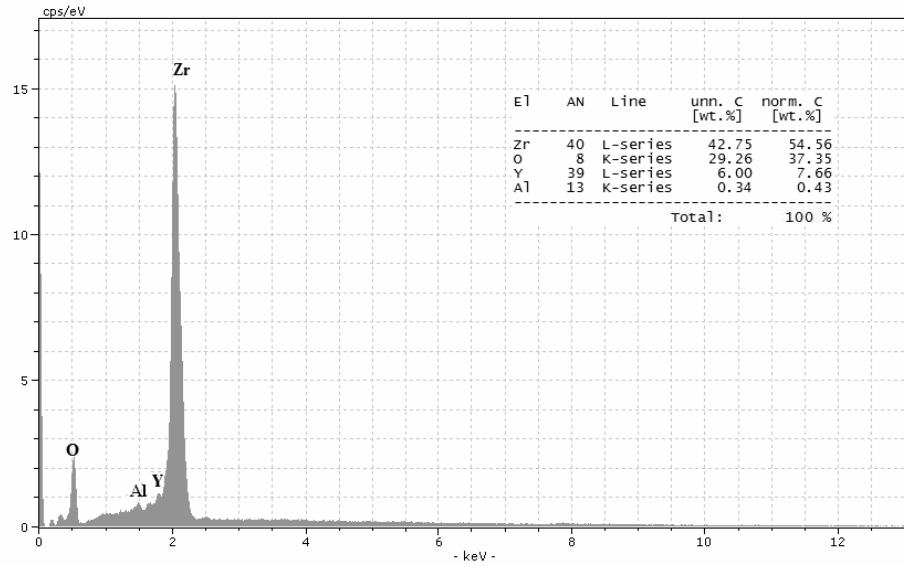
ağırlıkça % 39.15 Zr, % 37.57 O, % 17.56 Al ve % 5.73 Y tespit edilmiştir. Buradan da bölge içerisinde % 46.02 ZrO_2 , % 33.31 Al_2O_3 ve 7.28 Y_2O_3 bulunduğu anlaşılmaktadır. C2 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi (Şekil 9.48) incelediğinde, EDX analizi alınan (0) bölgesinde ZrO_2 , Al_2O_3 ve Y_2O_3 bileşiklerinin olduğu söylenebilmektedir. Şekil 9.47b’de verilen (1) bölgesinden alınan EDX analizinde % 54.56 Zr, % 37.35 O, % 0.43 Al ve % 7.66 Y elementleri tespit edilmiştir. XRD analizinde görülen % 64.13 ZrO_2 , % 0.82 Al_2O_3 ve % 9.73 Y_2O_3 bileşiklerinin EDX alınan (1) bölgesinde olduğu görülmektedir.



Şekil 9.46. C3 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.

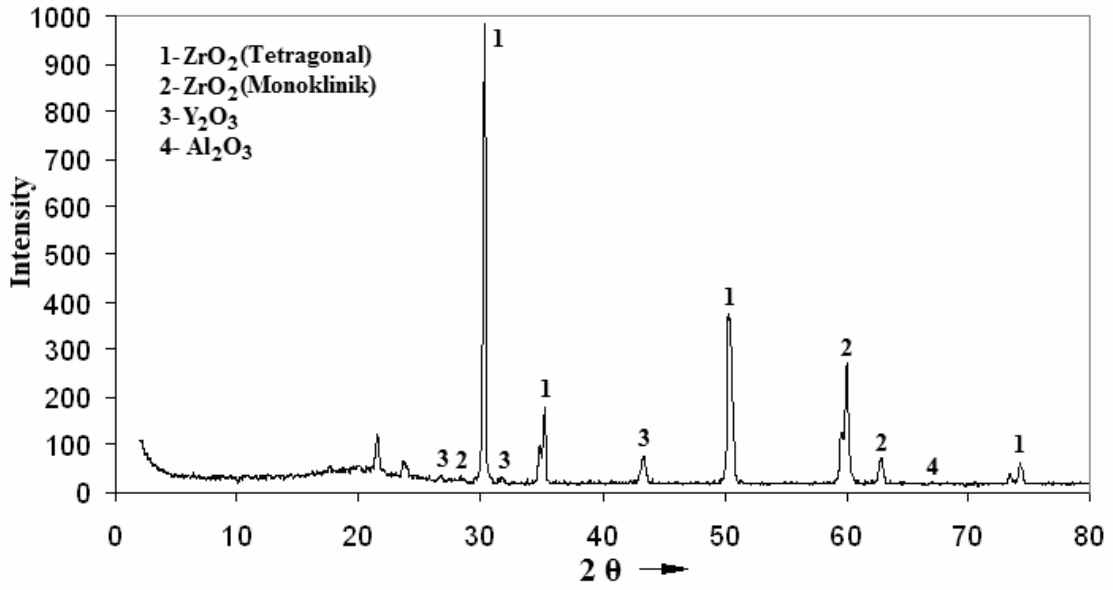


(a)



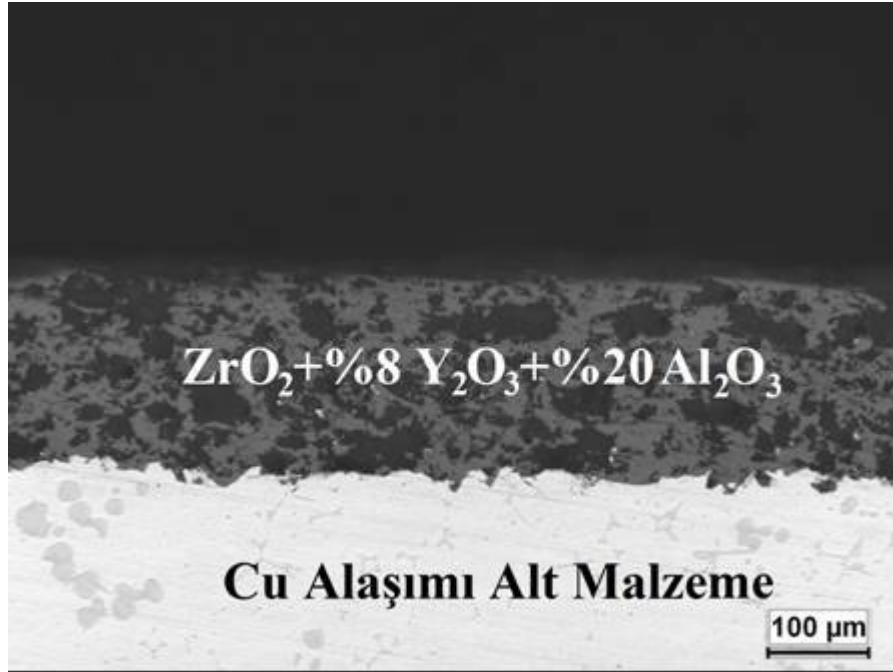
(b)

Şekil 9.47. C3 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri, a) 0 bölgesi, b) 1 bölgesi.

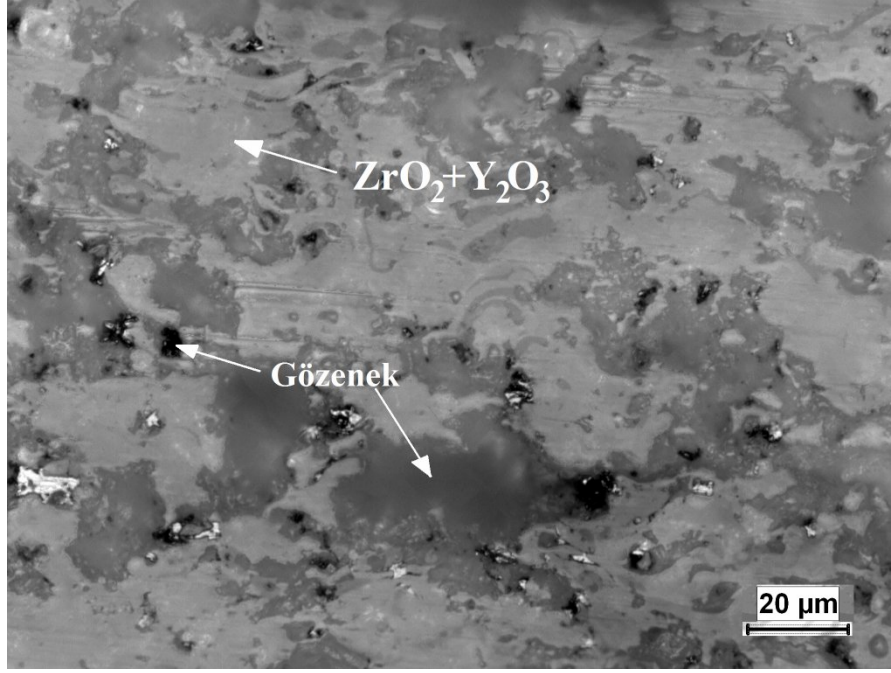


Şekil 9.48. C3 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

Alüminyum bronzu yüzeyine $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3 + \% 20 \text{ Al}_2\text{O}_3$ kaplanan C4 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.49'da verilmiştir. C4 numunesinin optik mikroyapı resimleri incelendiğinde tabaka içerisinde geniş hacimli gözeneklerin olduğu görülmektedir.



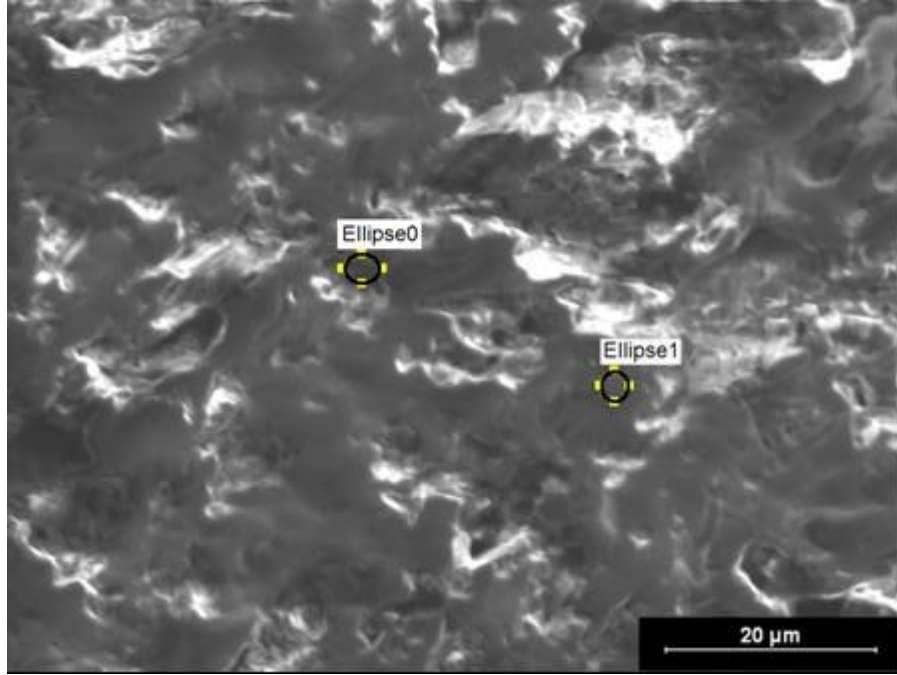
(a)



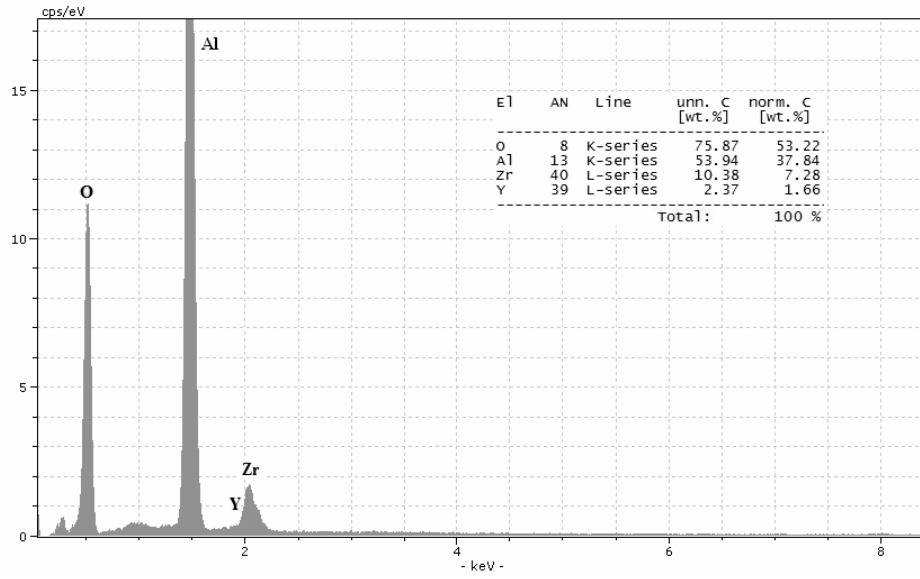
(b)

Şekil 9.49. C4 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kplama tabakası.

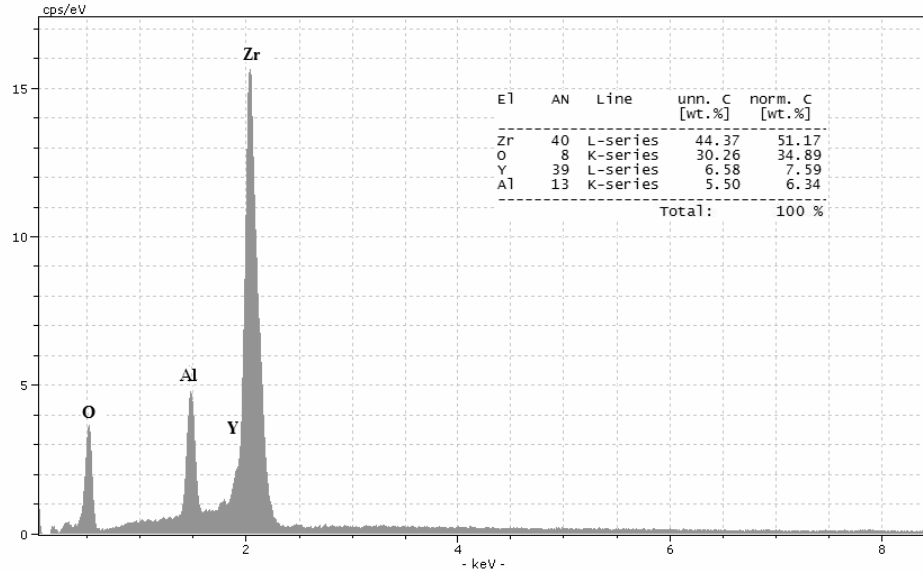
Şekil 9.50’de verilen SEM fotoğrafında, kaplama tabakasından alınan EDX analizlerinin yerleri görülmektedir. Şekil 9.51’de verilen EDX analizleri incelendiğinde % 8 Y_2O_3 ilave edilmiş ZrO_2 içerisine % 20 Al_2O_3 ilave edilerek kaplanmış C4 numunesinde Zr, O, Y ve Al elementleri tespit edilmiştir. (0) bölgesinin EDX analizinde ağırlıkça % 37.84 Al, % 53.22 O ve % 7.28 Zr tespit edilmiştir. C4 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi (Şekil 9.52), EDX alınan (0) bölgesinde Al_2O_3 bileşiği ile birlikte kısmen ZrO_2 bileşiğinin oluştuğunu göstermektedir. (1) bölgesinden alınan EDX analizinde % 51.17 Zr, % 34.89 O ve % 7.59 Y elementleri tespit edilmiştir. XRD analizine incelendiğinde (1) bölgesinde yoğun olarak ZrO_2 ve Y_2O_3 bileşiğinin oluştuğu görülmektedir.



Şekil 9.50. C4 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.

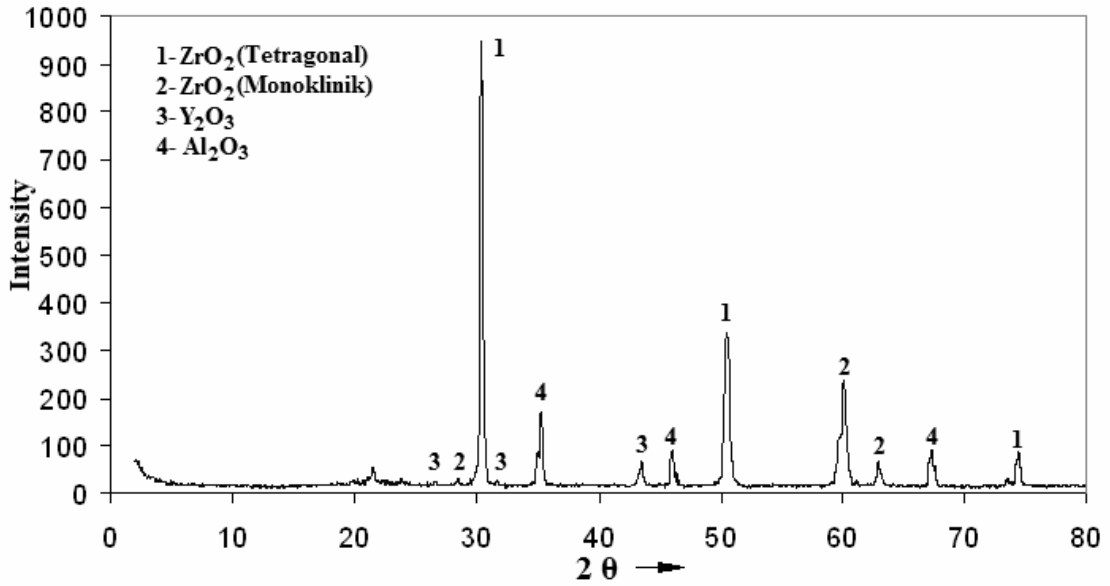


(a)



(b)

Şekil 9.51. C4 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri, a) 0 bölgesi, b) 1 bölgesi.



Şekil 9.52. C4 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

Atmosferik plazma püskürtme yöntemi ile yapılan $ZrO_2 + \% 8 Y_2O_3$ ve $ZrO_2 + \% 8 Y_2O_3 + Al_2O_3$ toz kaplamalarda gözenekli bir yapı elde edilmiştir. $ZrO_2 + \% 8 Y_2O_3$ tozu ile kaplanan C1 numunesinde gözeneklilik miktarının, $ZrO_2 + \% 8 Y_2O_3$ tozu içerisine Al_2O_3 tozu ilavesi ile kaplanan C2, C3 ve C4 numunelerine göre kısmen daha az olduğu görülmektedir. En yüksek gözeneklilik miktarı $\% 20 Al_2O_3$ ilave edilerek kaplanan C4 numunesinde elde

edilmiştir. Optik mikroyapı resimleri incelendiğinde plazma püskürtme ile kaplamada oluşan katmanlı tabakaların C4 numunesinde kısmen oluştuğu görülmektedir.

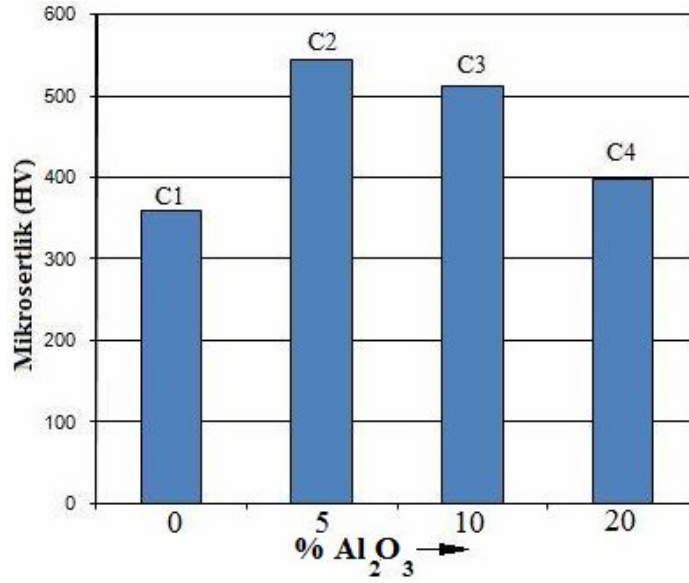
Kaplama tabakalarından alınan EDX analizleri ile birlikte XRD analizleri incelendiğinde, kaplama tabakası içerisinde tespit edilen Zr, Y, Al ve O elementleri ile oluşan tetragonal- ZrO_2 , monoklinik- ZrO_2 , Y_2O_3 ve Al_2O_3 bileşikleri tespit edilmiştir. Literatürde yapılan incelemelerde XRD analiz sonuçlarında tespit edilen bu bileşikler $ZrO_2 + Y_2O_3 + Al_2O_3$ tozları ile gerçekleştirilen plazma püskürtme kaplamalarda da tespit edilmiştir. Genelde $ZrO_2/Y_2O_3/Al_2O_3$ kaplamalarda tetragonal- ZrO_2 fazından monoklinik- ZrO_2 fazına dönüşüm söz konusudur (Vasiliev ve diğ., 2006; Afrasiabi ve diğ., 2008; Shanmugavelayutham ve diğ., 2006). Kısmen dönüşüme uğramış tetragonal- ZrO_2 β - ZrO_2 'i, monoklinik- ZrO_2 ise α - ZrO_2 'i ifade etmektedir. Plazma püskürtme ile gerçekleştirilen kaplamalarda, β - $ZrO_2 = \alpha$ - ZrO_2 allotropik dönüşümü söz konusudur. Tetragonal yapı 2370 °C ile 1170 °C arasında kararlı olup, 1170 °C'nin altında monoklinik yapıya dönüşür. Monoklinik yapı 1170 °C sıcaklıktan oda sıcaklığına kadar kararlıdır (Toplan, 2008).

Al^{+3} iyonu, 1050 °C derecenin altında ZrO_2 içerisinde eriyebilmektedir. Y^{+3} iyonu da yine ZrO_2 içerisinde yüksek bir çözünürlüğe sahiptir. Bu yüksek çözünürlük ile ZrO_2 'in tetragonal ve kübik faz yapıları sayesinde ZrO_2 'in stabilize (kararlı) olmasına yardımcı olur (Vasiliev ve diğ., 2006). Bu nedenle ZrO_2 içerisine farklı oranlarda Y_2O_3 ilavesi ile ZrO_2 kararlı hale getirilmektedir. Literatürde Zirkonyum oksit ile gerçekleştirilen ısı püskürtme kaplamalarında, İttriya (Y_2O_3), stabilizeli Zirkonya (YSZ) şeklinde ifade edilen standartlaşmış tozlar kullanılmaktadır (Afrasiabi ve diğ., 2008; Khoddami ve diğ., 2007; Ilavsky ve diğ., 1999).

9.3.2. Mikrosertlik ve Çekme Dayanımı İncelemesi

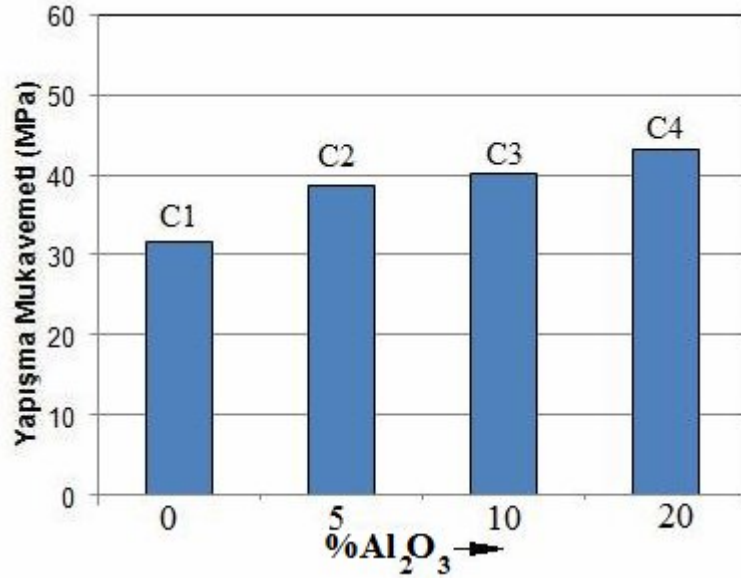
C1, C2, C3 ve C4 nolu numunelere ait mikrosertlik grafiği Şekil 9.53'de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde gözenek miktarının fazla oluşuna bağlı olarak sertlikte düşük değerler tespit edilmiştir. $ZrO_2 + \% 8 Y_2O_3$ tozu ile kaplanan C1 numunesinde 360 HV sertlik değeri tespit edilmiştir. $ZrO_2 + \% 8 Y_2O_3$ tozu içerisine ilave edilen Al_2O_3 tozu ile sertlik miktarı artmıştır. $\% 5 Al_2O_3$ ilaveli C2 numunesinde elde edilen 545 HV sertlik değeri, $\% 10 Al_2O_3$ ilaveli C3 numunesinde 511 HV ve $\% 20 Al_2O_3$ ilaveli C4 numunesinde ise 398 HV olarak tespit edilmiştir. İlave edilen Al_2O_3 tozunun sertlik değerinin yüksek olması kaplama tabakasının sertlik miktarında artış olmasına neden olmuştur. Fakat ilave edilen Al_2O_3 miktarının $\%5$ 'ten $\% 20$ değerine artmasıyla Şekil 9.41 ve Şekil 9.49'da görüldüğü gibi gözenek miktarı artmıştı. Gözenek miktarındaki bu artış sertlik miktarının düşmesine neden olmuştur (Yeşildal, 2007). En

yüksek sertlik değeri % 5 Al_2O_3 ilaveli C2 numunesinde tespit edilirken, en düşük sertlik değeri de $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{Y}_2\text{O}_3$ tozu ile kaplanan ve Al_2O_3 ilavesiz olan C1 numunesinde tespit edilmiştir.



Şekil 9.53. C grubu numunelere ait mikrosertlik grafiği.

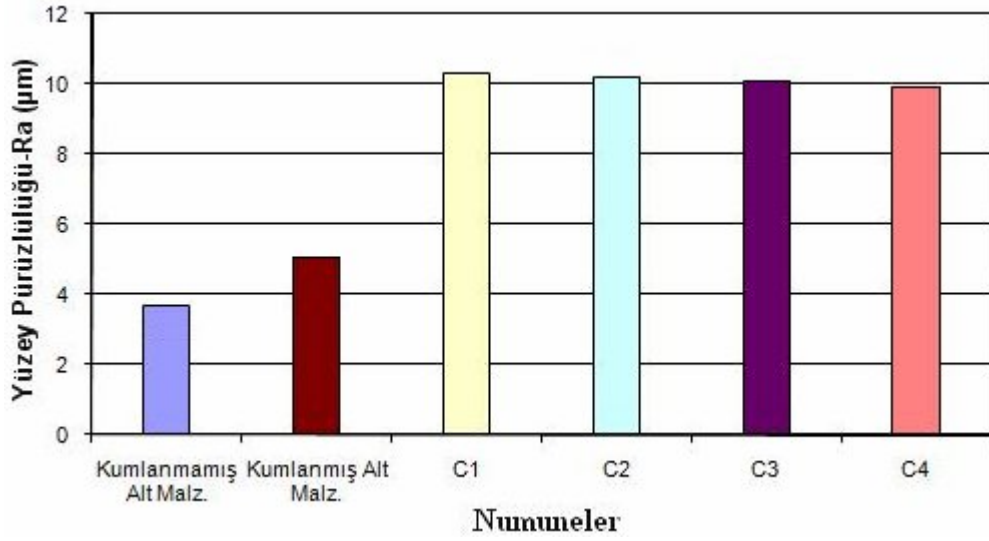
C grubu numunelere ait çekme deneyi sonrası yapışma mukavemetini gösteren grafik Şekil 9.54'te verilmiştir. Grafik incelendiğinde en düşük yapışma mukavemeti 31,71MPa değeri ile $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{Y}_2\text{O}_3$ (YSZ) ile kaplanan Al_2O_3 ilavesiz C1 numunesinde elde edilmiştir. $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{Y}_2\text{O}_3$ tozu içerisine ilave edilen Al_2O_3 tozu ile yapışma mukavemeti artmaktadır. C2, C3 ve C4 numunelerinde sırasıyla 38,62 MPa, 40,19 MPa ve 43,09 MPa yapışma mukavemetleri tespit edilmiştir. En yüksek yapışma mukavemetinin % 20 Al_2O_3 ilaveli C4 numunesinde tespit edildiği görülmektedir. A grubu numunelerde verilen sade Al_2O_3 tozu ile kaplanan A1 numunesinde 42,5 MPa yapışma mukavemeti tespit edilmişti. Diğer literatür araştırmalarında da (Khoddami ve diğ., 2007; Ma ve diğ., 2005) ısıp püskürtme yolu ile $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{Y}_2\text{O}_3$ (YSZ) kaplanan numunelerde 40MPa ve üzeri yapışma mukavemeti elde etmişlerdir. Gözenek miktarındaki artışa rağmen Al_2O_3 'ün yapışma mukavemetinin yüksek oluşu, C4 numunesine gidildikçe yapışma mukavemetinin artmasına neden olmuştur.



Şekil 9.54. C grubu numunelere ait yapışma mukavemeti değerleri.

9.3.3. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü

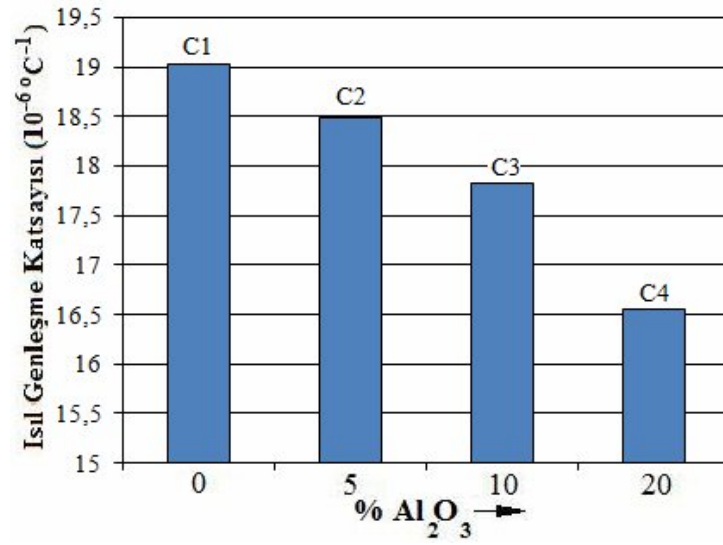
Numunelerin kaplama öncesi, yüzey pürüzlendirme işlemi sonrası ve kaplama sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Ölçümlerde, kaplama işlemi uygulanmamış numunede 3,824 μm , yüzeyi sadece pürüzlendirilmiş numunede ise 5,125 μm yüzey pürüzlülük değerleri tespit edilmiştir. Numune yüzeyine yapılan kaplamalar ile C1, C2, C3 ve C4 numunelerinde farklı yüzey pürüzlülük değerleri tespit edilmiştir. Yüzeye $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3$ kaplanan C1 numunesinde 10,285 μm pürüzlülük değeri tespit edilmiştir. $\% 5 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ilaveli C2 numunesinde 10,181 μm , $\% 10 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ilaveli C3 numunesinde 10,01 μm ve $\% 20 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ilaveli C4 numunesinde ise 9,89 μm yüzey pürüzlülük değerleri tespit edilmiştir. Şekil 9.55'te görüldüğü gibi $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3$ içerisine ilave edilen Al_2O_3 miktarının artması ile yüzey pürüzlülük değeri kısmen düşerek yüzey kalitesi artmıştır. Artan alüminyum oksit miktarı ile, sinterleşmenin iyileşmesi ve pürüzlülüğün azalması; alüminyum oksidin, zirkonyum dioksit ve itriyum oksidin 2700 °C dolaylarında bulunan ergime sıcaklıklarını düşürmesinden ileri gelmektedir.



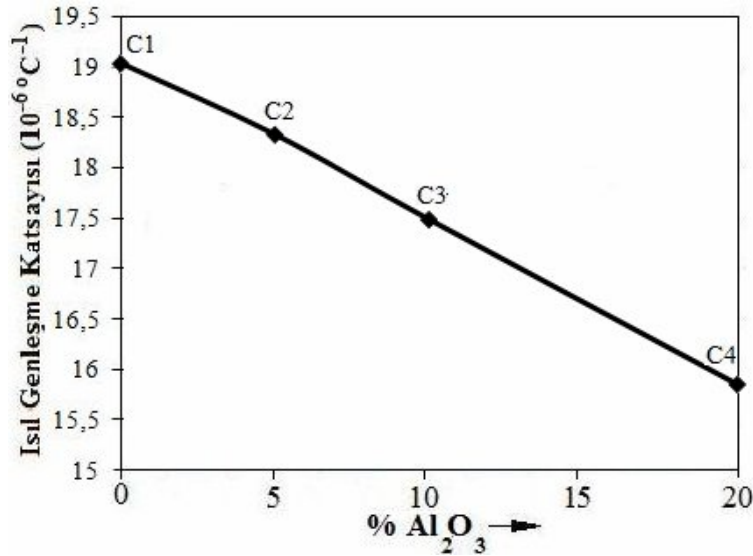
Şekil 9.55. C grubu numunelere ait alt malzeme ve kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.

9.3.4. Isıl Genleşme İncelemesi

C grubu numunelerin ısı genleşme katsayı değerleri Şekil 9.56'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde C1 numunesinin en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir. İlave edilen Al_2O_3 bileşiği $7 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ gibi düşük bir ısı genleşme katsayısına sahiptir. $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3$ tozu ile kaplanan C1 numunesinde, $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3$ tozunun ısı genleşme miktarının düşük olmasına ($10,3 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) bağlı olarak $19,035 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ gibi düşük bir değer elde edilmiştir. Al_2O_3 tozunun $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3$ tozuna ilave edilmesi ile elde edilen C2, C3 ve C4 numunelerinin ısı genleşme katsayıları incelendiğinde, düşük ısı genleşme katsayısına sahip Al_2O_3 miktarının artmasıyla ısı genleşme katsayısının düştüğü görülmektedir. $\%5 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ilaveli C2 numunesinde $18,484 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\%10 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ilaveli C3 numunesinde $17,825 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ve $\%20 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ilaveli C4 numunesinde ise $16,546 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ısı genleşme katsayıları tespit edilmiştir. Gözenek miktarının, kaplamaların ısı genleşme katsayılarını düşürdüğünü söylemiştik. C grubu numunelerde de ilave edilen Al_2O_3 bileşik miktarının artmasıyla gözenek miktarı artmaktaydı. Gözenek miktarındaki bu artış ve ilave edilen Al_2O_3 miktarının ısı genleşme katsayısının düşük oluşuna bağlı olarak C4 numunesine gidildikçe C grubu numunelerde ısı genleşme katsayısı düşmektedir. En düşük ısı genleşme katsayısı $\%20 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ilaveli C4 numunesinde elde edilmiştir.



(a)



(b)

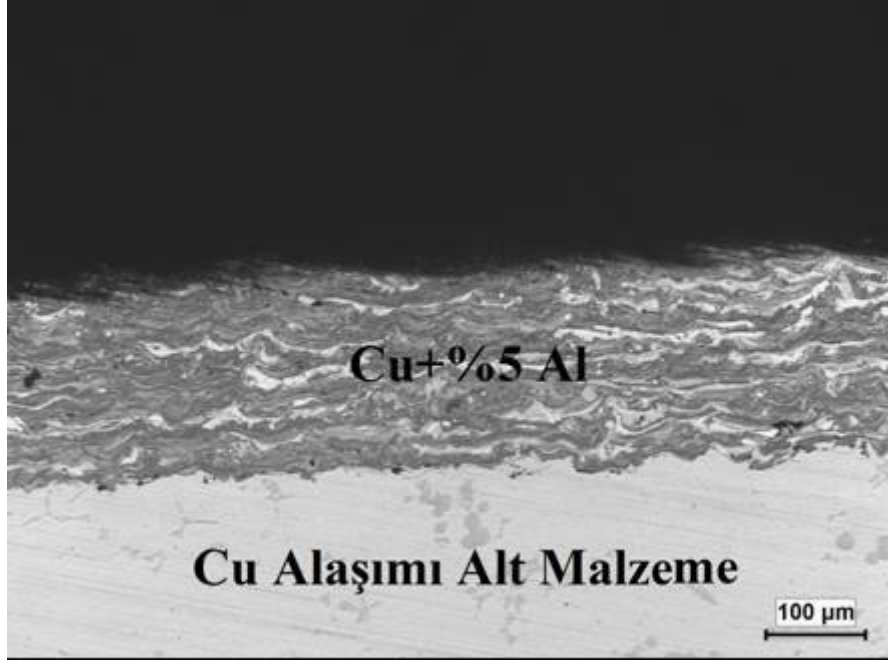
Şekil 9.56. C grubu numunelere ait ısı genleşme katsayı değerleri (250 °C’de).

9.4. Alüminyum bronzu yüzeyine (Cu alaşımı) Karbür Kaplama

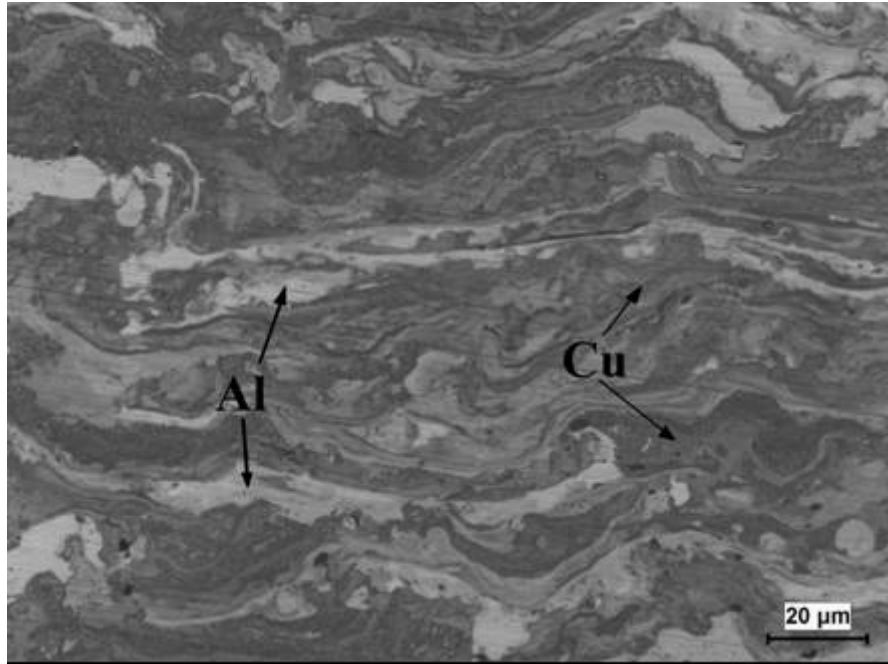
9.4.1. Mikroyapı İncelemesi

Alüminyum bronzu (Cu alaşımı) yüzeyine Cu + % 5 Al ve Cu + % 5 Al + % 5 [Cr₃C₂ + % 7 (NiCr)], Cu + % 5 Al + % 10 [Cr₃C₂ + % 7 (NiCr)] ve Cu + % 5 Al + % 20 [Cr₃C₂ + % 7 (NiCr)] karbür toz karışımlarının kaplanması atmosferik ortamda plazma püskürtme sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Alüminyum alaşımı yüzeyine yapılan plazma püskürtme kaplamalarda 200-320 µm arasında değişen tabaka kalınlıkları elde edilmiştir. Bu kaplama serisinde de plazma püskürtme kaplama işleminin elle yapılmasından dolayı, elde edilen tabaka kalınlıklarında

farklılıklar bulunmaktadır. Alüminyum bronzu yüzeyine Cu + % 5 Al kaplanan D1 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.57’de verilmiştir.



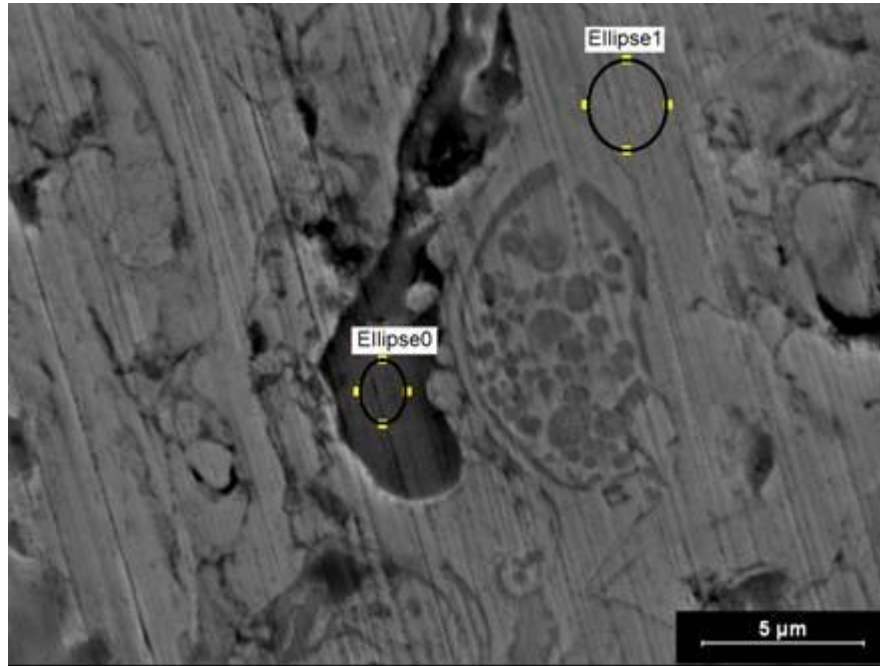
(a)



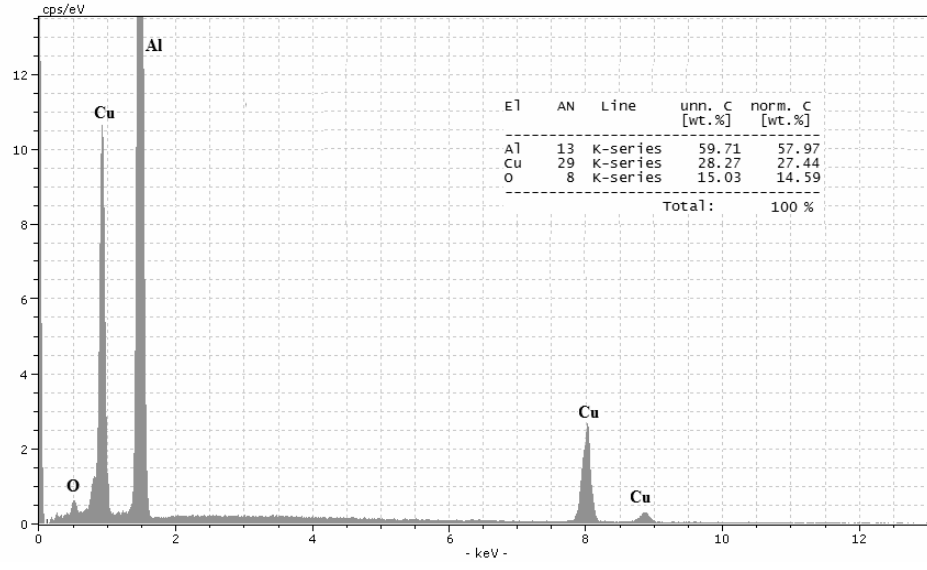
(b)

Şekil 9.57. D1 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kplama tabakası.

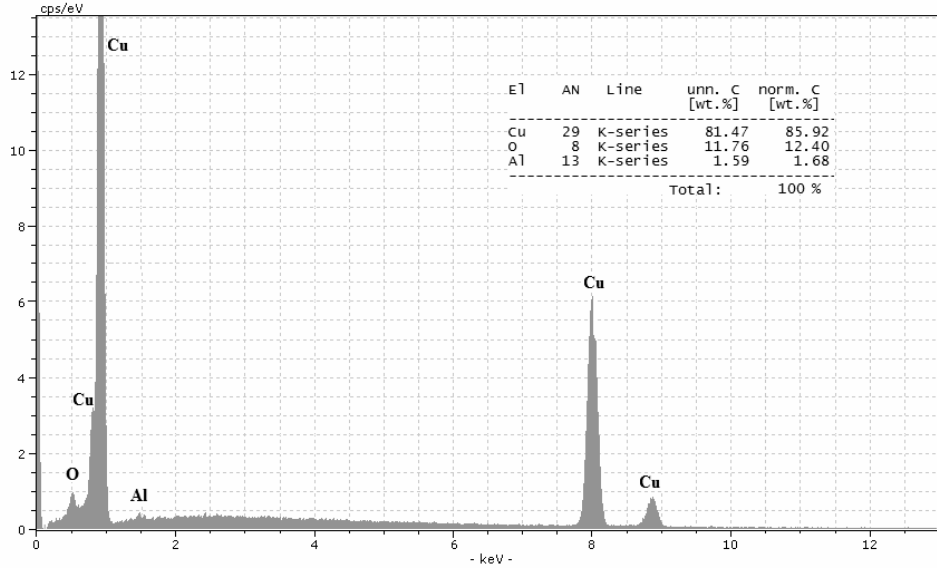
D1 numunesinin optik mikroyapı resimleri incelendiğinde, katmanlı bir yapının olduğu görülmektedir. Şekil 9.58’de verilen SEM fotoğrafında, kaplama tabakasından alınan EDX analizlerinin alındığı yerler gösterilmiştir. Şekil 9.59’da verilen EDX analizleri incelendiğinde; Cu, Al ve O elementlerinin her iki EDX noktasında da varlığı görülmektedir. (0) bölgesinde alüminyumun ağırlıkça fazla olduğu dikkati çekmektedir. Bu noktada; Şekil 9.60’da verilen XRD analiziyle de desteklendiği gibi, yapıda az miktarda saf Al, saf Cu ve yüksek oranlarda Al_2O_3 bileşiği ile birlikte CuO bileşiğinin bulunduğu söylenebilir. Burada oksit bileşiklerinin oluşumuna neden olan oksijen elementinin, açık havada çalışıldığı için kaplama esnasında havadan geldiği ve böylelikle oksit bileşiklerinin oluşumuna neden olduğu düşünülmektedir. (1) bölgesinden alınan EDX analizinde bakırın ağırlıkça fazla olduğu görülmektedir. Alüminyumun çok düşük seviyede % 1,68 Al (% 3,19 Al_2O_3) ve % 85,92Cu (% 96,81CuO + Cu_2O) oluşu, XRD analizine dayanılarak bu bölgede Al_2O_3 ’ün yanı sıra yüksek oranda CuO ve Cu_2O bileşiklerinin de olduğunu göstermektedir.



Şekil 9.58. D1 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.

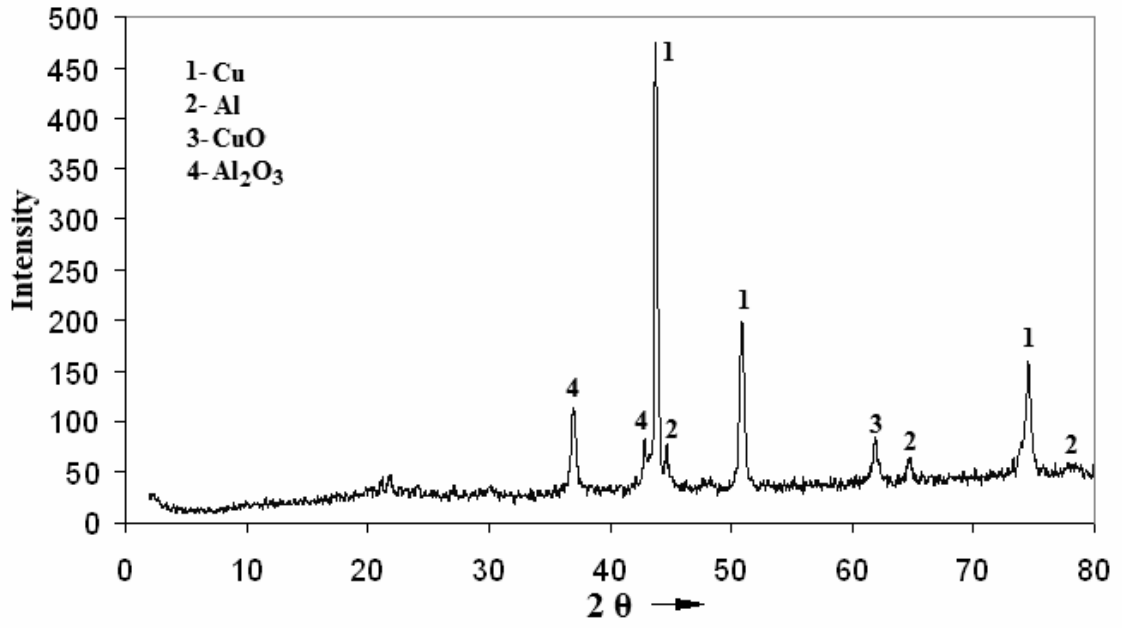


(a)



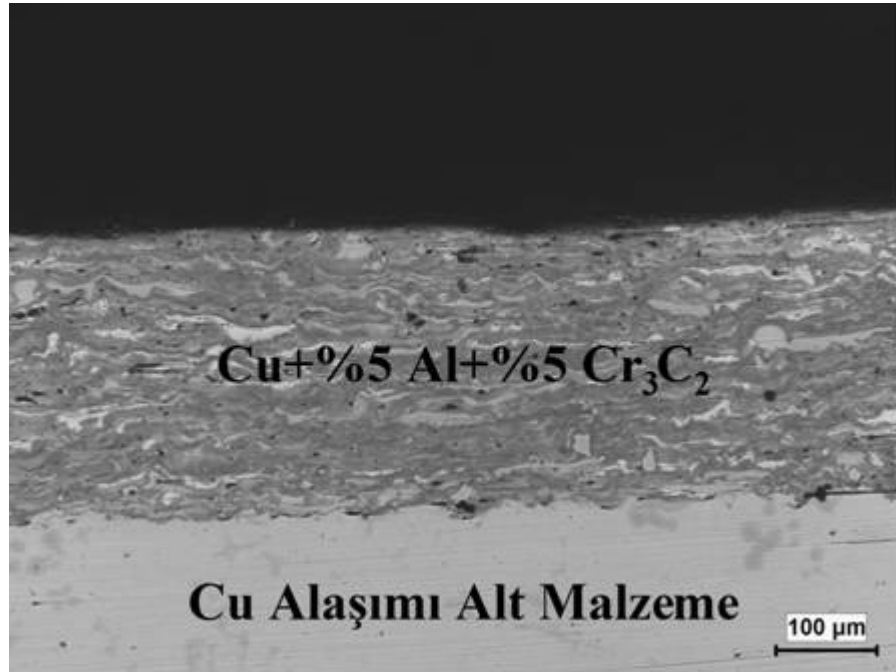
(b)

Şekil 9.59. D1 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölgeleri, a) 0 bölgesi, b) 1 bölgesi.

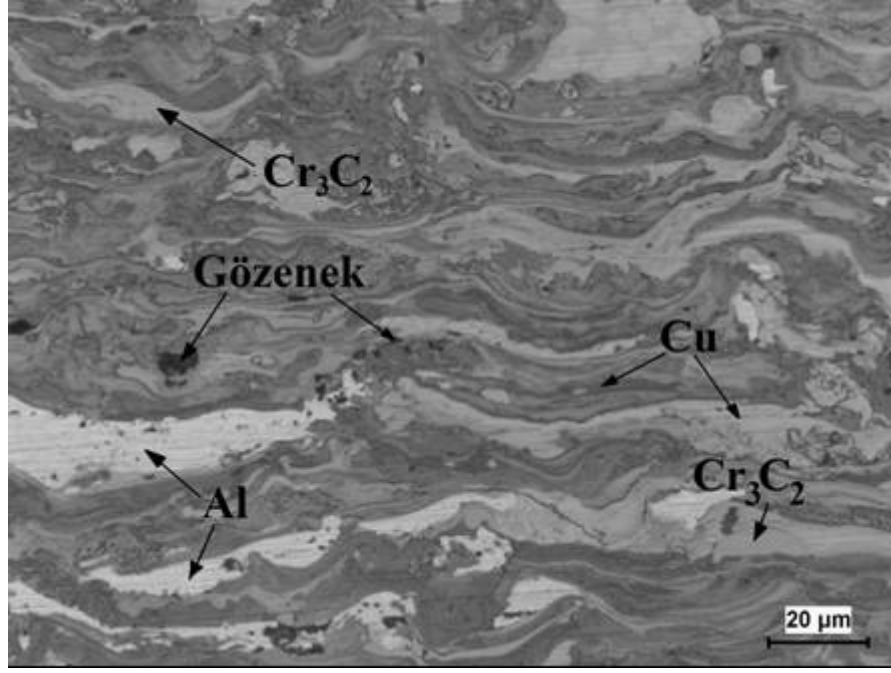


Şekil 9.60. D1 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

Alüminyum bronzu yüzeyine Cu + % 5 Al + % 5 [Cr_3C_2 + % 7 (NiCr)] kaplanan D2 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.61’de verilmiştir. D2 numunesinin optik mikroyapı resimleri incelendiğinde, bu numunede de püskürtme kaplama sisteminin klasik yapısı olan katmanlı tabakaların oluştuğu görülmektedir.



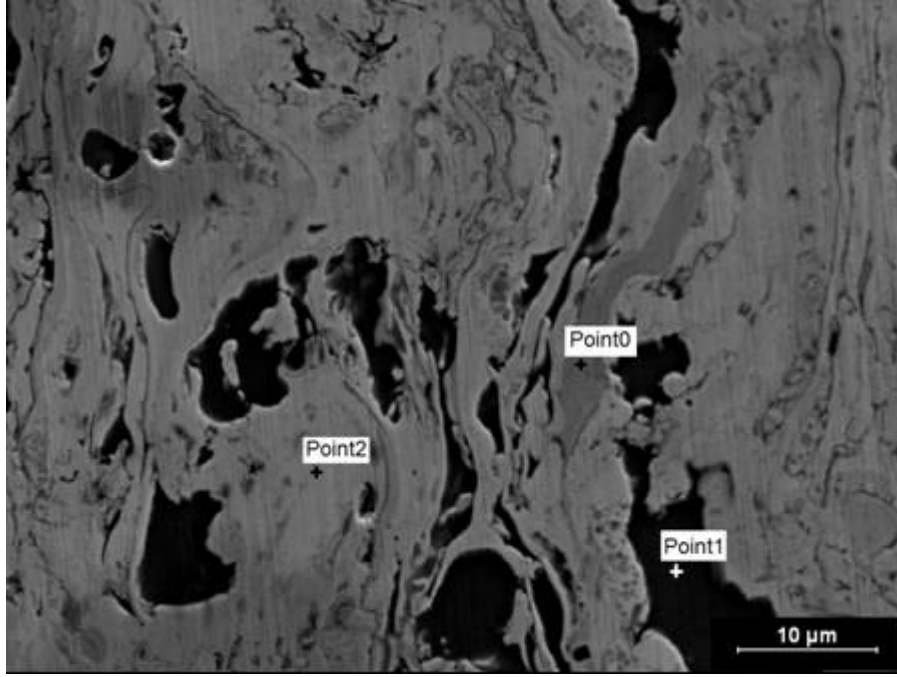
(a)



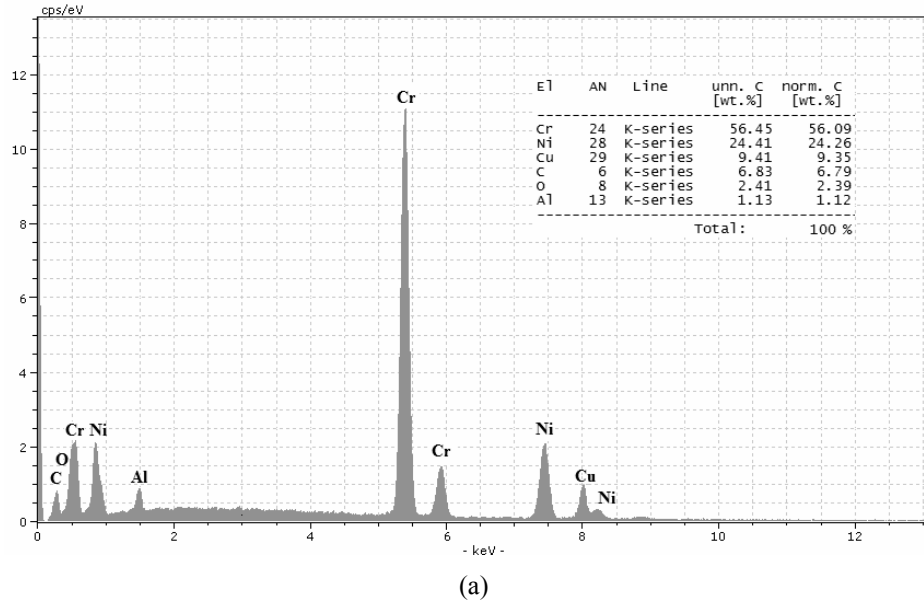
(b)

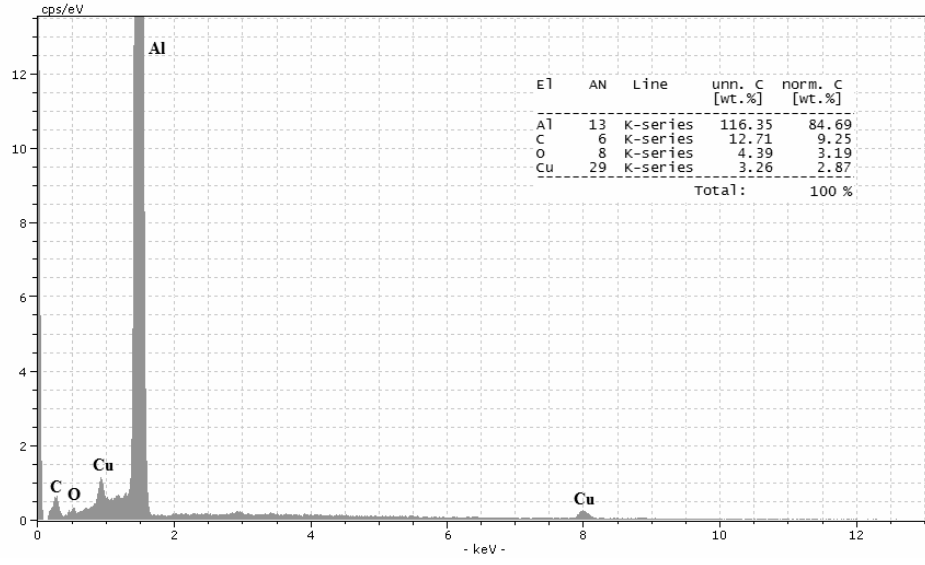
Şekil 9.61. D2 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kaplama tabakası.

Şekil 9.62’de verilen SEM fotoğrafında, kaplama tabakasından alınan EDX analizlerinin yerleri görülmektedir. Şekil 9.63’de verilen EDX analizleri incelendiğinde, koyu gri renkte görülen (0) noktasında Cr, Ni ve C elementleri görülmektedir. Cu matris içerisinde (0) noktası Şekil 9.64’de verilen XRD analizine göre ilave edilen Cr_3C_2 tipi krom karbür bileşiğinden, nikel ve az oranda da bakırdan oluşmuştur. Bu noktada analizle belirlenen oksijen miktarının az oluşu, yapıda bulunan ve oksijene olan afiniteleri yüksek olan alüminyum ve karbüre bağlı olmayan kromun (% 12,77 Cr’lik kısmı) oksit şeklinde bulunabileceklerini; nikel ve bakırınsa muhtemelen saf olarak yapıda yer aldıklarını göstermektedir. (1) noktası incelendiğinde, bu noktada Al miktarının ağırlıkça % 84 gibi yüksek bir seviyede olduğu görülmektedir. Burada alüminyumun iyi bir yaklaşımla % 6,75’i Al_2O_3 bileşiği şeklinde oksijene bağlı iken, geri kalan kısmı saf Al, saf bakır ve krom karbürden oluşmuştur. Bu noktada kroma ait analiz değeri verilmemiş olmakla beraber, yapıdaki analiz değeri verilen karbonun yine kromla eşdeğer miktarda birleşik halinde krom karbür (Cr_3C_2) olarak bulunduğu şüphe yoktur. Ancak bu noktadaki krom karbür içeriği azdır. (2) noktasının EDX analizine bakıldığında, bu noktada yüksek oranda saf bakır ve yine krom karbürle birlikte, az oranda Al_2O_3 bileşiğinin bulunduğu görülmektedir.

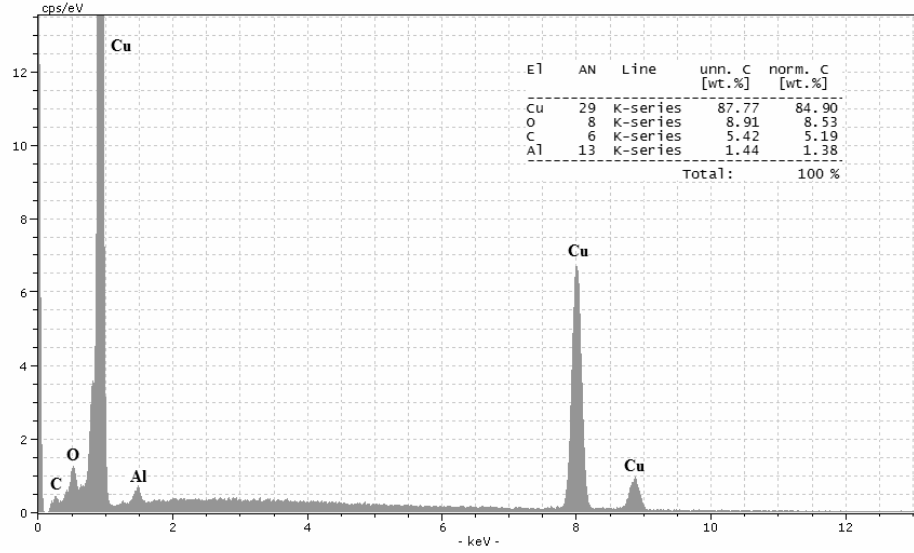


Şekil 9.62. D2 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.



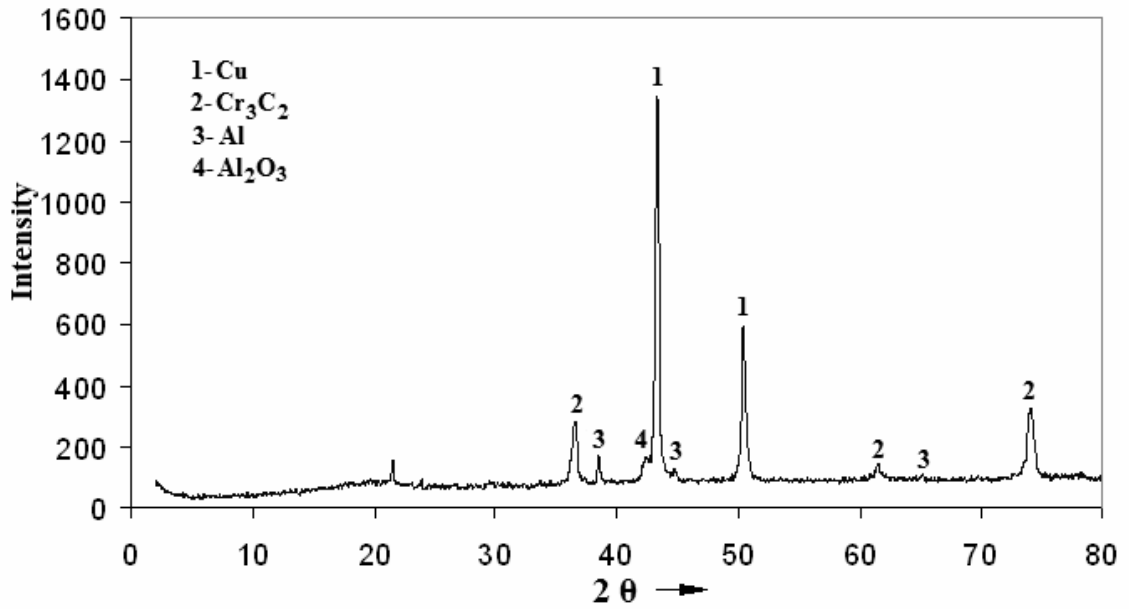


(b)



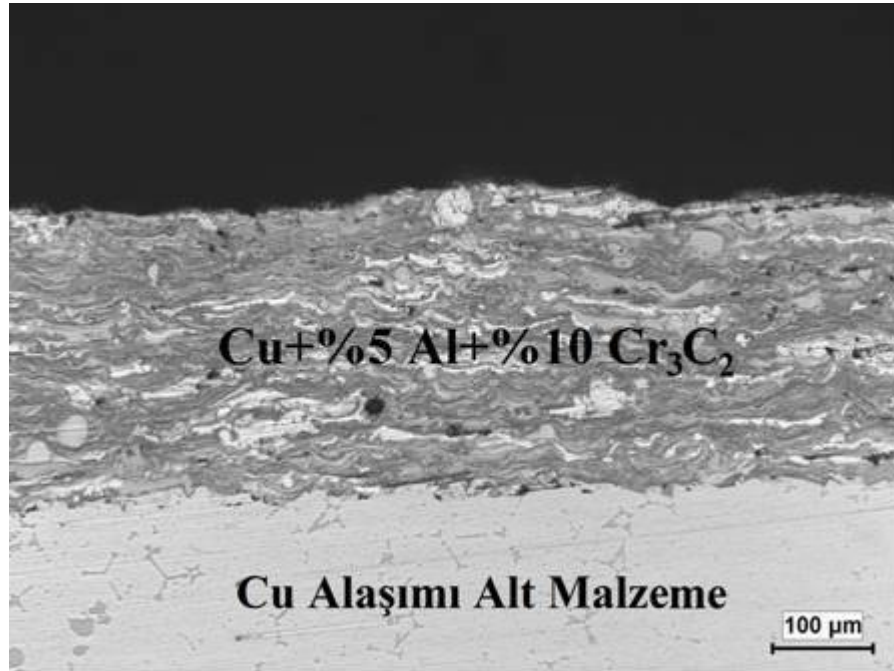
(c)

Şekil 9.63. D2 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz noktaları, a) 0 noktası, b) 1 noktası, c) 2 noktası.

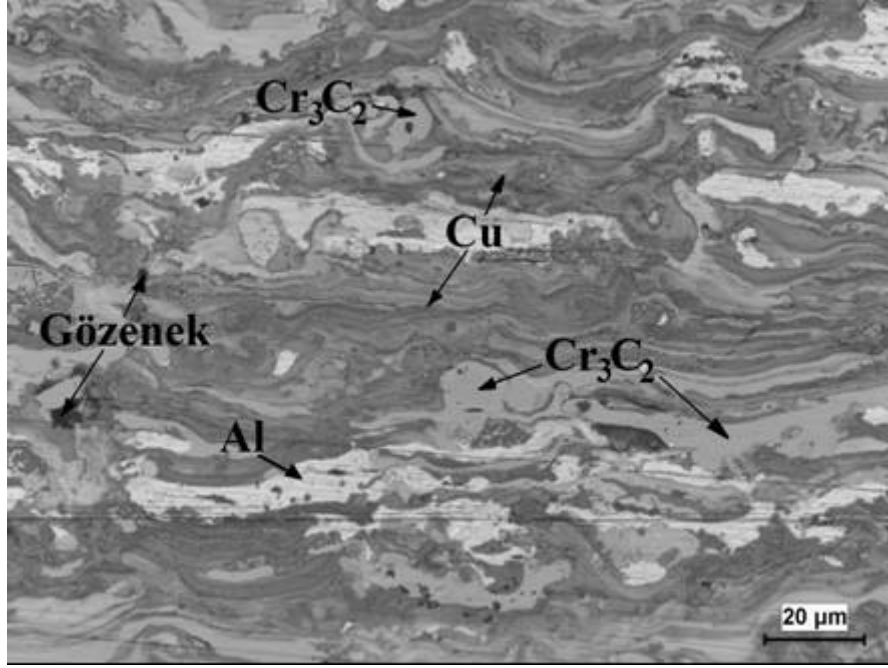


Şekil 9.64. D2 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

Alüminyum bronzu yüzeyine Cu + % 5 Al + % 10 [Cr₃C₂ + % 7 (NiCr)] kaplanan D3 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.65’de verilmiştir. D3 numunesinin optik mikroyapı resimleri incelendiğinde, püskürtme kaplama sisteminde görülen katmanlı tabakalardan oluşan yapının yine bu numunede de oluştuğu görülmektedir.



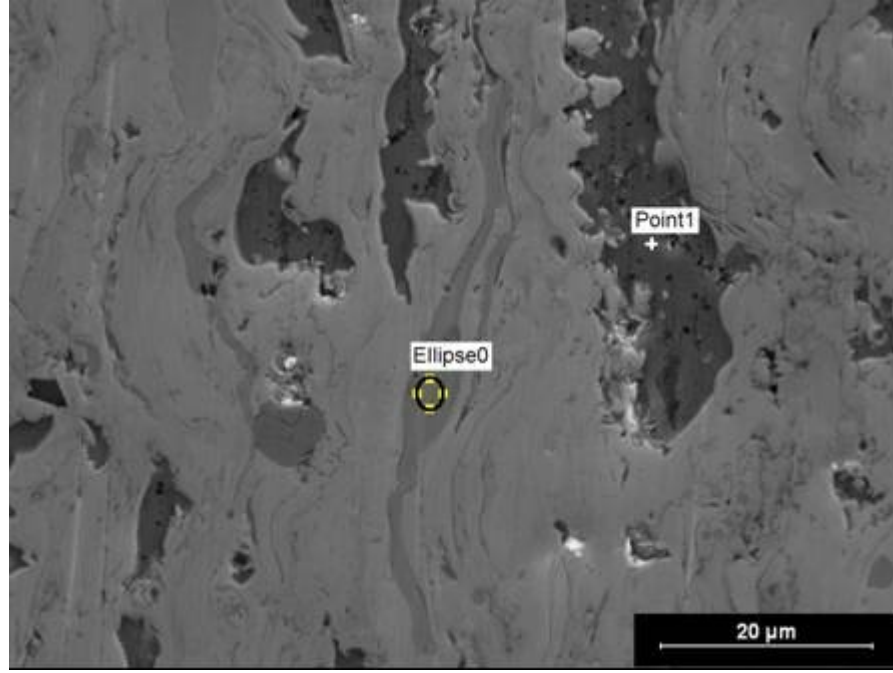
(a)



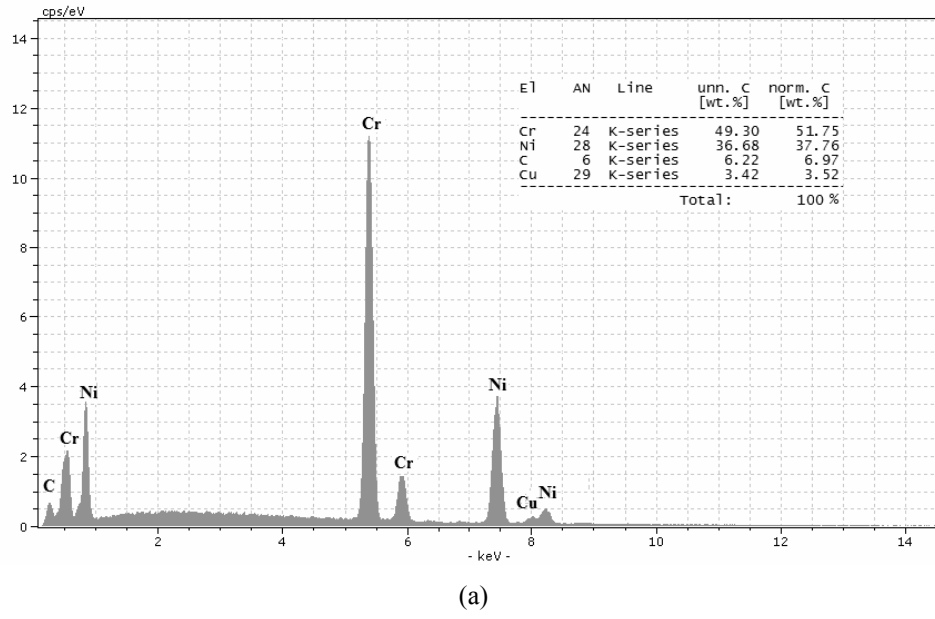
(b)

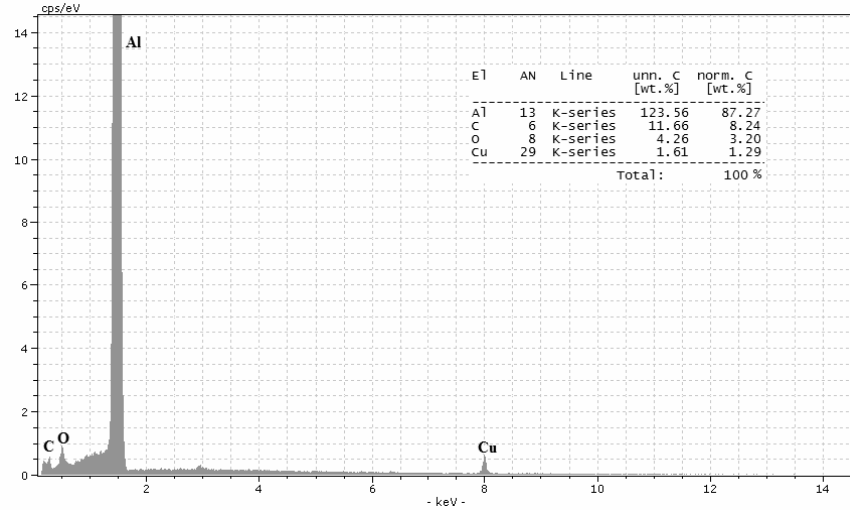
Şekil 9.65. D3 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kplama tabakası.

Şekil 9.66’da verilen SEM fotoğrafında, kaplama tabakasından alınan EDX analizlerinin yerleri görülmektedir. Şekil 9.67’de verilen EDX analizleri incelendiğinde, kısmen koyu gri renkte görülen (0) bölgesinde Cr, Ni ve C elementlerinin varlığı anlaşılmaktadır. (0) bölgesinde, kromun bir kısmının karbonla bağlı bulunduğu geri kalanının krom-nikel alaşımı şeklinde yapıda dağıldığı, yapıda ayrıca az oranda bakırın ve analizde görülmemesine karşın XRD analiziyle (Şekil 9.68) varlığı anlaşılan alüminyumun da bulunduğu belirlenmiştir. (1) noktasının analizinde; bu noktanın az oranda alüminyum oksit (Al_2O_3) ve büyük miktarda saf alüminyum ile çok az miktarda bakırdan oluştuğu anlaşılmaktadır.



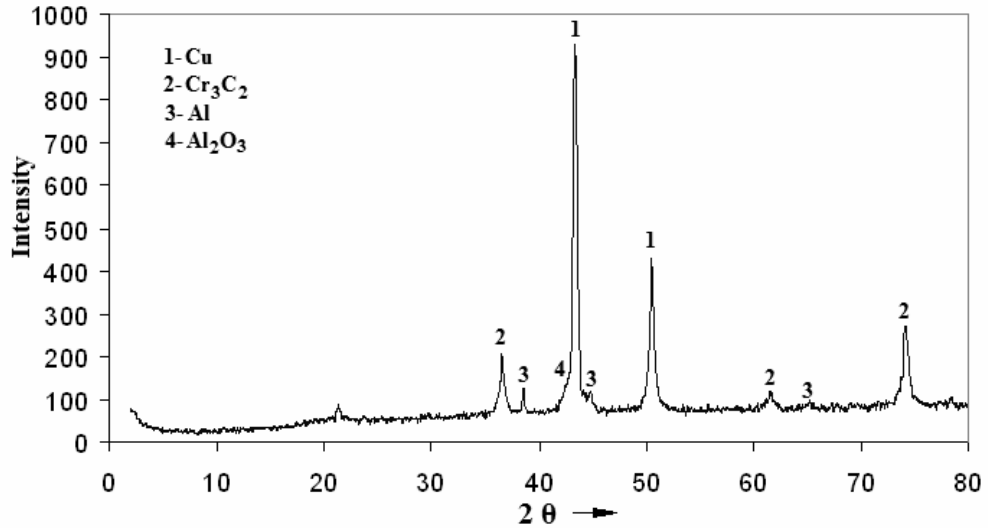
Şekil 9.66. D3 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.





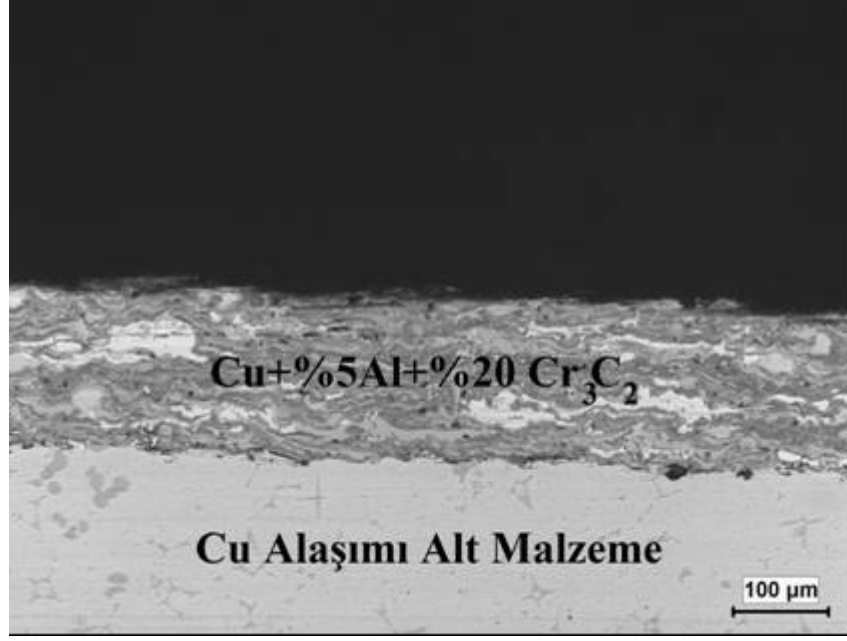
(b)

Şekil 9.67. D3 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölge ve noktası, a) 0 bölgesi, b) 1 noktası.

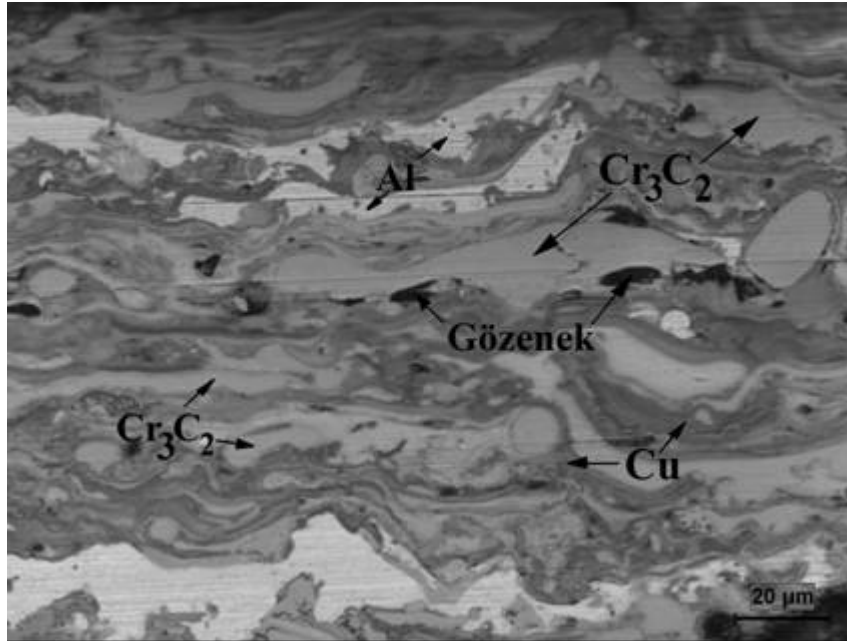


Şekil 9.68. D3 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

Alüminyum bronzu yüzeyine Cu + % 5 Al + % 20 [Cr_3C_2 + % 7 (NiCr)] kaplanan D4 numunesine ait optik mikroyapı resimleri Şekil 9.69'da verilmiştir. D4 numunesine ait olan optik mikroyapı resimleri incelendiğinde, diğer numunelerde görülen karakteristik katmanlı tabakalardan oluşan yapının bu numunede de oluştuğu görülmektedir.



(a)

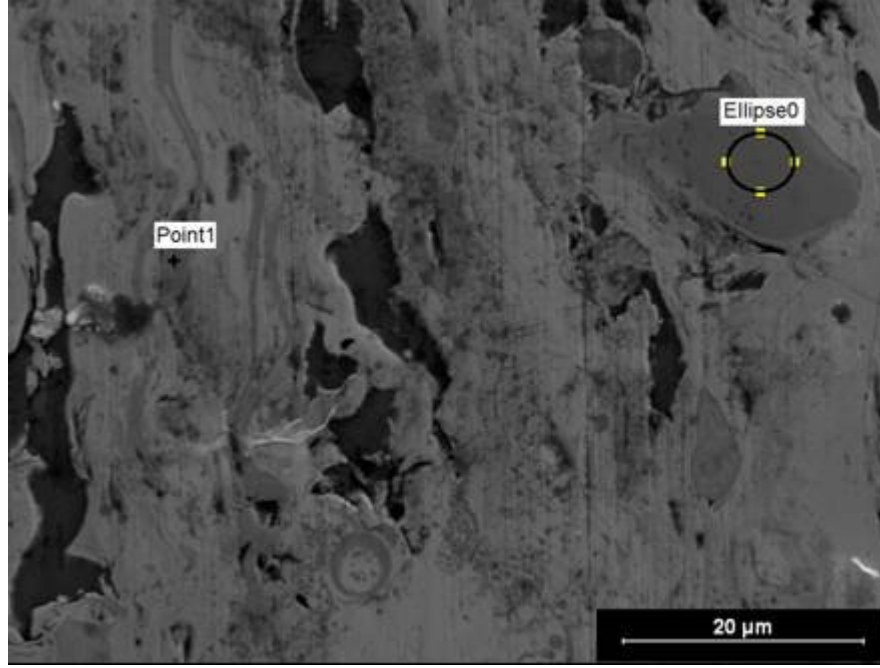


(b)

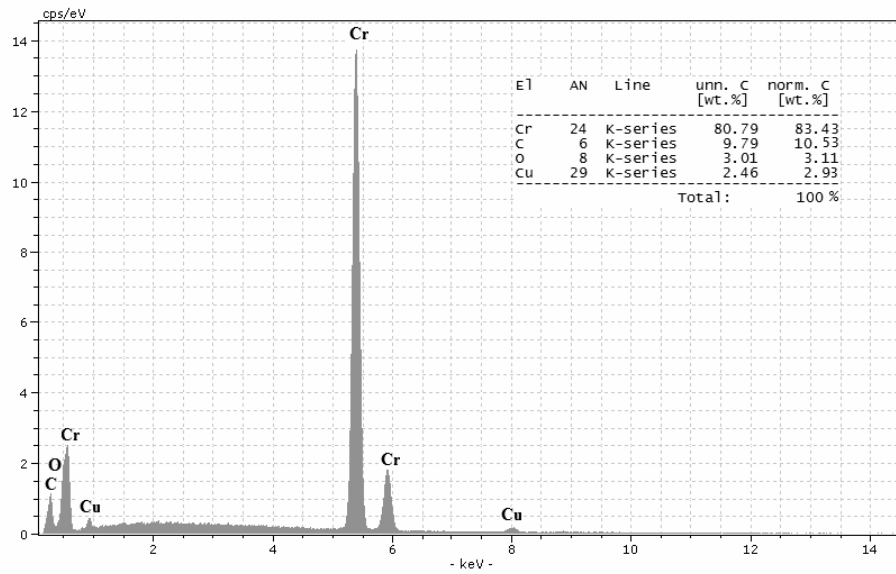
Şekil 9.69. D4 numunesinin optik mikroyapı görüntüsü, a) Alt malzeme ve kaplama tabakası, b) Kaplama tabakası.

Şekil 9.70’de verilen SEM fotoğrafında, kaplama tabakasından alınan EDX analizlerinin yerleri görülmektedir. (0) bölgesinden alınan EDX analizleri incelendiğinde (Şekil 9.71a; kısmen koyu gri renkte görülen bölgelerin esas itibarı ile krom karbürden oluştuğu, ayrıca krom karbür içerisinde bakır elementinin çözündüğü belirlenmiştir. Kaplama tabakasına püskürtülen Cu esaslı toz içerisine ilave edilen Cr_3C_2 tozunun miktarının artmasıyla, beklenildiği

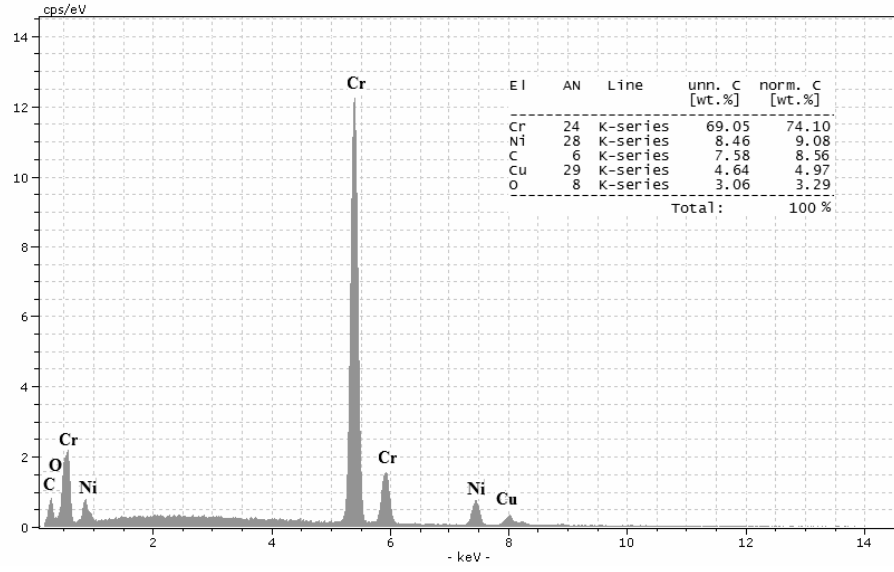
gibi, kaplama tabakasında Cr ve C elementlerini içeren bölgelerin arttığı görülmektedir. (1) noktasının EDX analizinden de; kromun bir kısmının krom karbür (Cr_3C_2) şeklinde bağlı olduğu geri kalan kromun, nikel krom nikel alaşımı şeklinde bir arada bulunduğu; yapıda ayrıca bakırın ve analiz değeri verilmemiş olmakla beraber, çok az miktarda alüminyumun çözündüğü anlaşılmaktadır. Bu alüminyum oksijene olan yüksek afinitesi nedeniyle, Şekil 9.72’de verilen XRD analizinde belirtildiği gibi, muhtemelen Al_2O_3 bileşiği şeklinde bulunmaktadır.



Şekil 9.70. D4 numunesinde kaplama tabakasından alınan SEM fotoğrafı.

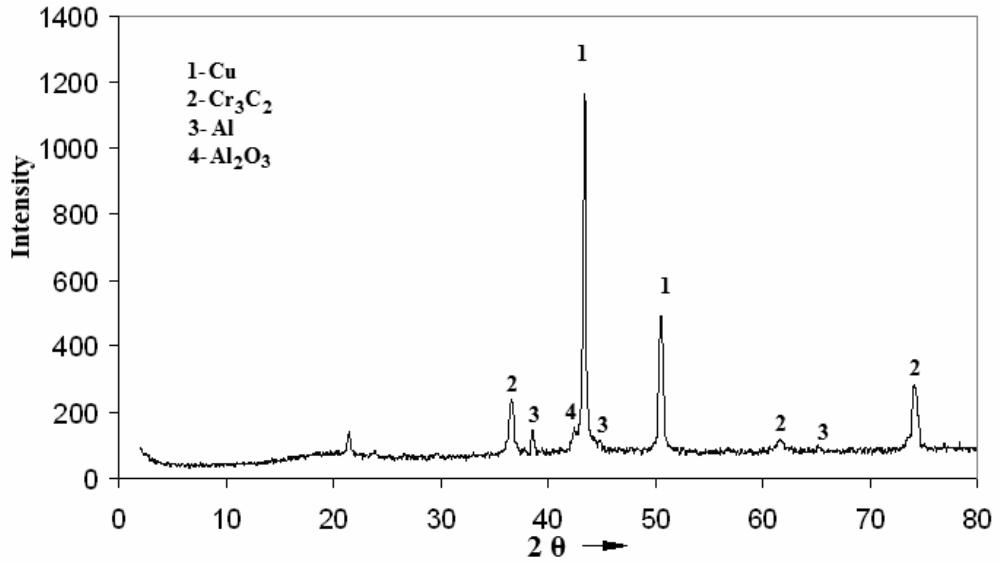


(a)



(b)

Şekil 9.71. D4 numunesine ait SEM fotoğrafında verilen EDX analiz bölge ve noktası, a) 0 bölgesi, b) 1 noktası.



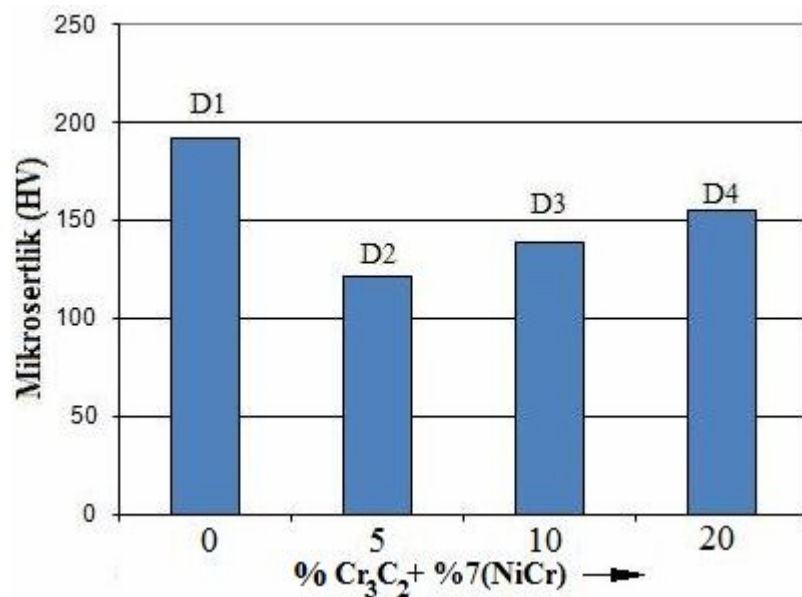
Şekil 9.72. D4 numunesinin kaplama tabakasından alınan XRD analizi.

Alüminyum bronz (Cu alaşımı) yüzeyine atmosferik plazma püskürtme yöntemi ile kaplanan Cu + % 5 Al ve Cu + Al + % 5 [Cr₃C₂ + % 7 (NiCr)], Cu + Al + % 10 [Cr₃C₂ + % 7 (NiCr)] ve Cu + Al + % 20 [Cr₃C₂ + % 7 (NiCr)] karbür toz karışımlarının mikroyapıları incelendiğinde D1 numunesinde gözenek miktarının yok denecek kadar az olduğu dikkat çekmektedir. D2, D3 ve D4 numunelerinde karbür tozu ilavesiyle, gözenegin oluştuğu görülmektedir. D1, D2, D3 ve D4 numunelerinin tümünde ısı püskürtme kaplamalarının karakteristik yapısı olan katmanlı yapı oluşumu görülmüştür. Optik mikroyapı resimlerinde

beyaz bölgelerin Al ve Al alaşımından, kısmen koyu gri renkteki bölgelerin ise Cr_3C_2 karbür bileşiğinden oluştuğu alınan EDX ve XRD analizleri ile açıkça görülmektedir. D4 numunesinde ilave edilen karbür tozunun % 20 değerinde olmasıyla, kaplama tabakası içerisindeki karbür bileşiklerinin dağılımı artmıştır. XRD analizleri genel olarak incelendiğinde tüm numunelerin kaplama tabakalarında Cu, Al elementleri ile birlikte Cr_3C_2 ve kısmen Al_2O_3 bileşiklerinin oluştuğu görülmektedir.

9.4.2. Mikrosertlik ve Çekme Dayanımı İncelemesi

D1, D2, D3 ve D4 nolu numunelere ait mikrosertlik grafiği Şekil 9.73’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde Cu + % 5 Al ilaveli D1 numunesinde 192 HV sertlik değerinin tespit edildiği ve Cr_3C_2 tozunun ilave edilmesi ile sertlik değerinin düştüğü görülmektedir. Bu düşüşün, ilave edilen Cr_3C_2 tozu ile artan gözenekten ve standart miktarda Cr_3C_2 + % 7 (NiCr) tozu içerisinde karıştırılmış bulunan Ni elementinin varlığından kaynaklandığı düşünülmektedir. % 5 Cr_3C_2 ilaveli D2 numunesinde 121 HV sertlik değeri tespit edilmiştir. Numunelerin mikroyapı incelemelerinde, Cr_3C_2 tozu ilave miktarının artmasıyla gözenek miktarının az miktarda arttığını önceden belirtilmişti. Fakat, % 10 Cr_3C_2 ilaveli D3 ve % 20 Cr_3C_2 ilaveli D4 numunelerinde karbür tozunun artış oranının gözenek miktarındaki artış oranından fazla olması ve karbürün zaten sert bir bileşik olması nedenleriyle sertlik miktarında artış gözlenmiştir. D3 nolu numunede 139 HV, D4 nolu numunede 155 HV sertlik değerleri tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değeri Cu + % 5 Al ilaveli D1 numunesinde tespit edilirken, en düşük sertlik değeri de % 5 Cr_3C_2 ilaveli D2 numunesinde tespit edilmiştir.

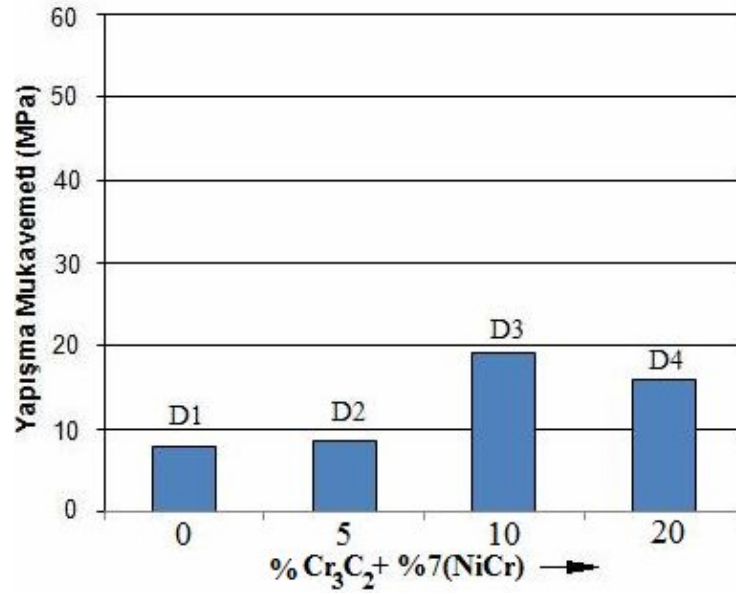


Şekil 9.73. D grubu numunelere ait mikrosertlik grafiği.

D grubu numunelere ait çekme deneyi sonrası yapışma mukavemetini gösteren grafik Şekil 9.75'te verilmiştir. D grubundaki numunelerin yapışma mukavemet değerleri incelendiğinde, ısıt püskürtme kaplamalar için ön görülen mukavemet değerlerinin alt sınırındaki seviyelerde olduğu görülmüştür. Bu da, Yeşildal (2007) tarafından belirtildiği gibi, D grubu numunelerde, kaplama tabakası ile alüminyum bronzundan oluşan alt malzeme arasında oksit tabakası oluşumlarının varlığından ileri gelmektedir (Şekil 9.74). Plazma püskürtme yöntemi ile gerçekleştirilen kaplamalarda, kaplama esnasında alt malzemenin ısınması söz konusudur. Cu alaşımı olan alüminyum bronz alt malzememizin yüzeyinin genelinde bu ısınmadan dolayı bir oksit film tabakası oluşmaktadır. Cu + % 5 Al + Cr₃C₂ ile kaplanan D grubu numunelerde kaplama tabakası, alt malzemeye yüzeyde oluşan oksit tabakasından dolayı tam olarak bağlanamamıştır. Ara yüzeyde gözenekli bir yapı elde edilmiştir. Bu bağlanma mukavemeti en düşük seviyede 7,96 MPa değeri ile Cu + % 5 Al tozu ile kaplanan D1 numunesinde tespit edilmiştir. Cu + % 5 Al toz içerisine ilave edilen Cr₃C₂ tozu ile yapışma mukavemet değeri artmıştır. Ara yüzeydeki tutunmaya bağlı olarak en yüksek yapışma mukavemeti 19,16 MPa değeri ile % 10 Cr₃C₂ ilaveli D3 numunesinde tespit edilmiştir.



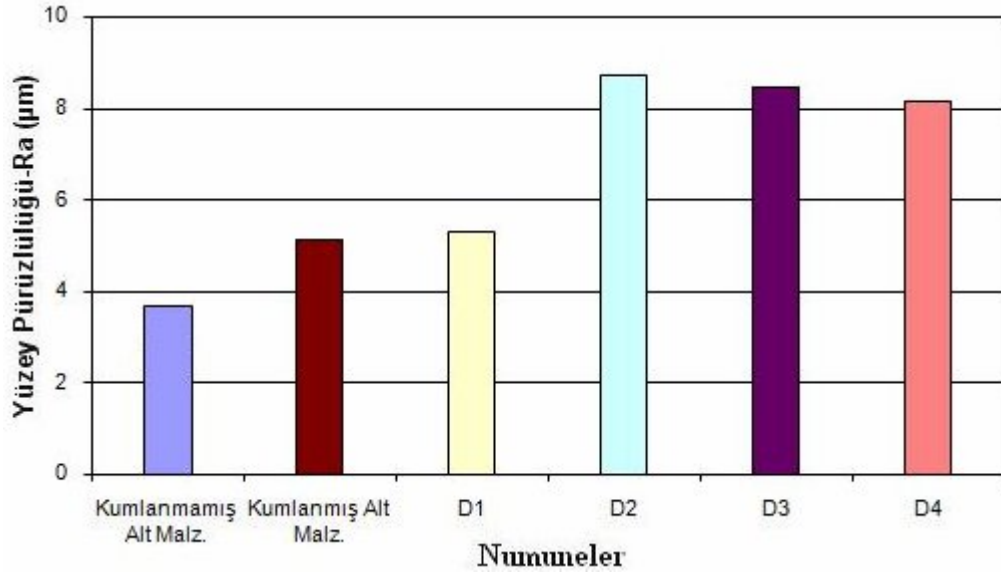
Şekil 9.74. D grubu numunelerde ara yüzeyde meydana gelen oksit tabakası.



Şekil 9.75. D grubu numunelere ait yapışma mukavemeti değerleri.

9.4.3. Kaplamaların Yüzey Pürüzlülüğü

Numunelerin kaplama öncesi, yüzey pürüzlendirme işlemi sonrası ve kaplama sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Ölçümlerde; kaplama işlemi uygulanmamış numunede 3,824 μm ve yüzeyi sadece pürüzlendirilmiş numunede de 5,125 μm yüzey pürüzlülük değerleri tespit edilmiştir. Numune yüzeyine yapılan kaplamalar ile D1, D2, D3 ve D4 numunelerinde farklı yüzey pürüzlülük değerleri tespit edilmiştir. Yüzeye Cu + % 5 Al kaplanan D1 numunesinde 5,28 μm pürüzlülük değeri elde edilmiştir. % 5 [Cr_3C_2 + % 7 (NiCr)] ilaveli D2 numunesinde yüzey pürüzlülüğü 8,75 μm ölçülürken; % 10 [Cr_3C_2 + % 7 (NiCr)] ilaveli D3 numunesinde 8,43 μm ve % 20 [Cr_3C_2 + % 7 (NiCr)] ilaveli D4 numunesinde de 8,13 μm yüzey pürüzlülük değerleri tespit edilmiştir. Şekil 9.76'da görüldüğü gibi Cu + % 5 Al kaplanan D1 numunesinde; D2, D3 ve D4 numunelerine göre daha iyi bir yüzey kalitesi oluşmuştur. İlave edilen Cr_3C_2 ile kaplama tabakasının ergime sıcaklığı olağanüstü yükselmekte, taneciklerin birbiriyle olan sinterleşmesi kötüleşmekte ve bu da yüzey pürüzlülüğünün bir miktar yükselmesine neden olmaktadır. D1 numunesinde yüzey pürüzlülüğünün en düşük olması bu numunenin tamamıyla istenen kalitede olduğunu göstermez. Cu + % 5 Al içerisine ilave edilen [Cr_3C_2 +%7 (NiCr)] ile yüzey pürüzlülük değeri artmıştır, fakat ilave edilen [Cr_3C_2 + %7 (NiCr)] miktarının artması ile yüzey pürüzlülük değeri düşerek yüzey kalitesi kısmen iyileşmiştir.



Şekil 9.76. D grubu numunelere ait alt malzeme ve kaplanan numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri.

9.4.4. Isıl Genleşme İncelemesi

D grubu numunelerin yapışma mukavemetlerine ait grafik ve ara yüzeyden alınan optik mikroyapı fotoğrafı incelemesinde, ara yüzeydeki oksit oluşumu ve buna bağlı olarak oluşan gözenekten bahsetmiştik. Bu oksit oluşumunun ve gözenegin yapışma mukavemetini ciddi manada düşürdüğünü görmüştük. Isıl genleşme deney uygulamalarında, D grubu numunelere uygulanan sıcaklığın artması ile bahsedilen oksit ve gözeneklerden dolayı yapışma mukavemetinin çok düşük olmasına bağlı olarak tabakalarda kalkmalar meydana gelmiştir. D grubu numunelerde meydana gelen ara yüzeydeki boşluklar, ısı genleşme katsayılarının ölçümü esnasında uygulanan 10 g. değerindeki yük ile basma kuvveti etkisi göstermiştir. Bu nedenle ısı genleşme katsayı ölçümlerinde grafikler ters bir eğilimde çıkmıştır. Ara yüzeydeki düşük yapışma bağ mukavemetinin ve boşlukların bir sonucu olarak D grubu numunelerde ısı genleşme katsayısı tespit edilememiştir.

10. GENEL SONUÇLAR

Alüminyum alaşımı (AA 2024-T4) ve alüminyum bronz (Cu + % 5 Al) yüzeyine oksit ve karbür bileşiklerinin plazma püskürtme yöntemiyle kaplaması gerçekleştirilmiştir. Farklı iki tür alt malzeme ve yüzeylerine kaplanan oksit ve karbür şeklindeki iki çeşit toz karışımları ile elde edilen kaplama tabakalarında aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir.

AA 2024-T4 alt malzeme yüzeyine gerçekleştirilen Al_2O_3 ve $Al_2O_3 + TiO_2$ kaplanarak elde edilen A grubu numunelerde;

- 1) Isıl püskürtme yöntemlerinde, tabaka içerisinde gözeneklilik kaçınılmaz olmaktadır. A grubu numunelerde ilave edilen TiO_2 tozunun artmasıyla, TiO_2 'in, Al_2O_3 'ün ergime sıcaklığını düşürdüğünden ve sinterleşmeyi kolaylaştırdığından, gözenek miktarı azalmıştır. En düşük gözenek miktarı % 40 TiO_2 ilaveli A4 numunesinde tespit edilmiştir.
- 2) Kaplama tabakalarından alınan XRD sonuçları incelenmiş; Al_2O_3 ve TiO_2 bileşikleriyle birlikte Al_2TiO_5 ve Ti_3O_5 ara faz bileşiklerinin de oluştuğu görülmüştür.
- 3) Sertlik değerleri incelendiğinde; % 13 TiO_2 ilaveli A3 numunesinde 860 HV değerinde sertlik elde edilmiştir. % 40 TiO_2 ilaveli A4 numunesinde ise 600 HV değerinde sertlik tespit edilmiştir. TiO_2 'in sertlik değeri Al_2O_3 'in sertliğinden düşük olduğundan TiO_2 'in artmasıyla sertlik değeri düşmüştür.
- 4) Kaplamaların TiO_2 ilavesi ile yapışma mukavemetinin arttığı görülmüştür. En yüksek mukavemet değeri 47,67 MPa olarak A4 numunesinde tespit edilmiştir.
- 5) Kaplanmış numunelerin TiO_2 ilavesi ile pürüzlülük değerinin düştüğü ve yüzey kalitesinin arttığı görülmüştür. Bunun da yine TiO_2 'nin ergime sıcaklığının düşük olması ve Al_2O_3 'ün ergime sıcaklığını aşağıya çekmesinden ileri geldiği düşünülmektedir. En düşük pürüzlülük değeri 3,655 μm olarak A4 numunesinde ölçülmüştür.
- 6) Isıl genleşme deneyi sonrasında A grubu numunelerde en düşük ısıl genleşme katsayısı $22,574 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ değeri ile A1 numunesinde ölçülmüştür. En yüksek ısıl genleşme katsayısı $24,487 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ değeri ile A4 numunesinde ölçülmüştür.

AA 2024-T4 alt malzeme yüzeyine gerçekleştirilen Al + Cu ve Al + Cu + B_4C kaplanarak elde edilen B grubu numunelerde;

- 1) B grubu numunelerde de gözeneklilik mevcuttur. B_4C bileşiğinin ilavesi ile gözenek miktarı artmıştır. En yüksek gözenek miktarı ise % 20 B_4C ilave edilen B4 numunesinde tespit edilmiştir. Sinterleşmenin de iyi olmadığı bor karbürü numunelerde, bor karbürün ergime sıcaklığının yüksek olması ($2450 \text{ } ^\circ\text{C}$) olması ve bu

bileşiğin ana malzemedeki mevcut metallerle yeterli mukavemette ve bağla bileşik oluşturmaması nedenleriyle; kaplama tabakası iri gözenekli ve boşluklu olarak ortaya çıkmaktadır.

- 2) B grubu numunelerin kaplama tabakalarından alınan XRD analiz sonuçları incelendiğinde, kaplama tabakalarının Al ile Cu saf elementleri ve AlCu ile B₄C bileşiklerinin oluştuğu görülmüştür.
- 3) Sertlik ölçümlerinde ise, kaplama tabakasına sertliği yüksek olan bor karbür bileşiğinin (B₄C) miktarının artmasıyla kaplama tabakasının sertliği de artmıştır. En yüksek sertlik değeri % 20 B₄C ilaveli B4 numunesinde ölçülmüştür.
- 4) B grubu numunelerde yapışma mukavemet değerlerine göre en yüksek yapışma mukavemeti 48,08 MPa değeri ile B1 numunesinde tespit edilmiştir. Çünkü burada malzeme yüzeyine sadece alüminyumun geçirilecek olması ve bakır ile alüminyumun düşük sıcaklıklarda % 10-15 oranlarına kadar birbiri içerisinde eriyebilmeleri bu kaplamada yapışma (yüzeye tutunma) kuvvetini artırmıştır. B₄C bileşiğinin ilavesi ile, metaller arasındaki atom alışverişi azaldığından, yapışma mukavemeti de düşmüştür.
- 5) B1 numunesinde 15,07 µm değeri ile en yüksek yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Bu değer, numunenin yüzeyinin çok pürüzlü olduğunu göstermektedir. En düşük pürüzlülük değeri 9,31 µm olarak B4 numunesinde ölçülmüştür.
- 6) Isıl genleşme deneyi sonrasında B grubu numunelerde en düşük ısıl genleşme katsayısı $25,987 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ değeri ile B4 numunesinde ölçülmüştür. Karbür ilave oranının artmasıyla ısıl genleşme katsayısı düşmüştür. En yüksek ısıl genleşme katsayısı $27,612 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ değeri ile B1 numunesinde ölçülmüştür.

Alüminyum bronz (Cu-Al alaşımı) alt malzeme yüzeyine gerçekleştirilen $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3$ ve $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ kaplanarak elde edilen C grubu numunelerde;

- 1) C grubu numunelerde ilave edilen Al₂O₃ tozunun artmasıyla gözenek miktarı artmıştır. En yüksek gözenek miktarı % 20 Al₂O₃ ilaveli C4 numunesinde tespit edilmiştir. Bu da alüminyum oksidin ($T_{\text{erg.}} = 2030 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ve itriyum oksidin ($T_{\text{erg.}} = 2680 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ergime sıcaklıklarının 2000 °C’den daha yüksek olmasından ve bu bileşiklerin düşük sıcaklıkta eriyen birleşik oksitler oluşturmamasından kaynaklanmaktadır.
- 2) XRD analizlerinin incelenmesinde kaplama tabakası içerisinde ZrO₂, Y₂O₃ ve Al₂O₃ bileşiklerinin oluştuğu görülmüştür. Burada zirkonyum dioksitin, β-ZrO₂ ve α-ZrO₂ şeklinde iki farklı modifikasyonuyla yapıda oluştuğu saptanmıştır.
- 3) Sertlik incelemesinde $\text{ZrO}_2 + \% 8 \text{ Y}_2\text{O}_3$ ile kaplanan numuneye göre Al₂O₃ ilaveli numunelerde sertlik artmıştır. Al₂O₃ tozunun ilave oranının artmasıyla sertlik değeri

düşmüştür. En yüksek sertlik değeri % 5 Al_2O_3 ilaveli C2 numunesinde tespit edilmiştir. Bunun da, % 5'i aşan Al_2O_3 oranı katkılarında, zirkonyum dioksit, itriyum oksit ve alüminyum oksit arasında sert ve sıkı bağlı bir bileşiğin oluşmamasından ileri geldiği düşünülmektedir.

- 4) C grubu numunelerde sertlik miktarının düşmesine bağlı olarak kaplama tabakasının yapışma mukavemeti artmıştır. İlave edilen Al_2O_3 toz miktarının artmasıyla yapışma mukavemeti de artmıştır. En yüksek yapışma mukavemeti 43,09 MPa değeri ile % 20 Al_2O_3 ilaveli C4 numunesinde tespit edilmiştir. Bunun da alüminyum bronzundan kaplama tabakasına difüzyonla yayılan bakır elementinin sert lehim karakteriyle bağlayıcı özelliğinden ileri geldiği tahmin edilmektedir.
- 5) Kaplama tabakalarında en düşük yüzey pürüzlülüğü 9,89 değeri ile % 20 Al_2O_3 ilaveli C4 numunesinde ölçülmüştür. Artan Al_2O_3 miktarı ile yüzey pürüzlülüğü azalmış ve yüzey kalitesi artmıştır. Al_2O_3 içeriğinin artması bronz yönüne doğru olan alüminyum difüzyonunu hızlandırmış, bronzdan kaplama tabakasına geçen bakırla birlikte karşılıklı olarak diğer oksitlerin sinterlenip birbiriyle kenetlenmelerini sağlayarak kaplama tabakasının daha sıkı şekilde yüzeye bağlanmasına yardımcı olmuştur.
- 6) Isıl genleşme deneyi sonrasında C grubu numunelerde Al_2O_3 ilave oranının artmasıyla en düşük ısıl genleşme katsayısı $16,546 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ değeri ile C4 numunesinde ölçülmüştür. En yüksek ısıl genleşme katsayısı $19,035 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ değeri ile C1 numunesinde ölçülmüştür.

Alüminyum bronz (Cu alaşımı) alt malzeme yüzeyine gerçekleştirilen Cu + % 5 Al ve Cu + % 5 Al + Cr_3C_2 kaplanarak elde edilen D grubu numunelerde;

- 1) D grubu numunelerde gözenek miktarının çok düşük olduğu görülmüştür. En düşük gözenek miktarı Cr_3C_2 ilavesiz Cu + % 5 Al ile kaplanan D1 numunesinde tespit edilmiştir. Bu da bakır içerisinde alüminyumun % 10 oranlarına kadar sorunsuz bir şekilde katı eriyik oluşturarak eriyebilmesinden kaynaklanmıştır.
- 2) XRD analizlerinin incelenmesinde; kaplama tabakalarında öncelikle krom karbür katkısıyla; saf Cu, saf Al ve bunlarla birlikte Cr_3C_2 ve Al_2O_3 bileşiklerinin varlığı tespit edilmiştir. Kaplama esnasında püskürtülen saf Al tozunun havadaki oksijen ile tepkimesi sonucu kaplama tabakalarında Al_2O_3 bileşiği oluşumları tespit edilmiştir.
- 3) Sertlik incelemesinde Cu + % 5 Al ile kaplanan numuneye göre Cr_3C_2 ilaveli numunelerde sertlik azalmıştır. Cr_3C_2 tozunun ilavesinin artmasıyla, sert olan bu bileşiğin varlığı ile sertlik değeri artmıştır. En yüksek sertlik değeri Cr_3C_2 ilavesiz Cu + % 5 Al ile kaplanan D1 numunesinde tespit edilmiştir. Bunun da, bu elementlerin verilen oranlarda çökeltme sertleşme etkisi göstermelerinden ileri geldiği

düşünülmektedir. Burada Cr_3C_2 standart tozu içerisinde mevcut olan Ni elementi ve karbonun gösterdiği yağlayıcı ve kaydırıcı etki, sertlik değerinin düşmesine neden olmuştur.

- 4) D grubu numunelerde yapışma mukavemetleri incelendiğinde, değerlerinin çok düşük olduğu görülmüştür. Alt bronz malzeme yüzeyinde kaplama esnasında ısının etkisi ile oksit tabakası oluşmuş ve buna bağlı olarak da ara yüzeyde gözenekli bir yapı oluşmuştur. Alt malzemeye tutunmanın az olmasından dolayı yapışma mukavemet değerleri düşük çıkmıştır. En yüksek yapışma mukavemeti 19,16 MPa değeri ile D3 numunesinde tespit edilmiştir.
- 5) Kaplama tabakalarında yüzey pürüzlülük ölçümleri sonucu en düşük yüzey pürüzlülüğü; metaller atom düzeyinde birbiriyle çok iyi bağlanabildikleri için, tamamen metal kaplama niteliği taşıyan ve 5,28 değeri ile Cr_3C_2 ilave edilmeyen D1 numunesinde ölçülmüştür. İlave edilen Cr_3C_2 ile kaplama tabakasının ergime sıcaklığı olağanüstü yükselmekte, taneciklerin birbiriyle olan sinterleşmesi kötüleşmekte ve bu da yüzey pürüzlülüğünün bir miktar yükselmesine neden olmaktadır.
- 6) Isıl genleşme deneyi esnasında, ara yüzeyde meydana gelen oksit ve buna bağlı olarak oluşan gözenekten dolayı kaplama tabakaları kalkmıştır. Bu nedenle ısıl genleşme katsayıları ölçümü sağlanamamıştır.

10.1. Sonuçlar

Alüminyum alaşımı (AA 2024-T4) alt malzeme yüzeyine gerçekleştirilen kaplamalar incelendiğinde, Al_2O_3 ve $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ oksit bileşiklerinin AA2024-T4 alüminyum alaşımı yüzeyine kaplanabildiği görülmüştür. Alüminyum alaşımı yüzeyine gerçekleştirilen $\text{Al}+\text{Cu}+\text{B}_4\text{C}$ karbür toz karışımıyla, oksit bileşikleri ile kaplanan numunelerin karşılaştırılması sonucunda; gözenek miktarı, sertlik ve yapışma mukavemet değerlerinin oksit bileşikleri ile kaplanan numunelerden daha iyi özelliklere sahip olduğu görülmüştür.

Alüminyum bronz (Cu alaşımı) alt malzeme yüzeyine gerçekleştirilen kaplamalar incelendiğinde, $\text{ZrO}_2+\text{Y}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3$ oksit tozlarının Cu alaşımı yüzeyine kaplanabildiği görülmüştür. Cu alaşımı yüzeyine uygulanan $\text{Cu}+\text{Al}+\text{Cr}_3\text{C}_2$ karbür toz kaplamaları incelendiğinde; arayüzeyde, Cu alt malzemenin ısıdan etkilenecek yüzeyde oksit oluşumu ve buna bağlı olarak meydana gelen gözeneklerin olduğu görülmüştür. $\text{ZrO}_2+\text{Y}_2\text{O}_3+\text{Al}_2\text{O}_3$ oksit tozları ile kaplanan numunelerde gözenek miktarının bir miktar fazla oluşuna karşın, $\text{Cu}+\text{Al}+\text{Cr}_3\text{C}_2$ karbür toz karışımı ile kaplanan numunelere nazaran sertlik ve yapışma mukavemetinin daha yüksek değerlere sahip olduğu görülmüştür.

AA2024-T4 alüminyum alaşımı yüzeyine gerçekleştirilen Al_2O_3 ve $Al_2O_3+TiO_2$ kaplamalar ile alüminyum bronz (Cu alaşımı) yüzeyine gerçekleştirilen $ZrO_2+Y_2O_3+Al_2O_3$ kaplamalar kıyaslandığında; Al_2O_3 ve $Al_2O_3+TiO_2$ ile kaplanan numunelerin daha düşük gözenek miktarı ve yüzey pürüzlülüğü ile daha yüksek sertlik ve yapışma mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir.

AA2024-T4 alüminyum alaşımı yüzeyine gerçekleştirilen $Al+Cu+B_4C$ kaplamalar ile alüminyum bronz (Cu alaşımı) yüzeyine gerçekleştirilen $Cu+Al+Cr_3C_2$ kaplamalar kıyaslandığında; $Cu+Al+Cr_3C_2$ ile kaplanan numunelerin daha yüksek sertlik ve daha düşük gözenek miktarına sahip olduğu görülmüştür. Fakat yapışma mukavemet değerlerinin $Al+Cu+B_4C$ ile kaplanan numunelerde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Her iki altlık malzeme de (AA2024-T4 ve Cu alaşımı), karbür toz karışımlarının kaplanması sıkıntılı olmuştur. Oksit bileşiklerinin kaplanabilirliği karbür bileşiklerinin kaplanabilirliğinden daha kolay gerçekleşmiştir. Alüminyum alaşımı (AA2024-T4) alt malzeme yüzeyine gerçekleştirilen kaplama numunelerinin ısı genleşme katsayı değerleri, alüminyum alaşımının ısı genleşme katsayı değerlerine bağlı olarak alüminyum bronz (Cu alaşımı) alt malzeme ile gerçekleştirilen kaplama numunelerinin ısı genleşme katsayı değerlerinden daha yüksek tespit edilmiştir.

10.2. Öneriler

- 1) Değişik partikül boyutlarındaki tozlarla kaplama işlemleri yapılarak, partikül boyutunun kaplamanın özelliklerine olan etkisi araştırılabilir,
- 2) Kaplama tabakasının ısı genleşme katsayısının ana malzemeye yakın olması istenildiğinden ara astar kaplama tabakası kullanılarak ısı genleşme özellikleri araştırılabilir,
- 3) Kaplama tabakalarının aşınma ve korozyon testleri yapılarak, ilave partikül oranlarının aşınma ve korozyon dirençlerine etkileri araştırılabilir,
- 4) D grubu numunelerin ara yüzeyleri ayrıntılı olarak incelenerek olumsuzlukların giderilmesine yönelik önlemler araştırılabilir,
- 5) Kaplama tabakalarında kullanılan tozlar, daha gelişmiş sistemler olan robotik sistem plazma ve HVOF yöntemleriyle kaplanması denenerek, bu sistemlerin kaplamaların performansına etkileri araştırılabilir,
- 6) Tozların karıştırılmasına bağlı olarak çeşitli karıştırma veya mekanik alaşımlama işlemlerinin kaplamanın özelliklerine olan etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

Abalı, S., 2006, Ötektik Seramik Kompozitler ve Üretim Yöntemleri, Metalurji Dergisi, Sayı: 143, 6 s.

Afrasiabi, A., Saremi, M., Kobayashi, A., 2008, A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ+Al₂O₃ and YSZ/Al₂O₃, Materials Science and Engineering A, 478, 264–269.

Akçıl, M., 1990, Zirkonya Esaslı Seramik Kaplama Malzemelerinin Termal-Şok ve Porozite Özelliklerinin Tayini, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 82s.

Alpay, A., 2000, Plazma spreyci ZrO₂ termal bariyer kaplamasına silisyum karbür ilavesinin kaplama özellikleri üzerine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 89 s.

Arslan, G., Kalemci, A. 2009, Processing of silicon carbide–boron carbide–aluminium composites, Journal of the European Ceramic Society, 29, 3, 473-480.

Atik, E., Meriç, C., Şahan, A., 2001, TIG kaynak yöntemiyle birleştirilmiş 2024 alüminyum alaşımının kaynak bölgesinin çökeltme sertleşmesi bakımından incelenmesi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 3, Sayı: 3, 75-83.

Avallone, E. A., Baumeister, T., Sadegh, A.M., 2006, Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers, published by McGraw-Hill Professional, 90th Anniversary Ed., 11 Ed., New York/London, 13-50.

Bach, F.W., Duda, T., 2000, Moderne Beschichtungsverfahren, DGM Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V., Wiley-VCH, Weinheim-New York, 80-103.

Başman, G., Atar, E., Kayalı, E.S., 2007, Seramik Malzemelerin Aşınma Davranışı, Metalurji Dergisi, 146.

Bechtloff, G., 1985, Untersuchung zur Wärmeleitfähigkeit von Thermischen Spritzschichten, Metall, 39, 733-734.

Bolelli, G., Cannillo, V., Lusvarghi, L., Manfredini, T., 2006, Glass-alumina composite coatings by plasma spraying. Part I: Microstructural and mechanical characterization, Surface & Coatings Technology, 201, 458–473.

Büyükarıslan, S., 2006, Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş Alüminyum alaşımlarının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü., 79s.

Call T., 1984, Resistant and solid-state welding and other joining processes, AWS Welding Handbook, Seventh Edition Chapter 12, Vol. 3.

Clare, M.J.H., Crawmer, D.E., 1982, Thermal Spray Coatings, Metals Handbook, Vol. 5, 361-375.

Collazo, A., Covelo, A., Izquierdo, M., Nóvoa, X.R., Pérez, C., 2008, Effect of the experimental setup in the behaviour of sol–gel coatings, Progress in Organic Coatings, 63, 3, 291-298.

Craig, D.B., Anderson, D.S, (ed. by), 1995, Handbook of Corrosion Data, A.S.M International, 16-18.

Davis, J.R., 1990, Properties end selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM Handbook, Vol.2, 1-402.

Demiral, M. ve Yaşar, M., 2006, 95200-95300 Cu-Al-Fe Alaşımlarının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Teknoloji, Cilt 9, Sayı 1, 17-26.

Dubourg, L., Hlawka, F., Cornet, A., 2002, Study of aluminium-copper-iron alloys: application for laser cladding, Surface and Coatings Technology, 151-152, 329-332.

Erdoğan, M., 1998, Seramik Malzemeler ve Üretim Yöntemleri, Gazi Üniversitesi Tek.Eğt. Fak. Metal Böl. Ders Notları.

Erdoğan, M., 2001, Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri Demir Dışı Alaşımlar Cilt 2, Nobel Yayınevi, Ankara, 395-444s.

Erdoğan, M., Güneş, İ., Develi, F., 2006, Plazma Sprey ve Kullanım Alanları, Teknolojik Araştırmalar, Makine Teknolojileri Dergisi, 1, 61-66.

Fang, J.C., Xu, W.J., Zhao, Z.Y., Zeng, H.P., 2007, In-flight behaviors of ZrO₂ particle in plasma spraying, , Surface & Coatings Technology, 201, 5671–5675.

Fervel, V., Normand, B., Coddet, C., 1999, Tribological behavior of plasma sprayed Al₂O₃-based cermet coatings, Wear, 230, 70–77.

Habib, K.A., Saura, J.J., Ferrer, C., Damra, M.S., Giménez, E., Cabedo, L., 2006, Comparison of flame sprayed Al₂O₃/TiO₂ coatings: Their microstructure, mechanical properties and tribology behavior, Surface & Coatings Technology, 201, 1436–1443.

Hazar H., 2004, Bir Dizel Motoru Silindir Yüzeyinin Seramik Malzeme İle Kaplanarak Aşınma Davranışının Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 106.

Hoff, I.H., 1995, Thermal Spraying and Its Application, Welding and Metal Abrication, 63(7), 266-269.

Ilavsky, J., Long, G.G., Allen, A.J., Berndt, C.C., 1999, Evolution of the void structure in plasma-sprayed YSZ deposits during heating, Materials Science and Engineering A, 272, 1, 215-221.

Kahraman, N., 2000, Toz alev spreyleme yöntemi ile kaplanan numunelerde kaplama parametrelerinin etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-86s.

Kahraman, N., Gülenç, B., 2002, Abrasive wear behaviour of powder flame sprayed coatings on steel substrates, Materials & Design 23, 8, 721-725.

Kahraman, N., Gülenç, B., Durgutlu, A., 2005, Alevle spreyleme yöntemiyle kaplanan malzemelerdeki aşınma davranışının incelenmesi, 1.Uluslararası Mesleki ve Teknik Eğitim Teknolojileri Kongresi, İstanbul, 1392-1399.

Kalay, Y.E., Ögel, B., Yıldırım, R.O., 2004, Tek ve çok katmanlı AA 2024 plakaların düşük hızlarda darbe karakterizasyonu, SAVTEK 2004, Savunma Teknolojileri Kongresi, 59-67, ODTÜ, Ankara

Kamal, S., Jayaganthan, R., Prakash, S., 2009, Evaluation of cyclic hot corrosion behaviour of detonation gun sprayed Cr_3C_2 -25%NiCr coatings on nickel- and iron-based superalloys, Surface and Coatings Technology, 203, 8, 1004-1013.

Karabaş, K., 2006, Bor Karbür Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 75s.

Karabay, S., 2007, AA-5xxx ve AA-6xxx Serisi Alüminyum Alaşımların Tel Çekme Özellikleri ve Tel Çekme Makineleri, Metal dünyası Dergisi, Eylül 2007, 166.

Karadeniz, S., 1981, Plasmametallurgische Herstellung von Metallegierungen. (Gleitlagerwerkstoffe auf Al-Pb-sowie Al-Pb-Fe Basis), Dissertation, Technische Universität-Hannover/Deutschland.

Kaya, A. Ö., 2007, Plazma Püskürtme ve HVOF Yöntemleri Kullanılarak, Cr_3C_2 - NiCr(75/25) ve CrNiBSi+%80 WC-Co Tozlarıyla Kaplanan Çeliğin Yapısı ve Yüzey Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, 74 s.

Khan, A.N., Qureshi, 2009, I.N., Microstructural evaluation of ZrO_2 -MgO coatings Journal of Materials Processing Technology, 209, 1, 488-496

Khoddami, A.M., Sabour, A. and Hadavi S.M.M., 2007, Microstructure formation in thermally-sprayed duplex and functionally graded NiCrAlY/Yttria-Stabilized Zirconia coatings, Surface and Coatings Technology, 201, 12, 6019-6024.

Khor, K.A., Dong, Z.L., Gu, Y.W., 1999, Plasma sprayed functionally graded thermal barrier coatings, Materials Letters, 38, 437-444.

Knotek, O., 2001, Thermal Spraying and Detonation Gun Processes, Handbook Of Hard Coatings, ISBN: 0-8155-1438-7, New York, 77-107.

Kurt, T.K., 2005, Alüminyum Alaşım Elementleri ve Alaşımları, Metal dünyası, Ağustos sayısı, 147.

Kutbay, I. ve Daşçılar, B., Plazma Sprey Kaplama Yöntemiyle Farklı Al_2O_3 - TiO_2 Tozlarının Kaplama Kalınlığına Bağlı Olarak Kaplama Pürüzlülüğüne ve Kaplama Sertliğine Etkisi, 13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, (Başkan : Tayfur ÖZTÜRK), İstanbul, 611-617.

Lee J.H., Won, C.W., Joo, S.M., Maeng Y.D., 2000, Preparation of B_4C Powder From B_2O_3 Oxide By SHS Process, Journal of Materials Science Letters, 19, 951-954.

Liang, W., Xiaolei, X., Jiujun, X., Zukun, H., 2000, Microstructures and properties of PVD aluminum bronze coatings, Thin Solid Films, 376, 159-163.

Lin, B.T., Jean, M.D., Chou, J.H., 2007, Using response surface methodology for optimizing deposited partially stabilized zirconia in plasma spraying, Applied Surface Science, 253, 3254–3262.

Lina, X., Zenga, Y., Leeb, S.W., Ding, C., 2004, Characterization of alumina–3 wt.% titania coating prepared by plasma spraying of nanostructured powders, Journal of the European Ceramic Society, 24, 627–634.

Luo, H., Goberman, D., Shaw, L. and Gell, M., Indentation fracture behaviour of plasma-sprayed nanostructured Al_2O_3 –13 wt.% TiO_2 coatings. Materials Science and Engineering A, 2003, 346, 237– 245.

Ma, W., Pan, W.X., Wu, C.K., 2005, Preliminary investigations on low-pressure laminar plasma spray processing, Surface & Coatings Technology, 191, 166– 174.

Matejka, D., Benko, B., 1989, Plasma Spraying of Metallic and Ceramic Materials, ISSN 0-471-91876-8, U.K.

Matucha, K.H., 1996, Structure and properties of nonferrous alloys, Vol.8, ISBN 3-527-26821-9, 837.

McGrann, R.T.R., Greving, D.J., Shadley, J.R., ; Rybicki, E.F., Kruecket., L., Bodger, B.E., 1998, The effect of coating residual stress on the fatigue life of thermal spray-coated steel and aluminum, Surface & Coatings Technology, 108-09, 1-3, 59-64.

Milhdbk5h, 1998, Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures, Department of Defence, Military Handbook, U.S. Army Materials Technology Laboratory, 3, 21-196.

Mori, T., 2007, Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths, Chapter 238 Higher Borides, Volume 38, 105-173.

Mishra, S.B., Chandra, K., Prakash, S., Venkataraman B., 2005, Characterisation and erosion behaviour of a plasma sprayed Ni₃Al coating on a Fe-based superalloy, Materials Letters, 59, 3694-3698.

Normand, B., Fervel, V., Coddet, C. and Nikitine, V., 2000, Tribological properties of plasma sprayed alumina-titania coating: role and control of microstructure, Surface and Coating Technology, 123, 278-287.

Oğuz, B., 1990, Demirdışı Metallerin Kaynağı Metalurji-Uygulama, Oerlikon Yayınları, İstanbul.

Öksüz C., 1996, Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının jomminy yöntemi ile su verme duyarlılığı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 90 s.

Özel S., 2004, Cu-Sn-Zn-Al Bronz Alaşımı Yüzeyine Ferromangan kaplamasının aşınma direncine etkisinin deneysel olarak araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 96 s.

Pamuk, U., Çimenoglu, H., 1997, Plazma Spreylenmiş Cr₃C₂-NiCr Kaplamaların Abrasiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 291-296.

Raman, V., Bhatia, G., Mishra, A., Sengupta, P.R., Rashmi, M.S, 2005, Development of carbon-ceramic composites, Materials Science and Engineering: A, 412, 1-2, 5, 31-36.

Riccardi, B., Montanari, R., Casadei, M., Costanza, G., Filacchioni, G., Moriani, A., 2006, Optimisation and characterisation of tungsten thick coatings on copper based alloy substrates, Journal of Nuclear Materials, 352, 29–35.

Sadyekov, F.A., Barykin, N.P., Aslanyan, I.R., 1999, Wear Of Copper And Its Alloys With Submicrocrystalline Structure, Wear, 225-229, 649-655.

Sanders, R.E., Sanders, T.H., Staley, I.T., 1983, Relationships between Microstructure, Conductivity and Mechanical Properties of alloy 2024-T4, Aluminium, 59, 13-17.

Saral, U., Üstel, F., Toplan, N., 2008, Alümina ilavesinin YSZ termal bariyer kaplamaların termal şok davranışına etkisi, 14. Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul.

Sarı, N.Y., Kaluç, E., Tülbentçi, K., 1999, Alevle Isıl Püskürtme Uygulanarak Ç 1050 (C45 E) Çeliğinin Abrasif + Eroziv Aşınma Davranışının İyileştirilmesi, Kaynak Teknolojisi II. Ulusal Kongresi, 177-185.

Sarı, N.Y. ve Tülbentçi, K., 1997, Modern Yüzey İşlemleri ile Aşınma Direncinin İyileştirilmesi, 7. Denizli Malzeme Sempozyumu, Bildiri Kitabı, Denizli, 370-377.

Sarıkaya, Ö., 2003, Al-12Si Malzeme üzerine plazma püskürtme tekniği ile Al-Si+B₄C kaplama, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 141 s.

Sarıkaya, Ö., Anık S., Çelik, E., 2004, Plazma püskürtme yöntemiyle Al-%12Si ana malzemesi üzerinde hazırlanmış Al-Si+B₄C kaplamaların aşınma davranışlarının incelenmesi, 10. Denizli Malzeme Sempozyumu, 412-418, Denizli.

Sarıkaya, Ö., 2007, *Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği*, Sakarya Üniversitesi Yayınları, ISBN: 978-9944-62-417-6, Sakarya, 95-145.

Sarsılmaz, F., 2008, Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş AA7075/AA6061 Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

Shackelford, J. F. and Alexander, W., 2001, Materials Science and Engineering Handbook, 3. Baskı, CRC Press, ISBN 0-8493-2696-6, 1950 sayfa.

Shanmugavelayutham, G., Yano, S., Kobayashi, A., 2006, Microstructural characterization and properties of ZrO_2/Al_2O_3 thermal barrier coatings by gas tunnel-type plasma spraying, *Vacuum*, 80, 1336–1340.

Sharma, S.K., Ko, G.D., Kang, K.J., 2009, High temperature creep and tensile properties of alumina formed on FeCrAlloy foils doped with yttrium, *Journal of the European Ceramic Society*, 29, 3, 355-362.

Smith, R.W., Knight, R. 1995, Thermal Spraying I: Powder Consolidation-From Coating to Forming, *JOM*, 47, 8, 32-39.

Sobolev, V.V., Guilemany, J.M., Calero, J.A., 1999, Heat transfer during the formation of an HVOF sprayed WC-Co coating on a copper substrate, *Journal of Materials Processing Technology*, 96, 1-8.

Sorrentino, L., Carrino, L., 2009, Influence of process parameters of oxygen cold plasma treatment on wettability ageing time of 2024 aluminium alloy *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29, 2, 136-143.

Taban, E., Kaluç, E., 2005, Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları - Endüstriyel Kullanım Alanları, *Metal Dünyası*, Şubat Sayısı, 141.

Tekin E., 1984, Demir Dışı Metaller ve Alaşımlarının Uygulamalı Optik Metalografisi, *SEGEM Yayınları*, Ankara, 254-300.

Topbaş, M. A., 1993, Isıl İşlemler, Yıldız Teknik Üniversitesi Metalurji Müh., İstanbul, 405-412.

Toplan, H. Ö., 2008, İleri Teknoloji Seramik Malzemeler, Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ders Notları.

Tucker, R. C., 1994, Thermal Spray Coatings, *ASM Handbook*, ISBN: 0-87170-384-2, Vol. 5: Surface Engineering, Ohio, 499-509.

Tulgar, H.E., 1971, *Demirden Gayrı Metaller Metalurjisi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, 215-219s.

Turhan, H., 1998, Düşük katkılı kalay içerikli bronz yatakların aşınma ve yorulma davranışlarının araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 100s.

Turhan, H., Kuzucu, V., Aksoy, M., Yildirim, M.M., 2001, The effect of manganese on the microstructure and mechanical properties of lead-tin bronze, *Journal of Processing Technology*, 4965, 1-5.

Tusek J. and Suban M., 2003, High-productivity multiple-wire submerged-arc welding and cladding with metal-powder addition, *Journal of Materials Processing Technology*, 133, 1-2, 207-213.

Uozato, S., Nakata, K., Ushio, M., 2005, Evaluation of ferrous powder thermal spray coatings on diesel engine cylinder bores, *Surface & Coatings Technology*, 200, 2580 – 2586.

Ulutan, M., 2007, AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 305 s.

Vasiliev, A. L., Padture, N.P., Ma, X., 2006, Coatings of metastable ceramics deposited by solution-precursor plasma spray: I. Binary $ZrO_2-Al_2O_3$ system, *Acta Materialia* 54, 4913–4920

Villat, M., 1986, Functionally Effective Coatings using Plasma Spraying, *Sulzer Technical Review*, 3, 41-45.

Wang Xi-He, Niu Ji-Tai, Guan Shao-Kang, Wang Le-Jun, Cheng Dong-Feng, 2009, Investigation on TIG welding of SiCp-reinforced aluminum–matrix composite using mixed shielding gas and Al–Si filler, *Materials Science and Engineering: A*, 499, 1-2, Pages 106-110

Wang, J.J., Lin, T., Chen, S.B., 2005, Obtaining weld pool vision information during aluminium alloy TIG welding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26, 3, 219-227.

William, J., Miller, A. R., 1989, TBC's for better engine efficiency, *Advanced Materials & Processes*, 41, 29-33.

www.azom.com

www.precisioncoat.com/chromecarbide.htm

www.sulzermetco.com

www.wikipedia.org/wiki/Chromium_carbide

Xiaodong He, Xianming Shi, 2008, Self-repairing coating for corrosion protection of aluminum alloys Progress in Organic Coatings, In Press, Corrected Proof, Available online 1 November 2008.

Xiong, H-B., Zheng, L-L., Sampath, S., Williamson, R.L., and Fincke, J.R., 2004, Three-dimensional simulation of plasma spray: effects of carrier gas flow and particle injection on plasma jet and entrained particle behavior, International Journal of Heat and Mass Transfer, 47, 24, 5189-5200.

Yeşildal, R., Günay, Y.Z., 2007, Plazma sprej yöntemi ile kaplama ve sprej karakteristiklerinin incelenmesi, DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt 9, Sayı 1, 59-76.

Yıldırım, M.M., 1974, Theoretische Untersuchungen über Abbaureaktionen an dichten Festkörpern mit einem Gemisch aus vier reagierenden Gasen, Dissertation, Technische Universität (TU) Clausthal/Deutschland.

Yıldırım, M.M., 1987, Çökeltme (ayırışma) yolu ile sertleşebilirlik, 2. Denizli Malzeme Sempozyumu, 2-3 Mart 1987, Bildiriler Kitabı, Denizli/Türkiye, 17-25.

Yıldırım, M.M., Doğan, Z., Çakan, A., Pakdil, M., 2001a, Mühendislik Malzemeleri -II-, Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Yayın No: 10/4, Mustafa Kemal Üniversitesi Basımevi, İskenderun, (ISBN 975-7989-15-0).

Yıldırım, M.M., Doğan, Z., Pakdil, M., Çakan, A., 2001b, Mühendislik Malzemeleri -III-, Mustafa Kemal Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Yayın No: 11/5, Mustafa Kemal Üniversitesi Basımevi, İskenderun, (ISBN 975-7989-16-9).

Yılmaz, R., Kurt, A.O., Demir, A., Tatlı, Z., 2007, Effects of TiO₂ on the mechanical properties of the Al₂O₃–TiO₂ plasma sprayed coating, Journal of the European Ceramic Society, Vol 27, 2-3, 1319-1323.

Yilbas B.S. and Arif, A.F.M., 2007, Residual stress analysis for HVOF diamalloy 1005 coating on Ti–6Al–4V alloy, Surface and Coatings Technology, 202, 3, 559-568.

Yurdakul, M., Özbay, O., İç, Y.T., 2002, Havacılık Alanında Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının Seçimi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., Cilt 17, No 2, 1-23.

Zhang, H., Wang, X.Y., Zheng, L.L and Jiang, X.Y., 2001, Studies of splat morphology and rapid solidification during thermal spraying, International Journal of Heat and Mass Transfer, 44, 4579-4592.

Zhao, L., Seemann, K., Fischer, A., and Lugscheider, E., 2003, Study on atmospheric plasma spraying of Al₂O₃ using on-line particle monitoring, Surface and Coatings Technology, Vol 168, 2-3, 186-190.

Zhou, M., Nose, M., Makino, Y., Nogi, K., 2000, Annealing effects on the structure and mechanical properties of r.f.-sputtered Cr–B hard thin films, Thin Solid Films 359, 2, 165-170.

SERKAN ÖZEL’İN ÖZGEÇMİŞİ

Serkan ÖZEL, 1979 yılında Ankara’da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Konya’nın Seydişehir ilçesinde, lise öğrenimini Mersin Endüstri Meslek Lisesi’nde tamamladı. 1997 yılında Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü’nde başlamış olduğu lisans öğrenimini 2001 yılında tamamladı. Aynı yıl Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2002 yılında Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. 2004 yılında yüksek lisans öğrenimini tamamlayıp, aynı yıl doktora öğrenimine başladı. Halen Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak görevini sürdüren Serkan ÖZEL, evli ve bir çocuk babasıdır.