

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



**BOR KARBÜR VE TİTANYUM KARBÜR İLAVELİ
SÜRTÜNMELİ KAPLAMANIN KARAKTERİSTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Mehmet Erbil ÖZCAN

Doktora Tezi

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Ekim 2020

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

**BOR KARBÜR VE TİTANYUM KARBÜR İLAVELİ SÜRTÜNMELİ
KAPLAMANIN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Tez Yazarı
Mehmet Erbil ÖZCAN

Danışman
Prof. Dr. Latif ÖZLER

Ekim 2020
ELAZIĞ

T. C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Başlığı: Bor Karbür ve Titanyum Karbür İlaveli Sürtünmeli Kaplamanın
Karakteristik Özelliklerinin İncelenmesi

Yazarı: Mehmet Erbil ÖZCAN

İlk Teslim Tarihi: 28.9.2020

Savunma Tarihi: 16.10.2020

TEZ ONAYI

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına göre hazırlanan bu tez aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından değerlendirilmiş ve akademik dinleyicilere açık yapılan savunma sonucunda OYBİRLİĞİ ile kabul edilmiştir.

Danışman:	Prof. Dr. Latif ÖZLER Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	<i>İmza</i> Onayladım
Başkan:	Prof.Dr.Mehmet EROĞLU Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof.Dr.Gül TOSUN Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof.Dr.Mehmet GAVGALI Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım
Üye:	Prof.Dr.Ahmet YARDIMEDEN Dicle Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi	Onayladım

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunun/...../20..... tarihli toplantısında tescillenmiştir.

İmza

Doç. Dr. Kürşat Esat ALYAMAÇ
Enstitü Müdürü

BEYAN

Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım “Bor Karbür ve Titanyum Karbür İlaveli Sürtünmeli Kaplamanın Karakteristik Özelliklerinin İncelenmesi” Başlıklı Doktora Tezimin içindeki bütün bilgilerin doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi ve sunulmasında bilimsel etik kurallarına uygun davrandığımı, kullandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi, maddi ve manevi desteği olan tüm kurum/kuruluş ve kişileri belirttiğimi, burada sunduğum veri ve bilgileri unvan almak amacıyla daha önce hiçbir şekilde kullanmadığımı beyan ederim.

16/10/2020

Mehmet Erbil ÖZCAN



ÖNSÖZ

Malzemelerin sertlik, korozyon ve aşınma direnci gibi yüzey özelliklerini iyileştirmek ya da bu özelliklerin birkaçını bir araya toplamak amacıyla farklı kaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Bu kaplama yöntemlerinden biri de sürtünmeli kaplama yöntemidir. Bu çalışmada, kaplama mili içine toz ilavesi ve altlık malzeme üzerine toz serme olmak üzere iki ayrı şekilde, sürtünmeli kaplama metodu ile gradyanlı olarak altlık malzemeler kaplanmış kullanılan parametrelerin etkisi incelenmiştir. Ayrıca literatürde yapılan çalışmalara ek olarak kullanılan iki yeni yöntemle, gelişen sürtünmeli kaplama teknolojisini bir adım daha ileri götürerek, bu alandaki eksiklikleri ve problemlerin giderilmesi amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasının her aşamasında her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam sayın Prof. Dr. Latif ÖZLER'e, tez çalışması süresince önerileriyle yol gösteren ve çok emeği bulunan sayın Prof. Dr. Gül TOSUN'a, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen tez izleme komitesi üyesi sayın Prof. Dr. Mehmet EROĞLU'na, her türlü imkânın kullanılması için gerekli desteği veren Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı sayın Prof. Dr. İhsan DAĞTEKİN'e, Konstrüksiyon ve İmalat Ana bilim dalı başkanı sayın Doç. Dr. Cihan ÖZEL'e, Makine Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi sayın Prof. Dr. Nihat TOSUN'a, Arş. Gör. Dr. Serkan ERDEM'e ve tüm bu süreçte sabrını, desteğini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 3001-Başlangıç AR-GE proje türü kapsamında **216M441** numaralı proje ile desteklenmiştir.

Mehmet Erbil ÖZCAN

ELAĞIĞ, 2020

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER	v
ÖZET	vii
ABSTRACT	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xv
EKLER LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
2. YÜZEY İYİLEŞTİRME İŞLEMLERİ.....	10
2.1. Yüzey Sertleştirilme İşlemleri	10
2.1.1. Yüzeyin Kimyasal Bileşimi Değiştirilmeden Yapılan İşlemler	10
2.1.2. Yüzeyin Kimyasal Bileşimini Değiştirerek Yapılan İşlemler	11
2.2. Yüzey Kaplama İşlemleri	14
2.2.1. Buhar Fazı ile Kaplama Yöntemleri.....	14
2.2.2. Sol-Jel Kaplama Yöntemi.....	15
2.2.3. Ergitme Fazlı Kaplama Yöntemleri.....	16
2.2.4. Ergitme Esaslı Kaplama Yöntemleri	24
2.3. Sertliklerine Göre Kaplama Çeşitleri.....	34
2.3.1. Düşük Sertlikli Kaplamalar	34
2.3.2. Sert Kaplamalar	36
2.3.3. Gradyanlı Kaplamalar	43
3. MATERYAL VE METOT	44
3.1. Kaplama Yöntemi.....	44
3.2. Altlık ve Kaplama Malzemeleri.....	44
3.3. Deney Parametreleri Belirlenmesi	46
3.4. Deney Malzemelerinin Hazırlanması	46
3.5. Deney Düzenekinin Hazırlanması	47
3.6. Sıcaklık Ölçümleri.....	49
3.7. Mikro Yapı İncelemeleri	51
3.8. Mikro Sertlik Ölçümleri	52
3.9. Aşınma Deneyleri	53
3.10. Eğme Testi.....	54
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	56
4.1. Deney Parametrelerinin Kaplama Yapısına Etkisi	56
4.2. Mikro Yapı İncelemeleri	63
4.3. Eksenel Kuvvet Ölçümleri.....	102
4.4. Kaplamaların Sıcaklık Ölçümleri	104
4.5. Mikro Sertlik İncelemeleri.....	106
4.6. Aşınma Deneyleri	114
4.7. Eğme Testi.....	123

4.8. Kaplama Verimi	126
5. SONUÇLAR.....	129
6. ÖNERİLER.....	133
KAYNAKLAR.....	134
EKLER	140
ÖZGEÇMİŞ	



ÖZET

Bor Karbür ve Titanyum Karbür İlaveli Sürtünmeli Kaplamanın Karakteristik Özelliklerinin İncelenmesi

Mehmet Erbil ÖZCAN

Doktora Tezi

FIRAT ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Ekim 2020, Sayfa: xvii + 139

Kaplama işlemleri, malzemenin özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynar. Malzemelerin sertlik, korozyon ve aşınma direnci gibi yüzey özelliklerini iyileştirmek ya da bu özellikleri bir araya toplamak amacıyla farklı kaplama yöntemleri kullanılmaktadır. Bu kaplama yöntemlerinden biri de sürtünmeli kaplama yöntemidir. Yöntem, altlık malzeme yüzeyine kendi eksenine etrafında belirli bir çevresel hızda dönen kaplama milinin teması sonucunda plastik deformasyon sıcaklığına ulaşarak altlık malzeme üzerine biriktirme esasına dayanır.

Bu çalışmada, kaplama işlemleri iki farklı yöntem kullanılarak yapılmıştır. Birinci yöntemde önce altlık malzeme yüzeyine belirli oranda kaplama tozu yapıştırılmış daha sonra kaplama mili vasıtasıyla kaplama malzemesinin altlık malzeme yüzeyine karışması sağlanarak malzeme kaplanmıştır. İkinci yöntemde ise takviye malzemeleri ve alüminyum tozlar çeşitli oranlarda karıştırılıp, kaplama milinin içine preslenerek sinterlenmiş ve gradyanlı olarak altlık malzeme üzeri kaplanmıştır. Deney parametrelerinin kaplamaların mekanik özellikleri üzerine, mikro yapıya, sertliğe ve aşınma direncine etkisi incelenmiş ve elde edilen kaplamaların eğme deneyleri yapılmıştır. Mikro yapı incelemeleri optik, SEM, EDX ve XRD yardımıyla yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, bazı toz ilavesiz tek katlı kaplamalarda altlık malzeme ile kaplama ara yüzeyinde kısmi boşluklar olduğu görülmüştür. Toz serme yöntemi ile yapılan kaplamalarda altlık malzemesi ile kaplama arasındaki yapışma yüzeyinin oldukça iyi, fakat homojen bir kaplama yapısının oluşmadığı görülmüştür. Toz takviyeli gradyanlı kaplamalarda ise kaplama ile altlık malzemesinin ara yüzey yapışmasının iyi olduğu, katmanlar arasındaki geçişlerin iyi olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sürtünmeli kaplama, Gradyanlı kaplama, Aşınma, Alüminyum, Bor karbür, Titanyum karbür,

ABSTRACT

Investigation of Characteristic Properties of Boron Carbide and Titanium Carbide Additive Friction Surfacing

Mehmet Erbil ÖZCAN

Ph.D. Thesis

FIRAT UNIVERSITY
Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

October 2020, Pages: xvii + 139

Coating processes play an important role in determining the properties of the material. Different coating methods are used to improve the surface properties of the materials such as hardness, corrosion and wear resistance or to gather these properties together. One of these coating methods is friction surfacing method. The method is based on the principle of accumulation on the substrate material by reaching the plastic deformation temperature as a result of the contact of the consumable rod rotating around the axis to the substrate at a certain rotational speed.

In this study, coating processes were made using two different methods. In the first method, a certain amount of coating powder is adhered to the substrate material surface, and then the material is coated by ensuring that the coating material is mixed with the surface of the substrate material by means of the consumable rod. In the second method, reinforcement and aluminum powders are mixed in various proportions, pressed into the consumable rod and sintered and coated gradiently on substrate surface. The effects of the test parameters on the mechanical properties were investigated. Microstructure, micro hardness and wear resistance were examined and bending tests of the obtained coatings were carried out. Microstructures were investigated with the help of optics, SEM, EDX and XRD. As a result of the study, it has been observed that some powder-free single-layer coatings have partial gaps at the interface of substrate and coating. It was observed that the adhesion surface between the substrate material and the coating of the samples made by the powder laying method was quite good, but a homogeneous coating structure was not formed. In powder reinforced gradient coatings, it was observed that the interlayer adhesion of the coating and the substrate was good and the transitions between the layers were good.

Keywords: Friction surfacing, Gradient coating, Wear, Aluminum, Boron carbide, Titanium carbide.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Termokimyasal yönteminin şematik gösterilişi.....	12
Şekil 2.2. Termal püskürtme yönteminin oluşum aşamaları.....	16
Şekil 2.3. a) Alevle püskürtme yönteminin şematik gösterilişi b) Yöntemin torna tezgâhında yapılan uygulaması	18
Şekil 2.4. Eksenel toz enjeksiyonlu plazma püskürtme yöntemi	19
Şekil 2.5. Dikey toz beslemeli plazma püskürtme yöntemi.....	20
Şekil 2.6. Plazma ile kaplama uygulaması.	20
Şekil 2.7. Patlamalı püskürtme yöntemi ile termal sprey kaplama.....	21
Şekil 2.8. Elektrik arkı ile püskürtme yönteminin şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.9. HVOF ısıp püskürtme düzeneğinin şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.10. Lazer kaplama işleminin şematik gösterilişi	25
Şekil 2.11. Lazer kaplamayla delme takımlarının kaplanması	26
Şekil 2.12. Elektron ışını ile kaplama yöntemi.....	27
Şekil 2.13. Tozaltı kaynağı ile kaplama yönteminin şematik diyagramı	28
Şekil 2.14. Gaz tungsten ark ile kaplamanın şematik olarak gösterilişi	29
Şekil 2.15. Sürtünmeli kaplama yönteminin şematik gösterimi	30
Şekil 2.16. Sürtünmeli kaplama işlemi	31
Şekil 2.17. Sürtünmeli kaplamanın termo-mekanik özellikleri	33
Şekil 2.18. Bor-Karbon ikili faz diyagramı	41
Şekil 2.19. Bor karbürün kristal yapısı	42
Şekil 2.20. Sanayide istenen amaca göre üretilmekte olan kaplama yapıları.	43
Şekil 3.1. Millerin içine toz basma işleminin yapıldığı pres	47
Şekil 3.2. Deney düzeneği	48
Şekil 3.3. Isıl İşlem Fırını	49
Şekil 3.4. Deneyler esnasında sıcaklık ölçümleri için kullanılan kızılötesi termometre	50
Şekil 3.5. Nikon MA-200 optik mikroskop	51
Şekil 3.6. SEM görüntüleme cihazı	52
Şekil 3.7. Mikro sertlik deneyleri ölçüm şablonu	52
Şekil 3.8. Sertlik ölçüm cihazı.....	53
Şekil 3.9. Pin-on-disk aşınma test cihazı.....	53
Şekil 3.10. Eğme Test Cihazı	54

Şekil 3.11. ASTM E290 standardına uygun eğilme testi düzeneği	55
Şekil 4.1. %10 B ₄ C ilaveli kaplamaların makro görüntüsü	59
Şekil 4.2. Ön deneyler esnasında yapılan başarısız deneylerden bir kısmı (a: n=800 d/dak ve Vf=140 mm/dak, b: n=1000 d/dak Vf=120 mm/dak ve düşük ilk bekleme süresi, c: n=1200 d/dak ve Vf=100 mm/dak)	60
Şekil 4.3. Düşük düşey ilerleme (n=1000 d/dak, Vv=140 mm/dak) hızında yapılan kaplamanın ara yüzeyinde görülen kısmi boşluklar	60
Şekil 4.4. Takviyeli ve takviyesiz olarak yapılan kaplamaların makro görüntüleri (1200 d/dak, Vf=160 mm/dak, Vv=100 mm/dak) a) Toz takviyesiz b) %10-30-60 B ₄ C takviyeli gradyanlı kaplama c) Toz serme yöntemi ile kaplama	61
Şekil 4.5. (a) Sürekli ve (b) sürekli olmayan gradyanlı kaplama numunelerinin makro görüntüleri (n=1000 d/dak, Takviye oranı= %10)	62
Şekil 4.6. %10-20-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın a) 1.katmanının b) 2.katmanının c) 3.katmanının d) Gradyanlı 3 katlı kaplamanın makro görüntüsü (n=1000 d/dak, Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)	62
Şekil 4.7. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın a) 1.katmanının b) 2.katmanının c) 3.katmanının d) Gradyanlı 3 katlı kaplamanın makro görüntüsü (n=1000 d/dak, Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)	63
Şekil 4.8. Altlık malzemesinin optik mikroskop görüntüsü ve EDX analizi sonucu elde edilen alaşım elementleri oranları (1000x)	64
Şekil 4.9. %10-20-30 TiC takviye tozuyla kaplanmış numunenin 1.katman – 2. Katman ara yüzeyindeki tane yapısı.	65
Şekil 4.10. 800 d/dak ile yapılan takviyesiz tek katlı kaplamanın optik mikroskop görüntüsü (x1000) (Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)	66
Şekil 4.11. 1000 d/dak ile yapılan takviyesiz tek katlı kaplamanın optik mikroskop görüntüsü (x1000) (Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)	67
Şekil 4.12. 1200 d/dak ile yapılan takviyesiz tek katlı kaplamanın optik mikroskop görüntüsü (x1000) (Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)	68
Şekil 4.13. 1500 d/dak ile yapılan tek katlı takviyesiz kaplamanın optik mikroskop görüntüsü (x1000) (Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)	69
Şekil 4.14. 1000 d/dak ile toz takviyesiz yapılan kaplamanın a) SEM görüntüsü b) EDX analizi (Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)	70
Şekil 4.15. 1200 d/dak B ₄ C toz serme yöntemi ile kaplanan numunenin optik mikroskop görüntüsü (x1000) (Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)	72
Şekil 4.16. B ₄ C takviyeli gradyan kaplamalı numunelerin optik mikroskop görüntüleri (x1000)	73
Şekil 4.17. B ₄ C takviyeli %5-15-30 gradyan kaplamalı numunelerin a) 1.katman b) 2.katman c) 3.katman optik mikroskop görüntüleri (x1000)	74
Şekil 4.18. B ₄ C takviyeli %10-20-30 gradyan kaplamalı numunelerin a) 1.katman b) 2.katman c) 3.katman optik mikroskop görüntüleri (x1000)	75

Şekil 4.19. B ₄ C takviyeli %10-30-60 gradyan kaplamalı numunelerin a)1.katman b)2.katman c)3.katman optik mikroskop görüntüleri (x1000).....	76
Şekil 4.20. a)B ₄ C b)TiC gradyanlı kaplama x1000 optik mikroskop görüntüsünde görülen intermetalik bantlar	77
Şekil 4.21. TiC takviyeli gradyan kaplamalı numunelerin optik mikroskop görüntüleri (x1000).....	78
Şekil 4.22. TiC takviyeli %5-15-30 gradyan kaplamalı numunelerin a)1.katman b)2.katman c)3.katman optik mikroskop görüntüleri (x1000).....	79
Şekil 4.23. TiC takviyeli %10-20-30 gradyan kaplamalı numunelerin a)1.katman b)2.katman c)3.katman optik mikroskop görüntüleri (x1000).....	80
Şekil 4.24. TiC takviyeli %10-30-60 gradyan kaplamalı numunelerin a)1.katman b)2.katman c)3.katman optik mikroskop görüntüleri (x1000).....	81
Şekil 4.25. a) %10-20-30 TiC, b) %10-30-60 TiC takviyeli numunelerin ara yüzey SEM görüntüleri ve c) %10-30-60 TiC takviyeli numunenin EDX analizi.....	83
Şekil 4.26. %10-20-30 TiC takviyeli numunenin ara yüzeyinde meydana gelen girdap bölgeleri a)altlık-1.katman b) 1.katman-2.katman geçiş bölgeleri (x50).....	84
Şekil 4.27. %10-30-60 TiC takviyeli numunenin ara yüzeyinde meydana gelen girdap bölgeleri a)altlık-1.katman b) 1.katman-2.katman geçiş bölgeleri (x50).....	85
Şekil 4.28. a) %10-20-30 B ₄ C b) %10-20-30 TiC takviyeli kaplamaların altlığında meydana gelen ITAB'ın optik mikroskop görüntüleri (x50).....	87
Şekil 4.29. %10-30-60 B ₄ C takviyeli kaplamanın başlangıç ve bitiş noktalarının optik mikroskop görüntüsü (x50).....	88
Şekil 4.30. B ₄ C gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri.....	89
Şekil 4.31. %5-15-30 B ₄ C gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri a) altlık-1.katman b) 1.katman-2.katman c) 2.katman-3.katman.....	90
Şekil 4.32. %10-20-30 B ₄ C gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri a) altlık-1.katman b) 1.katman-2.katman c) 2.katman-3.katman.....	91
Şekil 4.33. %10-30-60 B ₄ C gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri a) altlık-1.katman b) 1.katman-2.katman c) 2.katman-3.katman.....	92
Şekil 4.34. TiC gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri	93
Şekil 4.35. %5-15-30 TiC gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri a) altlık-1.katman b) 1.katman-2.katman c) 2.katman-3.katman.....	94
Şekil 4.36. %10-20-30 TiC gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri a) altlık-1.katman b) 1.katman-2.katman c) 2.katman-3.katman.....	95
Şekil 4.37. %10-30-60 TiC gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri a) altlık-1.katman b) 1.katman-2.katman c) 2.katman-3.katman.....	96
Şekil 4.38. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının a) SEM görüntüsü b) ve c) EDX analizi d) XRD faz analizi	97
Şekil 4.39. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının SEM görüntüsü	97
Şekil 4.40. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının EDX analizi.....	98

Şekil 4.41. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının XRD analizi	99
Şekil 4.42. %10-30-60 B ₄ C takviyeli kaplamanın 3.katmanının a) SEM görüntüsü b) ve c) EDX analizi d) XRD faz analizi	100
Şekil 4.43. %10-30-60 B ₄ C takviyeli kaplamanın 3.katmanının SEM görüntüsü	100
Şekil 4.44. %10-30-60 B ₄ C takviyeli kaplamanın 3.katmanının EDX analizi	101
Şekil 4.45. %10-30-60 B ₄ C takviyeli kaplamanın 3.katmanının XRD analizi	102
Şekil 4.47. %10-20-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği	103
Şekil 4.48. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği	104
Şekil 4.49. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 2.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	105
Şekil 4.50. %5-15-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	105
Şekil 4.51. Tek katlı kaplamalı numunelerin yüzeylerinin mikro sertlik grafiği	106
Şekil 4.52. 800 d/dak ile yapılan numunenin a) optik mikroskop b) SEM görüntüsü	107
Şekil 4.53. B ₄ C takviyesi kullanılarak yapılan kaplamaların altlık-kaplama1 ara yüzeyindeki mikro sertlik grafiği	109
Şekil 4.54. B ₄ C takviyesi kullanılarak yapılan kaplamaların kaplama1-kaplama2 ara yüzeyindeki mikro sertlik grafiği	109
Şekil 4.55. B ₄ C takviyesi kullanılarak yapılan kaplamaların kaplama2-kaplama3 ara yüzeyindeki mikro sertlik grafiği	110
Şekil 4.56. TiC takviyesi kullanılarak yapılan kaplamaların altlık-kaplama1 ara yüzeyindeki mikro sertlik grafiği	111
Şekil 4.57. TiC takviyesi kullanılarak yapılan kaplamaların kaplama1-kaplama2 ara yüzeyindeki mikro sertlik grafiği	112
Şekil 4.58. TiC takviyesi kullanılarak yapılan kaplamaların kaplama2-kaplama3 ara yüzeyindeki mikro sertlik grafiği	112
Şekil 4.59. %10-30-60 TiC ve B ₄ C takviyeli gradyanlı kaplama yapılmış numunelerin mikro sertliklerinin katman bazında karşılaştırılması	113
Şekil 4.60. Kaplamasız ve kaplamalı numunelerin aşınma grafiği	115
Şekil 4.61. %5-15-30 B ₄ C ve %5-15-30 TiC takviyeli kaplamaların aşınma yolu ile aşınma miktarının değişimi	115
Şekil 4.62. %10-20-30 B ₄ C ve %10-20-30 TiC takviyeli kaplamaların aşınma yolu ile aşınma miktarının değişimi	116
Şekil 4.63. %10-30-60 B ₄ C ve %10-30-60 TiC takviyeli kaplamaların aşınma yolu ile aşınma miktarının değişimi	116
Şekil 4.64. %5-15-30 a) B ₄ C ve b) TiC takviyeli kaplamanın altlık- kaplama 1 ara yüzeyinin aşınma deneyi sonrası SEM görüntüsü	118
Şekil 4.65. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın a) Kaplama 1-kaplama 2 ara yüzeyinin b) Kaplama 2-kaplama 3 ara yüzeyinin aşınma deneyi sonrası SEM görüntüsü	119

Şekil 4.66. %10-20-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın ara yüzeyinin aşınma deneyi sonrası SEM görüntüsü a) Altlık-kaplama 1, b) Kaplama 1-kaplama 2 c) Kaplama 2-kaplama 3.....	120
Şekil 4.67. %5-15-30 TiC tozu takviyeli numunenin birinci katmanının aşınma deneyi sonrası SEM görüntüsü	123
Şekil 4.68. a) 1200 d/dak devir sayısında tek katlı toz ilavesiz yapılan b) B ₄ C toz serme yöntemi ile yapılan takviyeli numunenin aşınma deneyi sonrası altlık-kaplama ara yüzeyinin SEM görüntüsü ..	122
Şekil 4.69. Üç nokta eğme testinin aşamaları.....	123
Şekil 4.70. a) %10-20-30 b) %5-15-30 c) %10-30-60 oranında B ₄ C kaplanan numunelerin eğme testi sonrası makro fotoğrafları.....	125
Şekil 4.71. B ₄ C takviyeli kaplamaların üç nokta eğilme testinden elde edilen yük-yer değiştirme grafiği	125
Şekil 4.72. a) % 5-15-30 b) % 10-30-60 c) % 10-20-30 oranında TiC kaplanan numunelerin eğme testi sonrası makro fotoğrafları.....	125
Şekil 4.73. TiC takviyeli kaplamaların üç nokta eğme testinden elde edilen yük-yer değiştirme grafiği ..	126
Şekil 4.74. 800, 1000 ve 1200 d/d, Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak şartlarında, B ₄ C ilaveli ve ilavesiz yapılan kaplamaların kaplama verimlerinin karşılaştırılması	127
Şekil 4.75. S=1000 d/d, Vv=160 mm/dak, %10 toz ilaveli B ₄ C ve TiC kaplamaların verimlerinin karşılaştırılması.....	128
Şekil 4.76. B ₄ C ilaveli numunelerin kaplama veriminin yatay ve düşey ilerlemeye göre değişimi	128
Şekil 6.1. %5-15-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği.....	143
Şekil 6.2. %5-15-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 2.katmanının kuvvet-zaman grafiği.....	143
Şekil 6.3. %5-15-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 3.katmanının kuvvet-zaman grafiği.....	144
Şekil 6.4. %10-20-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği	144
Şekil 6.5. %10-20-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 2.katmanının kuvvet-zaman grafiği	145
Şekil 6.6. %10-20-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 3.katmanının kuvvet-zaman grafiği	145
Şekil 6.7. %10-30-60 B ₄ C takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği	146
Şekil 6.8. %10-30-60 B ₄ C takviyeli kaplamanın 2.katmanının kuvvet-zaman grafiği	146
Şekil 6.9. %10-30-60 B ₄ C takviyeli kaplamanın 3.katmanının kuvvet-zaman grafiği	147
Şekil 6.10. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın 1. katmanının kuvvet-zaman grafiği	147
Şekil 6.11. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın 2. katmanının kuvvet-zaman grafiği	148
Şekil 6.12. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının kuvvet-zaman grafiği	148
Şekil 6.13. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği	149
Şekil 6.14. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 2.katmanının kuvvet-zaman grafiği	149
Şekil 6.15. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının kuvvet-zaman grafiği	150
Şekil 6.16. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği	150
Şekil 6.17. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 2.katmanının kuvvet-zaman grafiği	151
Şekil 6.18. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının kuvvet-zaman grafiği	151

Şekil 6.19. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın 1.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	152
Şekil 6.20. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın 2.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	152
Şekil 6.21. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	153
Şekil 6.22. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 1.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	153
Şekil 6.23. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 2.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	154
Şekil 6.24. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	154
Şekil 6.25. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 1.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	155
Şekil 6.26. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 2.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	155
Şekil 6.27. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	156
Şekil 6.28. %5-15-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 1.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	156
Şekil 6.29. %5-15-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 2.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	157
Şekil 6.30. %5-15-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	157
Şekil 6.31. %10-20-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 1.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	158
Şekil 6.32. %10-20-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 2.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	158
Şekil 6.33. %10-20-30 B ₄ C takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	159
Şekil 6.34. %10-30-60 B ₄ C takviyeli kaplamanın 1. katmanının sıcaklık-zaman grafiği	159
Şekil 6.35. %10-30-60 B ₄ C takviyeli kaplamanın 2. katmanının sıcaklık-zaman grafiği	160
Şekil 6.36. %10-30-60 B ₄ C takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği	160

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Bor karbürün özellikleri.....	41
Tablo 3.1. Gradyanlı kaplamalarda kullanılan takviye toz ve oranları	44
Tablo 3.2. Al 5754 ve Al 7075 malzemesinin kimyasal özellikleri	45
Tablo 3.3. Al 5754 ve Al7075 malzemesinin mekanik özellikleri	45
Tablo 3.4. Takviye tozlarının özellikleri.....	45
Tablo 3.5. Deney parametreleri ve değerleri.....	46
Tablo 3.6. Toz ilavesi yapılan kaplama millerinin sinterleme süre ve sıcaklığı.....	47
Tablo 3.7. Sürtünmeli kaplamada kullanılan CNC freze tezgâhının özellikleri.....	48
Tablo 3.8. Sürtünmeli kaplamada kullanılan dinamometrenin özellikleri	49
Tablo 3.9. Sürtünmeli kaplamada kullanılan kızılötesi termometrenin özellikleri	50

EKLER LİSTESİ

	Sayfa
Ek- 1: Sürtünmeli Kaplama için CNC Frezeyle yazılan Program Döngüsü	140
Ek- 2: Ana Program.....	142
Ek- 3 : Kuvvet – Zaman Grafikleri.....	143
Ek- 4 : Sıcaklık – Zaman Grafikleri.....	152



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

N	: Newton
d/dak	: Devir/dakika
mm/dak	: Milimetre/dakika
dB	: Desibel

Kısaltmalar

DKB	: Dinamik Kristallenme Bölgesi
EDX	: Enerji Yayılımlı X-Işını Analizi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Ray Yayılımı Analizi
HAZ	: Heat Affected Zone (Isı Tesiri Altındaki Bölge)
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
TiC	: Titanyumkarbür
B ₄ C	: Borkarbür
TEB	: Termomekanik Olarak Etkilenen Bölge
HV	: Vickers Sertliği
PVD	: Physical Vapour Deposition (Fiziksel Buhar Biriktirme)
CVD	: Chemical Vapour Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
HVOF	: High Velocity Oxy Fuel (Yüksek Hızlı Oksi Yakıt)
DJ-HVOF	: Diamond Jet High Velocity Oxy Fuel (Elmas Jet Yüksek Hızlı Oksi Yakıt)
D-GUN	: Detonation spraying (Patlamalı Püskürtme)
FSC	: Friction Stir Cladding (Sürtünme Karıştırma Biriktirme)
FSW	: Friction Stir Welding (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)
PTFE	: Polytetrafloretilen
DLC	: Diamond Like Carbon (Elmas Benzeri Karbon)
h-BN	: Hegzagonal Bor Nitrür

1. GİRİŞ

Dünyada aşınmanın neden olduğu yıllık maddi kayıpların 200 milyar dolar dolaylarında bulunduğu tahmin edilmektedir [1]. Bu kayıpları azaltmak ve malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek, istenen özellikleri bir araya toplamak için farklı yöntemlerle kaplama işlemleri yapılmaktadır. Yüzey kaplama işlemleri aşınma, korozyon, optik vb. özellikleri iyileştirmek, geliştirmek ve dış görünümü güzelleştirmek amacıyla otomotiv, uçak, elektronik ve sağlık sektörü gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Ana malzemenin tümü yerine sadece yüzeyi PVD, CVD, termal sprey ve sürtünmeli gibi çeşitli kaplama yöntemleri kullanılarak iyileştirilmektedir. Bu kaplama yöntemlerinden biri olan sürtünmeli kaplama, ilerleme hareketi yapan altlık malzeme üzerinde dönme hareketi yapan kaplama milinin belirli bir eksenel kuvvet ile bastırılması sonucunda yüksek sıcaklıklara ulaşarak kaplama yapması prensibine dayanmaktadır [2]. Sürtünmeli kaplama diğer adıyla sürtünmeli biriktirme işlemi, takım çelikleri, paslanmaz çelikler, alüminyum alaşımları ve sert dolgu malzemeleri gibi birçok malzemeyi yüzey üzerinde biriktirerek, altlık malzemenin özelliklerinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi amacıyla yapılır. Aksların, tarım araçlarının ve çapa zincirlerinin onarılmasında, malzemelerin aşınma dirençlerinin artırılmasında, düşük karbon çeliklerin yüksek karbonlu çeliklerle kaplanmasında, uçak türbin bıçaklarının ve demiryolu araçlarının aşınan parçalarının onarılması gibi birçok alanda kullanılmaya devam eden sürtünmeli kaplama, günümüzde önemi oldukça yüksek bir kaplama yöntemi olmaya devam etmektedir [3, 4]. Ayrıca bu yöntemin seçilmesindeki en önemli sebeplerinden biri, ek bir ısıtma kaynağı gerek duyulmadan malzemenin plastik deformasyon sıcaklığına ulaşarak kaplama işleminin yapılması olarak gösterilebilir.

Sürtünmeli kaplamanın temelleri 1941 yılında sürtünme kaynağının patentinin alınmasıyla atılmaya başlanmış, 1959 yılında ise sürtünme kaynağından sürtünmeli kaplamaya geçiş yapılmıştır. Bununla birlikte bu yöntem ancak son yıllarda ticari destek almaya ve ilgi görmeye başlamıştır [2]. Bu yöntemde yüksek gerilme şartları altında kaplama ve altlık malzeme arasında güçlü bir bağ oluşumu sağlanarak altlık malzeme üzerinde 0,5 – 3 mm civarında kaplama tabakası oluşur [5]. İşlem sırasında kaplama milindeki sıcaklık erime sıcaklığının yaklaşık %80 ulaşmaktadır [6].

Sürtünmeli kaplamada ilerleme işlemi altlık malzemenin bağlı olduğu tabladan verilir. Bu ilerleme ile ters yönde oluşan tabaka, altlık malzeme üzerinde yapılması istenen kaplamayı oluşturur. Ayrıca işlem esnasında kaplama milinin altlık malzeme ile temas bölgesinde flanş adı verilen bir kısım oluşur [7]. Oluşan flanşın çapı, kaplama milinin dönme hızına ve düşey ilerleme miktarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Elde edilen kaplama, istenen mikro yapıya göre çeşitli ısıtma işlemlere de tabi tutulabilir.

Sürtünmeli kaplama işlemi, numerik kontrollü tezgâhlarda, CNC tezgâhlarında ya da sürtünmeli kaplama için özel olarak tasarlanmış tezgâhlarda yapılan bilgisayar kontrollü tam otomatik bir işlemdir. Kaplama esnasındaki mil ve altlık malzeme hareketleri, CNC kodları vasıtasıyla tezgâha girilir ve kaplama işlemi otomatik olarak gerçekleştirilir. Yönteme el ile herhangi bir müdahale söz konusu değildir. Bu sebepten dolayı yöntemde operatör kaynaklı hatalar görülmez. İlk kurulum maliyeti yüksek olmasına rağmen seri üretim için uygun bir yöntem olarak kabul edilir.

Bu çalışmanın konusunu teşkil eden ve kaplama yöntemlerinden biri olan sürtünmeli kaplama yöntemi ilgili yapılan çalışmalar geniş bir şekilde aşağıda özetlenmiştir.

Batchelor vd. [2] düşük karbonlu çelik malzemedan yapılmış altlık malzeme üzerini paslanmaz çelik, alüminyum ve pirinç kaplama mili ile açık hava ve sıvı nitrojen ortamında sürtünmeli olarak kaplamışlardır. Paslanmaz çelik ile yapılan kaplama, altlık malzeme ile sert ve güçlü bir bağ oluştururken alüminyum ve pirinçle yapılan sürtünmeli kaplama işlemindeki yapışma paslanmaz çelikteki kadar iyi olmamıştır. Pirinç ve alüminyum malzeme ile sürtünmeli kaplamanın yapılamamasının sebebi olarak bu iki metalin yüksek ısı iletkenliğini göstermişlerdir. Sonuç olarak uygun altlık malzeme hızı ve uygun kaplama malzemesi seçilerek üniform bir kaplamanın ve iyi yapışmanın elde edileceğini, düşük devir seçilerek yapılan kaplamaların yapısında ise bozulmaların görülebileceği ifade edilmiştir.

Mishra ve Ma [8] sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile 5083 serisi alüminyum alaşımının üzerini SiC malzemesi ile kaplamışlardır. Kaplama milinin dönme hızını 300 d/dak ve pim yüksekliğini 1 mm sabit tutarak, takım ilerleme hızının kaplamaya olan etkisini incelemişlerdir. Takım ilerleme hızı 25,4 mm/dak olduğunda SiC tozlarının dağılımının homojen olduğu ve ana metale çok iyi bağlandığının sonucuna varmışlardır. 101,6 mm/dak ilerleme hızında ise yüzey kaplama tabakasının alüminyum altlık malzemeye bağlantısının çok zayıf olduğu görülmüştür. Sonuç olarak ilerleme hızının belli bir seviyenin üstüne çıkması altlık malzeme ile kaplama malzemesi arasındaki yapışmayı olumsuz etkilediği sonucu elde edilmiştir.

Puli vd. [9] düşük karbonlu çelik altlık malzeme üzerine önce sürtünmeli kaplama yöntemiyle daha sonra da geleneksel metal ark kaynağı yöntemiyle kaplayarak birbirleri ile karşılaştırmışlardır. Her iki kaplama işleminde taneler arası korozyon direncinin iyi olduğu, sürtünmeli kaplamada yöntemi ile kaplanan numunenin çukurcuk (pitting) korozyonuna karşı direncinin daha iyi olduğu ifade edilmiştir.

Hanke vd. [10] çalışmalarında Nimonic 80A altlık malzemesi üzerine Cr60Ni40 malzemesini sürtünmeli kaplama yöntemi kullanarak kaplamış ve kaplanmış numunelerin mikro yapı incelemelerini yapmışlardır. Bunun yanında kaplanan numunelere aşınma deneyleri ve korozyon testleri de yapmışlardır. Bu deneyler sonucunda kaplanmış numuneler kaplama yapılmamış numunelere göre daha az deformasyona uğramış ve aşınma miktarlarının diğer

numunelere göre üç kat daha düşük çıktığı belirtilmiştir. Bu farkın sebebi olarak kaplamalı numunelerde mevcut olan aşınma dirençli kromca zengin faz olması gösterilmiştir. Çalışmanın sonucu olarak sürtünmeli kaplama yöntemi ile 250 µm kalınlığa sahip kaplamaların yapılabilirdiği ve üretilen kaplamaların kaplanmamış malzemeye göre aşınma direncinin oldukça iyi çıktığı belirtilmiştir.

Hanke vd. [11] GP4M çeliğini, soğuk iş takımı çeliği altlık malzemesi üzerini sürtünmeli kaplama yöntemiyle kaplamışlardır. Soğuk iş takım çeliği altlık malzeme üzeri kaplama malzemesinin farklı safhalar gerektirmeden tek bir aşamada yapılması yöntemin avantajı olarak gösterilmiştir. Elde edilen kaplamada martenzitik mikro yapı ve 900 HV sertlik elde edilmiştir. Ayrıca ball-on-flat tipi aşınma tezgâhında yapılan aşınma deneyleri sonucunda malzeme üzerinden çok küçük hacimde malzemenin aşındığı, dolayısıyla aşınma dayanımının çok iyi olduğu belirtilmiştir.

Pereira vd. [12] AISI 1024, AISI 1045 ve AISI H13 kaplama malzemelerini kullanarak yumuşak çelikten yapılmış altlık malzeme üzerini sürtünmeli kaplayarak hangi malzeme kombinasyonunun aşınmaya daha dirençli olduğunu tespit etmeyi amaçlamışlardır. Kaplanan numunelerin aşınma testleri yapılmış ve deneylerin sonucunda aşınma miktarı en az olan malzeme AISI 1024 olmuştur. Bunun sebebi olarak AISI 1024 malzemesinin kaplama yüzeyinde yapışkan koruyucu oksit tabakanın olması, diğer iki malzemede ise bu koruyucu tabakaların olmayışı gösterilmiştir.

Stegmueller vd. [13] indüktif ısıtmalı sürtünmeli kaplama ile yaptıkları çalışmalarında kaplama parametrelerin kaplama yapısına etkisini incelemek amacıyla bir deney düzeneği kurmuşlar ve kaplama işlemi yapmışlardır. Çalışmada kaplama milinin devir sayısı arttıkça biriktirilen malzeme miktarı ve kalınlığı azalmıştır. Ayrıca devir sayısı iki katına çıkarıldığında kaplama milinde oluşan flanş miktarı % 70 oranında artmıştır. Bununla birlikte kaplama milinin temas basıncının kaplama kalınlığı üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır. Kaplama kütlesi, basıncın artışı ile azalırken kaplama genişliği kaplama mili üzerinde oluşan flanş ile iki katına çıkmıştır. Ayrıca 106 MPa 'a kadar kesme ve 96 MPa'ya kadar basma kuvvetleri uygulanarak basma ve çekme testleri yapılmıştır. Kaplamanın kesit görüntülerine göre altlık malzeme ile kaplama malzemesi ara yüzeyinde iyi bir yapışmanın olduğu belirtilmiştir.

Vitanov vd. [14] sürtünmeli kaplamanın optimizasyonu için çeşitli modeller oluşturmuş ve oluşturulan bu modellerin sürtünmeli kaplama üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Gerçek veri sinyallerini elde edebilmek için deney düzeneği ve ölçüm elemanları kurulmuştur. Optimizasyonun birinci aşamasında, altlık malzemenin yatay ilerleme hızı göz önünde bulundurularak kaplamanın ana parametreleri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise ilk aşamanın değerleri ile ikinci aşama için elde edilen veriler ikinci dereceden regresyon modeli katsayısını bulmak için en küçük kareler metodu ile analiz edilmiştir. Çalışmanın sonucunda sürtünmeli

kaplama yönteminin yapay zekâ metoduyla yüksek doğrulukta daha hassas ve düzgün kaplamaların yapılabileceği bildirmiştir.

Liu vd. [15] 1020 düşük karbonlu çelik üzerini 1Cr18Ni9Ti (321) malzemesi ile sürtünmeli kaplama yöntemiyle kaplamışlar ve kaplama mili üzerindeki farklı bölgelerin sıcaklık değişimlerini termočiftler vasıtasıyla ölçmüşlerdir. Ölçümlerin sonucunda sıcaklığın önce pik yaptığı, daha sonra ise düzenli olarak devam ettiği görülmüştür. Sürtünme ara yüzündeki sıcaklık artış oranı ilk başta en üst seviyeye ulaşmış ve ara yüzey bölgesinin sıcaklığı yarı-kararlı hale ulaştığında ise bu oranın daha düşük bir seviyeye düştüğü ve sıcaklığın kaplama çubuğunun erime noktasına yakın bir sıcaklıkta sabitlendiği belirtilmiştir.

Vitanov ve Javaid [16] sürtünmeli kaplama işleminin karmaşık geometriye sahip altlık malzemelerde termal tepkiyi modellemek ve geçici biriktirme süreçlerini çözmek için bir takım sayısal yöntemler geliştirmişlerdir. Kaplama bölgesindeki ısı dağılımını termal analiz yaklaşımı ile incelemiş ve %18 hata ile doğru sonuçlar elde edildiğini bildirmiştir. Deneysel ve simülasyon sonuçları arasındaki en önemli farklılık altlık malzeme geometrisinin değiştiği yerlerde meydana gelmiştir.

Rafi vd. [17] düşük karbonlu çelik altlık malzeme üzerini H13 takım çeliği kullanarak sürtünmeli kaplama yöntemiyle kaplamışlardır. Çalışmada kaplama milinin devir sayısı ve altlık malzemenin ilerleme hızı değişken olarak kullanılmış, eksenel kuvvet ise sabit tutularak kaplama parametrelerin kaplama karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca kaplamanın mikro yapısı optik mikroskop, SEM ve TEM analizleriyle incelenmiş ve kaplamaların mikro sertlik testi, kesme kuvveti testi ve eğilme testleri de yapılmıştır. Yüksek yatay ilerleme hızlarında daha ince kaplamaların, düşük devir sayılarında ise daha geniş kaplamalar elde edildiği ifade edilmiştir. Sonuç olarak ince kaplamaların kalın kaplamalara göre daha iyi bir yapışma kuvvetine sahip olduğu belirtilmiştir. Kaplama içinde ise karbür paracıklarının görülmediği, bunun yanında martenzitik mikro yapısından dolayı 600 HV'nin üzerinde çok iyi bir sertlik elde edildiği belirtilmiştir.

Puli ve Ram [18] düşük karbonlu çelik altlık malzeme üzerini AISI 410 martenzitik çelik malzeme ile sürtünmeli kaplama ve metal ark kaynağı yöntemleriyle kaplamışlar ve kaplamalardaki mikro yapı değişimlerini incelemişlerdir. Pin-on-disk aşınma test cihazı ile kaplamaların kuru ortamda aşınmaları incelenerek her iki farklı kaplama için elektrokimyasal korozyon testleri yapılmıştır. Sürtünmeli kaplama sonucu martenzitik bir yapı elde edilmiş olup, bu kaplamanın sertleştirilmiş ve temperlenmiş 410 alaşımı kadar iyi bir aşınma ve korozyon dayanımı sahip olduğu ifade edilmiştir. Öte yandan yüksek miktarda δ -ferrit bir yapı içeren metal ark kaplama, sürtünmeli kaplamayla kıyaslandığında oldukça düşük sertlik, çukurcuk korozyonuna karşı yüksek direnç ve aşınma direnci gösterdiği bildirilmiştir.

Puli ve Ram [19] tarafından yapılan başka bir çalışmada 440C alaşımını sürtünmeli kaplama yöntemiyle düşük karbonlu çelik üzerine kaplamışlardır. Kaplama yapılan numunelere eğilme ve kesme testleri yapılmış, bu testlerin sonucunda kaplamaların iyi bir yapışma özelliğine sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca sürtünmeli kaplama ile kaplanmış yüzeyin mikro yapısı incelenerek, korozyon davranışı ile aşınma performansı, kaplamasız malzemeyle karşılaştırılmıştır. Sürtünmeli kaplanmış malzeme, kaplanmamış malzemeye göre çok daha iyi bir korozyon dayanımı gösterirken aşınma direnci daha kötü çıkmıştır. Çalışmada birden fazla üst üste binen katmandan oluşan iyi bağlanmış kaplamaları elde etmenin mümkün olduğu gösterilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada, 440C alaşımı gibi geleneksel kaplama yöntemleriyle yapılması mümkün olmayan, aşınmaya karşı dirençli bir kaplamanın sürtünmeli kaplama yöntemiyle elde edilebileceği belirtilmiştir.

Rafi vd. [3] AISI H13 takım çeliğini, sürtünmeli kaplama yöntemiyle düşük karbonlu çelik üzerine kaplamışlardır. Kaplamanın ayrıntılı mikro yapıları incelenmiş ve mikro sertlik testleri yapılmıştır. Yapılan deneyler, kaplama ile altlık malzeme yüzeyi arasında hatasız ve sağlam metalürjik bağ oluşturduğunu göstermiştir. Buna ek olarak kaplamayla altlık malzeme arasında çok küçük bir ölçekte mekanik kenetlenme olduğu da gözlemlenmiştir. Kaplamanın ince taneli ve karbür içermeyen martenzitik yapıda bir mikro yapıya sahip olduğu görülmüştür. Sürtünmeli biriktirme ile yapılmış kaplama, tavlanmış kaplama malzemesiyle (20 HRC) karşılaştırıldığında oldukça yüksek bir sertliğe (58 HRC) sahip olduğu ifade edilmiştir. Sonuç olarak sürtünmeli kaplama yöntemiyle takım çeliği altlık malzemesinin sürtünmeli kaplama yöntemi ile kaplanmasının mümkün olduğu ve ayrıca kaplamanın mikro yapı ve tane boyutundaki iyileştirmeler için de yöntemin uygun olduğu belirtilmiştir.

Govardhan vd. [20] sürtünmeli kaplamadaki işlem parametreleri, kaplamanın altlık malzemeye yapışma mekanizması ve farklı yöntemlerle yapılan kaplamalara göre yapışma kalitesi incelenmiş ve regresyon analiz yöntemiyle bir model oluşturularak deneysel çalışmaya olan yaklaşımı belirlemiştir. Metalografi incelemeleri ve sertlik ölçümleri, kaplamanın biriktirme yönüne dik ve enine olmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır. Ayrıca kaplamadaki işlem parametrelerinin kesme mukavemeti ve yüzey pürüzlülüğü etkisi incelenmiştir. Elde edilen kaplamaların kimyasal ve basınçlı ortamlara uyumluluğunu belirlemek amacıyla korozyon testleri yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda sürtünmeli kaplama işleminin savunma, uzay elektrik ve otomotiv endüstrisi gibi mühendislik alanlarında kullanımına uygun olduğu belirtilmiştir.

Sekharbabu vd. [21] düşük karbonlu çelik altlık malzeme üzerini D2 takım çeliği ile sürtünmeli kaplama yöntemiyle kaplamışlardır. Mikro yapı karakterizasyonları optik mikroskop, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve XRD analizleriyle yapılmıştır. Kaplama bölgesinin termal profili elde etmek için kızılötesi termografi kullanılmış ve aşınma performansı pin-on-disk aşınma cihazında ölçülmüştür. Kaplama milinin düşük devir sayısında dönmesi ve altlık

malzemenin yüksek hızda ilerlemesi daha ince bir kaplama kalınlığının ortaya çıkmasına sebep olduğu ifade edilmiştir. Kaplanmış malzeme, ağırlıklı olarak ferritik mikro yapı özelliğini gösteren D2 takım çeliğine kıyasla ince taneli martenzitik bir mikro yapı sergilemiştir. Ayrıca kaplamadaki karıştırma işleminden dolayı karbürlerde bir ayrışmanın olduğu ve kaplamadaki sıcaklığın 1200°C civarına ulaştığı belirtilmiştir. Çalışmanın sonucunda yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip martenzitik bir tane yapısının elde edildiği belirtilmiştir.

Gandra vd. [22] sürtünmeli kaplama yöntemiyle AA2024-T3 altlık malzemesini Al-SiC partikülleri ile derecelendirilmiş AA6082-T6 millerini kullanarak gradyanlı kompozit kaplamışlardır. 118.8, 37.4 ve 12.3 µm boyutlarında SiC partikülleri alüminyum millerinin içine kaplama malzemesi olarak yerleştirmişlerdir. Kaplamalar artan SiC konsantrasyonu ve parçacık boyutu kullanılarak üretilmiştir. Bunun birlikte Si parçacıkların kaplama içerisinde homojen olarak dağıldığı ve biriktirme esnasında alüminyum matris içine küçük parçacıkların daha kolay yerleşebileceği ifade edilmiştir. Çok katmanlı kaplamada SiC dağılımının %5'den %30'a kadar artış gösteren bir bileşim gradyanı meydana getirmiştir. Toz takviyesi aşınma oranını %13 azaltırken yüzey sertliğini %30 oranında arttırmıştır.

Rao vd. [23] sürtünmeli kaplama ilgili yaptıkları çalışmada kızılötesi termometre kullanarak kaplama bölgesinin termal profilini incelemişlerdir. Çalışmada takım çeliği/çelik, bakır/çelik ve bakır/bakır çiftlerinin termal profilleri kaydedilmiş ve analizleri elde edilmiştir. Kaplama ile altlık malzemenin bağlanma mekanizmaları elde edilen termal profil verilerine göre incelenmiştir. Sonuç olarak ekstrüzyon ya da sıcak dövme sıcaklığına yakın olan kararlı durum sıcaklığı civarında, istenen özelliklere sahip kaplamaların elde edilebileceği ifade edilmiştir.

Gandra vd. [24] düşük karbonlu çelik altlık malzemesini düşük karbonlu çelik kaplama mili kullanarak dik işlem merkezli CNC tezgâhında sürtünmeli olarak kaplamışlar ve elde edilen kaplamanın mikro yapısını incelemişlerdir. Kaplamaların verimi ve performans kriterleri enerji tüketimi açısından araştırarak mikro yapı ve mikro sertlikleri incelenmiştir. Çalışmada kaplama miline uygulanan kuvvet, kaplama mili açısı, ilerleme ve devir sayısı işlem parametreleri olarak seçilmiştir. Kaplama mili üzerine etkiyen kuvvetin belli bir noktaya kadar artırılmasının kaplamanın yapışma mukavemetini ve altlık malzeme üzerine biriktirme oranını arttırdığı belirtilmiştir. Elde edilen optimum noktanın üstünde kuvvetin artırılması ise yapışma mukavemeti ve kaplama verimi için olumsuz etki yaptığı ifade edilmiştir. Kaplama mili uç açısının hareket yönü boyunca değişmesinin, yapışma veriminin % 5 artırdığı belirtilmiştir. Deneyler esnasında flanş kısmında biriken malzeme kaybı, toplam malzemenin %40-60 arasında olmuştur. Kaplamaların maksimum birleşme verimi %50-75 arasında değişiklik göstermiştir. Ayrıca kaplama esnasında 2,5 ila 5 kJ/g bir enerji gerektirdiği ifade edilmiştir.

Hanke vd. [25] Ni625 alaşımlı kaplama mili ile 42CrMo4 altlık malzemesini sürtünmeli olarak kaplamışlar ve bu malzeme çiftinin sürtünmeli kaplama açısından uyumluluğunu

incelemişlerdir. Kaplamanın mikro yapısı elektron mikroskobu ve EBSD analizleri ile incelenmiştir. Elde edilen kaplamaların mikro yapıları 0,5-12 mikron tane büyüklüğüne sahip ve rekristalize olmuş bir yapı sergilemiştir. Kısmi kayma bölgeleri ve homojen olmayan malzeme geçişleri, tane çekirdeklenmesi ve büyümesine neden olmuştur. Bu durum aynı kaplama bölgesi içerisinde farklı tane yapılarının olmasına sebep olmuştur. Sonuç olarak homojen olmayan bir mikro yapı elde edilmesine karşın kaplama mikro yapısında çok az miktarda çökeltme ve malzeme kusuru olduğu ve korozyon ve aşınma direncine olumlu katkıda bulunduğu ifade edilmiştir.

Hanke vd. [26] Al2024 altlık malzemesini aynı işlem koşulları altında AA5083 ve AA6082 kaplama milleri ile sürtünmeli olarak kaplamışlardır. Yapılan deneylerde işlem parametreleri olan kuvvet, sıcaklık ve biriktirme miktarı karşılaştırılarak malzeme mukavemeti, ısıl yumuşama oranı ve yeniden kristalleştirme mekanizmaları açısından incelenmiştir. Sonuç olarak AA6082 malzemesi AA5083 malzemesine göre daha hızlı plastisize olarak daha yüksek sıcaklıkta daha yüksek malzeme verimliliğine ulaştığı ifade edilmiştir. AA5083 malzemesinin kaplanması esnasında gözlemlenen küçük tane yapısının sebebinin çok fazla Mg miktarının olduğu belirtilmiştir. Hem enerji hem de malzeme verimliliği açısından yapılan karşılaştırma sonucunda AA6082 malzemesinin sürtünmeli kaplama yöntemi için daha iyi olduğu açıklanmıştır.

Guo vd. [27] paslanmaz çelik 304 altlık malzeme üzerini, paslanmaz çelik 316L / TiB₂ kompozit malzemesi ile sürtünmeli olarak kaplamışlar ve kaplama parametrelerinin etkisini incelemişlerdir. Mikron seviyesindeki TiB₂ tozunun kaplamalara takviye olarak eklenebilmesi için silindirik 316L sarf malzemesi çubuklarında aksel olarak farklı konumlarda iki delik açılmıştır. Açılan deliklerin içine TiB₂ tozu doldurularak yapılan kaplama işleminde yüksek sıcaklık ve yüksek gerilme oranı altında TiB₂'nin östenitik matris içine gömüldüğü ve FeTi yapılarının olduğu görülmüştür. Sonuç olarak TiB₂ toz ilaveli kaplamanın toz ilavesiz kaplama ile karşılaştırılmasında, 316L / TiB₂ kompozit kaplamanın daha yüksek artık gerilmeye ve daha düşük çukurcuk korozyon direncine sahip olduğu bildirilmiştir.

Nixon vd. [28] yumuşak çelik altlık malzeme üzerini sürtünmeli kaplama yöntemiyle paslanmaz çelik kaplayarak altlık malzemenin hızı, kaplama milinin devir sayısı gibi parametrelerin etkilerini incelemişlerdir. Seçilen altlık malzeme-kaplama malzemesi kombinasyonun ile çok iyi uyum sağladığı ve iyi bir kaplama yapısının elde edildiği bildirilmiştir. Kaplamanın bağlanma mukavemeti, çekme testi ile maksimum 502 MPa olarak elde edilmiştir. Sonuçların doğrulanması için, kaplanan numune tuz püskürtme testine tabi tutulmuştur. Bağlanma mikro yapısı, optik mikroskop ve XRD analizi kullanılarak karakterize edilmiştir. Kaplama yapılmış numunelerin korozyon direncinin paslanmaz çelikten daha düşük olduğu, yumuşak çelikten ise daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Badheka ve Badheka [29] 6 mm kalınlığındaki çelik altlık malzeme üzerini 8, 12, 16 ve 22 mm çaplarındaki Al6351-T6 kaplama millerini kullanarak kaplamışlardır. Kaplamaların gözle

muayenesi sonucunda en mükemmel kaplama yapısının 22 mm çaplı mil ile yapılan kaplamada elde edildiği ifade edilmiştir. Ayrıca kaplamanın her iki kenarından sıcaklıklar ölçülerek karşılaştırılmış, maksimum sıcaklığın 421°C olarak elde edildiği ve rekristalizasyon sıcaklığının (375°C) üzerinde çıktığı ifade edilmiştir.

Murugan vd. [30] AISI1012 malzemesinin Monel K500 ile kaplanabilirliğini araştırmışlardır. Sürtünmeli kaplama deneylerinde, iş mili hızı, eksenel basınç ve yatay ilerleme hızı parametreleri değişken olarak kullanılmıştır. Kullanılan parametreler ile Radyal Fonksiyon modeli geliştirilmiş, bu model ile kaplama kalınlığı ve genişliğinin varyasyon analizi yapılmıştır. Kaplama milinin devir sayısı ve yatay ilerleme hızı arttıkça kaplama kalınlığı ve genişliği azalırken, eksenel yük arttıkça kaplama kalınlığı ve genişliğinin arttığı ifade edilmiştir.

Son yılların en çok kullanılan ve kilit malzeme haline gelen alüminyum alaşımları kullanıldığı alan ve avantajları nedeniyle oldukça popüler hale gelmiştir. Yüksek dayanım/ağırlık oranı, işleme kolaylığı, karmaşık geometriye sahip parçaların hassas toleranslarda üretimlerinin yapılabilmesi gibi birçok avantajının ön plana çıkması sebebiyle otomotiv, denizcilik, uzay ve havacılık endüstrisi gibi birçok alanda alüminyum alaşımları tercih edilmektedir. Günümüzde alüminyum alaşımlı malzemelerin birçok serisi bulunmaktadır.

Alüminyum malzemeleri içerdiği alaşım miktarına göre sınıflandırılmaktadır. Bu malzemelerden biri de magnezyum alaşımlı Al5754 serisidir. Al5754 serisinin en önemli özelliği kaynaklanabilme kabiliyetinin yüksek olması ve yüksek korozyon direncine sahip olmasıdır. Deniz suyu ve kimyasallara karşı direncinin iyi olması Al5754 serisinin bu alanlarda kullanımını yaygınlaştırmıştır. Bu malzemenin kaynak edilebilir olması ve gemi sanayisi su altı kaplamalarında kullanılmasında tercih edilme sebebi olmuştur [31]. Bununla birlikte Al5754 malzemenin en büyük olumsuzluğu sertlik ve aşınma direnci gibi birtakım mekanik özelliklerinin zayıf olmasıdır. Bu tür malzemeler hem kendinde bulunan özelliklerin korunması hem de ilave özelliklerin bünyesine dâhil edilebilmesi için çeşitli kaplama yöntemleri ile yüzey modifikasyon işlemlerine tabi tutulurlar. Mekanik özellikleri daha iyi olan malzemeler kullanılarak yapılan modifikasyon işlemleri genellikle altlık malzeme yüzeylerin sertlik, aşınma ve korozyon direnci gibi mekanik özelliklerini iyileştirmesi amaçlıdır. Bu çalışmada da mekanik özellikleri iyi olmayan Al5754 altlık malzemesi, mekanik özellikleri daha iyi olan Al7075 malzemesi ile toz ilavesiz ve toz ilaveli olarak iki farklı şekilde sürtünmeli kaplanmıştır.

Literatür araştırması incelendiğinde sürtünmeli kaplama ile ilgili yapılmış birçok çalışma mevcuttur. Al5754 malzemesinin kendisinden daha mekanik özellikleri iyi olan Al7075 malzemesiyle sürtünmeli kaplanması ilgili herhangi bir çalışma mevcut değildir. Özellikle çalışmaların çoğu kaplama milinin doğrudan kullanılması ve toz ilavesinin tek bir yöntemle yapılmasıdır. Bu çalışmanın literatürdeki diğer çalışmalardan en önemli farkı ise iki farklı yeni

kaplama yöntemi kullanılmasıdır. Bu yöntemlerden ilki toz serme yöntemi olup kaplanacak altlık malzeme üzerine aseton yardımıyla toz serilerek kaplama mili üzerinden gidilmesi işlemidir. İkinci ise kaplama milinin içine toz ilave edilerek sinterlenmesi ve altlık malzemelerin gradyanlı olarak kaplanmasıdır. Toz ilaveli sinterleme yöntemi ile kaplamalarda değişik oranlarda homojen karıştırılan takviye tozu belli çap ve derinlikte ekseni boyunca delinen kaplama milinin içine doldurularak önce preslenmiştir. Daha sonra miller belirli süre ve sıcaklıklarda sinterlenerek gradyanlı sürtünme kaplama işlemleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda her iki yöntemle elde edilen kaplamaların mikro sertlik, mikro yapı, aşınma direnci ve bağlanma mukavemeti incelenerek EDX analizinin yapılmış, SEM ve optik mikroskoplar kullanılarak katmanlar arasındaki bağ yapısı da incelenmiştir.

2. YÜZEY İYİLEŞTİRME İŞLEMLERİ

Malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilme işlemleri malzemede bulunmayan sertlik, dayanım, korozyon, aşınma direnci gibi özellikleri sağlamak amacıyla yapılır. Bu özellikler elde edilirken ana malzemeye zarar vermeden yapılması ve mümkün olduğunca maliyetinin düşük olması gerekir. Örneğin aktarım organında kullanılan bir dişlinin dış yüzeyinin sert olması istenirken iç kısmının ise üzerine gelen darbeleri sönmülmesi için bir miktar sünek olması istenir. Sertlik, aşınma ve korozyon direnci gibi yüzey modifikasyon işlemleri ya mevcut malzemenin yüzeyinde bir işlem yapılarak ya da farklı bir malzeme ile kaplayarak sonuç ve maliyet odaklı yapılır. Bu işlemler iki ana sınıfta incelenir. Bunlar;

- Yüzey sertleştirilme işlemleri
- Yüzey kaplama işlemleri

şeklinde olmaktadır.

2.1. Yüzey Sertleştirilme İşlemleri

Yüzey sertleştirme işlemi malzemelerin bütününe yerine sadece yüzeyine yapılarak istenen özelliklerin elde edilmesi olayıdır. Malzeme yüzeyinin kimyasal yapısı değiştirilmeden yahut değiştirilerek yapılan bu iyileştirme işlemleri ile malzeme yüzeyinin aşınma, korozyon gibi dış etkenlere karşı dayanımı önemli ölçüde arttırılabilir [32].

2.1.1. Yüzeyin Kimyasal Bileşimi Değiştirilmeden Yapılan İşlemler

Kimyasal bileşimi değişmeden yapılan yüzey sertleştirme işlemi malzemenin tümünün ya da belli bir kısmının ısıtılıp daha sonra ani soğutulmasıyla yapılan işlemdir. Bu sayede malzemenin kimyasal bileşenleri değişmeden istenen özellikler elde edilmiş olur. Yüzey sertleştirme işlemi genellikle malzemenin sadece dış yüzeyinin sertleştirilmesi istenen durumlarda yapılır ve malzemenin içyapısı aynı şekilde kalır. Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken en önemli husus malzemenin dış yüzeyinin çok kısa sürede ısıtılmasıdır. Bu sebeple her ısıtma yöntemi kullanılamaz. Malzeme yüzeyinin ısıtılması oksijen-asetilen ile orta veya yüksek frekanslı girdap akımları etkisiyle ya da yüksek sıcaklıklı tuz ya da metal banyolarıyla yapılır [32]. Çelik malzemelerde çeliğin kimyasal bileşimi değişmeden yüzeyinin sertleştirilmesi için malzeme içindeki karbon miktarının yeterli olması lazımdır. Bu oran alaşımsız çelikler için %0,30 ile %0,70 arasındadır. Bu şartı sağlayan çelikler fırın, ocak gibi ısı kaynaklarının yanı sıra alevle ya da indüksiyon akımıyla yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulabilir. Bahsi geçen bu metotların seçimindeki temel ilke malzeme yüzeyini östenitleme sıcaklığına kadar ısıtıp daha sonra bu

sıcaklıktan uygun soğutma hızı ($^{\circ}\text{C}/\text{sn}$) ile hızlı bir şekilde soğutulmasıdır. Bu ani soğutma işleminin yapılmasının esas amacı malzemenin istenen bölgesinde aşınmaya dayanıklı, sert bir martenzitik yapı oluşmasını sağlayarak malzemenin diğer bölgelerinin ise istenen derecede sünek ve tok bir yapı elde edilmesidir. Bu sebeple malzemenin farklı bölgelerinin farklı özelliklerde olması istendiğinden ısıtma bölgelerinin ve ısıtma sürelerinin iyi ayarlanması gerekir [33]. Bu yöntemler haricinde ergime sıcaklığı civarına kadar ısıtılarak ani soğutma işleminin sonucu sertleştirme işlemi de yapılmaktadır. Bu yöntem için ise ısı kaynağı olarak lazer kullanılır. Lazer ile istenen bölge ısıtılarak ani soğumaya tabi tutulur ve martenzitik bir yapı elde edilerek sertleştirme işlemi yapılır [34].

2.1.2. Yüzeyin Kimyasal Bileşimini Değiştirerek Yapılan İşlemler

Yüzeyin kimyasal bileşimlerini değiştirerek yapılan yüzey sertleştirme işlemlerinde malzeme yüzeyine karbon, azot ve bor gibi ara yer atomlarının difüzyonu ile yüzeye metal iyonlarının bağlanmasının sağlanması ya da çeşitli alaşım tozlarıyla yüzeyin kimyasal bileşimi değiştirilerek istenen özelliklere sahip malzeme yüzeyinin elde edilmesidir. Malzeme yüzeyindeki sertleştirme işlemi için malzemede kimyasal bir değişim yapılmasının başlıca nedenleri şu şekilde sıralanabilir:

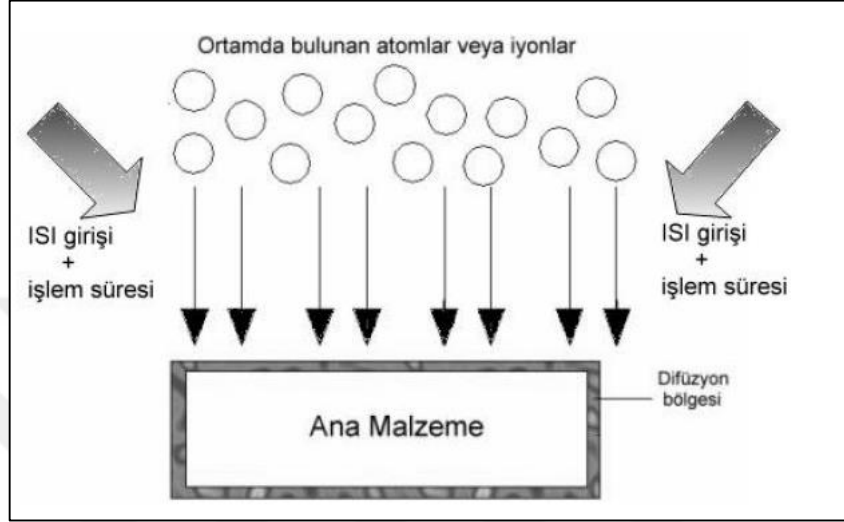
- Yüksek sıcaklıklarda çalışan parçaların diğer sertleştirme vb. ısıtma işlemlerinden sonra kazandıkları özelliklerini çalıştıkları ortamlarda koruyamamaları
- Farklı ortamlarda kullanılan malzemelerin korozyon dayanımının artırılmasının istenmesi
- Alev ve indüksiyonla metodu ile sertleştirilen farklı kesitlere sahip iş parçalarının her noktasının homojen olarak sertleştirilememesi
- Malzemenin yeterli karbon oranına sahip olmamasıdır.

Bu yöntemlerle; çelik yüzeyinde çok sert bir tabaka elde edilirken; aynı zamanda bu yapının korozyona karşı dayanıklı hale gelmesi de sağlanmaktadır. Yapılan yüzey sertleştirme işlemlerinde, yüzey tabakasının sertliği belirgin olarak değişmekte ve bazı işlemlerde, esas malzemeyle oluşturulan yüzey tabakası arasında bir sınır tabaka oluşumu görülmektedir [33]. Genellikle difüzyona dayalı olan bu yöntemde difüze madde miktarının kontrolü ve işlemin başarılı olması; seçilecek işlem süresi, ortam sıcaklığı, soğutma hızı ve soğutma şekline bağlıdır [35]. Kimyasal bileşimini değiştirme işlemleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Termokimyasal işlemi
- Nitürleme işlemi
- Karbürleme (Sementasyon) işlemi
- Borlama işlemi

Termokimyasal İşlemler

Termokimyasal işlemler; karbon, azot ve bor gibi ara yer atomlarının sıcaklık etkisiyle malzeme yüzeyine difüzyonu esasına dayanır. Burada sıcaklık ve zaman, difüzyon için gerekli iki temel faktörü oluşturur [32].



Şekil 2.1. Termokimyasal yönteminin şematik gösterilişi [32]

Termokimyasal yöntemlerin amacı, malzeme yüzeyine dışarıdan bir element difüze edilmesi ile malzeme yüzeyinin özelliklerinin değiştirilmesidir. Bu sayede istenen özellikler Şekil 2.1’de görüldüğü gibi parçaya kazandırılarak kullanıma hazır hale gelmiş olur. Bu yöntemlerden, karbürleme ve nitrürleme en tanınmış yöntemler iken, daha az yaygınlaşmış metal difüzyon yöntemleri (kromlama, vanadyumlama, niobyumlama ve krom-vanadyumlama) vasıtasıyla malzemelerde difüzyon bölgeleri oluşturulur [36].

Difüzyon bazlı kaplama yöntemlerinde atom çapının büyüklüğüne göre yüzey modifikasyonu gerçekleşir. Bu yüzey modifikasyonları çapı küçük olan atomların altlık malzeme yüzeyine difüzyonu sonucu ara yer katı eriyik veya bileşik oluşturması şeklindedir. Karbonitrürlemede ara yer katı eriyik, nitrürleme ise yeni bir bileşik oluşturur [36].

Nitrürleme İşlemi

Nitrürleme işlemi malzeme yüzeyinin azot ile zenginleştirilerek özelliklerinin iyileştirilmesidir. Sertlik ve aşınma direnci gibi özelliklerin iyileştirilmesi için yapılan yüzey modifikasyon işlemlerinden olan nitrürleme, malzemenin aşınma direncini arttırmak için yapılır. Nitrürleme öncesi malzeme, 500-550°C sıcaklıklarına çıkarılarak bir ısıl işlem uygulanır. Bu sıcaklık demir esaslı malzemelerin ferrit fazı bölgesine karşılık gelmektedir [36].

Nitrürleme işlemi katı (toz), sıvı, gaz ve plazma olmak üzere farklı şekillerde yapılabilir. En yaygın kullanılan yöntemler aşağıda listelenmiştir.

- Gaz Nitrürleme
- Tuz Banyosunda Nitrürleme (Sıvı Nitrürleme)
- Plazma Nitrürleme

Karbürleme (Sementasyon) İşlemi

Karbürleme ya da diğer adıyla sementasyon işlemi, düşük karbonlu çeliklerin yüzeyine belli oranlar karbon atomlarının difüze edilmesi işlemi olarak tanımlanabilir. İşlem yüksek sıcaklıklarda, karbon içeren bir ortamda yapılır. İşlem sonucunda malzemenin dış yüzeyi istenen sertliğe ulaşırken, iç kısımlarında herhangi bir değişiklik olmaz. Difüzyon işlemi % 0,1 ile 0,2 karbon içeren bir malzemeyi % 0,7 - 0,8 seviyelerine getirir. Yüzey kısmının karbon oranını arttırırken dikkat edilmesi gereken hususlardan biri sementit yapının oluşmaması için % 0,8 seviyesini aşmamaktır [36]. Sementasyon işlemi içinde bulunduğu ortama göre dört farklı şekilde yapılır. Bunlar katı, sıvı, gaz ve plazma ortamında yapılmaktadır.

Borlama İşlemi

Termokimyasal bir yüzey modifikasyon işlemi olan borlama, yüksek sıcaklıkta metal yüzeylerine bor atomlarının difüze edilmesi ve bir tabaka oluşturulması işlemidir. Borlama işleminin diğer yöntemlere göre avantajı tüm metallere uygulanabilir olması ve hatta bunun yanında demir dışı metal ve alaşımlara da uygulanabilir olmasıdır. Ayrıca bor elementinin yüksek sertliğe sahip olması bu yöntemi diğer yöntemlerden üstün tutmaktadır. Yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci, korozyon ve yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direncine sahip olması borlama işleminin en önemli avantajlarından bazılarıdır [36].

Borlama işlemi 700-1100° C sıcaklıklarda 1 ila 12 saat süre aralığında katı, macun, sıvı, gaz, iyon ve plazma fazlarındaki ortamlarda bekletilmesi ile elde edilir. Boraks bazlı ortamlarda parça yüzeyi daha hızlı kirlendiği için B₄C içeren ortamlarda yapılan borlama işleminin teknik olarak daha uygun olduğu belirtilmiştir. İşlem sonucu malzeme içeriğine bağlı olarak demir-bor fazları oluşur. Elementin kendine has bor fazı var ise bu faz ortaya çıkar [32]. Litetarürde kullanılan borlama yöntemleri aşağıda listelenmiştir.

- Katı borlama
- Sıvı borlama
- Gaz borlama
- Plazma borlamadır

2.2. Yüzey Kaplama İşlemleri

Yüzey kaplama işlemleri malzemelerin yüzey kısmında istenen özelliklerin elde edilebilmesi için PVD, CVD, sol-jel, elektrolitik sıvı içinde yapılan işlemler ve ergitme bazlı işlemler gibi yöntemlerin kullanılarak yapılan iyileştirme işlemidir. Bu işlemler sonucunda malzeme yüzeyinde aşınma direnci, korozyon direnci ve sertliği yüksek olan dayanıklı bir tabaka elde edilir. Bu özelliklerin iyileştirilmesiyle beraber kaplama işlemi malzemenin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesinin yanında dekoratif görünüm elde edilmesi amacıyla da yapılmaktadır. Diğer yüzey işlemlerinin yetersiz kaldığı durumlarda yapılan kaplama işlemleri sonucunda istenen mühendislik özelliklerine sahip, birkaç özelliğin bir arada olduğu bir malzeme ortaya çıkarmak mümkündür [32].

Yüzey kaplama yöntemlerinden olan metalin ergitilip ilave metal ile alaşımlamak suretiyle tekrar katılaştırılması yani kaynak bazlı işlemler, pratik ve ucuz olması sebebiyle yüzey modifikasyon işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Dekoratif amaçlı kaplamalarda elektrokimyasal kaplamalar tercih edilirken otomotiv sektörü gibi mekanik özelliklerin ön plana çıktığı kaplamalarda ise sert kaplamalar tercih edilmektedir [37]. Ayrıca İnce tabakalı kaplamaların kullanılması gereken, yüzey ayrıntıları çok olan parçalarda ise buhar biriktirme ve elektrolitik kaplama yöntemler tercih edilir. Yüzey kaplama işlemleri aşağıdaki gibi sınıflandırabilir;

- Buhar Fazı ile Kaplama Yöntemleri
- Sol-Jel Kaplama Yöntemleri
- Ergimiş/Yarı Ergimiş Fazdan Üretilen Kaplama Yöntemleri
- Ergitme Esaslı Kaplama Yöntemleri

2.2.1. Buhar Fazı ile Kaplama Yöntemleri

Malzemelerin yüzeyinde değişik varyasyonlarda kaplamaların üretilmesi için buhar fazı yöntemlerinin kullanılmasıyla elde edilen kaplama çeşitleridir. Bu yöntemler fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapour Deposition, PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapour Deposition, CVD) olmak üzere iki ana gruba ayrılır [32]. PVD ve CVD yöntemi ile kaplama işlemi temelde üç adımda gerçekleştirilir;

- Kaplanacak malzemenin buhar fazının oluşturulması.
- Oluşan buhar fazının malzeme yüzeyine ulaştırılması
- Buhar fazının kaplanacak malzeme yüzeyine yapışması ve bir film oluşturmasıdır [32].

2.2.2. Sol-Jel Kaplama Yöntemi

Cam, seramik gibi malzemelerin üretilmesi ve kaplanması için kullanılan bir yöntem olan sol-jel yönteminde kaplanacak malzeme bir çözelti içinde çöktürme işlemiyle ya da püskürtme yöntemiyle kaplanabilir [32]. Yöntem, maliyetinin düşük olması, çalışma sıcaklığının diğer kaplama yöntemlerine göre düşük olması, farklı altlık malzeme üzerine kaplama yapılabilirliği gibi birçok avantaja sahiptir.

Sol-jel yöntemi sıvı içerisinde bulunan katı taneciklerden oluşan kolloidal yapının (sol) ve yine sıvı faz içerisinde üç boyutlu katı inorganik ağ yapısının (jel) oluşumunu içerir. Sol-jel yöntemi süspansiyon yapısından dolayı seramik, cam ve kompozit gibi malzemelerin üretim tekniğine verilen genel isimdir. Yöntem olarak ifade edilirse kolloidal boyutta amorf tanecikleri kullanarak sıvı içeren yahut kuru bir ortamda kararlı metal-oksit çözeltilerinin hazırlanması işlemidir. Sol-jel yönteminde temel prensip bir çözücü içerisinde metal bileşiklerini, kendi başlangıç birimine dağıtmaktır. Bundan dolayı prekürsor olarak adlandırılan çeşitli başlangıç maddeleri kullanılır [36].

Sol-jel işleminde kaplama öncesi hazırlanmış bir katmanın hidroliz olması ve bir miktar hidroliz olmuş ürünlerin yoğunlaşması esasına dayalı iki ana kimyasal reaksiyon içerir. Öncelikle çözelti bir jel haline getirilir ve kurumasının ardından ısıtılma tabi tutulur ve istenen yapı elde edilir. Kaplamanın elde edilebilmesi için oluşturulan bu jel yapı ince bir tabaka halinde kaplanacak yüzeye serilir ve dönüşümün başlaması beklenir. Bu tabaka ısıtılma işlemleriyle kuruma, yoğunlaşma veya kristalleşme aşamalarından geçirilir. İşlem sonucunda kaplama kalınlığı 100 ila 200 nm arasında olmaktadır. Sol-jel yönteminin dezavantajı kaplama esnasında oluşturulan tabakanın karmaşık yüzeye sahip parçalara uygulanamamasıdır [32].

Sol-jel yöntemi ile kaplama çeşitli aşamalardan oluşur. İlk aşama yukarıda bahsi geçen çözelti elde etme aşamasıdır. Bundan sonra hidroliz, polimerizasyon, yoğunlaşma, jel haline gelme, temizleme ve yaşlandırma aşamalarıdır [36]. Sol-jel kaplama yöntemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

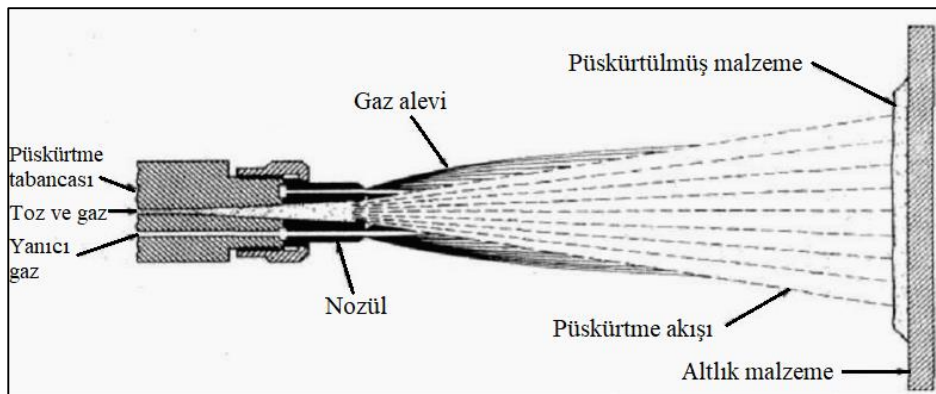
- Daldırmalı Kaplama Tekniği (Dip Coating)
- Püskürtme Kaplama Tekniği (Spray Coating)
- Akış Kaplama Tekniği (Flow Coating)
- Santrifüj Kaplama Tekniği (Spin Coating)
- Baskı Kaplama (Printing)
- Laminer Kaplama Yöntemi (Laminar Coating)
- Merdaneli Kaplama Yöntemi (Roll Coating)

2.2.3. Ergitme Fazlı Kaplama Yöntemleri

Malzemenin ergime sıcaklığı üzerine ya da civarına çıkartılarak yapılan kaplama işlemleridir. Isıl püskürtme yöntemi, alevle püskürtme yöntemi, plazma püskürtme yöntemi, patlamalı püskürtme, elektrik ark ile püskürtme, yüksek hızlı oksit yakıt püskürtme gibi çeşitleri bulunur.

• Isıl Püskürtme Yöntemi

Isıl püskürtme yönteminde altlık malzeme üzerine, ısıtılarak ergitilmiş ya da yarı ergiyik halde bulunan partiküllerin hızlı bir şekilde gönderilmesi prensibiyle kaplama işlemi yapılır (Şekil 2.2). Seramik ya da polimer gibi malzemelerden oluşan altlık üstünde bir kaplama tabakası meydana gelir. Bu yöntemde kaplamanın sertliği, altlık ve kaplama olarak kullanılan malzemenin çeşidine bağlıdır. Genel olarak ısıl püskürtme yöntemlerinde farklı enerji kaynakları kullanılsa da dört ana kısımdan oluşur. Bunlar ısıtılmış partiküllerin taşınması, altlık malzeme ile temas, kaplanacak tabakaya gerçekleşen ısı transferi ve kaplama tabakasının katılaşp tutunma aşamalarıdır [38]. Çok çeşitli ısıl püskürtme yöntemleri vardır. Bunlardan bazıları toz-tel alev püskürtme, elektrik ark püskürtme, plazma püskürtme, patlamalı püskürtme (D-gun) ve yüksek hızlı oksit-yakıt (HVOF) püskürtme yöntemleridir. Bu yöntemlerde kaplama malzemeleri olarak tungsten alümina, krom karbür, nikel, titanyum ve demir esaslı tozlar gibi geniş bir aralıktaki kaplama malzemeleri kullanılmaktadır. Aşınma problemine karşı nikel ve kobalt esaslı krom malzemelerin yanında bor ve silisyum, tungsten karbürü malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Dolayısıyla termal püskürtme yöntemi ile aşınmaya dirençli malzeme üretiminin yanında yüzey kalitesinin iyileştirilmesi için tamir amaçlı kullanım da söz konusudur. Havacılıkta (kompresör ve yanma odaları), kimya sanayisinde (pompa, valf, kılavuz ve hadde parçalarında), otomotiv sektörü (piston ve segman yatakları) ve medikal uygulamalarda (implant) yaygın olarak kullanılmaktadır [32]. Isıl püskürtme yöntemleri malzeme olarak metaller, seramikler ve polimerler gibi çok geniş kullanım alanına sahip bir kaplama yöntemidir.



Şekil 2.2. Termal püskürtme yönteminin oluşum aşamaları [39]

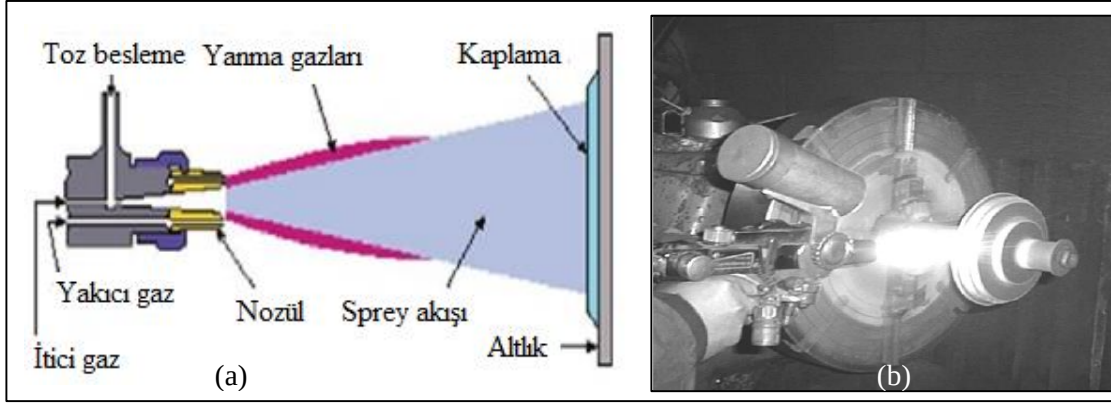
Isıl püskürtme yöntemlerine etki eden başlıca faktörler şunlardır:

- Termal kinetik enerji miktarı,
- Püskürtme malzemesinin enerji etkileşim oranı,
- Püskürtme partiküllerinin kaplama malzemesiyle etkileşim oranı.
- Püskürtme akışının(alev, plazma vb.) bileşim, sıcaklık, hız, sprej mesafesi, dış ortam ve çalkantısı (türbülans)etkileri,
- Malzeme türü; partikül yada tel boyutu ve şekli, ilerleme, enjeksiyon metodu ve geometrisi, taşıyıcı gaz, akış şekli ve hızı, kimyasal ve fiziksel özellikleri.
- Kaplanacak malzemenin; yüzey bileşimi, yüzey profili, sıcaklık, kimyasal ve fiziksel özellikleri.
- Sprej tabancasının; lüle geometrisi, gücü, gaz akışları ve gaz bileşiminin ısı püskürtme yöntemlerine etkisidir [32].

• Alevle Püskürtme Yöntemi

Alevle püskürtme yöntemi toz esaslı malzemelerin kaplanacak malzeme üzerine püskürtülerek kaplanması işlemidir (Şekil 2.3). Hem ekonomik olması hem de geniş malzeme spektrumu sayesinde oldukça sık tercih edilen bir kaplama yöntemidir. Nikel esaslı alaşımların aşınmaya, oksitlenmeye ve yüksek sıcaklık korozyonuna karşı dirençli olmaları sebebiyle sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Hadde merdanelerinin üretiminde, pompa parçalarının üretiminde ve aşınmaya dayanıklılığın istendiği plakalarda kullanılır. Yapılan kaplamanın gözeneklilik oranı %10-20 civarındadır. Dolayısıyla ana malzemeye bağlanma yeteneği istenen düzeyde değildir. Bu sorunun çözümünde tabakalar yeniden ergitilerek gözeneklilik azaltılır ve daha iyi bir bağ oluşumu sağlanır. Bu kaplama yönteminde ergitme işlemi indüksiyonla, fırında ve oksitlenilen yöntemleriyle yapılır [40].

Alevle püskürtme yönteminde kaplama malzemesi olarak toz kullanılması durumunda öncelikle tozlar ergitilir. Daha sonra alev ve hava yardımıyla bu ergitilmiş tozlar kaplanacak malzeme yüzeyine taşınır. Bu yöntemde partiküllerin hızları 100 m/s'den küçüktür. Dolayısıyla kaplamanın bağlanma mukavemeti azdır. Kaplama debisi 0,5 ila 9 kg/sa aralığında değişmektedir. Yüksek sıcaklıkta yapılan bir yöntem olması nedeniyle kaplanacak malzemenin de sıcaklığı kaplama esnasında çok yükselmektedir. Hatta termal sprej yöntemlerinin çoğunda harcanan enerjinin yüzde 10'unun ergitme safhasında kullanıldığı belirtilmiştir [32].

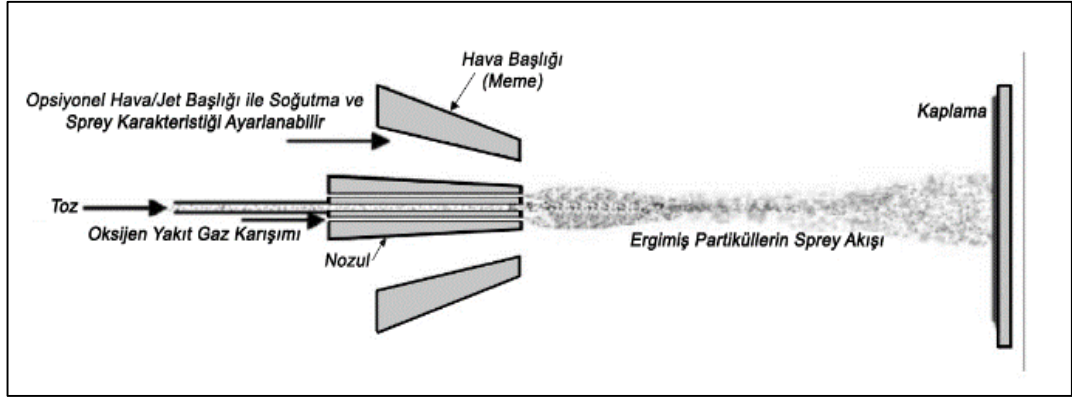


Şekil 2.3. a) Alevle püskürtme yönteminin şematik gösterilişi b) Yöntemin torna tezgâhında yapılan uygulaması [41]

Yanma işlemi oksijen veya sıkıştırılmış hava ile yapılmaktadır. Ayrıca asetilen, propan, hidrojen gazı veya doğal gaz da yaygın olarak kullanılmaktadır. Kaplanacak malzeme üzerine belirli bir hızda gönderilmesi gereken partiküllerin hızlandırma işlemi sıkıştırılmış hava yahut argon, azot gibi gazlarla yapılır. Yöntemde kullanılan cihazların ilk kurulum maliyeti yüksek değildir. Basit bir kaplama işlemi için sprej lülesi, oksijen ve yakıt gazı gereklidir. Partikül hızlarının diğer termal sprej yöntemlerine göre düşük olması kaplama kalitesinin de düşük olmasına sebep olmaktadır. Ayrıca gözeneklilik oranı da diğer yöntemlere göre daha yüksektir. Bunun yanında iyi bağlanma mukavemetine sahip bir kaplama ortaya çıkmaktadır. Yöntemin çok yüksek sıcaklıklarda yapılması deformasyona sebep olacağından bu nokta bir dezavantaj olarak görülmektedir [42].

• Plazma Püskürtme Yöntemi

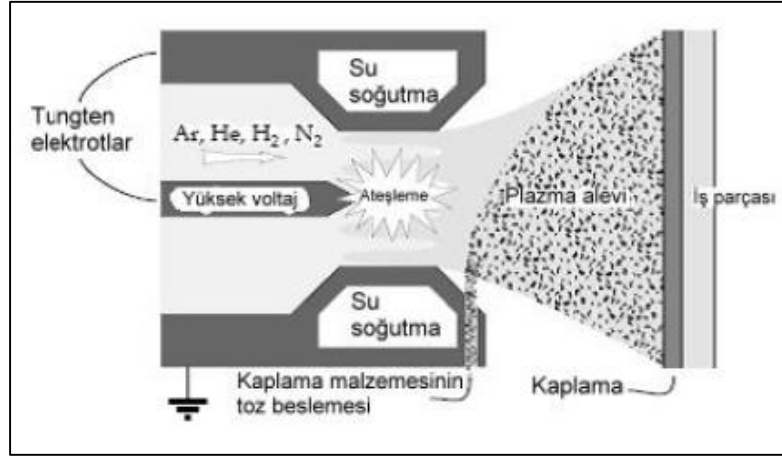
Plazma püskürtme yöntemi DC akım plazma tabancalarından elde edilen ark bir lüle içerisindeki silindirik tungsten bir katotla, buna dik pozisyonda duran anot arasında meydana gelerek kaplama yapılması işlemidir (Şekil 2.4). Gaz olarak argon ve helyum gazları yahut bu gazların karışımı kullanılır. Bu gazlar üzerinden ark geçtiğinde katottan gelen elektronlarla gaz molekülleri arasında reaksiyonlar başlar ve gaz iyonize olarak plazma haline gelir. Lülenin çalışma prensibi gereği içinden geçen gazlar çıkışa doğru hızlanır. Bu arada atom ve moleküllerin ekzotermik reaksiyona girerek oluşan ısı ve radyasyon nedeniyle merkez bölgesindeki sıcaklık 10000°K civarına çıkar. Partikül hızları lüle tasarımına, plazma gazlarına ve kaplanacak malzemeye göre 300–700 m/s aralığında değişir. Yöntemde sıcaklık, hız, gaz karışımı, lüle tipi, toz malzemenin boyutu ve yoğunluğu gibi birçok parametre mevcuttur [38]. Yöntem ile elde edilen kaplamaların bağlanma mukavemetleri çok yüksektir [43].



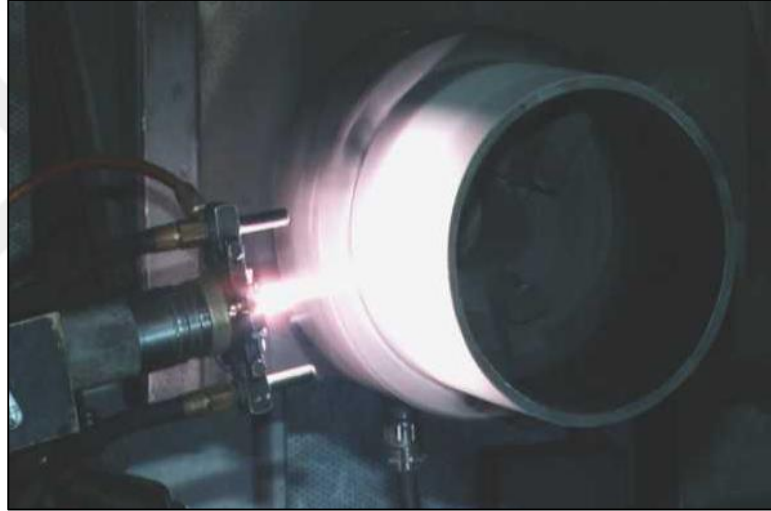
Şekil 2.4. Eksenel toz enjeksiyonlu plazma püskürtme yöntemi [44]

Plazma püskürtme yönteminde ilave gaz olarak soy gaz grubundan gazların kullanılması yüksek saflık ve oksit içermeyen kaplamaların elde edilmesine imkân sağlar. Bu yöntem yataklar, valf yuvaları, uçak motorları, maden makineleri ve zirai araçlar gibi aşınma ve korozyon direnci aranan yüzeylerde yaygın olarak kullanılmaktadır [45]. Plazma püskürtme yönteminde toz beslemesi yatay pozisyonda olabileceği gibi düşey pozisyonlarda yapılan sistemler de mevcuttur (Şekil 2.5).

Plazma püskürtme yöntemi, çok geniş bir malzeme spektrumunun olması ve çok çeşitli kaplamaların yapıldığı bir kaplama yöntemidir. Yöntemde kaplama malzemesi olarak toz biçimindeki malzemelerin yanında tel malzemeler de kullanılmaktadır. Seramik oksitleri gibi yüksek ısı dayanımına sahip malzemeleri kullanarak 70 MPa'dan fazla bağ mukavemetli % 2–5 gözenekli ve % 2–5 aralığında oksit bileşenli kaplamalar üretilebilmektedir. Yöntem hangi malzeme olursa olsun çok yüksek sıcaklıklarda çalışabildiğinden makine parçalarının yüzey özelliklerinin istenen seviyeye gelmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca kaplamaların yenilenmesi işlemi için de plazma püskürtme yöntemi kullanılır (Şekil 2.6). Fakat bu yöntem çinko alüminyum gibi korozyona dayanıklı koruyucu kaplama üretimi için ekonomik değildir [46]. Malzemelerin ergime sıcaklıklarına yakın sıcaklıklarda kaplama aralığının olması ve yüksek sıcaklıklarda çalışma yeteneğinin olması birçok malzemenin bu yöntemle kullanılmasına olanak sağlar. Bu özelliğinin yanında korozyon ve aşınma direnci kazandırması özellikle elektrik ve biyomedikal alanlarında özel olarak kullanılma şansı vermiştir.



Şekil 2.5. Dikey toz beslemeli plazma püskürtme yöntemi [45]

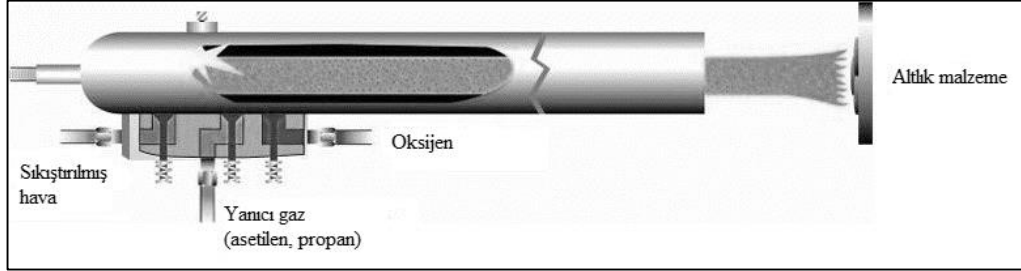


Şekil 2.6. Plazma ile kaplama uygulaması [36].

• Patlamalı Püskürtme (D-Gun) Yöntemi

Patlamalı püskürtme, diğer adıyla D-Gun (Detonation spraying) yöntemi partiküllerin kaplanacak malzeme üzerine patlama yöntemiyle gönderilmesi sonucu kaplama elde edilmesi yöntemidir (Şekil 2.7). Yöntem, bir kapsül içerisinde toz karışımı ile oksii-asetilen gazının tutuşması ile patlaması sonucu parçacıkların yüksek hızlara ulaşarak kaplama yüzeyine yapışması şeklindedir. Her patlama döngüsünün ardından kapsülün içine azot püskürtülerek temizlenir ve tekrar patlama işlemi devam eder. Bu işlem saniyede birkaç kez tekrarlanır. Yöntem ile elde edilen kaplamaların kalitesi oldukça iyidir. Bunun sebebi parçacık hızlarının çok yüksek olması olarak gösterilebilir. Yüksek partikül hızı kaplamanın yoğun ve iyi bir bağlanma mukavemetine sahip olmasına sebep olur. Yöntemin en önemli dezavantajlarından biri pahalı olmasıdır. Bunun

yanında 140 dB'lere ulaşan gürültü oluşması da işlem olumsuzluklarından biridir [42]. Patlamalı püskürtme yöntemi, HVOF yöntemleri ile karşılaştırıldığında genel olarak her iki yöntem benzerlik gösterse de farklı yakıt gazlarının kullanılması ve patlamalı püskürtmede yanmanın zaman ayarlı bir bujiyle yapılmasıdır [47].



Şekil 2.7. Patlamalı püskürtme yöntemi ile termal sprej kaplama [48]

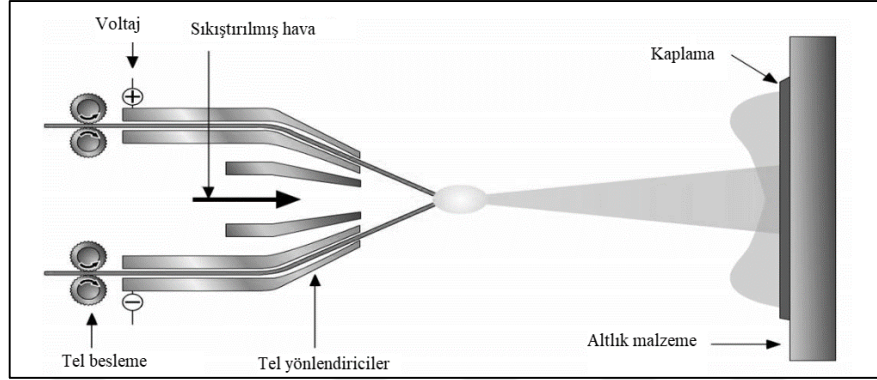
Patlamalı püskürtme yönteminde patlama sonucu toz parçacıkları 3000-3500°C civarına kadar ısınır, ana malzemenin sıcaklığı ise CO₂ destekli soğutma sistemi ile 150°C'nin altında tutularak ergimiş partiküllerin hızı 800 m/s civarına ulaşır. Yaklaşık olarak bu parametrelerde çalışan patlamalı püskürtme yöntemi ile altlık malzeme üzerinde % 0,5-1 boşluk oranına sahip, yani çok düşük boşluklu, iyi bağlanmış kaplamalar elde edilir. Her bir patlama döngüsünde çapı 2,5 cm ve kalınlığı 2 mm olan daire şeklinde bir kaplama bölgesi elde edilir. Tüm bu kaplama bölgeleri birleştirildiğinde sıkı kenetlenmiş mercimek tanelerine benzer yapıda bir yüzey oluşur. Bu kaplama yüzeyi altlık malzemeye sıkı bir şekilde bağlanır [67]. Plazma sprej yöntemi ile karşılaştırıldığında daha düzgün, sıkı ve katmanlı bir kaplama tabakası elde edilir [43]. Ayrıca tungsten karbür gibi çok yüksek yoğunluklu kaplamalar da elde edilebilir [32].

• Elektrik Ark Püskürtme Yöntemi

Elektrik arkı ile püskürtme yöntemi kaplama malzemesi telin bir motor yardımıyla kaplama tabancasının ucuna sürekli itilmesi ve ark ile tutuşturulup eritilerek altlık malzeme yüzeyine püskürtülmesi işlemidir (Şekil 2.8). Bahsi geçen ark 6000°C'nin üstüne kadar çıkabilir. Ergimiş malzeme sıkıştırılmış hava ile birleşerek atomize olur ve kaplanacak yüzeye püskürtülür. Bu yöntemde genel olarak kısmen sünek ve elektrik iletkenliği iyi olan malzemeler kullanılmaktadır [43].

Elektrik ark püskürtme yönteminde diğer yöntemlerden farklı olarak ayrıca bir ısı kaynağına ihtiyaç yoktur. İki adet tel elektrot, ark oluşturarak bir ergime meydana getirir. Bu ergime sonucu oluşan partiküller sıkıştırılmış hava ile hızlandırılarak kaplanacak malzemenin yüzeyine püskürtülür. Yöntem esnasında gaz olarak soy gaz kullanılması durumunda oksitlenmeyen daha iyi bir kaplama elde edilir. Kapanacak malzeme ısı ile temas halinde

olmadığı için kaplama bölgesinde sıcaklık çok düşük olur. Diğer püskürtme yöntemlerine göre daha iyi özelliklere sahip bir kaplama elde edilir. Elektrik ark ile püskürtme yöntemi ile metaller, bakır ve paslanmaz çeliklerin kaplamasını yapmak mümkündür [45].



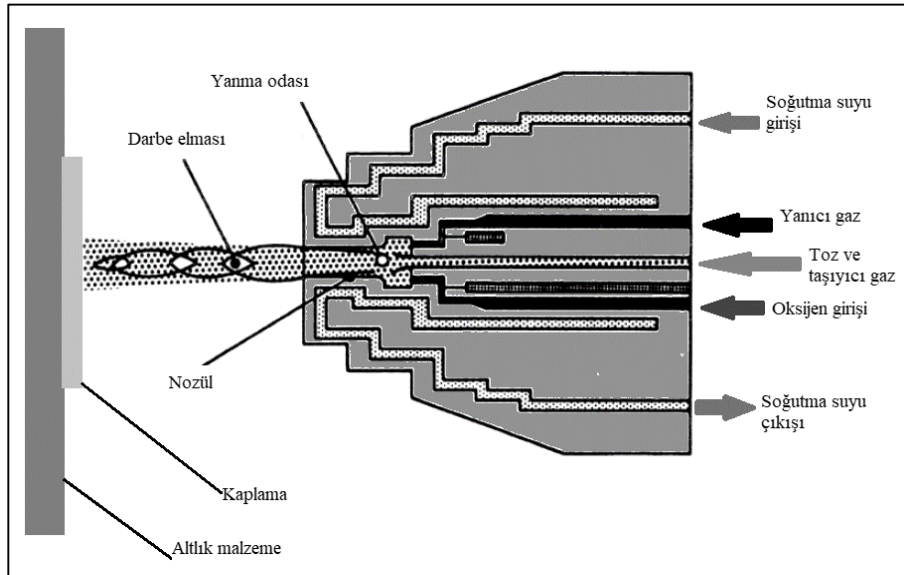
Şekil 2.8. Elektrik arkı ile püskürtme yönteminin şematik gösterimi [49]

Yöntemde soy gazlar kullanılmadığı zaman metal partikülleri oksitlenmeye başlar. Zamanla kaplamanın içinde yüksek miktarda metal oksitler oluşmaya başlar. Bu şekilde oluşan kaplamalar sertlik olarak çok yüksek değerlere sahiptirler fakat işlenmesi zordur. Bu durum kimi zaman bir olumsuzluk gibi görünse de sertliğin istendiği yüzeylerde kullanılmaktadır. Ark sıcaklığı ile partiküllerin ergime sıcaklığı arasındaki ilişki ise kaplamanın yapısını önemli ölçüde değiştirmektedir. Ark sıcaklığının partikül ergime sıcaklığından yüksek olması aşırı ısıtılmış parçacıkların oluşmasına sebep olacaktır. Böylece kısmi metalürjik etkileşimler ve difüzyon bölgeleri artarak iyi bir çekme ve bağlanma mukavemeti oluşturacaktır. Ayrıca yöntem seri üretime uygunluk olarak diğer püskürtme yöntemlerine göre daha avantajlıdır. Püskürtme miktarının fazla olması, ayarlanabilir olması yöntemin avantajları arasındadır. Bu ayarlanabilir püskürtme sayesinde yöntem daha ekonomik olmaktadır [42]. Yönteme püskürtme oranı olarak bakıldığında ise 1-10 g/s akış oranına sahiptir [32]. Kaplama yapılacak olan malzemenin direk olarak yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmaması yöntemin avantajları arasında gösterilir. Bu sayede mikro yapı değişiklikleri ve bozulmalar minimum düzeyde olur. Diğer kaplama yöntemleri ile elde edilen kaplamalar ile kıyaslandıklarında daha yoğun ve daha sert bir yüzey elde edildiği görülmüştür. Ayrıca çalışma maliyetinin düşük olması, püskürtme oranının yüksek olmasından dolayı verimliliği diğer yöntemlere göre daha yüksektir. Bazı kaplamalarda kaplanacak malzemenin yüzeyine ön ısıtma işleminin uygulanması, kaplama malzemesi olarak sadece iletken tellerin kullanılabilmesi ise yöntemin dezavantajları arasındadır [32].

• Yüksek Hızlı Oksi Yakıt (HVOF) Püskürtme Yöntemi

HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme yöntemi, alev püskürtme yöntemlerinden birisi olup kaplama malzemesi olarak genellikle toz malzemenin kullanılan yüzey modifikasyon işlemidir. Tekniğin kolay uygulanması ve elde edilen kaplama özelliklerinin iyi olması, tercih edilen bir yöntem olarak literatürde yer bulmuştur. Genel olarak toz malzeme kullanılsa da bazı durumlarda tel ya da çubuk kaplama malzemesi, 2300-3000°C arasında olan alev sıcaklığı içerisinde ergimiş ya da yarı ergimiş hale gelir (Şekil 2.9). Bu ergimiş malzeme tabanca nozulünden kaplanacak altlık malzeme süpersonik hızlarda (>1350 m/s) gönderilir [43].

Bu püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamaların gaz türbinleri, imalat sektörü, petrol sektörü ve otomotiv sektöründe pek çok uygulama alanı vardır. Diğer kaplama yöntemlerine göre kaplama altlık malzemeye daha iyi bağlanır, yüksek sertlik değerlerine ulaşılır ve gözenek oranı çok düşüktür. Bu sebeple de tercih edilen bir kaplama türüdür [47]. Özellikle püskürtme yöntemleri arasında püskürtme hızının kaplama yapısında çok büyük öneme sahip olması HVOF yönteminin seçilmesinde etkili olmaktadır [32]. Ayrıca daha düşük termal gerilmeler oluşturduğu ve daha büyük kalınlıklardaki kaplamaların elde edildiği ve Diamond Jet HVOF (DJ HVOF) yöntemi olarak adlandırılan yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme yöntemde ise daha yüksek kinetik enerjiye sahip partiküllerin yüzeye gönderilmesine imkân verdiğinden diğer tüm termal sprej yöntemlerinden daha iyi bağlanma mukavemeti ve en az gözeneklilik elde edilmektedir [43].



Şekil 2.9. HVOF ısı püskürtme düzeneğinin şematik gösterimi [50]

HVOF yönteminin avantaj ve dezavantajları şunlardır:

- Yanma bölgesindeki partiküllerin yüksek türbülansı sonucunda daha düzgün ve etkili partikül sıcaklığı elde edilir.
- Yüksek partikül hızı nedeniyle uçuş esnasında partiküllerin soğuma süresi daha kısadır.
- Diğer ısıtma yöntemleriyle karşılaştırıldığında, partikülün daha kısa sürede yüzeye ulaşması nedeniyle, daha az oksidasyon oluşumu gözlenir.
- Partiküller ve jet, tabancadan ayrıldığında nemli hava ile karışma daha az olmaktadır.
- Diğer yöntemlere göre daha düşük partikül sıcaklıkları oluşmaktadır. Plazma ya da ark tabancalarında operasyon sıcaklıkları 20000°C iken HVOF'da bu sıcaklık değeri 3000°C (oksijen/propilen karışımı) dolaylarında olmaktadır [43].

2.2.4. Ergitme Esaslı Kaplama Yöntemleri

Ergitme esaslı kaplama yöntemleri, farklı iki metali birleştirmeye yarayan kaynak yöntemleriyle benzerlik gösteren iki malzemeyi ısı, basınç veya her ikisinin yardımıyla ilave malzeme kullanarak yahut kullanmadan yapılan (kaynak) işlemlerdir. Bu ergitme yöntemleri kullanılarak malzeme yüzeyine sert tabakalı kaplamalar elde etmenin yanında mevcut yüzeyin tamamen değiştirilmesi, aşınmış bölge tamiri gibi çok farklı işlemler yapılabilir. Malzeme yüzeyinin ergitme esaslı kaplama yöntemleri ile kaplama yapılabilmesi için geleneksel kaynak yöntemlerinden olan elektrik ark, toz altı ve gaz altı gibi kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Ayrıca lazer ışını ve elektron ışını ile kaynak teknikleri de kullanılmaktadır. Fakat bu yöntemler ile yapılan kaplamalarda kaplanacak malzeme direk olarak ısıya maruz kaldığı için çarpılmalar ve bozulmalar meydana gelebilmektedir. Bu olumsuzluklara rağmen bu yöntemlerle aşınma, korozyon ve erozyona dirençli kaplamalar yapmak mümkündür. Bu konuyla ilgili birçok çalışma yapılmış olup yöntemin verimli olduğu belirtilmiştir [32].

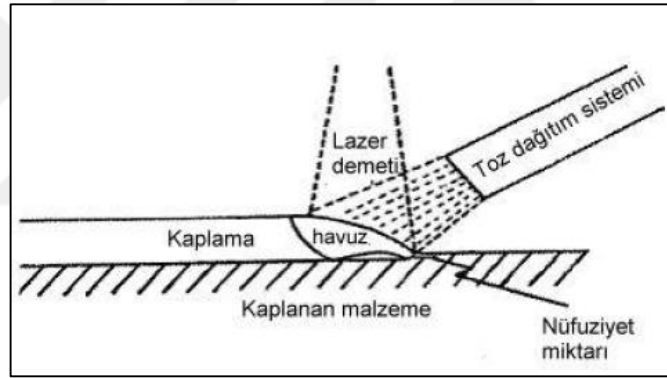
• Lazerle Yüzey Kaplama

Isı kaynağı olarak lazer ışınlarının kullanıldığı lazerle yüzey kaplama yöntemi, bilgisayar destekli imalat, robotik, sensörler ve toz metalürjisi gibi birkaç disiplini bir arada toplayan bir kaplama yöntemidir. Yöntemde öncelikle kaplama malzemesi altlık malzeme üzerine ince bir tabaka halinde serilir. Yüzeye difüze olacak olan metal altlık malzeme üzerine önceden hazırlanmış tozun enjeksiyonu, püskürtülmesi ya da tel besleme yolu ile kaplanacak malzeme üstüne aktararak lazer ısı kaynağı yardımıyla kaplanır (Şekil 2.10 ve Şekil 2.11). Kaplamanın nüfuziyeti koruyucu gaz seçimi, lazer tipi, malzemenin yansıtma özelliği, malzemenin iletkenliği, altlık malzemenin geometrisi ve yüzeyin temizliğine bağlıdır [35]. Kaplama parametresi olarak lazerin gücü, lazer kaynağının çapı, malzemenin ışığı yansıtma ve absorbe etme özelliği ve

kaynak hızı, gibi değişkenler kullanılır. Bunun yanında kaplama hızı, birleşme şekli ve malzeme cinsi gibi değişkenler parametre olarak kullanılabilir. Kaynak tasarımı, koruyucu gazın özellikleri ve parçalar arası mesafe gibi etkenler de kaplama özelliklerini etkileyen parametreler arasındadır [32]. Lazerle kaplama tekniğinin avantajlarını aşağıda gibi sıralayabiliriz;

- Üretim süresini azaltması: Lazer kaplama yöntemi bilgisayar destekli tasarım ile yapıldığından ayarlar ve ön hazırlık gibi işlemler doğrudan ve hızlı bir şekilde yapılarak zaman kaybının önüne geçilir.

- İşlem sıcaklık kontrolünün sağlanması: Kaplama işlemlerinde sıcaklığın ayarlanması ve kontrolü sağlanması önemli bir parametredir. Altlık malzemenin gereğinden fazla ısıya maruz kalması, malzemeni iç yapısının ve mekanik özelliklerinin tamamının değişmesine değişimine sebep olur. Lazer kaplama işleminde lazer demetinin yapısı gereği çok iyi kontrol edilebilen bir ısı bölge oluşur. Isıl bölgenin kontrol edilebilir ve olabildiğince dar olması ana metalin özelliklerinin en az seviyede değişmesi demektir. Isı tesiri altında kalan bölgenin (ITAB) izlenebilmesi ve kontrol edilebilmesi üretilen parçanın kalitesinin artmasına neden olur.



Şekil 2.10. Lazer kaplama işleminin şematik gösterilişi [51]

- Parçaların tamirine imkân vermesi: Lazerle kaplama teknolojisi tamir için uygun bir yöntemdir. Yöntem parçanın takım ömrünü arttırdığı gibi aynı zamanda zorunlu değişmesi gereken durumlarda o parçanın tamir edilerek kurtarılmasını sağlar.

- Katmanlı olarak parça üretimi yapılabilmesi: Geleneksel imalat yöntemlerinde üretim tabakalar halinde değil tek malzeme türü üzerinden yapılır. Lazerle üretimde ise farklı malzeme tabakalarına sahip bir parça üretmek mümkündür. Parçaların üretimi esnasında farklı özelliklere sahip tabakalar aynı malzeme üzerinde toplanabilir. Bu sayede yapışma, korozyon sertlik gibi istenen tüm özellikler aynı parçada toplanır. Farklı katmanlara sahip parça üretimi, farklı nozüllerin diğer tabakalar üzerine malzeme biriktirmesi ile yapılır. Yöntemin avantajları;

- Yüksek dayanıma sahip kaplama yapılabilmesi.

- Kaynak edilebilirliği zor olan malzemelerin (titanyum, kuvarsit gibi) kaplamasında kullanılabilmesi.
- Şekil ve geometri yönünden karmaşık olan parçaların kolaylıkla kaplanabilmesi.

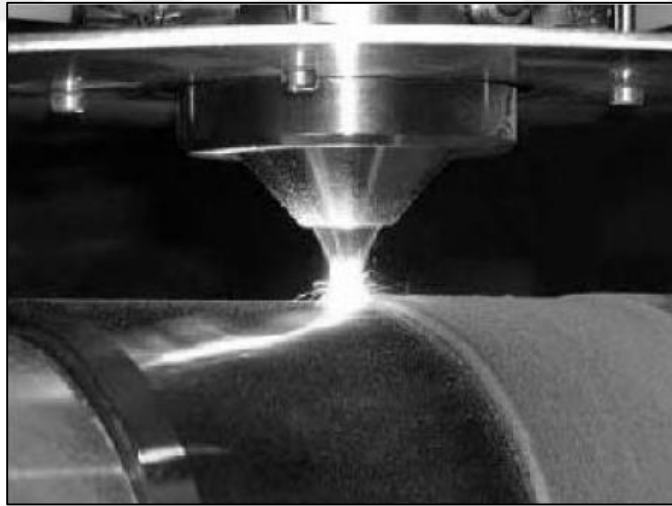
Yöntemin dezavantajları ise;

- Lazer kaplama parametrelerinin (lazer ışını gücü, lazer demeti hızı, toz besleme miktarı gibi) çok fazla değişkenlik göstermesi sebebiyle kaplama kalitesinin sürekli değişmesi. Bahsi geçen parametrelerin çok küçük değişimi bile kaplama üzerinde önemli değişikliklere sebep olmaktadır.

- İlk yatırım maliyetinin çok yüksek olması. Ayrıca lazer kaynaklarından elde edilen verimin düşük olması, kaplama bölgesinin kontrolünün yetersiz olması lazer teknolojisinin kaplama sektöründe kullanılmasını kısıtlamaktadır.

- Kaplama tabakalarının ana malzemeye yapışma problemi, sürenin çok kısa olması sebebiyle ara yüzeyde atom hareketlerinin çok kısa sürede yeteri kadar istenen düzeye gelmemesi yapışma problemine sebep olur.

Yukarıda belirtilen bu dezavantajlara rağmen yöntem, son yıllarda özellikle metalik kaplama ve üretiminde önemli bir potansiyele sahiptir [34, 45, 52].



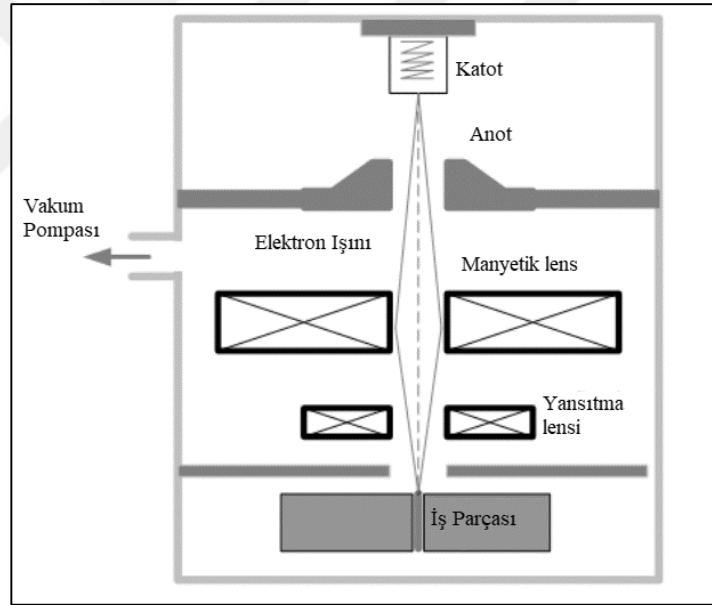
Şekil 2.11. Lazer kaplamayla delme takımlarının kaplanması [52]

• Elektron Işını İle Kaplama Yöntemi

Yönlendirilmiş elektron demetinin sahip olduğu enerji sayesinde tel veya toz malzemelerin ergitilmesi suretiyle yüzeyin kaplanması işlemine elektron ışını ile kaplama adı verilir (Şekil 2.12). Katottan çıkan elektron demeti manyetik lens ve yansıtma lenslerinden geçerek malzeme üzerine yönlendirilir ve iş parçası üzeri kaplanır. Elektron demetinin gönderilmesi için gerekli

olan elektrik enerjisi iki farklı işlevi yerine getirir. Birinci kaynak katottan gelen elektronları sağlarken ikincisi ise onların hızının artırılmasını sağlar. Bu iki işlevi de bir arada yapan sisteme elektron tabancası adı verilir. Elektron tabancalarının elektron sağlama şekline göre iki farklı çeşidi vardır. Birincisi, termal emisyon ile metal ya da metal olmayan bir termo-katottan elektronların iletilmesini sağlarken ikincisi ise plazma emisyonu ile bir plazma katot ya da soğuk bir metal katot tarafından sağlanır.

Elektron tabancası kullanarak kaplama malzemesinin buharlaştırılmasında altlık malzeme soğuk olarak kalır. Böylece yüksek saflıkta kaplamalar elde edilmiş olur. Elektron ışını ile kaplama sayesinde kaplama malzemesi yoğun ve yüksek enerjisi ile çok yüksek sıcaklıklarda ve miktarlarda buharlaşır. Bunun yanında yüksek ergime sıcaklıklarına sahip bileşikler buharlaştırılarak metal ve alaşımlar ilave edilebilir. Tıpkı lazerle kaplama yönteminde olduğu gibi elektron ışınının gücünün ayarlanabilir olması sayesinde buharlaştırma miktarı kolay ve hızlı bir şekilde kontrol edilebilir [32].



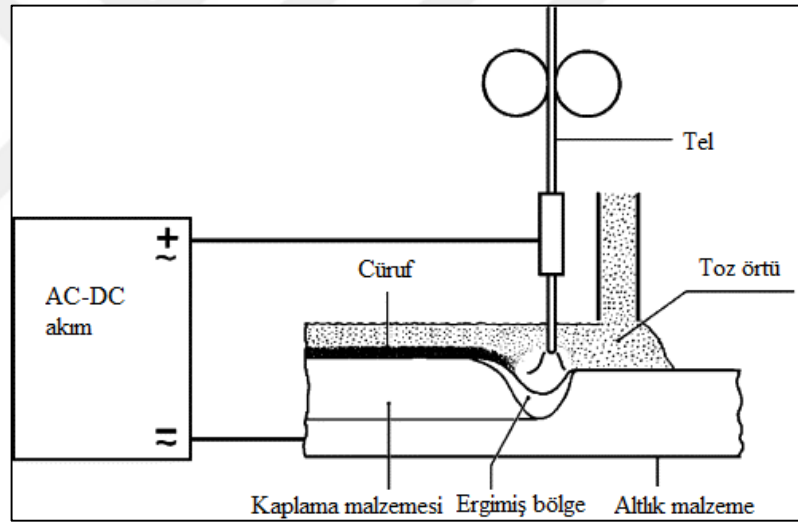
Şekil 2.12. Elektron ışını ile kaplama yöntemi [53]

• Tozaltı Kaynağı ile Kaplama

Toz altı kaynak yöntemi ile kaplama, kaplama yüzeyini örten bir koruyucu toz yığını altında bir elektrot ve bir makara tarafından sürekli beslenen bir tel veya şerit kullanılarak yapılan kaplama işlemidir (Şekil 2.13). Kaplama bölgesi toz ile kaplı olduğu için kullanılan ark yüksek akım değerlerine çıkarılarak çevresel etmenlerden etkilenmeden kullanılabilir. Yapılacak kaplama türüne göre akım, kaynak hızı, koruyucu toz debisi ve tel kombinasyonları gibi parametreler ayarlanarak kaplama özellikleri değiştirilebilir. Hem alternatif akım hem de doğru akım

kullanılarak birden çok tel ile işlem yapılabilir. Doğru akım ile yapılan kaplamalarda altlık malzeme üzerine derin nüfuziyet sağlanırken alternatif akımda ise ilave teller daha fazla birikmeye yani kaplama kalınlığının daha fazla olmasına sebep olur. Toz altı kaynağı ile yapılan kaplamalarda akım 1000 A değerlerine kadar çıkabilir. Ama genellikle bu değer 400 A civarındadır. Özellikle çeliklerin birleştirilmesinde kullanılan koruyucu tozun iyi seçilmesi gerekir. İşlem sonrası yüzeyde oluşan cüruf ve kalıntıların taşlama ile giderilmesi gerekir [54].

Bu yöntem ile 3 mm ve üzerinde derin kaplamalar elde etmek mümkündür. İşlem sonrası kaplama bölgesinde meydana gelebilecek çatlamlar için bölge çok yavaş bir hızda soğutulabilir. Kaplama işleminden sonra bölgeye çeşitli işlemler yapılabilir. Bunlar ısıl işlemler, yüzey düzeltme işlemleri, gerilim giderme için yapılan ısıl işlemler, taşlama gibi talaşlı imalat işlemleri ve koruyucu toz tabakasının yüzeyden uzaklaştırılması için temizleme işlemleri gibi müdahalelerdir. Toz altı kaynak yöntemi Co, W, Cr ve Ni gibi ilave malzemeler ile çok büyük valflerin, tamburların kaplanmasında kullanılır [55].



Şekil 2.13. Tozaltı kaynağı ile kaplama yönteminin şematik diyagramı [56]

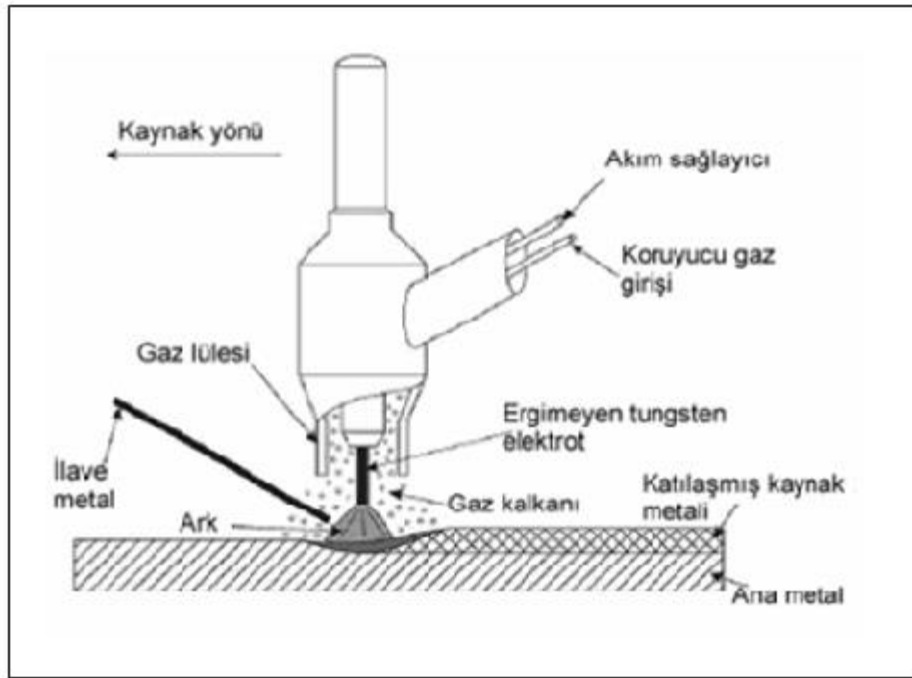
• Gaz Tungsten Ark (GTA veya TIG) ile Kaplama

Koruyucu gaz (argon veya helyum) altında tungsten elektrotlar arasında ark oluşturarak kaplama malzemesinin eritilmesi suretiyle altlık malzemesinin kaplanması işlemine gaz tungsten ark ile kaplama denir (Şekil 2.14). İşlem süresince verilen alternatif akımla Al alaşımları, doğru akımla ise demir alaşımlarının kaplanması sağlanır. Düşük akımlı mikro plazma işlemlerine benzeyen bu yöntem elle yahut basit bir otomasyon ile yapılabilir. Tungsten elektrot, yüksek sıcaklıklara ısıtılarak elektrotların emisyonu sağlanır. Elektrot ile altlık bölgesinde oluşan ark elektromanyetik alan ile ortamdaki koruyucu gazın bir kısmı iyonlaşır. İyonlaşan bu gaz belli bir

süre sonra plazma halini alır. Elektrik arkı iletken olan asal gazdan akımın geçmesiyle üretilir [32].

Gaz tungsten ark ile kaplama işleminde malzeme üzerinde bulunan küçük ayrıntıları ve deliklerin iç kısmı da bu yöntem ile kaplanabilir. İstenen kaplama kalınlığının 2 mm'den kalın olması istenirse kaplama biriktirme oranı 2 kg/s değerine ulaşır. İşlemin nispeten yavaş olması ve çok geniş alanların kaplanmasında yetersiz kalması kullanım alanlarını daraltmaktadır. Ayrıca ilk kurulum maliyetinin fazla olması ve koruyucu gaz ortamında çalışması nedeniyle özel bir alan gerektirir ve bu da yöntemin dezavantajları arasında yer alır. Gaz tungsten ark ile kaplama yöntemi genellikle küçük parçaların kalın bir tabaka ile kaplanması istendiğinde kullanılan bir yöntemdir. Çok geniş bir malzeme spektrumu ile yapılabilen kaplamaya malzeme ilavesi yapılarak kaplamanın özellikleri değiştirilebilir [55].

Gaz tungsten ark yönteminde ergime işlemi her iki malzemede de aynı anda olur. Hızlı bir şekilde soğuma ve katılaşma süreci başlar ve kaplama malzemesi ile altlık malzeme metalürjik olarak birbirine bağlanır. Ani katılaşma süreçleri malzeme yapısında çeşitli değişikliklerin olmasına sebep olur. Hızlı soğumadan dolayı sert karbür fazlar ince taneli mikro yapılar içinde bulunur. Bu da yüzeyin sert, aşınmaya dirençli bir yapı olması için istenen bir mikro yapıdır [32].



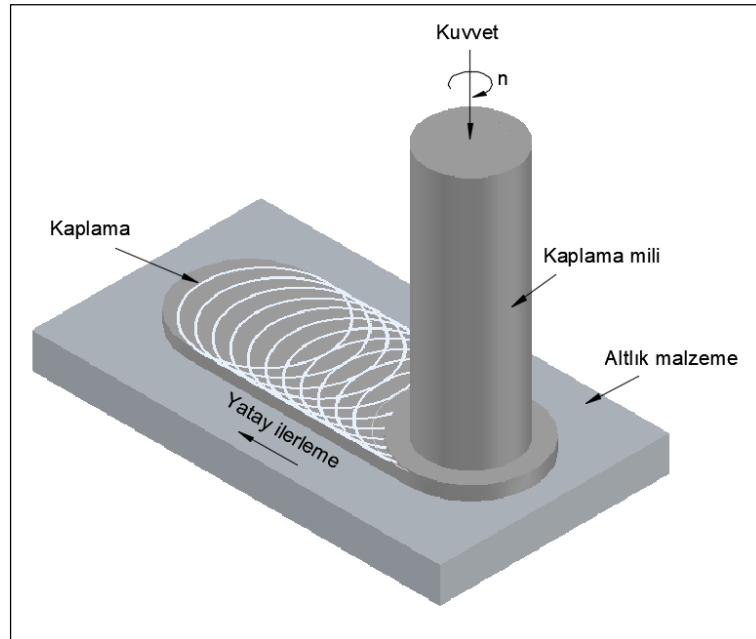
Şekil 2.14. Gaz tungsten ark ile kaplamanın şematik olarak gösterilişi [57]

Gaz tungsten ark ile kaplama ile aşınmış olan yüzeyler tekrardan kullanılabilir hale getirilebilir. Aynı zamanda kaplamada kullanılan ilave tel ve çubuk malzemeler ile kaplama

yüzeyleri daha dayanıklı hale getirilebilir. Kaplama öncesi yüzeylerin bir takım ön hazırlığa ve yüzeyin bir ön ısıtmaya tabi tutulması gerekebilir. Kaplama sonrası ise gerilim giderme gibi ısıt işlemlerin yanında ekstradan bir talaşlı imalat işlemi gerekebilir.

- **Sürtünmeli Kaplama Yöntemi**

Sürtünmeli kaplama yöntemi, dönme hareketi yapan bir kaplama milinin ilerleme hareketi yapan altlık malzeme üzerine belirli bir kuvvet ile bastırılıp yüksek sıcaklıklara ulaşarak kaplama yapması prensibine dayanır (Şekil 2.15). Kaplama işlemi özel olarak tasarlanan sürtünmeli kaplama tezgâhlarında, geleneksel tezgâhlarda veya CNC kontrollü tezgâhlarda yapılan bir işlem olup, kaplama malzemesinin altlık malzemesi üzerine biriktirilmesi esasına dayanır(Şekil 2.16). Bu yöntemde malzeme seçimindeki en önemli husus altlık malzemesiyle kaplama malzemesinin yapışma özelliğinin iyi olmasıdır. Kaplama işlemi malzemelerin yeniden kristalleşme sıcaklığı ile ergime sıcaklığı arasında meydana gelir. Oluşan ısı, sürtünmenin etkisiyle ara yüzde oluşarak plastik deformasyon etkisi yapar ve kaplama malzemesinin altlık malzemeye yapışmasını sağlar. Kaplama işleminde harici bir ısı kaynağı kullanılmadan iki malzemenin birbiri üstünde sürtünerek istenen sıcaklığa ulaşması diğer yöntemlere karşı önemli bir avantajdır. Yöntemin bir diğer avantajı ise geleneksel kaynak yöntemi ile birleştirilemeyen farklı iki malzemenin birleştirebilmesidir. Katı hal sürtünme esaslı teknolojilerde olduğu gibi sürtünmeli kaplama işlemleri hem füzyon bazlı işlemlerdeki metalürjik kusurlar içermezler hem de çevreye herhangi bir zararlı etkisi yoktur.



Şekil 2.15. Sürtünmeli kaplama yönteminin şematik gösterimi

Sürtünmeli kaplama işlemi sırasında kaplama mili altlık malzemeye transfer olurken belli bir kısmı ise mil ucunda flanş adı verilen bir kısım meydana getirir. Oluşan bu kısmın çapı kaplama milinin dönme hızına göre değişir. Flanş bölgesinin gereğinden fazla büyük olması kaplama verimini düşürerek altlık malzeme üzerinde daha az malzeme birikmesine sebep olur. Dolayısıyla kullanılan parametrelerin flanş bölgesini minimum büyüklükte olacak şekilde seçilmesi gerekir. Kaplama mili çapı ise, kaplama yapılacak yerin genişliğine göre genellikle 20 mm civarında seçilir [22]. Eğer kaplama yapılacak alan bu genişlikten büyükse yan yana kaplama işlemi yapılır. Oluşan kaplama kısmı istenen mikro yapıya göre çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemleri gibi çeşitli ısı işlemlere tabi tutulabilir.

Kaplama mili ve altlık malzemenin kesit görüntüsü Şekil 2.17a’da koordinat düzlemi ise Şekil 2.17b’de gösterilmiştir. Sürtünmeli kaplama işlemi sırasında kaplama milinde ön ısıtma bölgesi, elastoplastik ve viskoplastik bölge olmak üzere üç farklı bölge meydana gelirken altlık kısmında ise ITAB ve ara difüzyon bölgesi meydana gelmektedir (Şekil 2.17c).



Şekil 2.16. Sürtünmeli kaplama işlemi

Sürtünmeli kaplama işleminde kaplama milinin devir sayısı, kaplama milinin çapı, kaplama miline uygulanan kuvvet, altlık malzemenin ilerleme hızı ve malzeme kombinasyonları gibi kaplama yapısına doğrudan etkiyen birçok değişken mevcuttur. Uygun parametrelerin seçilmesi ile istenen kaplama yapısı elde edilebilir. Bu parametreler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- **Devir sayısı:** Devir sayısı kaplama esnasında istenen sıcaklığa ulaşmak için kullanılan parametrelerin başında gelmekte ve kaplama kalınlığı, kaplama kalitesi ve kaplama genişliği gibi kaplama yapısına doğrudan etki etmektedir.

- **Kaplama mili çapı:** Kaplama milinin çapı, tek seferde kaplama yapılacak bölgenin genişliğini oluşturmaktadır. Literatür çalışmaları incelendiğinde genellikle 20 mm civarında seçildiği görülmektedir [22]. Mil çapının yetersiz kaldığı durumlarda iki kaplama yan yana yapılarak kaplama genişliği ayarlanabilir.

- **Kaplama miline uygulanan kuvvet:** Kaplama miline uygulanan kuvvet, sürtünme bölgesinde oluşan ısıya doğrudan etki etmektedir. Özellikle kaplama kalınlığı ve flanş büyüklüğünü doğrudan etkileyen bu faktör kaplama için önemli bir parametredir [24].

- **Altlık malzemenin ilerleme hızı:** Altlık malzemenin ilerleme hızı, kaplama bölgesini etkileyen bir diğer faktördür. Hızın artması birim zamanda altlık malzeme üzerinde biriken kaplama miktarını azaltarak kaplama malzemesinin difüzyonunu zayıflatır.

- **Malzeme kombinasyonları:** Altlık malzeme ve kaplama malzemesinin seçimi, yapılacak kaplamanın en önemli noktasını oluşturur. Altlık malzemesinin üzerine uygun kaplama mil malzemesinin seçilmesiyle kimyasal ve mekanik özellik açısından daha iyi kaplamalar elde edilebilir.

- Sürtünmeli kaplama ile sürtünme kaynağı farklı amaçlar için kullanılmalarına rağmen, her iki işlemde benzer termomekanik işlemler mevcuttur. Bu yüzden mikro yapı değerlendirmeleri esnasında birçok benzerlikler görülür [58]. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Ruhsatları Kurumu (FSW Licenses Association) tarafından kabul edilen sisteme göre sürtünmeli kaplama bölgesinde mikro yapı açısından 3 farklı bölgenin olduğu belirtilmiştir. Bunlar;
- **1. Isının tesiri altındaki bölge (ITAB veya HAZ):** Dönen milin merkezinin yakınında olan bu bölgede malzeme, mikro yapıyı ve/veya mekanik özelliklerini değiştiren bir ısı çevrim geçirir. Bununla birlikte, bu alanda plastik deformasyon oluşmaz.
- **2. Termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB):** Bu bölgede, kaplama mili malzemesi plastik olarak deformasyona uğrar ve sürtünmeden oluşan ısı malzemeyi etkiler. TEB'in yeniden kristalleşmiş bölgesi ile deforme olmuş bölgesi arasında genellikle farklı bir sınır vardır.

bağlanma meydana gelir. Isı iletiminin devam etmesi ile viskoplastik kesme ara yüzeyinin kalınlığı altlığın içlerine doğru artar ve ardından soğuma ve bağ oluşumu meydana gelir. Milin ucundaki aşırı plastisite olmuş malzeme altlığa yanal bir zorlama uygular, bu da mil çapının dışına çıkan bir kısmın (flaş) oluşmasına neden olur. Bu yüzden kaplamadaki tam olarak yapışmış kısım milin çapından daha küçüktür [66]. Altlık yüzeyi ile temas halinde olan milin yatay düzlemdeki hareketi ile birlikte viskoplastik malzeme altlığın üzerine birikir. Dönen milin oluşturduğu ısı kaynağı, plastik deformasyon ve ara yüzey sürtünmesinden dolayı füzyon altındaki sıcaklıklarda sürtünmeli kaplamanın oluşmasını sağlar. Termomekanik işlemin etkisiyle yüzeyde ince taneli bir tabaka birikir. Böylece sürtünmeli kaplama işleminde dönen milin ucunda oluşan ısının ve dönmenin etkisiyle dalgaya benzer geometriye sahip kaplamalar elde edilir [62].

2.3. Sertliklerine Göre Kaplama Çeşitleri

Kaplamalar farklı şekillerde sınıflandırılabilirler. Bunlardan birisi de sertliklerine göre yapılan sınıflandırmadır. Kaplamalar sertliklerine göre sınıflandırılması ve özellikleri aşağıda verilmiştir.

2.3.1. Düşük Sertlikli Kaplamalar

Sertliklerine göre kaplama çeşitlerinin en az sert grubuna giren yumuşak kaplamalar bir bağlayıcı malzeme içine toz ilavesiyle veya elektrokimyasal kaplama ve fiziksel buhar kaplama gibi yöntemlerle elde edilen, katı yağlama amacıyla kullanılan kaplama çeşididir. Özellikle bağlayıcı malzeme ile yapılan kaplamalar birçok uygulama alanında katı yağlayıcı olarak görev yapmaktadır [67]. Yumuşak metaller, lamelli katılar ve polimerler, halojen sülfatlar, sülfürler gibi malzeme gruplarından imal edilirler.

Yumuşak Metaller

Yumuşak metaller, Ag, Au, Pb, Al ve Cu gibi YMK yapıda ve tetragonal kristal yapıdaki Sn ve In gibi geçiş ve iç geçiş metallere aittir. Bu metaller elektro kaplama ve fiziksel buhar kaplama yöntemleri ile yapılan yumuşak kaplamalardır. Çelik üzerine Pb, Sn, Cu kaplamalar yağlayıcı olarak kullanılmaktadır. Au ve Ag malzemelerinden yapılan kaplamalar ise yine katı yağlayıcı olarak uzay araçlarında, jet motorlarında ve hafif yüklerde çalışan yüksek hızlı makinelerde kullanılmaktadır [67].

Lamelli Katılar ve Polimerler

Molibden sülfür (MoS_2), grafit ve polimerler (PTFE) gibi kendinden yağlayıcı katılar, dışarıdan bir yağlayıcı ilavesinin olmadığı durumlarda düşük sürtünme ve aşınma durumu

sergilerler. Özellikle fiziksel buhar biriktirme ile kaplama (PVD) yöntemi kullanılarak üretilen MoS_2 ve grafit kaplamalar katı yağlayıcı görevi gördüğü alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Molibden sülfür, grafit gibi diğer katı yağlayıcıların aksine kuru ve vakum olmayan çalışma ortamlarında istenen özellikleri gösterir. Normal şartlarda molibden sülfür grafitte nazaran daha düşük sürtünme özelliği gösterir. Grafit malzemesinin iyi bir yağlayıcı olarak kullanılabilmesi için nemli ortamlarda bulunması gerekir. Akışkan yağlayıcılarda bulunan bir dezavantaj olan gaz oluşumu MoS_2 malzemesinde bulunmadığı için uzay ortamı gibi hava bulunmayan ortamlarda aranan malzeme olmuştur [68]. 1940'lı yıllarda ilk olarak kullanılan bu malzeme günümüzde de popülerliğini yitirmemiş, diğer katı yağlayıcılara göre daha fazla kullanılmaktadır [69]. PTFE olarak bilinen polimerler ise düşük yük ve düşük sıcaklık ortamlarında kullanıma uygundur [68]. Molibden sülfür, uzay endüstrisinin yanında hava sensör yatakları, çapraz mafsallı yataklar gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Diğer katı yağlayıcılara göre daha az miktarda gaz oluşumu sebebiyle vakum ortamında tercih edilen bir bileşik olmuştur. Bileşiğin anizotropik kristal yapıya sahiptir. Yapı içerisinde trigonal sandviç şeklinde oluşur ve aralarında Van der Waals bağları vardır. Van der Waals bağlarının özelliği olan zayıf bağlanmadan dolayı kaymanın kolay olması ve sürtünme katsayısının düşük olması demektir [67].

Molibden sülfür, grafit ve PTFE gibi toz malzemeler, polimerler ile birleştirilip püskürtme, daldırma ya da sıvama gibi işlemlerle malzeme yüzeylerine uygulanabilir. Bu uygulamaların kaplama kalınlıkları 1 ila 50 mikrometre arasında değişiklik gösterir. Hava ile kurutulan yağlayıcılarda kullanılan bağlayıcılar selüloz ve akrilik gibi termoplastik polimerler ile alkid, fenolik, epoksi, silikon ve polimidler gibi termoset plastiklerdir.

Katı yağlayıcı olarak görev yapan bu kaplamalar 200°C 'ye kadar kararlı davranış gösterirler. Sadece polimidler 300°C 'ye kadar dayanım göstermektedir. Bahsi geçen bu polimer kaplamaların birçoğu ticari olarak kullanılmaktadır. Bu kaplamalar, PTFE, polifenilin sulfid, poliamid-imid ve/veya organik bir reçine bağlayıcı ve çözücü içerisindeki polimid karışımıdır. Hegzagonal bornitrür (h-BN) bileşiği ise dış görünüş ve renk olarak alüminaya, yapı olarak ise grafitte benzer. Zehirli değildir ve katı yağlayıcı olarak kullanılır. h-BN malzemesi seramik malzemeler içinde $2,27 \text{ g/cm}^3$ ile yoğunluğu en düşük malzemedir. Dayanımı oldukça yüksektir. Havada 1000°C soy gaz ortamında ise 3000°C 'ye kadar dayanır ve termal şoklara karşı da direnci yüksektir. Elektrik iletmeyen, ısıyı ileten bir yapısı vardır. Mor ötesi ışığı yansıtır. Namlu, mühimmat, mekanizma vb. ürünlerde katı yağlayıcı kaplama olarak kullanılmaktadır [67].

Halojen Sülfatlar, Sülfürler

CaF_2 - BaF_2 , CaF_2 ve PbO-SiO_2 bileşiklerinden üretilmiş olan seramik bağlayıcılı ve plazma püskürtme kaplamaları yumuşama sıcaklıklarının üstüne çıktığı zaman akış özellikleri gösterir ve yüksek sıcaklıklarda katı yağlama amaçlı kullanılabilir. Bahsi geçen bu kaplamalar, yumuşaktır

ve abrasif değildir. Güçlü asitler ve indirgeyici ortamlarda kimyasal olarak soy gaz özelliği gösterirler. Bazı CaF_2 - BaF_2 ve CaF_2 bileşiklerden oluşan kaplamalar ise, havada sırasıyla 650 ve 900°C'ye kadar etkili yağlama özelliği gösterirler. Mekanik olarak yumuşak özellik gösteren kaplamalar, içerisine alaşım elementleri katılarak dayanıklı ve sert hale getirilir. Bu sayede kaplamaların mekanik ve tribolojik özellikleri iyileştirilir [67].

Yumuşak kaplamalar, içerisine alaşım elementleri katılmak suretiyle kompozit yapılarak dayanıklı hale getirilmekte, mekanik ve tribolojik özellikleri iyileştirilmektedir [67].

2.3.2. Sert Kaplamalar

Yapı olarak seramik malzeme grubuna giren sert kaplamalar kimyasal olarak formülize edilebilirler. Mekanik olarak dirençli malzemelerdir. Sert kaplamaların elde edildiği bu malzemeler aşağıda gibi üç şekilde karşımıza çıkmaktadırlar [67];

- Periyodik tabloda Fe elementinin sol tarafında kalan geçiş metalleri ile atom yarıçapı 1 ($\text{\AA}$) angströmden daha küçük olan karbon, azot, bor, oksijen gibi ametaller arasında kovalent bağ ile oluşan ve kimyasal formülü (Geçiş Metali)_x(Ametal)_y olarak ifade edilebilen ileri teknoloji seramikleri.

- Atom yarıçapı 1 ($\text{\AA}$) angströmden daha küçük olan karbon, azot, bor, oksijen gibi ametallerin birbirleri arasında kovalent bağ ile yapmış oldukları ve kimyasal formülü (Ametal)_x(Ametal)_y olarak ifade edilebilen ileri teknoloji seramikleri. (Örneğin bor karbür (B_4C) veya karbon atomlarının kendi aralarında farklı allotropik yapılarda görülen elmas, grafit gibi yapılar)

- Periyodik tabloda Fe elementinin sol tarafında kalan geçiş metalleri ile Si yarı metali arasında kovalent bağ ile oluşan ve kimyasal formülü (Geçiş Metali)_x(Si)_y olarak ifade edilebilen silisitler [67].

Karbürler

Periyodik cetvelde Fe elementinin sol tarafında bulunan bazı geçiş metalleri ile karbon elementinin iyonik yahut kovalent bağ yapması ile oluşan TiC, ZrC, HfC, Cr_3C_2 , Mo_2C , WC, W_2C , VC, NbC ve TaC gibi yüksek sertliğe sahip (10-25 GPa) seramik bileşiklere karbürler adı verilir. Çelikler, demir dışı metallerin ve sementasyona uğramış karbürlerin aşınma ömrünü yükseltmek için kullanılır. Daha çok iyon kaplama, sıçratma ve CVD yöntemleriyle üretilirler. En yaygın kullanılan seramik karbür kaplama titanyum karbür (TiC) kaplamalardır. Çeliklerin ömürlerini arttırmak için, rulmanlı yataklarda rulman üzerine, nükleer füzyon reaktörlerinde ise cidar malzemesi olarak kullanılırlar. Ayrıca ametalik karakterde olan bor ve karbonun yaptığı kübik B_4C ve yarı metal silisyum ile karbonun, aralarında kovalent bağ ile yaptığı SiC gibi malzemeler de bu gruba girmektedir. Özellikleri bakımından özel bir seramik olan bor karbür,

sertliğinin çok yüksek olması (3000 HV), yoğunluğunun düşük olması (yaklaşık 2,52 g/cm³), ergime noktasının yüksek olması (yaklaşık 2500°C), elastisite modülünün yüksek olması (460 GPa) ve aşınma direncinin yüksek olması gibi istenen özelliklere sahiptir. Bu özel seramik kaplama malzemesi özellikle askeri alanda ve savunma sanayiinde personel zırhı ve araç zırhı olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında aşınmaya dirençli nozül malzemesi olarak kullanılır. Bor atomlarının nötron absorplama spektrumunun geniş olması sebebiyle, nükleer alanda kontrol ve kalkan malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Borik asitle beraber sitrik asit veya PVA gibi başlangıç maddelerinin kullanıldığı sol jel ve CVD gibi metotlarla kaplama yapılabilir [67].

Nitrürler

Alkali yahut toprak alkali metallerin azot ile yapmış olduğu Li₃N, Mg₃N₂, Be₃N₂, Ca₃N₂, Sr₃N₂ ve Ba₃N₂ gibi bileşiklerdir. Bunların yanı sıra ametalik özellik gösteren bor-azot elementlerinin yapmış olduğu ve çok yüksek sertlik dayanımına sahip (48 GPa) kübik bor nitrür (c-BN) ve yarı metal silisyum ile azot arasında kovalent bağ ile yapılan ve çok yüksek aşınma direncine sahip Si₃N₄ malzemesi gibi malzemeler de özel nitrürler arasına girer. Ayrıca hegzagonal bor nitrür olarak adlandırılan (h-BN) malzemesi 900°C'ye kadar dayanım gösterirken yatak elemanları vb. gibi birçok uygulamada katı yağlayıcı olarak kullanılır.

Geçiş metallerinin azot elementiyle yapacağı, aşınmaya dirençli ve refrakter özellikli azot bileşikleri bu grupta incelenmelidir. TiN, TiCN, TiAlN, CrN, ZrN, TiZrN, TiCrN ve HfN gibi bileşikler yapan bu malzemeler periyodik cetvelde Fe elementinin sol tarafında bulunan bazı geçiş metalleri ile azotun iyonik yahut kovalent olarak bağlanması sonucu oluşur. TiN malzemesi altın renginde olup en çok PVD yöntemiyle üretilir. Bu malzeme aynı zamanda kimyasal olarak kararlı, korozyon direnci yüksek, düşük sürtünme ve aşınma sergileyen bir kaplama malzemesidir. Kesici takımlarda, kayma ve yatak malzemelerinde kullanılırken dekoratif amaçlı da kullanılmaktadır. TiCN ise düşük sürtünme sergiler ve yüksek hıza maruz kalan yerlerde kullanıldığında yüksek gerilmeli aşınmaya karşı TiN malzemesine göre daha fazla dayanım gösterir. TiAlN malzemesi TiCN ile benzer özellikler gösterir, fakat yüksek sıcaklığa (800°C) daha dayanıklıdır.

CrN, mekanik özellikler bakımından tok bir malzemedir ve korozyona karşı dirençlidir. ZrN kaplaması ise biyo-uygunluğundan ve korozyon direncinin iyi olmasından dolayı tıbbi/cerrahi aletlerde kullanılır. TiCrN malzemesi ise titanyuma benzer fakat aynı çalışma şartlarında daha iyi etkinlik gösterir [67].

Oksitler

Periyodik tabloda Fe elementinin sol tarafında bulunan bazı geçiş metalleri ve alüminyum ile silisyumun oksijen ile oluşturduğu Al_2O_3 , TiO_2 , HfO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , Cr_2O_3 , ZrO_2 ve SiO_2 gibi yüksek sertlik değeri (750-2100 HV), yüksek ergime sıcaklıkları ve iyi bir korozyon ve aşınma direncine sahip seramik malzemelere oksitler adı verilir.

Oksit kaplamalar PVD, CVD, kimyasal ve elektrokimyasal gibi pek çok yöntemle üretilir. Altlık malzeme olarak metal, seramik ve sermetler kullanılabilir. Alüminyumoksit (Al_2O_3) kaplamalar, yukarıda sayılan tekniklerin yanı sıra anotlama, plazma püskürtme, buharlaştırma, sıçratma gibi yöntemlerle üretilirler. Titanya olarak da bilinen titanyumdioksit (TiO_2) kaplamalar ise geniş bant aralığına sahip yarı iletken bir malzeme olup, insan sağlığına zarar vermeyen yapısı, fotokatalitik özelliği, hidrofobik yapısı, antibakteriyel ve kendi kendini temizleyen özelliklerinin bulunması sebebiyle son zamanların trend malzemelerinden biri haline gelmiştir. Uygulama alanlarına bakıldığında oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklarda çalışan ve aşınmaya maruz bırakılan parçalarda kullanıldığı görülmüştür. Kullanılacağı alana göre kaplama yöntemi belirlenen malzemelerde sıçratma yöntemi ile kaplanan malzemeler aşınmaya dirençli ve elektriksel olarak yalıtkan malzeme olarak kullanılırken CVD yöntemi ile kaplanmış olanlar ise sementle edilmiş karbür takımların TiN ve TiC kaplanmasında kullanılır. Krom oksit (Cr_2O_3) ya da kromya olarak bilinen kaplamalar ise plazma püskürtme ve radyofrekans sıçratma yöntemi ile oksitlenerek aşınmaya dirençli bir kaplama elde edilir. Plazma püskürtme yöntemi ile üretilen Cr_2O_3 kaplamalar hem oda sıcaklığı hem de yüksek sıcaklıklarda aşınmaya dirençli malzeme olarak kullanılırken, RF sıçratma ile üretilen kaplamalar yatak elemanlarında yalıtım malzemesi olarak kullanılır. Aynı şekilde zirkonya (ZrO_2) kaplamalar da hem plazma püskürtme yöntemi ile hem de sıçratma yöntemleriyle üretilirler. Bu malzemeden üretilen kaplamalar sertlik açısından oldukça iyi, yüksek sıcaklıklara dayanabilen, çizilmeye ve korozyona karşı dirençli kaplamalar elde edilir. Zirkonya kaplamaların plazma püskürtme yöntemi ile üretilen kaplamaları uçak motorların yanma odalarında termal bariyer olarak ve yakıt akülerinde ise sensör olarak kullanılmaktadır. Silisyumoksit (SiO_2) ya da diğer adıyla silika kaplamalarla, şeffaf, yansımayı engelleyen (antirefle) ve hidrofobik yüzeyler elde edilir. Sıçratma yöntemi ile yapılan silika kaplamalar yarı iletken uygulamalarda manyetik depolama cihazlarında kullanılır. Yukarıda bahsedilen oksitlerin yanı sıra, yine farklı maksatlarla, Sb_2O_3 , BaO , CaO , In_2O_3 , ITO (indium tin oxide), ZnO , CuO , CdO , SrO , MgO vd. gibi oksit kaplamalar da üretilmektedir [67].

Boritler

Periyodik cetvelde demir (Fe) elementinin sol tarafında bulunan bazı geçiş metalleri ile bor elementinin TiB_2 , ZrB_2 , W_2B , NbB_2 , VB_2 , HfB_2 , CrB_2 , Mo_2B_5 ve TaB_2 şeklinde, iyonik ya da kovalent bağ ile oluşan sertliği ve ergime sıcaklığı yüksek, korozyon ve aşınma direnci iyi olan

malzemelerdir. TiB_2 'nin diğer karbür ve silisit kaplamalardan üstün yönü daha düşük sürtünme katsayıları ($\mu=0,2$) sunmasıdır. Ayrıca bu malzemenin sertliği 2200-5240 HV arasında değişim gösterir. Yukarıda bahsi geçen boritlerin yanı sıra CeB_6 , ErB_4 , LaB_6 , GdB_6 , AlB_2 , SiB_2 , MgB_2 ve Pd_3B gibi özel borit kaplamalar üretilmektedir [67].

Bor Karbürler

Sertlikleri 20 GPa ile 78 GPa arasında değişiklik gösteren bor karbürlerin genel kabul görmüş Vickers sertlik değeri 32 GPa'dır. Nitrürlenmiş çelik ile karşılaştırıldığında (21 GPa) oldukça iyi sertlik özelliğine sahip olduğu görülmektedir [70].

Aşınma özelliklerine bakıldığında ise yine aynı şekilde diğer malzemelere nazaran oldukça iyi sonuçlar göstermiştir. Sert malzemeler ile karşılaştırıldığında 0,613 ile relatif skalanın en üstünde yer almaktadır [70]. Bazı bor karbür bileşiklerinin yoğunluklarının karşılaştırılması için stokiometrik ara bileşik hesaplamaları yapıldığında B_4C için $2,52 \text{ gr/cm}^3$, $B_{13}C_2$ için $2,488 \text{ gr/cm}^3$, $B_{10,5}C$ için ise $2,465 \text{ gr/cm}^3$ değerlerinin elde edildiği görülmüştür [70]. İncelenen bileşiklere bakıldığında yapıdaki bor miktarının artmasıyla yoğunlukta bir düşüş söz konusu olmuştur. Bunun sebebi borun elementel ağırlığının karbona göre düşük olmasıdır. Bu sebepten dolayı bor miktarı arttıkça yoğunluk miktarı azalmıştır.

Bor karbürlerin elektriksel özellikleri incelendiğinde ise grafit ve SiC ile benzer değişimler gösterdiği görülmüştür. Normal şartlar altında ve oda sıcaklığında silisyum karbür için spesifik elektrik direnci 0,2-10 ohm.cm aralığında değişirken, bor karbür için 0,1-10 ohm.cm'dir. Aynı şekilde 10 ohm.cm elektriksel direnç gösteren saf bor karbürün direnci 1600°C civarında 0,2 ohm.cm değerine kadar bir düşüş gösterir. Bor karbürler silisyum karbürler ile kıyaslandığında daha yüksek akım geçirebilme özelliğine sahiptirler [70].

Kararlı bir bileşik olan bor karbür; atomik karbon miktarı % 8-20 arasında değişen geniş bir stokiometrik aralığa sahiptir (Şekil 2.18). Bu da geniş bir kompozisyon aralığı ve kimyasal formül anlamına gelmektedir. Teknik bor karbür olarak bilinen B_4C kompozisyonu ise üretim metotları sırasında en yüksek kararlılığı göstermektedir. Teknik bor karbür kompozisyonu B/C oranı 3,9-4,3 arasında değişmektedir, ancak literatürde genel olarak B_4C olarak gösterilmektedir [71].

Ergime sıcaklığının yüksek olması, sertlik özelliklerinin iyi olması, düşük yoğunluk, yabancı maddelere karşı yüksek direnç ve diğer mekanik özelliklerinin iyi olması sebebiyle bor karbür, günümüzde birçok özelliği bünyesinde barındıran özel bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Özellikle reaktörlerde, hafif zırh üretiminde ve yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren yerlerde kullanılmaya devam etmektedir [70].

Bor karbür, fiziksel özelliklerine bağlı olarak sertliğinin çok yüksek olması sebebiyle aşındırıcı olarak kullanılmaktadır. Bor karbürün diğer bir önemli kullanım alanı kumlama ve su

jet i ile kesmede kullanılan nozüller gibi aşınmaya dayanıklı makine parçaları üretimidir [70]. Magnazya–karbon refrakterlerinde antioksidan katkısı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca bor karbür yüksek sertlik, mukavemet ve düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı zırh malzemesi olarak kullanılmaktadır. Günümüz tank ve helikopterlerinde bor karbürlü zırh sistemleri kullanılmaktadır.

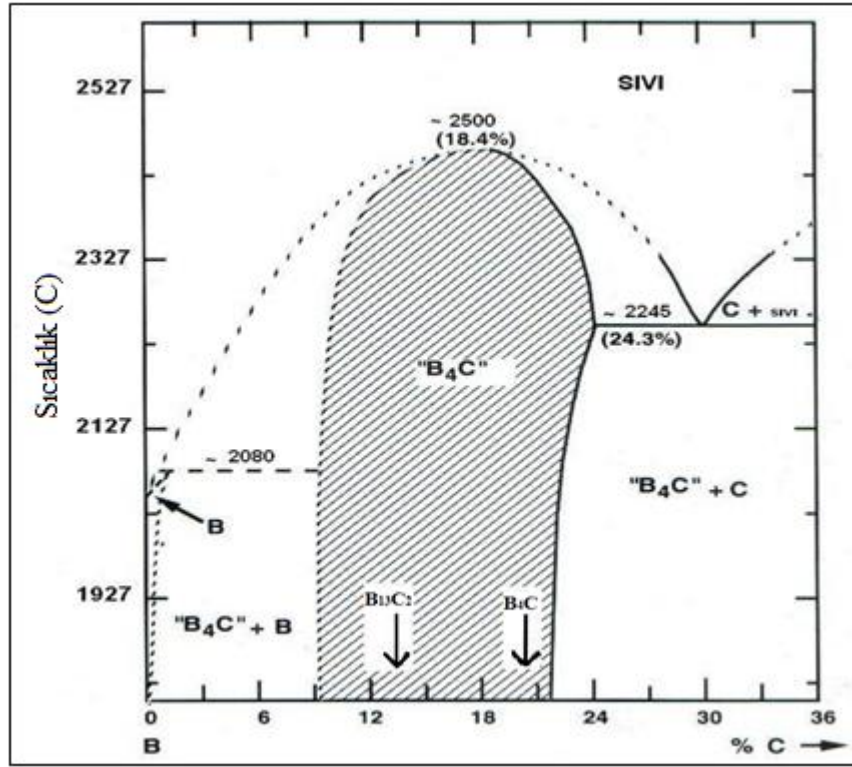
Bunların haricinde bor karbürün en yaygın kullanım alanlarından biri de nükleer enerji santrallerinde radyasyondan korunma amaçlı ve yakıt yükleme çubuğu olarak kullanımındır. Nükleer amaca yönelik olarak kullanılan bor karbürün yüksek miktarda bor içermesi gerekir. Bu amaca yönelik kullanılacak olan bor karbür tozları bir sınıflandırmaya sokulur ve -16+20 mesh, -60+80 mesh ve -200+325 mesh gruplarına ayrıldıktan sonra her bir gruptan sırasıyla %40 - %20 - %40 oranında karıştırılarak toz yoğunluğu 1,6 gr/cm³ olarak şekilde hazırlanır. Bu karışım kontrol çubuğu üretimine uygun bir boyut dağılımı verir [70].

Bor karbür, en kararlı bileşiklerden biridir. Asit ve bazlarla kolay bir şekilde reaksiyona girmeyişi ayrıca bir avantajdır. Birçok karbür ve nitrür bileşikleri erimeden direk olarak buharlaşma yoluyla bozulma eğilimi gösterirken bor karbür 2450 C’de eriyerek sıvı faz oluşturabilen bileşiklerden biridir [70].

Yüksek sertliği ve ergime noktasının yanı sıra bor karbürün mekanik özellikleri de oldukça önemli ve diğer malzeme ile kıyaslandığında iyidir. Yoğunluğuna bakıldığında mukavemetinin çok iyi olması bor karbür malzemesini diğer malzemelerden bir adım  ne çıkarmaktadır. Mukavemetin iyi olmasının sebebi kristal yapısındaki kovalent bağların nispeten diğer malzemelere göre daha güçlü olmasından kaynaklanır. Malzeme yapısına ilave edilen az miktardaki bor katkısı mikro yapıda bulunan serbest karbonu tutarak mukavemet artışına sebep olur.

Yüksek sıcaklıklarda sertliğin düşmesine paralel olarak mukavemette de azot gazı altında 1500  C’ye kadar herhangi bir azalma görülmez. Öte yandan havada 600-1000 C arasında yapılan eğme deneyleri B₄C’nin oksitlenmesine bağlı olarak mukavemetinin düşmesine sebep olur. Ayrıca karışıma silisyum ve alüminyum katkısının yapılması oksitlenmenin önüne geçer ve yüksek sıcaklıklardaki mukavemet değerinin iyileştirilmesine katkıda bulunur [70].

En kararlı bileşik olarak bilinen bor karbürün standart oluşum entalpisi 9,3 ile 17,1 kcal/mol aralığındadır. Her ne kadar asit ve bazlarla reaksiyona girmese de uzun süre HF-H₂SO₄ ve HF-HNO₃ karışımlarına maruz bırakıldıklarında yavaş da olsa çözünüm gösterirler. Sıcak ortamda HNO₃-H₂SO₄-HClO₄ gibi asitlerle oksitlenebilir. K  k boyutlu karbür taneleri nemli ortamlarda oksijen ile yavaşça oksitlenebilir ve tane yüzeylerinde B₂O₃, HBO₃ veya H₃BO₃ filmi oluşur. Tablo 2.1’de Bor karbürün özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.18. Bor-Karbon ikili faz diyagramı [72]

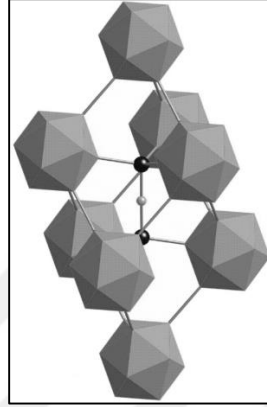
Tablo 2.1. Bor karbürün özellikleri [73]

Bor karbürün özellikleri	
Kimyasal Formülü	B ₄ C
Moleküler Ağırlığı (gr/mol)	55,25
Yoğunluk (g/cm ³)	2,51
Erime Sıcaklığı (°C)	2450
Kaynama Sıcaklığı (°C)	3500
Tane Boyut Analizi (3m)* X50	4-4800 mesh
Görünüm	Granül ve Toz / Siyah - Gri

Bor içeriği bakımından zengin katıların süper sert olmalarının en büyük nedenlerinden biri sahip oldukları kristal yapılarıdır. Kristal yapının ortak yapı taşı B₁₂xC_x ikosahedronudur. Bor karbür kristali oluşurken, öncelikle B₁₂ ikosahedronları oluşur ve daha sonra lineer bir karbon zinciriyle birbirlerine bağlanarak kristal yapıyı oluştururlar (Bir B₁₂ ikosahedronu ve CCC zincir bağı) [74].

B₄C kompozisyonu için en fazla kabul gören kristal yapı modeli rombohedraldir. Bir periyodik birim hücre, bir ikosahedron ve bir zincir olmak üzere on beş atom içerir. İkosahedronların üçgensel yüzündeki üst ve altta bulunan altı atom polar konumdadır ve direkt

olarak kovalent bağlarla komşu ikosahedronlara bağlanmışlardır. İkosahedronun ekvatorial konumundaki her bir altı atom ise zincirin sonunda bulunan bir atoma kovalent bağla bağlanmaktadır [75]. Bor ve karbon atomları ve konumları Şekil 2.19’de gösterilmiştir. Polar konumda olan gri atomlar komşu ikosahedralara bağlanmıştır. Zincirdeki siyah atomlar ise ekvatorial konumdaki beyaz atomlara bağlanmıştır [76].



Şekil 2.19. Bor karbürün kristal yapısı [77]

Deneyisel anlamda B₁₂ ikosahedronlarının B₁₁C ve B₁₀C₂ formlarında oluşabilecekleri ve dolayısıyla lineer zincirin de CBC, BBC gibi değişik şekillerde oluşabileceği tespit edilmiştir. Başka bir deyişle, bor karbür çoklu bir kristal yapıya sahiptir. Bunun ötesinde, Bor (11B) ve Karbon (12C) atomlarının saçılma uzunlukları ve X-ışını yapı faktörleri birbirine çok yakın olduğundan, kristal yapı deneyisel anlamda tam olarak aydınlatılamamıştır [74].

Elmas ve DLC (Elmas Benzeri Karbon)

Karbonun düzgün kristal yapıya sahip bir allotropu olan elmas, kovalent bağ ile kendini çevreleyen dört karbon atom ile tetrahedral meydana getiren bir yapıdır. Bu dört yüzlü C-C bağları çok yüksek sertlik (70 ila 100 GPa arası), kimyasal tepkimeye girmeme (inert özellik), elektriksel direncin yüksekliği, yüksek yalıtkanlık (dielektriklik) sabiti, yüksek ısı iletkenlik, yüksek yoğunluk ve optik saydamlık sağlar. Bilinen en sert malzeme olarak tanımlanır. DLC (Diamond like carbon) elmas benzeri karbon kaplamalar ise çok kısa aralıklar ile sıralanmış elmas ile grafit fazının birlikte olduğu amorf yapıyı temsil eder. Yapının içindeki elmas oranı arttıkça sertlik artarken grafit oranı arttıkça da katı yağlama özellikleri iyileşir. DLC kaplama malzemesinin yapısı ve özellikleri kaplama tipine, işlem türüne ve kaplama esnasında uygulanan parametrelere bağlı olarak değişiklik gösterir. Kaplama tipine bağlı olarak sp²/sp³ oranı, kimyasal bileşim ve kristalografik yönelme ortaya çıkacaktır. Son zamanlarda, DLC

kaplamaların daha iyi özelliklere sahip olabilmesi için, kaplamaların içerisine H, Si, N ve Ti, Nb vb. başka element atomları ilave edilmektedir [67].

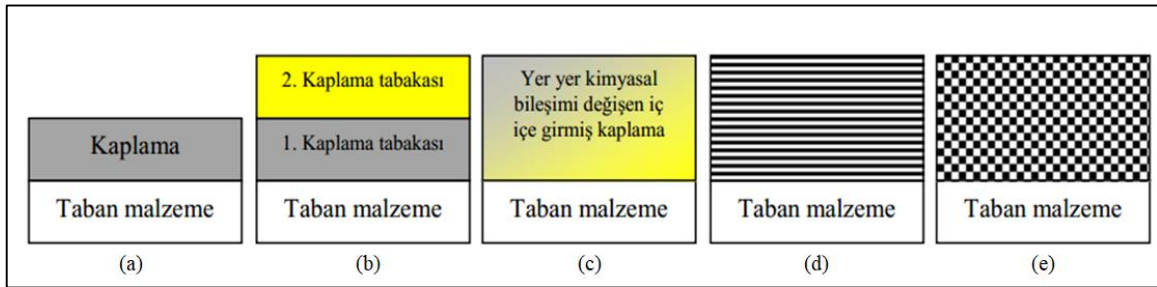
Silisitler

Periyodik tabloda demir (Fe) elementinin solunda bulunan geçiş metalleri ile silisyumun kovalent olarak bağlanması ile ortaya çıkan ve yüksek korozyon direnci, iyi sürtünme ve aşınma özellikleri gösteren MoSi_2 , TiSi_2 , Cr_3Si_2 , WSi_2 ve TaSi_2 gibi malzemelere silisitler adı verilir. Üretim yöntemi olarak daha çok sıçratma ve kristal büyütme (epitaksi) kullanılır. Özellikle yarı iletken teknolojisinde Si düzlemi üzerinde kristal büyütme tekniği kullanılmaktadır. Sert kaplama elde etmek çoğu zaman bir avantaj gibi görünse de bunun bir takım dezavantajları da mevcuttur. Özellikle yapısında bulunan iç gerilmelerin fazla oluşu kırılma riskini ortaya çıkarmaktadır. Bunun yanında altlık malzemeye istenen ölçüde yapışmama gibi dezavantajlar da mevcuttur.

2.3.3. Gradyanlı Kaplamalar

Kaplama yapılacak altlık malzemenin üzerindeki ilk tabakada yapışma özelliklerinin iyi, üst tabakalarda ise ortamla etkileşimi düşük ve sertlik gibi istenen özelliklerin bulunduğu bir kaplama yöntemi olan gradyanlı kaplamalarda kalınlık boyunca bileşim oranı değişen bir yüzey modifikasyon işlemidir. Özellikle metalik malzemelerde bağlanabilirliğinin iyi olması bu fikir için bir alt yapı oluşturmuştur. Aynı zamanda metalik ve seramik kaplamalarda içerik oranının tabakalar arasında değişiklik yapılması ile istenen özelliklerde kaplama elde etmek mümkündür.

Gradyan kaplamalarda bir malzemenin birden çok özelliğinden yararlanmak için parametrelerin etkin kullanılması gerekir. Yani altlık malzemeye yakın olan katmanlarda yapışma gibi özelliklerin kaplamanın en üst katmanında ise sertlik ve dayanım gibi mekanik özelliklerin iyi olması amaçlanır ve parametreler buna göre düzenlenir. Bahsedilen bu parametreler malzemenin içeriği, kaplamanın bileşik yapısı ve içeriği ile ilgili olabileceği gibi sıcaklık, basınç gibi değişkenler de olabilir. Sanayideki kullanım amacına göre yapılan kaplamalar Şekil 2.20'deki grafikte sınıflandırılırken gradyanlı kaplama da bu yöntemlerden biridir [67].



Şekil 2.20. Sanayide istenen amaca göre üretilmekte olan kaplama yapıları a) Tek tabakalı b) İki tabakalı c) Gradyan d) Çok tabakalı e) Kompozit kaplama [67].

3. MATERYAL VE METOT

Materyal ve Metot bölümü; kaplama yöntemi, altlık malzemesi ve kaplama malzemeleri, deney parametreleri, deney düzeneğinin hazırlanması, mikro yapı incelemeleri, mikro sertlik ölçümleri, aşınma deneylerinin yapılışı ve eğme testlerinin yapılışı kısımlar oluşmaktadır. Bu kısımlar aşağıda ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

3.1. Kaplama Yöntemi

Bu çalışmada Al5754 altlık malzemesi Al7075 kaplama mili kullanılarak toz ilavesiz ve toz ilaveli olmak üzere sürtünmeli kaplanmıştır. Toz ilaveli sürtünmeli kaplamalar gradyanlı kaplama ve toz serme yöntemi olmak üzere iki şekilde yapılmıştır. Gradyanlı kaplamalarda değişik oranlarda Al+TiC ve Al+B₄C karışım tozu içeren Al7075 kaplama milleri kullanılmış ve altlık malzeme artan takviye toz oranlarıyla sürtünmeli kaplanmıştır. Toz serme yöntemi olarak adlandırdığımız yöntemde ise B₄C tozu saf alkol ile macun haline getirilerek altlık malzeme yüzeyine serilmiş ve tozsuz kaplama mili ile üzerinden gidilerek kaplanmıştır. Her iki yöntem literatürde bulunmayan kendine özgü birer yöntemdir. Gradyanlı kaplamalarda kullanılan takviye tozları ve oranları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Gradyanlı kaplamalarda kullanılan takviye toz ve oranları

Takviye Oranı (%)	1.Katman		2.Katman		3.Katman	
	TiC	Al	TiC	Al	TiC	Al
5-15-30	5	95	15	85	30	70
10-20-30	10	90	20	80	30	70
10-30-60	10	90	30	70	60	40
	B ₄ C	Al	B ₄ C	Al	B ₄ C	Al
5-15-30	5	95	15	85	30	70
10-20-30	10	90	20	80	30	70
10-30-60	10	90	30	70	60	40

3.2. Altlık ve Kaplama Malzemeleri

Sürtünmeli kaplama işleminde altlık malzemesi olarak Al5754 serisi, kaplama mili malzemesi olarak ise Al7075 serisi kullanılmıştır (Tablo 3.2 ve Tablo 3.3). Al5754 serisinin en önemli özelliği yüksek kaynaklanabilme kabiliyeti ve yüksek korozyon direncine sahip olmasıdır. Deniz suyu ve kimyasallara karşı direncinin yüksek olması Al5754 serisinin bu alanlarda kullanımını yaygınlaştırmıştır. Bununla birlikte Al5754 malzemenin en büyük olumsuzluğu

sertlik ve aşınma direnci gibi birtakım mekanik özelliklerinin zayıf olmasıdır. Bu tür malzemeler hem kendinde bulunan özelliklerin korunması hem de ilave özelliklerin bünyesine dâhil edebilmek için çeşitli kaplama yöntemleri ile yüzey modifikasyon işlemlerine tabi tutulurlar. Mekanik özellikleri daha iyi olan malzemeler kullanılarak yapılan modifikasyon işlemleri genellikle yüzeylerin sertlik, aşınma ve korozyon direnci gibi bir takım özelliklerini iyileştirmesi amaçlıdır. Bu çalışmada mekanik özellikleri iyi olmayan Al5754 altlık malzemesi, mekanik özellikleri daha iyi olan Al7075 kaplama mili kullanılarak kaplanmıştır. Deneylerde kullanılan takviye tozları Al, B₄C ve TiC tozları Egenanotek firmasından temin edilmiş olup, özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.2. Al 5754 ve Al 7075 malzemesinin kimyasal özellikleri

%	Fe	Mn	Si	Mg	Zn	Cu	Cr	Ti	Diğer	Al
Al 5754 -H11	0,4	0,5	0,4	3,0	0,2	0,1	0,3	0,15	0,15	94,8
Al 7075-T6	0.5	0.3	0.5	2.3	5.6	1.3	0.20	0.25	0.15	88,9

Tablo 3.3. Al 5754 ve Al7075 malzemesinin mekanik özellikleri

Malzeme-Temper	Akma mukavemeti (MPa)	Çekme mukavemeti (MPa)	Uzama (%50)	Sertlik (HB)
AL 5754 -H11	80-100	190-215	24	50-55
AL 7075-T6	460-505	530-570	10	140-160

Tablo 3.4. Takviye tozlarının özellikleri [78]

Özellikleri	Takviye tozları		
	Al	B ₄ C	TiC
Tane Büyüklüğü(μm)	45	45	45
Safılık(%)	99	99	%99
Yoğunluk (g/cm ³)	2,7	2,52	4,91
Ergime Noktası (°C)	660	~2450	3067
Özgül Isı (J/mol.K)	24,2	50,88	33,8
Termal İletkenlik (W/m.°C)	36	30	21
Termal Genleşme (10 ⁻⁶ /°C)	23,1	4,3	7,4
Elastisite Modülü (GPa)	70	290-450	410 - 510
Poisson Oranı	0,33	0,18	0,191
Vickers Mikro sertlik	-	34,3	31,38

3.3. Deney Parametreleri Belirlenmesi

Deneylerde kullanılan parametreler, literatür çalışmaları [26, 28, 29] ve ön çalışmalar esas alınarak belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan kaplama milleri literatür çalışmaları esas alınarak 20 mm çapında ve 120 mm uzunluğunda seçilmiştir. Yapılan ön çalışmalarda tezgâhın pensine bağlanan kaplama mili için en uygun uzunluğun 120 mm civarında olduğu tespit edilmiştir. Bu uzunluğun gereğinden fazla olması kaplama milinde sehime sebep olarak kaplama tozunun dağılmasına sebep olmaktadır.

Deneylerde kaplama milinin yeterli sıcaklığa ulaşmasını sağlayan bekleme süresi, iş parçasının yatay ilerlemesi ve kaplama milinin düşey ilerlemesi için CNC programlar hazırlanmış (Ek 1) ve bu programlarla ön deneyler yapılarak optimum kaplama parametreleri belirlenmiştir (Tablo 3.5). Her kaplama öncesi yeni bir altlık malzeme kullanılarak önceki kaplamaların ısı etkileri ortadan kaldırılmıştır.

Tablo 3.5. Deney parametreleri ve değerleri

Deney parametreleri		Parametre değerleri
Devir sayısı, n	d/dak	800; 1000; 1200; 1500
Yatay ilerleme, Vf	mm/dak	100;120;140
Düşey ilerleme, Vv	mm/ dak	140;160;180
Takviye oranları	%	5-15-30; 10-20-30; 10-30-60

3.4. Deney Malzemelerinin Hazırlanması

Sürtünmeli kaplama deneylerinde kalınlığı 2 mm olan levha şeklindeki altlık malzemeler dinamometrenin boyutu ve kaplama mili çapı dikkate alınarak 150x35 mm boyutlarına getirilmiş ve pabuçlar yardımı ile dinamometreye bağlanmıştır.

Toz serme yöntemi deneylerinde kullanılan kaplama milleri 20 mm çapında 120 mm boyundaki kaplama milleri herhangi bir işlem yapılmadan doğrudan kullanılmıştır. Gradyanlı kaplamalarda ise kaplama milleri önce eksenlerinden 15 mm çapında ve 50 mm boyunda delinmiştir. Daha sonra çeşitli oranlarda 24 saat toz karıştırıcısı ile homojen karıştırılan kaplama tozları (Tablo 3.4) millerin açılan deliklerinin içerisine doldurulmuş ve 30 bar basınç altında sıkıştırılmıştır (Şekil 3.1). Yapılan ön çalışmalarda, sadece preslenen kaplama millerinin kullanılması durumunda kaplama tozlarının dağıldığı ve tozların kaplama yapısına karışmadığı belirlenmiştir. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak amacıyla kaplama milleri çeşitli süre ve sıcaklıklarda alüminyum malzemenin ergime sıcaklığı dikkate alınarak ısı işlem fırınında (Şekil 3.3) sinterlenmiştir. Sinterleme sıcaklığı ve süreleri Tablo 3.6’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Millerin içine toz basma işleminin yapıldığı pres

Tablo 3.6. Toz ilavesi yapılan kaplama millerinin sinterleme süre ve sıcaklığı

B ₄ C ve TiC tozlarının takviye oranı (%)	Sinterleme süreleri (d)	Sinterleme sıcaklıkları (°C)
5	90	350
10	90	350
15	90	350
20	90	350
30	90	350
60	90	450

3.5. Deney Düzenekinin Hazırlanması

Kaplama işlemleri Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği'nde bulunan Microcut Challenger 2414 marka dik işlem merkezli CNC freze tezgâhında yapılmıştır (Şekil 3.2). Deney esnasındaki kuvvet ölçümlerinde Marmatek KD0160 marka dinamometre CNC freze tezgâhı tablasına bağlanarak kullanılmış ve elde edilen verilen bilgisayara anlık olarak aktarılmıştır. Altlık malzemenin dinamometreye bağlanmasını sağlayan harici bir parça imal

Tablo 3.8. Sürtünmeli kaplamada kullanılan dinamometrenin özellikleri

Özellikler	Değeri
Boyutlar (mm x mm x mm)	160x160x66
Ağırlık (kg)	8,4
Ölçüm aralığı (kN)	50 kN
Çalışma Kuvveti (%FS)	150
Hassasiyet Sınıfı	1%
Doğrusallık Hata Payı	< % 0,2
Bağlantı Kablosu (m)	5 m



Şekil 3.3. Isıl İşlem Fırını

3.6. Sıcaklık Ölçümleri

Kaplama esnasındaki sıcaklıkların ölçümlerinde için Cem DT8886-H markalı bir kızılötesi termometre kullanılmıştır (Şekil 3.4). Kızılötesi termometre hareket edebilen bir tripod üzerine sabitlenerek ölçümler yapılmıştır. Uzaktan ölçüm yapan bu kızılötesi termometre ile elde edilen veriler anlık olarak bilgisayara aktarılarak sıcaklık grafikleri çizilmiştir. Sıcaklık ölçümü için kullanılan kızılötesi termometrenin teknik özellikleri Tablo 3.9’de verilmiştir.

3.7. Mikro Yapı İncelemeleri

Kaplama işlemleri sonrası numunelerin kesit görüntülerinin incelenmesinde optik mikroskop ve SEM görüntüleme cihazı kullanılmıştır. Kaplanan numuneler önce Fırat Üniversitesi Metalürji Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan Struers marka hassas kesme tezgâhında 10x10 mm boyutlarında kesilerek Struers marka bakalite alma cihazı ile bakalite alınmıştır. Daha sonra numuneler sırasıyla 400, 800 ve 1200'lük zımparalardan geçirilerek Metkon marka elmas parlatma süspansiyonu ve Struers marka çuha bezi yardımıyla parlatılmıştır. Parlatılan numuneler keller dağlayıcısıyla [79] dağlanarak optik mikroskop görüntüleme işlemi için hazır hale getirilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi'nde bulunan Nikon MA-200 Optik Mikroskop kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3.5). Kaplamaların SEM görüntüleri ve EDX analizleri ise Fırat Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda bulunan ZEISS EVO MA10 marka SEM görüntüleme cihazında 15,00 kV EHT voltaj verilerek elde edilmiştir (Şekil 3.6). Ayrıca kaplanan numunelerin katmalarının XRD faz analizleri ise İnönü Üniversitesi Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Rigaku marka cihazda yapılmıştır.



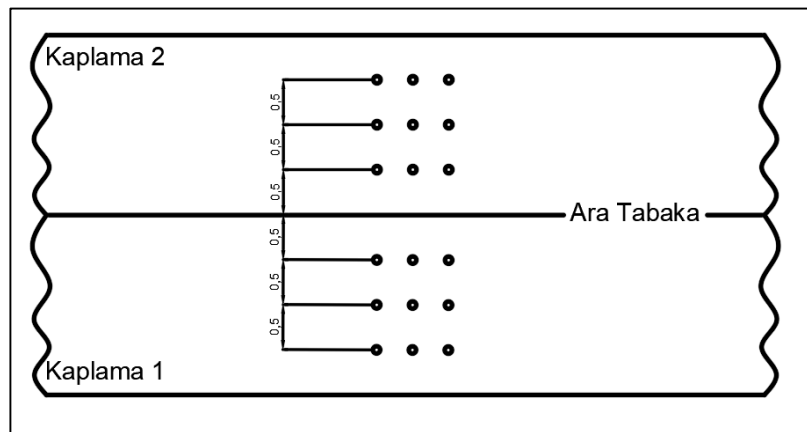
Şekil 3.5. Nikon MA-200 optik mikroskop



Şekil 3.6. SEM görüntüleme cihazı

3.8. Mikro Sertlik Ölçümleri

Mikro sertlik ölçümlerinde Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği'nde bulunan TRONIC marka mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.8). Ölçme esnasında numuneye 15 saniye boyunca 0,49 N ön yükleme uygulanmış ve ölçümler Vickers sertlik ölçüm metoduyla yapılmıştır. Gradyanlı kaplamaların ölçümlerinde ara yüzey referans olarak alınmış ve kaplamanın alt ve üst bölgelerinden 0,5 mm aralıklarla 1,5 mm uzunluğunda 3 farklı bölgeden üçer defa ölçümler yapılarak ortalamaları alınmıştır (Şekil 3.7).



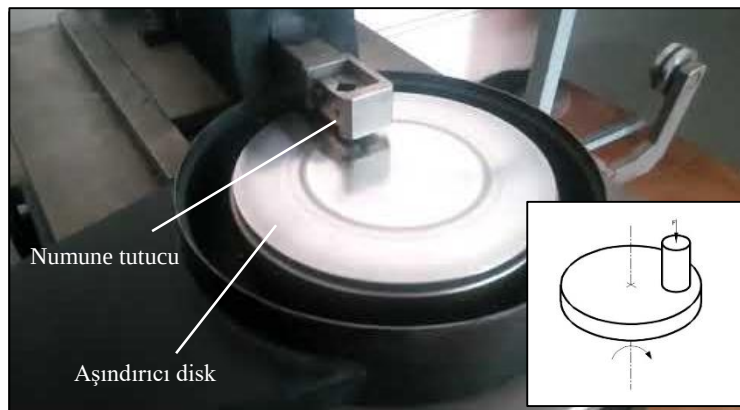
Şekil 3.7. Mikro sertlik deneyleri ölçüm şablonu



Şekil 3.8. Sertlik ölçüm cihazı

3.9. Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Pin-on disk aşınma aşınma tezgâhında GG25 aşındırıcı disk kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.9). Aşındırıcı disk DC motor ile tahrik edilmiş ve devri sayısı motor devir kontrol cihazı ile ayarlanmıştır. Numune aşındırıcı disk üzerine basınç kontrol valfi ve kuvvet dinamometresi yardımıyla pnömatrik olarak yüklenmiştir. Aşınma deneyleri ASTM-G99 normuna göre 450 d/dak devir ve 2 kgf yük altında yapılmıştır. Tüm numuneler ağırlık farkı metoduna göre 10^{-4} g hassasiyetindeki hassas terazi ile önce tartılmıştır. Daha sonra 300, 600 ve 900 m aşınma yolu sonrası tekrar numuneler tartılarak fark belirlenmiştir.



Şekil 3.9. Pin-on-disk aşınma test cihazı

3.10. Eğme Testi

Kaplamaların yapışma mukavemetini belirlenmesinde kullanılan Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde bulunan eğilme test cihazı (Şekil 3.10) kullanılmıştır. Eğme deneylere ASTM-E290 standardına uygun olarak en iyi kaplamaların elde edildiği numunelere uygulanmıştır (Şekil 3.11). ASTM-E290 normuna göre mesnetler arası mesafe (C) Denklem 2'ye göre hesaplanarak hazırlanmış ve UTEST eğme cihazında eğme testine tabi tutulmuştur.

$$C = 2r + 3t \pm \frac{t}{2} \quad (3.1)$$

C= alt destekler arası mesafe (mm)

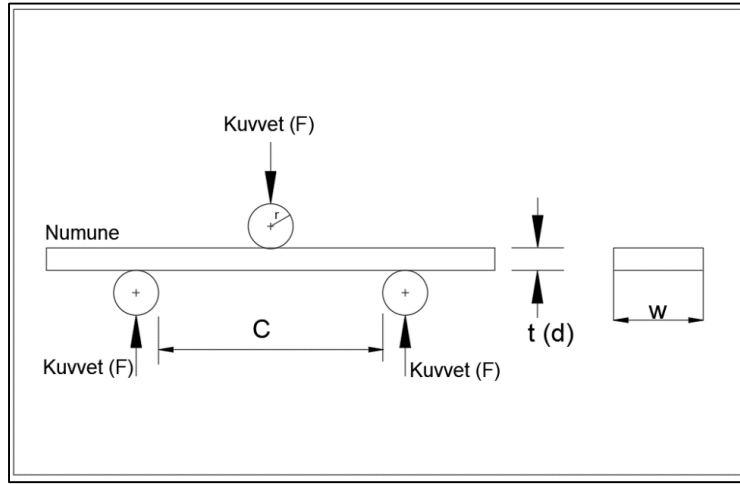
r= destek yarıçapı (mm)

t = numune kalınlığı (mm)

w= numune genişliği (mm)



Şekil 3.10. Eğme Test Cihazı



Şekil 3.11. ASTM E290 standardına uygun eğilme testi düzeneği

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde deney parametrelerinin kaplama yapısına ve mikro yapıya olan etkileri incelenerek eksenel kuvvet, kaplama bölgesi sıcaklığı, mikro sertlik, aşınma miktarı ve eğme deneyi sonuçları verilmiştir.

4.1. Deney Parametrelerinin Kaplama Yapısına Etkisi

Sürtünmeli kaplama işlemi, hem sıcak deformasyon hem de kaynak prensiplerinin kombinasyonu olan bir işlemdir. Bu işlem, difüzyon ile birleştirilmesi çok zor hatta imkânsız olan farklı malzemelerin bir araya getirilmesini, düşük ısı girişi nedeniyle ısıdan az etkilenmiş bölgenin oluşmasını ve kaynaklı bağlantılarda görülen distorsiyon, çatlak, aşırı erime ve kalıntı gerilmeler gibi problemlerin oluşmamasını sağlar. Kaplama işlemi esnasında, milin dönmesinden dolayı elde edilen mekanik enerjinin bir kısmı ısı (parlama) enerjisine, bir kısmı ise eksenel kuvvet vasıtasıyla altlık ve kaplama arasındaki bağlanmanın sağlanması amacıyla ısı enerjine harcanır. Kaplama esnasında dönen milin ucunda meydana gelen ısı enerjisi ne kadar fazla ise altlığa transfer edilen enerji de o kadar azdır [59, 60]. Altlığa transfer edilen ısı enerjisi ile viskoplastisite katı hal bölgesi oluşturularak yeni metalürjik yapıya ve düşük iç gerilmelere sahip kaplama elde edilir [80]. Deformasyon esnasında, sürtünmenin artmasıyla elde edilen ısı enerjiden dolayı dönen milin temas eden iç kısmı ile ara yüzeylerde malzeme akışı meydana gelir.

Kaplama yapısı ve kalitesini belirleyen en önemli faktör altlığa birim zamanda transfer edilen enerji miktarıdır. Altlığa transfer edilen enerji miktarı kaplama milinin devir sayısı, kaplama milinin düşey ilerlemesi ve altlık malzemenin yatay ilerlemesi ile değişir [30]. Daha iyi kaplama yapısının elde edilmesi parametrelerin uygun seçilmesi ile sağlanır. Bu nedenle işlem parametreleri literatür ışığında ve bir takım ön deneyler sonucunda belirlenmiştir [26, 28, 29]. İşlem parametrelerin doğruluğu ve uygunluğu kontrol edilirken kaplama görüntülerinin de göz önüne alındığı deneysel çalışma sürecinde, kaplamaların sürekliliği ve üniformluğu, yapışma özelliği, başlangıç ve bitiş geometrisi gibi özellikler deneysel çalışmalarla kontrol edilerek belirlenmiştir. Optimum devir sayısının belirlenmesinde Tablo 3.5’de verilen üç farklı deney parametreleri kullanılmış ve gradyanlı kaplamalar için en iyi kaplama geometrisinin 1000 d/dak’da elde edildiği görülmüştür (Şekil 4.1a). Yüksek devir sayılarının kullanılmasının altlık malzeme üzerindeki birikmeye önemli bir faydasının olmadığı, kaplama milinin flanş bölgesinde büyümeye sebep olduğu belirlenmiştir [21]. Devir sayısının artması kaplama mili ile altlık malzeme arasında birim zamandaki sürtünme miktarını artırarak sıcaklığı yükseltir. Yüksek sıcaklık kaplama mili ile altlık malzeme ara yüzeyi viskoplastik hale geldiğinden sürtünme katsayısı azalır ve sıcaklık daha fazla artmaz [81].

Yatay ilerlemenin belirlenmesinde ise en iyi kaplama yapısının elde edildiği 1000 d/dak değeri kullanılarak deneyler yapılmış ve optimum yatay ilerleme değerinin 120 mm/dak olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.1c). Bununla birlikte düşük devir sayıları ($n=800$ d/dak) ve yüksek yatay ilerleme ($V_f=140$ mm/dak) değerleri ile yapılan kaplamalarda kaplama mili yeterli sıcaklığa ulaşmadığından iyi bir yapışmanın oluşmadığı, kaplama ile altlık malzeme arasında bölgesel boşlukların meydana geldiği de görülmüştür (Şekil 4.2a). Kaplama başlangıcında bekleme (ısınma) süresinin yetersiz olması altlık malzeme üzerine kaplama malzemesinin difüzyonunu engellediğinden sürekli olmayan tam yapışmamış bir yapı ortaya çıkar (Şekil 4.2b). Yüksek devir sayısı ($n=1200$ d/dak) ve düşük yatay ilerleme ($V_f=100$ mm/dak) değerlerinin kullanılması halinde ise kaplama mili aşırı yumuşadığından altlık malzeme yüzeyinin ilk bölgesinde oldukça kalın bir kaplama tabası meydana gelerek aşırı yükselmesinden dolayı süreklilik kaybolmuştur (Şekil 4.2c). Yatay ilerlemenin aşırı artması kaplama malzemesinin altlık malzemeye difüze olması için yeterli süreyi tanınamakta [81] ve kaplama yapısında düzensizliklere sebep olmaktadır (Şekil 4.2c). Bu nedenle en iyi ikili kombinasyonun 1000 d/dak devir sayısı ve 120 mm/dak yatay ilerleme değerlerinde olduğu tespit edilmiştir.

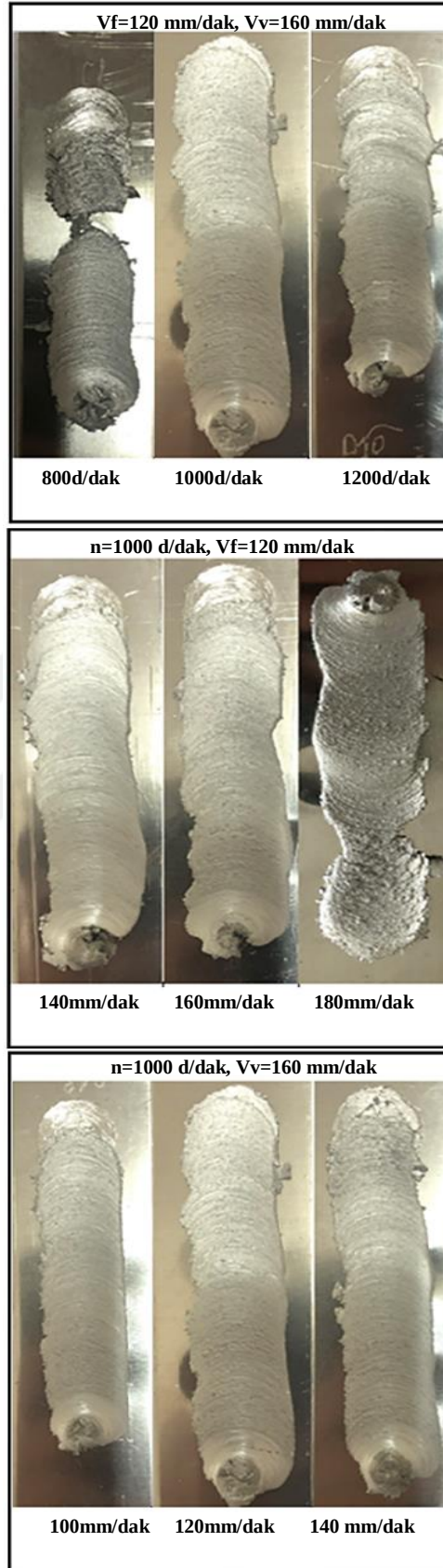
Düşey ilerlemenin kaplama yapısı üzerindeki etkisi incelendiğinde ise en iyi kaplama yapısının 160 mm/dak değerinde elde edildiği görülmüştür (Şekil 4.1b). Düşük düşey ilerleme ($V_v=140$ mm/dak) değerinde eksenel ilerleme kuvveti azaldığından sürtünme enerjisi azalmış [82] ve altlık malzeme ile kaplama arasında kısmi yapışmayan bölgeler meydana gelmiştir (Şekil 4.3). Ayrıca yüksek devir sayısı ($n=1200$ d/dak) ve yüksek düşey ilerleme ($V_v=180$ mm/dak) değerleri ile yapılan kaplamalarda hem aşırı yumuşayan kaplama mili eğilmiş hem de kaplama milinin yumuşayan flanş bölgesi kendinden ayırarak altlık malzemenin yüzeyinde bölgesel olarak birikmiştir (Şekil 4.2b).

Kaplama işlemi yapılırken, tam olarak altlığa yapışmış bölgenin elde edilmesi veya kaplamanın verimli bir şekilde yapılması, dönen milin altlığa uyguladığı eksenel kuvvet yani düşey ilerleme tarafından karakterize edilir [61]. Kaplama işlemi esnasında, belirli devir ve ilerlemeye sahip mil, dönme hareketinden dolayı mekanik enerji üretir. Devir sayısı ve düşey ilerleme oranı değiştirilmediği takdirde, üretilen mekanik enerji değişmez. Eksenel kuvvet nedeniyle üretilen mekanik enerji kaplama milinin sıcaklığını yükseltir. Sıcaklığın artmasıyla, viskoplastik hale gelen mil ile altlık malzeme arasındaki kayma gerilmesi ve sürtünme katsayısı düşer [82]. Bu durum temas bölgesi sıcaklığının daha fazla yükselmesini engeller. Bu nedenle çok yüksek düşey ve yatay ilerlemelerde kaplama yapısında önemli bir değişikliğin oluşmadığı görülmüştür (Şekil 4.1). Galvis vd. [83] yaptıkları çalışmada kaplama milinin düşey yöndeki hız artışının, sisteme etki eden basıncın yükselmesine neden olduğunu ve bunun sonucu olarak daha ince kaplamaların elde edildiği ifade edilmiştir. Kaplamanın yüzeyindeki malzeme akışı kaplamanın başlangıç sürecinde milin dönme hareketinden etkilenir. Altlığa etki eden eksenel kuvvet kaplamanın altlığa

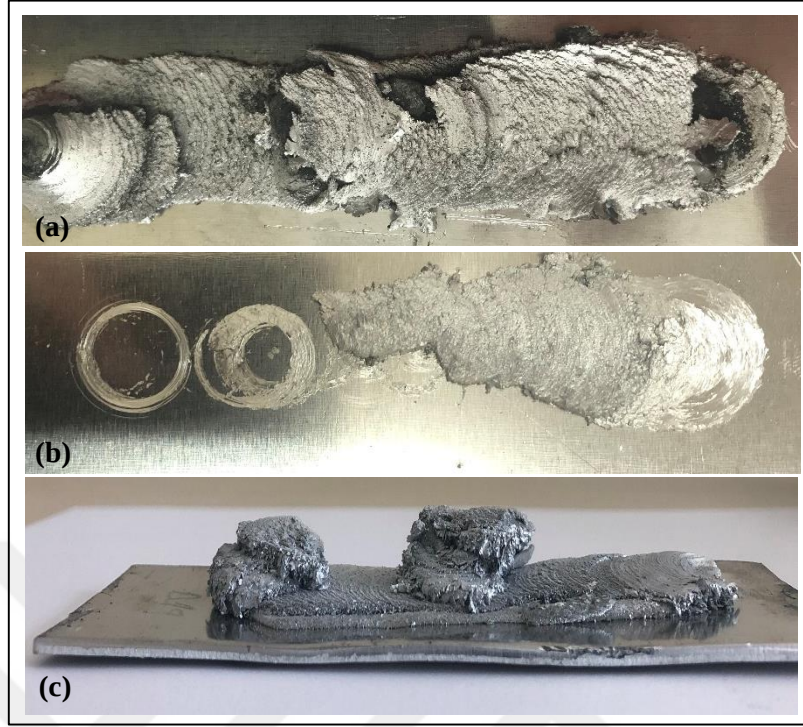
yapışmasına yardımcı olur ve altlığın yatay hareketinden de etkilenir [63]. Milin dönmesinden ve düşey ilerlemesinden dolayı altlığa etki eden eksenel kuvvetin artması daha homojen bir kaplama yapısının elde edilmesini sağlar [61]. Eksenel kuvvetin artması, kaplama ara yüzeyinin genişliğini artırarak daha geniş bir kaplama oluşturur. Düşük eksenel kuvvetler ise zayıf bir ara yüzey ve yapışmamış bir kaplamanın oluşmasına neden olur. İdeal sürtünmeli kaplama ince bir kalınlığa ve kaplama yapısında kopmaların ve ayrılmaların olmadığı mukavemetli bir yapılmaya sahip olmalıdır [60].

Toz takviyeli kaplama milleri yapılan ön deneylerden elde edilen makro görüntülere göre 1000 d/dak devir sayısı, 120 mm/dak yatay ilerleme ve 160 mm/dak düşey ilerleme değerlerinde daha iyi sonuçların elde edildiği görülmüştür. Bu nedenle gradyanlı kaplamalarda ön deneylerde elde edilen bu parametreler kullanılarak kaplamalar yapılmış ve Al + B₄C ve Al + TiC toz takviye oranlarının kaplama yapısına, mikro sertlik, mikro yapıya ve yapışma mukavemetine etkisi incelenmiştir (Tablo 3.1).

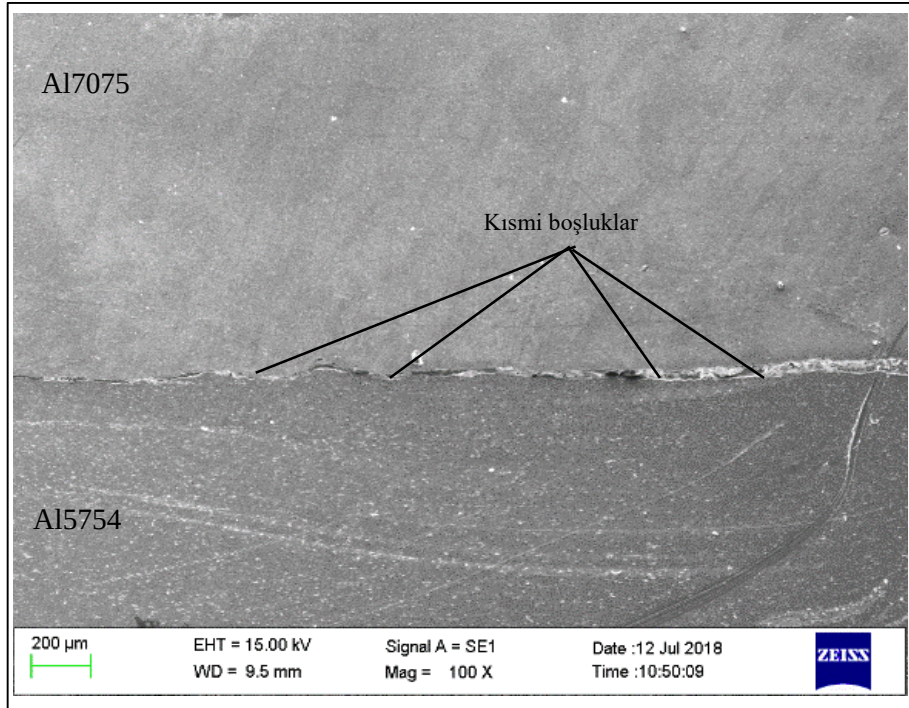
Toz takviyesiz (Şekil 4.4a) ve %10-30-60 toz takviyeli kaplamaların makro görüntüleri incelendiğinde (Şekil 4.4b) homojen bir yapı elde edilmesine rağmen B₄C ilaveli toz serme metodu ile yapılan kaplamalarda (Şekil 4.4c) kaplama tozunu yapı içerisinde homojen dağılmadığı belirlenmiştir. Kaplama işleminin başlangıcında kaplama mili yeterli sıcaklığa ulaşmadan altlık üzerindeki tozu ilk önce süpürmekte daha sonra geride kalan tozu bölgesel olarak yüzeye sıvamaktadır. Bu nedenle kaplama hattı boyunca dalga şeklinde birbirini peş peşe takip eden Al alaşımı ve B₄C toz kaplama hattı elde edilmiştir (Şekil 4.4c). Ortaya çıkan bu olumsuzluk dikkate alındığından TiC ilaveli toz serme metodu ile kaplama yapılmamıştır. Şekil 4.4'te toz ilavesiz, gradyanlı ve toz serme yöntemi ile yapılan kaplamaların makro görüntüleri verilmiştir.



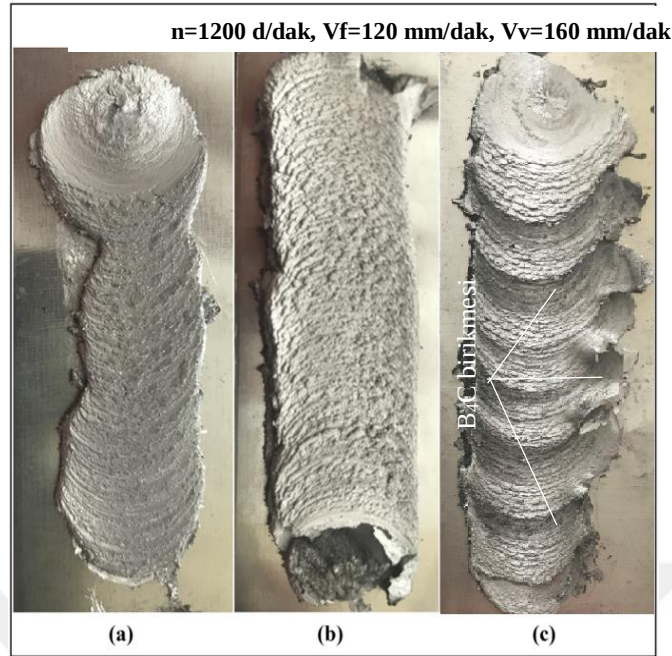
Şekil 4.1. %10 B₄C ilaveli kaplamaların makro görüntüsü a) Devir sayısı, b) Yatay ilerleme, c) Düşey ilerleme



Şekil 4.2. Ön deneyler esnasında yapılan başarısız deneylerden bir kısmı (a: $n=800$ d/dak ve $V_f=140$ mm/dak, b: $n=1000$ d/dak $V_f=120$ mm/dak ve düşük ilk bekleme süresi, c: $n=1200$ d/dak ve $V_f=100$ mm/dak)



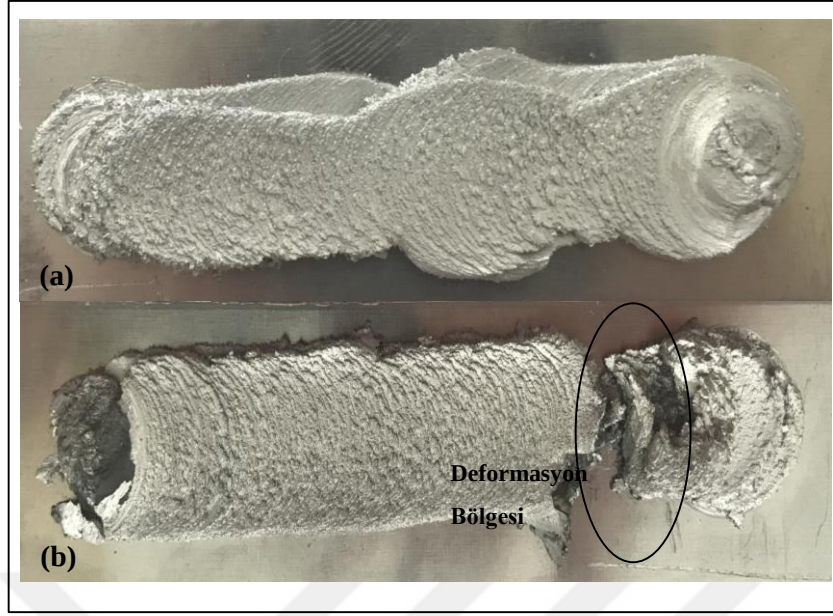
Şekil 4.3. Düşük düşey ilerleme ($n=1000$ d/dak, $V_v=140$ mm/dak) hızında yapılan kaplamanın ara yüzeyinde görülen kısmi boşluklar



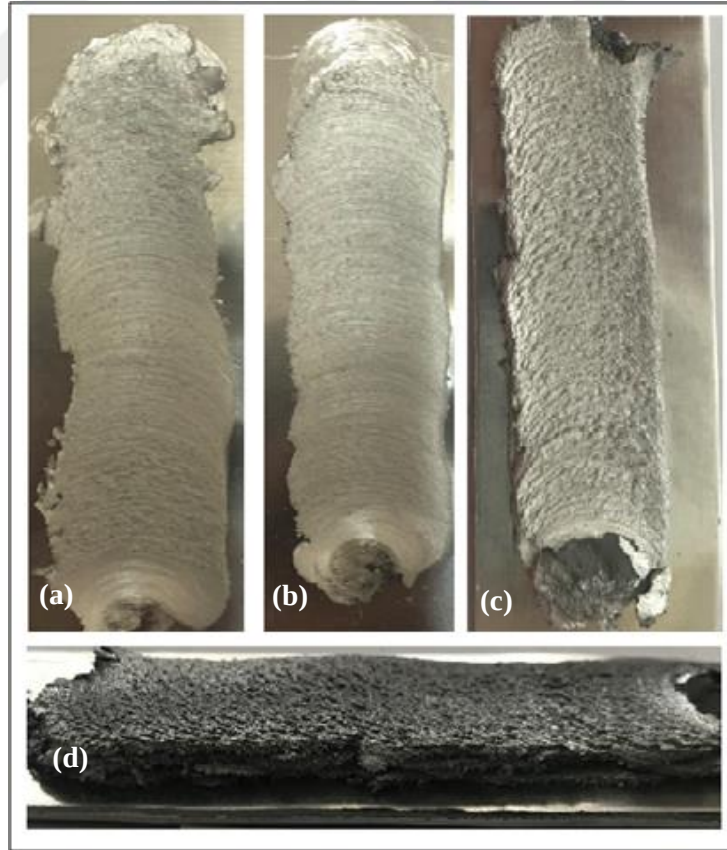
Şekil 4.4. Takviyeli ve takviyesiz olarak yapılan kaplamaların makro görüntüleri (1200 d/dak, Vf=160 mm/dak, Vv=100 mm/dak) a) Toz takviyesiz b) %10-30-60 B₄C takviyeli gradyanlı kaplama c) Toz serme yöntemi ile kaplama

Şekil 4.5a'daki gradyanlı kaplama incelendiğinde kaplamanın sürekli rejimde devam ederek altlık malzeme yüzeyini tamamen kapladığını, Şekil 4.5b'deki kaplamada ise sona doğru yaklaşıldığında kaplama bölgesinde bir miktar deformasyonun olduğu görülmektedir. Bunun nedeni bir önceki kaplamadan kaynaklanan sürekli yapışmaya engel olan pürüzlü yüzeyden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kaplamanın başlangıcı ve bitişinde görülen kısmi kopmalar ise, milin kaplamadan ayrılması esnasında kaplamanın kırılmaya zorlanmasından kaynaklanmaktadır [84]. Gradyanlı kaplama yapılan numunelerde bu tür deformasyonların görülmesi yöntem ile alakalı olup olağan bir durumdur. Literatürde yapılan çalışmalarda bu şekildeki gibi, deformasyonlardan bahsedilmiştir [24, 85].

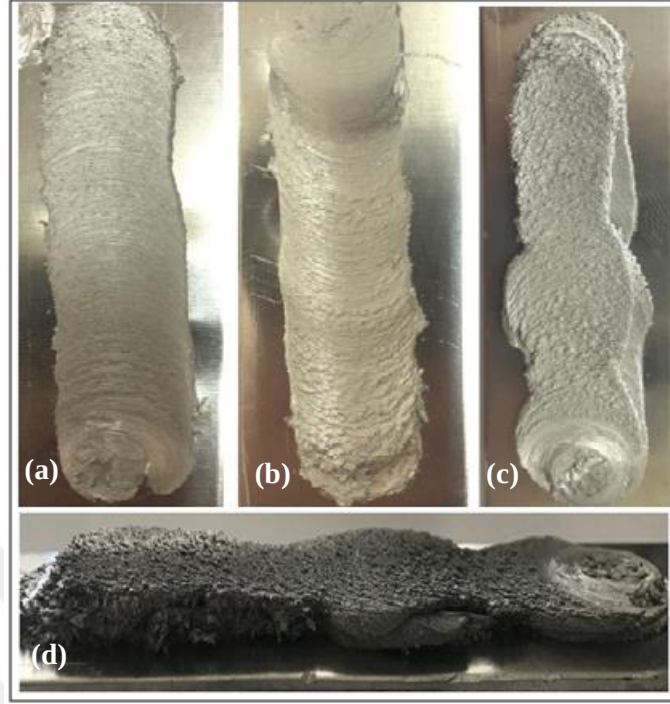
Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de B₄C ve TiC toz takviyeli gradyanlı kaplamaların birinci, ikinci ve üçüncü katmanlarının makro görüntüleri verilmiştir. Verilen görüntülerde üniform bir kaplama yapısının elde edildiği, buna karşılık bütün kaplamalarda iç içe geçmiş dalgali bir görüntünün olduğu belirlenmiştir. Oluşan dalgali görüntü plastik deformasyon sıcaklığına ulaşan kaplama milinin dönmesi ve altlık malzemenin ilerlemesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle farklı devir sayıları ile yapılan gradyanlı kaplamaların tüm makro görüntülerinde dalgaya benzer oluşumları görmek mümkündür (Şekil 4.5a). Ayrıca Şekil 4.5'te görüldüğü gibi kaplamaların bitiş noktalarında milin altlık malzemeden uzaklaşması sırasında kaplamadan yer yer ayrılımlar oluşmuştur.



Şekil 4.5. (a) Sürekli ve (b) sürekli olmayan gradyanlı kaplama numunelerinin makro görüntüleri (n=1000 d/dak, Takviye oranı= %10)



Şekil 4.6. %10-20-30 B₄C takviyeli kaplamanın a)1.katmanının b) 2.katmanının c) 3.katmanının d) Gradyanlı 3 katlı kaplamanın makro görüntüsü (n=1000 d/dak, Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)



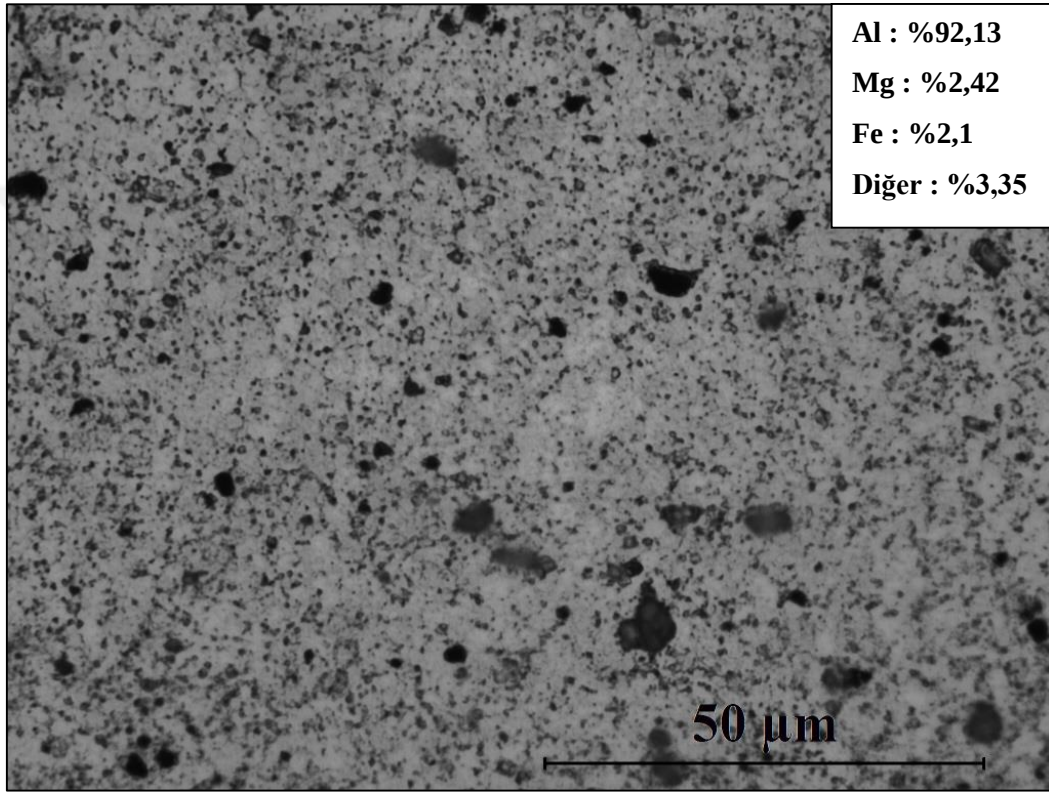
Şekil 4.7. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın a) 1.katmanının b) 2.katmanının c) 3.katmanının d) Gradyanlı 3 katlı kaplamanın makro görüntüsü ($n=1000$ d/dak, $V_f=120$ mm/dak, $V_v=160$ mm/dak)

4.2. Mikro Yapı İncelemeleri

Şekil 4.8’de altlık malzemesinin optik mikroskop görüntüsü, Şekil 4.9’da kaplamanın tane yapısını gösteren SEM görüntüsü, Şekil 4.10’dan Şekil 4.15’e kadar olan şekiller tek katlı kaplamaların ara yüzey ve kaplama bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri göstermektedir.

Tek katlı ve toz ilavesiz yapılan sürtünmeli kaplama görüntülerinde devir sayısının mikro yapı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Mikro yapı incelemelerinde tek katlı ve toz ilavesiz kaplamaların optik mikroskop görüntülerine göre en iyi kaplama yapısının 1200 d/dak değerinde elde edildiği belirlenmiştir. 800 d/dak ile yapılan kaplama numunelere ait optik mikroskop görüntüsünde kaplamanın altlık malzemesini tam olarak sıvamadığı, kaplama ile altlık ara yüzeyinde boşlukların oluştuğu ve üniform olmayan bir yapının elde edildiği belirlenmiştir (Şekil 4.10). Bu nedenle üretim esnasında kullanılan 800 dev/dak değerinin ara yüzey yapışması için uygun olmadığı ve düşük olduğu kanaatine varılmıştır. Takviyesiz kaplamalarda devir sayısı 1000 d/dak’ya artırıldığında kaplamanın altlık malzemesine kısmen yapıştığı bununla birlikte ara yüzeyde bir miktar mikro boşluğun oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.11). Devir sayısı 1200 d/dak değerine yükseltildiğinde makro görüntülere paralel olarak iyi bir birleşmenin meydana geldiği, hemen hemen hiç mikro boşluğun oluşmadığı tespit edilmiştir (Şekil 4.12). Devir sayısının 1500

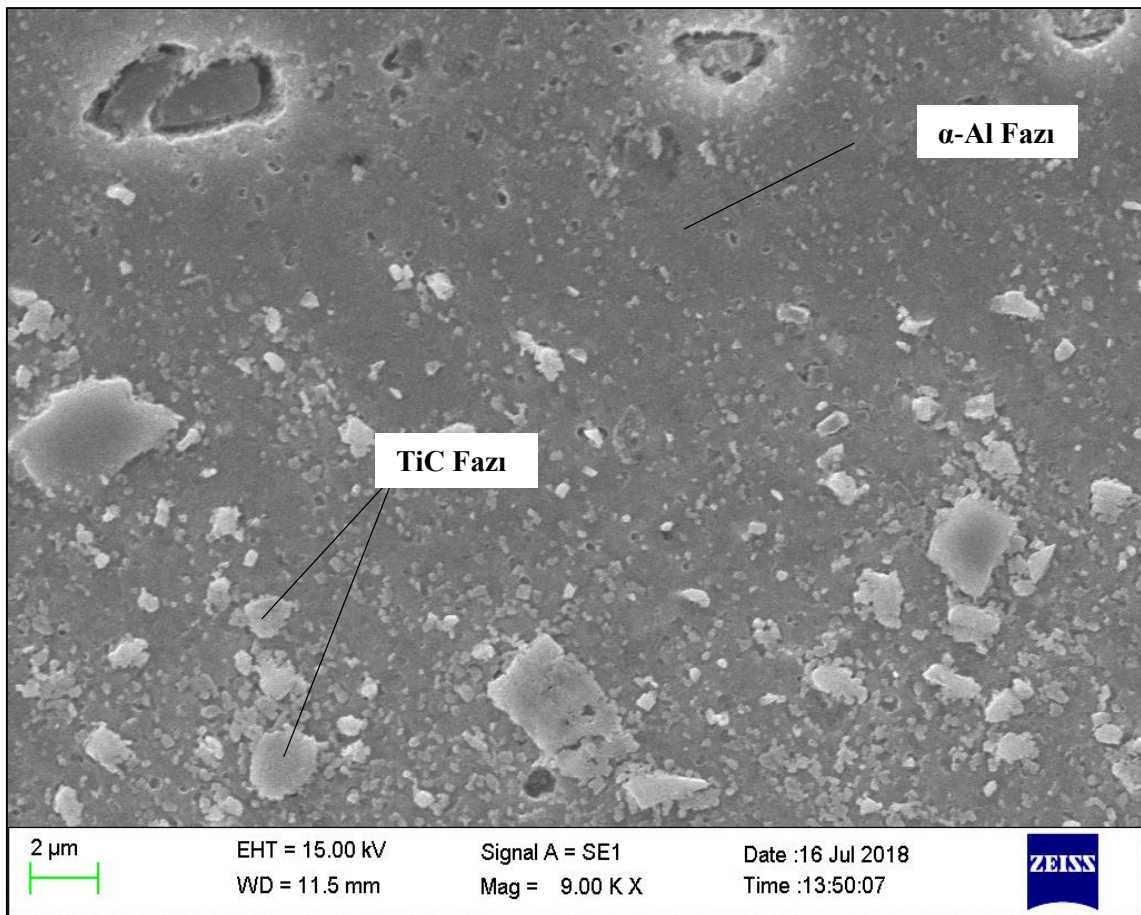
d/dak'ya yükseltilmesi halinde ise kaplama ara yüzey yapışmasının iyi olmadığı ve ara yüzeyde daha fazla mikro boşlukların oluştuğu belirlenmiştir (Şekil 4.13). Fitseva vd. (2016) yaptıkları çalışmada belirli bir dönme hızının altında kalan veya bu limiti aşan işlemlerde iyi bir kaplama kalitesinin elde edilemediğini belirtmişlerdir [86]. Optik mikroskop görüntüleri ve literatür çalışmaları, kaplama üretimi esnasında deney şartlarına bağlı olarak optimum bir devir sayısının olduğunu göstermektedir. Optimum sayısının altında ve üzerindeki değerlerle üretim yapıldığında, istenilen karaktere sahip iyi bir kaplama yapısı elde edilememektedir.



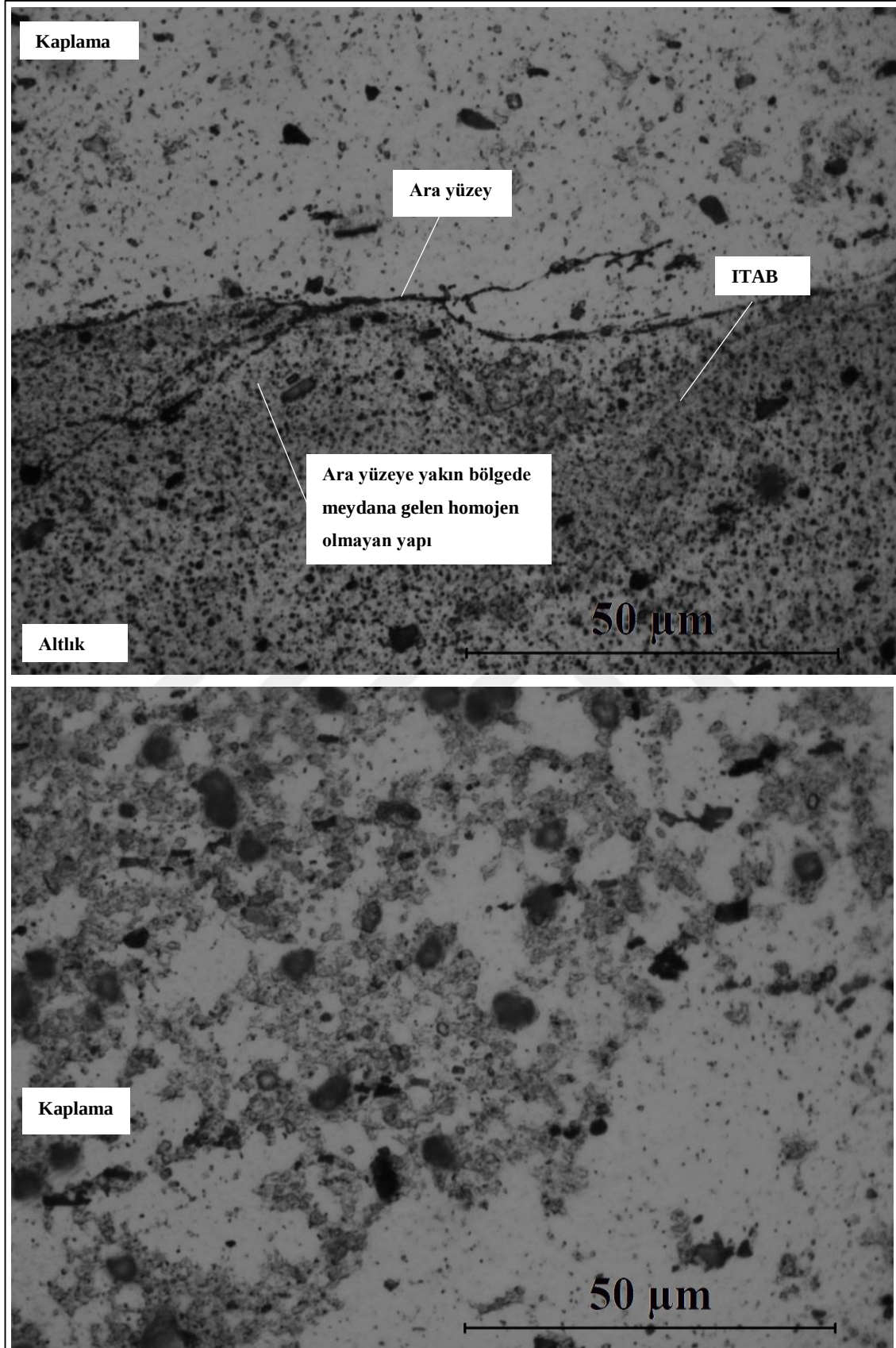
Şekil 4.8. Altlık malzemesinin optik mikroskop görüntüsü ve EDX analizi sonucu elde edilen alaşım elementleri oranları (1000x)

Kaplama işlemi esnasında oluşan sürtünme enerjisi ve plastik deformasyon sonucunda altlık üzerinde sıvanırken ısıtılma işlemi görmüş gibi davranır, yeniden kristalleşme meydana gelir ve kaplamanın mikro yapısında tane incelmeleri (DKB) gözlenir (Şekil 4.12). Katı hal bağlanma mekanizması çoğunlukla difüzyon ile kontrol edilir. Kaplama esnasında oluşan viskoplastik kaplama füzyon sıcaklığına ulaşır. Erime sıcaklığının %50- 90'a tekabül eden bu sıcaklık difüzyon yapışma işlemi için yeterlidir [65]. Yapılan deneylerde işlem esnasındaki sıcaklığın 450-550°C'ye kadar çıktığı da görülmüştür. Bu sıcaklık yeniden kristalleşme için yeterli bir sıcaklıktır [58]. Bedford vd. göre kaplama yapıldıktan sonra meydana gelen soğuma işlemi saniyeler içinde gerçekleştiğinden, soğuma için verilen süre yeniden kristalleşmiş yapının tane büyümesi için

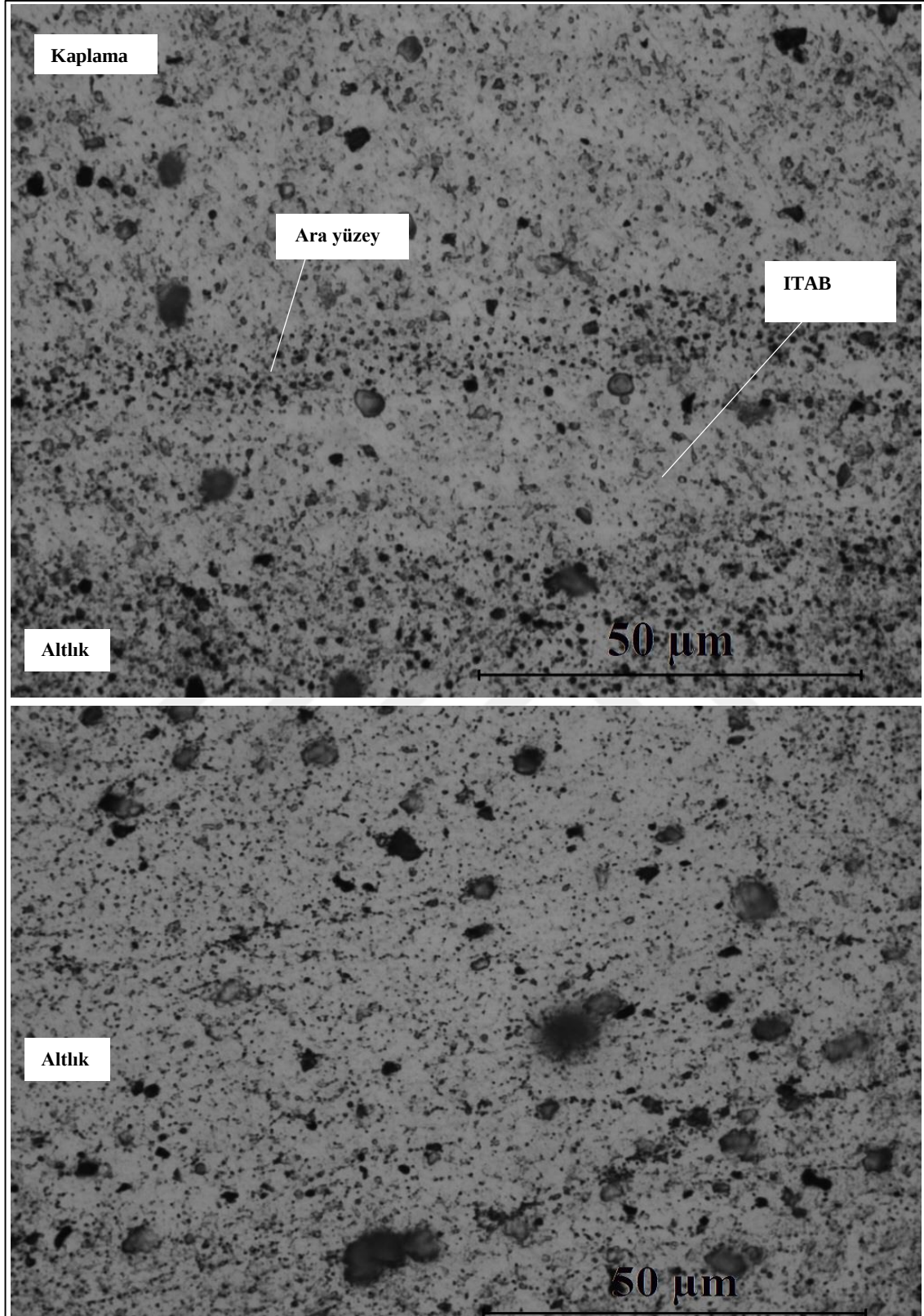
yeterli zamanı vermez, böylece ince taneli ve homojen yapıya sahip bir kaplama üretilir (Şekil 4.12) [65]. İşlem esnasında yer alan ciddi plastik deformasyon nedeniyle sarf malzemesinde bulunan deforme olmayan fazlar küçük parçalara ayrılır. Bu fazlar, plastik olarak deforme olan matris içerisinde homojen olarak dağılır. Dönen milin altlığı temas kısmında yeniden kristalleşen yapı plastik olarak deforme olarak altlığı sıvar [58]. Ara yüzeydeki bağlanma, viskoplastik akışın meydana geldiği malzeme ve derece derece deformasyonlar geçiren birçok tabakanın varlığına bağlı olarak gerçekleşir [87]. Yapıda bulunan oksit tabakaları metal-metal temasını engeller, böylece ara yüzeyde yapışmanın olmadığı boşluklar görülür. Ayrıca ara yüzeyde gözlemlenen intermetalik fazlar da ara yüzeyde boşlukların oluşmasının bir sebebidir (Şekil 4.10) [2].



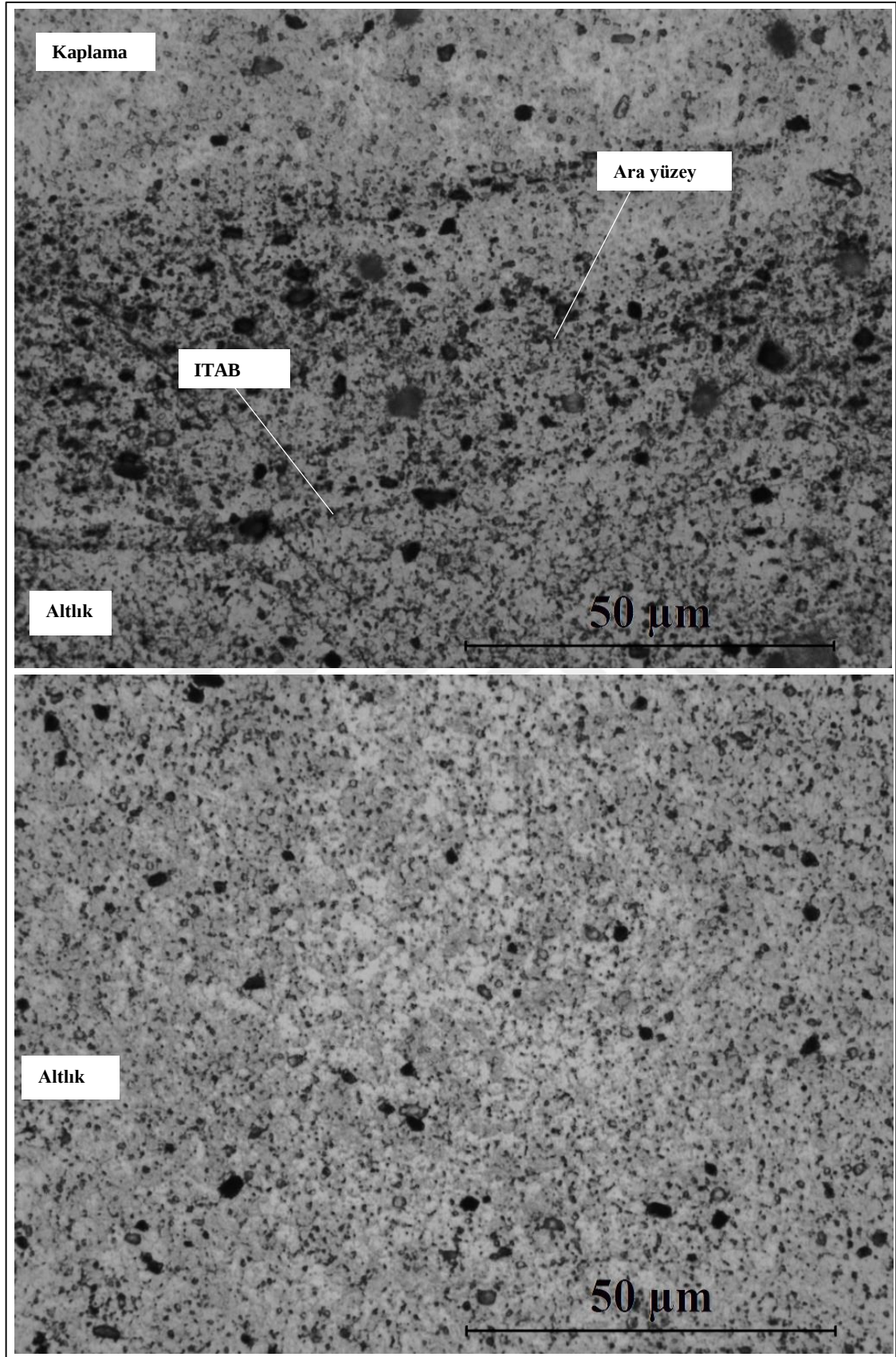
Şekil 4.9. %10-20-30 TiC takviye tozuyla kaplanmış numunenin 1.katman – 2. Katman ara yüzeyindeki tane yapısı.



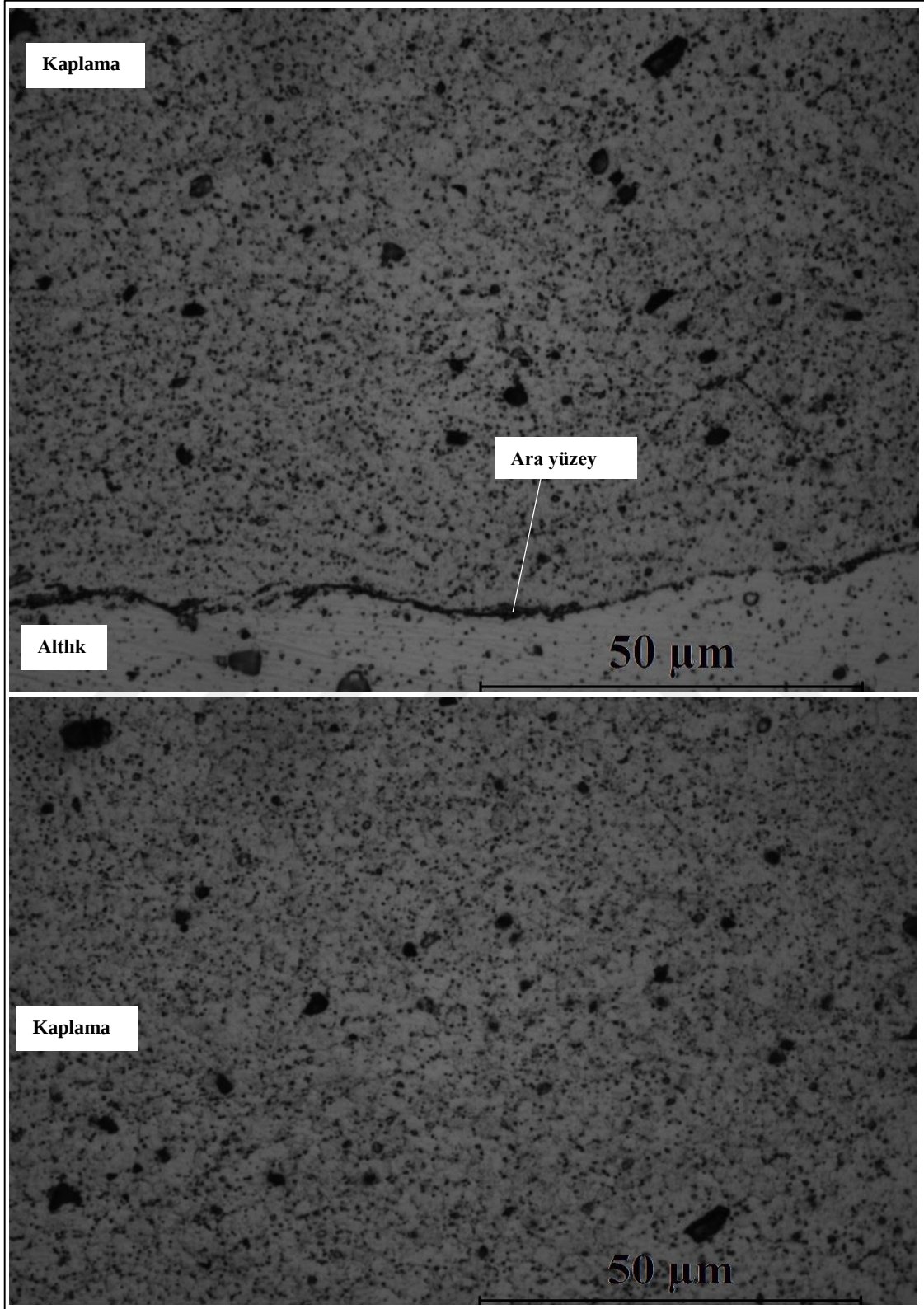
Şekil 4.10. 800 d/dak ile yapılan takviyesiz tek katlı kaplamanın optik mikroskop görüntüsü (x1000)
(Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)



Şekil 4.11. 1000 d/dak ile yapılan takviyesiz tek katlı kaplamanın optik mikroskop görüntüsü (x1000)
(Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)



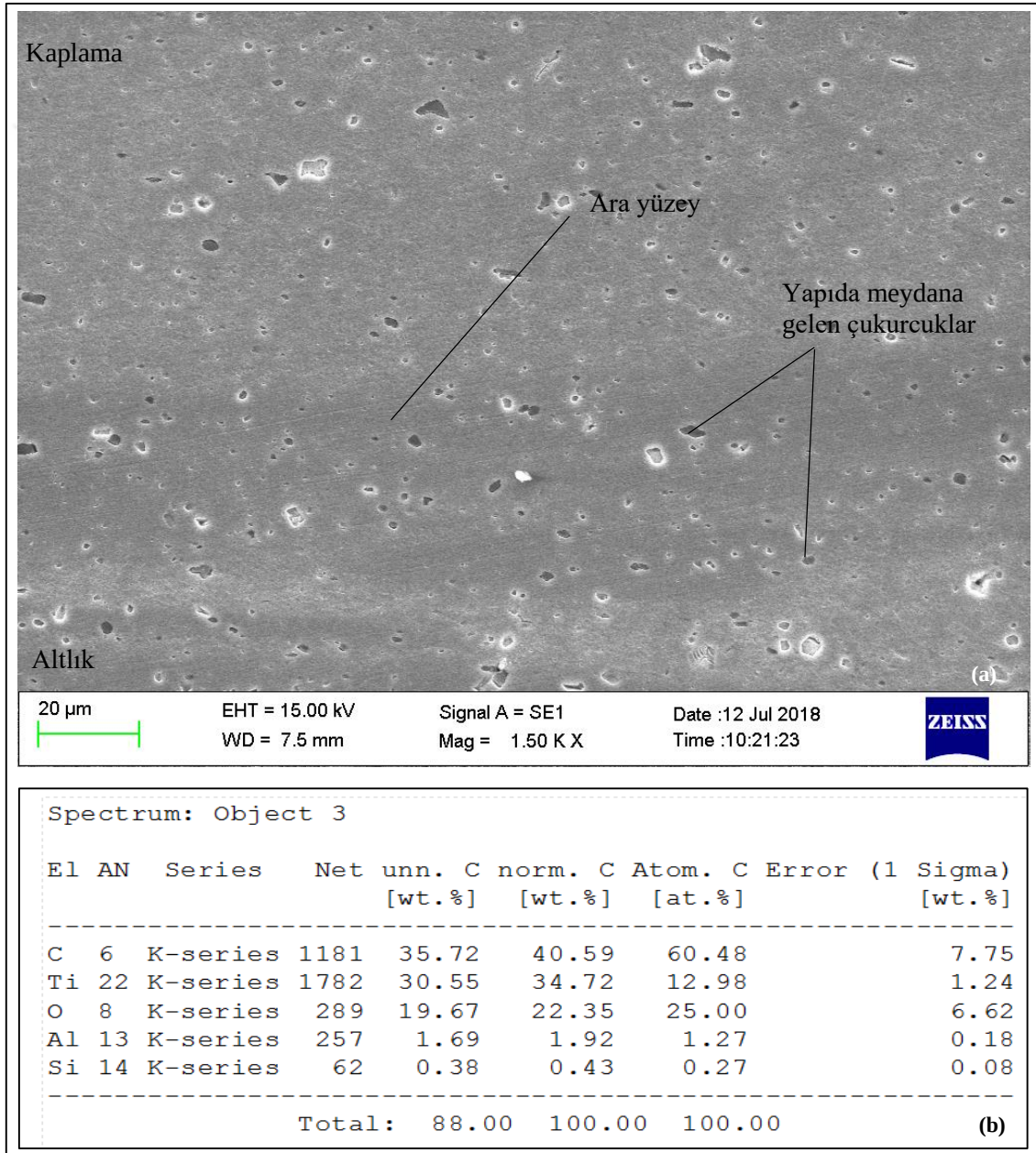
Şekil 4.12. 1200 d/dak ile yapılan takviyesiz tek katlı kaplamanın optik mikroskop görüntüsü (x1000)
(Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)



Şekil 4.13. 1500 d/dak ile yapılan tek katlı takviyesiz kaplamanın optik mikroskop görüntüsü (x1000)
(Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)

Devir sayısının artması ile üretilen mekanik enerji artar, dolayısıyla altlığa iletilen ısı artar ve bu da sürtünmenin artmasıyla ısı oluşumundan dolayı dönen milin temas eden iç kısmı ile ara yüzeylerdeki malzemenin akışının olduğu ITAB bölgesinin artmasına sebep olur [62] (Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12).

Şekil 4.14’de 1000 d/dak ile toz takviyesiz olarak kaplanan numunenin ara yüzeyinden alınan SEM görüntüsü ve EDX analizi verilmiştir. Bu kaplamanın EDX analizi sonucunda alaşım elementleriyle birlikte oksit yapının da oluştuğu görülmüştür.

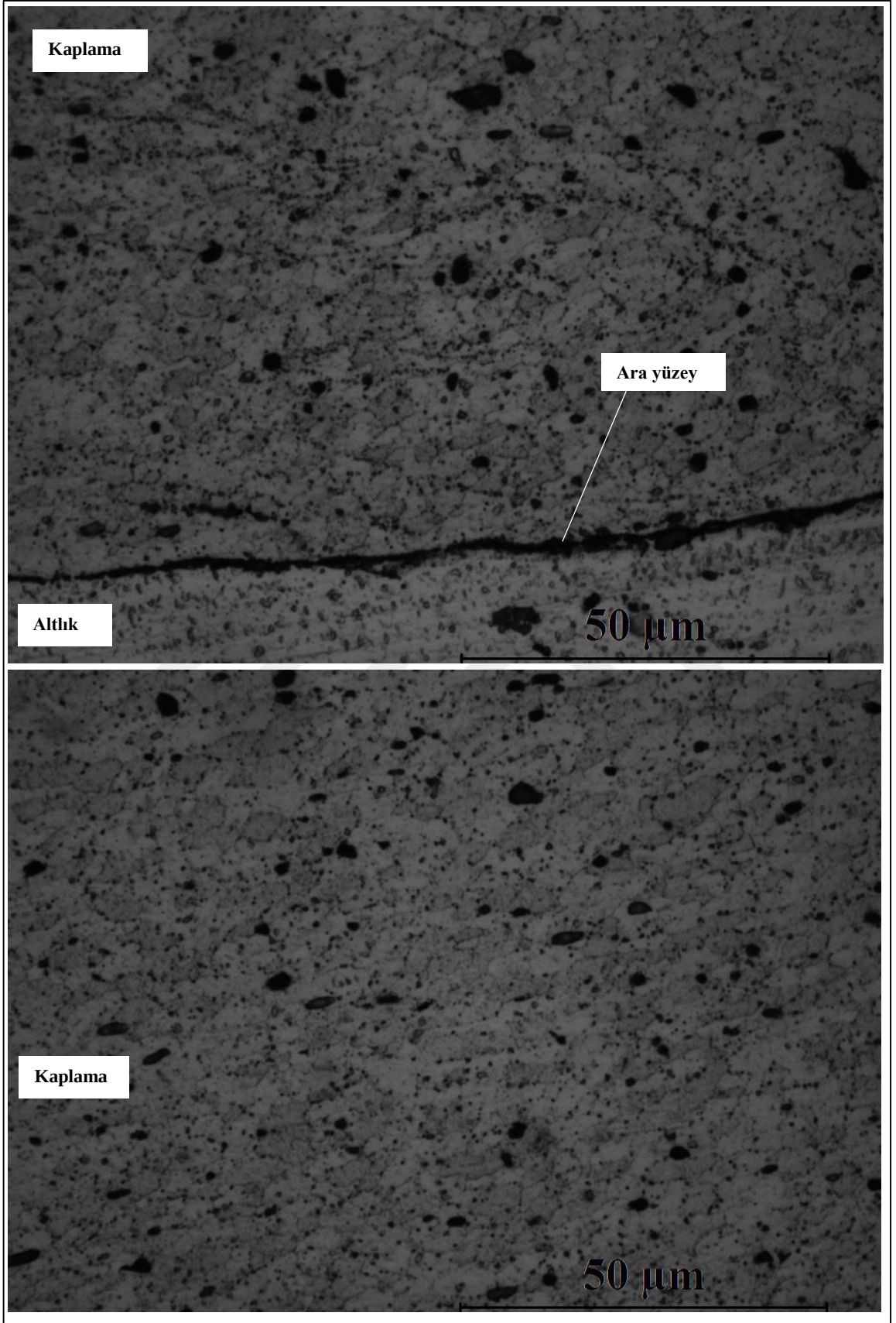


Şekil 4.14. 1000 d/dak ile toz takviyesiz yapılan kaplamanın a) SEM görüntüsü b) EDX analizi (Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)

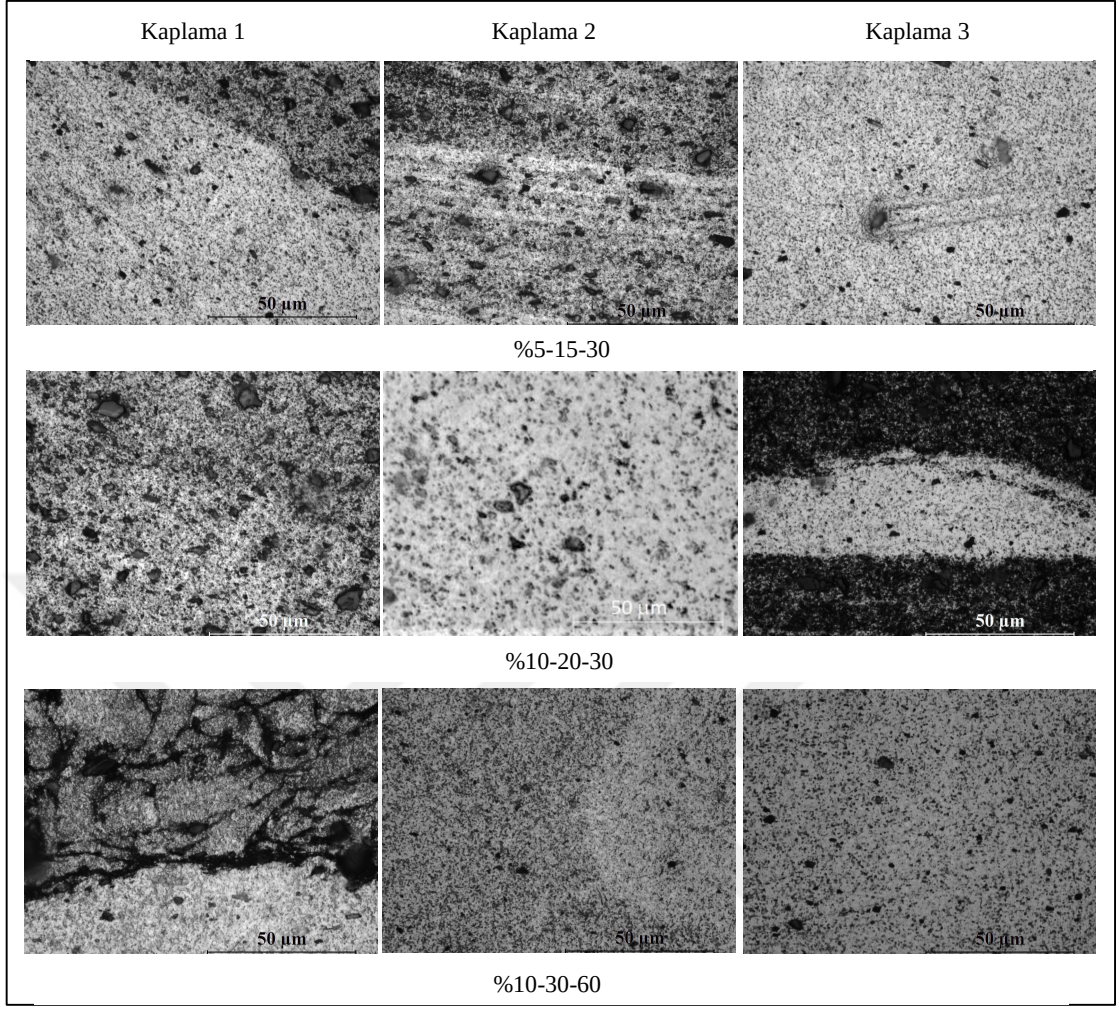
Sürtünmeli kaplama yönteminin değiştirilmesi ile birlikte üretilen kaplamanın ara yüzey yapışmasında değişiklikler görülmüştür. Toz serme yöntemi ile üretilen kaplamanın ara yüzeyinde çok daha fazla boşluk meydana geldiği görülmüştür. Şekil 4.15'te verilen toz serme yöntemi ile kaplanan numunenin mikro yapı görüntüsünde altlık malzeme yüzeyine serilen B_4C tozunun kaplama mili ile altlık malzeme arasında bir oksit tabakası gibi davrandığı ve kaplama malzemesinin altlık malzemeye difüzyonunu engelleyerek ara yüzeyde boşlukların oluşumuna sebep olduğu belirtilmiştir.

Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'de TiC ve Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te B_4C üç katlı gradyanlı kaplamaların optik mikroskop görüntüleri verilmektedir. Üç katlı gradyanlı kaplamalarla yapılan ön deneyler sonucunda toz ilavesiz kaplamada elde edilen 1200 d/dak değerinin toz ilaveli kaplamalarda (%10 B_4C) optimum bir değer olmadığı, buna karşılık 1000 d/dak değerinin en iyi devir sayısı parametresi olduğu belirlenmiştir. Bu durum dikkate alınarak kaplamaların tümünde 1000 d/dak devir sayısı $V_f=120$ mm/dak yatay ilerleme hızı ve $V_v=160$ mm/dak düşey ilerleme hızı parametreleri kullanılmıştır. Yapılan kaplamalara altlıktan başlayarak üste doğru 1. kaplama, 2. kaplama ve 3. kaplama olarak isim verilmiştir.

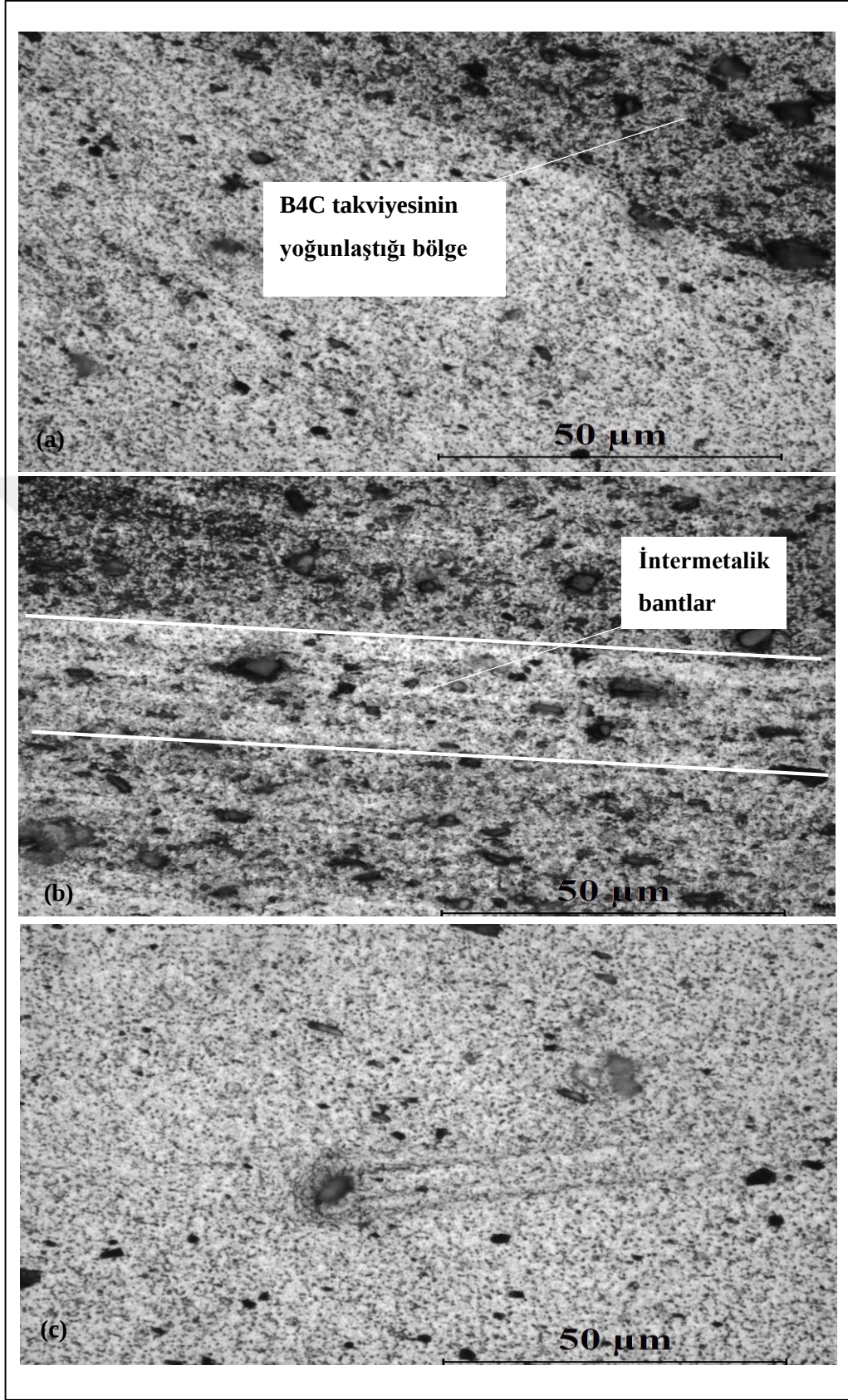
%5-15-30 B_4C takviye tozu ile yapılan kaplamaların optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde ilk katmanda homojen olmayan ve açık-koyu olarak görülen iki farklı bölge, ikinci katmanında ise tane büyümlerinin olduğu ve intermetalik bantların bulunduğu bölgeler görülmektedir (Şekil 4.16 ve Şekil 4.20a). Bu bantların, rastgele, süresiz ve kaotik bir şekilde meydana geldiği ve literatürle uyumlu olduğu belirlenmiştir [88]. İşlemin doğasından dolayı, deformasyon esnasında deforme olmayan ikincil fazlar mevcuttur [58]. Bu intermetalik bantlar, her bir yeni tabakanın sürtünmeli kaplamanın ilk aşamalarında alüminyum ile borun alaşımlanması veya karışması nedeniyle gelişir [88]. %5-15-30 B_4C en üst katmanında ise yer yer birikmeler görülmüş ve homojene yakın bir yapı elde edilmiştir. %10-20-30 B_4C takviyesi ile yapılan kaplamalar incelendiğinde birinci ve ikinci katmanlarda tane büyümlerinin olduğu görülürken en üst katmanda ise homojen olmayan ve farklı bölgelerde birikmelerin olduğu bir yapı tespit edilmiştir. %10-30-60 B_4C takviyesi ile yapılmış kaplama incelendiğinde ise birinci katmanda homojen olmayan ve B_4C takviyelerinin çizgi halinde ve tane sınırlarında biriktiği görülmüştür [89]. İkinci katmanda Karthik vd.'nin [90] de bahsettiği metalik birikmeler görülmüştür. Üçüncü katmanda ise B_4C takviye tozları katman içerisinde homojen dağılmasına rağmen bazı bölgelerde yer yer birikmelere de oluşmuştur. Özellikle birinci ve ikinci katmanlarda görülen farklı tane büyüklüklerine sahip yapıların oluşmasının nedeni üst üste gradyanlı kaplama esnasında birden çok ısı işleme maruz kalması olarak açıklanabilir.



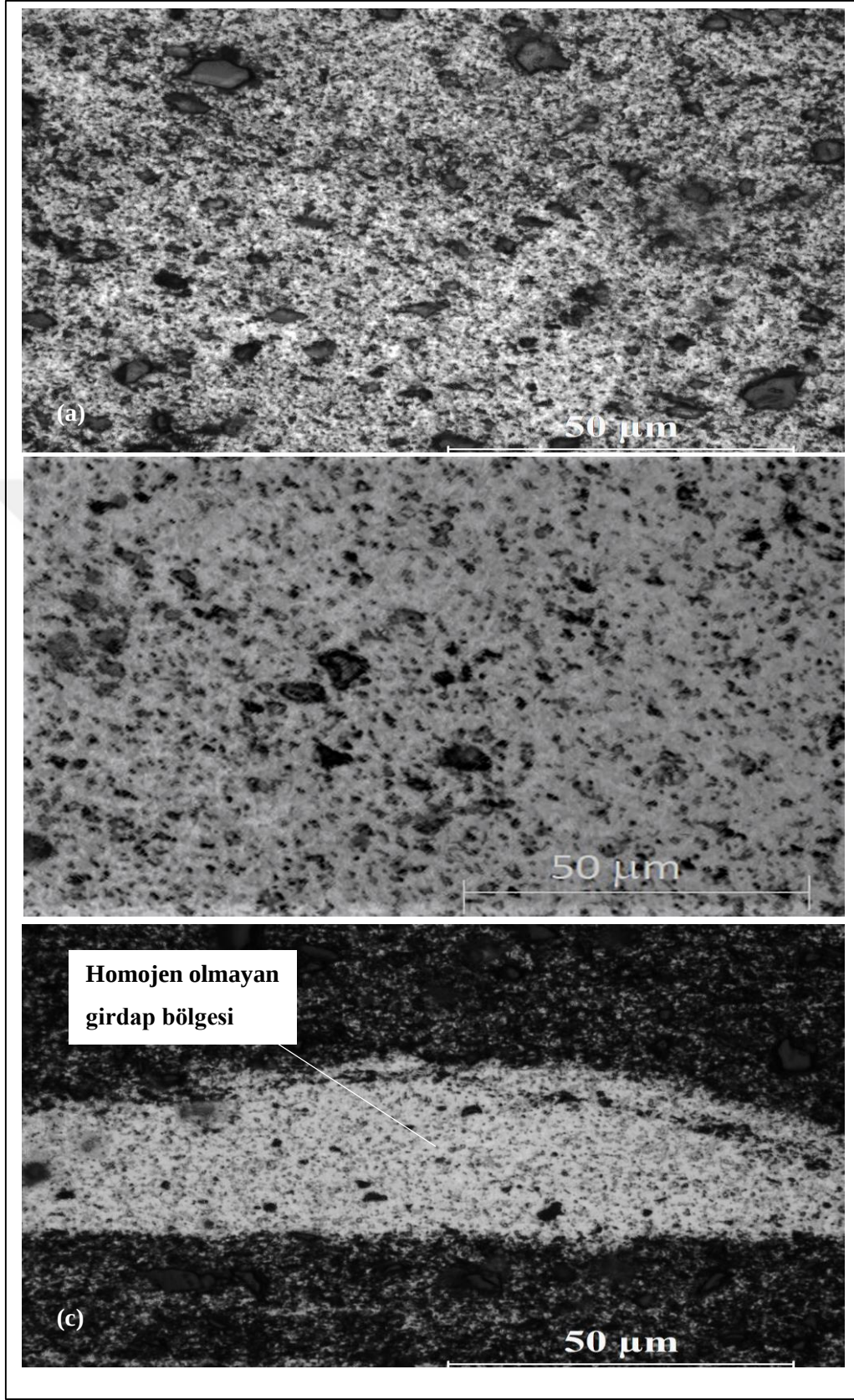
Şekil 4.15. 1200 d/dak B₄C toz serme yöntemi ile kaplanan numunenin optik mikroskop görüntüsü (x1000)
(Vf=120 mm/dak, Vv=160 mm/dak)



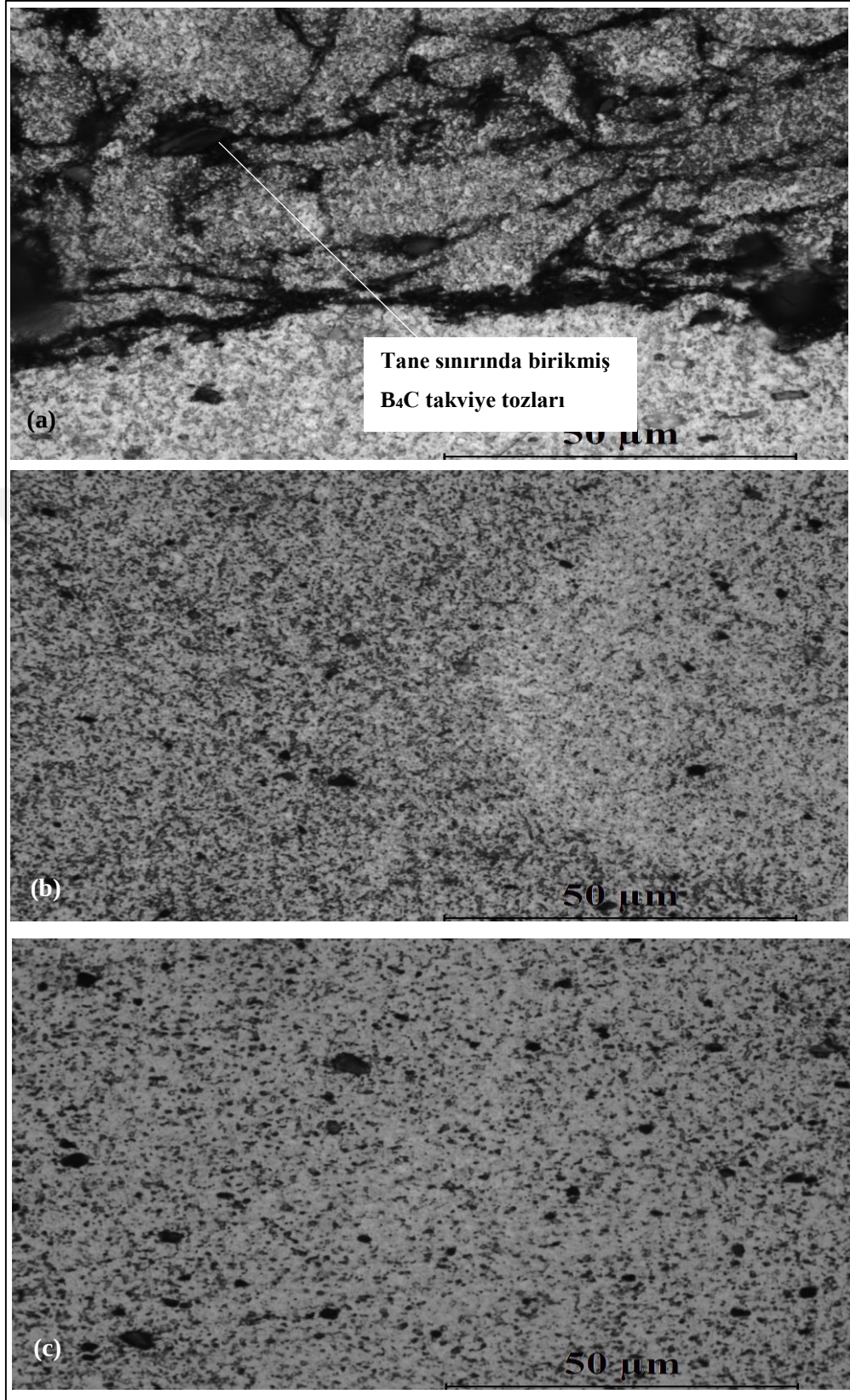
Şekil 4.16. B₄C takviyeli gradyan kaplamalı numunelerin optik mikroskop görüntüleri (x1000)



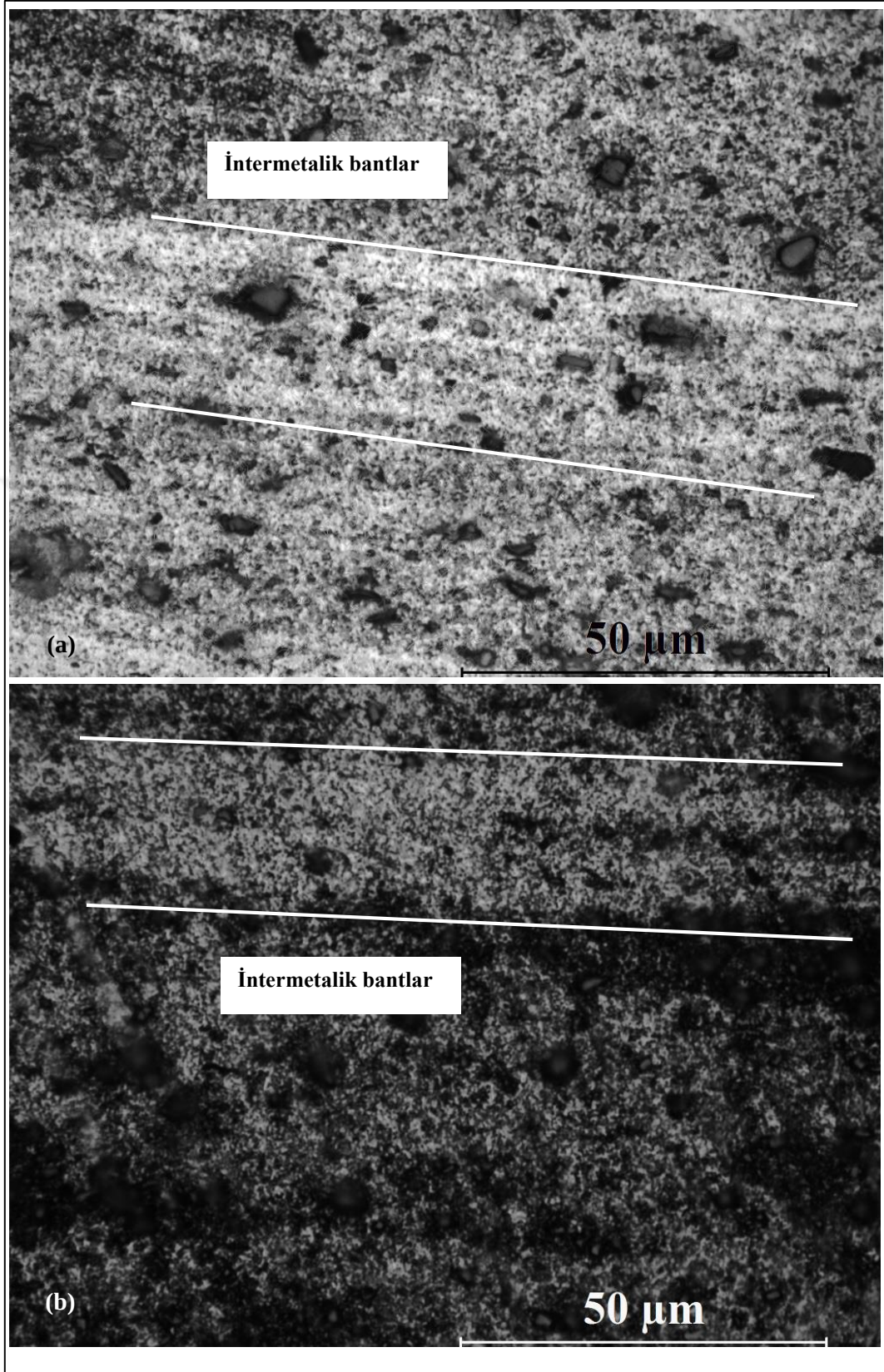
Şekil 4.17. B₄C takviyeli %5-15-30 gradyan kaplamalı numunelerin a)1.katman b)2.katman c)3.katman optik mikroskop görüntüleri (x1000)



Şekil 4.18. B₄C takviyeli %10-20-30 gradyan kaplamalı numunelerin a)1.katman b)2.katman c)3.katman optik mikroskop görüntüleri (x1000)

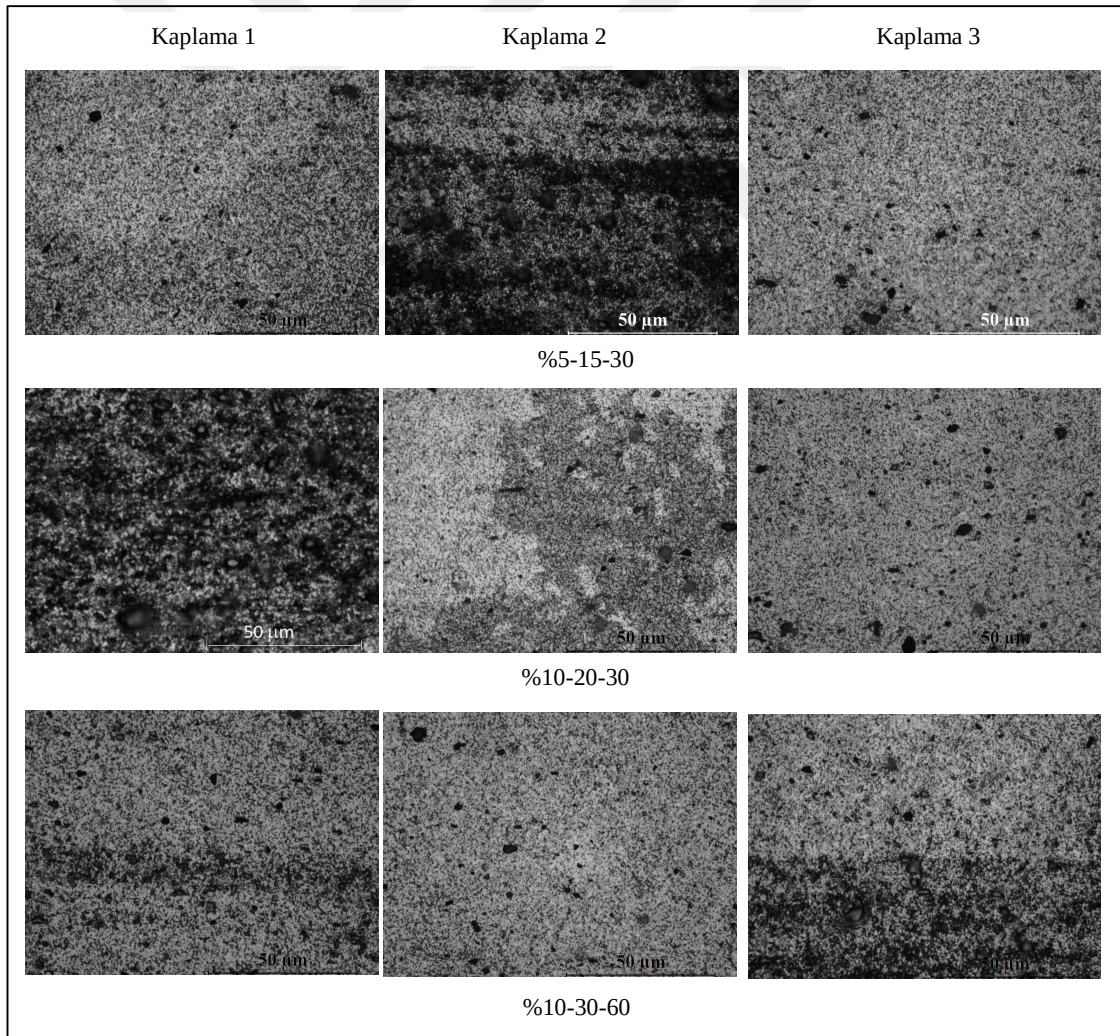


Şekil 4.19. B_4C takviyeli %10-30-60 gradyan kaplamalı numunelerin a)1.katman b)2.katman c)3.katman optik mikroskop görüntüleri (x1000)

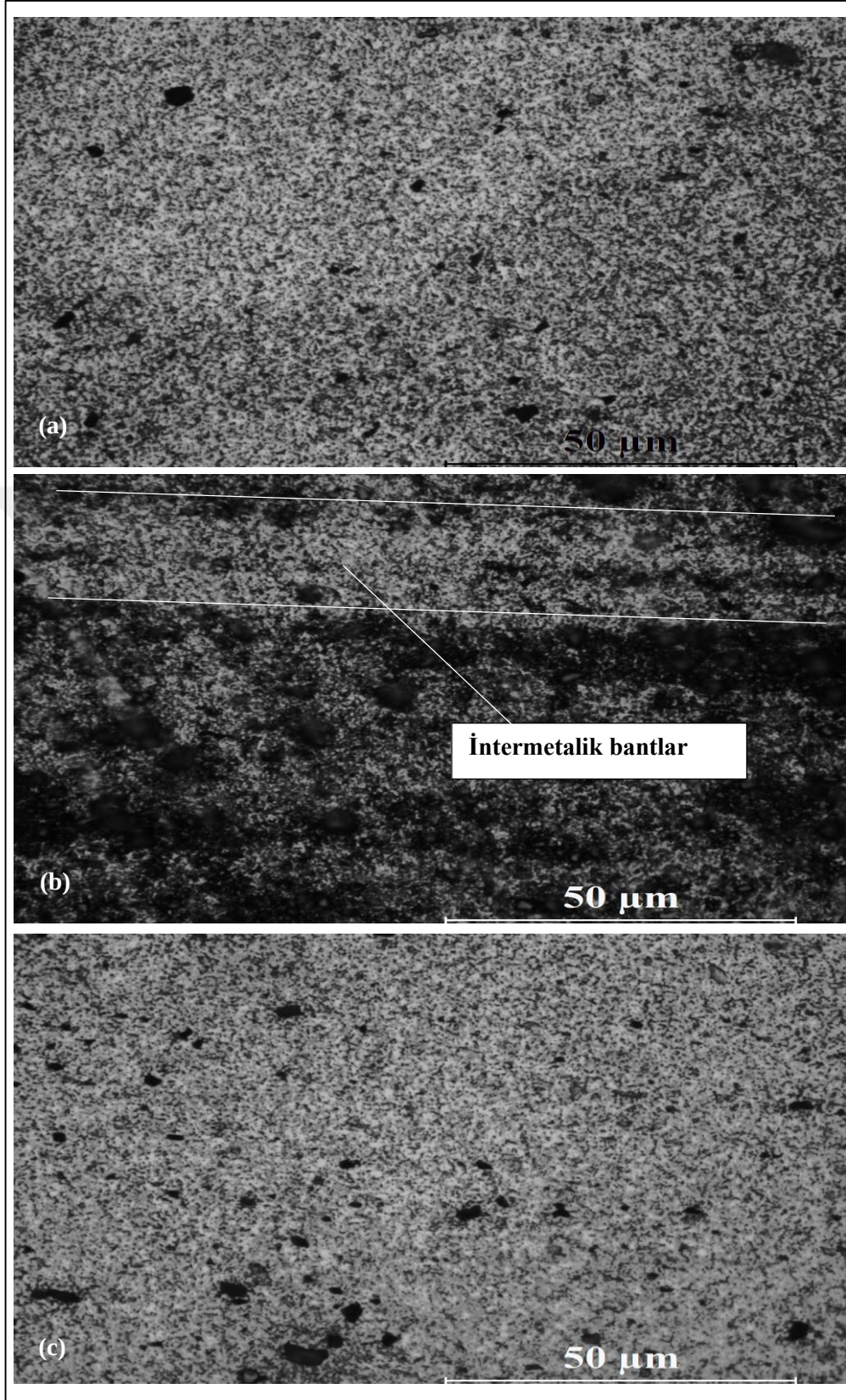


Şekil 4.20. a) B_4C b) TiC gradyanlı kaplama x1000 optik mikroskop görüntüsünde görülen intermetalik bantlar

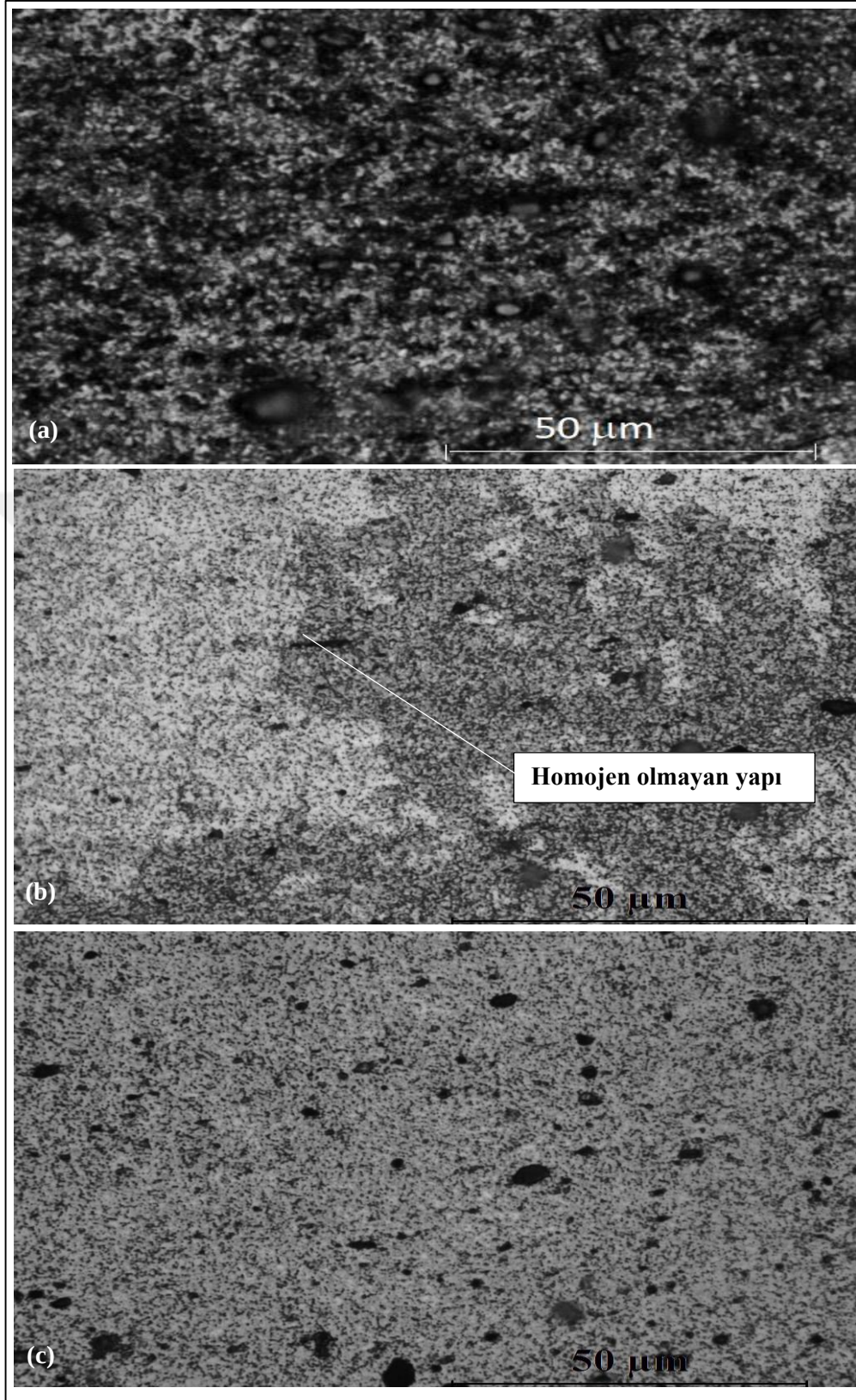
TiC toz takviyeli kaplamaların optik mikroskop görüntülerin incelenmesinde B₄C toz takviyeli kaplamadaki yapıya benzer yapıların oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.21). %5-15-30 TiC toz takviyeli kaplamanın ilk katmanında iki ayrı bölgenin oluştuğu, homojen olmayan metalik birikmelerin varlığı görülmüştür. İkinci katmanda ise B₄C toz takviyeli kaplamalara benzer intermetalik bantlar oluşarak TiC takviye tozları yer yer yapı içerisinde birikmiş, en üst katmanda ise yer yer tane büyümeleri görülmüştür. %10-20-30 TiC ile yapılan kaplamanın mikro yapısı incelendiğinde aynı şekilde homojen olmayan ve kaplamanın farklı bölgelerine birikmiş takviye tozlarının olduğu görülmektedir. Özellikle birinci ve ikinci katmanlar birden fazla ısıtılma işlemine maruz kaldıklarından dolayı farklı tane yapıları ve metalik birikmelerin olması kaçınılmazdır. TiC %10-30-60 takviyeli kaplamanın mikro yapısı incelendiğinde ise tane büyümelerinin yanı sıra nispeten daha homojen bir yapının da elde edildiği görülmüştür. TiC toz takviyesi kullanılarak yapılan gradyanlı kaplamaların SEM görüntülerinde TiC taneciklerin mevcut olduğu ve EDX analizinden titanyum bulunduğu da tespit edilmiştir (Şekil 4.25).



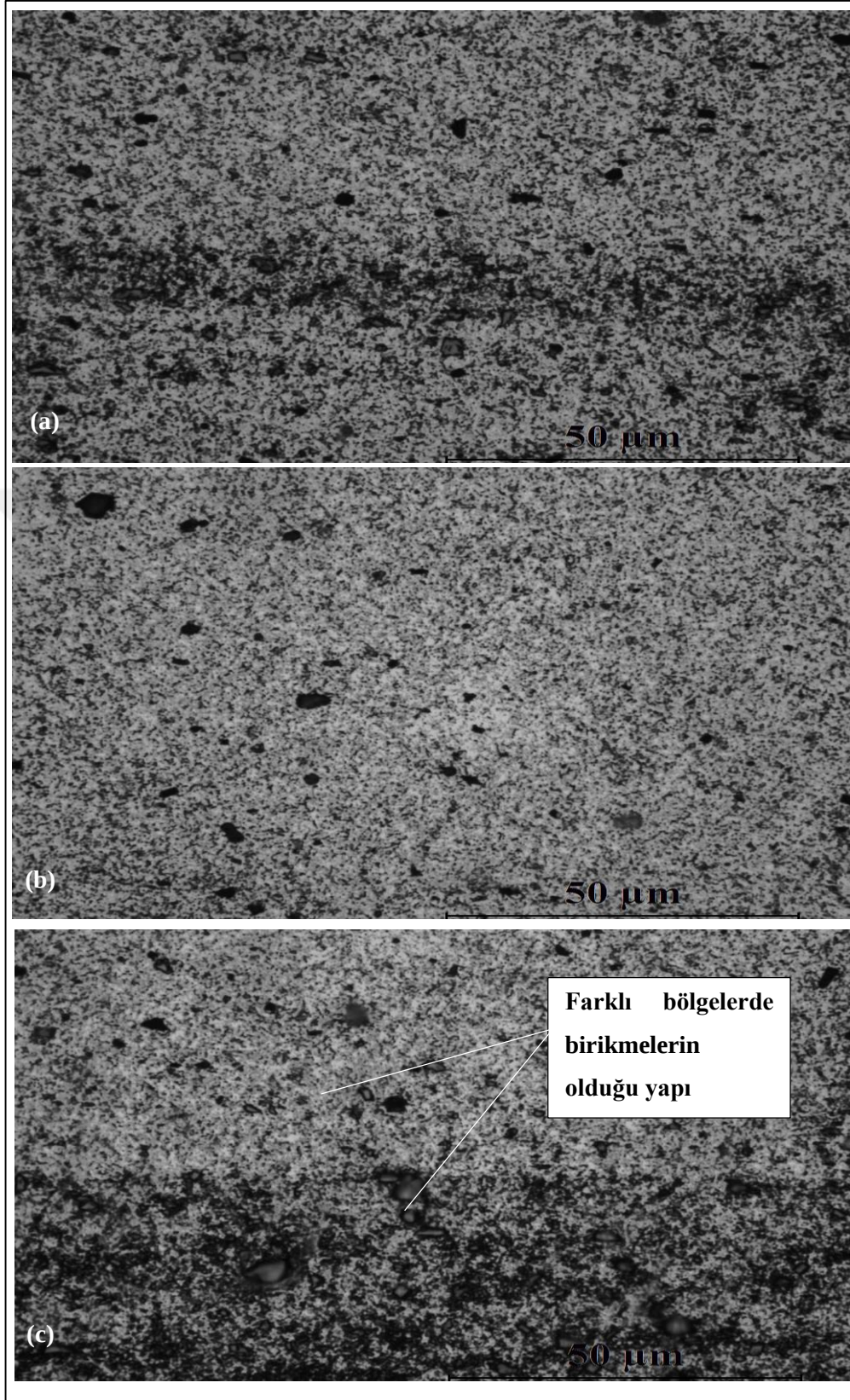
Şekil 4.21. TiC takviyeli gradyan kaplamalı numunelerin optik mikroskop görüntüleri (x1000)



Şekil 4.22. TiC takviyeli %5-15-30 gradyan kaplamalı numunelerin a)1.katman b)2.katman c)3.katman optik mikroskop görüntüleri (x1000)



Şekil 4.23. TiC takviyeli %10-20-30 gradyan kaplamalı numunelerin a)1.katman b)2.katman c)3.katman optik mikroskop görüntüleri (x1000)

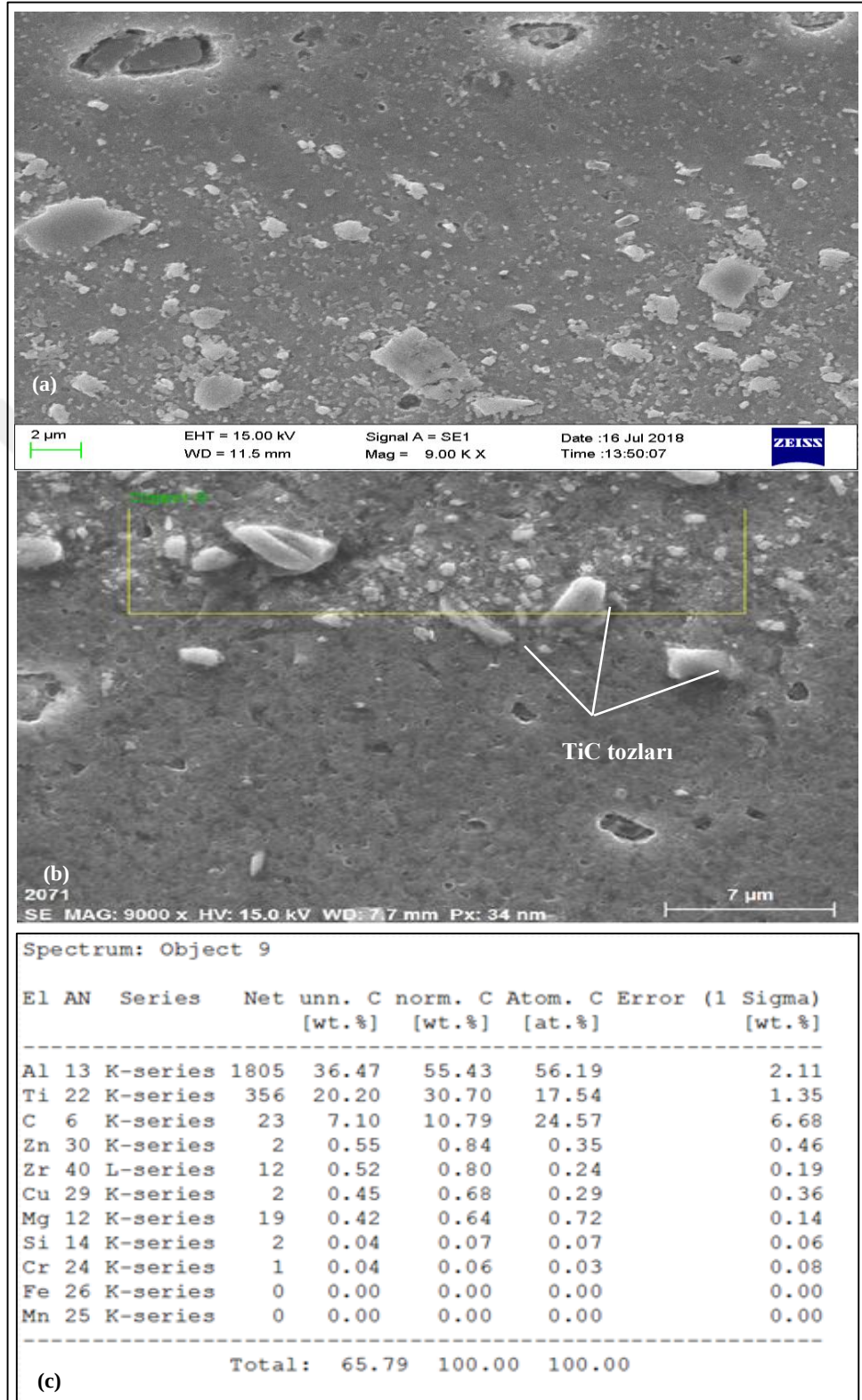


Şekil 4.24. TiC takviyeli %10-30-60 gradyan kaplamalı numunelerin a)1.katman b)2.katman c)3.katman optik mikroskop görüntüleri (x1000)

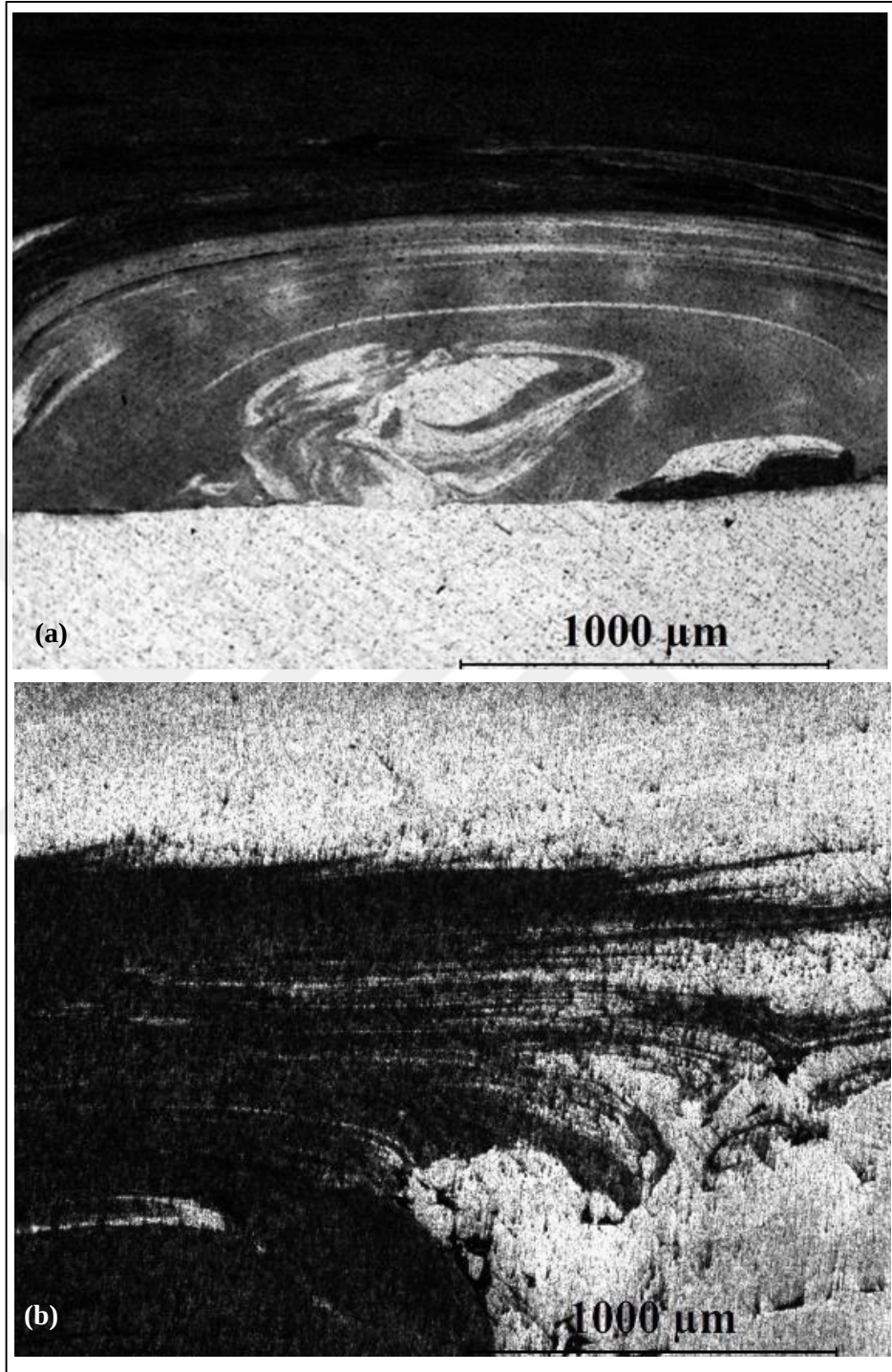
Şekil 4.25'da TiC tozu takviye edilerek kaplanan numunelere ait SEM görüntüleri ve EDX analizi verilmiştir. Bu görüntülerde kaplama işleminin doğası gereği meydana gelen ısınmadan dolayı, kısmen yeniden kristalleşmiş taneler, büyük uzamış kristalleşmemiş taneler, eş eksenli yeniden kristalleşmiş taneler mevcuttur [88]. Deney esnasında yapılan sıcaklık ölçümlerine göre kaplama mili ile altlık malzeme temas bölgesi sıcaklığı 600°C civarına kadar çıkmıştır. Bu sıcaklık hem takviyesiz hem de takviyeli kaplamaların içerisinde mevcut olan alüminyum alaşımının yaşlanmasına sebep olur. Özellikle çok katlı kaplamalarda ikinci katman oluşturulurken işlem sıcaklığı 480°C'nin üzerine çıkıldığı zaman kaplama tozları içerisinde bulunan Al alaşımı her bir kaplamanın üretilmesiyle, ısı çevrime maruz kaldığından dolayı yeniden kristalleşme kaçınılmazdır. Özellikle çok katlı tabakaların ara katmanların da birden fazla ısınma ve soğuma çevrimi uygulandığı için yapılarda aşırı yaşlanmadan kaynaklı iri tanelerin görülmesi mümkündür (Şekil 4.25b). Ayrıca işlem esnasında sürekli deformasyon, yapıda dislokasyonların artışına sebep olur. Zamanla sıcaklığın da etkisiyle küçük açılı tane sınırları oluşmaya başlar. Jata ve Semiatin [91] tarafından yapılan çalışmada da belirtildiği gibi küçük açılı tane sınırları yerini zamanla büyük açılı tane sınırlarına bırakır ve yeniden çekirdeklenme başlar. Bu işlem dinamik yeniden kristalleşme (DKB) olarak adlandırılır [61]. Yapılan literatür araştırmalarında sürtünmeli kaplama esnasında dinamik yeniden kristalleşmenin varlığından bahsedilir [58]. Charit ve Mishra yaptıkları çalışmalarda sürtünmeli kaplama işlemi esnasında homojen olmayan deformasyonun tane büyümesine sebep olduğunu belirtmişlerdir [92]. Su ve Nelson ise üniform olmayan plastik deformasyonun mikro yapısında farklı dislokasyon yoğunluklarının bulunduğu taneler ve farklı büyüklüklerde tane yapılarına rastlandığını belirtmiştir [93].

Sürtünmeli kaplama yöntemi, milin dönmesi esnasında tabakaları birbirine karışması ile meydana gelen elips şeklindeki girdap ya da yüzük adı verilen (Şekil 4.26 ve Şekil 4.27) oluşumların meydana geldiği görülmüştür [2]. Jujare vd. tarafından yapılan çalışmada da buna benzer görüntüler elde edilmiştir [85]. Bu kısımlarda kaplamanın takviye kısmı (TiC, B₄C) kaplama işlemi esnasında milin dönme hareketinden dolayı oluşan girdap boyunca sıralanma eğilim gösterirler. Çünkü dönme hareketi ve ilerleme hızına bağlı olarak bir miktar ısınma meydana gelir. Oluşan ısınmanın etkisiyle kaplama malzemesinin yumuşak matris fazı içerisinde bir akışı meydana gelir. Sürtünmeli kaplama işleminde plastisize olan metal eliptik bir şekilde kaplamaya transfer edilir ve her bir tabaka küçük gruplar halinde önce birine sonra diğerine kaplanır [2, 63]. Oluşan girdap bölgeleri Sekharbabu vd. [21] ve Thomas [87] tarafından yapılan çalışmalarda da ITAB ve yüzük olarak ifade edilmiştir. Kaplamaların enine kesit geometrileri de benzer özelliktedir. Bu da kaplama işlemi esnasında takviye partiküllerinin matris malzemesinin akışı esnasında tam olarak karışmadığı anlamına gelmektedir. Yüzey pürüzlülüğünün de katkısıyla, yumuşak matris içerisine gömülmüş olan partikül takviyelerin (TiC, B₄C) bulunduğu kaplama hem

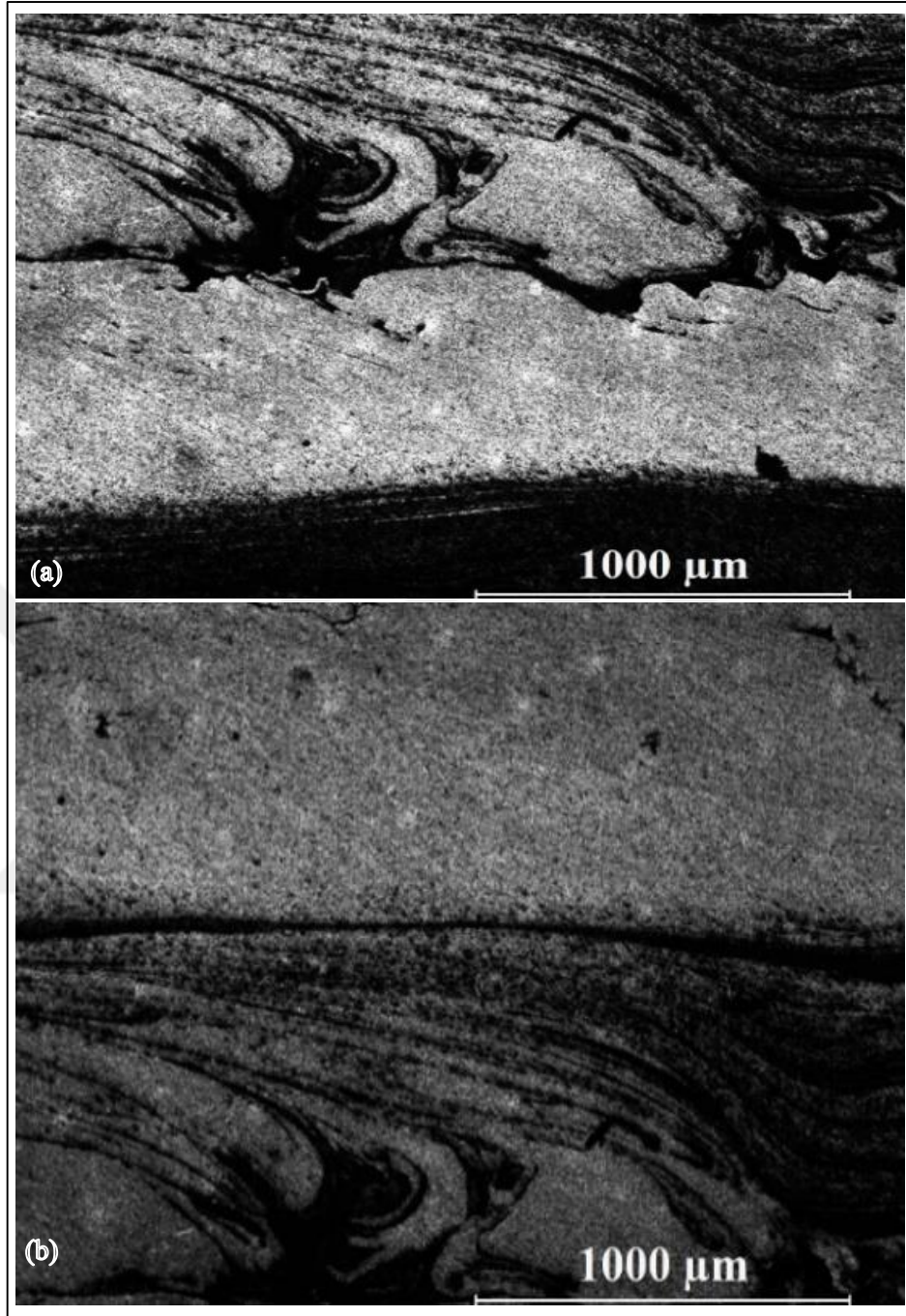
mekanik hem de difüzyon yoluyla altlığa, çok katlı kaplamalarda ise altındaki kaplamaya bağlanır [63].



Şekil 4.25. a) %10-20-30 TiC, b) %10-30-60 TiC takviyeli numunelerin ara yüzey SEM görüntüleri ve c) %10-30-60 TiC takviyeli numunenin EDX analizi



Şekil 4.26. %10-20-30 TiC takviyeli numunenin ara yüzeyinde meydana gelen girdap bölgeleri
a)altlık- 1.katman b) 1.katman-2.katman geçiş bölgeleri (x50)



Şekil 4.27. %10-30-60 TiC takviyeli numunenin ara yüzeyinde meydana gelen girdap bölgeleri a)altlık-1.katman b) 1.katman-2.katman geçiş bölgeleri (x50)

Sürtünmeli kaplama işleminde, kaplama malzemesi ile altlık arasındaki ısı transferi, etkin bir role sahiptir. İşlem esnasında meydana gelen ısı, sıcaklık ve basınç sınır şartlarını belirleyen en önemli faktörlerdir [94]. İdeal ısı transfer şartları, altlık ile temasta olan kaplama arasında dar bir ara yüzey oluşturacak ısı transfer şartlarıdır. İstenmeyen ısı transfer şartları ise kalın bir ara yüzeyin meydana getiren ısı transfer şartlarıdır. Isı transferi meydana gelirken kullanılan altlık ve kaplamanın ısı transfer katsayıları da büyük bir öneme sahiptir. Kplama işlemi esnasındaki dönme

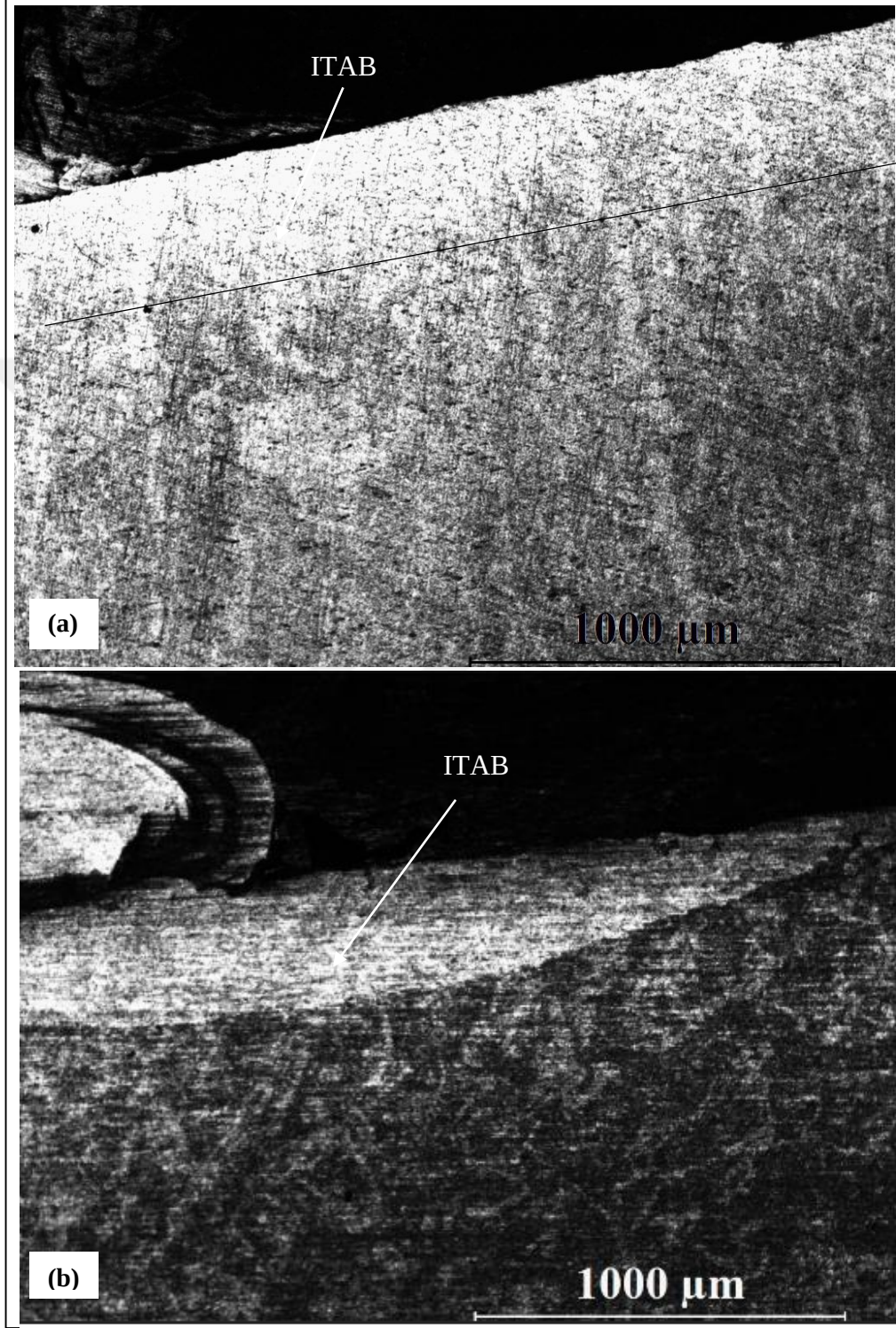
hareketinden dolayı meydana gelen ısı altlık üzerinde ısıdan etkilenmiş bölgenin (ITAB, TEB, DKB) oluşumuna neden olur (Şekil 4.28) [2]. Yüksek ısı transferi sürtünmeli kaplama işlemi esnasında geniş bir ITAB oluşmasına müsaade etmez.

Tabaka şeklindeki düz bir yüzey üzerinde hareket eden bir kaynak tarafından oluşturulan ısı transferi teorisine göre maksimum yüzey sıcaklığı, ilerleme hızının termal difüzyon katsayısına bölünmesiyle orantılıdır. Yani kaplama ile dönen mil arasındaki temas bölgesinin ısı konsantrasyonu, milin ısınan bölgesinin altlığın üzerindeki eksenel hareketinin hızına bağlıdır [2]. Kaplama esnasında, eksenel harekete bağlı olarak altlığın ısıdan etkilenen bölgesi kademeli olarak artar. Maksimum bir genişliğe ulaştıktan sonra kaplamanın bitişine doğru kademeli olarak azalır. ITAB bölgesinde ısınmadan dolayı altlık malzemesi ısı işlemine maruz kalmış gibi mikro yapıda değişiklikler meydana gelir [65]. Şekil 4.28’te B₄C %10-20-30 ve TiC %10-20-30 takviye oranına sahip kaplamaların altlık tarafında ITAB oluştuğu görülmüştür. Kaplama milinin devir sayısının düşük olması, milin dönme hareketinden dolayı meydana gelen mekanik enerjinin düşük olmasına sebep olur ve altlık malzemesinde ITAB meydana gelmez. Sürtünme enerjisi ısı iletimi ile dağıtılır ve mevcut enerji ara yüzeylerde istenen yapışmanın olmasına müsaade etmez ve kaplama istenildiği gibi elde edilmez. Kaplama ile altlık arasındaki temas gerilmesinin artması, kaplama-ara yüzey karışımını ve plastik deformasyonu artırır.

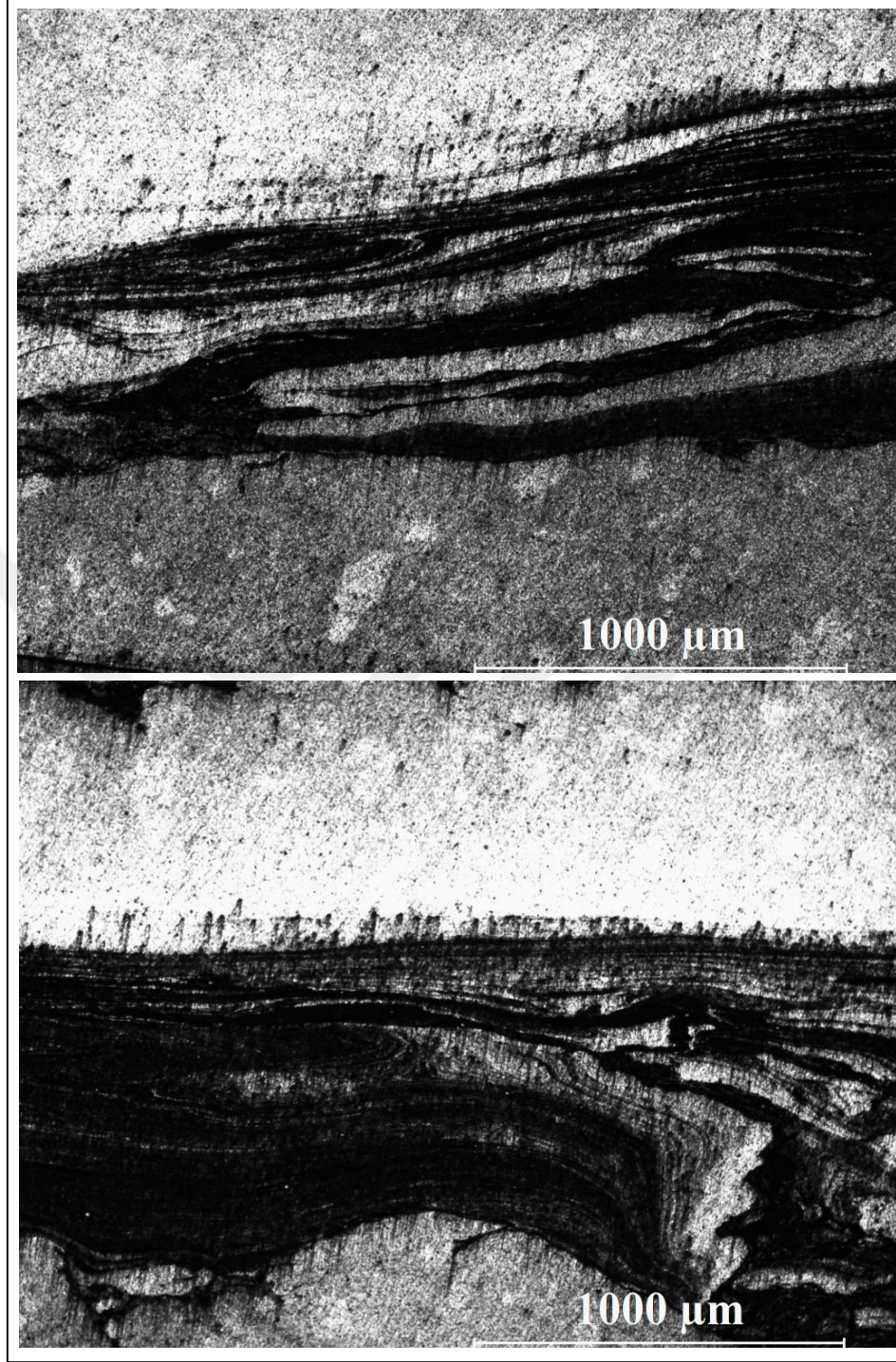
Şekil 4.29’te %10-30-60 B₄C takviyeli kaplamanın başlangıç ve bitiş bölgelerindeki mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Kaplamaların kenar bölgelerinin optik mikroskop görüntülerinde birbirine katman şeklinde geçmiş iki ayrı yapının varlığı görülmüştür. Kaplamaların kenar bölgelerinde birbiri içine geçme şeklindeki bu yapılar kaplamanın her bölgesinde viskoplastik karışımın ve adhezyonun gerçekleştiğini göstermiştir. Ayrıca her iki optik mikroskop görüntüsünde de girdap alanlarının oluşması yöntemle alakalı olup dönme işlemi sonucu oluşan kaplamanın doğası gereği meydana gelmiştir.

Şekil 4.30, Şekil 4.31, Şekil 4.32 ve Şekil 4.33’de B₄C; Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de TiC ilave edilmiş üç katlı gradyan kaplamaların altlık-kaplama1, kaplama1-kaplama2 ve kaplama2-kaplama3 ara yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 4.30’te %5-10-15 B₄C takviyeli kaplama incelendiğinde, altlık-kaplama1, kaplama1-kaplama2’deki ara yüzey geçişleri çok belirgin fakat boşluk oluşmadığı görülürken, kaplama2-kaplama3 görüntüsünde yine ara yüzey geçişinin çok belirgin ve aynı zamanda bir miktar boşluğun olduğu görülmüştür. %10-20-30 B₄C toz takviyeli kaplamanın 1.katmanında porözlü yapının daha fazla olduğu, bununla birlikte kaplama geçişlerinin belirgin olduğu, 1.katman ve 2.katman ara yüzey geçişlerinin iyi ve boşluksuz bir yapının oluştuğu belirlenmiştir. Üçüncü katmanda ara yüzeylerde yer yer boşluk ve çatlakların mevcut olduğu görülmüştür. %10-30-60 B₄C takviyeli kaplama incelendiğinde B₄C ilavesi ile altlık

ve kaplamalar arasında mikro yapı farklılıkları olduğu gözlenirken kaplamanın en üst katmanında birleşmenin tam oluşmadığı ve yer yer boşlukların oluştuğu belirlenmiştir.



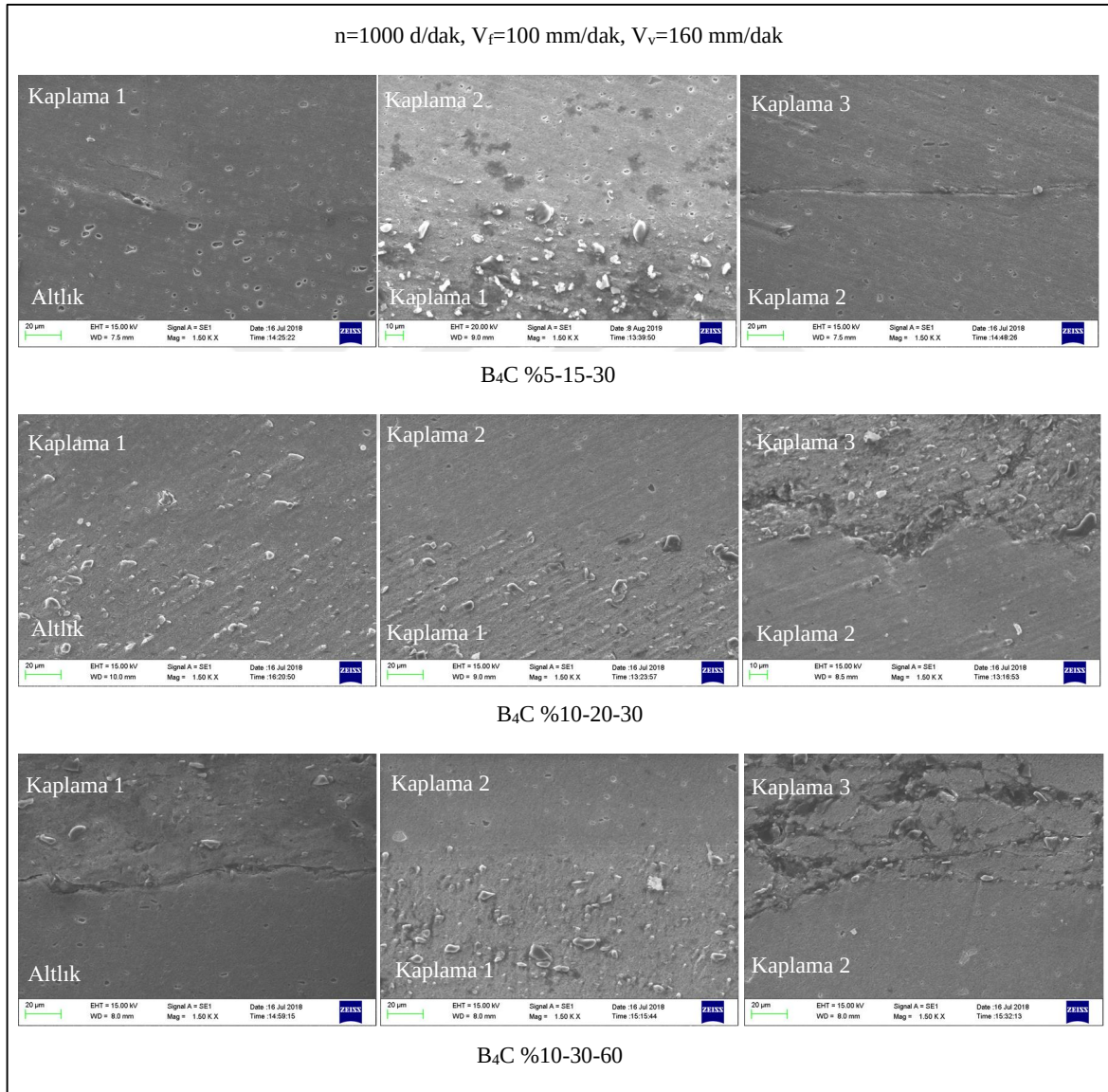
Şekil 4.28. a) %10-20-30 B₄C b) %10-20-30 TiC takviyeli kaplamaların altlığında meydana gelen ITAB'ın optik mikroskop görüntüleri (x50)



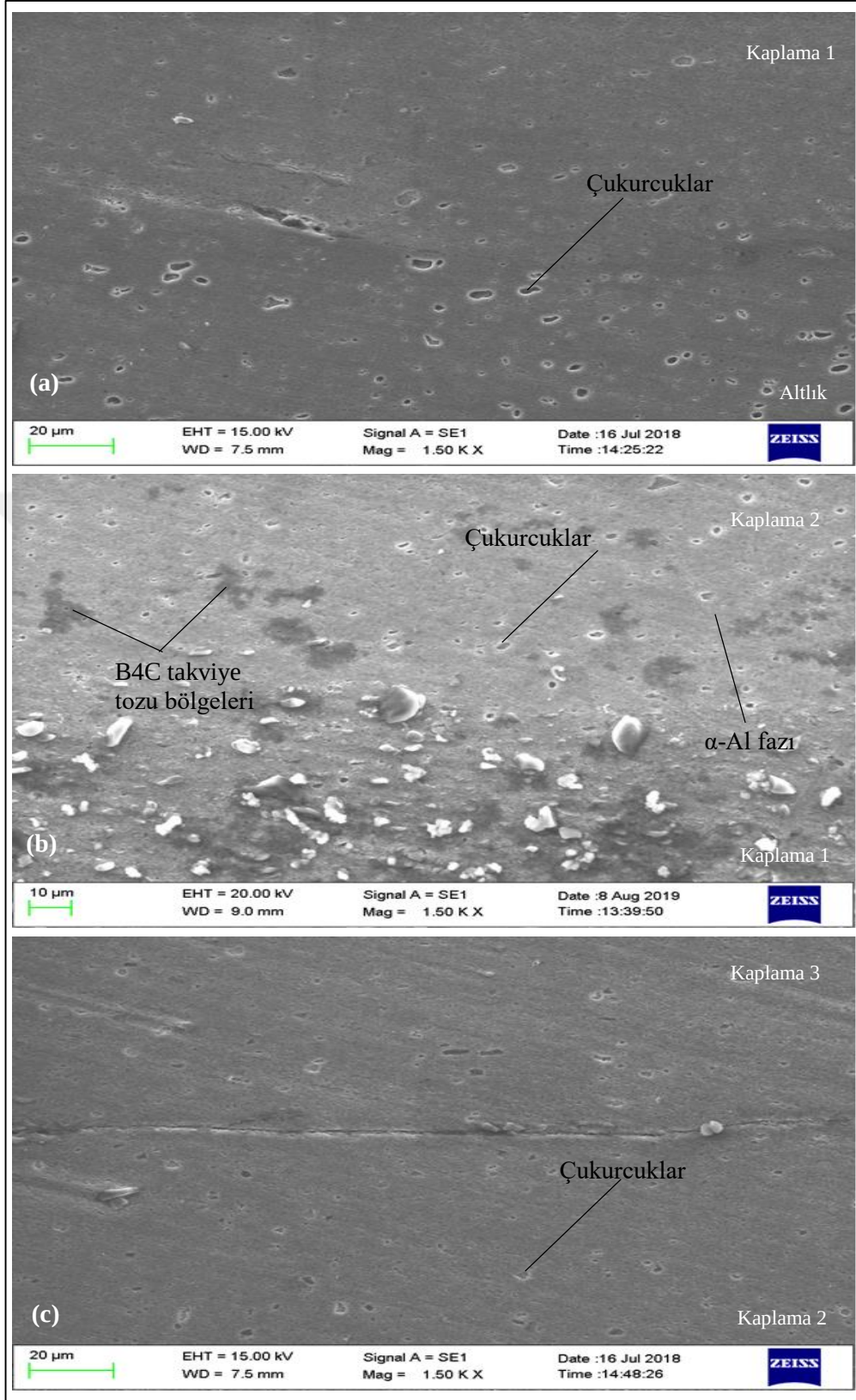
Şekil 4.29. %10-30-60 B₄C takviyeli kaplamanın başlangıç ve bitiş noktalarının optik mikroskop görüntüsü (x50)

Şekil 4.34'te %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın SEM görüntüsü incelendiğinde göre gradyan oranının artmasıyla üçüncü katmanda titanyum miktarının arttığı belirlenmiştir. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın SEM görüntülerinde ise altlık malzeme - kaplama1, kaplama1-kaplama 2 ve kaplama2-kaplama3 ara yüzeylerinde geçişin neredeyse hiç belli olmadığı görülmüştür. Bunun sebebi kaplama esnasında ikinci kaplama malzemesinin yeteri kadar

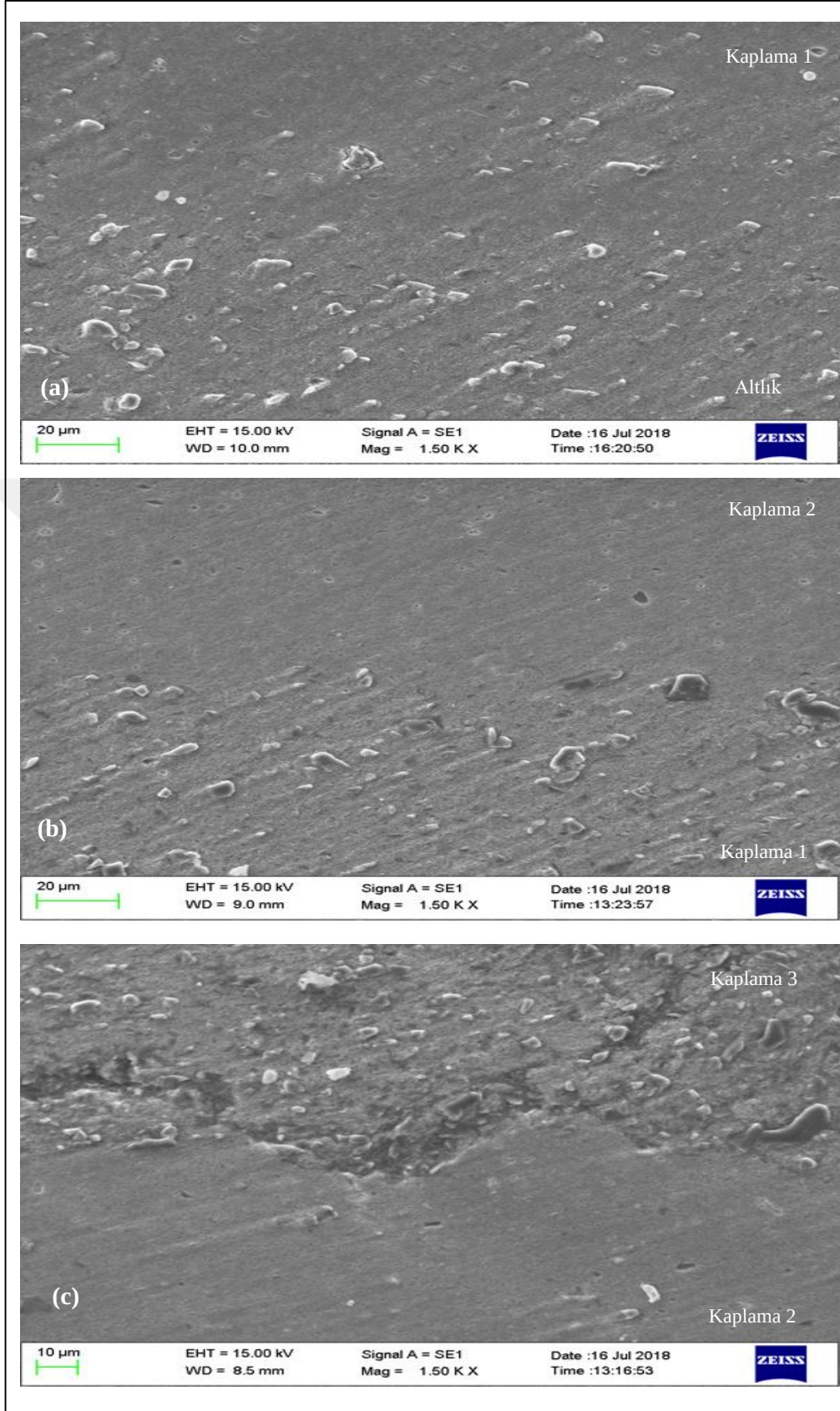
yumuşaması ve kaplama milinden altlığa aktarılan malzemenin istenen düzeyde karışmasıdır. TiC ilaveli bu kaplamalarda yapının içerisinde titanyum takviyeleri beyaz renkli olarak görülmektedir. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamalarda ara yüzey bölgelerinde yapışmanın ve geçişlerin iyi olduğu, fakat kaplamaların içerisinde yer yer boşlukların oluştuğu oluşmuştur. Özellikle altlık malzemenin kaplanmasında takviye oranının hızlı artması (%10) %10-20-30 TiC toz ilaveli kaplamanın ilk katmanındaki görüntüde de görüldüğü gibi boşluk oranını artırmıştır.



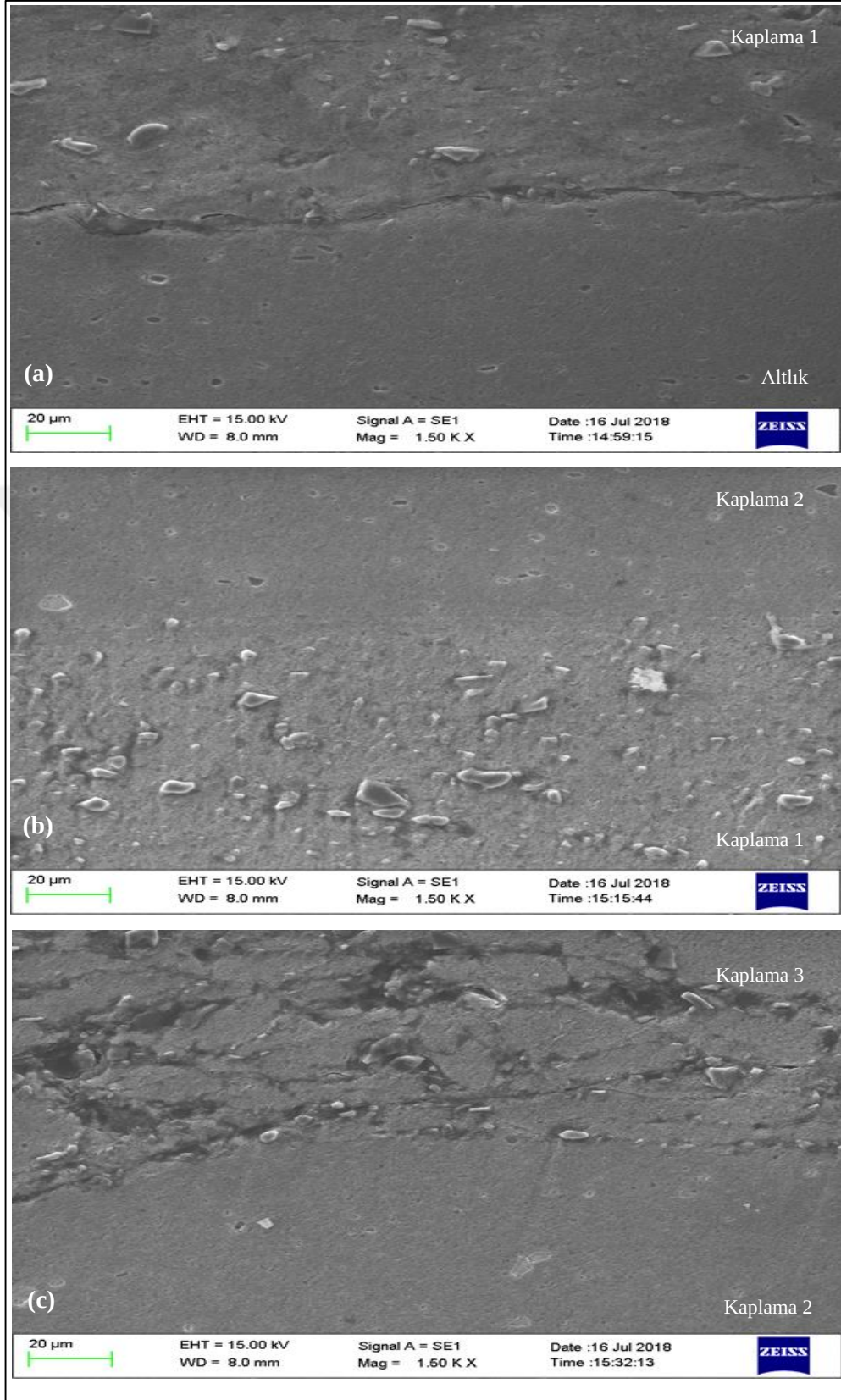
Şekil 4.30. B₄C gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri



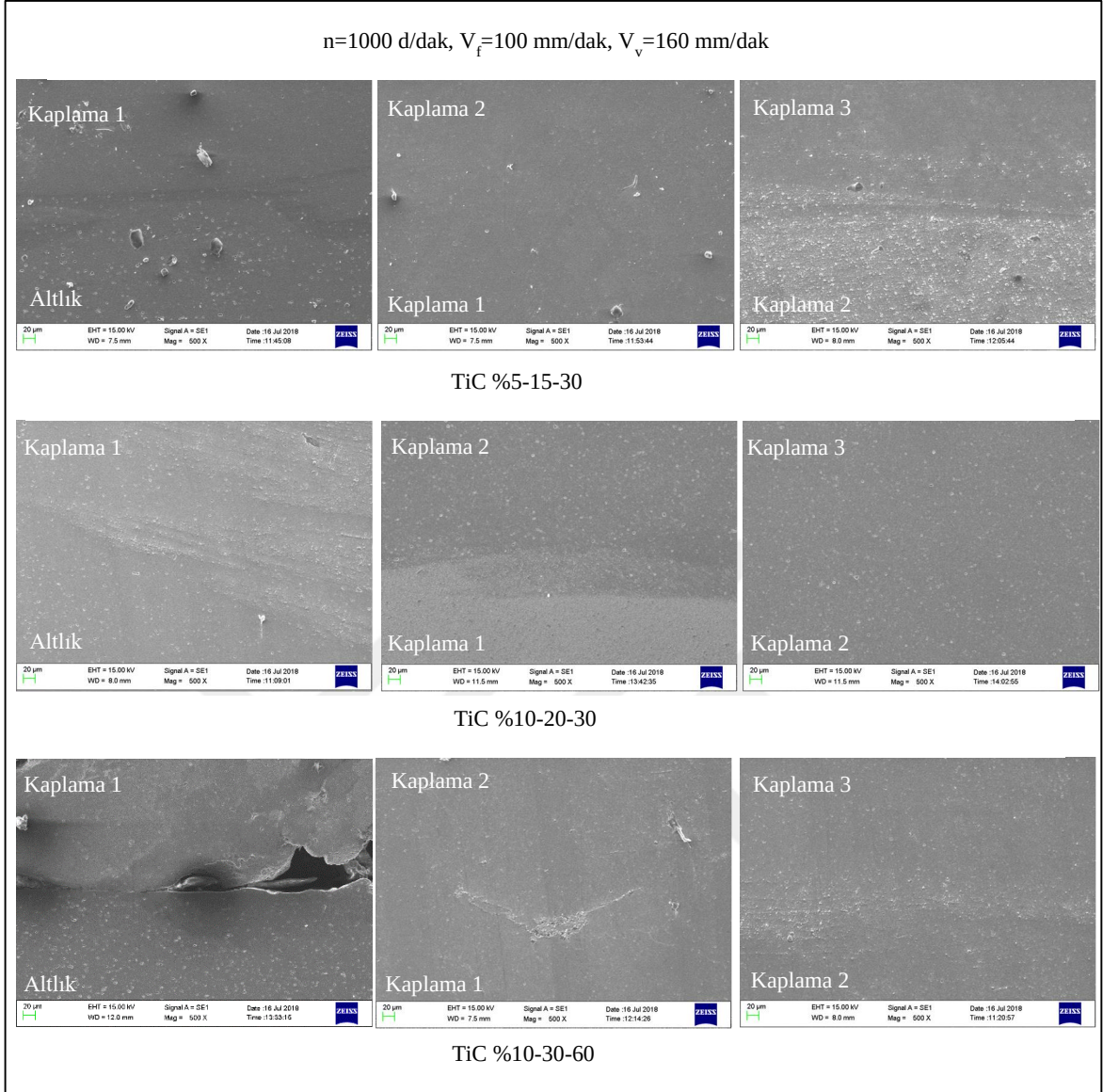
Şekil 4.31. %5-15-30 B₄C gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri a) altlık-1.katman b) 1.katman-2.katman c) 2.katman-3.katman



Şekil 4.32. %10-20-30 B₄C gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri a) altlık-1.katman b) 1.katman-2.katman c) 2.katman-3.katman

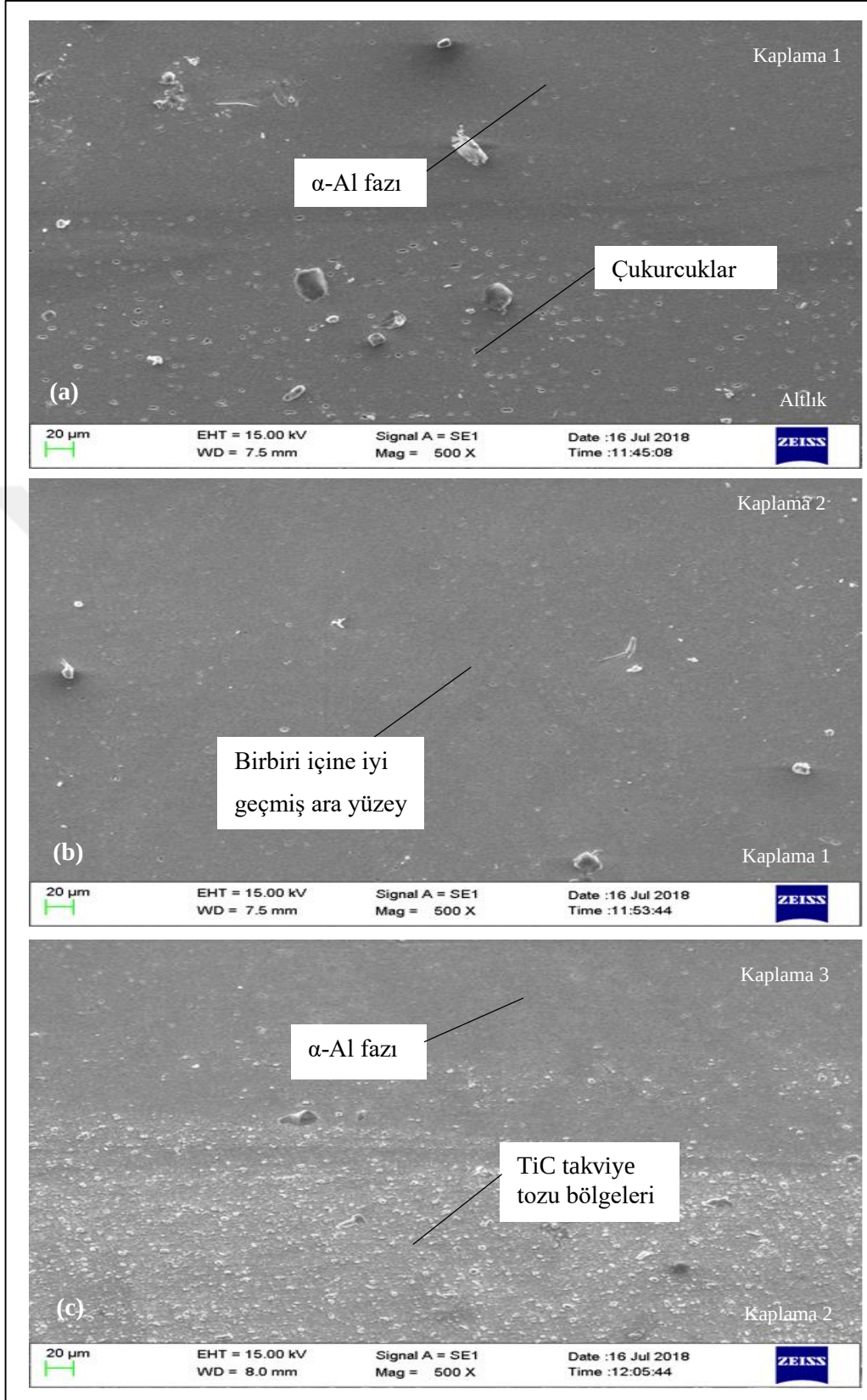


Şekil 4.33. %10-30-60 B₄C gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri a) altlık-1.katman b) 1.katman-2.katman c) 2.katman-3.katma

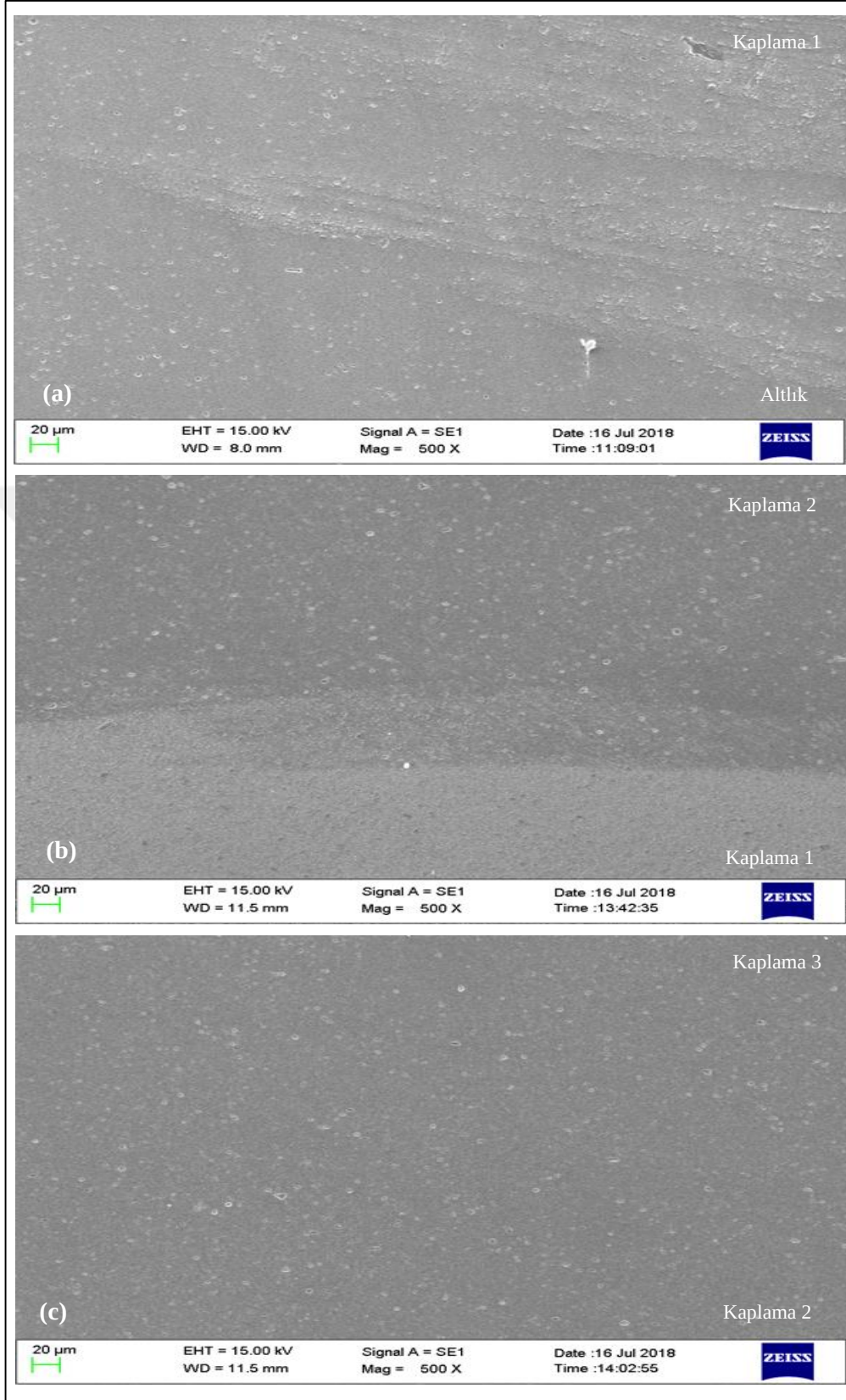


Şekil 4.34. TiC gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri

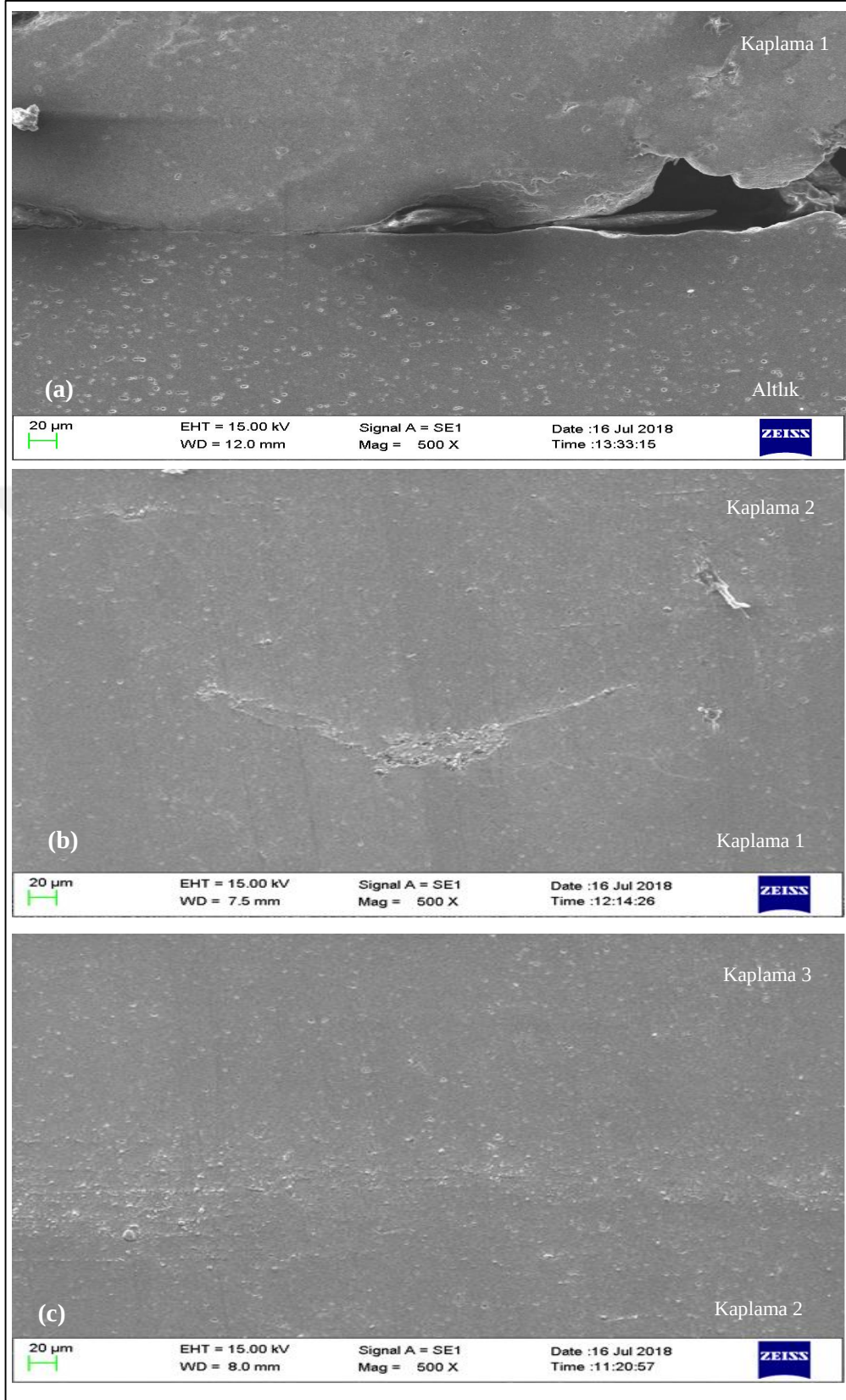
Şekil 4.38, Şekil 4.39, Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’te %10-30-60 TiC tozu ilaveli yapılan gradyanlı kaplamanın en üst katmanının SEM görüntüsü, EDX ve XRD faz analizi verilmiştir. XRD analizine göre kaplama yapısında AlMgZn_{11} , TiC ve Fe_2Ti bileşiklerinin olduğu, kaplamalarda, kaplama miline ilave edilen titanyum karbür fazı ile birlikte Fe_2Ti bileşiği de görülmüştür. Titanyum ile bileşik yapan demir (Fe) hem kaplama mili malzemesi olan alüminyum 7075, hem de altlık malzemesi Al5754 serisinin alaşım elementlerinde bulunmaktadır (Tablo 3.2). Tondü vd. [95] tarafından yapılan lazer kaynağı ile kompozit kaplama çalışmasında TiC fazının oluştuğu bildirilmiştir.



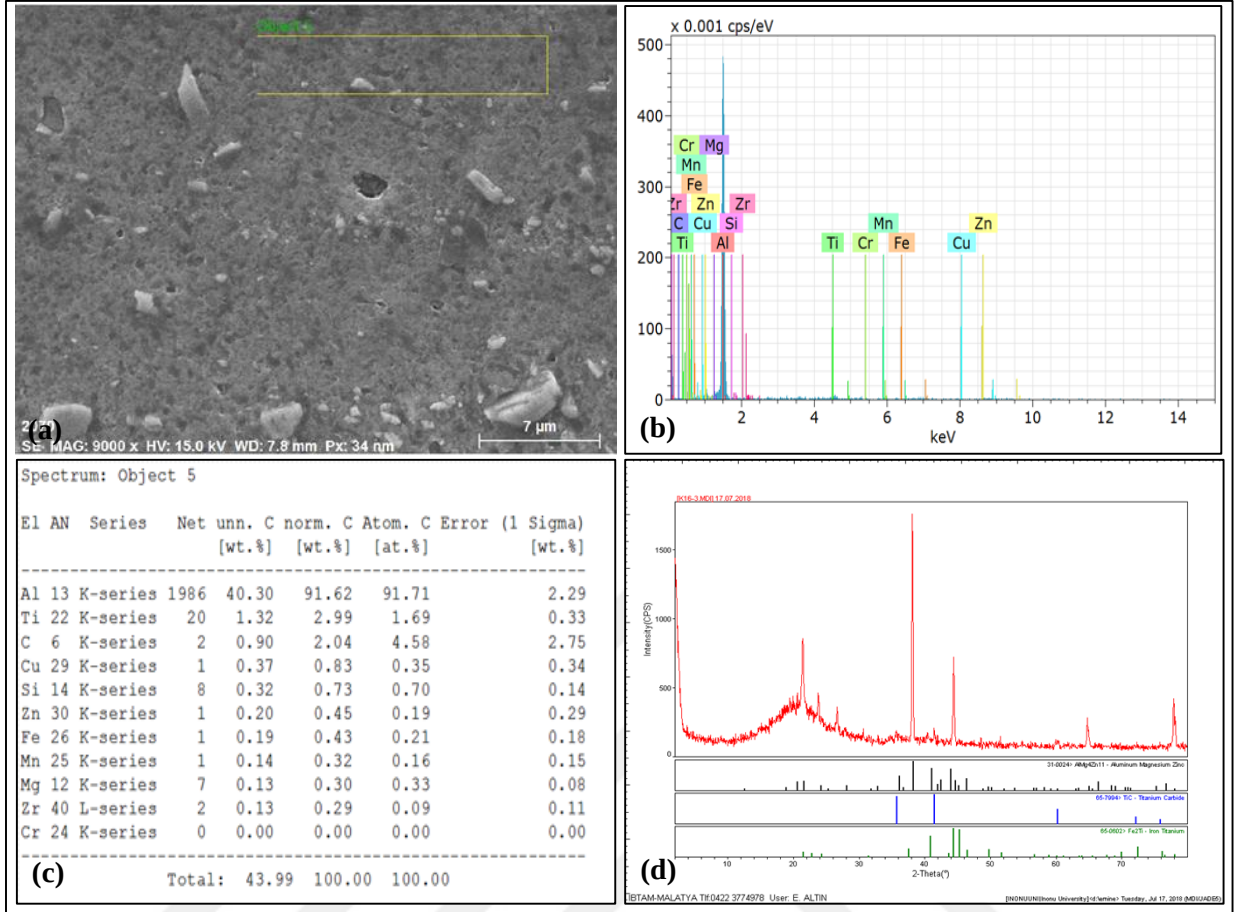
Şekil 4.35. %5-15-30 TiC gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri a) altlık-1.katman b) 1.katman-2.katman c) 2.katman-3.katman



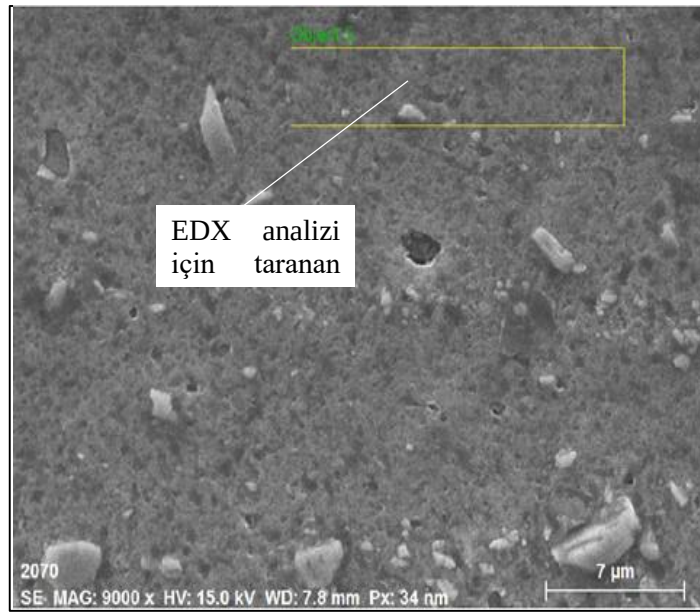
Şekil 4.36. %10-20-30 TiC gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri a) altık-1.katman b) 1.katman-2.katman c) 2.katman-3.katman



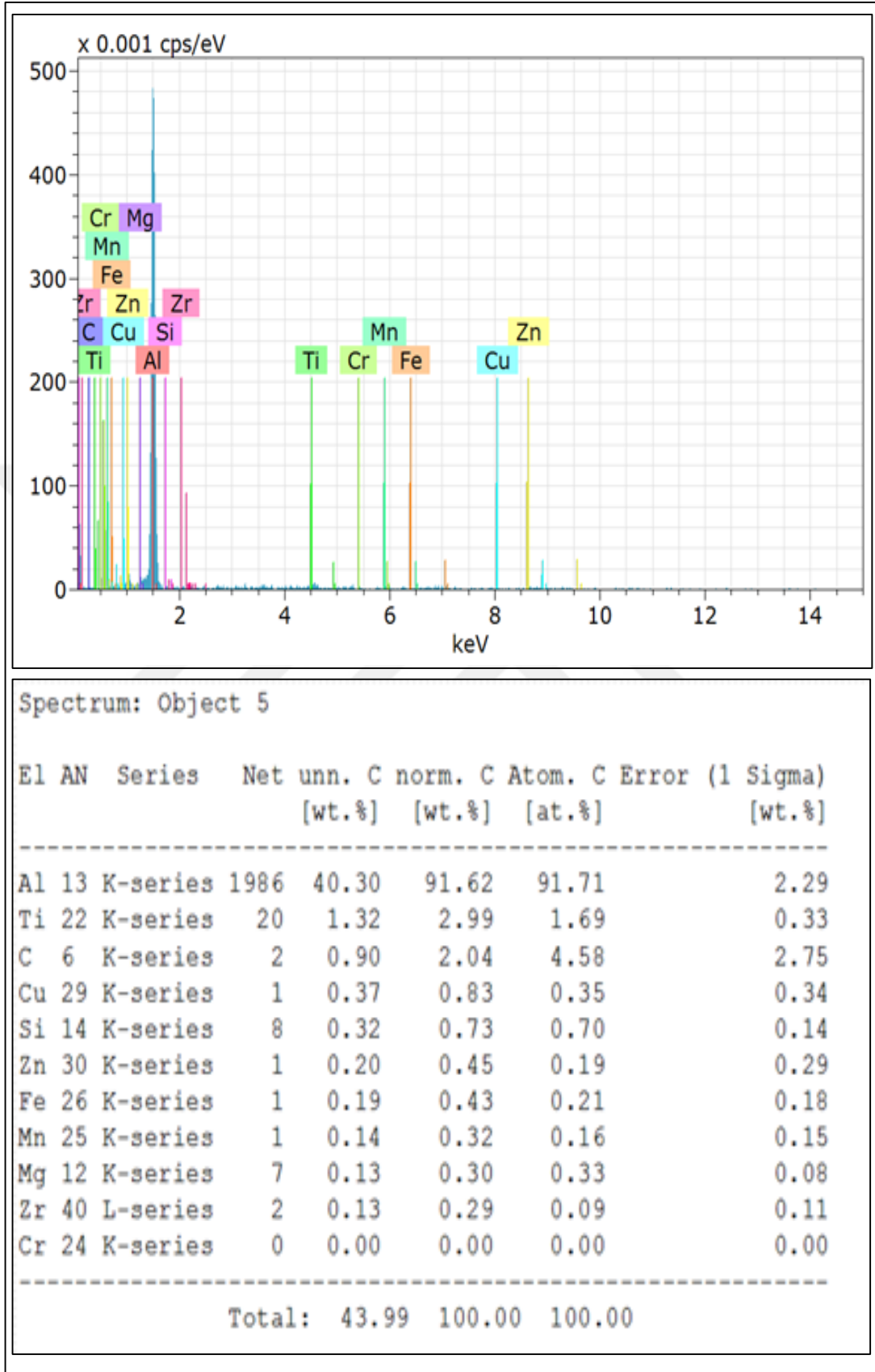
Şekil 4.37. %10-30-60 TiC gradyanlı kaplamaların SEM görüntüleri a) altık-1.katman b) 1.katman-2.katman c) 2.katman-3.katman



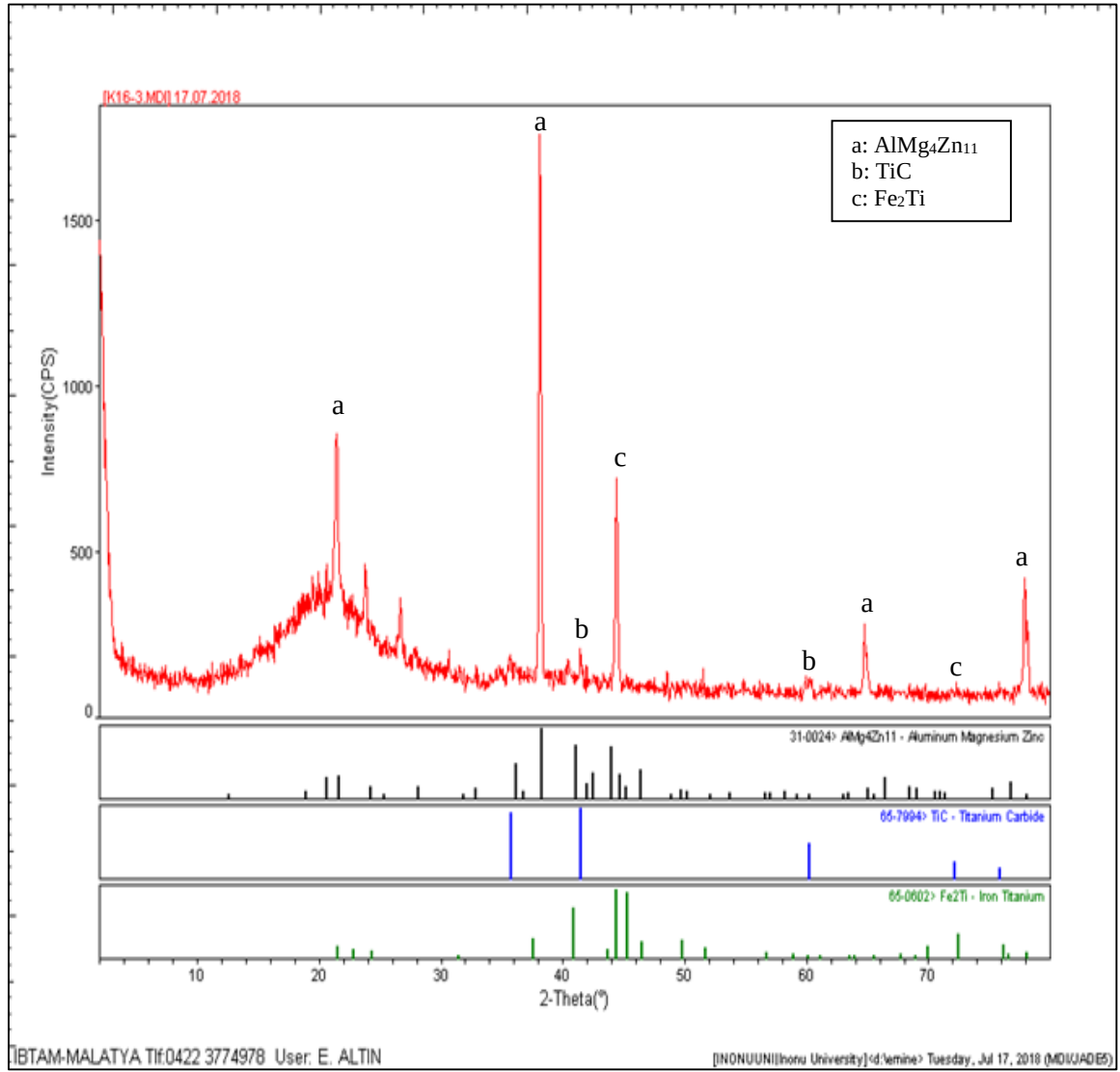
Şekil 4.38. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının a) SEM görüntüsü b) ve c) EDX analizi d) XRD faz analizi



Şekil 4.39. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının SEM görüntüsü

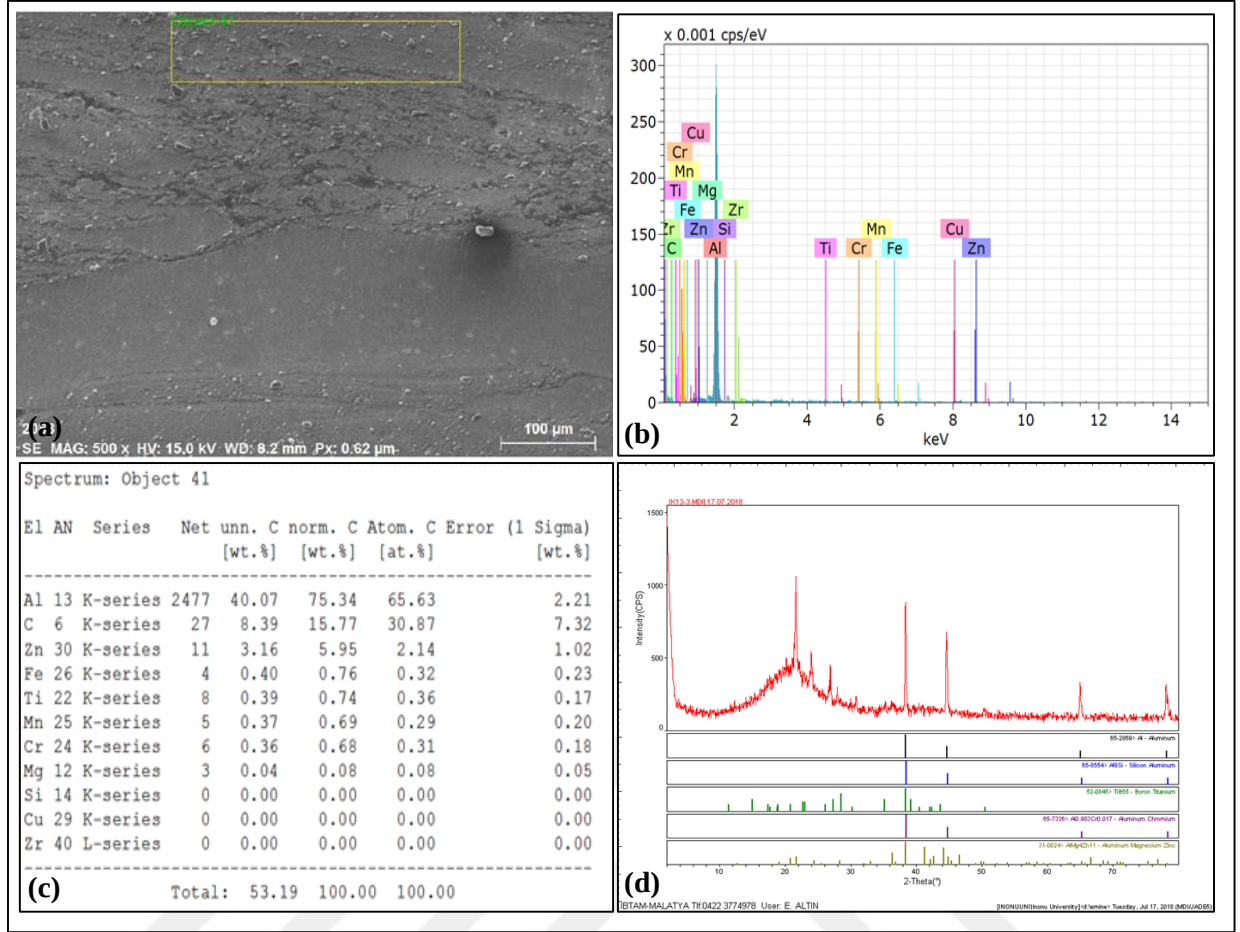


Şekil 4.40. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının EDX analizi

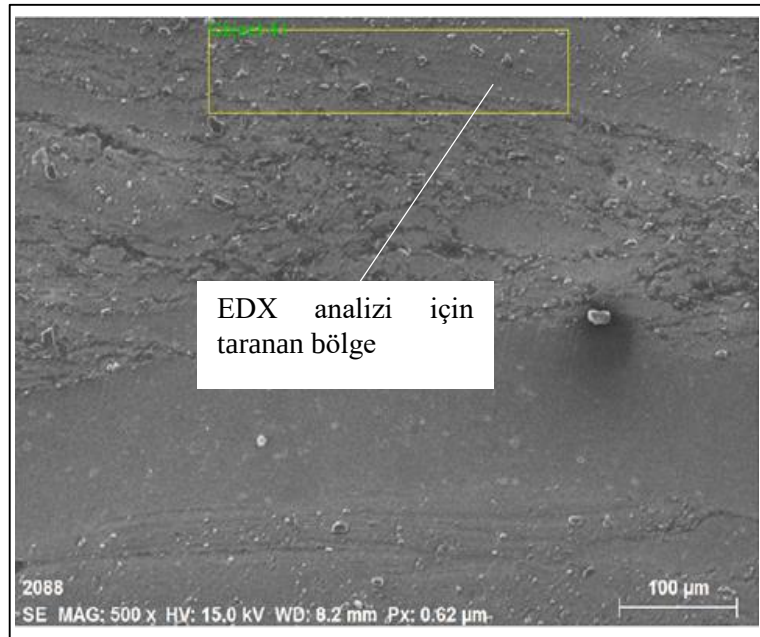


Şekil 4.41. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının XRD analizi

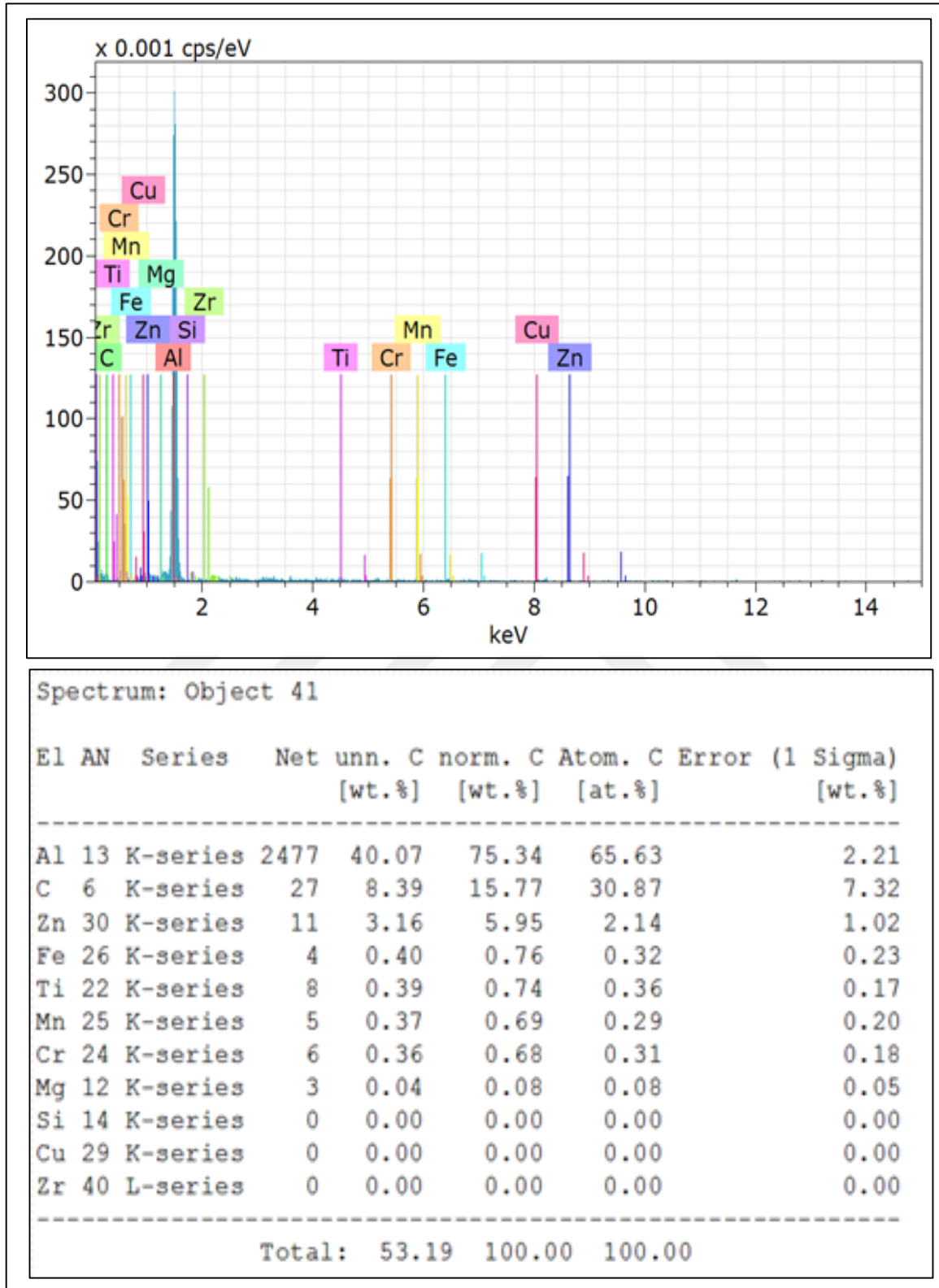
%10-30-60 B₄C takviyeli gradyanlı kaplamanın en üst katmanının XRD faz analizini Şekil 4.42 de verilmiştir. Grafik incelendiğinde kaplama yapısında Al, Al₉Si, Ti₉B₅₅, Al_{0,983}Cr_{0,017}, AlMg₄Zn₁₁ bileşiklerine rastlandığı görülmektedir. XRD analizinde EDX analizinde görülmeyen bor elementi Ti ile bileşik yaparak Ti₉B₅₅ şeklinde görülmüştür.



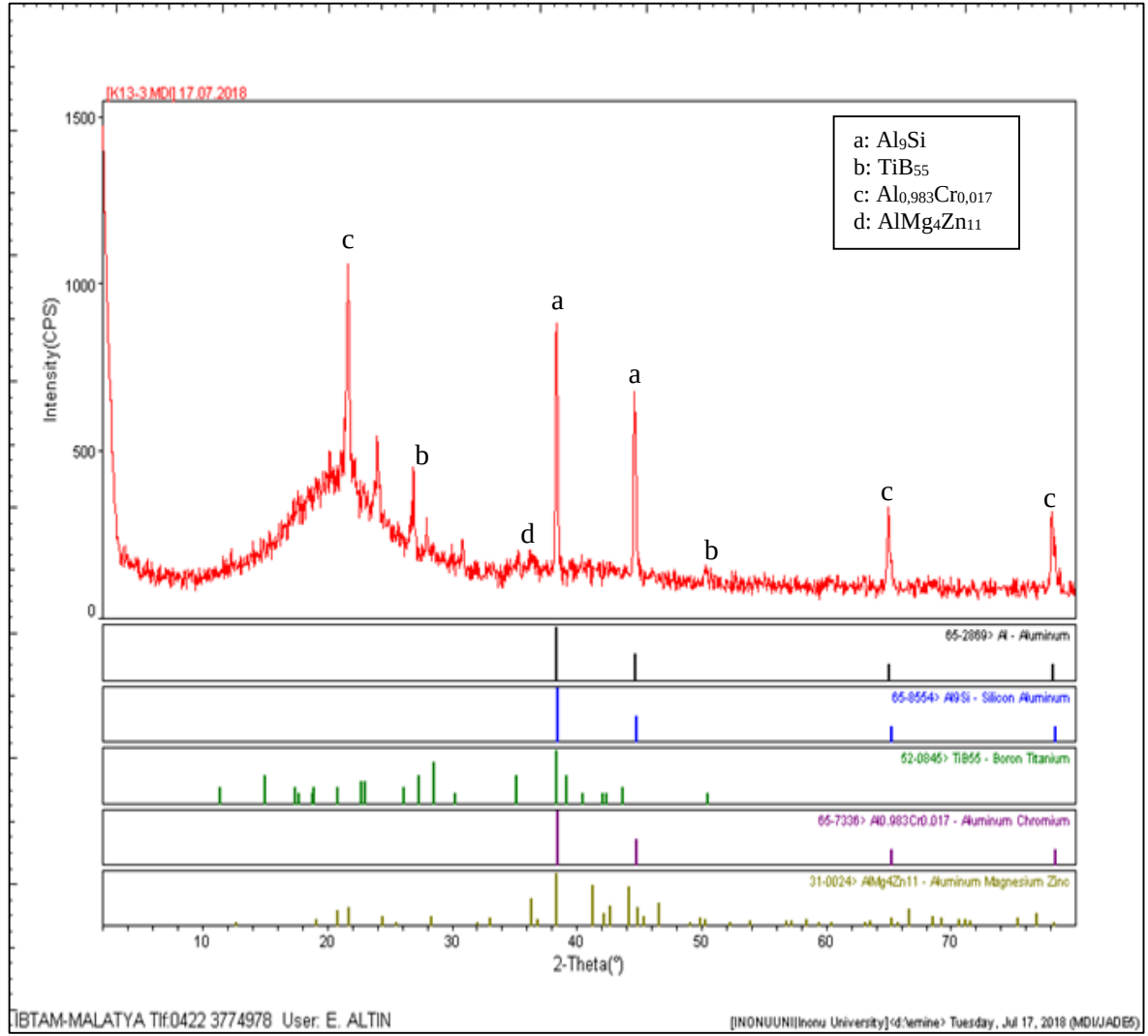
Şekil 4.42. %10-30-60 B₄C takviyeli kaplamanın 3.katmanının a) SEM görüntüsü b) ve c) EDX analizi d) XRD faz analizi



Şekil 4.43. %10-30-60 B₄C takviyeli kaplamanın 3.katmanının SEM görüntüsü



Şekil 4.44. %10-30-60 B₄C takviyeli kaplamanın 3.katmanının EDX analizi

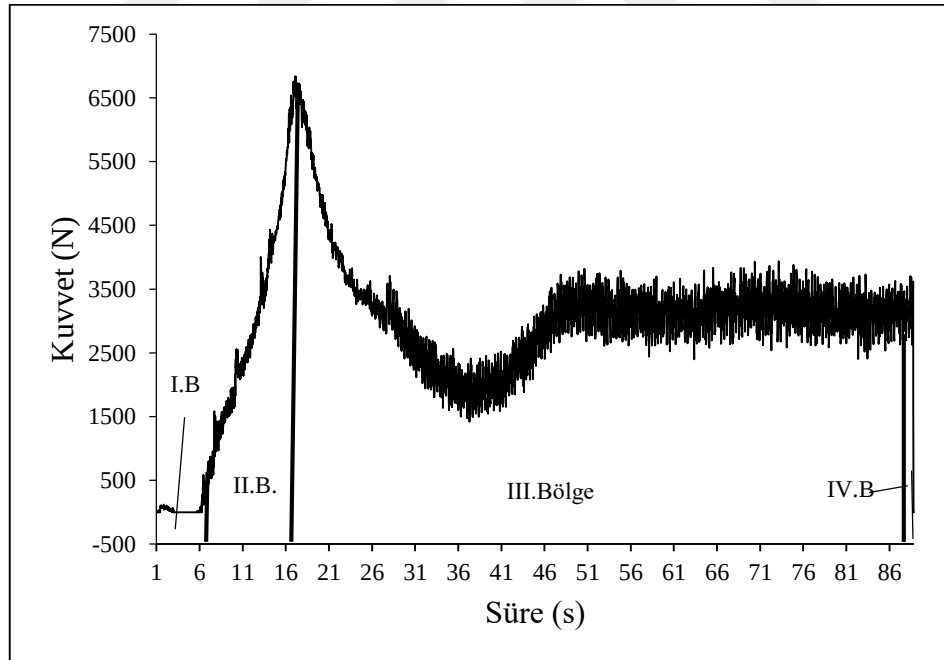


Şekil 4.45. %10-30-60 B₄C takviyeli kaplamanın 3.katmanının XRD analizi

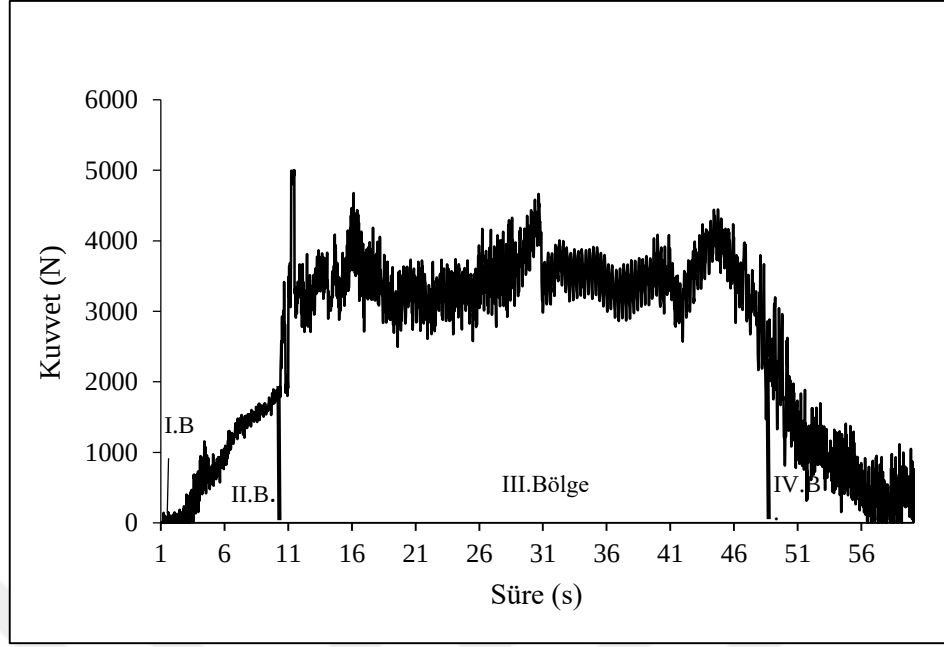
4.3. Eksenel Kuvvet Ölçümleri

Şekil 4.46 ve Şekil 4.47’de B₄C ve TiC toz takviyeli kaplamaların kuvvet-zaman grafiği verilmiştir. Ayrıca yapılan gradyanlı kaplamaların tümünün kuvvet – zaman grafikleri Ek – 3’te verilmiştir. Galvis vd. [61] yaptıkları çalışmada ifade edildiği gibi kuvvet-zaman grafiklerini dört ana bölgeye ayırmaktadır. I. bölge düşey ilerleyen kaplama milinin altlık malzemeye yaklaştığı bölgedir. Viskoplastik halde olmayan kaplama milinin altlık malzemeye teması ile ilerleme kuvveti artmaktadır. II. bölge ise düşey doğrultuda ilerleyen kaplama mili ile altlık malzeme arasındaki temas basıncının en yüksek olduğu başlangıç deformasyon bölgesidir. Bu bölgede oluşan yüksek sürtünme kuvveti altlık malzemesini viskoplastik hale getirmekte ve kaplama işlemi başlamaktadır. Bu bölgedeki pik, altlık malzemenin sertlik durumuna ve milin altlık malzemeye uyguladığı temas basıncına göre değişir. Bu pikler B₄C toz ilaveli millerle yapılan kaplamalarda belirgin bir şekilde

görülürken (Şekil 4.46) TiC toz ilaveli kaplamalarda daha düşük değerlerde ortaya çıkmıştır (Şekil 4.47). Altlık ile milin ilk teması anında dinamometreden ölçülen eksenel kuvvetlerin yüksek olması, milin yeterli sıcaklığa ulaşabilmesi ve altlığa enerji transfer edilerek yeniden kristalleşme sıcaklığına gelebilmesi için fazla kuvvete ihtiyaç duymasındandır [4]. III. bölgede görülen alan, biriktirmenin (kaplamanın) gerçekleştiği kısımdır. Bu bölge, kaplama malzemesinin altlığa transfer edilerek yüzeyin kapladığı kısım olup kaplama işleminin gerçekleştiği bölgedir. Bu bölgede kaplama kuvveti 7000 N'dan yaklaşık 3500 N'a düşmüştür. Kaplama esnasında yeterli sıcaklığa ulaşan kaplama mili yeniden kristalleşme sıcaklığına yakın sıcaklığa ulaşarak temas bölgesinde viskoplastisiteye sebep olmakta ve daha düşük kaplama kuvvetini ortaya çıkarmaktadır. Kaplama esnasında tam olarak altlığa yapışmış bölgenin elde edilmesi veya kaplamanın verimli bir şekilde yapılması, dönen milin altlığa uyguladığı eksenel kuvvet tarafından karakterize edilir [61]. Uygulanan bu eksenel kuvvetin büyüklüğü altlık yüzeyinde biriktirilen kaplamanın kalınlığını ve diğer karakteristiklerini belirler [64]. Kaplama esnasında, devir ve ilerleme oranı değiştirilmediği takdirde, milin dönme hareketinden dolayı üretilen mekanik enerji sabittir. IV. bölge ise milin geri çekildiği kısım olup bu bölgede işlem sonlanmıştır.



Şekil 4.46. %10-20-30 B₄C takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği



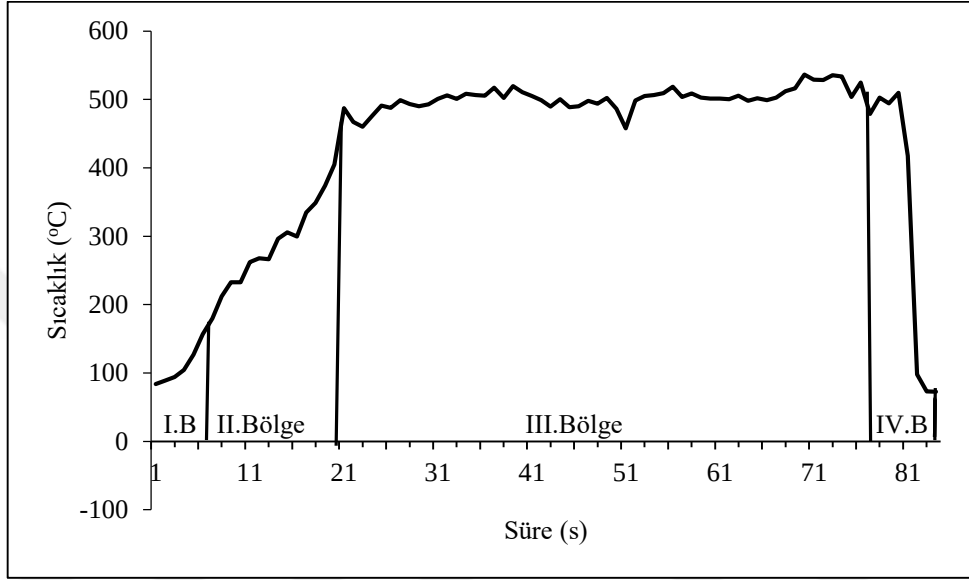
Şekil 4.47. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği

Kuvvet grafikleri incelendiğinde TiC takviyesi kullanılarak yapılan kaplamalarda ölçülen kuvvet aralığı 4000-6500 N iken B_4C takviyesi kullanılarak yapılan kaplamalarda ölçülen kuvvet aralığı 4000-7000N aralığındadır. B_4C takviyeli millerle yapılan kaplamalarda elde edilen kuvvetler TiC toz takviyeli millerle yapılan kaplamalarda daha fazla olmuştur. Elde edilen bu sonuç daha sert olan kaplamaların yumuşak altlık malzemesine bağlanabilmesi için daha yüksek kuvvetlere ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır. Kaplamanın sertliğinin artması eksenel kuvveti ve biriktirme esnasında altlığa transfer için gerekli enerjiyi artırır [60].

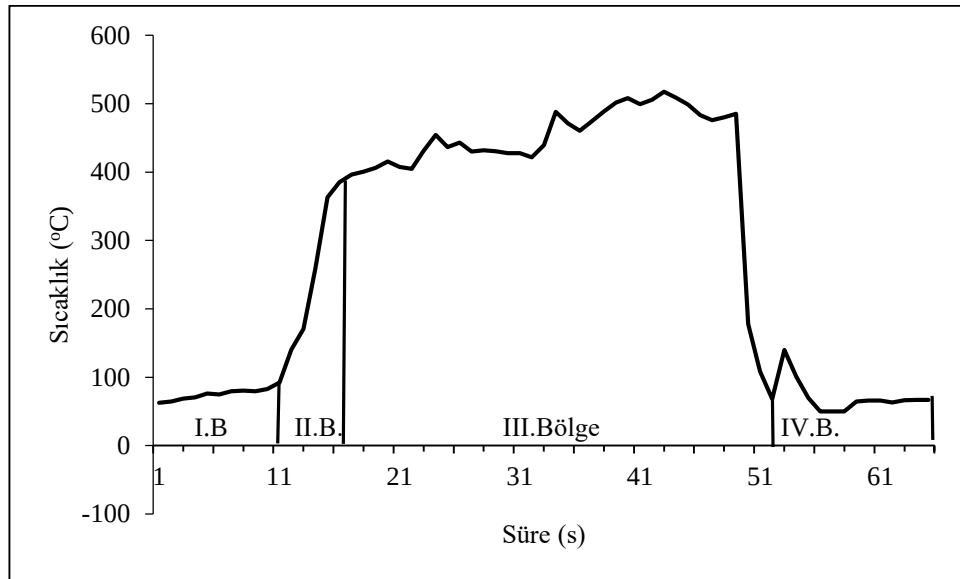
4.4. Kaplamaların Sıcaklık Ölçümleri

TiC ve B_4C toz takviyeli kaplamaların sıcaklık zaman değişim grafikleri Şekil 4.48 ve Şekil 4.49'teki grafikteki verilmiştir. Ayrıca tüm kaplamalara ait sıcaklık – zaman grafikleri Ek – 4'te verilmiştir. Şekil 4.48 ve Şekil 4.49'deki her iki grafik incelendiğinde, I. ve II bölge kaplama milinin yeterli sıcaklığa ulaşması sağlamak için iş parçası yaklaşarak temasa başladığı ve biriktirmeni henüz başlamadığı bölgedir. III. bölge kaplama milinin yeterli sıcaklığa ulaşması ile birlikte kaplama işlemin yapıldığı bölge olup her iki kaplamada da sıcaklık yaklaşık 517 ile 536 °C civarında değişmiştir. Yapılan tüm kaplamaların sıcaklık – zaman grafikleri incelendiğinde ise sıcaklığın 440 ile 627°C arasında değiştiği görülmektedir. IV. bölge kaplama milinin altlık malzemedan uzaklaştığı ve kaplama malzemesini soğumaya bırakıldığı bölgedir. Kuvvet grafiklerinde olduğu gibi önce artış eğilimi gözlenmiş daha sonra sıcaklık III. bölgenin başında yeniden kristalleşme sıcaklığına ulaşarak kaplama işlemi sonuna kadar bu civarda seyretmiştir.

%10-20-30 TiC toz takviyeli kaplamanın sıcaklığı kaplama anında 536°C'ye, %5-15-30 B₄C toz takviyeli kaplamanın sıcaklığı ise 517 °C'ye kadar yükselmiştir. Bu sıcaklıklar kaplama milinin altlık malzeme üzerine transferi için yeterli bir sıcaklık olmaktadır [58]. Hanke ve Santos [26] yaptıkları çalışmada kaplama sıcaklığının kullanılan malzeme çiftinin özelliğine göre dar bir aralıkta değiştiğini belirtmişlerdir.



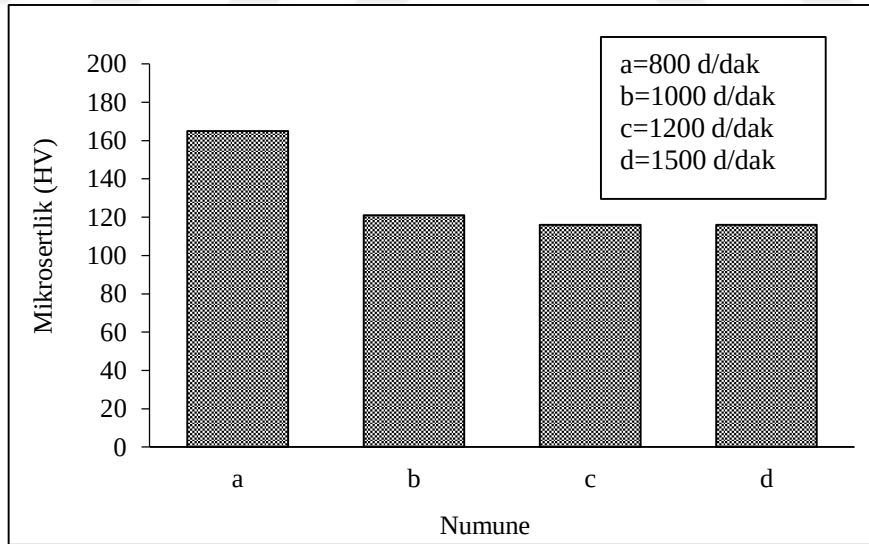
Şekil 4.48. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 2.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



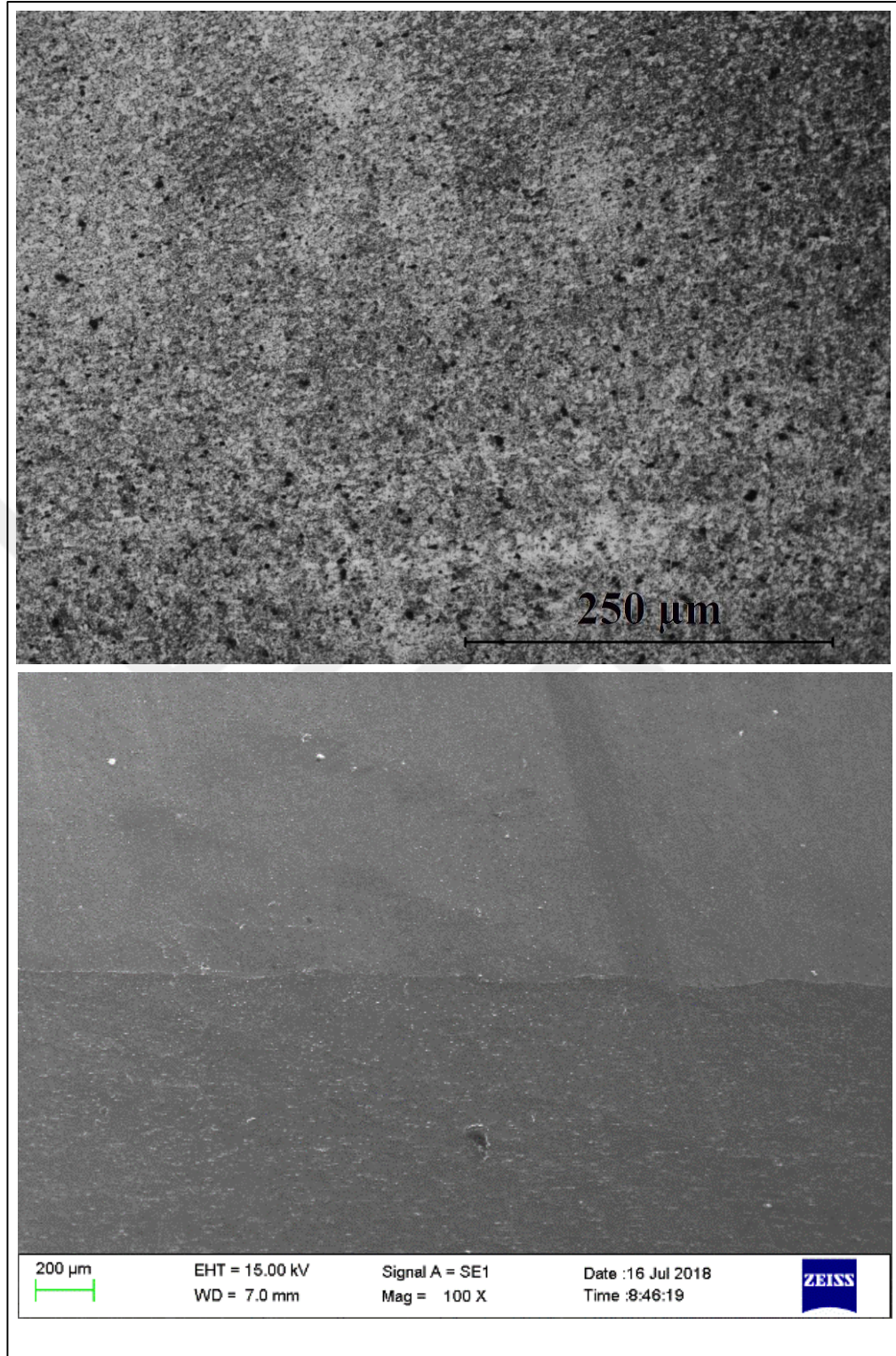
Şekil 4.49. %5-15-30 B₄C takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği

4.5. Mikro Sertlik İncelemeleri

Tek katlı toz ilavesiz kaplamalara ait mikro sertlik ölçümleri Şekil 4.50’de verilmiştir. Her bir ara yüzeyden en az 18 ölçüm alınmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınarak grafik çizilmiştir. Altlık malzemesinin kaplama öncesi mikro sertlik ölçümleri yapılmış ve 68 HV olarak elde edilmiştir. Şekil 4.50’ye göre 800 d/dak devir sayısı ile yapılan kaplamanın mikro sertliği 165 HV çıkarken 1000 d/dak ile yapılan kaplamanın mikro sertliği %26 daha düşük çıkarak 121 HV elde edilmiştir. 1200 d/dak ve 1500 d/dak ile yapılan kaplamaların mikro sertlik değeri ise 116 HV olarak ölçülmüştür. 800 d/dak devir sayısı ile yapılan kaplamanın mikro sertlik değerinin yüksek çıkmasının sebebi küçük taneli mikro yapının olmasıdır [96]. İncelen tane yapısı daha sert bir kaplama yapısının ortaya çıkmasına sebep olmuştur (Şekil 4.51). Çeşitli devirlerde altlık malzeme üzerine yapılan kaplamaların mikro sertlikleri karşılaştırıldığında 800 d/dak ile kaplanan numunenin mikro sertliği altlık malzemeye göre 2,4 kat; 1000, 1200 ve 1500 d/dak ile yapılan kaplamaların ise 1,7 kat arttığı görülmüştür. Karthik vd. [88] yapılan çalışmada da sürtünmeli kaplama yöntemi ile yapılmış kaplamaların mekanik özelliklerinin çok iyi olduğunu, çekme mukavemetinin arttığı ve sertliğinin yükseldiği belirtilmiştir. Ayrıca Rao vd. yaptıkları çalışmada sürtünmeli kaplama yöntemi ile yapılan kaplamada kaplama bölgesinden ölçülen sertlik miktarının altlık yüzeyinden alınan sertlik değerine göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [97].



Şekil 4.50. Tek katlı kaplamalı numunelerin yüzeylerinin mikro sertlik grafiği



Şekil 4.51. 800 d/dak ile yapılan numunenin a) optik mikroskop b) SEM görüntüsü

Toz serme ve üç katlı B₄C toz takviyesi ile yapılmış gradyanlı kaplamalara ait mikro sertlik ölçümleri Şekil 4.52, Şekil 4.53 ve Şekil 4.54’da verilmiştir. Mikro sertlik ölçümleri kaplamaların ara yüzeyinin altından ve üstünden ara yüzeye 0,5; 1 ve 1,5 mm uzaklıkta olacak şekilde bütün

katmanlardan alınmıştır (Şekil 3.7). Şekil 4.52’de toz serme yöntemi ile yapılan kaplamanın mikro sertlik değeri incelendiğinde, sertliğin, ara yüzeyin 0,5 mm üstünde 148 HV, 1 mm üstünde 154 HV, 1,5 mm üstünde ise 155 HV olduğu görülmüştür.

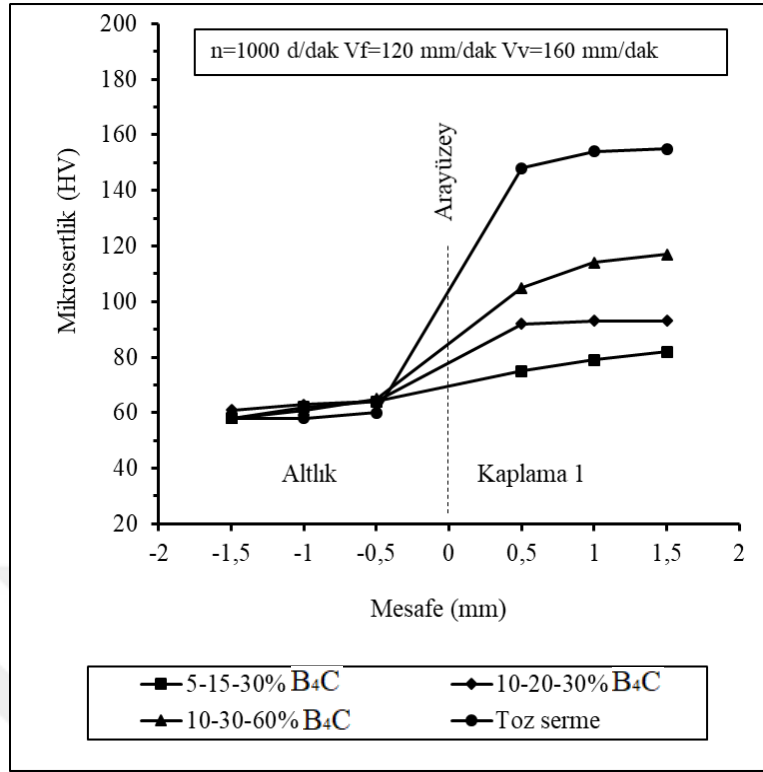
Şekil 4.52, Şekil 4.53 ve Şekil 4.54’deki gradyanlı kaplama grafikleri incelendiğinde toz oranının artması ile alt katmandan en üst katmana doğru sertlik değerinin giderek arttığı görülmektedir.

%5-15-30 B₄C takviyesi ile yapılan kaplamanın mikro sertlik değeri altlık malzemesinin ara yüzeyinin 0,5 mm altında 64 HV, ara yüzeyin 1 mm altında 62 HV, 1,5 mm altında ise 58 HV olarak elde edilmiştir (Şekil 4.52). Aynı takviye oranlı numunenin birinci kaplamasının ara yüzeyin 0,5 mm üstünde 75 HV, 1 mm üstünde 79 HV, 1,5 mm üstünde ise 82 HV olduğu görülmüştür. Şekil 4.53’de kaplama 1 ile kaplama 2 ara yüzeyindeki mikro sertlikleri ölçüldüğünde sertliğin artarak sırasıyla 88, 92 ve 96 HV olarak elde edilmiştir. Kaplama 2’deki sertlik ise kaplama 1 e göre %15 artarak sırasıyla 109 ve 110 HV olmuştur. Kaplama 2 - kaplama 3 ara yüzeyinde ise 110, 112 ve 115 HV olarak elde edilmiş olup en yüksek sertlikler, kaplama 3 yüzeyinde bir önceki kaplamaya göre % 40’lık bir artışla 145, 155 ve 162 HV olarak ölçülmüştür (Şekil 4.54).

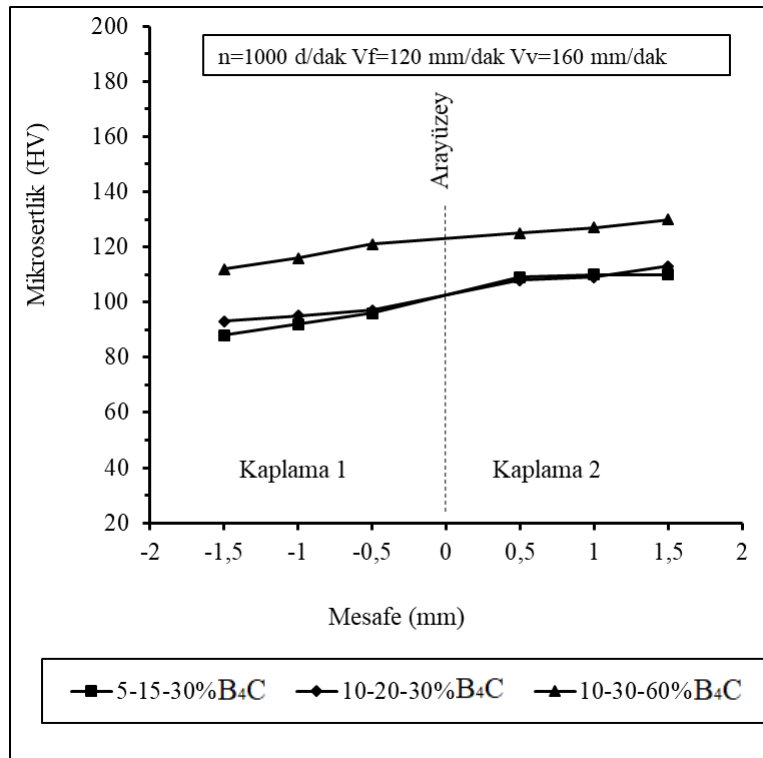
%10-20-30 B₄C takviyeli kaplamanın mikro sertlik değerleri incelendiğinde altlık bölgesinde 61, 63 ve 64 HV elde edilirken, 1. kaplama bölgesinde 92 ve 93 HV olarak elde edilmiştir (Şekil 4.52). Şekil 4.53’deki aynı takviye oranı ile yapılan kaplamada 1. Kaplama bölgesinde 93, 95 ve 97 HV, 2. kaplama bölgesinde 108,109 ve 113 HV değerleri ölçülmüştür. Aynı kaplamanın 3 kaplama bölgesinde ise yaklaşık %75 artarak ara yüzeyin 0,5 mm üstünde 155 HV, 1 mm üstünde ise 187 HV 1,5 mm üstünde ise 188 HV mikro sertlik değerleri elde edilmiştir (Şekil 4.54). Elde edilen bu sonuçlar kaplama işleminde kullanılan takviye tozlarının tabakalar arasında homojen dağıldığını ve alttan üste doğru sertliğin arttığı göstermektedir.

Şekil 4.52’da gösterilen %10-30-60 B₄C takviyeli kaplamanın altlık bölgesindeki sertlik değerleri ise 58, 61 ve 65 HV olarak ölçülmüştür. Takviye oranının artmasıyla altlık malzemenin sertliği de bir miktar artmıştır. Bunun sebebi, %10-30-60 takviye oranlarında yapılan kaplamalarda altlığın daha fazla sıcaklığa maruz kalması ve dolayısıyla ITAB bölgesinde meydana gelen ısı işlemin yapıyı sertleştirmesidir [11]. Aynı kaplamanın kaplama 1 kısmında ölçülen sertlik değerleri %10-20-30 B₄C toz ilaveli kaplamanın 1.kaplama bölgesine göre %20 daha fazla elde edilerek ara yüzeyin 0,5 ve 1 ve 1,5 mm üstünde sırasıyla 105, 114 ve 117 HV olarak ölçülmüştür.

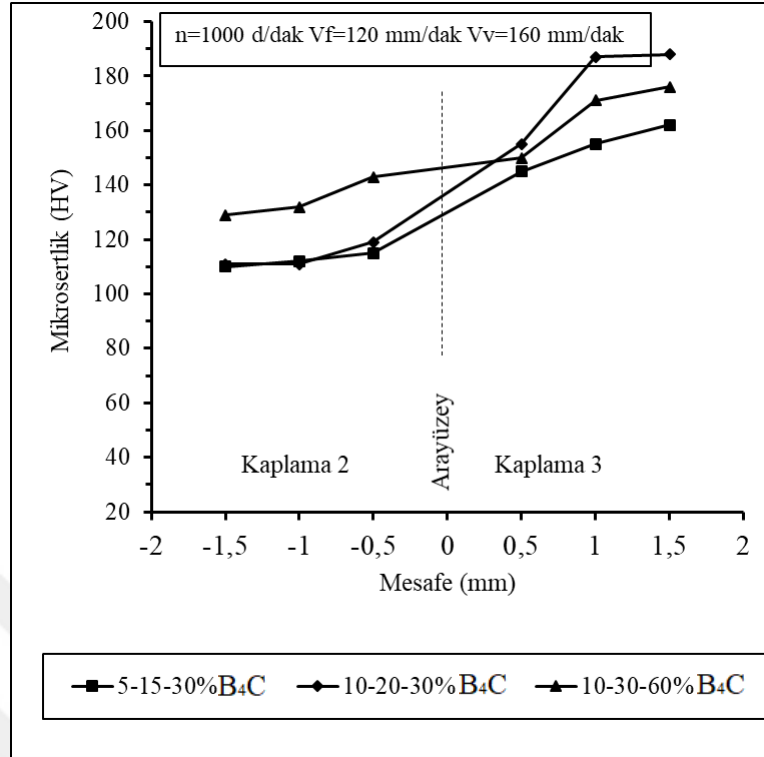
Şekil 4.53’deki %10-30-60 toz takviyeli kaplama incelendiğinde 1. kaplama bölgesinden elde edilen sertlik değerleri 112, 116 ve 121 HV, Şekil 4.54’te 2. kaplama bölgesindeki sertlik 129, 132 ve 143 HV ve 3. Kaplama bölgesinden ise yaklaşık % 20’lik bir artış göstererek 176 HV elde edilmiştir. B₄C toz takviyeli kaplamaların elde edilen sertlik ölçümlerine göre katman sayısı arttıkça sertlik de artmıştır [98].



Şekil 4.52. B₄C takviyesi kullanılarak yapılan kaplamaların altlık-kaplama1 ara yüzeyindeki mikro sertlik grafiği



Şekil 4.53. B₄C takviyesi kullanılarak yapılan kaplamaların kaplama1-kaplama2 ara yüzeyindeki mikro sertlik grafiği

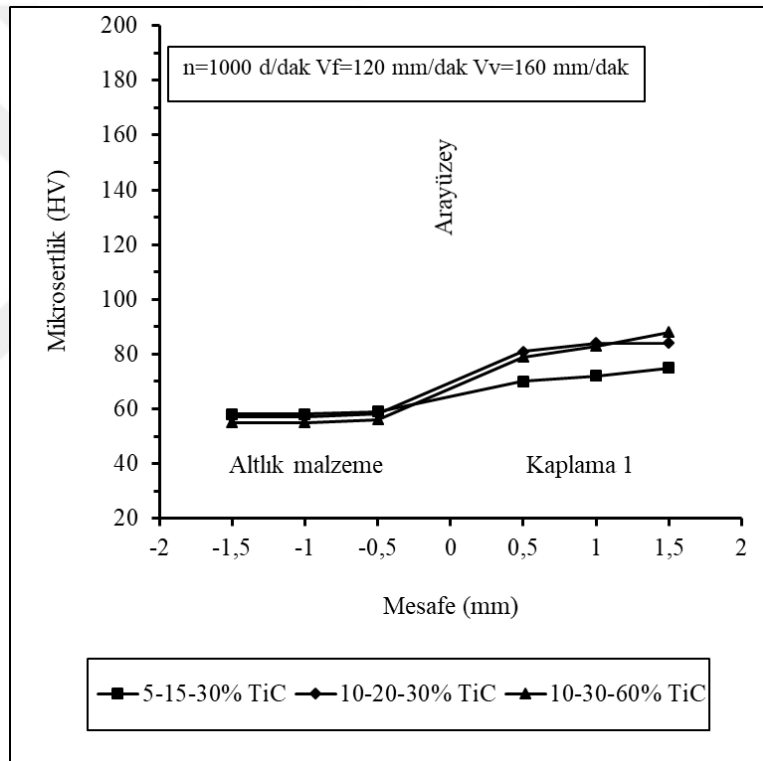


Şekil 4.54. B₄C takviyesi kullanılarak yapılan kaplamaların kaplama2-kaplama3 ara yüzeyindeki mikro sertlik grafiği

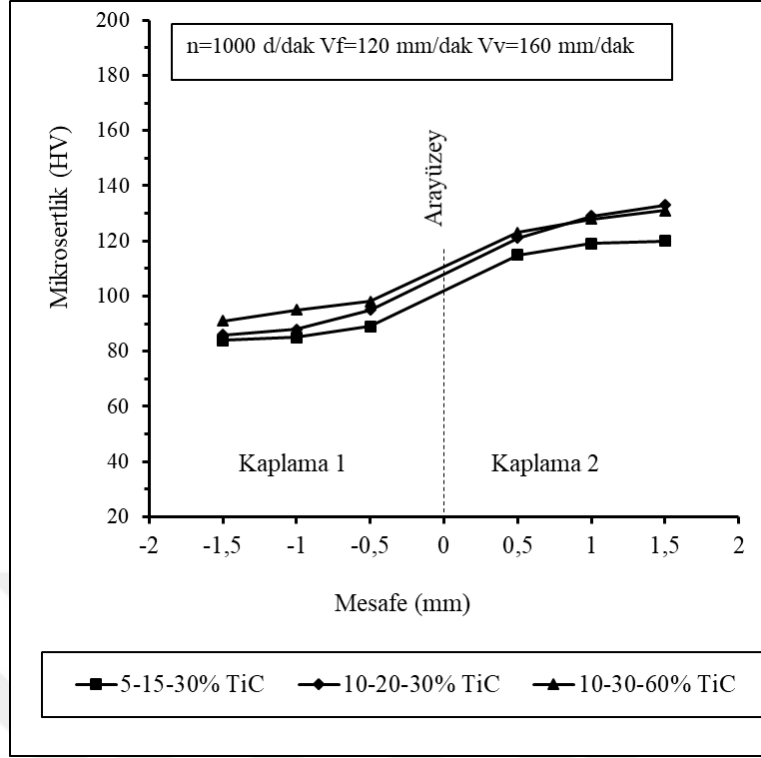
Şekil 4.55, Şekil 4.56 ve Şekil 4.57’te üç katlı TiC takviyesi kullanarak yapılmış kaplamalara ait mikro sertlik ölçümleri verilmiştir. Şekil 4.55’da %5-15-30 TiC takviye oranı ile yapılan kaplamanın altlık malzeme - kaplama 1 ara yüzey bölgesinden alınan sertlik değerleri incelendiğinde ara yüzeyin 0,5; 1 ve 1,5 mm altında 58, 58 ve 59 HV, ara yüzeyin 0,5; 1 ve 1,5 mm üstünde ise 70, 72 ve 75 HV değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.56’te %5-15-30 TiC takviye oranı ile yapılan kaplamanın mikro sertlik değerleri incelendiğinde kaplama 1 bölgesinde 84, 85 ve 89 HV değerleri, kaplama 2 bölgesinde ise %25’lik bir artış görülerek 115 ve 119 ve 120 HV değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.57 incelendiğinde kaplama 2 bölgesinden 126, 128 ve 135 HV, kaplama 3 bölgesinden ise 140, 151 ve 155 HV değerleri elde edilmiştir.

Şekil 4.55’da %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın altlık- kaplama 1 ara yüzeyi incelendiğinde altlık malzemesinin sertlik değerleri 57, 57 ve 58 HV, kaplama 1 bölgesinden ise 81, 84 ve 84 HV değerleri elde edilmiş olup, altlık ve 1.kaplama arasında yaklaşık %50’lik bir sertlik artışı meydana gelmiştir. Şekil 4.56’teki grafiğe göre %10-20-30 TiC takviye oranı ile yapılan kaplamaların kaplama 1 bölgesinden 86, 88 ve 95 HV, kaplama 2 bölgesinden ise %30’luk bir artışla 121, 129 ve 133 HV değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Şekil 4.57’de aynı oranla yapılan kaplamanın sertlik değerleri kaplama 2 bölgesinden 130, 132 ve 135 HV, kaplama 3 bölgesinden ise sertlik 158 159 ve 162 HV olarak ölçülmüştür.

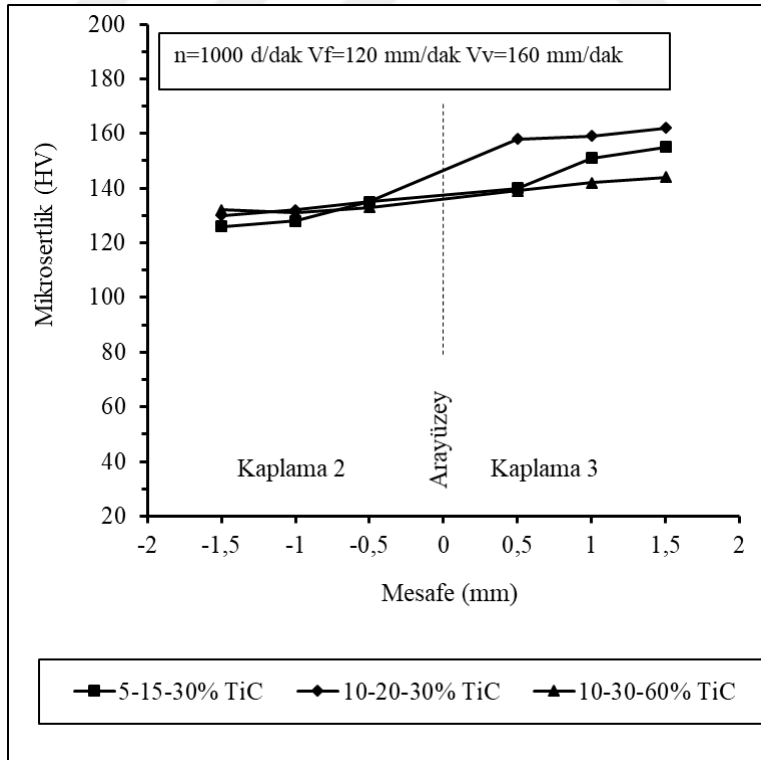
Şekil 4.55’de %10-30-60 TiC oranı ile yapılan kaplamanın altlık- kaplama 1 ara yüzeyinin 0,5; 1 ve 1,5 mm altında sırasıyla 55, 55 ve 56 HV, ara yüzeyin 0,5; 1 ve 1,5 mm üstünde ise sırasıyla 79, 83 ve 88 HV sertlik değerleri elde edilmiştir. İlk katmanda altlık malzemeye göre %50’lik bir sertlik artışı olmuştur. Şekil 4.56’te %10-30-60 TiC oranı ile yapılan kaplamanın ara yüzeyinden 0,5; 1 ve 1,5 mm altında sırasıyla 98, 95 ve 91 HV, ara yüzeyin 0,5, 1 ve 1,5 mm üstünde ise %30’luk bir artışla sırasıyla 123, 128 ve 133 HV sertlik değerleri elde edilmiştir. Şekil 4.57’de ise aynı kaplama oranı ile yapılan numunenin kaplama 2 – kaplama 3 ara yüzeyinden alınan sertlik değerleri verilmiş olup 0,5; 1 ve 1,5 mm altında 133, 131 ve 132 HV; 0,5; 1 ve 1,5 mm üstünde ise sertlik 139, 142 ve 144 HV olarak belirlenmiştir.



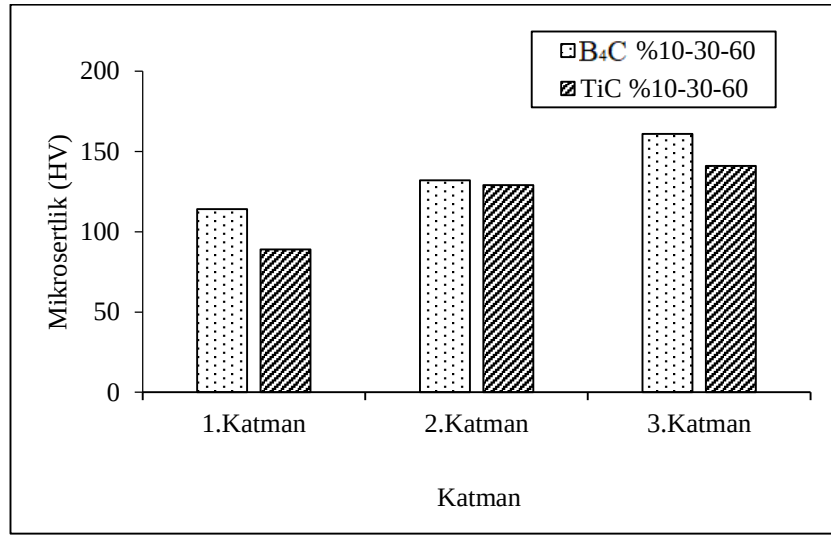
Şekil 4.55. TiC takviyesi kullanılarak yapılan kaplamaların altlık-kaplama1 ara yüzeyindeki mikro sertlik grafiği



Şekil 4.56. TiC takviyesi kullanılarak yapılan kaplamaların kaplama1-kaplama2 ara yüzeyindeki mikro sertlik grafiği



Şekil 4.57. TiC takviyesi kullanılarak yapılan kaplamaların kaplama2-kaplama3 ara yüzeyindeki mikro sertlik grafiği



Şekil 4.58. %10-30-60 TiC ve B₄C takviyeli gradyanlı kaplama yapılmış numunelerin mikro sertliklerinin katman bazında karşılaştırılması

Her iki takviye malzemesi ile yapılan kaplamalarda altlık malzeme ile kaplamanın birinci katmanı arasında yaklaşık %50'lik, altlık malzeme ile en üst katman arasında yaklaşık %300'lük bir sertlik artışı görülmüştür. Bununla birlikte takviye oranının artmasına bağlı olarak katmanlar arasındaki geçişlerdeki mikro sertlik değerleri takviye miktarı ile aynı oranda artmamıştır. Bu düzensizliğin nedeni kaplamalar arasındaki ısıdan etkilenen ITAB bölgeleri, kaplama sırasında takviye tozunun tam homojen dağılmaması ve buna bağlı olarak homojen olmayan bölgelerden alınan mikro sertlik ölçümleridir [2]. TiC takviyeli kaplamalarda gradyan artışı dikkate alınarak değerlendirme yapılacak olursa, en fazla gradyan artışının olduğu %10-30-60 TiC takviyeli kaplamaların en yüksek sertliğe sahip olması beklenirken en yüksek sertlik artışı %10-20-30 TiC takviyeli kaplamalarda elde edilmiştir. Aynı durum B₄C takviyeli gradyanlı kaplamalarda da mevcuttur. Gradyan artışının hızlı olması (%10-30-60), mikro sertlik değerini aynı oranda arttırmamıştır. Şekil 4.34'teki mikro yapı SEM görüntüleri incelendiğinde üçüncü katmandaki takviye tozlarının bir alt katmanda yoğunlaştığı görülmüştür. Bu yoğunlaşma mikro sertlik ölçümlerini de etkilemiş ve mikro sertlik artışı beklenen düzeyde elde edilememiştir. Ayrıca % 10-30-60 toz takviyeli kaplamaların üçüncü katmanındaki sertlik artışının yeterli seviyede olmamasının bir diğer sebebi yapıda meydana gelen aşırı boşluklardır (Şekil 4.30). Bu sebeple gradyanlı kaplamalarda gradyan artışının yavaş kademelendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Şekil 4.60, Şekil 4.61 ve Şekil 4.62'te farklı oranlarda B₄C ve TiC toz takviyeli kaplamaların aşınma yollarına göre aşınma miktarları karşılaştırılmıştır. %5-15-30, %10-20-30 ve %10-30-60 oranlarında takviye tozu kullanılan her üç grafik de incelendiğinde TiC ilaveli kaplamaların B₄C ilaveli kaplamalara göre daha fazla aşındığı belirlenmiştir. Bunun sebebi B₄C malzemesinin TiC

malzemesine göre sertlik gibi mekanik özellikler bakımından daha iyi olmasıdır [99]. Ayrıca %5-15-30 ve %10-20-30 toz takviye oranları ile yapılan numunelerde aşınma yolu arttıkça aşınma miktarı lineer olarak artarken %10-30-60 oranında yapılan kaplamalarda bu lineerlik bozulmuştur. (Şekil 4.62). Takviye oranının aşırı artması kaplamanın homojenliğini etkileyerek takviye tozlarının bölgesel olarak birikmesine sebep olmuştur (Şekil 4.25b)

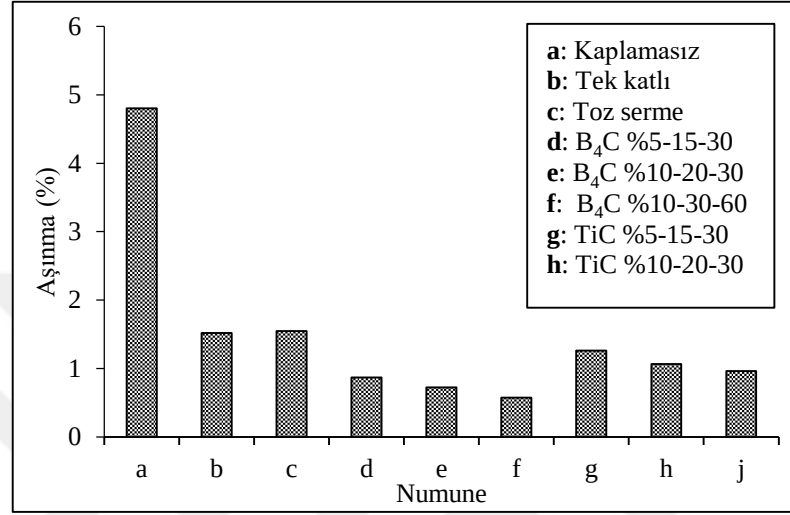
4.6. Aşınma Deneyleri

Şekil 4.59’te altlık malzemenin, toz ilavesiz tek katlı ve toz ilaveli gradyanlı kaplamaların 900 m aşınma yolu için % aşınma miktarları verilmiştir. Aşınma deneyleri sonucunda altlık malzemenin aşınma oranı % 4,8 elde edilirken tek katlı ve toz ilavesiz yapılan kaplamanın %1,52 elde edilmiştir. Toz ilavesiz kaplamanın % aşınma miktarı altlık malzemeye göre 3,2 kat azalmıştır. Toz serme yöntemi ile yapılan kaplamanın % aşınma oranı ise tek katlı toz ilavesiz kaplamaya yakın bir değer olup %1,55 elde edilmiştir. B₄C ilaveli toz serme metodu ile yapılan kaplamanın aşınma oranı altlık malzemeye göre düşük çıkarken toz ilavesiz kaplamaya göre önemli bir değişiklik göstermemiştir. Bunun nedeni toz serme metodundaki toz takviyelerini homojen dağılmaması ve aşınma deneyleri esnasında mekanik kopmaların meydana gelmesidir.

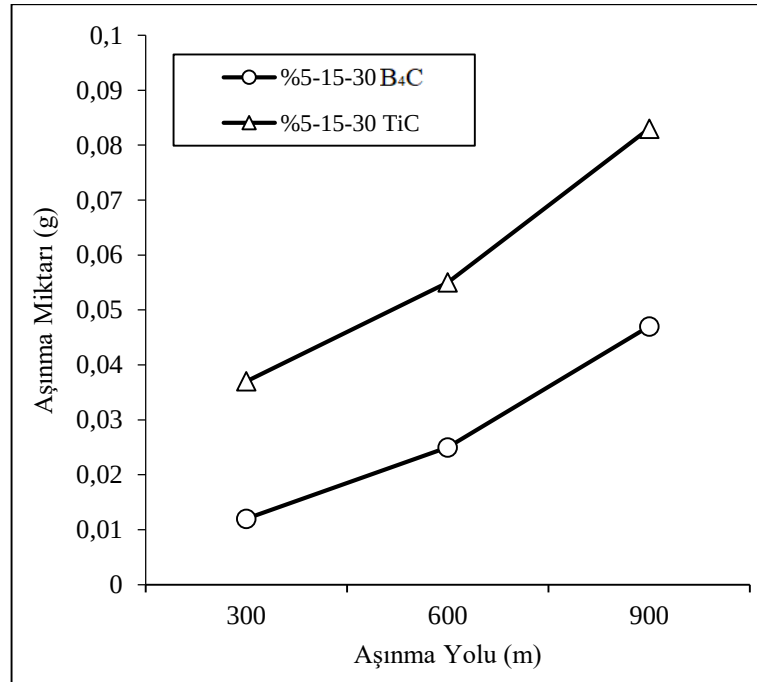
B₄C takviyeli kaplamaların % aşınma değerlerine incelendiğinde takviye oranı arttıkça % aşınma değerinin düştüğü görülmüştür (Şekil 4.59). %5-15-30 takviye oranı ile yapılan kaplamanın aşınma değeri % 0,87, %10-20-30 takviye oranı ile yapılan kaplamanın aşınma değeri %15’lik bir düşüşle % 0,72 ve %10-30-60 ile yapılan kaplamanın aşınma değeri ise %5-15-30 oranı ile yapılan kaplamaya göre %30’luk bir düşüşle % 0,57 elde edilmiştir. B₄C takviyeli kaplamaların aşınma değerleri altlık malzeme ile kıyaslandığında yaklaşık olarak 5 kat azalmış, toz ilavesiz tek katlı ve toz serme yöntemi ile yapılan kaplamalara göre yaklaşık 1,5 kat azalmıştır.

TiC takviyeli %5-15-30 oran ile yapılmış kaplamanın aşınma miktarı % 1,26 iken, %10-20-30 takviye oranı ile yapılmış kaplamanın aşınma miktarı % 1,07 elde edilmiştir (Şekil 4.59). %10-30-60 takviye oranı ile yapılan kaplamanın aşınma miktarı ise azalarak % 0,96 elde edilmiştir. Her iki takviye malzemesi ile yapılan kaplamada kullanılan takviye oranları artması % aşınma miktarını düşürmüştür. Hem TiC hem de B₄C toz takviyeli kaplamalarda toz takviye oranının artması % aşınma oranını düşürmüş olup en iyi aşınma oranı B₄C toz takviyeli kaplamalarda elde edilmiştir (Şekil 4.59). B₄C takviye malzemesinin kaplama milinin hem takviye oranının artması hem de ısıtıl işlem sonucu daha sert olması, aşınma miktarını düşürmüştür [96]. Ayrıca kaplama esnasında sıcaklığının 450°C’nin üzerine çıkması Al alaşımı olan altlık ve kaplama milinde faz dönüşümlerini meydana getirmektedir. Bu durum aşırı ısınma ve soğuma çevrimi oluşturarak ara yüzeydeki yapılarda ITAB, TEB, DKB ve daha sonraki zamanlarda yaşlanma ortaya çıkarmaktadır [60]. Ayrıca hem kaplama esnasında oluşan deformasyon hem de ani ısınma ve soğuma yeni

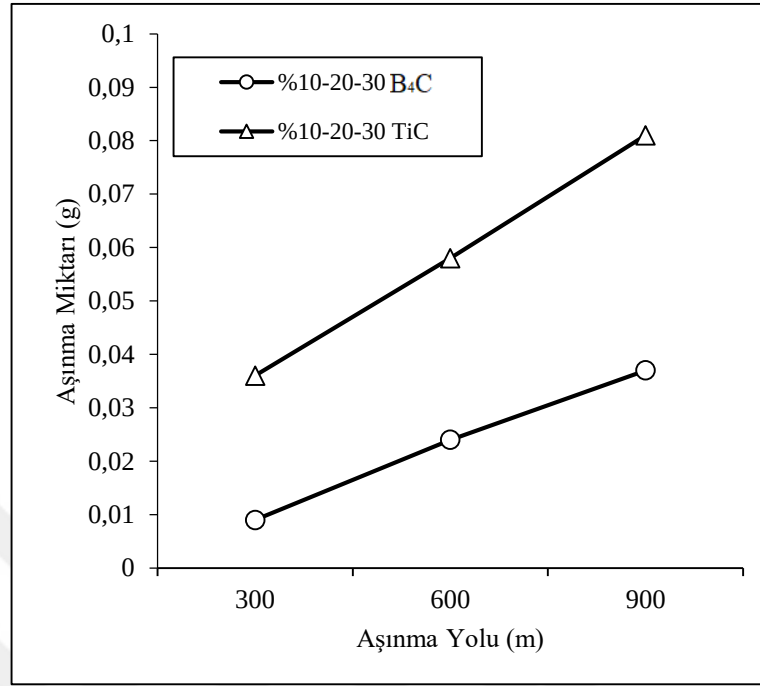
dislokasyonlarının oluşmasına sebep olur. Yeni dislokasyonlar yaşlanma sonucu tane içerisinde oluşan çökeltiler tarafından birbirini engelleyerek alaşımın mukavemetinin artmasına ve aşınma direncinin yükselmesine sebep olur [100]. Aynı durum takviyesiz numuneler içinde geçerli olduğu için takviyesiz numunelerin de aşınma direnci altık malzemeye göre artmıştır.



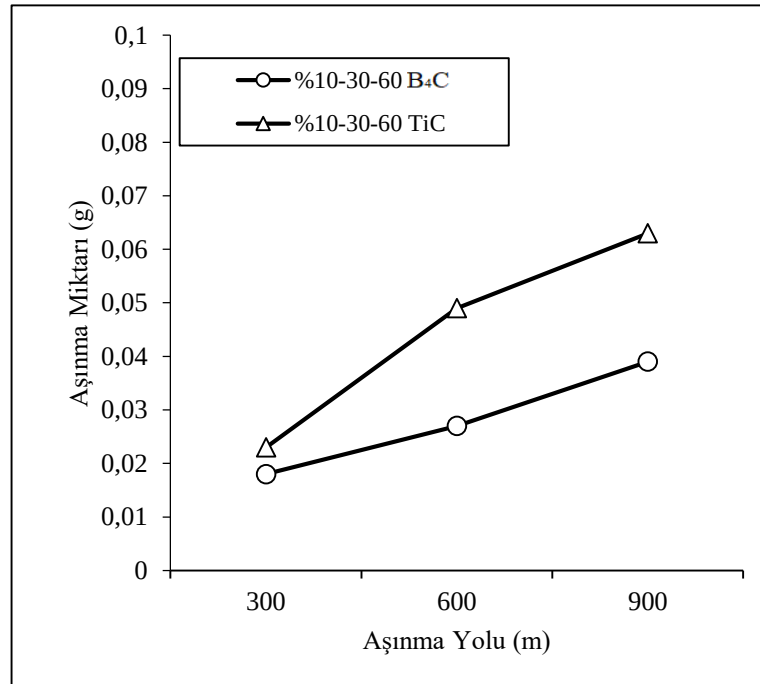
Şekil 4.59. Kaplamasız ve kaplamalı numunelerin aşınma grafiği



Şekil 4.60. %5-15-30 B₄C ve %5-15-30 TiC takviyeli kaplamaların aşınma yolu ile aşınma miktarının değişimi



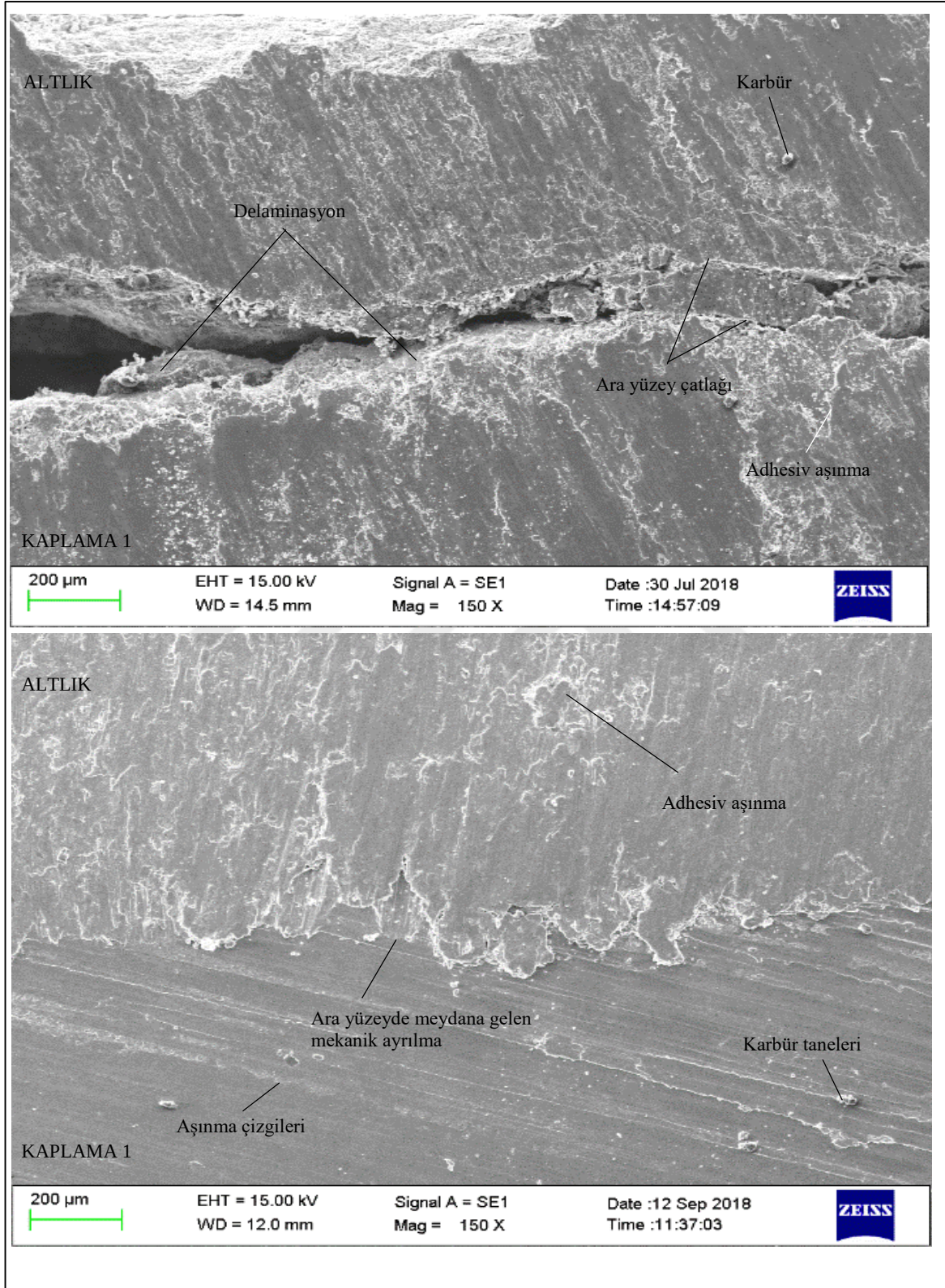
Şekil 4.61. %10-20-30 B₄C ve %10-20-30 TiC takviyeli kaplamaların aşınma yolu ile aşınma miktarının değişimi



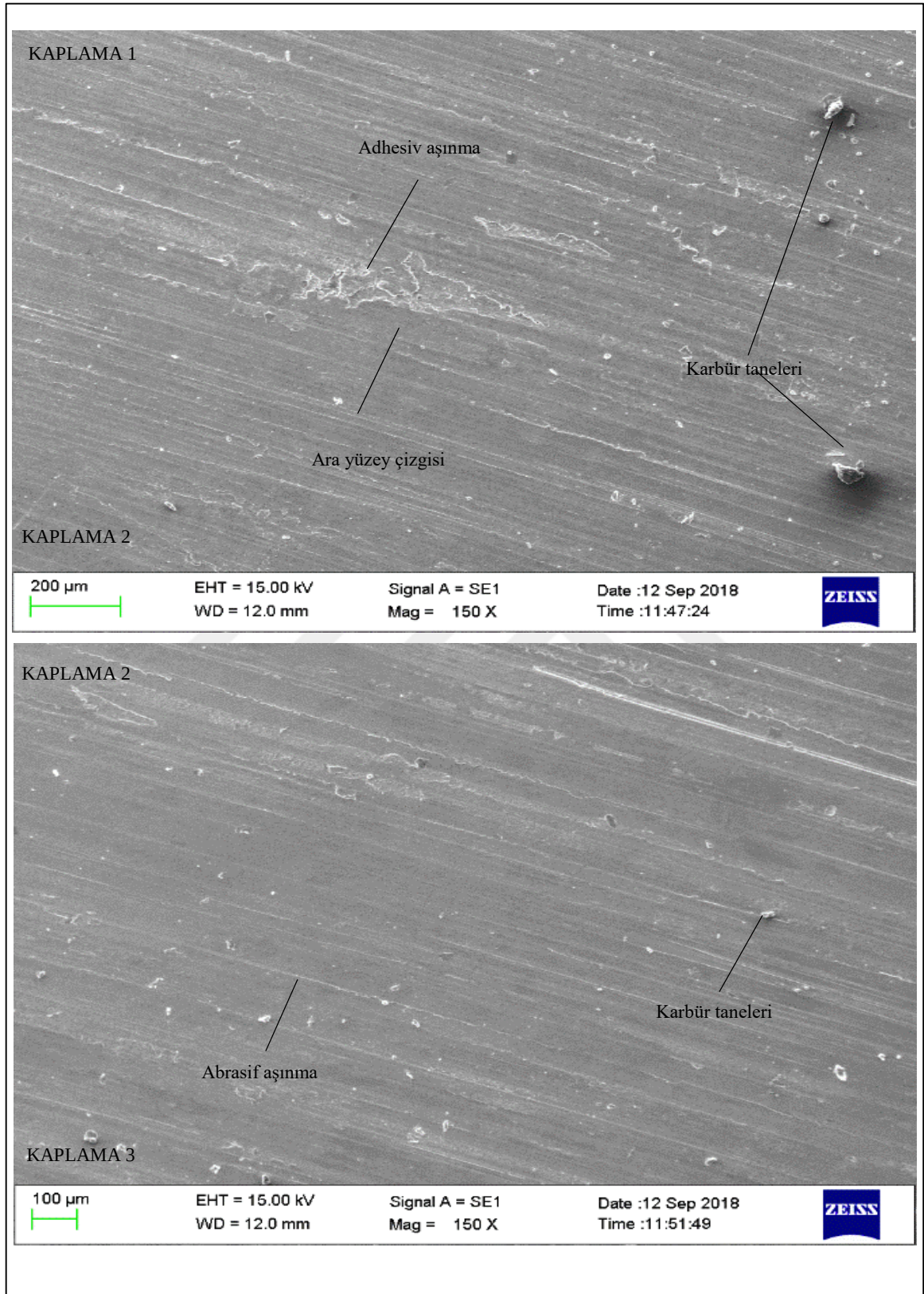
Şekil 4.62. %10-30-60 B₄C ve %10-30-60 TiC takviyeli kaplamaların aşınma yolu ile aşınma miktarının değişimi

%5-15-30 B₄C takviyeli kaplamaların aşınmış yüzeylerin SEM görüntülerinde, farklı aşınma mekanizmalarının mevcut olduğu görülmüştür (Şekil 4.63a). Altlık ve 1. katman ara yüzeyinde kopmalar ve abrasif aşınmayla birlikte adhesif aşınma bölgeleri, altlık ve kaplama ara yüzeyinde çatlak ve delaminasyon bölgeleri ve dolayısıyla katmanlar arasında açılmalar mevcuttur. Aşınma deneylerinde malzemeye uygulanan düşey doğrultudaki yük ve zıt yönde oluşan sürtünme kuvveti pürüzlü yüzey boyunca kaplamada anlık değişen çekme ve basma gerilme alanları oluşturur [60]. Bu gerilme alanları kaplamanın farklı fazlarının olduğu yerlerde gerilme yığılmaları oluşturarak boşluklar meydana getirir. Düzensiz yapı içerisindeki mevcut çatlaklar ya da değişken yüklerden dolayı oluşan boşluklar daha büyük çatlaklara dönüşerek ilerler ve sonuçta kaplama yüzeyi doğrultusunda delaminasyonların ortaya çıkmasına sebep olur. Ayrıca B₄C takviyeli kaplamalarda sert olan kaplama tabakasında abrasif aşınma, altlıkta ise adhesif aşınma görülmüştür (Şekil 4.63a). Kaplama ile altlık arasındaki sertlik farkının fazla oluşu, kaplama tabakası altlıktan tamamen ayrılmasına ve boşluklar meydana getirmesine sebep olmuştur. TiC takviyeli kaplamalarda ise aynı şekilde altlık tarafında adhesif aşınma görülürken, kaplama tarafında abrasif aşınma görülmüştür. Ancak aşınma sonrası ara yüzey görüntülerinde kaplama, altlık ara yüzeyinde boşluk oluşumundan kaynaklı mekanik ayrılmalar meydana gelmiş ve altlık malzemesinin kaplama üzerine sıvandığı da görülmüştür (Şekil 4.63b). Bu durum birleşmenin tam oluşmadığı sert katmanlarda, daha fazla oluşarak kaplama katmanlarının birbirinden kaplama hattı boyunca ayrılmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte daha yumuşak olan alüminyum matrisinden küçük B₄C partikülleri koparak ayrılması sonucu aşınmalar meydana gelir. Aşınma yolu arttıkça stabil aşınma meydana geldiği, kaplamada mevcut olan yumuşak ve düşük ergime sıcaklığına sahip alüminyum matrisi sürtünme ve ısınmadan dolayı viskoplastik olarak yüzeye sıvanmış ve adhesif aşınma bölgelerini oluşturduğu görülmüştür (Şekil 4.63). Aşınma deneyi esnasında hangi aşınma mekanizması mevcutsa, aşınmış yüzeyin mikro yapısı ve buna bağlı olarak % aşınma miktarları da buna bağlı olarak değişir [60]. Şekil 4.63a'da gösterilen B₄C takviyeli kaplamanın aşınma mekanizması Stachowiak vd. tarafından ortaya atılan delaminasyon teorisi ile uyumlu olduğu görülmektedir [45].

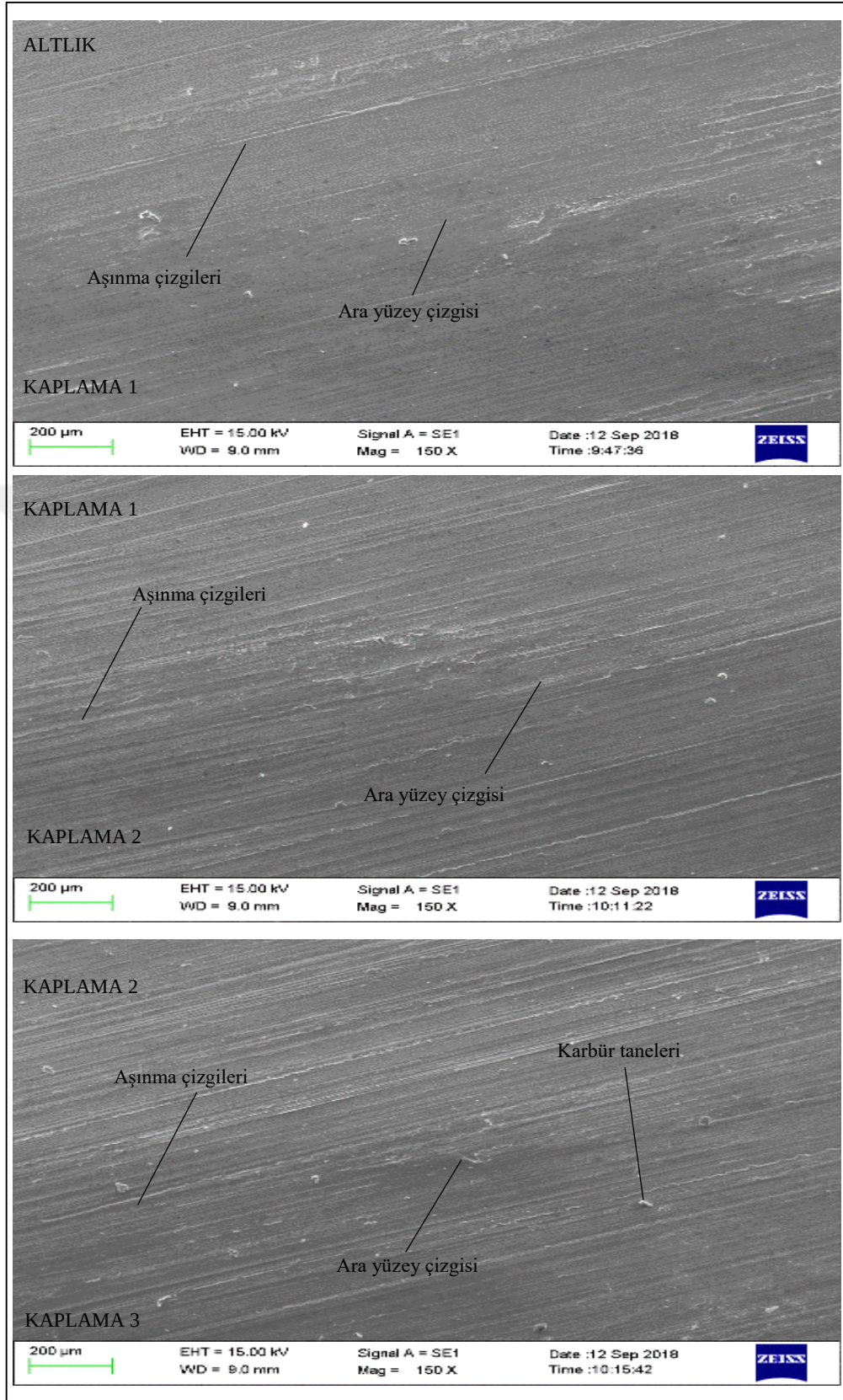
Hem TiC hem de B₄C kaplamalarda kaplama katman sayısı arttıkça aşınma mekanizmasında değişiklikler oluşmuştur (Şekil 4.63 ve Şekil 4.64). Altlıkta genellikle adhesif aşınma mekanizması mevcut iken kaplama kısmında abrasif aşınma mekanizması etkin hale gelmiştir (Şekil 4.63b). Kaplamaların katman sayısı arttıkça ayrılma görülmezken sertliğe bağlı olarak abrasif aşınma mekanizmalarının daha fazla olduğu görülmüştür (Şekil 4.64). Aşınma deneyleri sonucunda en iyi ara yüzey görüntüleri %10-20-30 B₄C takviyeli gradyanlı kaplamadan alınmıştır (Şekil 4.65). Bu görüntülerde hem ara yüzey birbiri içine çok iyi geçmiş hem de aşınma karakteristiği olarak abrasif aşınmanın etkin olduğu görülmüştür.



Şekil 4.63. %5-15-30 a) B₄C ve b) TiC takviyeli kaplamanın altlık- kaplama 1 ara yüzeyinin aşınma deneyi sonrası SEM görüntüsü



Şekil 4.64. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın a) Kaplama 1-kaplama 2 ara yüzeyinin b) Kaplama 2-kaplama 3 ara yüzeyinin aşınma deneyi sonrası SEM görüntüsü

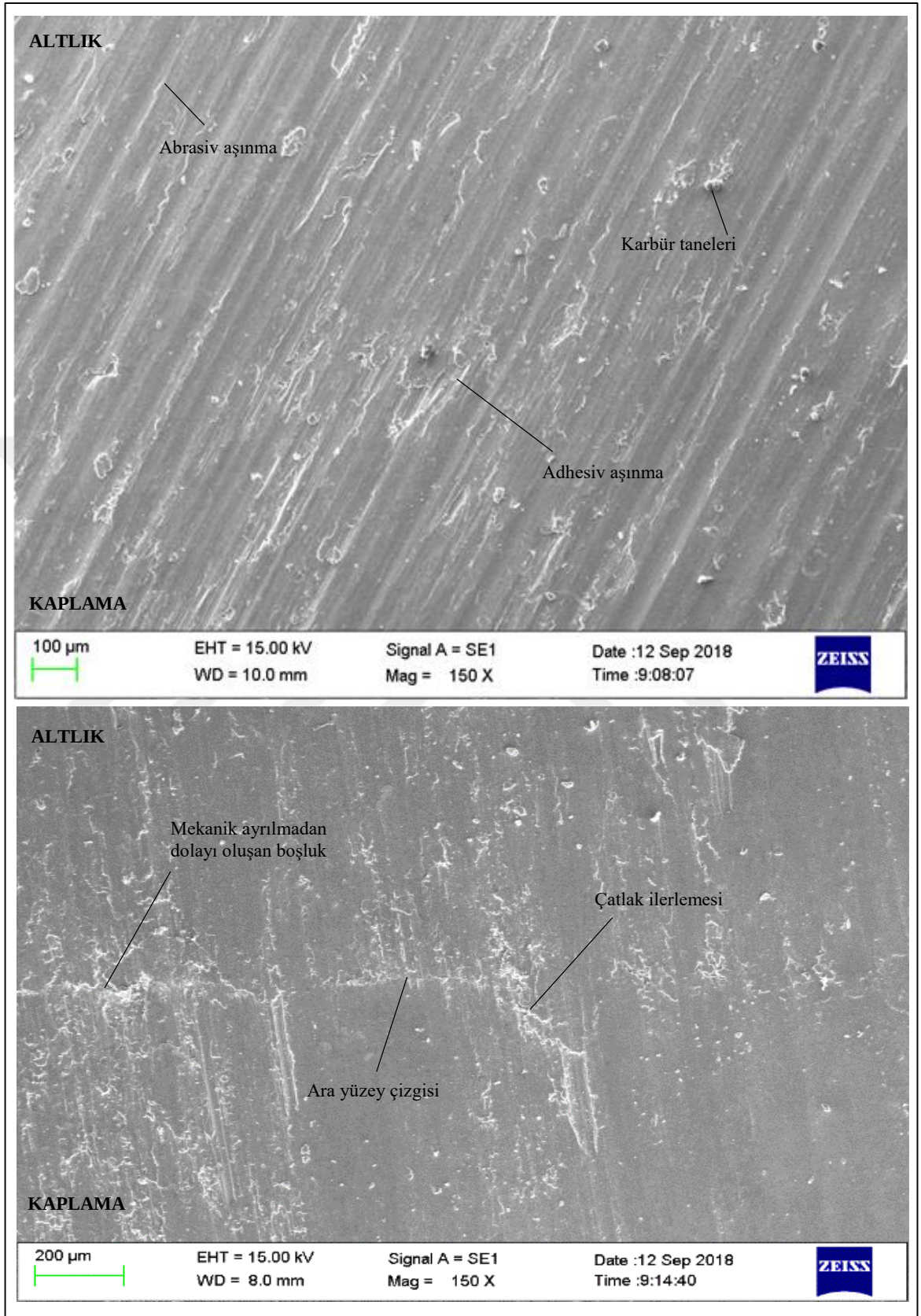


Şekil 4.65. %10-20-30 B₄C takviyeli kaplamanın ara yüzeyinin aşınma deneyi sonrası SEM görüntüsü a) Altlık-kaplama 1, b) Kaplama 1-kaplama 2 c) Kaplama 2-kaplama 3

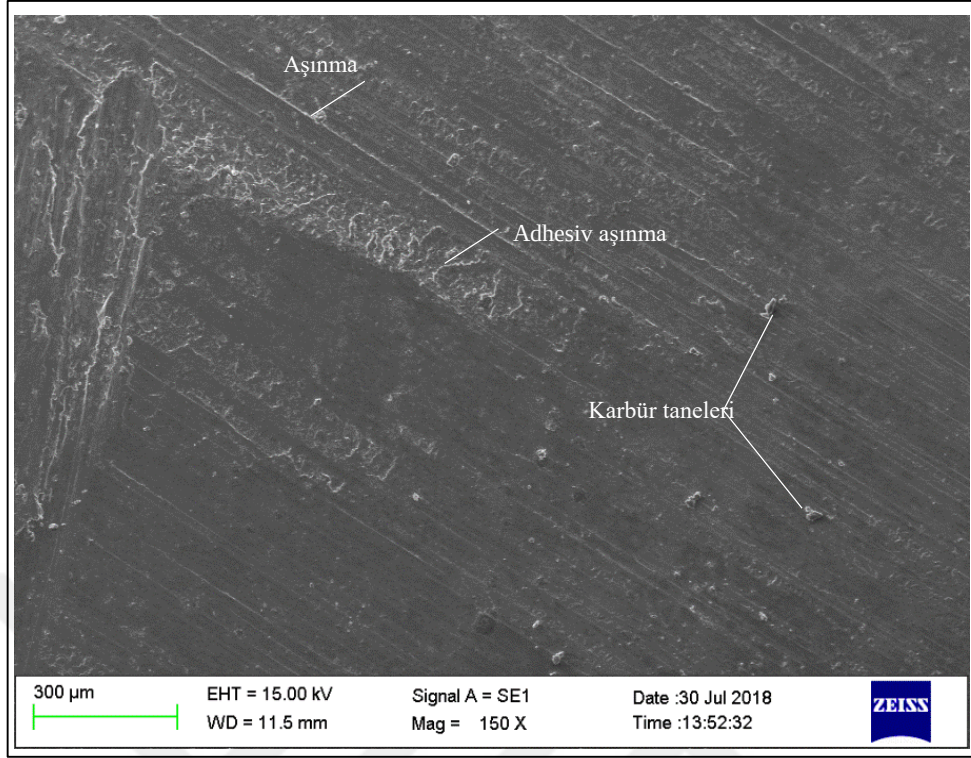
%10-20-30 TiC takviyeli numunenin SEM görüntüsünde altlık malzeme ile 1. kaplama ara yüzeyinde bölgesel olarak mikro boşluğun olduğu görülmektedir (Şekil 4.34). Yapı içerisinde bulunan bu boşluk değişken yükler altında çatlak başlangıcı gibi davranarak aşınma mekanizmasını da etkilemiştir. Dolayısıyla TiC takviyeli kaplamalardaki en yüksek aşınma kaybı bu kaplamada elde edilmiştir. Şekil 4.38'deki %10-30-60 TiC toz takviyeli kaplamaların XRD faz analizine göre yapıda $AlMg_4Zn_{11}$, TiC ve Fe_2Ti fazları bulunmaktadır. Sürtünmeli kaplamalarda alüminyum matrisi içerisindeki titanyum karbür, kaplamanın mukavemeti artırmakta ve sünekliği azaltmaktadır [88]. TiC aşınma direnci yüksek sert bir fazdır. Kaplama içindeki TiC partikülleri alüminyum alaşım matrisinin plastik deformasyon bölgesi içindeki dislokasyonların ilerlemesini bozarak aşınmaya karşı kaplama direncini artırmaktadır [60]. Şekil 4.67'de aşınma sonrası SEM görüntüleri incelendiğinde 3 boyutlu abrasiv aşınma, adhesiv aşınma ve ayrılmalar görülmektedir. SEM görüntülerindeki aşınma bölgeleri incelendiğinde (Şekil 4.63) TiC takviyeli kaplamalarda adhesiv aşınmanın bölgelerinin B_4C takviyeli kaplamalara göre daha az olduğu, buna karşılık abrasif aşınma çizgilerinin yoğun olduğu görülmüştür.

Üretim yönteminin değişmesiyle aşınma sonrası elde edilen yüzey görüntülerinde de farklılıkların olduğu görülmüştür (Şekil 4.66). Toz serme yöntemiyle üretilen numunelerin ara yüzeyinde mekanik çözülmelerden dolayı oluşan çatlakların kaplama hattı boyunca ilerlediği belirlenmiştir. İlerleyen çatlak daha sonra yön değiştirip kaplamanın içinde ve kaplama hattına dik bir şekilde yönelmiştir.

Şekil 4.67'teki aşınma sonrası SEM görüntülerinde TiC toz takviyesinin homojen dağılmaması dengesiz bir aşınma durumunu ortaya çıkarmış ve stabil aşınma durumunu ortadan kaldırmıştır. Ayrıca ana matristen kopan TiC partikülleri yüzey üzerinde yuvarlanarak 3 boyutlu aşınma çizgilerini oluşturmuştur.



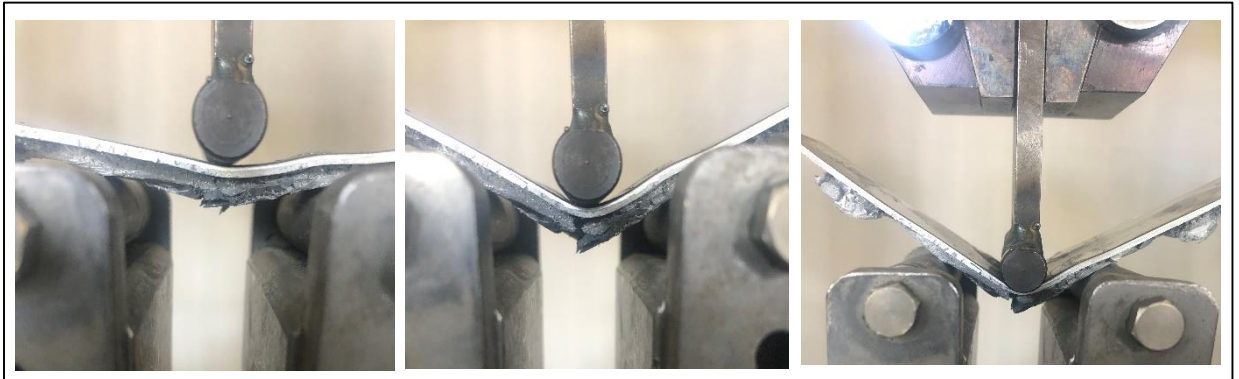
Şekil 4.66. a)1200 d/dak devir sayısında tek katlı toz ilavesiz yapılan b) B₄C toz serme yöntemi ile yapılan takviyeli numunenin aşınma deneyi sonrası altlık-kaplama ara yüzeyinin SEM görüntüsü



Şekil 4.67. %5-15-30 TiC tozu takviyeli numunenin birinci katmanının aşınma deneyi sonrası SEM görüntüsü

4.7. Eğme Testi

B₄C ve TiC takviyeli gradyanlı kaplamaların katmanlar arası yapışma özelliklerini belirlemek için deney numuneleri üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Eğme testi UTEST marka test cihazda ASTM-E290 standardına uygun olarak hem altlık hem de kaplama numunelerine ayrı ayrı yapılmıştır. Test işlem aşamaları Şekil 4.68’te ve makro görüntüler ise Şekil 4.69 ve Şekil 4.70’de verilmiştir.

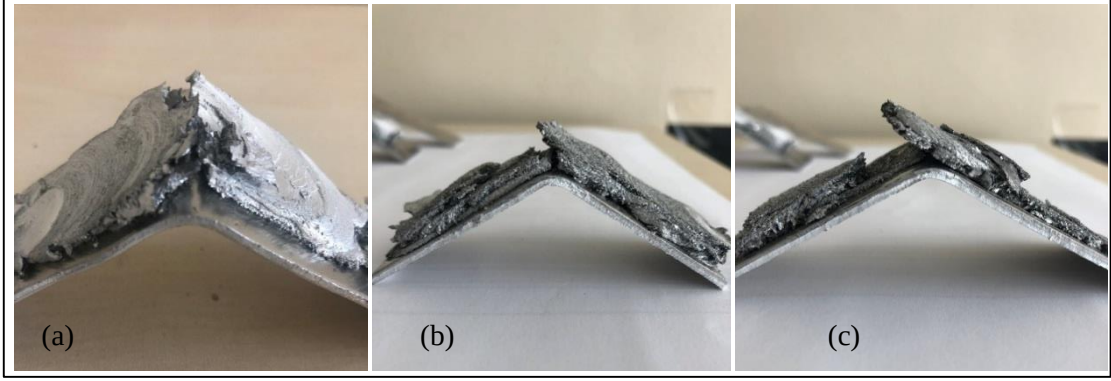


Şekil 4.68. Üç nokta eğme testinin aşamaları

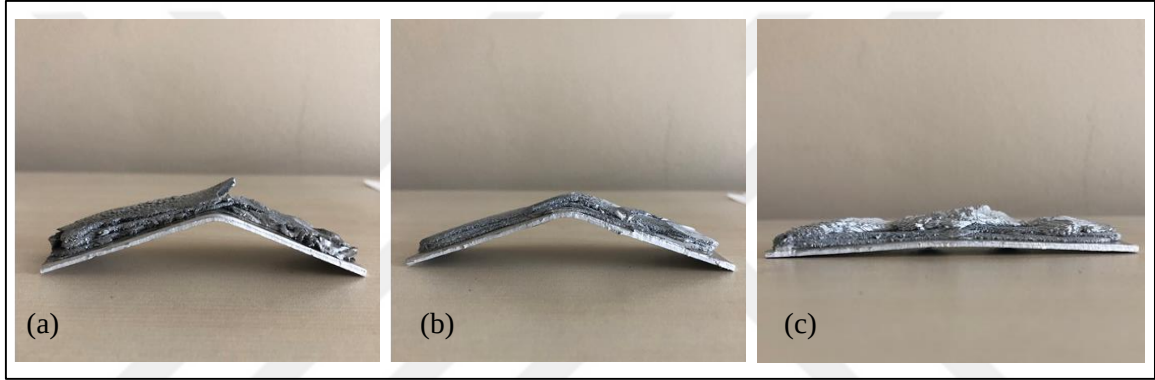
Altlık malzemeye yapılan eğme deneylerinde ilk çatlak oluşumu 10° 'de başlamış ve artan yük ile birlikte kopma 800 N'da meydana gelmiştir [101]. B_4C toz takviyeli kaplamaların eğme testlerinde ilk çatlak oluşumu altlık malzemedeki gibi 10° 'de başlamış olup %5-15-30 B_4C toz takviyeli kaplamalarda kopma 3000 N'da olmuştur. %10-20-30 toz takviyeli kaplamada kopma 3500 N'da gerçekleşirken %10-30-60 B_4C toz takviyeli kaplamada kopma 1200 N'de meydana gelmiştir (Şekil 4.71). Bu sonuçlara göre mikro yapı ve sertlik değerlerine paralel olarak en iyi yapışma özelliği %10-20-30 B_4C toz takviyeli kaplamanın olduğu görülmüştür (Şekil 4.30 ve Şekil 4.59). %5-15-30 ve %10-30-60 toz takviye oranına sahip kaplamaların yapışma özelliklerinin istenen seviyede olmaması katmanlar arası gradyan oranı artışının hızlı olmasından kaynaklanmaktadır. Gradyan oranının hızlı bir şekilde artırılması diğer özelliklerde olduğu gibi katmanlar arası yapışma özelliğini de olumsuz yönde etkilemiştir.

Şekil 4.69'da B_4C takviye tozu ile yapılan kaplamaların eğme testi sonrası makro fotoğraflarına göre %10-20-30 takviye oranı ile yapılan kaplamadaki ayrılma, kuvvetin uygulandığı eğme noktasında gerçekleşmiştir. Kopma ve ayrılmaların kuvvetin uygulandığı noktaya yakın olması tabakalar arası yapışmanın iyi olduğunu göstermektedir. Rafi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmaya [3] benzer olarak, ayrılmalar kuvvet uygulanan bölgeye çok yakın bir alanda oluşmuş ve diğer bölgelerde herhangi bir ayrılma tespit edilmemiştir. %5-15-30 ve %10-30-60 toz takviyesi ile yapılan kaplamaların eğme testleri sonucunda meydana gelen ayrılmalar ise kuvvet uygulanan noktadan farklı bölgelerde meydana gelmiş ve özellikle %10-30-60 takviye oranı ile yapılan kaplamadaki ayrılmalar en üst kısımda tabaka şeklinde oluşmuştur. Ayrıca bu kaplamaların kırılma aşamasında yüzey boyunca çok sayıda çatlak oluşmuştur. (Şekil 4.69).

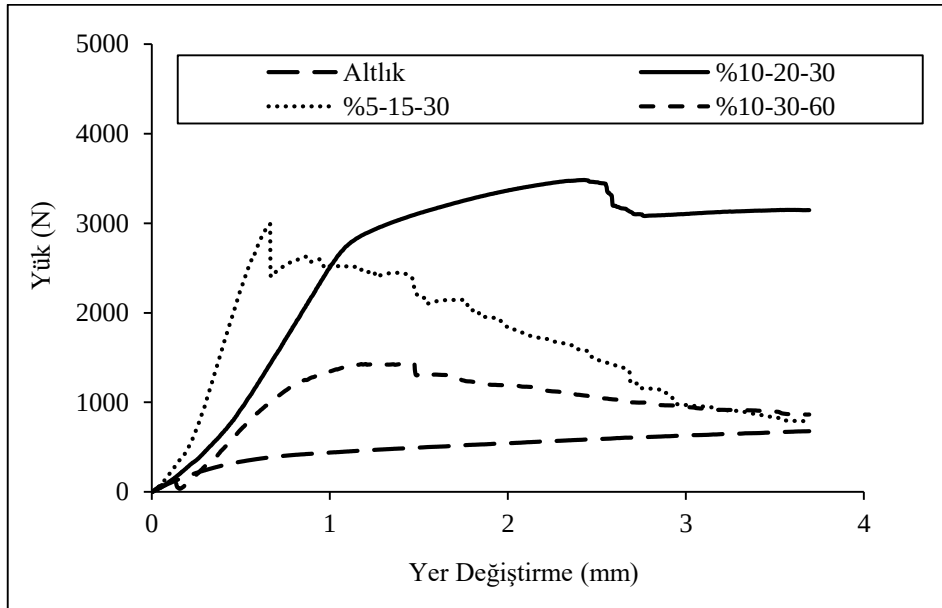
Şekil 4.72'da TiC takviyeli %5-15-30, %10-20-30 ve %10-30-60 oranlarında yapılan gradyanlı kaplama numunelerinin eğme testinden elde edilen yük-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Grafiğe göre %5-15-30 oranında kaplanan numune yaklaşık olarak 2000 N, %10-30-60 oranında yapılan kaplamada ise yaklaşık 6000 N'a kadar numune eğilmiş ve ardından kopmuştur. %10-20-30 oranı ile yapılan kaplamada numune ise 10000 N'a kadar yük uygulanmış ve cihazın eğme kapasitesi aşıldığından dolayı yüklemeye son verilmiştir. Şekil 4.70'deki makro fotoğraflar incelendiğinde %5-15-30 oranlarıyla kaplanan numunedeki kopma eğilme noktasından değil tabaka şeklinde ve eğilme noktasına uzak bir bölgeden gerçekleşmiş, buna karşılık %10-30-60 takviye oranlarıyla kaplanan numunedeki kopma ise tam eğilme noktası üzerinden olmuştur. Ayrıca %10-20-30 takviye oranıyla kaplanan numunede uygulanan yük sonrası herhangi bir çatlak oluşmamıştır (Şekil 4.70c).



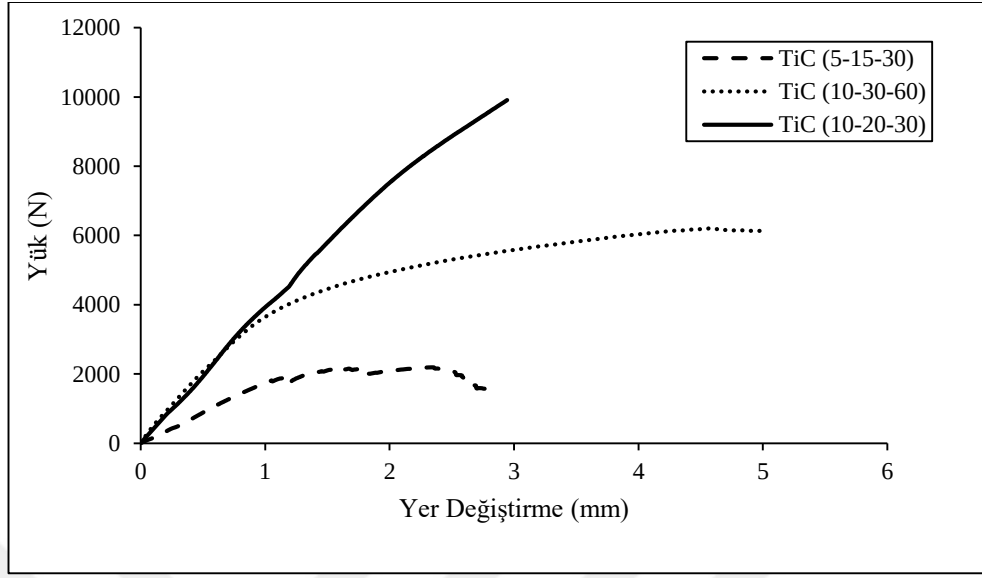
Şekil 4.69. a) %10-20-30 b) %5-15-30 c) %10-30-60 oranında B₄C kaplanan numunelerin eğme testi sonrası makro fotoğrafları



Şekil 4.70. a) % 5-15-30 b) % 10-30-60 c) % 10-20-30 oranında TiC kaplanan numunelerin eğme testi sonrası makro fotoğrafları



Şekil 4.71. B₄C takviyeli kaplamaların üç nokta eğilme testinden elde edilen yük-yer değiştirme grafiği



Şekil 4.72. TiC takviyeli kaplamaların üç nokta eğme testinden elde edilen yük-yer değiştirme grafiği

4.8. Kaplama Verimi

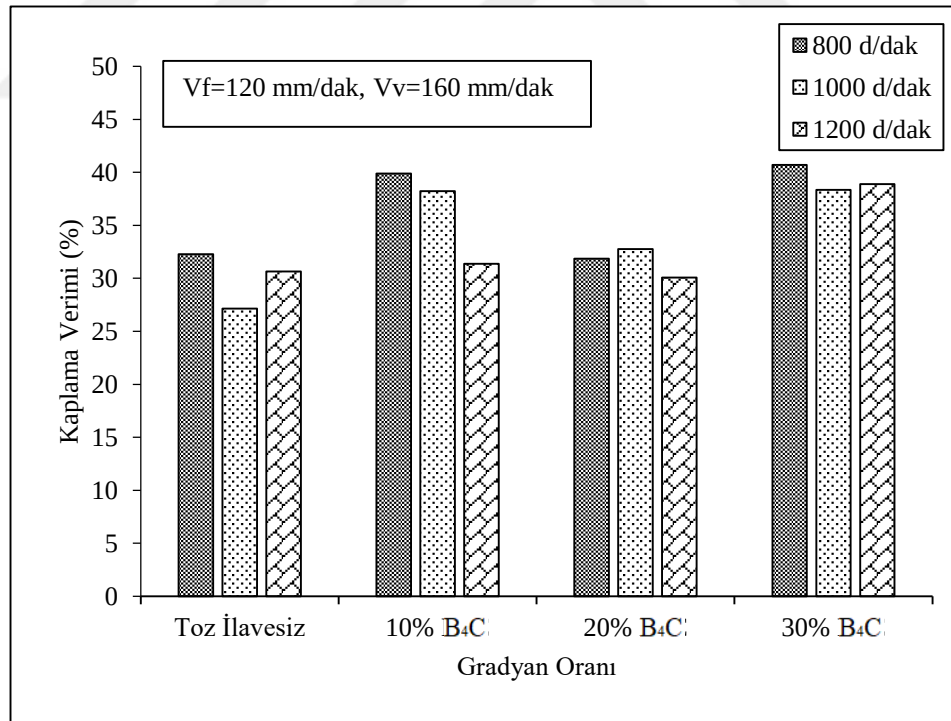
Kaplama verimi altlık malzeme üzerine biriktirilen toplam malzemenin kaplama milinden harcanan malzeme miktarına oranıdır [102]. Kaplama üzerine biriken malzeme miktarının belirlenmesindeki en önemli faktörlerden biri flanş bölgesinde meydana gelen birikmedir. Devir sayısı belirli bir seviyenin üstüne çıktığında flanş bölgesinde meydana gelen birikme yükselir ve kaplamanın verimi düşer [102]. Kaplamanın veriminin bu flanş bölgesinde biriken malzeme oranına bağlı olması, bu bölgede biriken malzemenin minimuma indirilmesi hedefini ortaya koyar. Yani kaplama mili ucundaki flanş bölgesi ne kadar küçük olursa kaplama verimi o kadar yüksek olur. Kaplama üzerine biriken malzeme miktarı hacim hesabı yapılarak elde edilir. Altlık malzeme üzerinde biriken malzemenin genişlik uzunluk ve yükseklik değerleri ölçülerek hacmi hesaplanır. Hacimsel hesaplamaların ardından Denklem 4.1'e göre kaplamanın verimi elde edilir.

$$\eta_{\text{kaplama}} = \left(\frac{\text{biriktirilen malzeme}}{\text{milden harcanan malzeme}} \right) * 100\% \quad (4.1)$$

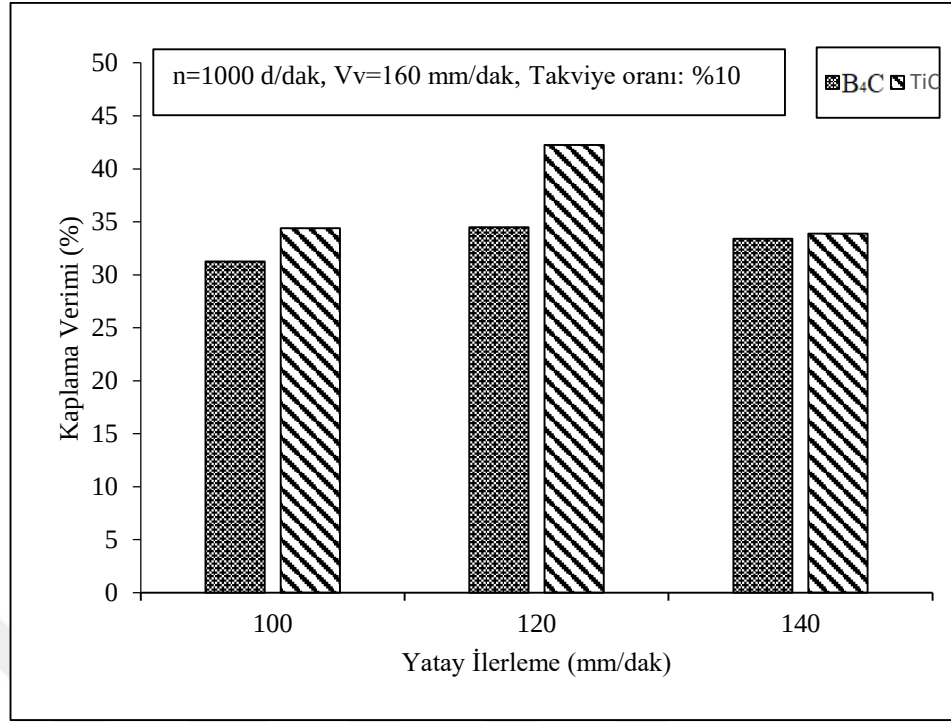
Şekil 4.73'teki grafikte 800, 1000 ve 1200 d/dak dönme hızında ve $V_h=120$ mm/dak yatay ilerleme ve $V_v=160$ mm/dak düşey ilerleme hızlarında yapılan kaplamaların verimleri karşılaştırılmıştır. Toz ilavesiz yapılan kaplamaların verimlerine bakıldığında verimin en yüksek olduğu devir sayısı %32,29 ile 800 d/dak'dır. %10 B_4C ilaveli kaplamalara bakıldığında ise en yüksek verim yine 800 d/dak'da; %20 B_4C ilaveli kaplamaların verimlerine bakıldığında en yüksek verimin 1000 d/dak'da ve %30 B_4C ilaveli kaplamaların değerleri incelendiğinde ise en yüksek

verimin yine 800 d/dak'da olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.73 grafiği incelendiğinde en düşük verim %20 B₄C toz ilaveli kaplamada edilmiştir.

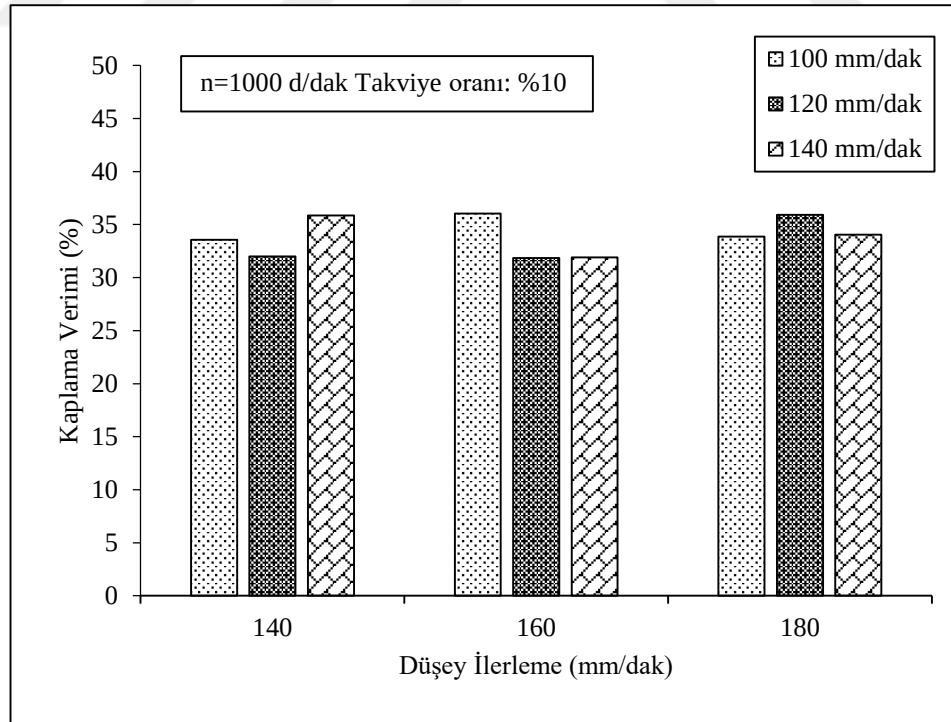
Şekil 4.74'te n=1000 d/dak, V_v=160 mm/dak ve %10 takviye oranına sahip B₄C ve TiC toz ilaveli kaplamaların verimleri karşılaştırılmıştır. Yatay ilerlemenin TiC ve B₄C toz takviyeli kaplama verimlerine etkisi incelendiğinde TiC takviyeli kaplamaların verimlerinin B₄C takviyeli kaplamaların verimlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Şekil 4.75'da ise B₄C ilaveli kaplamaların yatay ve düşey ilerleme hızlarına göre kaplama verimlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Yatay ilerlemenin kaplama verimine etkisi incelendiğinde en iyi verim V_v=140 mm/dak düşey ilerleme hızında ve V_f=140 mm/dak yatay ilerleme hızında %35,86 olarak elde edilmiştir. 160 mm/dak düşey ilerleme ile yapılan kaplamaların verimleri incelendiğinde en yüksek verime sahip kaplamanın V_f=100 mm/dak yatay ilerlemede elde edildiği görülmüştür. Aynı şekilde V_v=180 mm/dak düşey ilerleme hızında yapılan kaplamalarda ise verimi en yüksek olan yatay ilerleme hızı %35,91 ile V_f=120 mm/dak olmuştur. Elde edilen bu sonuçlara göre yatay ve düşey ilerleme hızlarının verime doğrudan bir etki etmediği, verimi etkileyen en önemli parametrelerin devir sayısı ve malzeme kombinasyonu olduğu görülmektedir [102].



Şekil 4.73. 800, 1000 ve 1200 d/d, V_f=120 mm/dak, V_v=160 mm/dak şartlarında, B₄C ilaveli ve ilavesiz yapılan kaplamaların kaplama verimlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.74. S=1000 d/d, Vv=160 mm/dak, %10 toz ilaveli B₄C ve TiC kaplamaların verimlerinin karşılaştırılması



Şekil 4.75. B₄C ilaveli numunelerin kaplama veriminin yatay ve düşey ilerlemeye göre değişimi

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, AA5754 altlık malzemesi TiC ve B₄C toz takviyeli sinterlenmiş kaplama milleri kullanılarak iki farklı yöntem ile gradyanlı olarak kaplanmıştır. Elde edilen kaplamaların yapışma özellikleri, aşınma dirençleri, mikro sertlikleri ve eğilme mukavemetleri incelenmiş, elde edilen önemli sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Kaplama esnasında mil ile temas yüzeyindeki eksenel kuvvetler ölçülmüş 4000 ile 7000 N arasında eksenel kuvvetlerin olduğu görülmüştür. TiC takviyesi ile yapılan kaplamalarda elde edilen maksimum kuvvet 6500 N iken B₄C toz takviyesi ile yapılan kaplamalarda maksimum kuvvet 7000 N olarak elde edilmiştir. Tüm grafiklerde milin ilk teması veya son bitiş anında uygulanan eksenel kuvvetin yüksek değerde olduğu görülmüştür. İlk temastaki yüksek eksenel kuvvet kaplama milinin yeterli sıcaklığa ulaşması için fazla eksenel kuvvete ihtiyaç duymasından kaynaklanmaktadır.
- Gradyanlı kaplamaların sıcaklıkları altlık malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde olup 440° ile 627°C civarında elde edilmiştir. Elde edilen bu sıcaklıklar altlık malzemede ısıdan etkilenen bölgenin (ITAB) oluşmasına sebep olmuştur. Bunun yanında her iki takviye tozu ile yapılan kaplamalarda da mikro yapıda yer yer tane büyümelerinin ve yapı değişimlerinin olduğu görülmüştür.
- Yapılan tüm kaplamaların makro görüntülerinde kaplama yöntemi ile alakalı dalgaya benzer yapılar görülmüştür. Bu dalgaya benzer görüntü yöntem ile alakalı olup altlık ve kaplama malzemesinin birbiri içinde karışmasından dolayı meydana gelmektedir.
- Kaplama işlemlerinde kaplama milinin yatay ve düşey ilerlemesi kontrol edilmiş ve yatay ilerleme değeri için en uygun değerin $V_f=120$ mm/dak, düşey ilerleme için en uygun değerin $V_v=160$ mm/dak olduğu belirlenmiştir.
- Tek katlı ve ilave toz kullanılmadan yapılmış sürtünmeli kaplamalarda devir sayısının mikro yapı üzerindeki önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. 800, 1000, 1200 ve 1500 d/dak kullanılarak kaplama işlemleri yapılmış, mikro yapı incelemelerinden en iyi yapışmanın 1200 d/dak dev olduğu belirlenmiştir. Belirlenen bu optimum değerin altında yapılan kaplamalarda yeterli sıcaklığa ulaşamamış, üstünde ise flanş bölgesinde fazla malzeme birikmesinden dolayı altlık malzeme üzerinde istenen miktarda biriktirme sağlanamamıştır.
- Sürtünmeli kaplama ile yapılan kaplamalarda yöntemin değiştirilmesi kaplama ara yüzey yapışma profilini de değiştirmiştir. Toz serme metodu ile yapılan kaplamalarda takviye tozu kaplama yapısı içerisine homojen dağılmamasına karşılık toz takviyeli kaplamalarda daha

homojen bir yapı elde edilmiştir. Ayrıca toz serme metodu ile yapılan kaplamalarda ara yüzeyde daha fazla boşluk görülmüştür.

- B₄C toz takviyeli üç katlı gradyanlı kaplamalarda en iyi kaplama yapıları (%5, 10, 15 ve %10, 20, 30) toz takviyeli kaplamalarda elde edilmiştir. Toz takviye oranının fazla olması (%10, 30, 60) ara yüzeylerde daha fazla boşluk ve kötü yapışma meydana getirmektedir. Bu nedenle katmanlar arasındaki artış % 10'u geçmemelidir.
- Aynı durum TiC toz takviyeli gradyanlı kaplamalarda da gözlenmiştir. En iyi kaplama yapısı %10, 20, 30 toz takviyeli kaplamalarda meydana gelmiştir.
- Kaplamaların XRD analizine göre %10-30-60 B₄C takviyeli gradyanlı kaplamanın en üst katmanında kaplama yapısında Al, Al₉Si, Ti₉B₅₅, Al_{0,983}Cr_{0,017} ve AlMg₄Zn₁₁ bileşiklerine rastlanmıştır. %10-30-60 TiC toz takviyeli kaplamanın en üst katmanından alınan XRD analizine göre ise yapı içerisinde AlMg₄Zn₁₁, TiC ve Fe₂Ti bileşiklerine rastlanmıştır. Meydana gelen bu yapılar alüminyum alaşım elementleri ile yapı içerisine eklenen takviye tozlarının bileşik yapması sonucu ortaya çıkmıştır.
- Toz takviyeli kaplamaların optik mikroskop görüntülerinde milin dönmesi esnasında tabakaların birbirine karışması ile meydana gelen elips şeklindeki girdap ya da yüzük adı verilen oluşumlar görülmüştür.
- Tek katlı kaplamaların mikro sertlik ölçümlerinde en yüksek değer 800 d/dak'da yapılan kaplamada 165 HV olarak elde edilmiştir. 800 d/dak devir sayısı ile yapılan kaplamanın mikro sertlik değerinin yüksek çıkmasının sebebi kaplama milinin altlık malzeme üzerinde homojen bir şekilde dağılması ve daha küçük taneli bir yapı elde edilmesidir. Meydana gelen küçük tane yapısı daha sert bir kaplama yapısının ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Tek katlı kaplamalarda en düşük sertlik ise 1200 ve 1500 d/dak parametresinin kullanıldığı kaplamada 116 HV olarak ölçülmüştür.
- En fazla gradyan artışına sahip olan %10-30-60 B₄C ve TiC takviyeli kaplamaların mikro sertliği %10-20-30 B₄C ve TiC toz takviyeli kaplamaların mikro sertlik değerlerinden daha düşük elde edilmiştir. Gradyan artışının hızlı olması (%10-30-60), sertlik artışına olumsuz katkıda bulunmuştur. Böylece hem TiC hem de B₄C takviyeli kaplamalar hızlı gradyan artışının bulunduğu %10-30-60 gradyanlı kaplamalarda istenen sertlik artışı elde edilememiştir. Bu sebeple diğer mekanik özelliklerde olduğu gibi daha sert bir yapının elde edilmesi için gradyanlı kaplamalarda gradyan artışının yavaş kademelendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.
- B₄C ile yapılan kaplamaların mikro sertlikleri TiC takviyesi ile yapılan kaplamalara göre daha yüksek elde edilmiştir. Bunun sebebi olarak B₄C tozunun mikro sertliğinin TiC tozundan daha yüksek olmasıdır.

- Aşınma deneyleri sonuçlarına göre toz ilavesiz yapılan kaplama altlık malzemenin aşınma direncine önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. Kaplamasız altlık malzemesindeki yüzde aşınma oranı % 3,15 iken toz ilavesiz kaplamalı numunede yaklaşık üç kat azalarak %1,32'ye düşmüştür.
- Takviye tozunun yapı içerisinde homejen karışmaması nedeniyle toz serme metodu yapılan kaplamaların toz ilavesiz kaplamaya göre aşınma direncinde önemli bir değişik olmadığı görülmüştür. Her iki kaplamanın aşınma miktarı yaklaşık aynı olup kayıp % 1,32 olarak ölçülmüştür.
- Kaplamaların aşınma deneyleri sonrası aşınma mekanizmaları incelendiğinde 'mikro-cutting' aşınma mekanizmasının daha baskın olduğu bunun yanında yer yer 'micro-cracking' mekanizması olarak bilinen mikro çatlakların olduğu görülmüştür.
- Gradyanlı kaplamalarda toz takviye oranının artması aşınma direncini düşürmüştür. En düşük aşınma yüzdesi %10-30-60 B₄C toz takviyeli kaplamada %0,57 olarak elde edilirken, en yüksek aşınma yüzdesi %5-15-30 B₄C toz takviyeli kaplamalarda %0,87 olarak elde edilmiştir.
- Benzer durum TiC toz takviyeli kaplamalarda da gözlemlenmiştir. %5-15-30 TiC toz takviyeli deneyde aşınma miktarı %1,26 olarak belirlenmiştir. En düşük aşınma yüzdesi %10-30-60 TiC toz takviyeli kaplamada %0,96 olarak elde edilirken, en yüksek aşınma yüzdesi %5-15-30 TiC toz takviyeli kaplamalarda %1,26 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler toz takviyesiz kaplamalara göre 5 kat daha az, aynı takviye oranında yapılan B₄C toz takviyeli kaplamalara göre 1.7 kat daha yüksektir.
- B₄C toz takviyeli kaplamaları sonrası SEM görüntülerinde ara yüzeyde kopmalar ve abrasif aşınmayla birlikte adhesif aşınma bölgelerinin oluştuğu görülmüştür. Özellikle altlık ve kaplama ara yüzeyinde çatlak ve delaminasyon bölgeleri de mevcuttur. Ayrıca hemen hemen bütün B₄C toz takviyeli kaplamalarda aşınma sonrası katmanlar arasında ayrılmalara ve boşlukların oluştuğu görülmüştür.
- TiC takviyeli kaplamalarda abrasif aşınmanın daha baskın olduğu, bununla birlikte yer yer adhesif aşınmanın bölgelerinin oluştuğu, kaplama sonrası ara yüzeylerde ayrılmalara ve kopmaların daha az meydana geldiği görülmüştür.
- Her iki toz takviyeli gradyanlı kaplamalarda katmanlardaki aşınma mekanizmaları değişmiştir. Altlıkta genellikle adhesiv aşınma mekanizması mevcut iken altlık üzerine gelen kaplamalarda abrasiv aşınma mekanizması etkin hale gelmiştir. Kaplama tabakasının toz takviye oranı ve sertliği arttıkça adhesiv aşınma yerini abrasiv aşınmaya bırakmıştır.
- Toz serme yöntemiyle yapılan kaplamaların ara yüzeyinde mekanik çözülmelerden dolayı oluşan çatlağın kaplama hattı boyunca ilerlediği görülmüştür. Buna karşılık toz takviyeli millerle yapılan kaplamalarda ise daha az çatlak oluşarak daha dirençli bir yapı oluşmuştur.

- Kaplama mili çapının çok büyük olması kaplama milinin flanş bölgesini aşıı genişletmekte ve kaplama verimini düşürmektedir. Kaplama milinin aşıı uzun olması ise yatay ilerleme ve eksenel kuvvetin etkisi altında bağlama pensi bölgesinden eksen kaçıklığı meydana getirerek sehim oluşturmaktadır.



6. ÖNERİLER

Çalışmanın sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda, daha sonraki çalışmalar için aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur.

- Alüminyum altlık ve kaplama malzemesi ile yapılan sürtünmeli kaplama işlemi farklı malzeme çifti kullanarak yapılabilir. Özellikle paslanmaz çelik malzeme çiftleriyle yapılan deneyler, yöntemin geleceği için büyük önem arz etmektedir.

- Elde edilen veriler ışığında yapılan kaplamaların korozyon testleri yapılarak kaplamaların korozyon dayanımları karşılaştırılabilir.

- Su altında da kullanılan sürtünmeli kaplama yöntemi ile su ortamında deneyler yapılarak karşılaştırmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] T. Savaşkan. (1999). Malzeme Bilgisi ve Muayanesi, *Birsen Yayınevi*
- [2] Batchelor, A. W.; Jana, S.; Koh, C. P.; Tan, C. S. (1996). The effect of metal type and multi-layering on friction surfacing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 57, Nos. 1–2, 172–171. doi:10.1016/0924-0136(95)02057-8
- [3] Rafi, H. K.; Ram, G. D. J.; Phanikumar, G.; Rao, K. P. (2011). Microstructural evolution during friction surfacing of tool steel H13, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 1, 82–87. doi:10.1016/j.matdes.2010.06.031
- [4] Govardhan, D.; Kumar, A. C. S.; Murti, K. G. K.; Reddy, G. M. (2012). Characterization of austenitic stainless steel friction surfaced deposit over low carbon steel, *Materials and Design*, Vol. 36, 206–214. doi:10.1016/j.matdes.2011.07.040
- [5] Hanke, S.; Staron, P.; Fischer, T.; Fitseva, V.; dos Santos, J. F. (2018). A method for the in-situ study of solid-state joining techniques using synchrotron radiation - observation of phase transformations in Ti-6Al-4V after friction surfacing, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 335, No. December 2017, 355–367. doi:10.1016/j.surfcoat.2017.12.049
- [6] Dilip, J. J. S.; Babu, S.; Varadha Rajan, S.; Rafi, K. H.; Janaki Ram, G.; Stucker, B. E. (2013). Use of friction surfacing for additive manufacturing, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 28, No. 2, 189–194. doi:10.1080/10426914.2012.677912
- [7] Gandra, J.; Krohn, H.; Miranda, R. M.; Vilac, P.; Quintino, L.; Santos, J. F. (2014). Journal of Materials Processing Technology Friction surfacing — A review, Vol. 214, 1062–1093. doi:10.1016/j.jmatprotec.2013.12.008
- [8] Mishra, R. S.; Ma, Z. Y.; Charit, I. (2003). Friction stir processing: a novel technique for fabrication of surface composite, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 341, Nos. 1–2, 307–310
- [9] Puli, R.; Ram, G. D. J. (2012). Dynamic recrystallization in friction surfaced austenitic stainless steel coatings, *Materials Characterization*, Vol. 74, 49–54. doi:10.1016/j.matchar.2012.09.001
- [10] Hanke, S.; Fischer, A.; dos Santos, J. F. (2015). Sliding wear behaviour of a Cr-base alloy after microstructure alterations induced by friction surfacing, *Wear*, Vols 338–339, 332–338. doi:10.1016/j.wear.2015.07.010
- [11] Hanke, S.; Beyer, M.; Santos, J. F.; Fischer, A. (2013). Friction surfacing of a cold work tool steel — Microstructure and sliding wear behavior, *Wear*, Vol. 308, Nos. 1–2, 180–185. doi:10.1016/j.wear.2013.06.017
- [12] Pereira, D.; Gandra, J.; Pamies-teixeira, J.; Miranda, R. M.; Vilac, P. (2014). Journal of Materials Processing Technology Wear behaviour of steel coatings produced by friction surfacing, Vol. 214, 2858–2868. doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.06.003
- [13] StegmueLLer, M. J. R.; Schindele, P.; Grant, R. J. (2015). Journal of Materials Processing Technology Inductive heating effects on friction surfacing of stainless steel onto an aluminium substrate, *Journal of Materials Processing Tech.*, Vol. 216, 430–439. doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.10.013
- [14] Vitanov, V. I.; Voutchkov, I. I.; Bedford, G. M. (2001). Neurofuzzy approach to process parameter selection for friction surfacing applications, 256–262
- [15] Liu, X.; Yao, J.; Wang, X.; Zou, Z.; Qu, S. (2008). Finite difference modeling on the temperature field of consumable-rod in friction surfacing, Vol. 9, 1392–1399. doi:10.1016/j.jmatprotec.2008.03.067

- [16] Vitanov, V. I.; Javaid, N.; Stephenson, D. J. (2010). Surface & Coatings Technology Application of response surface methodology for the optimisation of micro friction surfacing process, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 204, Nos. 21–22, 3501–3508. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.04.011
- [17] Rafi, H. K.; Ram, G. D. J.; Phanikumar, G.; Rao, K. P. (2010). Friction surfaced tool steel (H13) coatings on low carbon steel: A study on the effects of process parameters on coating characteristics and integrity, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, No. 1, 232–242. doi:10.1016/j.surfcoat.2010.06.052
- [18] Puli, R.; Janaki Ram, G. D. (2012). Wear and corrosion performance of AISI 410 martensitic stainless steel coatings produced using friction surfacing and manual metal arc welding, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 209, 1–7. doi:10.1016/j.surfcoat.2012.06.075
- [19] Puli, R.; Janaki Ram, G. D. (2012). Microstructures and properties of friction surfaced coatings in AISI 440C martensitic stainless steel, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 207, 310–318. doi:10.1016/j.surfcoat.2012.07.001
- [20] Govardhan, D.; Kumar, A. C. S.; Murti, K. G. K.; Madhusudhan Reddy, G. (2012). Characterization of austenitic stainless steel friction surfaced deposit over low carbon steel, *Materials and Design*, Vol. 36, 206–214. doi:10.1016/j.matdes.2011.07.040
- [21] Sekharbabu, R.; Rafi, H. K.; Rao, K. P. (2013). Characterization of D2 tool steel friction surfaced coatings over low carbon steel, *Materials and Design*, Vol. 50, 543–550. doi:10.1016/j.matdes.2013.03.042
- [22] Gandra, J.; Vigarinho, P.; Pereira, D.; Miranda, R. M.; Velhinho, a; Vilaça, P. (2013). Wear characterization of functionally graded Al – SiC composite coatings produced by Friction Surfacing, *Journal of Materials&Design*, Vol. 52, 373–383. doi:10.1016/j.matdes.2013.05.059
- [23] Prasad Rao, K.; Veera Sreenu, A.; Khalid Rafi, H.; Libin, M. N.; Balasubramaniam, K. (2012). Tool steel and copper coatings by friction surfacing - A thermography study, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 2, 402–407. doi:10.1016/j.jmatprotec.2011.09.023
- [24] Gandra, J.; Miranda, R. M.; Vilaça, P. (2012). Performance analysis of friction surfacing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 8, 1676–1686. doi:10.1016/j.jmatprotec.2012.03.013
- [25] Hanke, S.; Sena, I.; Coelho, R. S.; dos Santos, J. F. (2018). Microstructural features of dynamic recrystallization in alloy 625 friction surfacing coatings, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 33, No. 3, 270–276
- [26] Hanke, S.; dos Santos, J. F. (2017). Comparative study of severe plastic deformation at elevated temperatures of two aluminium alloys during friction surfacing, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 247, No. October 2016, 257–267. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.04.021
- [27] Guo, D.; Kwok, C. T.; Chan, S. L. I. (2018). Fabrication of stainless steel 316L/TiB2 composite coating via friction surfacing, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 350, No. November 2017, 936–948. doi:10.1016/j.surfcoat.2018.03.065
- [28] George Sahaya Nixon, R.; Mohanty, B. S.; Sathish, R. (2018). Friction surfacing of AISI 316 over mild steel: A characteriation study, *Defence Technology*, Vol. 14, No. 4, 306–312. doi:10.1016/j.dt.2018.03.003
- [29] Badheka, K.; Badheka, V. (2017). Friction Surfacing of Aluminium on Steel: An Experimental Approach, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 4, No. 9, 9937–9941. doi:10.1016/j.matpr.2017.06.297
- [30] Murugan, B. K.; Balusamy, V.; Padmanaban, R.; Vignesh, R. V. (2018). Study of the effect of parameters in friction surfacing of Monel over Mild Steel using linear - Radial basis function model, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 2, 8604–8611. doi:10.1016/j.matpr.2017.11.558

- [31] Krohn, H.; Hanke, S.; Beyer, M.; dos Santos, J. F. (2015). Influence of external cooling configuration on friction surfacing of AA6082 T6 over AA2024 T351, *Manufacturing Letters*, Vol. 5, 17–20. doi:10.1016/j.mfglet.2015.04.004
- [32] Ulutan, M. (2007). AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri Ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 4140
- [33] Yıldırım, M. M. (2001). *Mühendislik Malzemeleri 1*
- [34] Yıldırım, M. M. (1993). Lazerle Yapılan Yüzeysel İşlemlerde Son Uygulama Teknikleri, 5. *Denizli Malzeme Sempozyumu*, 561–570
- [35] ÖZSARAÇ, U.; YILMAZ, R.; Alpaslan, E.; UZUN, H. (2001). Sementasyon işlemi yapılan çeliklerde mikro sertlik ve mikroyapı değişimlerinin incelenmesi, *Metalurji, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*, Vol. 127, 34–38
- [36] Evcin, A. (2015). İnternet: Afyon/Karahisar Kocatepe Üniversitesi, “Kaplama Teknikleri” Ders notları A. Evcin, <http://www.kimmuh.com/evcin/coating/coating6.pdf> , Tarih: 20.06.2015., 2015
- [37] YILDIRIM, M. M. (1989). *Galvanizleme Tekniği*, Fırat Üniversitesi Yayınları
- [38] Bunshah, R. F. (2001). Handbook of Hard Coatings Deposition Technologies- Properties and Applications, *Tribology International*, 77–100. doi:10.1016/s0301-679x(01)00021-4
- [39] Özel, S. (2013). Thermal Spray Methods Used on The Surface Coating Processes, *BEU Journal of Science*, Vol. 2, No. 1, 88–97
- [40] González, R.; Cadenas, M.; Fernández, R.; Cortizo, J. L.; Rodríguez, E. (2007). Wear behaviour of flame sprayed NiCrBSi coating remelted by flame or by laser, *Wear*, Vol. 262, Nos. 3–4, 301–307. doi:10.1016/j.wear.2006.05.009
- [41] İnternet: www.erametalurjicom.tr/pageplazma-sprey.pdf. (n.d.)
- [42] Schwartz, M. (2002). *Encyclopedia of Materials, Parts, and Finishes*, CRC Yayınları, LLC
- [43] Stokes, J. (2006). *The Theory and Application of the HVOF Thermal Spray Process*, Dublin City University
- [44] Salman, S.; Köse, R.; Urtekin, L.; Findik, F. (2006). An investigation of different ceramic coating thermal properties, *Materials and Design*, Vol. 27, No. 7, 585–590. doi:10.1016/j.matdes.2004.12.010
- [45] Stachowiak, G. W.; Batchelor, A. W. (2000). Engineering Tribology-II, *Wear*, Butterworth Heinemann Basımevi, 430–440. doi:10.1016/0043-1648(96)80024-x
- [46] Islak, S. (2003). *Yüzey Modifikasyonu Yöntemleri.pdf* Fırat Üniversitesi
- [47] Stokes, J. (2003). *Production of Coated and Free-standing Engineering Components Using the HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) Process*, PhD Thesis Dublin University
- [48] İnternet: <https://www.plakart.pro/en/technologies/detonation-spraying-d-gun/f>. (n.d.)
- [49] İnternet: <http://www.thermic.co.th/thermal-spray-processes/electric-arc-spray/>. (n.d.)
- [50] İnternet: <http://www.mechanicalengineeringsite.com/high-velocity-oxy-fuel-hvof-coating-processes-principle-working/>. (n.d.)
- [51] Sexton, L.; Lavin, S.; Byrne, G.; Kennedy, A. (2002). Laser cladding of aerospace materials, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 122, No. 1, 63–68. doi:10.1016/S0924-0136(01)01121-9

- [52] Toyserkani, E.; Khajepour, A.; Corbin, S. F. (2005). *Laser Cladding* (1st Editio.), CRC Yayınları
- [53] İnternet: substech.com. (n.d.)
- [54] Hicks, J. (2000). *Welded Design- Theory and Practice*, Abington Yayınları, Abington
- [55] Neale, M. J. (1995). *The Tribology Handbook 2*, Butterworth-Heinemann, Oxford
- [56] ITW Welding. (n.d.). Submerged Arc Welding Consumables, 76. doi:10.1533/9780857095183.105
- [57] Jandric, Z.; Labudovic, M.; Kovacevic, R. (2004). Effect of heat sink on microstructure of three-dimensional parts built by welding-based deposition, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, Nos. 7–8, 785–796. doi:10.1016/j.ijmachtools.2004.01.009
- [58] Dilip, J. J. S.; Janaki Ram, G. D. (2013). Microstructure evolution in aluminum alloy AA 2014 during multi-layer friction deposition, *Materials Characterization*, Vol. 86, 146–151. doi:10.1016/j.matchar.2013.10.009
- [59] Güleç, E.; Uysal, M. İ. (2006). *Sürtünme Karıştırma Kaynağı Araştırma Projesi* İzmir
- [60] Gandra, J.; Vigarinho, P.; Pereira, D.; Miranda, R. M.; Velinho, A.; Vilaça, P. (2013). Wear characterization of functionally graded Al – SiC composite coatings produced by Friction Surfacing, *Materials and Design*, Vol. 52, 373–383. doi:10.1016/j.matdes.2013.05.059
- [61] Galvis, J. C.; Oliveira, P. H. F.; Hupalo, M. F.; Martins, J. P.; Carvalho, A. L. M. (2017). Influence of friction surfacing process parameters to deposit AA6351-T6 over AA5052-H32 using conventional milling machine, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 245, 91–105. doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.02.016
- [62] Gandra, J.; Krohn, H.; Miranda, R. M.; Vilaça, P.; Quintino, L.; Dos Santos, J. F. (2014). Friction surfacing - A review, *Journal of Materials Processing Technology*, 1062–1093. doi:10.1016/j.jmatprotec.2013.12.008
- [63] Rafi, H. K.; Ram, G. D. J.; Phanikumar, G.; Rao, K. P. (2011). Microstructural evolution during friction surfacing of tool steel H13, *Materials and Design*, Vol. 32, No. 1, 82–87. doi:10.1016/j.matdes.2010.06.031
- [64] Bedford, G. M. (1991). Friction surfacing a rotating hard metal facing material onto a substrate material with the benefit of positively cooling the substrate
- [65] Bedford, G. M.; Vitanov, V. I.; Voutchkov, I. I. (2001). On the thermo-mechanical events during friction surfacing of high speed steels, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 141, No. 1, 34–39. doi:10.1016/S0257-8972(01)01129-X
- [66] Olson, D.; Siewert, T.; Liu, S.; Edwards, G. (1993). *ASM Handbook — Welding Brazing and Soldering*, ASM International, Ohio
- [67] F., B. (2014). Sert ve Yumuşak Kaplamalar, *Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg.*, Vol. 2, No. 4, 32–41
- [68] Bhushan, S.; Gupta, K. B. (1991). *Handbook of Tribology: Materials, Coatings and Surface Treatments*, A.B.D
- [69] Miyoshi, K. (1998). *Solid Lubricant Fundamentals and Applications: Characterization of Solid Surfaces*, NASA/TM, Cleveland, Ohio
- [70] Zıraplı, M. (2013). *Bor Aplike Edilmiş Dokuma Kumaşların Elektromanyetik Alan Ekranlamasının İncelenmesi* Süleyman Demirel Üniversitesi
- [71] Sezer, A. O.; Brand, J. I. (2001). Chemical vapor deposition of boron carbide, *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, Vol. 79, No. 3, 191–202. doi:10.1016/S0921-5107(00)00538-9

- [72] Akarsu, C. (n.d.). *Titanyum Diborür Katkılı Sıcak Preslenmiş Bor Karbür Silisyum Karbür Kompozitlerinin Özelliklerinin İncelenmesi* İstanbul Teknik Üniversitesi
- [73] İnternet: <http://www.bmbor.com/tr/urunler/urun-32-borkarbur.php>. (n.d.)
- [74] Aydın, S.; Şimşek, M. (2008). *İlk Prensipler Yaklaşımı ile BCB - Zincirli Süper Sert Bor Karbür Kristalinin İncelenmesi* , „Gazi Üniversitesi
- [75] Gandra, J.; Pereira, D.; Miranda, R. M.; Vilaça, P. (2013). Influence of process parameters in the friction surfacing of AA 6082-T6 over AA 2024-T3, *Procedia CIRP*, Vol. 7, 341–346. doi:10.1016/j.procir.2013.05.058
- [76] Lazzari, R.; Vast, N.; Besson, J. M.; Baroni, S.; Corso, A. D. (1999). Atomic structure and vibrational properties of icosahedral b4c boron carbide, *Physical Review Letters*, Vol. 83, No. 16, 3230–3233. doi:10.1103/PhysRevLett.83.3230
- [77] İnternet: https://en.wikipedia.org/wiki/Boron_carbide. (n.d.)
- [78] Pierson, H. O. (1996). *Handbook of Refractory Carbides and Nitrides Properties, Characteristics, Processing and Applications*, Noyes Publications, A.B.D
- [79] Shirvanimoghaddam, K.; Khayyam, H.; Abdizadeh, H.; Karbalaee Akbari, M.; Pakseresht, A. H.; Ghasali, E.; Naebe, M. (2016). Boron carbide reinforced aluminium matrix composite: Physical, mechanical characterization and mathematical modelling, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 658, 135–149. doi:10.1016/j.msea.2016.01.114
- [80] Bedford, G. M.; Richards, P. J. (1985). On the absence of dilution in friction surfacing and later friction welding. In: 1st International Conference on Surface Engineering, *Brighton*, 279–290
- [81] Özler, L. (2019). The influence of variable feed rate on bushing and surface roughness in friction drilling, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, No. 8, 308
- [82] Ozler, L.; Dogru, N. (2013). An experimental investigation of hole geometry in friction drilling, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 28, No. 4, 470–475. doi:10.1080/10426914.2012.746699
- [83] Galvis, J. C.; Oliveira, P. H. F.; De Paula Martins, J.; De Carvalho, A. L. M. (2018). Assessment of process parameters by friction surfacing on the double layer deposition, *Materials Research*, Vol. 21, No. 3. doi:10.1590/1980-5373-MR-2018-0051
- [84] Anık, S.; Vural, M. (1993). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi* (4.Baskı.), Birsen Yayınları, Ankara
- [85] Jujare, T.; Kumar, A.; Kailas, S. V.; Bhat, K. U. (2014). Friction Surfacing of Mild Steel by Copper: A Feasibility Study, *Procedia Materials Science*, Vol. 5, 1300–1307. doi:10.1016/j.mspro.2014.07.445
- [86] Fitseva, V.; Hanke, S.; Santos, J. F. dos; Stemmer, P.; Gleising, B. (2016). The role of process temperature and rotational speed in the microstructure evolution of Ti-6Al-4V friction surfacing coatings, *Materials and Design*, Vol. 110, 112–123. doi:10.1016/j.matdes.2016.07.132
- [87] Thomas, W. M. (2009). An investigation and study into friction stir welding of ferrous -based material”, *University of Bolton*, Vol. 22, 291–296
- [88] Karthik, G. M.; Ram, G. D. J.; Kottada, R. S. (2016). Friction deposition of titanium particle reinforced aluminum matrix composites, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 653, 71–83. doi:10.1016/j.msea.2015.12.005
- [89] Yu, M.; Zhang, Z.; Zhao, H.; Zhou, L.; Song, X. (2019). Microstructure and corrosion behavior of the ultra-fine grained aluminum coating fabricated by friction surfacing, *Materials Letters*, Vol. 250, 174–177. doi:10.1016/j.matlet.2019.05.022

- [90] Karthik, G. M.; Ram, G. D. J.; Kottada, R. S. (2016). Friction deposition of titanium particle reinforced aluminum matrix composites, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 653, 71–83. doi:10.1016/j.msea.2015.12.005
- [91] Jata, K. V.; Semiatin, S. L. (2000). Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys, *Scripta Materialia*, Vol. 43, 743–749
- [92] Charit, I.; Mishra, R. S. (2008). Abnormal grain growth in friction stir processed alloys, *Scripta Materialia*, Vol. 58, 367–371. doi:10.1016/j.scriptamat.2007.09.052
- [93] Su, J. Q.; Nelson, T.W.; Sterling, C. J. (2006). Grain refinement of aluminum alloys by friction stir processing, *Philos Magazine*, Vol. 86, 1–24
- [94] Vilaça, P.; Gandra, J.; Vidal, C. (2012). Linear friction based processing technologies for aluminum alloys: surfacing, stir welding and stir channeling, *Aluminium Alloys-New Trends in Fabrication and Applications*. doi:10.5772/52026
- [95] Tondou, S.; Schnick, T.; Pawlowski, L.; Wielage, B.; Steinhäuser, S.; Sabatier, L. (2000). Laser glazing of FeCr-TiC composite coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 123, Nos. 2–3, 247–251. doi:10.1016/S0257-8972(99)00530-7
- [96] ESTHER, I.; DINAHARAN, I.; MURUGAN, N. (2019). Microstructure and wear characterization of AA2124/4wt.%B4C nano-composite coating on Ti-6Al-4V alloy using friction surfacing, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, Vol. 29, No. 6, 1263–1274. doi:10.1016/S1003-6326(19)65033-8
- [97] Rao, K. P.; Damodaram, R.; Rafi, H. K.; Ram, G. D. J.; Reddy, G. M.; Nagalakshmi, R. (2012). Friction surfaced Stellite6 coatings, *Materials Characterization*, Vol. 70, 111–116. doi:10.1016/j.matchar.2012.05.008
- [98] Qin, J.; Zhang, Z.; Chen, X. G. (2016). Mechanical Properties and Strengthening Mechanisms of Al-15 Pct B4C Composites with Sc and Zr at Elevated Temperatures, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, Vol. 47, No. 9, 4694–4708. doi:10.1007/s11661-016-3606-4
- [99] Zhao, Y.; Yu, T.; Sun, J.; Jiang, S. (2020). Microstructure and properties of laser clad B4C/TiC/Ni-based composite coating, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 86, No. August 2019, 105112. doi:10.1016/j.ijrmhm.2019.105112
- [100] Mindivan, H.; Baydogan, M.; Kayali, E. S.; Cimenoglu, H. (2005). Wear behaviour of 7039 aluminum alloy, *Materials Characterization*, Vol. 54, No. 3, 263–269. doi:10.1016/j.matchar.2004.12.004
- [101] Chandrasekaran, M.; Batchelor, A. W.; Jana, S. (1997). Friction surfacing of metal coatings on steel and aluminum substrate, Vol. 72, 446–452
- [102] Fitseva, V.; Krohn, H.; Hanke, S.; dos Santos, J. F. (2015). Friction surfacing of Ti-6Al-4V: Process characteristics and deposition behaviour at various rotational speeds, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 278, 56–63. doi:10.1016/j.surfcoat.2015.07.039

EKLER

Ek- 1: SÜRTÜNMELİ KAPLAMA İÇİN CNC FREZEYE YAZILAN PROGRAM DÖNGÜSÜ

O0044 (Alt Program)

G28 G17 G40 G55 ;

G90 G43 H1 ;

G00 Z1 ;

M0 ;

#1 =1 ;

#2 =0.5 ;

#3 =110 ;

#4 =0.1 ;

#5 =0.5 ;

G01 Z-0.1 F100 ;

G04 X8 ;

N5 G1 Z#4 F100 ;

G4 X4 ;

#4 =#4-0.1 ;

IF [#4 GE #1] GOTO5 ;

N10 G1 Y#2 F200 ;

#2 =#2+0.8 ;

#5 =#5-0.1 ;

G01 Z#5 F150 ;

IF [#3 GE #2] GOTO10 ;

G0 Z20 ;

G0 X0 Y0 Z50 ;

M5 ;

M30 ;

%



EK- 2: ANA PROGRAM

O03 ;

T1 M6 ;

S1200 M3 ;

G28 G17 G40 G55 ;

G90 G43 H1 ;

G00 X0 Y0 Z20 ;

G00 X0 Y0 Z5 ;

M0 ;

G66 P0044 ;

G00 Z5 ;

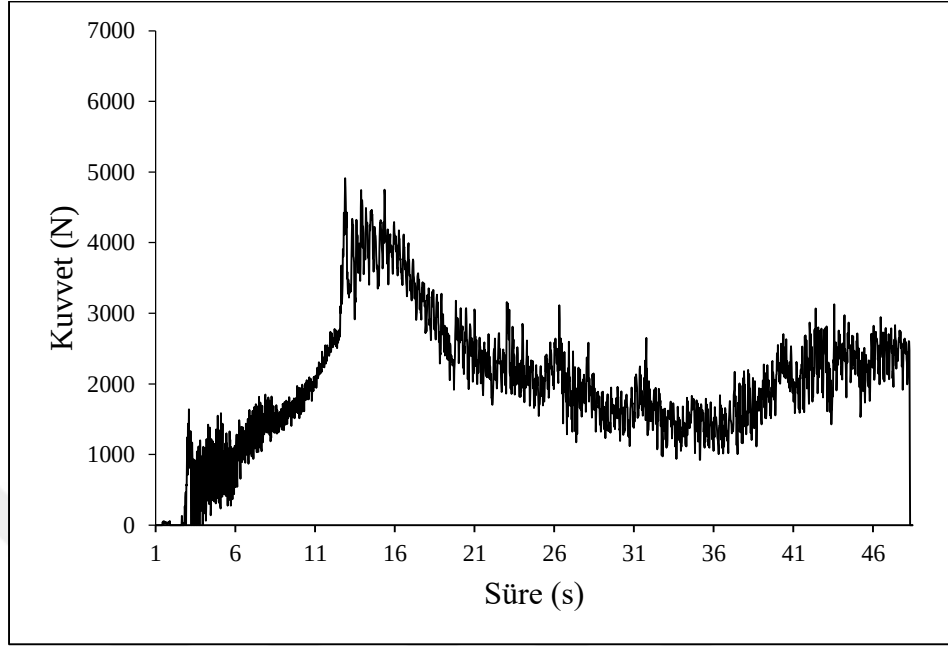
G67

M5 ;

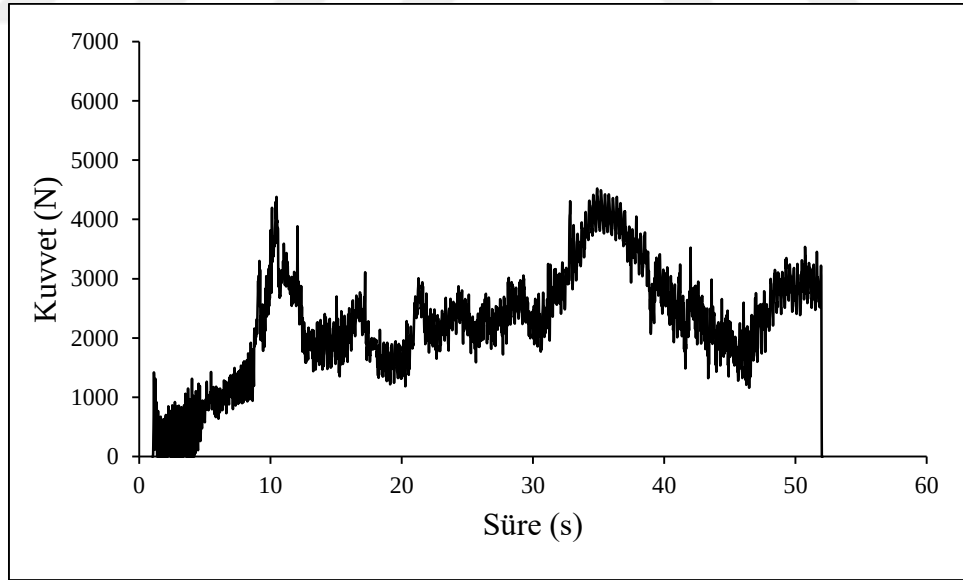
M30 ;

%

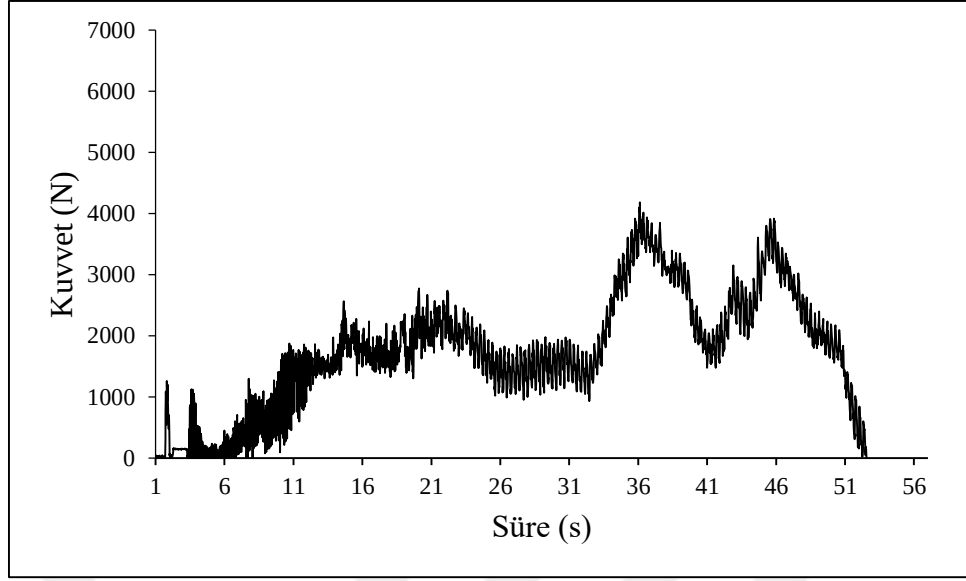
Ek- 3 : KUVVET – ZAMAN GRAFİKLERİ



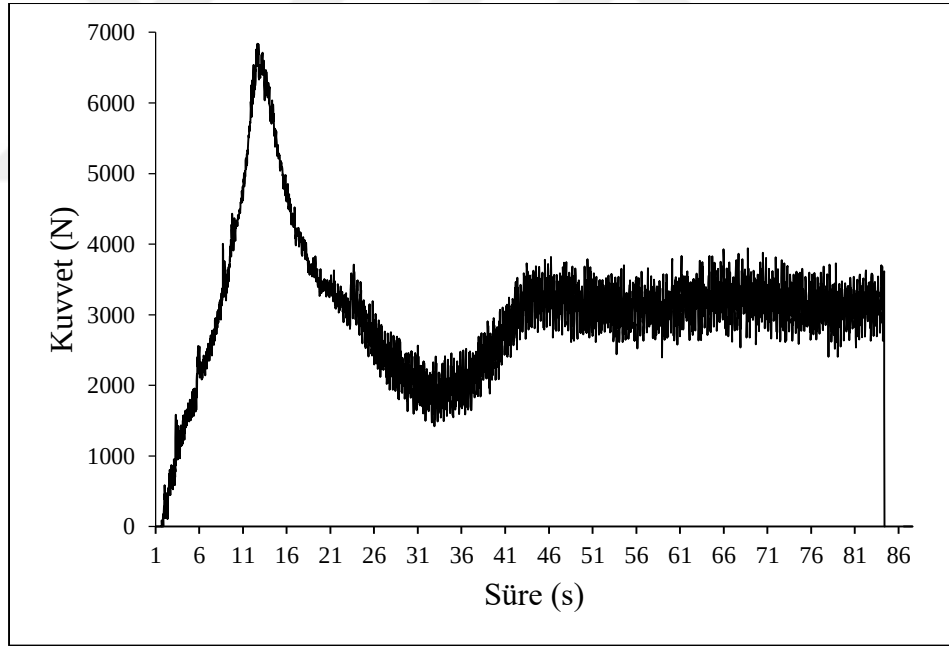
Şekil 6.1. %5-15-30 B₄C takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği



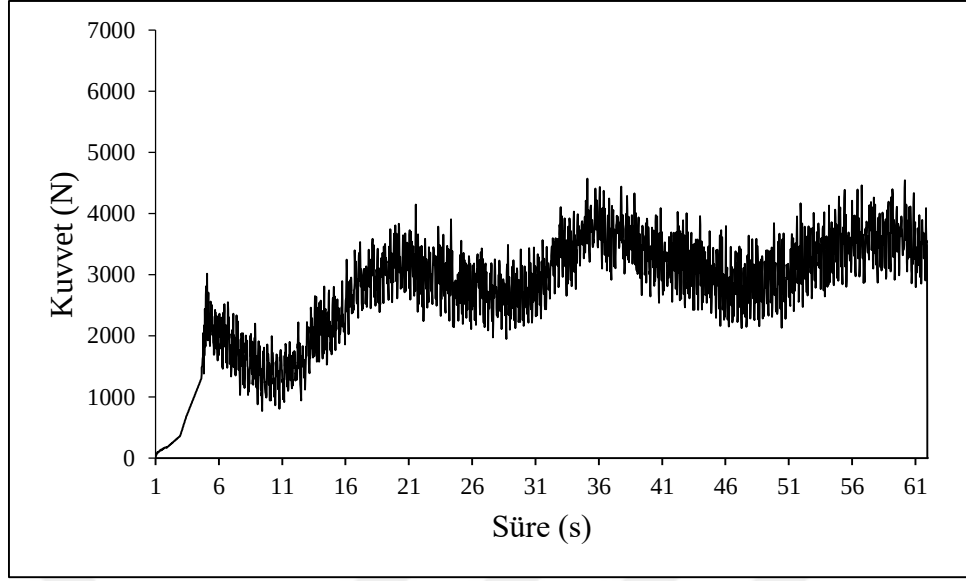
Şekil 6.2. %5-15-30 B₄C takviyeli kaplamanın 2.katmanının kuvvet-zaman grafiği



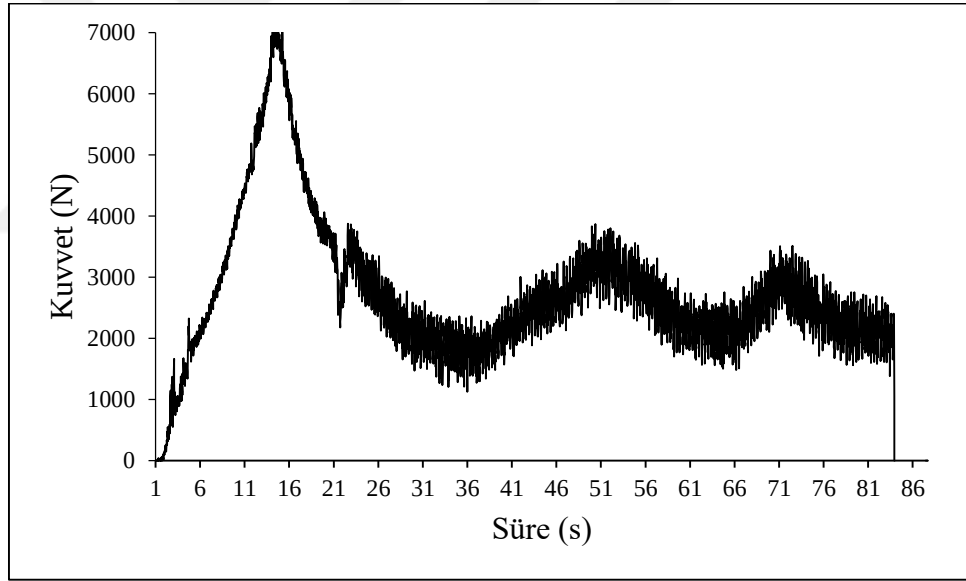
Şekil 6.3. %5-15-30 B₄C takviyeli kaplamanın 3.katmanının kuvvet-zaman grafiği



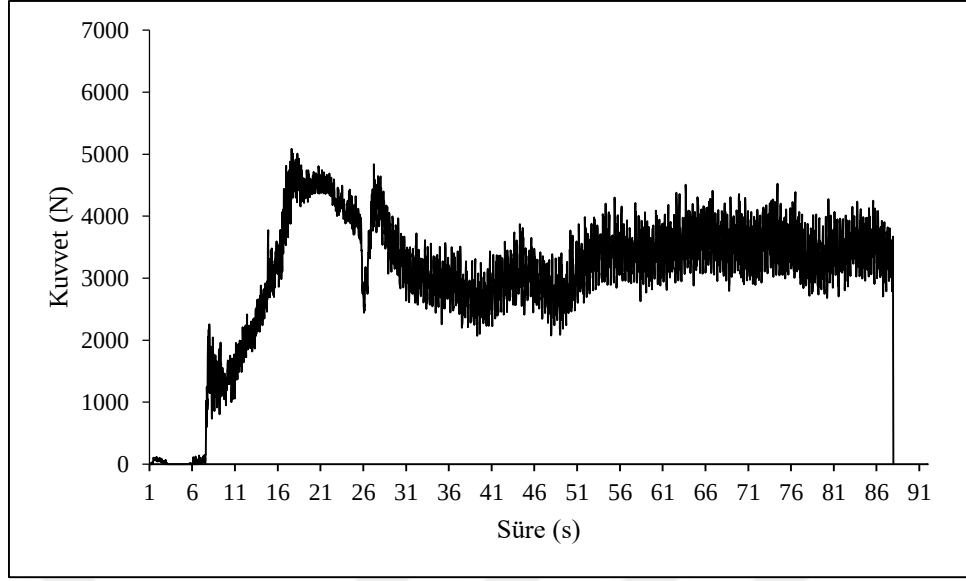
Şekil 6.4. %10-20-30 B₄C takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği



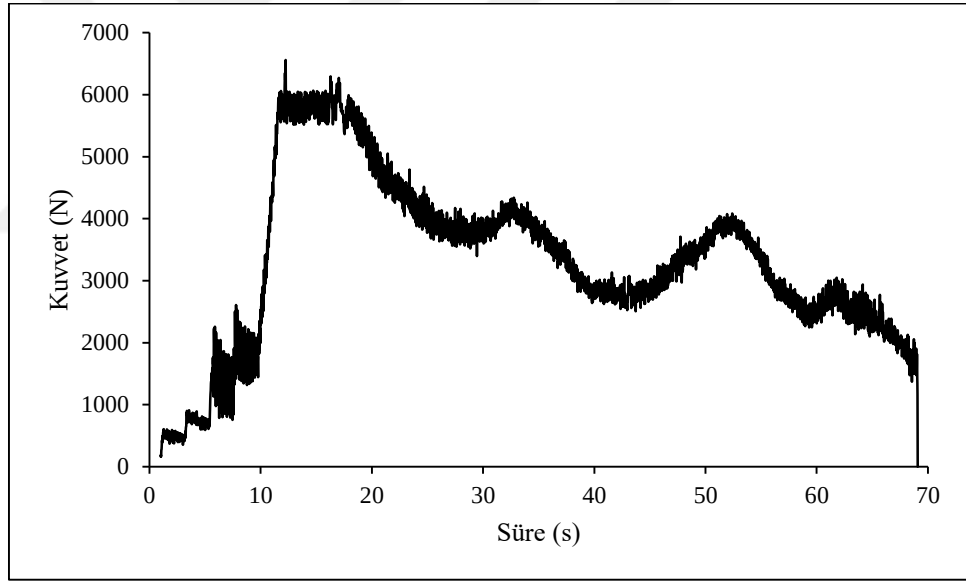
Şekil 6.5. %10-20-30 B₄C takviyeli kaplamanın 2.katmanının kuvvet-zaman grafiği



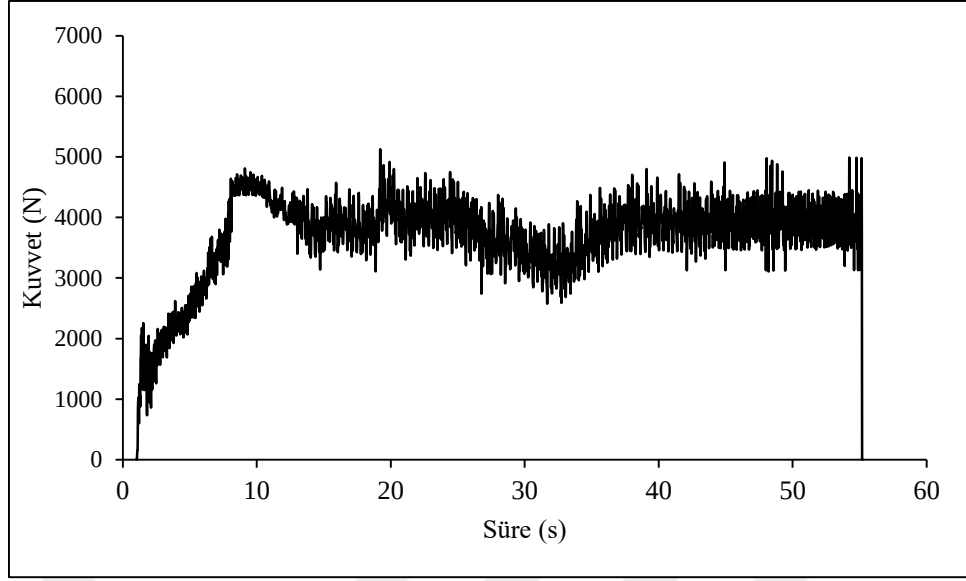
Şekil 6.6. %10-20-30 B₄C takviyeli kaplamanın 3.katmanının kuvvet-zaman grafiği



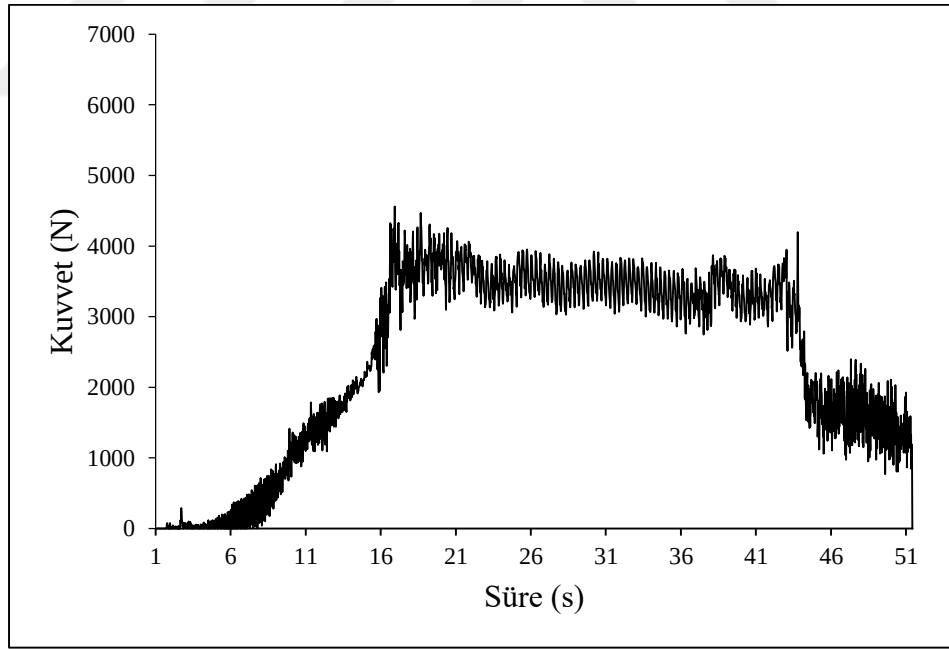
Şekil 6.7. %10-30-60 B₄C takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği



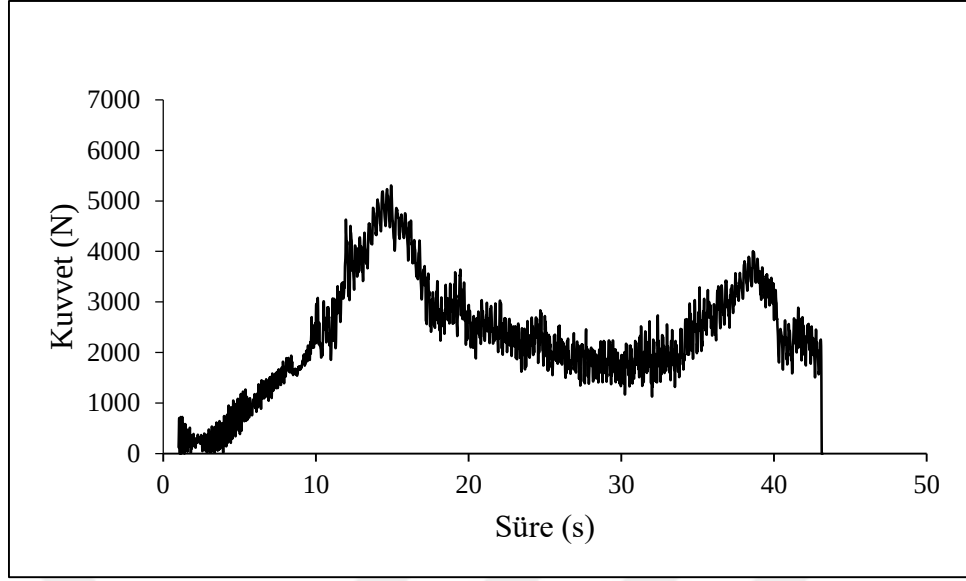
Şekil 6.8. %10-30-60 B₄C takviyeli kaplamanın 2.katmanının kuvvet-zaman grafiği



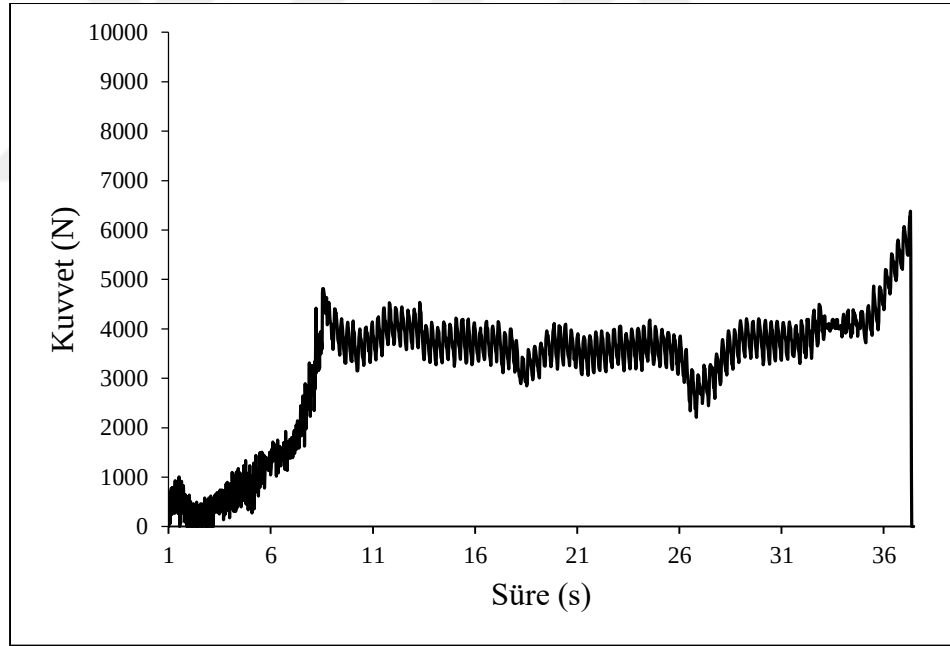
Şekil 6.9. %10-30-60 B₄C takviyeli kaplamanın 3.katmanının kuvvet-zaman grafiği



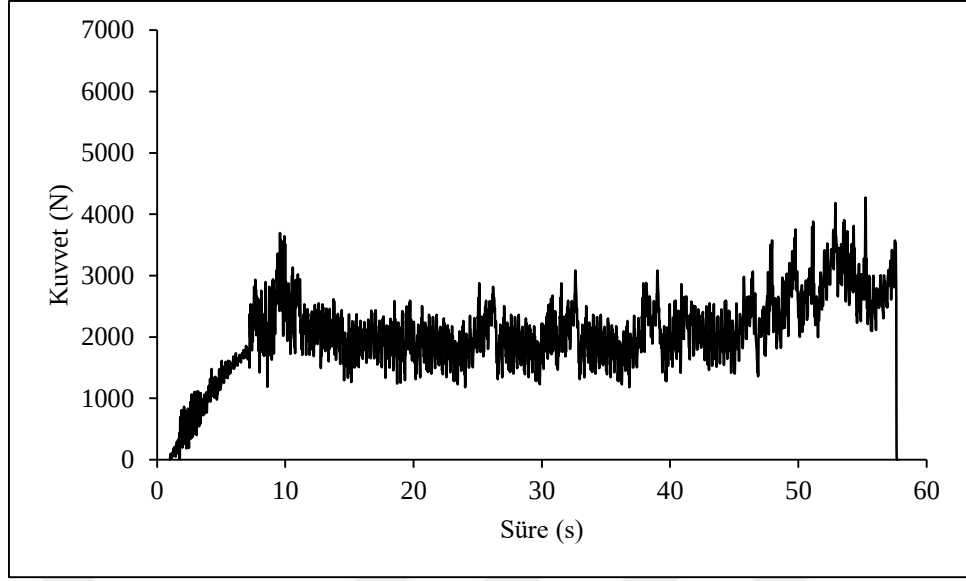
Şekil 6.10. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın 1. katmanının kuvvet-zaman grafiği



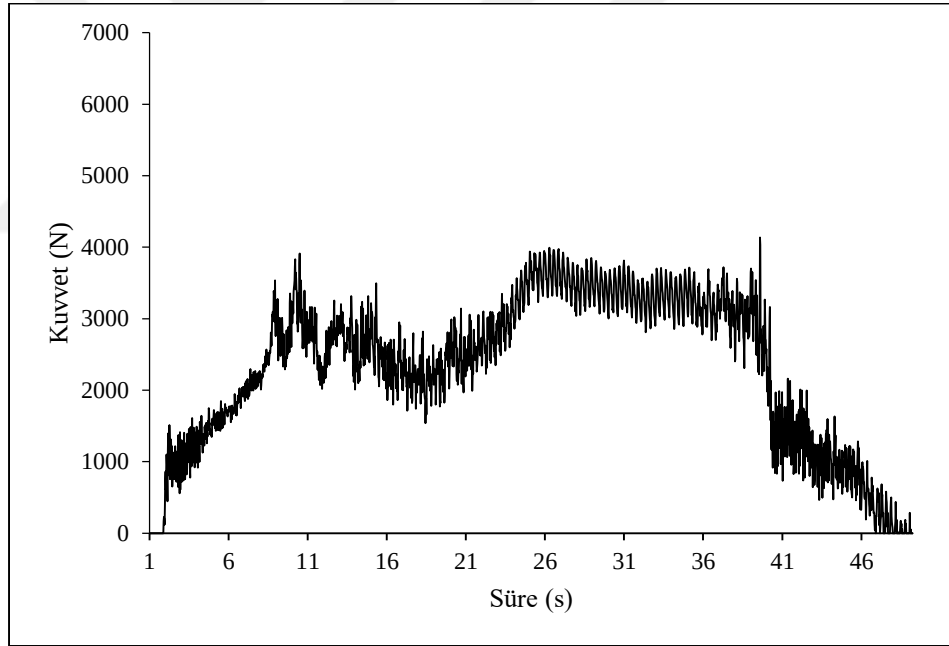
Şekil 6.11. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın 2. katmanının kuvvet-zaman grafiği



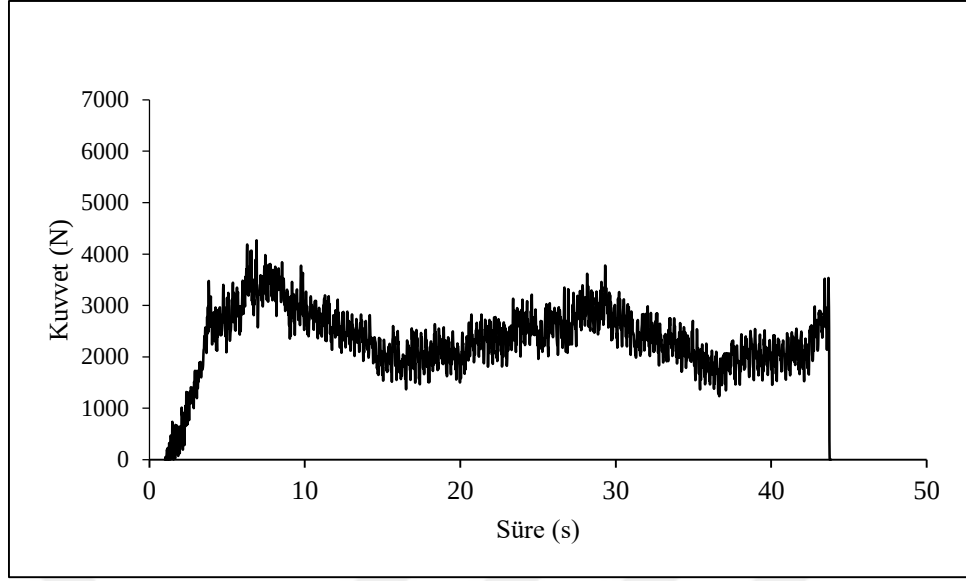
Şekil 6.12. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının kuvvet-zaman grafiği



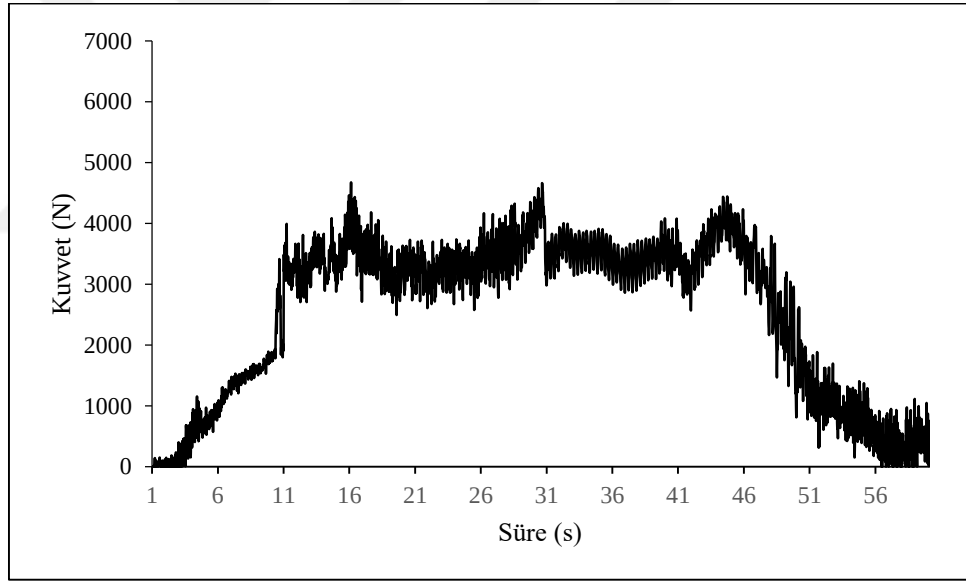
Şekil 6.13. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği



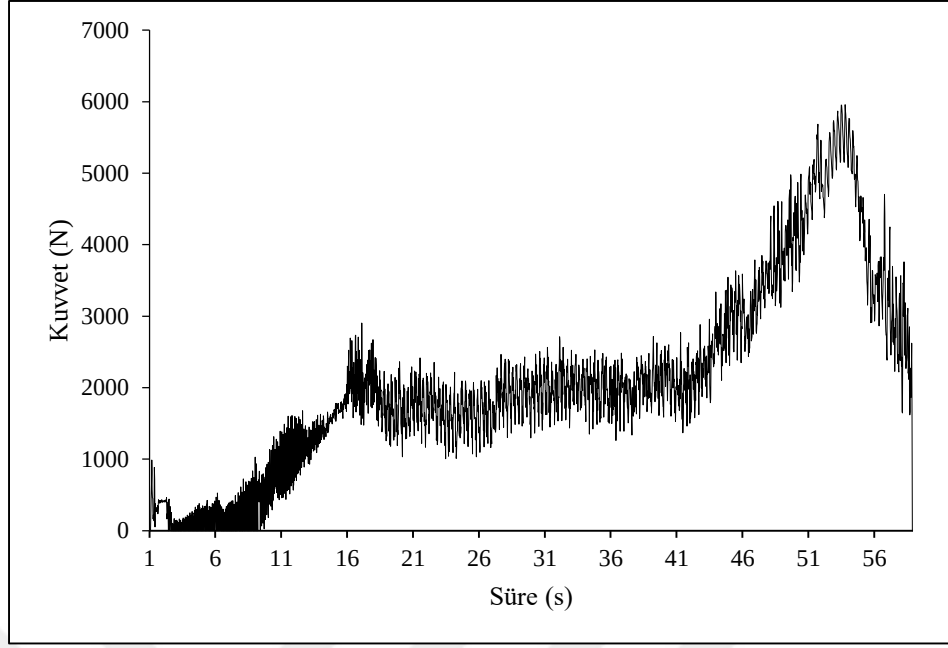
Şekil 6.14. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 2.katmanının kuvvet-zaman grafiği



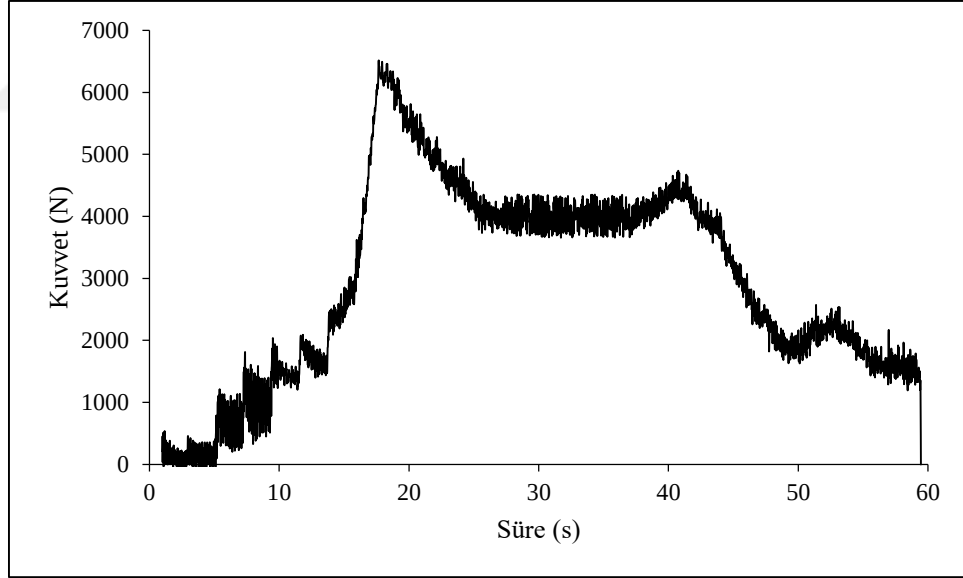
Şekil 6.15. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının kuvvet-zaman grafiği



Şekil 6.16. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 1.katmanının kuvvet-zaman grafiği

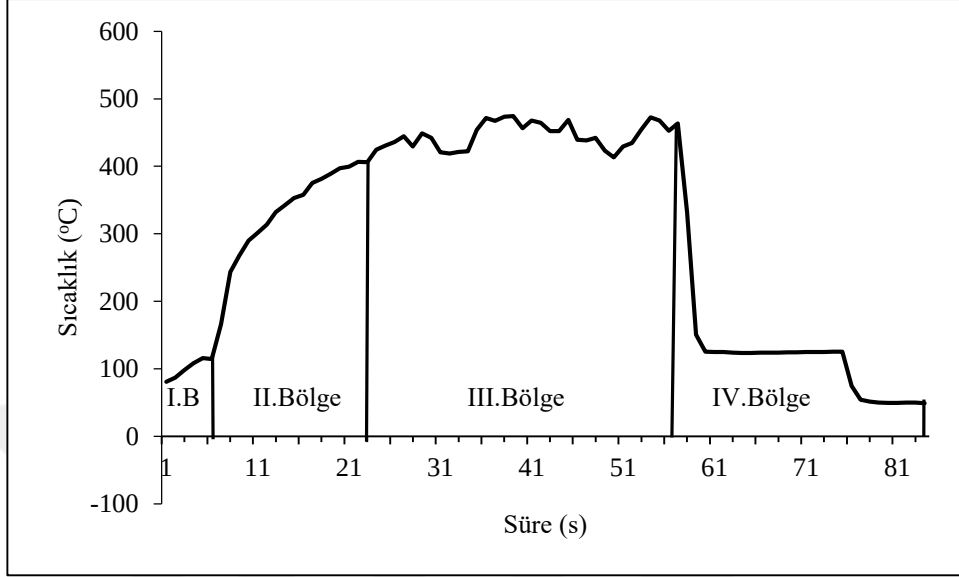


Şekil 6.17. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 2.katmanının kuvvet-zaman grafiği

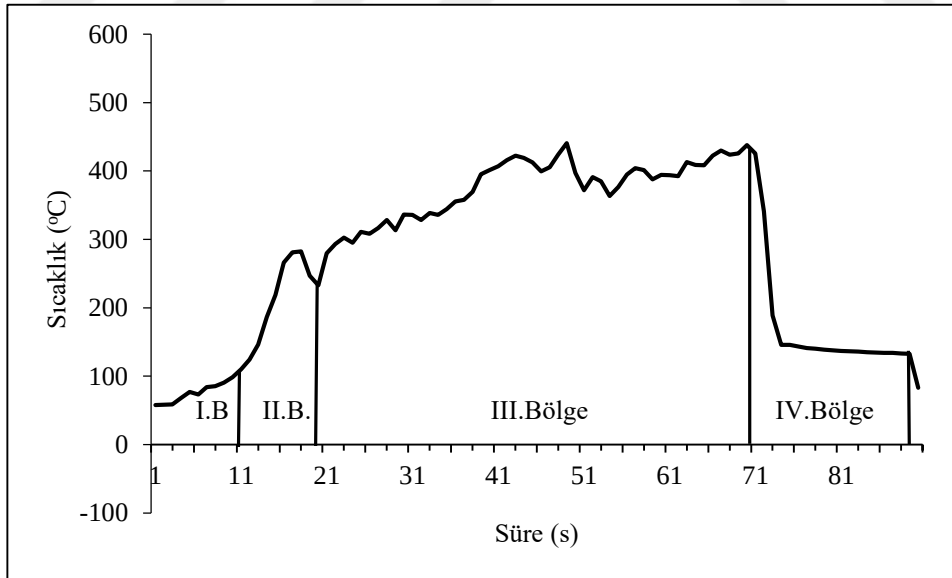


Şekil 6.18. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının kuvvet-zaman grafiği

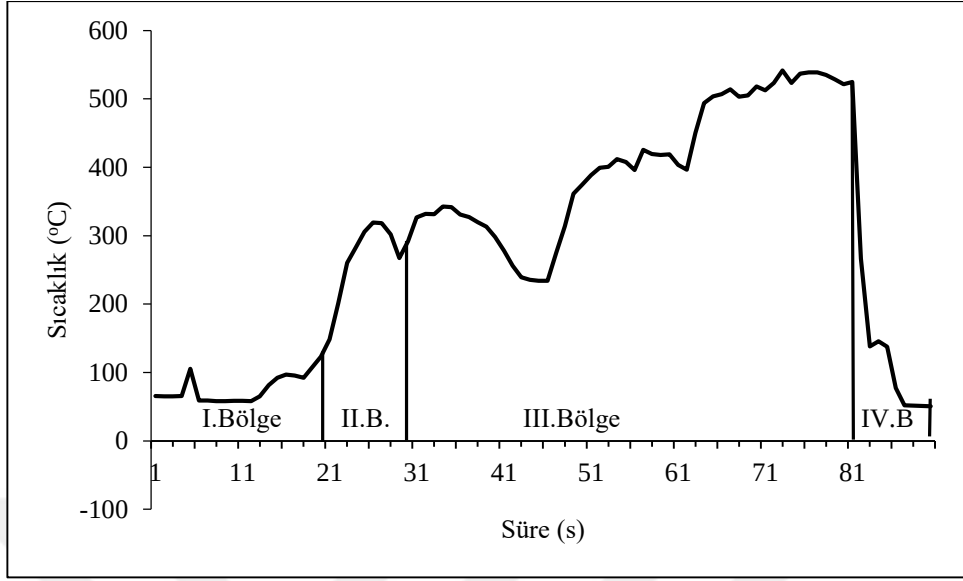
EK- 4 : SICAKLIK – ZAMAN GRAFİKLERİ



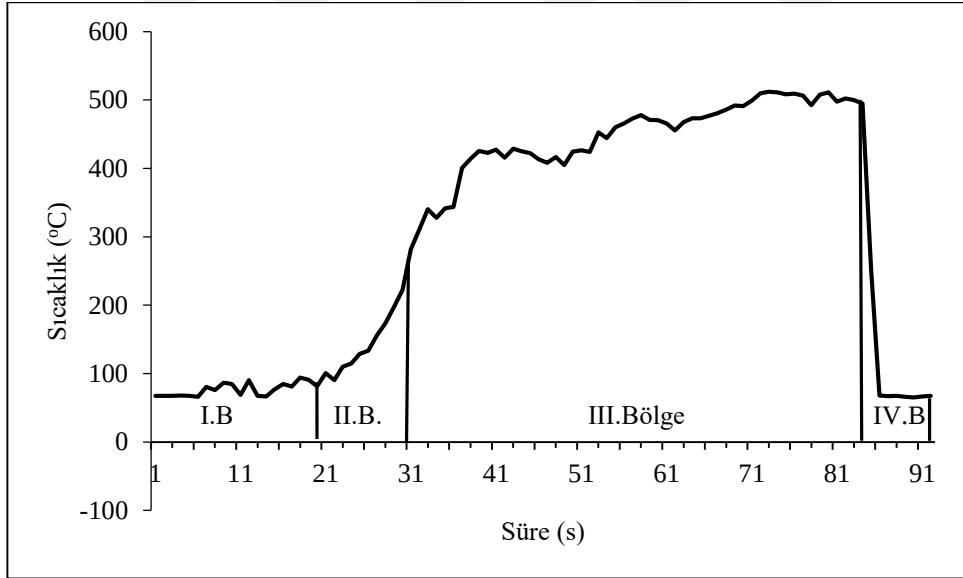
Şekil 6.19. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın 1.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



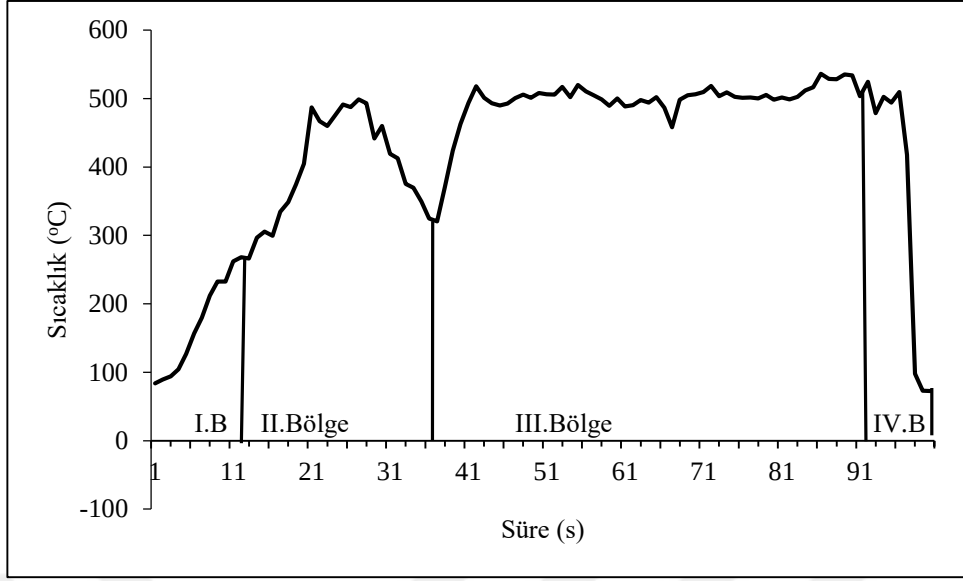
Şekil 6.20. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın 2.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



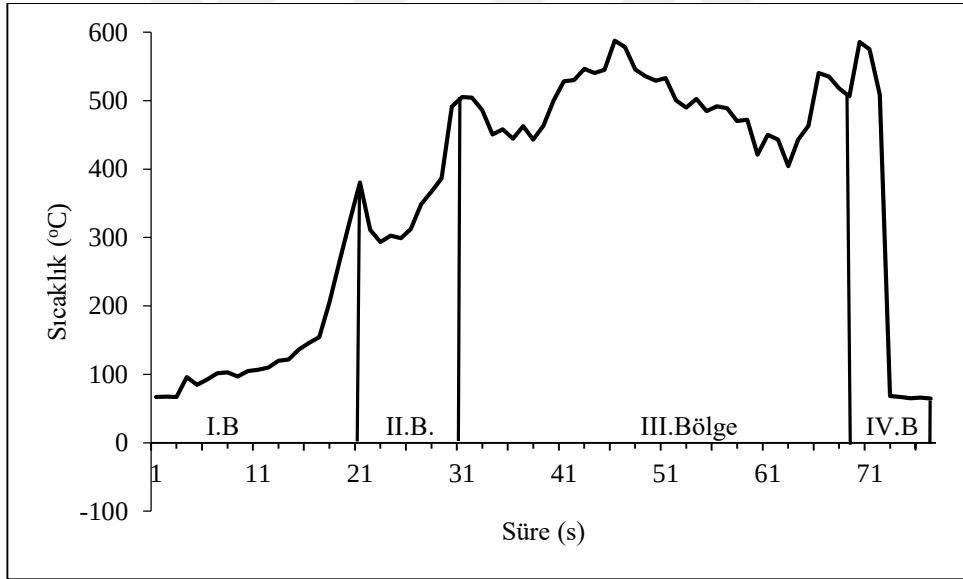
Şekil 6.21. %5-15-30 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 6.22. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 1.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



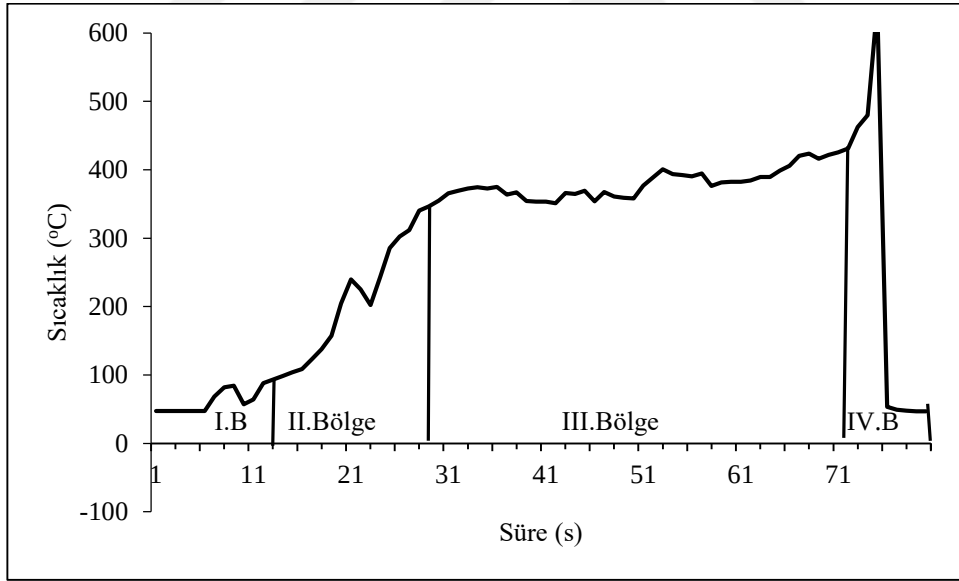
Şekil 6.23. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 2.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



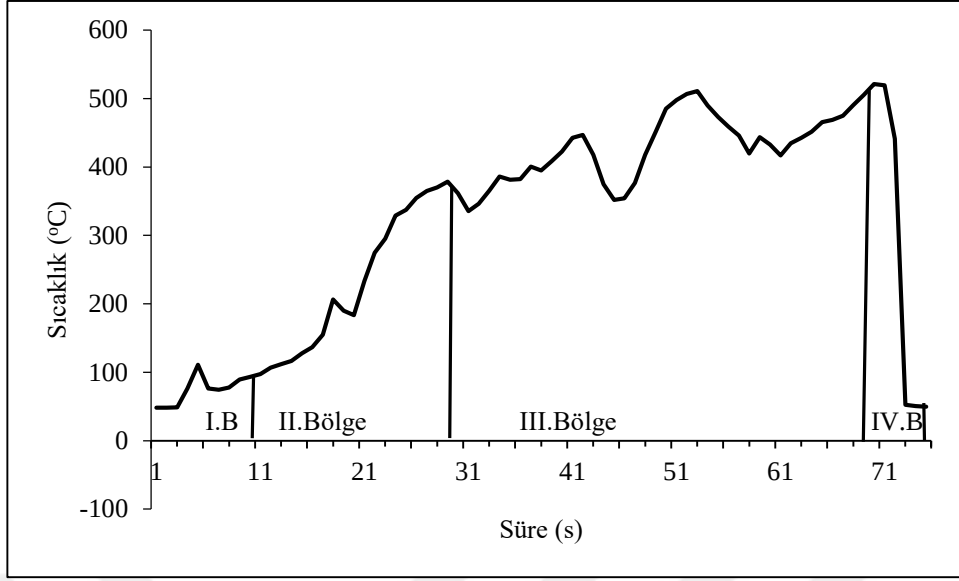
Şekil 6.24. %10-20-30 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



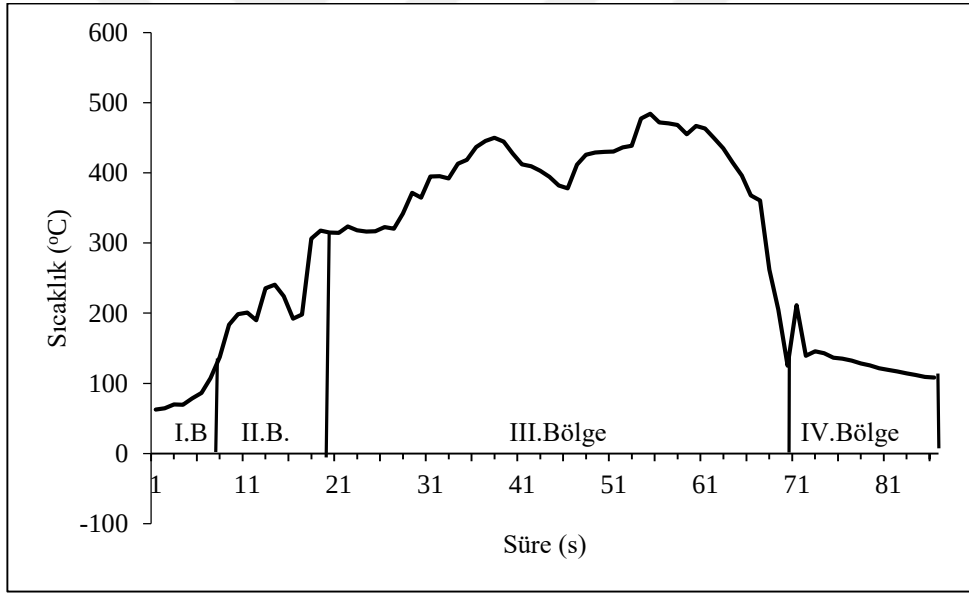
Şekil 6.25. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 1.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



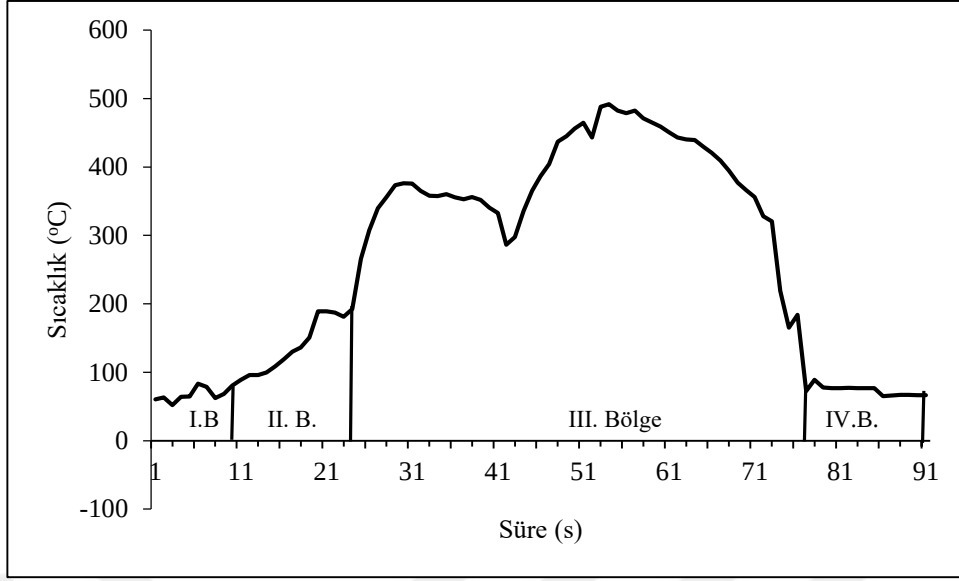
Şekil 6.26. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 2.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



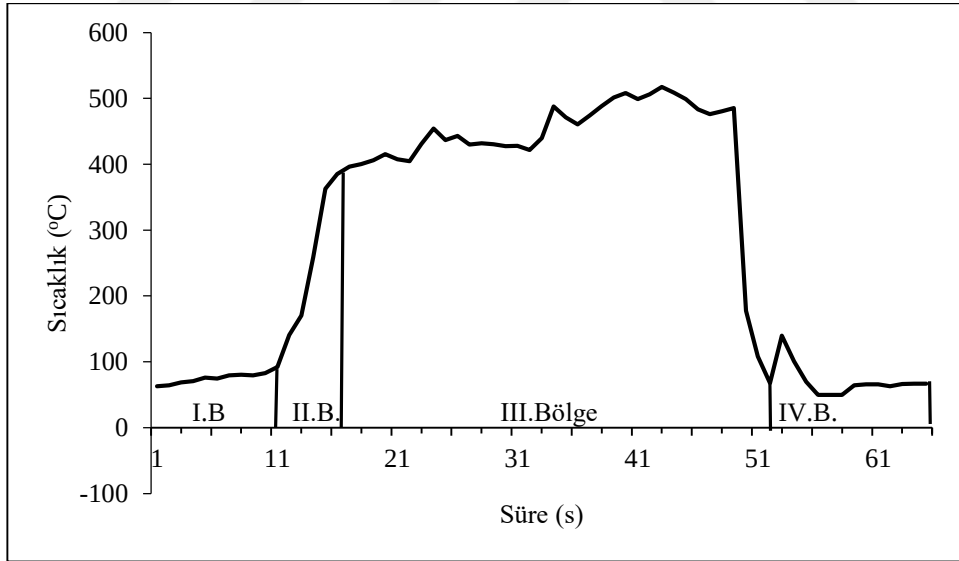
Şekil 6.27. %10-30-60 TiC takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



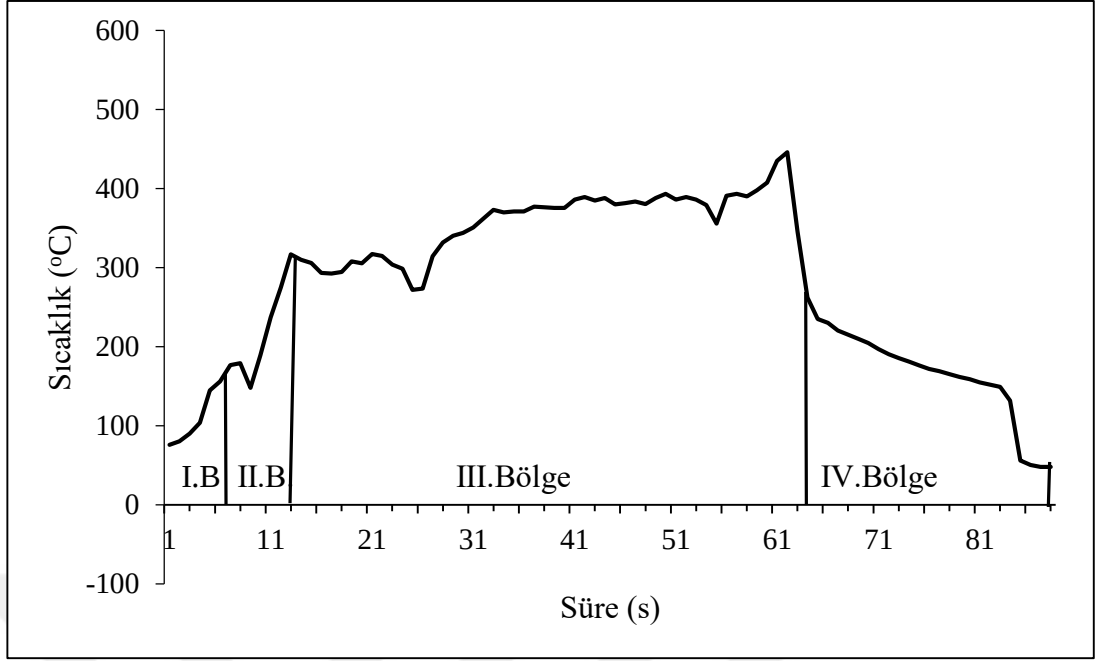
Şekil 6.28. %5-15-30 B₄C takviyeli kaplamanın 1.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



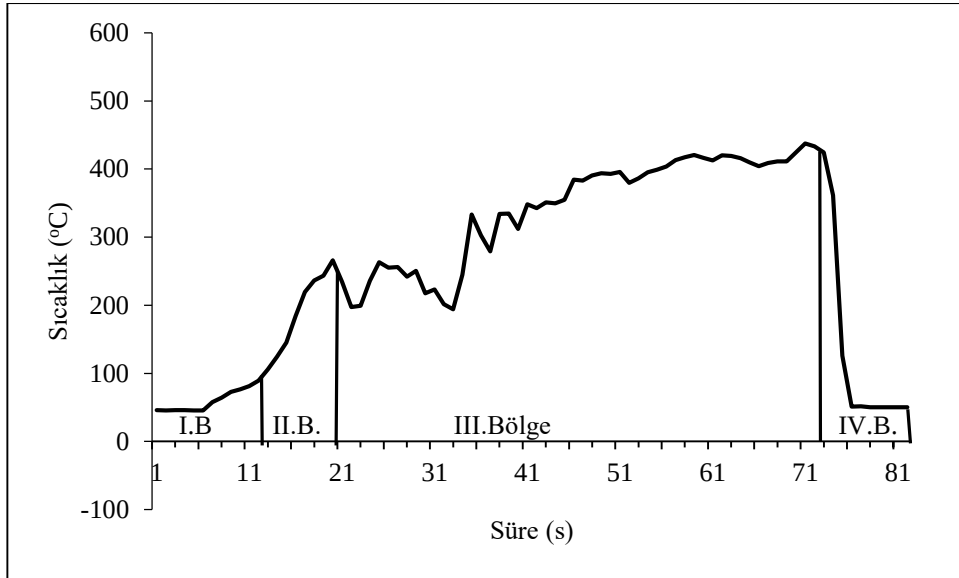
Şekil 6.29. %5-15-30 B₄C takviyeli kaplamanın 2.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



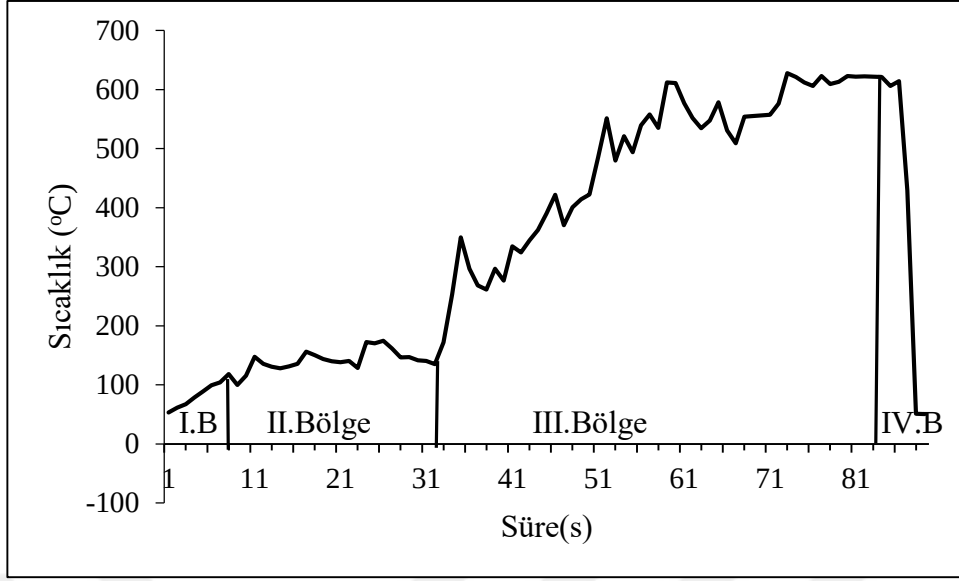
Şekil 6.30. %5-15-30 B₄C takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



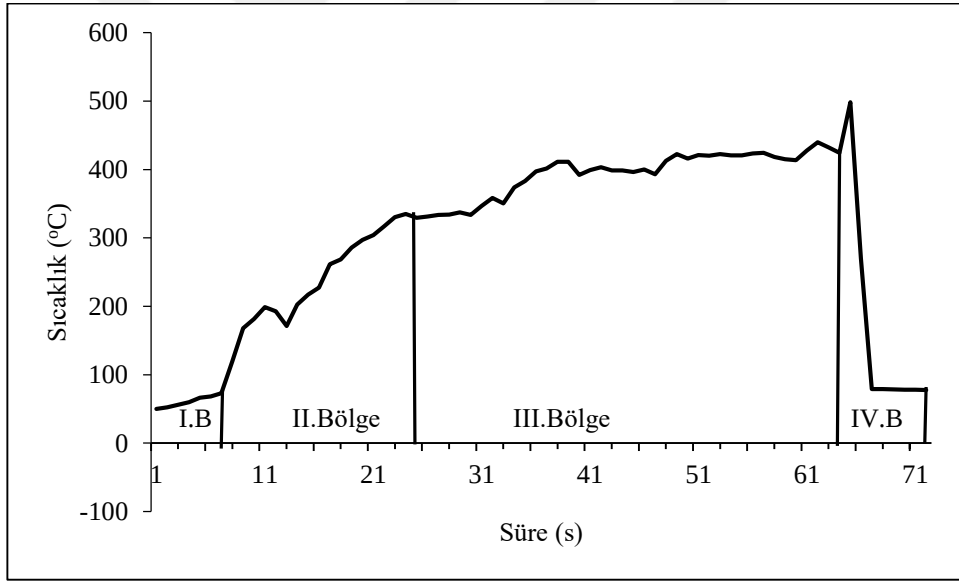
Şekil 6.31. %10-20-30 B₄C takviyeli kaplamanın 1.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



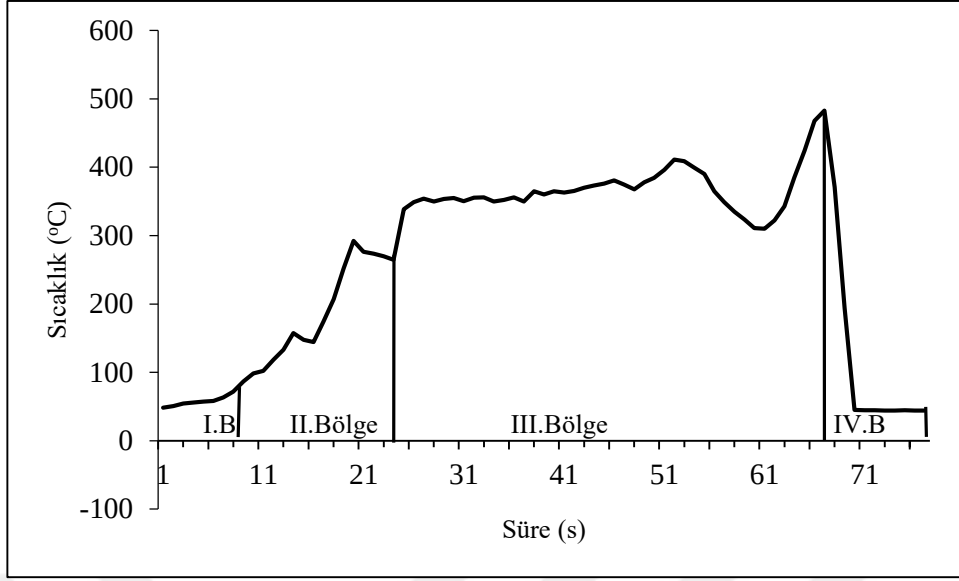
Şekil 6.32. %10-20-30 B₄C takviyeli kaplamanın 2.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



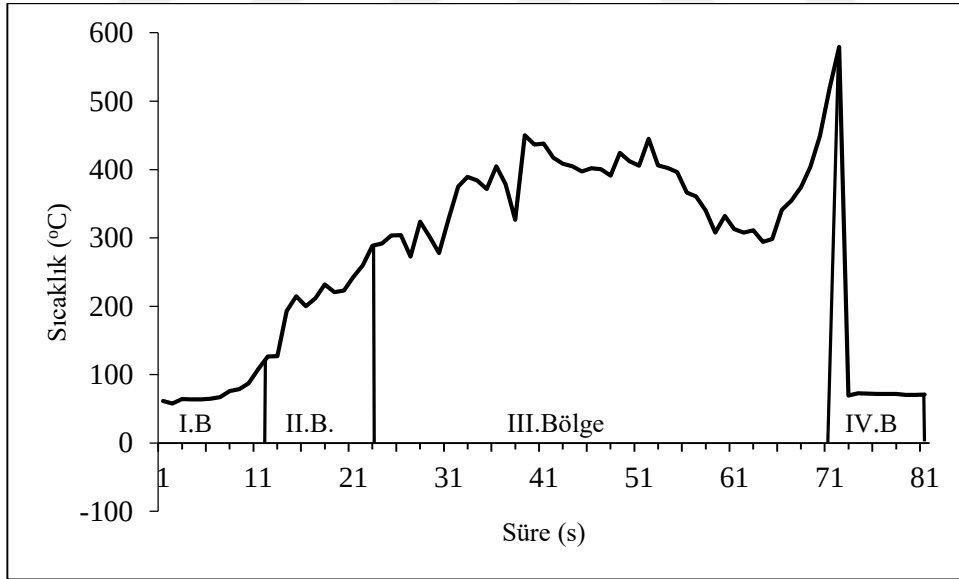
Şekil 6.33. %10-20-30 B₄C takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 6.34. %10-30-60 B₄C takviyeli kaplamanın 1. katmanının sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 6.35. %10-30-60 B₄C takviyeli kaplamanın 2. katmanının sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 6.36. %10-30-60 B₄C takviyeli kaplamanın 3.katmanının sıcaklık-zaman grafiği

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Erbil ÖZCAN

KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Yeri : Aksaray
Doğum Yılı : 1988
Uyruğu : T.C.
Adres : Çaydağcra Mah.Ş.Polis Oral Ergin Cad. No:1/9 Elazığ
E-posta : meozcan@firat.edu.tr
Yabancı Diller : İngilizce (Düzey: Orta)

ARAŞTIRMACI BİLGİLERİ

Öğrenci Orcid ID : 0000-0003-1641-8279
Danışman Orcid ID : 0000-0002-0595-153X

EĞİTİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans : “Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi ile Kaplanmış Alüminyum Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi” Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2013, Danışman: Prof.Dr.Latif ÖZLER
Lisans : Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, 2010.
Lise : İbrahim Bodur Anadolu Lisesi, Çan/Çanakkale, 2006

ARAŞTIRMA DENEYİMİ

- ✓ Takım tezgahları laboratuvarında mevcut olan talaşlı imalat tezgahları (torna, freze, matkap, taşlama, vargel)
- ✓ AutoCAD, SolidWORKS, ve MS Office programları.

İŞ DENEYİMİ

2011 – ... :Fırat Üniversitesi Müh. Fakültesi Araştırma Görevlisi

AKADEMİK FAALİYETLER

Makaleler:

SCI Dergilerde Yayımlanan

1. Gradient composite coatings on AA5754 using friction stir process, Tosun, G., Ozler L., Özcan, ME., (2020) Surface Engineering, 36:5, 447-455, DOI: 10.1080/02670844.2019.1665279 (Doktora tezinden üretilmiştir.)
2. Influence of B₄C powder reinforcement on coating structure, microhardness and wear in friction surfacing, Ozler L., Tosun, G., Özcan, ME., Materials and Manufacturing Processes, DOI: 10.1080/10426914.2020.1772480 (Doktora tezinden üretilmiştir.)

Uluslararası Dergilerde Yayımlanan

1. Investigation of surface roughness of Al7075 material coated with micro-arc oxidation method, ÖZCAN ME., ÖZLER L., PARLAK N., Advances in Materials and Processing Technologies S:67-77, <https://doi.org/10.1080/2374068X.2015.1112147>

Bildiriler:

1. Hybrid Coating; Friction Coating Method with Gradient Coating, ÖZCAN, ME., ÖZLER, L., TOSUN, G., 8th International Conference on Advanced Technologies (ICAT-19) Ağustos 26-30, 2019, Sarajevo, Bosna Hersek.
2. Coating with Friction Surfacing Method: A Review ÖZCAN, ME., ÖZLER, L., TOSUN, G., 3rd International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS-2018), 17-21 Temmuz 2018, Skopje, Makedonya.
3. Optimization of Wear Parameters of MAO Coated Aluminum Based on Taguchi Method, ÖZCAN, ME., ÖZLER, L., ŞANLITÜRK, İH., 11th International Conference on Engineering, Science and Technology (ICEST-2017), 13-15 Mart 2017 Dubai, Birleşik Arap Emirlikleri.
4. Investigation of Surface Roughness of Al7075 Material Coated With Micro Arc Oxidation Method, ÖZCAN ME., ÖZLER L., PARLAK N., Advances in Materials and Processing Technology Conference (AMPT-2014) 16-20 Kasım 2014, Dubai, Birleşik Arap Emirlikleri.
5. Yüksek Manganlı Çeliğin Tel Erozyon İle İşlenmesinde Yüzey Pürüzlülüğünün Araştırılması, KURUBAŞ, H., ÖZLER L., ÖZCAN ME., 4.Uluslararası Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS-2013), 7-9 Kasım 2013, Aydın.
6. AISI D6 İş Parçasının Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi, PARLAK N, ÖZLER L., ÖZCAN ME., 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi (TİMAK-2012) 29-30 Kasım 2012 , Balıkesir.

Projeler:

1. Bor Karbür ve Titanyum Karbür İlaveli Sürtünmeli Kaplamanın Karakteristik Özelliklerinin İncelenmesi (TÜBİTAK 3001 Projesi, Proje Kodu: 216M441)
2. Mikro Ark Oksidasyon Yöntemi İle Kaplanmış Alüminyum Alaşımının Aşınma Davranışının İncelenmesi (BAP Projesi, Proje Kodu: MF13-04)
3. Teknogirişim Sermaye Desteği Projesi (TGSD), Hasta Transfer Sedyesi, (Proje Kodu: 0431.TGSD.2015)