

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Ag-Fe-Co/CaP TOZ KATKILI SİNTERLENMİŞ ELEKTROT İLE ELEKTRİKSEL
KIVILCIMLA İŞLENMİŞ Ti-6Al-4V YÜZEYLERİN YAPISAL VE MORFOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SEMA KALAMAN

MART 2022

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ag-Fe-Co/CaP TOZ KATKILI SİNERLENMİŞ ELEKTROT İLE ELEKTRİKSEL
KIVILCIMLA İŞLENMİŞ Ti-6Al-4V YÜZEYLERİN YAPISAL VE MORFOLOJİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sema KALAMAN

DANIŞMAN: Prof. Dr. Bülent EKMEKCİ

ZONGULDAK

Mart 2022

KABUL:

Sema KALAMAN tarafından hazırlanan “Ag-Fe-Co/CaP Toz Katkılı Sinterlenmiş Elektrot ile Elektriksel Kıvılcımla İşlenmiş Ti-6Al-4V Yüzeylerin Yapısal ve Morfolojik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 16/03/2022

Danışman: Prof. Dr. Bülent EKMEKÇİ

.....
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Oktay ELKOCA

.....
Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Üye: Doç. Dr. Barış AVAR

.....
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

....../....../2022

Prof. Dr. Ahmet ÖZARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Sema KALAMAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Ag-Fe-Co/CaP TOZ KATKILI SİNERLENMİŞ ELEKTROT İLE ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLENMİŞ Ti-6Al-4V YÜZEYLERİN YAPISAL VE MORFOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Sema KALAMAN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent EKMEKÇİ

Mart 2022, 114 sayfa

Elektriksel Kıvılcımla İşleme (EKİ) yönteminde, gerilimle yüklenen elektrot ve iş parçası arasında dielektriğin yalıtım direncinin kırılması ile kıvılcım meydana gelir. Kıvılcımın etki ettiği noktalarda sıcaklık ve basınç çok yüksektir. Elektriksel akımın sonlanmasıyla malzemenin buharlaşmasını ve kaynamasını engelleyen basınç da ortadan kalkmaktadır. Basıncın ortadan kalkmasıyla plazma boşluğu dielektrik sıvı ile dolmakta ve aşırı ısınan malzeme dielektrik sıvı içine püskürmektedir. Bu şekilde iş parçasının yüzeyinde yarım küre benzeri krater oluşturarak malzeme kaldırmaktadır. Ayrıca püsküren malzeme soğuk dielektrik ortamın etkisiyle küre benzeri katılaşarak yüzeye çökelmektedir. Krater boyutları ve şekilleri elektriksel parametrelerle değiştirilmekte ve iş parçası yüzeyi ortamla (elektrot, dielektrik ortam vb.) etkileşerek fonksiyonel yüzeyler oluşturulabilmektedir. Bu doğrultuda Ti-6Al-4V alaşımının yüzeyleri Ag-Fe-Co/CaP sinterlenmiş elektrot ile EKİ’de işlenerek, implantın başarısı için gerekli hem gelişmiş osseointegrasyona sahip hem de bakteriyel dirençli yüzeyler oluşturmak amaçlanmıştır.

ÖZET (devam ediyor)

Bu tez çalışmasında Fe ve Co kolay bulunabilir ve ekonomik bir malzeme olması sebebiyle ayrıca Ti ile birlikte gelişmiş biyouyumluluk ve korozyon direncine sahip alaşımlar elde edilebildiği için sinterlenmiş elektrot bileşiminde yer almıştır. Ag ise yüzeylerde antibakteriyel özelliğin geliştirilmesi adına tercih edilmiştir. Ek olarak artırılmış biyouyumluluk için elektrot bileşiminde CaP partikülleri yer almaktadır.

Bu çalışmada 7 A darbe akımında ve 6 μ s, 12 μ s, 25 μ s, 50 μ s ve 100 μ s darbe sürelerinde yüzeyler EKİ ile işlenmiştir. Sinterlenmiş elektrot olarak %100 Ag-Fe-Co (A elektrot), %25 CaP-%75 Ag-Fe-Co (B elektrot), %35 CaP-%65 Ag-Fe-Co (C elektrot) ve %50 CaP-%50 Ag-Fe-Co (D elektrot) kullanılmıştır. İşlenmiş yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu ikincil elektron (SEM-SE) fotoğrafları alınarak değerlendirilmiştir. Yüzeydeki mikro yapısal değişimler ise taramalı elektron mikroskobu geri saçılan elektron kırınımı (SEM-BSED) fotoğraflarıyla birlikte elementel analizler alınarak incelenmiştir. Ayrıca X-ışını kırınımı (XRD) analizleri ile elektrot bileşimine ve darbe süresine bağlı malzeme transferinin etkisi ile oluşan fazlar tespit edilmiştir. Çalışmada elektrot ve iş parçasındaki işleme öncesi ve sonrası ağırlık değişimleri, işleme süresi ve elementel analizlerden elde edilen % ağırlıkça malzeme miktarları birlikte karşılaştırılarak işleme parametrelerine bağlı malzeme transfer mekanizmaları açıklanmıştır.

Sonuç olarak elektrot bileşiminde CaP oranı arttıkça yüzeye olan malzeme transferi artmıştır. Ag bakımından en zengin yüzeyler ikincil kıvılcımların etkili olduğu darbe sürelerinde ve deşarj gücünün azaldığı yüksek darbe sürelerinde incelenmiştir. Elde edilen yüksek enerjili, çatlaklı mikro yapılar, CaP bileşikleri ve HA içeren Ag katkılı yüzeyler ile biyouyumluluğun ve antibakteriyel özelliğin geliştirileceği öngörülmektedir. Ek olarak iç içe geçmiş gözenekli kemik benzeri (scaffold) yapıların sinterlenmiş elektrotta birbiri içinde tam çözünmeyen bileşenler kullanarak EKİ ile üretilebileceği bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektriksel kıvılcımla işleme, EKİ, sinterlenmiş elektrot, toz metalürjisi, Gümüş, Hidroksiapatit

Bilim Kodu: 625.02.05

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL AND MORPHOLOGICAL PROPERTIES OF ELECTRICAL DISCHARGE MACHINED SURFACES OF Ti-6Al-4V USING Ag-Fe-Co/CaP POWDER MIXED SINTERED ELECTRODES

Sema KALAMAN

**Zonguldak Bülent Ecevit University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor: Prof. Dr. Bülent EKMEKÇİ

March 2022, 114 pages

In Electrical Discharge Machining (EDM), a spark occurs between the electrodes loaded voltage when insulation resistance of the dielectric is broken. The temperature and pressure are extremely high at the points affected by spark. The pressure preventing the evaporation and boiling of the material disappears with the termination of the pulse current. Once the pressure vanishes, dielectric liquid suddenly flows into plasma space, and the superheated material explodes into the dielectric liquid. As a result, it removes material by forming a hemisphere-like crater on the surface of the workpiece. Also, ejected material solidifies like a sphere due to the cooling effect of the dielectric medium after it precipitates on the surface. Electrical parameters modulate crater sizes and shapes, and functional surfaces can be created by interacting the workpiece surface with the medium, such as tool electrode and dielectric. In this direction, the research aims not only to enhance osseointegration but also advance bacterial resistance required for the success of the implant by processing the surfaces of the Ti-6Al-4V alloy with EDM using the Ag-Fe-Co/CaP sintered electrode.

ABSTRACT (continued)

The sintered electrode composition contains Fe and Co elements since they are easily accessible and economical materials, and alloys or compounds possessing improved biocompatibility and corrosion resistance can be obtained with the interaction between Fe, Co, and Ti on the surface due to discharge energy. On the other hand, Silver (Ag) was preferred as the electrode material to achieve antibacterial surfaces. Furthermore, the electrode composition includes CaP particles for enhanced biocompatibility.

In this study, surfaces were machined in EDM with 7 A pulse current and five pulse-on time levels (6 μ s, 12 μ s, 25 μ s, 50 μ s, and 100 μ s). 100% Ag-Fe-Co (A electrode), 25% CaP-75% Ag-Fe-Co (B electrode), 35% CaP-65% Ag-Fe-Co (C electrode) and 50% CaP-50% Ag-Fe-Co (D electrode) were used as sintered electrode. Surface morphology was evaluated by taking Scanning Electron Microscopy-Secondary Electrons (SEM-SE) photographs. The microstructural variations on the surface were examined with Scanning Electron Microscopy-Backscatter Electrons Diffraction (SEM-BSED) photographs and elemental analysis. In addition, the phase changes due to the effect of material transfer depending on the electrode composition and pulse duration were confirmed by X-Ray Diffraction analysis (XRD). We have explained material transfer mechanisms depending on the processing parameters by comparing the weight differences before and after machining in the electrode and the workpiece, the processing time, and the % weight of material obtained from elemental analysis.

In conclusion, the material transfer to the surface increased as the CaP ratio in the electrode composition increased. The most Ag-rich surfaces were observed at pulse-on times in which secondary sparks were of influence and at high pulse-on times, which led to lower discharge power. Ag-doped surfaces incorporating high-energy cracked microstructures, CaP compounds, and HA could be obtained in this study and propose the potential to improve biocompatibility and bacterial resistance. In addition, it has been found that EDM is a promising method to produce interconnected porous bone-like (scaffold) structures using elements that are insoluble in each other in sintered electrodes.

Keywords: Electrical discharge machining, EDM, sintered electrode, powder metallurgy, Silver, Hydroxyapatite

Science Code: 625.02.05

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim sürecince bilgi birikimi ve deneyimi ile bana yol gösteren, kendisine ulaşmak istediğim her anda tüm samimiyeti ile her zaman diyalog kurabildiğim değerli hocam Prof. Dr. Bülent EKMEKÇİ'ye teşekkürü borç bilirim.

Bu süreçte her konuda yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Dr. Hamidullah YAŞAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Kalıp üretim sürecinde yardımlarını esirgemeyen Zonguldak TTK Maden Makinaları Fabrikası İşletme Müdürü, Makine Yüksek Mühendisi Sayın Kadir ÇELİK'e teşekkürü borç bilirim.

Hayatıma anlam katan sevgili annem Arife ÇETİNKAYA'ya ve canım babam Mehmet ÇETİNKAYA'ya, kardeşim Şefika YILDIZ'a, değerli eşi Emre YILDIZ'a ve yeğenlerim Zeynep ve Melek'e her zaman yanımda oldukları ve beni destekledikleri için teşekkür ederim.

Tüm bu süreçte iyi ve kötü zamanlarımda her türlü desteği sağlayan, beni her koşulda yüreklendiren ve motive eden değerli eşim Sudi KALAMAN'a ve varlıklarına her an şükrettiğim, sevgilerinden güç aldığım evlatlarım Esmâ Bilge KALAMAN ve Mehmet Toprak KALAMAN'a gösterdikleri sabır ve destekleri için teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
 BÖLÜM 1 GİRİŞ	 1
1.1 EKİ MEKANİZMASI	2
1.2 TOZ KATKILI ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME (TK-EKİ)	4
1.2.1 TK-EKİ Mekanizması.....	5
1.2.1.1 Deşarj Boşluğunun Artması	5
1.2.1.2 Deşarj Kanalının Genişlemesi	6
1.2.1.3 Kıvılcım Frekansının Artması	7
1.2.1.4 Kıvılcımların Bölünmesi	8
1.3 EKİ ve TK-EKİ PROSES PARAMETRELERİ.....	9
1.3.1 Deşarj Gerilimi.....	10
1.3.2 Darbe Akımı.....	10
1.3.3 Darbe Süresi ve Bekleme Süresi.....	10
1.3.4 Kutuplama.....	13
1.3.5 Dielektrik Sıvı ve Uygulama Şekli	13
1.4 EKİ'DE YÜZEY KATMANLARI	13
1.5 EKİ'DE YÜZEY MODİFİKASYONLARI	14
1.5.1 Yüzey Pürüzlülüğü.....	14
1.5.2 Yüzey Çatlakları	16

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	Sayfa
1.5.3 Yüzey ve Yüzey Altı Katmanları.....	19
1.5.4 Fonksiyonel Yüzeyler	23
BÖLÜM 2 LİTERATÜR TARAMASI	25
2.1 EKİ VE TK-EKİ İLE FONKSİYONEL VE BİYOUYUMLU YÜZEYLER.....	26
2.2 TM-ELEKTROT KULLANILARAK OLUŞTURULAN FONKSİYONEL VE BİYOUYUMLU YÜZEYLER.....	31
BÖLÜM 3 AMAÇ DENEY DÜZENİĞİ ve YÖNTEM.....	39
3.1 GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI.....	39
3.2 DENEYSEL DÜZENEK VE YÖNTEM	41
3.2.1 İş Parçası Hazırlık Aşaması	41
3.2.2 Toz Metalurjisi ile Elektrot Üretimi	41
3.2.3 Yöntem.....	49
BÖLÜM 4 BULGULAR.....	59
4.1 YÜZEY TOPOGRAFYASI	59
4.1.1 Elektrot A (%100 Ag-Fe-Co T/M)	59
4.1.2 Elektrot B (%75 Ag-Fe-Co -%25 CaP T/M)	61
4.1.3 Elektrot C (%65 Ag-Fe-Co -%35CaP T/M)	61
4.1.4 Elektrot D (%50 Ag-Fe-Co -%50 CaP T/M)	63
4.2 GERİ SAÇILMIŞ ELEKTRON GÖRÜNTÜSÜ VE ALANSAL ENERJİ DAĞILIM ANALİZİ	64
4.2.1 Elektrot A (%100 Ag-Fe-Co T/M)	64
4.2.2 Elektrot B (%25CaP-%75 Ag-Fe-Co T/M)	69
4.2.3 Elektrot C (%35 CaP-%65 Ag-Fe-Co T/M)	74
4.2.4 Elektrot D (%50 CaP-%50 Ag-Fe-Co T/M)	79
4.3 X-IŞINLARI KIRINIM DİFRAKTOMETRESİ (XRD) ANALİZİ	81

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 5 DEĞERLENDİRMELER	93
5.1 SONUÇLAR.....	105
5.2 İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR	106
KAYNAKLAR.....	107





ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Bir kıvılcım çevrimi	2
Şekil 1.2 Ardışık kıvılcım oluşumu.....	3
Şekil 1.3 Kıvılcım sırasında oluşan erime ve buharlaşma.....	4
Şekil 1.4 TK-EKİ’de kıvılcımların saçılması.....	6
Şekil 1.5 Deşarj boşluğunun artması.....	6
Şekil 1.6 Dielektrik sıvıya SiC ilavesinin kıvılcım mekanizmasına etkisi	8
Şekil 1.7 Farklı tip kıvılcım modelleri	9
Şekil 1.8 EKİ ve TK-EKİ’deki başlıca etkili proses parametreleri.....	11
Şekil 1.9 Darbe akımı değişiminin malzeme kaldırma mekanizmasına etkisi.....	12
Şekil 1.10 Darbe süresi değişiminin malzeme kaldırma mekanizmasına etkisi.....	12
Şekil 1.11 EKİ’de yüzey ve yüzeyaltı katmanları.....	14
Şekil 1.12 EKİ’de çatlak oluşumu.....	18
Şekil 1.13 EKİ’de toz katkısının çatlak oluşumuna etkisi	19
Şekil 3.1 Deneylerde kullanılan a) Ti-6Al-4V alaşımı iş parçası, b) Isıl işlem fırını.	42
Şekil 3.2 Ag-Fe-Co tozlarının SEM ve EDS analizleri.....	43
Şekil 3.3 CaP tozlarının SEM ve EDS analizleri.	43
Şekil 3.4 CaP tozlarının partikül boyut analizi.	44
Şekil 3.5 T/M ile elektrot üretmek için gereken toz ölçümleri.	44
Şekil 3.6 Bilyeli öğütme cihazı.	45
Şekil 3.7 T/M elektrot üretiminde kullanılan özel kalıp.	46
Şekil 3.8 Atölye tipi manuel hidrolik pres.	46
Şekil 3.9 T/M elektrot üretim aşamaları.....	47
Şekil 3.10 Elektrot bağlama şekilleri	48
Şekil 3.11 Su arıtma cihazı.....	48
Şekil 3.12 Deneysel sistem.....	49
Şekil 3.13 İşlenen parçaların görünüşleri.	51
Şekil 3.14 Taramalı elektron mikroskobu.	52
Şekil 3.15 XRD cihazı.....	53

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.16 Otomatik hassas kesme cihazı.....	53
Şekil 3.17 Sıcak kalıp reçinesi.	54
Şekil 3.18 Bakalit pres cihazı.	55
Şekil 3.19 Numune inceleme aşamaları	55
Şekil 3.20 Zımparalama ve parlatma cihazı.	56
Şekil 3.21 Optik mikroskop.	56
Şekil 4.1 Elektrot A SEM-SE görüntüleri.....	60
Şekil 4.2 Elektrot B SEM-SE görüntüleri.	62
Şekil 4.3 Elektrot C SEM-SE görüntüleri.	63
Şekil 4.4 Elektrot D SEM-SE görüntüleri.....	64
Şekil 4.5 Elektrot A SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 6 μ s)	65
Şekil 4.6 Elektrot A SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 12 μ s)	66
Şekil 4.7 Elektrot A SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 25 μ s)	67
Şekil 4.8 Elektrot A SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 50 μ s).	68
Şekil 4.9 Elektrot A SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 100 μ s)	69
Şekil 4.10 Elektrot B SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 6 μ s)	70
Şekil 4.11 Elektrot B SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 12 μ s)	71
Şekil 4.12 Elektrot B SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 25 μ s)	72
Şekil 4.13 Elektrot B SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 50 μ s)	73
Şekil 4.14 Elektrot B SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 100 μ s)	74
Şekil 4.15 Elektrot C SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 6 μ s)	75
Şekil 4.16 Elektrot C SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi:12 μ s)	76
Şekil 4.17 Elektrot C SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 25 μ s)	77
Şekil 4.18 Elektrot C SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 50 μ s)	78
Şekil 4.19 Elektrot C SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 100 μ s)	79
Şekil 4.20 Elektrot D SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 6 μ s)	80
Şekil 4.21 Elektrot D SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 100 μ s)	81
Şekil 4.22 Darbe süresi 6 μ s için XRD kırınım desenleri karşılaştırması.....	83
Şekil 4.23 Darbe süresi 100 μ s için XRD kırınım desenleri karşılaştırması.....	83
Şekil 4.24 EKİ ile işlenmiş numunelerin yüzey kesitleri	85
Şekil 4.25 Elektrot A kesit mikro yapısı (darbe süresi: 6 μ s, 500X).....	86

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.26 Elektrot A kesit mikro yapısı (darbe süresi: 100 μ s, 500X).....	86
Şekil 4.27 Elektrot B kesit mikro yapısı (darbe süresi: 6 μ s, 500X).....	87
Şekil 4.28 Elektrot B kesit mikro yapısı (darbe süresi: 100 μ s, 500X).....	88
Şekil 4.29 Elektrot C kesit mikro yapısı (darbe süresi: 6 μ s, 500X).....	89
Şekil 4.30 Elektrot C kesit mikro yapısı (darbe süresi: 100 μ s, 500X).....	90
Şekil 4.31 Elektrot D kesit mikro yapısı (darbe süresi: 6 μ s, 200X).....	91
Şekil 4.32 Elektrot D kesit mikro yapısı (darbe süresi: 100 μ s, 200X).....	91
Şekil 5.1 EKİ yüzeylerinin Ag-Fe-Co-Ti elementel dağılımları.....	95
Şekil 5.2 EKİ yüzeylerinin Ca-P elementel dağılımları.....	96
Şekil 5.3 Çatlaklı koyu gri bölge.....	97
Şekil 5.4 Beyaz renkte keskin sınırlarla ayrılmış bölge	101
Şekil 5.5 Çatlaksız koyu gri bölge	102
Şekil 5.6 Parlak beyaz bölge	102
Şekil 5.7 Elektrot D kesit fotoğrafı	105



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 Ti-6Al-4V ELI alaşımının kimyasal bileşimi	42
Çizelge 3.2 Ti-6Al-4V ELI alaşımının kimyasal fiziksel ve mekanik özellikleri.....	42
Çizelge 3.3 Ag-Fe-Co tozlarının ICP-MS analizi.	43
Çizelge 3.4 Bilyeli öğütme cihazı teknik özellikleri.	45
Çizelge 3.5 Atölye tipi manuel hidrolik pres teknik özellikleri.	47
Çizelge 3.6 Dalma tipi erozyon tezgâhı teknik özellikleri.	49
Çizelge 3.7 Parametre belirlemek için yapılan ön deneyler	50
Çizelge 3.8 Deneylerde kullanılan işleme parametreleri.....	51
Çizelge 3.9 EKİ’de sabit parametreler.	51
Çizelge 3.10 Otomatik hassas kesme cihazı teknik özellikleri.	54
Çizelge 3.11 Deneylerde kullanılan malzemelerdeki elementlerin bazı özellikleri.....	57
Çizelge 4.1 XRD analizlerinden tespit edilen fazlar.	82
Çizelge 5.1 İşleme ile ağırlık değişimleri ve işleme süresi.	94
Çizelge 5.2 İşleme parametrelerine göre elementel dağılım.	103



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

DC	: Doğru Akım
A	: Amper
V	: Volt
μ s	: Mikrosaniye
Ti-6Al-4V	: Titanyum Alüminyum Vanadyum Alaşımı
Al	: Alüminyum
SiC	: Silisyum Karbür
°C	: Santrigrat Derece
MPa	: Megapaskal
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Co	: Kobalt
Si	: Silisyum
CNT	: Karbon Nanotüp
μ m	: Mikrometre
AISI 304	: 304 Kalite Paslanmaz Çelik
Ti	: Titanyum
W	: Tungsten (Volfram)
W300	: Sıcak İş Takım Çeliği (Ferritik Çelik)
M300	: Plastik Kalıp Çeliği (Martenzitik Çelik)
ASTM A631	: Takım Çeliği
AISI D5	: Krom Soğuk İş Çeliği
15-5PH	: Paslanmaz Çelik
Al 6081 T6	: Alüminyum Alaşımı
β -Ti	: Beta Titanyum
g	: Gram

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

l	: Litre
V	: Vanadyum
TiO	: Titanyum Oksit
Ta	: Tantalyum
CaP	: Kalsiyum Fosfat
dk.	: Dakika
d/dk.	: Devir/Dakika
Fe	: Demir
Mn	: Mangan
TiH	: Titanyum Hidroksit
HA	: Hidroksiapatit
J	: Joule
Ca ₃ (PO ₄) ₂	: Trikalsiyum Fosfat
CaZrO ₃	: Kalsiyum Zirkonat
Nb ₈ P ₅	: Niyobyum Fosfit
CaO	: Kalsiyum Oksit
TiP	: Titanyum Fosfür
Nb ₄ O ₅	: Niyobyum Oksit
TiO ₂	: Titanyum Dioksit
HB	: Brinell Sertlik Değeri
Mg	: Magnezyum
Zn	: Çinko
Ag	: Gümüş
TiC	: Titanyum Karbür
MWCNT	: Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
AISI H13	: Sıcak İş Takım Çeliği
HV	: Vickers Sertlik Değeri
AISI 1049	: Karbon Çeliği
WC	: Tungsten Karbür
EN31	: Yüksek Karbonlu Çelik
H11	: Sıcak Takım Çeliği
HK	: Knoop Sertlik Değeri

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

TCP	: Trikalsiyum Fosfat
GPa	: Gigapaskal
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit (Alümina)
AA 6061	: Alüminyum Alaşımı
Al 5052	: Alüminyum Alaşımı
ZE41A	: Magnezyum Alaşımı
HSS	: Yüksek Hız Çeliği
AISI 1020	: Düşük Karbonlu Çelik
Ra	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
Nb	: Niyobyum (Kolombiyum)
Mesh	: Elek Izgara Açıklığı
mm	: Milimetre
Ω	: Ohm
W	: Watt
ρ	: Yoğunluk
KVA	: Elektriksel Anma Gücü
kV	: Kilovolt
mA	: Miliamper
S	: Siemens
MS	: Megasiemens

KISALTMALAR

ARTMER	: Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi
CNC	: Bilgisayar Nümerik Kontrol
EDS	: Enerji Dağılım Analizi
EKİ	: Elektriksel Kırılma İle İşleme
MKO	: Malzeme Kaldırma Oranı
MO-PSO	: Multi Objective Particle Swarm Optimization
RSM	: Yüzey Cevap Metodu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SEM-SE	: Taramalı Elektron Mikroskobu-İkincil Elektron

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

SEM-BSED	: Taramalı Elektron Mikroskobu- Geri Saçılan Elektron Kırınımı
TAO	: Takım Aşınma Oranı
TK-EKİ	: Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcım ile İşleme
T/M	: Toz Metalurjisi
TTK	: Türkiye Taşkömürü Kurumu
XRD	: X-Işını Kırınımı
YP	: Yüzey Pürüzlülüğü
ZBEÜ	: Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi



BÖLÜM 1

GİRİŞ

Elektriksel Kıvılcım ile İşleme (EKİ), dielektrik akışkan içinde elektrot ile iş parçası arasında kontrollü şekilde oluşturulan kıvılcımlarla elektriksel iletken malzemeleri işleme yöntemidir.

EKİ temelleri ilk olarak İngiliz bilim adamı Joseph Priestly'nin elektrik deşarjlarının aşındırıcı etkisini gözlemlediği 1770 yılına dayanmaktadır. 1930'lu yıllarda, metal ve elmasları elektriksel kıvılcımla işleyebilmek için çeşitli girişimlerde bulunmuştur. Hava ile birbirlerinden ayrılmış takım elektrodu ve DC güç kaynağına bağlı bir iş parçası arasında oluşturulan aralıklı ark boşalmalarının malzeme aşınmasına neden olduğunu gözlemlemiştir. Bu tür işlemler, işleme alanının aşırı ısınması ve kontrol edilebilirliğin düşük seviyede olması nedeniyle "kıvılcımla işleme" yerine "ark işleme" olarak tanımlanmıştır [1].

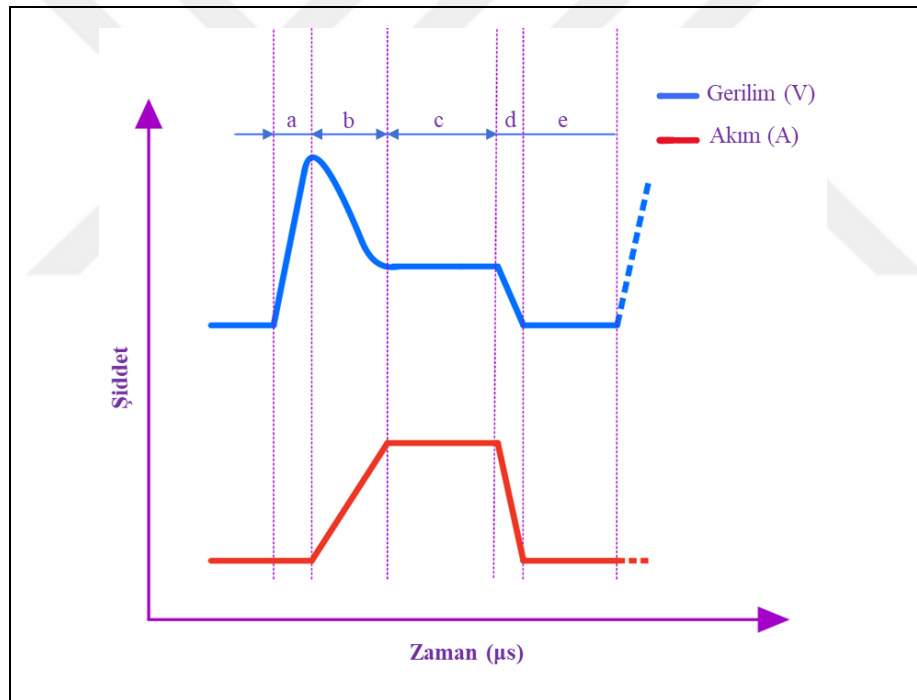
EKİ konusunda öncü çalışmalar, 1943'te II. Dünya Savaşı sırasında iki Rus bilim adamı B.R. ve N.I. Lazarenko tarafından Moskova Üniversitesi'nde yapılmıştır [2]. Çalışmalarında, kararlı ve kontrol edilebilir kıvılcımların basit bir direnç/kapasitör (Resistance Capacitance, RC) devresi kullanarak oluşturulabildiğini gözlemlemiş ve elektriksel iletken malzemelerin yöntem ile işlenebileceğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, kıvılcımların olduğu iş parçası ve elektrot arası mesafenin, işleme sırasında kararlı kalmasını sağlayan basit bir servo kontrol devresini de 1950'lerde tanıtmışlardır. RC devresi daha sonra EKİ teknolojisinde gelişmeler için temel oluşturmuştur. RC ile birlikte, transistörlü devrelerin kullanımı, kararlı kıvılcım oluşumunu ve kontrol edilebilirliği geliştirmiş, 1980'lerde Bilgisayar Sayısal Kontrol (Computer Numerical Control, CNC) tekniklerinin yöntemle birlikte kullanılmasıyla işleme verimliliği ve uygulanabilirliği dikkate değer şekilde artmıştır.

EKİ, sertliği, şekli veya dayanımı ne olursa olsun, elektriksel olarak iletken olan herhangi bir malzemenin işlenebilmesine olanak sağlayan bir yöntem olarak günümüz imalat teknolojisinde yer edinmiştir. İş parçasıyla fiziksel temas kurulmadan işleme gerçekleştiği için, işleme sırasında mekanik takım kuvvetleri ve titreşimler oluşmamaktadır. Bu sebeple, narin yapıları

takım elektrotları kullanılarak sert malzemeler üzerinde, ince ve hassas kesitler, şekil bozuklukları olmaksızın yöntemle işlenebilmektedir. Geleneksel imalat yöntemleriyle üretimi imkânsız gibi görünen karmaşık biçimli şekiller kolaylıkla işlenebilir. İstenilen sınırlar içerisinde ölçü ve hassasiyete sahip iş parçalarının imalatı gerçekleştirilebilir [2].

1.1 EKİ MEKANİZMASI

EKİ’de saniyede binlerce hatta yüz binlerce ardışık kıvılcım oluşturulabilir. EKİ’de malzeme kaldırma kıvılcımların birikimli etkisiyle sağlanır. Bundan dolayı bir kıvılcım çevriminde meydana gelen fiziksel olaylar, işleme mekanizmasının anlaşılması açısından önem taşır. Bir kıvılcım oluşumu süresince elektrotlar arası gerilim ve akımda gözlemlenen değişimler Şekil 1.1’de gösterilmektedir.

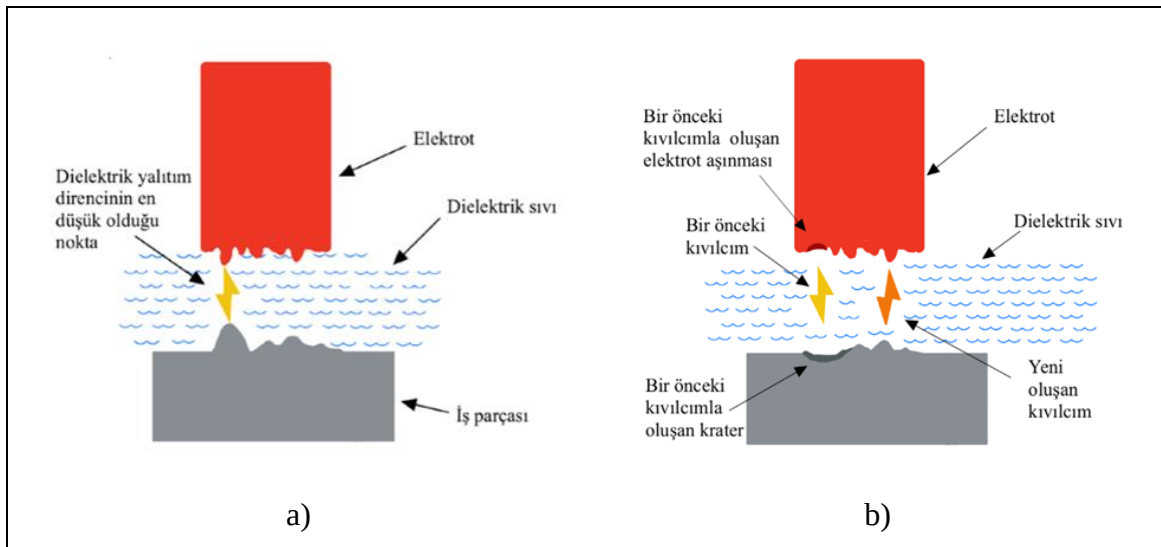


Şekil 1.1 Bir kıvılcım çevrimi a) Kırılma süreci, b) İyonizasyon süreci, c) Plazma genişlemesi d) Deiyonizasyon süreci, e) Bekleme süresi.

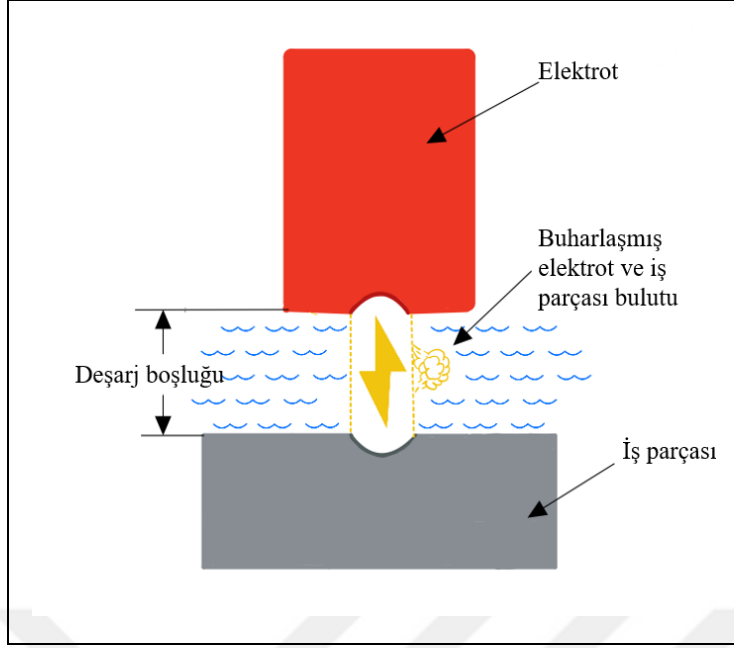
Servo sistem, takımı iş parçasına doğru yaklaştırır ve elektrotlar arası mesafe kritik eşişe geldiğinde gerilim aniden artar. Bu gerilim sıçraması dielektrik sıvının polarize olmasını sağlar ve gerilimin tepe değerinde dielektrik sıvının yalıtım direnci aşılarak bir plazma kanalı oluşur. Ardından, elektronların plazma kanalından akışıyla gerilim düşmeye başlar. Gerilim zaman grafiğinde görülen bu düşüş bölgesi kırılma fazı olarak adlandırılır (Şekil 1.1a). Kırılma fazı süresince elektronlar dielektrik moleküllerine yüksek hızda çarparak kinetik enerjilerini

aktarırlar ve dielektrik moleküllerinin iyonize olmasını sağlarlar. İyonizasyon sadece dielektrik moleküllerinde değil takım ve iş parçası arasındaki yüzey atomlarında da meydana gelir. Bu yoğun elektron ve iyon akışı plazma kanalını oluşturur (Şekil 1.1b). Plazma kanalında iyon ve elektronların çok yüksek hızlarda elektrot yüzeylerine çarpmasıyla kinetik enerjileri ısı ve basınç enerjisine dönüşür. Darbe süresinin artması ile plazma kanalı genişler ve darbe süresinin sona ermesiyle hızla kapanır (Şekil 1.1c). Elektrot ve iş parçası yüzeylerinde malzeme aşınması tam bu aşamada oluşur. Plazma kanalının temas ettiği elektrot yüzeyleri aşırı ısınmış ve yüksek basınç etkisi altındadır. Kanalin kapanması ile basınç ortadan kalkar ve aşırı ısınmış malzeme şiddetli biçimde dielektrik sıvıya püskürür. Düşük sıcaklıkta dielektrik sıvı ile karşılaşan püskürtü küremsi formda aniden katılaşır. Plazma kanalının kapanmasından sonra ortamdaki iyonlar deiyonize olur (Şekil 1.1d). Elektrot malzemesinden ayrılarak dielektrik sıvı içerisinde aniden katılaşan işleme atıklarının (debris) çalışma bölgesinden temizlenebilmesi için zamana ihtiyaç vardır. Bu sürece bekleme süreci denir (Şekil 1.1e). Bekleme sürecinde, dielektrik çalışma bölgesindeki işleme atıkları temizlenerek bir sonraki kıvılcım için kararlı işleme koşulları sağlanarak işleme devam edilir.

EKİ'de iş parçası ve elektrot arasında dielektrik direncin en düşük olduğu noktada kıvılcım oluşur (Şekil 1.2a). İyonlar ve elektronlar ait olduğu kutba göre iş parçası ve elektroda hücum ederek plazma kanalını oluşturur. Plazma kanalında oluşan yüksek basınç ve sıcaklık hem elektrottan hem de iş parçasından (Şekil 1.2b) malzeme kaybına neden olur ve ardında küçük kraterler bırakır (Şekil 1.3).



Şekil 1.2 Ardışık kıvılcım oluşumu a) Dielektrik yalıtım direncinin en düşük olduğu noktada kıvılcım oluşumu, b) Oluşan bir sonraki kıvılcım.



Şekil 1.3 Kıvılcım sırasında oluşan erime ve buharlaşma.

Dielektrik sıvı, deşarj enerjisinin çok küçük kesit alanında yoğunlaşmasını sağlar. Aynı zamanda işlem sırasında iş parçası ve elektrot yüzeylerini soğutur. Dielektrik sıvının elektrik yalıtım direnci, deşarj enerjisi ve kırılma fazı süresini etkiler [3]. Elektrot ve iş parçası arasındaki kıvılcım aralığını korumak için hidrokarbon bazlı yağ, deiyonize su gibi dielektrik malzemeler kullanılabilir. EKİ için kullanılan dielektrik akışkanlar, kıvılcımın olduğu hacim dışında kalan bölgelerde elektriksel yalıtkan özelliğini korur. Dielektrik akışkan her bir çevrim için, kıvılcımın olduğu bölgelerde yalıtıktan, iletken ve ardından tekrar bir yalıtıkana dönüşür [4].

Dielektrik sıvı işlemede:

- ✓ Elektrot ve iş parçası arasındaki kıvılcım mesafesini belirler,
- ✓ Kıvılcımın dar bir kanalda gerçekleşmesini sağlar,
- ✓ Elektriksel deşarj esnasında ve sonrasında oluşan ısının atılmasını sağlar,
- ✓ Kısa devre oluşumunu önler,
- ✓ İşleme bölgesinde oluşan işlem atıklarının uzaklaştırılmasını sağlar.

1.2 TOZ KATKILI ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME (TK-EKİ)

EKİ ile işlemede malzeme kaldırma hızının yüksek darbe süreleri ve akımları kullanarak artırılması, yüzey kalitesini düşürmektedir. Yüksek malzeme kaldırma hızlarında elde edilen düşük yüzey kalitesini iyileştirmek için literatürde çeşitli öneriler sunulmuştur. Bunlar arasında,

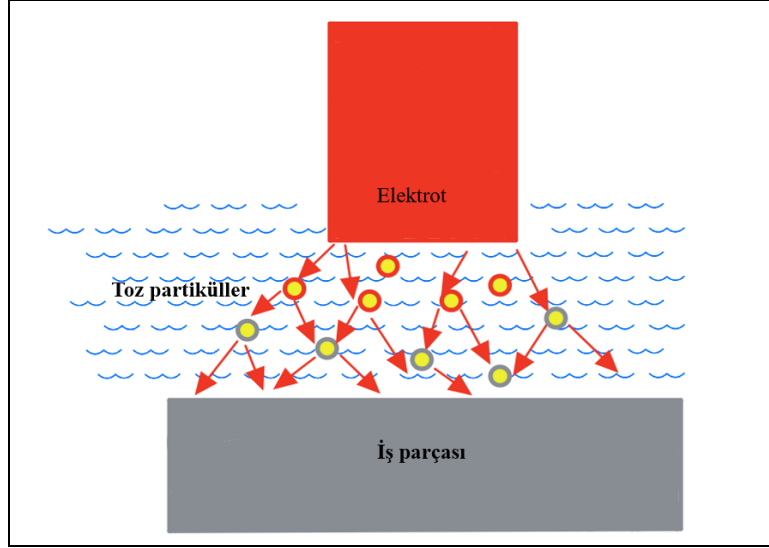
dielektrik sıvıya toz formunda çeşitli malzemeler karıştırılarak yapılan işleme yöntemi, Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcım ile İşleme (TK-EKİ) olarak adlandırılmıştır. Bu yöntemle, yüzey kalitesinin iyileştirilerek işleme verimliliğinin artırılabilceği, takım aşınmasının azaltılabileceği, işlenen yüzeyde oluşan mikro çatlak ağları gibi yüzey bütünlüğünü bozucu unsurların önlenebileceği araştırmacılar tarafından raporlanmıştır. Ayrıca son yıllarda amacına uygun dielektrik sıvı, toz katkısı ve elektrot malzemesi seçimiyle fonksiyonel yüzeylerin elde edilebildiği ortaya konmuş ve araştırmacıların yoğun ilgisini çekmiştir. Benzer biçimde, doğrudan dielektrik sıvıya toz katılması yerine, işleme sırasında Toz Metalurjisi (T/M) teknikleri ile üretilen takım elektrot kullanımının, benzer olumlu performans çıktıları sağladığı görülmüştür. T/M ile üretilen elektrot içinde yer alan bileşenler kıvılcım enerjisi ile dielektrik içine dağılarak, işleme bölgesindeki dielektrik sıvı özelliklerini TK-EKİ'ye benzer biçimde değiştirmektedir.

1.2.1 TK-EKİ Mekanizması

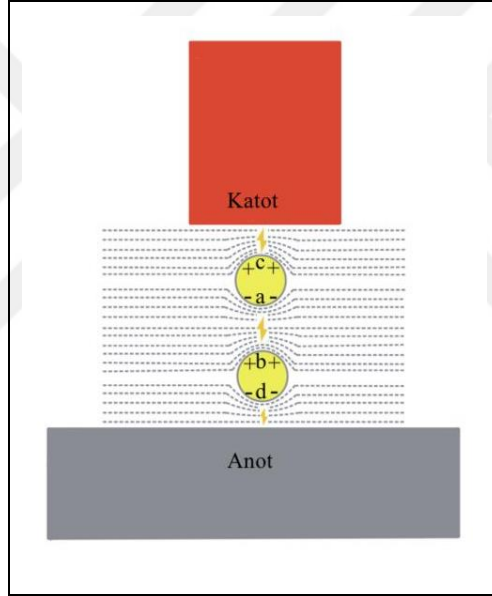
Dielektrik sıvıya eklenen toz katkısı sıvı içerisinde elektriksel süreksizlikler oluşturarak işleme mekanizmasını değiştirmektedir. Toz taneleri deşarj bölgesinde dielektrik sıvı molekülleri ile birlikte polarize olur ve deşarj kanalında sapmalar meydana getirir. Polarize olmuş tozlar arasındaki küçük deşarjlar, deşarj boşluğunu artırmakta, deşarj kanalını genişletmekte, kıvılcım frekansını artırmakta ve kıvılcımları daha alt enerji seviyelerine bölmektedir (Şekil 1.4).

1.2.1.1 Deşarj Boşluğunun Artması

EKİ yönteminde dielektrik homojen bir yapıya sahip olduğu için her nokta için aynı yalıtım direncine sahiptir ve gerilim uygulandığında elektriksel alan yoğunluğu her noktada eşittir. Bu nedenle dielektriğin kırılması daha zordur ve daha küçük kıvılcım aralıkları gerektirir. Dielektrik sıvıya çok sayıda iletken toz eklendiğinde Şekil 1.5'te görüldüğü gibi deşarj boşluğunda elektriksel alan sapması olur ve gerilim yüklendiğinde tozların üstünde ve altında birçok pozitif ve negatif yük toplanır. Daha sonra elektrik alan yoğunluğunun en yüksek olduğu iki toz arasındaki birbirine en yakın 'a' ve 'b' noktalarında kırılma meydana gelir ve deşarj oluşur. Bu deşarj ardından iki toz parçacığı arasında kısa devreye ve bölgedeki yüklerin yeniden dağıtılmasına neden olur. Ardından elektrik yükü 'c' ve 'd' noktalarında yoğunlaşır ve yine deşarj oluşur ve bu şekilde seri deşarjlar meydana gelir. Böylece deşarj boşluğu genişlemiş olur ve dielektrik yalıtım direnci azalarak deşarj gerilimi daha düşük değerlerde meydana gelir.



Şekil 1.4 TK-EKİ’de kıvılcımların saçılması.



Şekil 1.5 Deşarj boşluğunun artması.

1.2.1.2 Deşarj Kanalının Genişlemesi

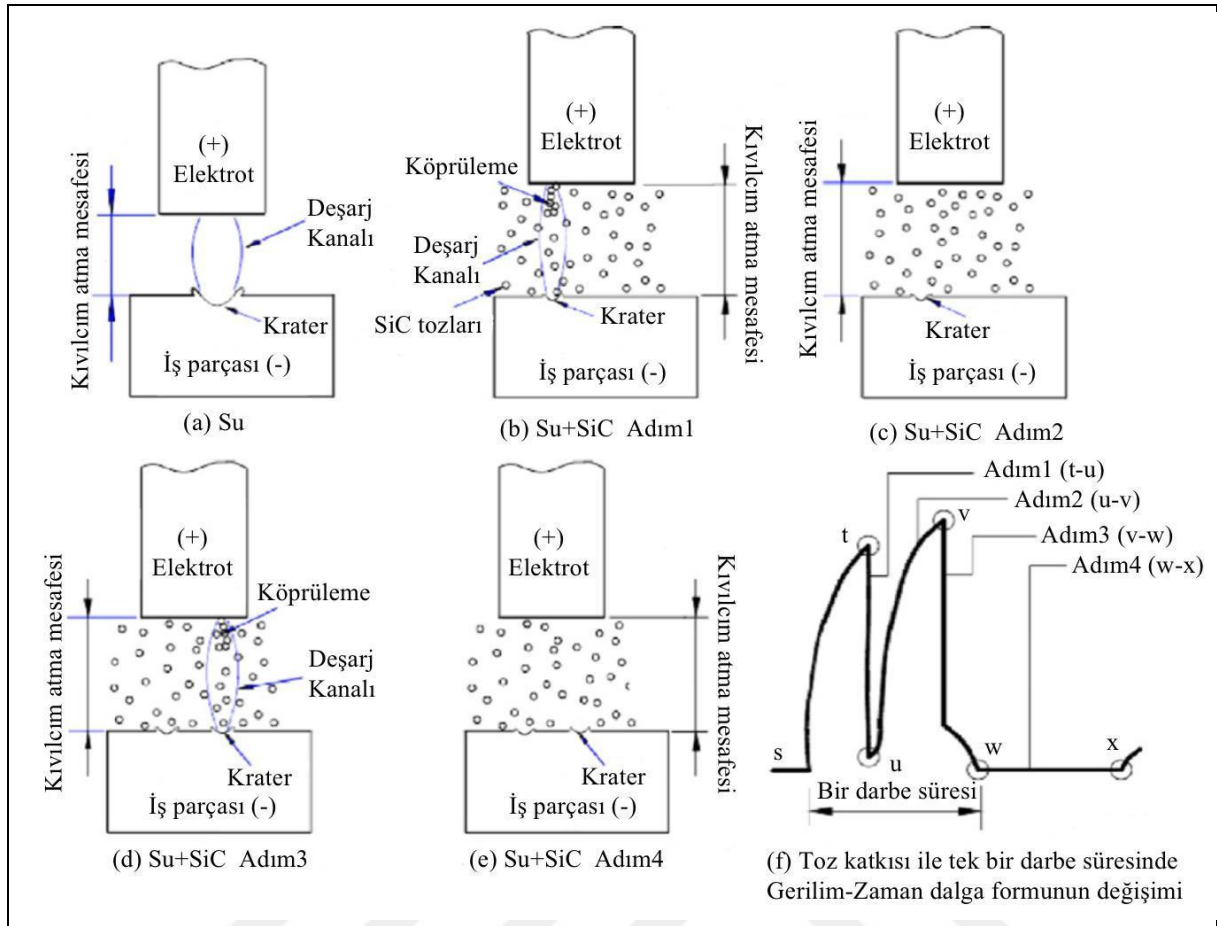
Deşarj anında iyonlar ve elektronlar, ilgili kutba doğru hızla hareket ederken ortamda bulunan moleküllere ve mikro parçacıklara çarparak enerji biriktirirler. Deşarj kanalının etrafı dielektrik sıvı ile çevrilidir. Dielektriğe toz ilavesiyle deşarj boşluğu yukarıda bahsedildiği gibi artmaktadır. Bu artış elektronların ve iyonların deşarj sırasında alması gereken yolun artışı anlamına gelmektedir. Böylelikle iyonların ve elektronların dielektrik moleküllere ve mikro partiküllere çarpma ihtimali artacak ve deşarj kanalı genişleyecektir. Sonuç olarak daha geniş ve sığ kraterler oluşacaktır.

TK-EKİ’de işleme sırasındadeşarj boşluğunun artması ile ortamda oluşan işleme atıklarının daha kolay temizlenebilmesini sağlar. Deşarj kanalının genişlemesi ile daha büyük bir alanda ve düşük yoğunlukta ısı etkilenmiş bölgeler oluşturacağından, işlenmiş yüzeylerde daha sık ve daha geniş kraterler oluşur. Sonuç olarak, yüzey pürüzlülüğü iyileşir.

1.2.1.3 Kıvılcım Frekansının Artması

Dielektriğe toz katkısının diğer bir etkisi de kıvılcım frekansını artırmasıdır. Çalışmalarda kıvılcım frekansının artırılması iki şekilde açıklanmaktadır. Birinci açıklamada, aynı darbe süresi içindedeşarj kanalının hızla ve ardışık biçimde açılıp kapandığı öne sürülmektedir. İkinci açıklamada ise, tıpkı doğada yıldırımlarda gözlemlendiği gibi, anadeşarj kanalının bölünerek dallandığı öngörülmektedir.

Chow vd. (2008) tek bir darbe süresi içinde iki farklı kıvılcım darbesini göstermektedir (Şekil 1.6). Toz katkısız EKİ’de tek birdeşarj kanalı oluşmakta ve dielektrik sıvının sahip olduğu yüksek yalıtım direnci nedeniyle, elektrot ve iş parçası arasındaki mesafe daha kısadır (Şekil 1.6(a)). Bununla birlikte, dielektrik sıvıya toz katkısı elektrotlar arası mesafeyi genişletir ($\text{Gapw} + \text{SiC} > \text{Gapw}$) (Şekil 1.6(b)-(e)). Köprüleme etkisi nedeniyle kolaycadeşarj kanalı meydana gelmiştir. Şekil 1.6(b)'de ve karşılık gelen Şekil 1.6(f)'nin 1. adımında (t-u) gösterildiği gibi elektrotlar arası mesafenin genişlemesi daha küçük bir krater oluşumu ile sonuçlanır. Bununla birlikte, elektrotlar arasındaki bağıl hareket ya da dielektrik sıvı akışı işleme bölgesinde hem geçici köprüleme hem dedeşarj kanalı etkisini ortadan kaldırabilir. Daha sonra dielektrik sıvının yalıtım direnci, Şekil 1.6(c)'de ve karşılık gelen Şekil 1.6(f)'nin 2. adımında (u-v) gösterildiği gibi tekrar yükselir. Dielektrik sıvının içindeki akan toz taneleri, Şekil 1.6(d) 'de ve karşılık gelen Şekil 1.6(f) 'nin 3. adımında (v-w) gösterildiği gibi sırasıyla başka bir köprüleme,deşarj kanalı ve küçük bir krater oluşturur. Bununla birlikte,deşarj kanalı tekrar kaybolur ve dielektrik sıvısı içindeki yalıtım direnci, Şekil 1.6(e) 'de gösterildiği gibi tekrar yükselir. Çevrim, bekleme süresinin Şekil 1.6(f)'nin 4. adımının (w-x) sonunda tekrar başlayarak devam eder [5].



Şekil 1.6 Dielektrik sıvıya SiC ilavesinin kıvılcım mekanizmasına etkisi [5].

1.2.1.4 Kıvılcımların Bölünmesi

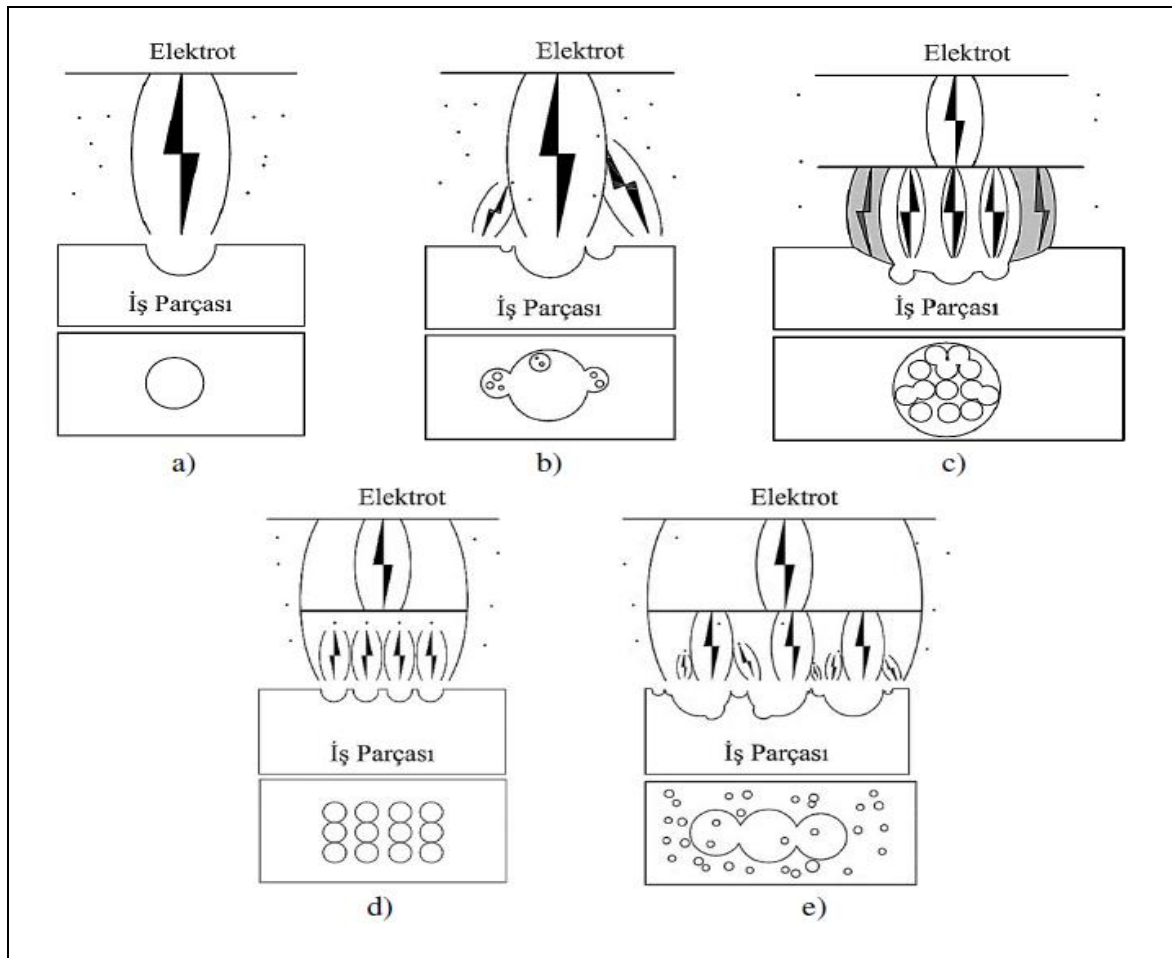
İlave edilen toz tanelerinin dielektrik sıvıda oluşturduğu elektriksel alan süreksizlikleri kıvılcım oluşumu sırasında ana deşarj kanalının bölünerek saçılmasına neden olmaktadır. Birincil kıvılcımların daha düşük enerji seviyelerine bölünmesi aynı anda birden çok kıvılcımın yüzeylere etki etmesi sonucunu doğurmaktadır.

Ekmekci vd. (2016), yaptığı çalışmada yüzeylere ve kesitlere bakarak 5 farklı kıvılcım modeli belirlemiştir (Şekil 1.7). Bunlar;

- Tekil kıvılcımlar,
- Tekil kıvılcımlardan az sayıda ve düşük enerji seviyelerinde ayrılan ikincil kıvılcım oluşumu,
- Ana deşarj kanal merkezi çökerken, ana kanal dış çeperinin ilerlemesi ve çöken merkezde çok sayıda ve birbirine yakın enerji seviyelerinde ikincil kıvılcım oluşumu,

- d) Ana deşarj kanalının tamamen ve çok sayıda ve birbirine yakın enerji seviyelerinde saçılarak ikincil kıvılcımların oluşumu,
- e) İkincil kıvılcımlarla birlikte, ikincil kıvılcımlardan ayrılan az sayıda üçüncül kıvılcım oluşumu.

Bu kıvılcım modellerinin oluşmasında, uygulanan darbe süresi, darbe akımı ve dielektrik sıvıya eklenen toz katkı miktarı etkin parametreler olarak görülmüştür. İşleme sırasında uygulanan operasyonel parametrelerin kombine etkisiyle belirlenmiş koşullarda farklı kıvılcım modelleri oluşmaktadır [6].



Şekil 1.7 Farklı tip kıvılcım modelleri [6].

1.3 EKİ VE TK-EKİ PROSES PARAMETRELERİ

EKİ’de işleme çıktılarını etkileyen elektriksel ve elektriksel olmayan birçok parametre vardır. İşleme performansı ve yüzey değişimleri üzerinde bu parametrelerin tekil veya kombine etkileri söz konusu olmakta ve işlemin doğasının anlaşılabilmesini zorlaştırmaktadır. Literatürde

Çalışılan bazı işlem girdileri ve buna karşılık ıktıları Şekil 1.8’de özetlenmiştir. Ayrıca bazı temel parametreler alt başlıklar halinde açıklanmıştır.

1.3.1 Deşarj Gerilimi

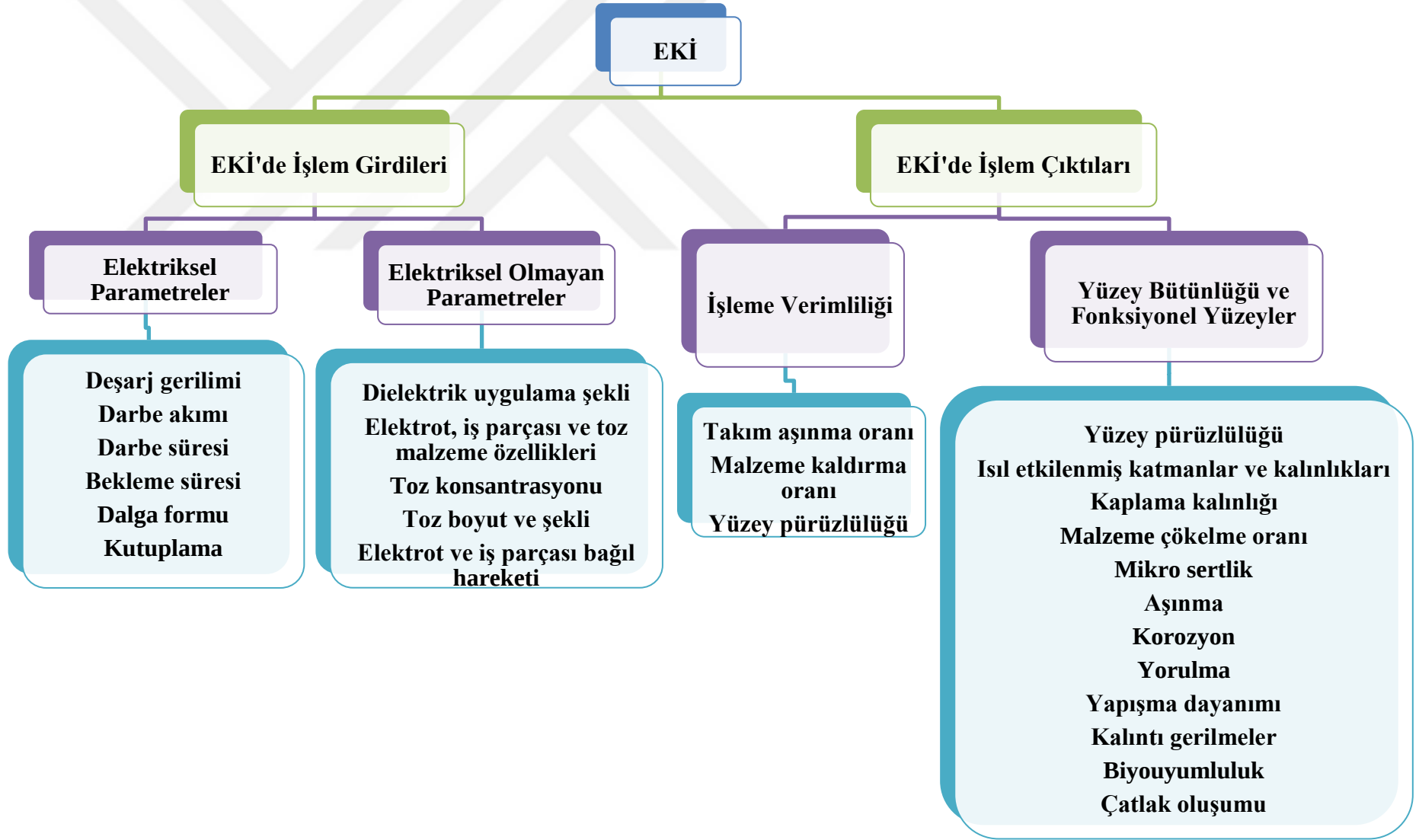
EKİ’deki deşarj gerilimi, elektrotlar arası mesafe ve dielektrik sıvının kırılma direnci ile ilişkilidir [7]. Akım akmadan önce, açık aralık gerilimi, dielektrik sıvı moleküllerinin iyonlarına ayrılmasına kadar geçen süre içerisinde artar. Akım akmaya başladığında, gerilim düşer ve deşarj gerilimi seviyesinde sabitlenir. Elektrot ile iş parçasının en yakın olduğu mesafe deşarj gerilimi ile belirlenir. Yüksek deşarj gerilimi, elektrotla iş parçası arasındaki mesafenin yüksek olması sonucunu doğurur. Sonuç olarak, ortamdaki işleme atıklarının temizlemesi kolaylaşır ve işleme koşulları daha kararlı hale gelir. Malzeme kaldırma oranı (MKO), takım aşınma oranı (TAO) ve yüzey pürüzlülüğü (YP) açık aralık gerilimi ile değişiklik gösterir. Bu değişiklik çalışma aralığı ve elektriksel alan şiddeti ile ilgilidir.

1.3.2 Darbe Akımı

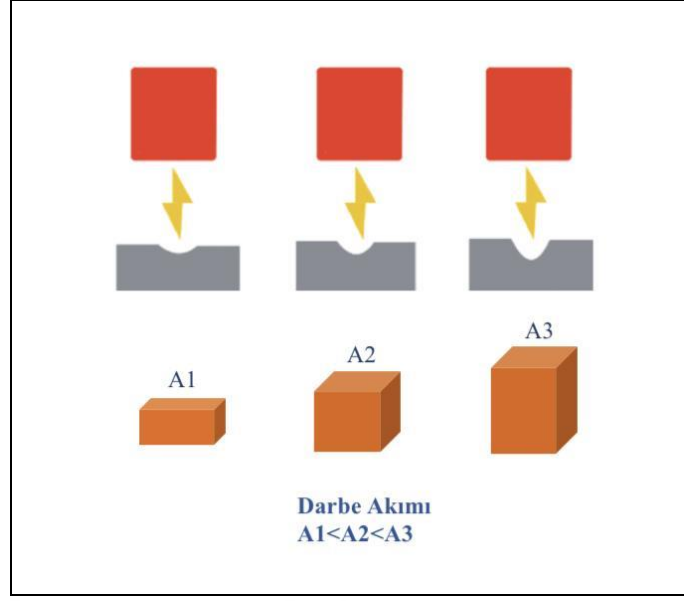
EKİ’de darbe akımı, yüzey kalitesi ile birlikte, MKO, TAO gibi işlem çıktılarını etkileyen önemli bir parametredir. Yüksek akımlarda işleme yapıldığında MKO ve TAO artar ancak yüzey kalitesi düşer. Darbe akımı, tıpkı darbe süresi gibi malzeme yüzeyine nüfuz eden deşarj enerjisini artırmaktadır, böylelikle krater boyutları (krater derinliği ve genişliği) artmaktadır (Şekil 1.9).

1.3.3 Darbe Süresi ve Bekleme Süresi

Her deşarj çevriminde darbe süresi ve bekleme süresi olarak ifade edilen ve birimi mikrosaniye olan bölümler vardır. Darbelerin süresi ve saniyedeki tekrar sayısı (frekans) işleme verimliliği açısından önem taşımaktadır. MKO darbe süresi ve tepe akımıyla, yani deşarj enerjisi miktarı ile orantılıdır [7]. Bu enerji, tepe akımı ve darbe süresiyle kontrol edilir. İyonizasyon, deiyonizasyon ve işleme kanalındaki işleme atıklarının temizlenebilmesi için belirli bir zaman gereklidir ve bu zaman bekleme süresi olarak adlandırılmaktadır. Darbe süresi arttıkça, daha fazla iş parçası malzemesi işlenir. İşlenen yüzeyde oluşan kraterler, daha geniş ve derindir. Sonuç pürüzlü bir yüzey oluşumudur (Şekil 1.10). Darbe süresi arttıkça, kıvılcımın ısı etkisi iş parçasına daha fazla nüfuz eder ve yayılır. Darbe süresinin çok uzun seçilmesi işleme bölgesinde işlem atık yoğunluğunu arttırarak kararsız koşullara sebep olur.

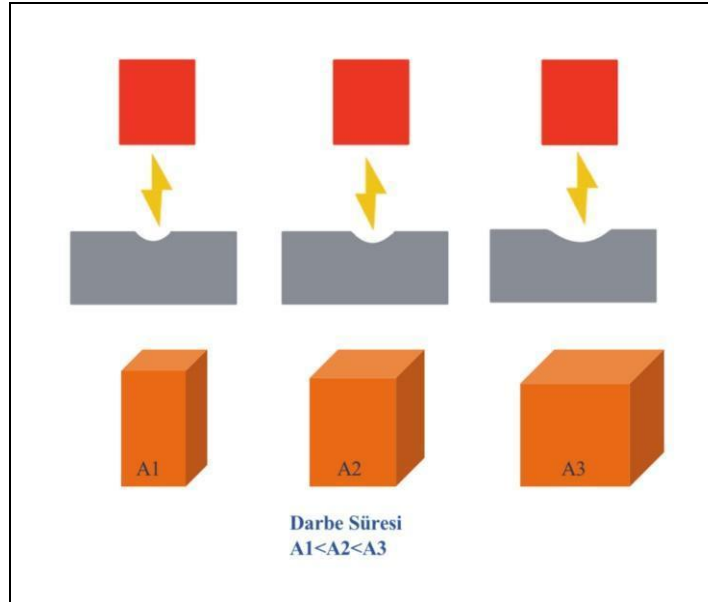


Şekil 1.8 EKİ ve TK-EKİ'deki başlıca etkili proses parametreleri.



Şekil 1.9 Darbe akımı değişiminin malzeme kaldırma mekanizmasına etkisi.

Bekleme süresi, işlemin hızını ve kararlılığını etkiler. Teorik olarak, süre ne kadar kısa olursa, işleme o kadar hızlı olacaktır. Ancak bekleme süresi çok kısa belirlenirse, işleme atıkları dielektrik sıvı akışıyla temizlenemez ve bir sonraki kıvılcım kararsız koşullar altında gerçekleşir. Kararsız koşullar düzensiz kıvılcım ve ark oluşumunu tetikleyerek ilerleyen servonun geri çekilmesine neden olur. Sonuç olarak, bekleme süresi kararlı işleme koşullarının sağlanabildiği süreden kısa seçilmemesi gereklidir.



Şekil 1.10 Darbe süresi değişiminin malzeme kaldırma mekanizmasına etkisi.

1.3.4 Kutuplama

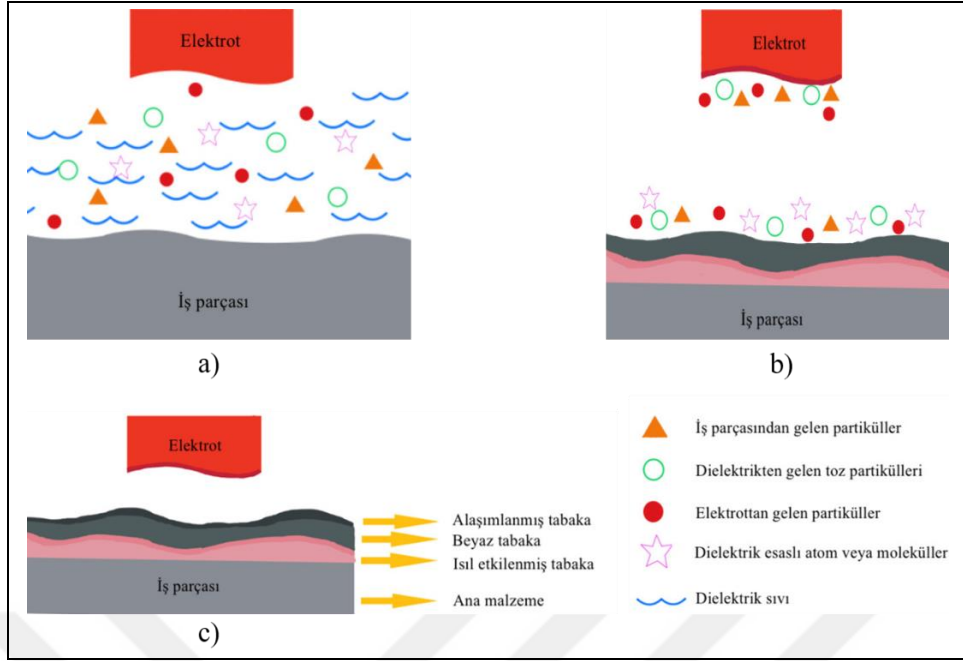
Takım elektrot kutbu pozitif veya negatif olabilir. Deşarj kanalı iyon ve elektronların akışı tarafından sürdürülür. Elektronlar ve eksi yük iyonlar artı yüklü kutba doğru akarken, artı yüklü iyonlar eksi yüklü kutba doğru çekilecektir. Elektron kütlelerinin iyonlara göre çok küçük ancak hızlarının yüksek olduğu bilinmektedir. Bu bakımdan istenen yüzey özelliklerine göre, kutuplama deneylerle belirlenir. İşleme sırasında kullanılan takım, iş parçası, dielektrik sıvı malzemesi, darbe süresi ve darbe akımına göre kutup seçimi yapılır. Ayrıca malzeme iyon hareketleri, işlem sırasında takım elektrodu ya da iş parçasına gerçekleşen malzeme göçünün seçilen kutba bağlı olarak değişeceği unutulmamalıdır [2].

1.3.5 Dielektrik Sıvı ve Uygulama Şekli

Dielektrik sıvının cinsi ve uygulama şekli TAO ve MKO'yu doğrudan etkiler. Genellikle dielektrik sıvı olarak hidrokarbon bileşikleri veya su kullanılır.

1.4 EKİ'DE YÜZEY KATMANLARI

EKİ ile işlemede elektrottan ve dielektrik ortamından iş parçası yüzeylerine malzeme transferi olduğu bilinmektedir. Yöntemin doğası gereği yüksek noktasal sıcaklıklar oluşmakta, iş parçası ve elektrot yüzeylerinde buharlaşma ve ergime meydana gelmektedir. Dielektrik sıvının soğutma etkisi sayesinde hızlı gelişen ısı çevrimlerle ergimiş malzeme, hızla yeniden katılaşmaktadır. İş parçası yüzeyinde ardışık kıvılcımlarla oluşan ısıl döngüler, yüzey ve yüzey altı mikroyapısını ana faz malzemesinden farklılaştırmaktadır. Genel olarak en üst kısımda ortamdan geçen malzeme ve iyon transferleri ile alaşımlanmış bir katman bulunur. Ayrıca bu katmanda çok yüksek hızda soğumanın oluşturduğu termal iç gerilmeler ve faz değişimleri ile çatlak oluşumları görülebilmektedir. Alaşımlanmış bu katmanın hemen altında ana faz malzeme ile aynı bileşime sahip, ergiyip tekrar katılaşmış bir katman bulunmaktadır. Yüksek hızda ısıl çevrimlere maruz kalan bu katmanda alışılmadık faz dönüşümleri meydana gelebilmektedir. Genel olarak katmanın dağılayıcı kimyasallara gösterdiği direnç sebebiyle optik mikroskop altında özelliksiz görünümü tabakanın literatürde beyaz tabaka olarak adlandırılmasına neden olmuştur. Beyaz tabakanın altında ise kıvılcımların ısıl etkisiyle katı fazda mikroyapı değişimlerine uğramış bir katman bulunur. Bu katmanı ana faz malzemesi takip eder (Şekil 1.11). Bu katman kalınlıkları, seçilen elektriksel parametreler ile birlikte, işlenen malzemenin erime sıcaklığı, ısı iletim katsayısı gibi ısıl özelliklerine bağlı olarak değişir.



Şekil 1.11 EKI'de yüzey ve yüzeyaltı katmanları a) İşleme sırasında dielektrik durumu b) İşlem sonrasında yüzeylerin aşınması c) Oluşan yüzey ve yüzey altı katmanları.

1.5 EKI'DE YÜZEY MODİFİKASYONLARI

Son yıllarda, yüzey modifikasyonu için EKI'nin potansiyeline vurgu yapılarak, yeni uygulamalara artan bir ilgi görülmüştür. İşleme sırasında iş malzemesinin aşınmasının yanı sıra, işlemin kendine özgü doğası gereği takım malzemesinin aşınmasına da neden olur. İşleme sırasında oluşan çok yüksek sıcaklık ve basınç, iş parçası ve elektrottan buharlaşan/ergiyen malzemelerle birlikte dielektrik sıvının pirolizi ile gelen elementler, yüzey kompozisyonunu ve dolayısıyla özelliklerini etkilemektedir. EKI ile malzeme transferi, kompozit elektrotlar, çeşitli malzeme tozlarının dielektrik sıvıya karıştırılmasıyla veya her ikisiyle birlikte, belirli işleme koşulları altında gerçekleştirilebilmektedir.

1.5.1 Yüzey Pürüzlülüğü

EKI'de YP krater derinlik ve çapının yüzey çatlaklarının ve yüzeyde bulunan küresel eklentiler gibi yüzey kusurlarının bir fonksiyonu olarak belirlenir. Daha sığ ve düzgün kenarlı kraterler oluşturmak YP'yi artırmak için birincil öncelikli hedeftir. TK-EKI ile kıvılcımlar daha kolay oluşarak MKO artmaktadır. Ayrıca tek bir darbe süresinde, ikincil kıvılcımların etkisiyle oluşan daha küçük ve sığ kraterler yüzey kalitesini geliştirmektedir.

Ming ve He (1995) gaz yağına iletken tozlar ve inorganik oksit partikülleri karıştırarak yaptıkları çalışmada deşarj geriliminin düşerek, deşarj mesafesinin arttığını gözlemlemişlerdir. İşlenen yüzeyde kıvılcımlar homojen biçimde dağılmış ve yüzey kalitesini arttırmıştır [8]. Wong vd. (1998), dielektrik sıvıya eklenen farklı toz katkıları ve farklı iş parça malzeme kombinasyonları kullanarak ayna parlaklığında yüzeyler elde etmişlerdir [9]. Elde edilen sonuçlar işlemin mekanizmasıyla ilgili çeşitli fikirler vermektedir. Dielektrik sıvıda asılı bulunan toz partikülleri deşarj aralığında oluşan kıvılcımları bölerek genişletmiştir. Böylece yüzeyde daha geniş ve sık kraterler oluşmuştur. Ayrıca deşarj kanalı genişlemesiyle kolaylaşan dielektrik sıvı sirkülasyonu kararlı işleme koşullarını sağlamıştır. Ancak aynamsı yüzeylere ulaşmak için elektriksel parametrelerin yanında, iş parçası ve toz özelliklerinin de doğru kombine edilmesi gerekliliği çalışmada vurgulanmıştır. Literatürde genellikle işleme verimliliği ile (yüksek MKO, düşük TAO) YP arasındaki ilişki ters orantılı sunulmuştur. Ancak Chow vd. (2000), yaptığı çalışmada işleme verimliliği ile birlikte yüzey kalitesini de iyileştirmiştir. Gaz yağında toz katkısız, Al ve SiC toz katkılı işlemler karşılaştırıldığında, YP ve MKO gelişmektedir. Elde edilen sonuçlar kıvılcım bölünmesi neticesinde, kıvılcım frekansının ve deşarj mesafesinin artışıyla, kararsız işleme koşullarının iyileşmesi şeklinde açıklanmıştır [10]. Benzer olarak Yan vd. (2001), gaz yağına Al ve Cr toz katkısının deşarj mesafesini artırdığını, deşarj akımını böldüğünü ve iyileştirilmiş işleme performansı elde edildiğini bildirmişlerdir. Ayrıca işleme sırasında dielektrik sıvıda bulunan tozun taşınarak işlenmiş yüzeye nüfuz ettiğini göstermişlerdir. Dielektrik sıvıya Al tozu ilavesi, işlenmiş daha yumuşak yeniden katılaşmış bir katman oluştururken, Cr ilavesi işleme sırasında malzeme göçü nedeniyle yeniden katılaşmış katmanı sertleştirmiştir [11]. Dielektrik sıvıya eklenen tozların boyutu da işleme performansını etkilemektedir. Örneğin yağ dielektrik sıvısına Al, Cr, Cu ve SiC tozu ilave edilerek incelemeler yapılmış ve daha küçük tane boyutuna sahip toz katkısının daha iyi bir yüzey kalitesi sağladığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yeniden katılaşmış katman (YKK) kalınlığı, eklenen tozların boyutu ile ters orantılı olarak değişmiştir. Büyük toz, taneleri daha pürüzlü bir yüzey oluştururken, ince taneler YKK kalınlığı düşürmektedir [12]. Khan vd. (2018), 0.3 g/l Karbon Nanotüp (CNT) katkısının ve darbe süresinin, YP ve MKO üzerindeki etkisini incelemişlerdir. CNT'lerin varlığı ana kıvılcımı daha küçük kıvılcımlara ayırmış ve ısı enerjisini homojen şekilde yayarak YP'yi iyileştirmiştir. Böylelikle en düşük YP değeri en düşük darbe süreleri için CNT katkısıyla elde edilmiştir. Düşük darbe sürelerinde yüzeyden daha küçük talaşlar kaldırıldığından YP düşecektir. Bu çalışmada 8.61 μm ile en düşük YP 0.3 g/l CNT konsantrasyonu, 6 μs darbe süresi ve 6 A sabit akım için elde edilmiştir [13]. Dielektriğe eklenen tozların elektriksel iletkenliğinin yanında termal iletkenliğinin

önemini de vurgulayan bir çalışmada Shabgard ve Khosrozadeh (2017), Ti-6Al-4V alaşımını EKİ yağı içine 2 g/l CNT ilave ederek işlemişlerdir. Düşük akım ve yüksek darbe sürelerinde CNT ilavesi MKO'nu geliştirmiştir. Ancak diğer koşullar altında 2 g/l CNT ilavesi MKO'yu geliştirmeye yeterli olmamıştır. Dielektrik sıvıya CNT ilavesi ile MKO kararlı koşullar için saf dielektrik sıvıya göre düşük olmasına rağmen, yüzey kalitesi CNT ilavesi ile gelişmiştir. Ayrıca dielektrik sıvıya CNT ilavesi işlenen yüzeyde oluşan mikro çatlak uzunluklarını ve boyutlarını azaltmıştır. CNT'nin yüksek termal iletkenliği sayesinde plazma kanalındaki ısı dielektrik sıvı içine yayılmıştır. Böylelikle iş parçası yüzeyine geçen plazma ısı akısı azaltılmaktadır [14]. Toz katkısının etkisini incelemek için yapılan diğer bir çalışmada gaz yağına SiC toz ilavesi edilerek AISI304 paslanmaz çelik iş parçası EKİ ile işlenmiştir. En düşük YP 6.7 µm için, 4 A akım, 50 µs darbe süresi, % 65'lik görev döngüsü (darbe süresi/(darbe süresi+bekleme süresi) ve 10 g/l SiC konsantrasyonu ile gözlenmiş, ancak işlenen yüzeyde mikro çatlaklar görülmüştür. Ayrıca gaz yağı içindeki SiC konsantrasyonu azalırken, darbe süresinin ve akımın artması daha yüksek YP değerlerine sebep olmuştur. Bu durum bizlere deşarj enerjisinin ve kıvılcım bölünmesinin önemine işaret etmektedir [15]. Gosai ve Joshi (2016), TK-EKİ işlemi ile Ti alaşımını gaz yağı içine Si toz katkısı kullanarak işlemiştir. Darbe süresi, darbe akımı, bekleme süresi, toz konsantrasyonunun MKO ve YP'ye etkisini değerlendirmişlerdir. Gaz yağı içine toz katkısının MKO ve YP değerlerinde etkili bir parametre olduğunu bildirmişlerdir. Toz katkısı ile birlikte yüksek MKO orta seviyede pürüzlülük değerleri ile elde edilebilmiştir. Aynı zamanda saf dielektrik sıvıya göre YP, MKO'dan ödün vermeden azalmıştır [16]. Ti-6Al-4V malzemesi EKİ ile dielektriğe nano boyutta Al toz ilavesi ve Cu-W takım elektrot kullanılarak işlenmiştir. İşlenmiş yüzeyde YP, mikro çatlak boyutları, krater büyüklükleri ve mikro boşluklar azaltılmıştır. Nano-Al toz katkısı elektriksel deşarj enerjisini yüzeyde homojen bir şekilde dağıtmıştır. Elektrottan, dielektrikten ve toz katkısından malzeme transferi ile alaşım elementleri (C-Cu-W-Al) işlenen yüzeylerde tespit edilmiştir [17].

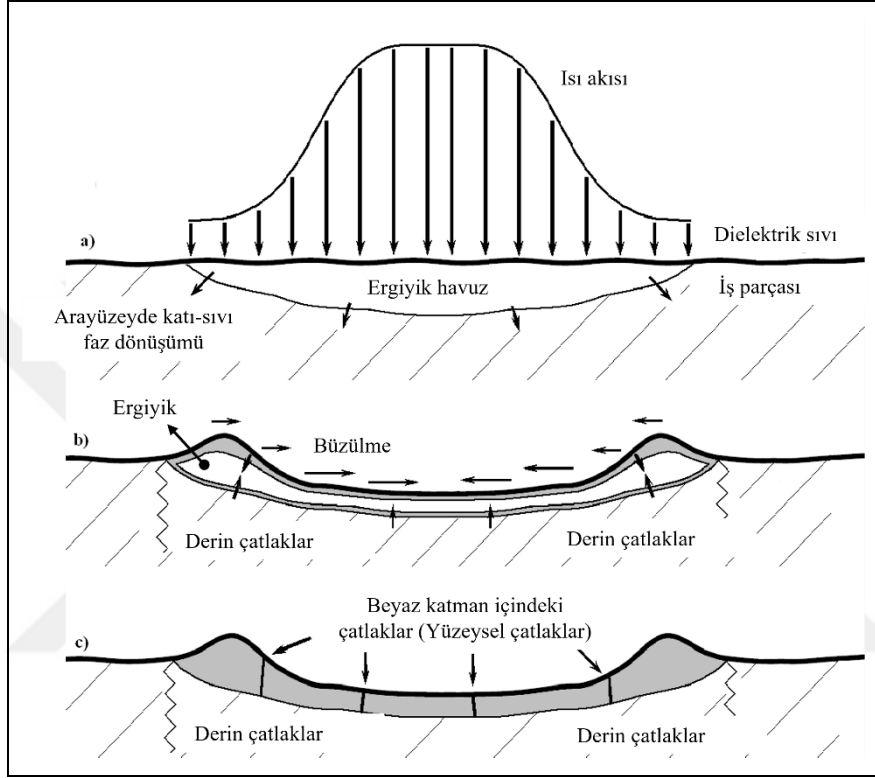
1.5.2 Yüzey Çatlakları

EKİ'de yüzey çatlakları işlem sırasında oluşan gerilmelerin, malzemenin çekme dayanımını aşması ile oluşur. EKİ'de elektriksel enerji ısı enerjisiye dönüşür. Bu dönüşüm kıvılcımların yüzeyde yüksek sıcaklık oluşturmaya sebep olur. Yüzeyde oluşan çok yüksek sıcaklıklar bir miktar malzemenin erimesine bir miktar malzemenin de buharlaşmasına sebep olur. Yüzeydeki eriyen malzemenin tümü dielektrik tarafından uzaklaştırılmaz. Böylelikle YKK yüzeyde oluşur. Çok yüksek sıcaklıklardaki ergimiş malzeme soğutucu dielektrik ile karşılaştığında çok

hızlı soğuyarak büzülür. Soğuma hızındaki değişimler ve YKK'daki mikro yapısal farklılıklar büzülme oranının ana faz malzemeye göre farklılaşmasına sebep olur. Bu değişimler iç gerilmeleri artırır ve malzemenin çekme mukavemetinin aşılmasıyla işlenen yüzeyde çatlakları oluşturur. Ekmekci (2009), 3 farklı çatlak türü belirlemiştir. Birinci tür mikro çatlaklar yüzey çatlaklarıdır ve YKK içinde kalmaktadır. Bu tür çatlaklar yüzeyde başlar ve ısı etkilenmiş bölge ile YKK'yi ayıran ara yüzeye doğru dik şekilde uzanır. Hidrokarbon esaslı dielektrik sıvıda yüksek darbe süreleri ve düşük deşarj akımları kullanıldığında bu tür yüzey çatlakları görülebilmektedir. İkinci tür çatlaklar ise ana faz malzemeye nüfuz eden çatlaklardır. Beyaz tabakanın tamamını geçerek ana malzemeye nüfuz eden bu tür mikro çatlaklar işlenen parçanın yorulma mukavemetini düşürmektedir. İşlem öncesi sertleştirme ısı işlemi veya sertleştirme-temperleme ısı işlemi uygulanmış çelik işparçalarının deiyonize suda işlenmesi sonucunda nüfuz eden mikro çatlakların oluştuğu görülmüştür. Üçüncü tür çatlaklar ise genellikle küresel veya düzensiz şekilli eklentilerin etrafında görülmektedir. Bu tür çatlakların çok düşük nüfuziyet etkileri vardır ve yüzeyde rastgele dağılmaktadır [18].

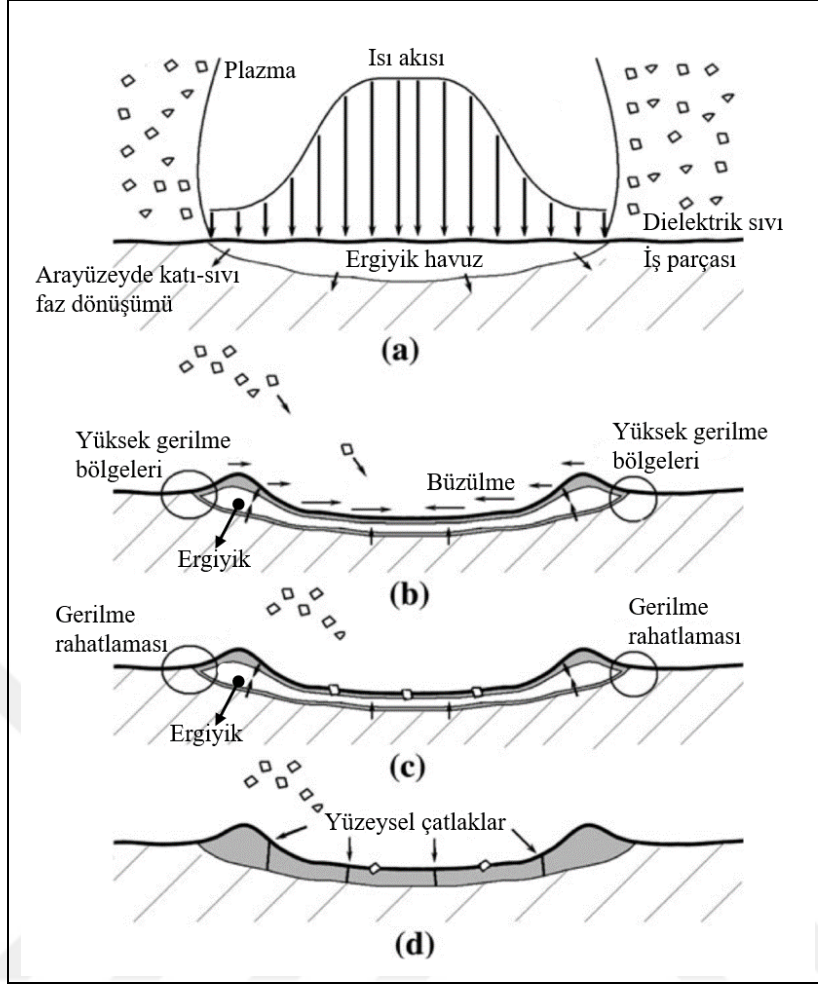
Yüzey çatlaklarına YKK'nın heterojen yapısı nedeniyle farklı fazların farklı büzülme hızları sebep olmaktadır. Temelde hızlı faz dönüşümleri katılma sırasında gerçekleşmekte ve heterojen fazlar arasında da iç gerilmeler oluşmaktadır. Derin çatlaklar ise sadece ana krater çevresinde YKK ve ana faz malzemesinin farklı büzülme oranları nedeniyle oluşur. Yüzey çatlakları ise krater üzerinde radyal ve çevresel bir desen sergiler. Dielektrik sıvı olarak gaz yağı kullanıldığında, yüzey çatlakları ve nüfuz eden çatlaklar birarada görülebilmektedir. Ancak dielektrik sıvı olarak deiyonize su kullanıldığında ise derin çatlaklar görülmeye devam ederken YKK içinde yüzey çatlakları neredeyse yok denilecek kadar azdır. Bu sonuç ana faz malzemesine nüfuz eden mikro çatlakların YKK ve ana faz malzemesinin farklı büzülme oranları nedeniyle oluştuğunu ispatlamaktadır. Aşağıdaki şekilde çatlak oluşum mekanizmaları şematik biçimde gösterilmiştir. Şekil 1.12.a'da deşarj sırasında oluşan ısı akısı ve deşarj ortadan kalktığı andaki ergimiş malzeme görülmektedir. Deşarj sırasında oda sıcaklığında bulunan dielektrik sıvı deşarj sonunda oluşan krater boşluğuna doğru hücum eder. Böylece ergiyik malzemenin üst yüzeyi taşınım, alt bölümü ise iletim yoluyla soğumaya başlar. Ancak hızlı soğuyan yüzey kabuk şeklinde katılırken altında hala ergiyik durumda malzeme bulunmaktadır. Kabuk biçiminde bütünlüğünü koruyan yüzey büzülür ve krater çeperinde yüksek gerilmelere neden olur. Bu gerilmeler malzeme çekme mukavemetini aştığında ise nüfuz eden çatlaklar oluşmaya başlar (Şekil 1.12.c). Yüzeye dik sıcaklık gradyanı etkisi altında katılma devam eden ergiyik malzeme, heterojen faz dönüşümleri sonucunda fazlar arası iç

gerilmelere maruz kalır. İç gerilmeler malzemenin çekme mukavemetinden daha yüksek olduğunda ise sadece YKK içinde yer alan yüzeysel mikro çatlak yapıları oluşur (Şekil 1.12.c). Nüfuz eden mikro çatlaklar işleme sırasında uygulanan darbe enerjisi ile orantılı olarak büyümektedir. Ayrıca iş parçasının mekanik ve termal özellikleri bu tür çatlak oluşumunda etkilidir [18].



Şekil 1.12 EKI'de çatlak oluşumu a) Deşarj sırasında oluşan ısı akısı dağılımı b) Deşarj sonrasında kabuk oluşumu ve bölgesel gerilmeler c) Yeniden katılaşmış katmanda oluşan çatlaklar [18].

Ekmekci ve Ersöz (2012), yukarıdaki bahsedilen çatlakları detaylı bir şekilde tanımladıktan sonra dielektriğe toz katkısının ana malzemeye nüfuz eden derin çatlakları nasıl azalttığını veya yok ettiğini aşağıdaki şekilde göstermiştir. Dielektriğe toz katıldığında deşarj sırasında plazma kanalı etrafında toz taneleri bulunmaktadır (Şekil 1.13a). Deşarj sonlandığında elektroforetik ve negatif basınç etkisiyle toz taneleri katılaşmaya başlayan krater yüzeyine nüfuz etmektedir (Şekil 1.13b). Böylelikle katılaşmaya devam eden kabuk yüzeyinde sürekliliği bozarak, krater çeperlerinde oluşan gerilmeyi azaltmaktadır (Şekil 1.13c). Kabukta meydana gelen gerilme boşalması sonucu derin çatlak oluşumu büyük oranda azalmakta veya yok olmaktadır. Ancak Şekil 1.13d' de görüldüğü gibi yüzeysel çatlaklar dönüşümsel gerilmeler sebebiyle meydana geldiği için, dielektriğe toz katkısı bu çatlaklar üzerinde kayda değer bir etki yaratmamaktadır [19].



Şekil 1.13 EKİ'de toz katkısının çatlak oluşumuna etkisi [19].

1.5.3 Yüzey ve Yüzey Altı Katmanları

EKİ ile oluşan yüzeylerde genel olarak YKK altında ısıl etkilenmiş katman ve en altta ise ana faz malzeme bulunmaktadır. En üst katman dielektrik ve deşarj sırasında oluşan ortamla doğrudan temastadır. Altında kalan ısıl etkilenmiş katmanda ise termal çevrimler sonucunda faz değişimleri meydana gelebilmektedir. Shabgard vd. (2011), yaptığı çalışmada en üst katmanda ergimiş ve YKK ve hemen altındaki ısıl etkilenmiş katmanın darbe süresi ve darbe akımıyla değişimini incelemişlerdir. Darbe süresinin artmasıyla YKK ve ısıl etkilenmiş katman kalınlıkları artmış, düşük darbe sürelerinde ise kalınlıklar azalmıştır. Ancak aynı enerji seviyesinde, düşük darbe akımı ve yüksek darbe süresi kullanıldığında kalınlıklarda artış görülmüştür [20]. YKK'nı daha yakından inceleyen Cusaneli vd. (2004), W300 ferritik çeliğini standart EKİ yağı kullanarak işlemişler ve yüzeyde oluşan katmanları değerlendirmişlerdir. YKK'de farklı boyutlarda dendritik ve sütunumsu mikroyapılar ile karşılaşmışlardır. Kaba işleme koşullarında (Yüksek darbe akımı ve darbe süresi kullanılarak), YKK'de üstte kalıntı

östenit ve hemen altında bazı martenzit yapıları görüntülemişlerdir. Östenitik sütunsu yapı beyaz tabaka ile ısı etkilenmiş katman ara yüzeyinde bulunmaktadır. Yüzeye göre soğuma hızı aslında bu ara yüzeyde çok daha hızlıdır. YKK'nin en üst yüzeyinde karbon içeriği daha yüksek olduğundan ϵ -karbürler yer almaktadır. İnce işleme koşullarında (Düşük darbe akımı ve darbe süresi kullanılarak) ise beyaz tabaka kalınlığının incelmekte ve beyaz tabaka içinde martenzit oluşumu görülmemektedir. Beyaz tabaka altında yer alan ısı etkilenmiş katman, genel olarak temperlenmiş martenzitten oluşur. Bu katmanda martenzit iğneleri belirli açılarda ara yüzeye doğru uzanmaktadır [21]. Arooj vd. (2014), Al 6061 T6 alaşımını gaz yağı kullanarak EKİ ile işlemişlerdir. Çalışmalarında YKK kalınlığının belirli bir akım eşik değerine kadar arttığını ancak bu eşik değerinden sonra YKK kalınlığının azaldığını belirtmişlerdir [22]. Ramasawmy vd. (2005), M300 martenzitik takım çeliğini kaba ve ince işleme koşulları altında EKİ ile işlemişlerdir. Araştırmacılar EKİ sırasında dielektrik sıvının ısı bozunumuyla iş parçası yüzeyine karbon atomlarının ergiyik metale difüzyonu yoluyla demir karbürlerin YKK'de oluştuğunu göstermişlerdir. Demir karbürler yüksek soğuma hızlarında dendritik yapıda katılır ve yüzeye dik bir şekilde hizalanırlar [23]. Mannan vd. (2013), yüksek hız çeliğini gaz yağı içinde Cu elektrot kullanarak EKİ ile işlemişlerdir. Araştırmacılar, YKK, martenzitik yapıda ısı etkilenmiş katman ve katmanın altında ana faz malzemeyle arasında birkaç mikron kalınlığında bir geçiş katmanı görmüşlerdir. Ana faz malzemesi mikro yapısından anlamlı bir farklılık içermeyen tabaka, genelde düşük darbe akımları işlemede uygulandığı zaman ortaya çıkmaktadır [24]. Gostimirovic vd. (2012), ASTM A681 takım çeliğini hidrokarbon yağı içinde Cu elektrot kullanarak işlemişlerdir. İşlenmiş yüzeylerde dört karakteristik katman gözlemlenmiştir. Bu katmanlar; YKK, sertleştirilmiş, ara yüzey ve temperlenmiş katmanlardır. YKK, Sertleşmiş katman martenzit, kalıntı östenit ve sementitten oluşmaktadır. Ara yüzey katmanı martenzit-östenitik örgüsü ve sementitten oluşmaktadır. Kalıntı östenit oranı temperlenmiş katmandan uzaklaştıkça azalmaktadır. Temperlenmiş katmanın mikro yapısı ise temperlenmiş martenzit ve sementitten oluşmaktadır. Bu katman ana faz malzemesine doğru kademeli biçimde ince küresel sementit içeren martenzit yapıya dönüşür. Bu yapı gerçekte ana faz malzemesinin mikro yapısı ile aynıdır [25]. YKK'nin kalınlığı ve mikro çatlak yoğunluğu malzemenin termal iletkenliği ile ters orantılıdır. Yüksek termal iletkenliğe sahip bir malzemede termal enerji kolaylıkla yayılır ve belirli bir noktada ısı kümelenemez. Buda her kıvılcım sonrası ergimiş malzeme hacminin daha az olacağı anlamına gelir. Beyaz tabaka kalınlıkları genelde işlenmiş yüzeyde homojen biçimde yayılı olmamaktadır ve mikro yapıyı da etkilemektedir. Çalışmada üç ana YKK kategorisi belirlenmiştir. Birincisi üst üste binen katmanlardan oluşan çok katmanlı YKK'dir. Karmaşık dendritik veya sütunsu mikro yapıya

sahiptir. YKK'nin kalınlığı 10 μm 'nin üzerinde olduğunda bu tip çoklu katmanlar şeklinde malzeme ile karşılaşılır. Takım çeliklerinin işlenmesinde uygulanan darbe enerjisi yüksek olduğunda YKK'nin yüzde ellilik bölümü çok katmanlı bir yapı sergilemektedir. İkincisi, tek katmanlı YKK'dir. YKK mikro yapısı en üst bölümünde sütunsu yapılardan oluşurken, orta katmanda iç içe geçmiş karmaşık dendritik yapılarla karşılaşmaktadır. YKK'nın alt bölgesi ise yüzeye dik dendritik bileşenlerden oluşmaktadır. Genelde YKK kalınlığı 10-20 μm arasında olduğunda bu tip katmanlarla karşılaşılır. Üçüncüsü ise, özelliksiz YKK'dir. Bu katman bilinen kimyasal ajanlar ile dağlanamadığından yapı özelliksiz olarak tanımlanmıştır. Genel olarak düşük darbe enerjisi kullanılarak yapılan işlemlerde bu tip YKK ile karşılaşılır. YKK çok katmanlı yapıda oluştuğunda, işlenen yüzeyde mikro çatlak oluşturma eğilimi yüksektir. Özelliksiz YKK ise genellikle mikro çatlaklar içermez. YKK'de yer alan mikro çatlakların çatlak kalınlığı ve yoğunluğu, EKİ'de kullanılan iş parçası kalınlığı ile doğru orantılı biçimde arttığı görülmüştür [26]. Ghanem vd. (2002), yüksek alaşımlı çeliği hidrokarbon esaslı dielektrik sıvı içinde grafit elektrot kullanılarak EKİ yöntemi ile işlemişlerdir. Çalışmalarında işlenen yüzeylerde üç ayırt edilebilir katman oluşumunu tespit etmişlerdir. YKK altında martenzit yapıya sahip sertleştirilmiş bir bölge oluşurken, ana faz malzemesi ile sertleştirilmiş bölge arasında bir geçiş katmanı gözlemlenmiştir. Yüzeyde sert ve mikro çatlaklar içeren bir katman bulunmaktadır. Bu katmanın iş parçası yorulma mukavemetini önemli ölçüde düşüreceği öngörülmüştür [27]. Farklı bir çalışmada sertleştirme, temperleme ve tavlama ısıl işlemleri uygulanmış AISI D5 çeliği pirinç tel elektrot kullanılarak (Tel EKİ) deiyonize suda işlenmiştir. Çalışmada, yüzey dokusu üst üste binmiş kraterlerin rassal dizilimi ile oluşmaktadır. İşlenmiş parça kesitinde, dört mikro yapı bölgesi ile karşılaşmıştır. En dış YKK altında beyaz tabaka bulunmaktadır. Beyaz tabakanın altında ise ısıtma ve soğutma çevriminin daha yavaş gerçekleştiği tavllanmış bölge bulunmaktadır. Bu bölge ana malzemeden daha yumuşaktır. Ayrıca ısıl etkilenmiş katman kalınlığı yüzeye nüfuz eden deşarj enerjisi ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Beyaz tabaka içindeki çatlak yoğunluğu darbe süresi ve açık aralık gerilimi ile artmaktadır. Ek olarak mikro çatlaklar işleme sırasında uygulanan darbe enerjisine bağlı olarak, ısıl etkilenmiş bölgeye nüfuz etmektedir [28]. Farklı bir çalışmada, 15-5PH paslanmaz çeliği EKİ ile işlendiğinde 50-70 μm kalınlığında YKK ölçülmüştür. Bu katman martenzit, kalıntı östenit ve bir miktar çözülmemiş karbürlerden meydana gelmektedir. İşlenen yüzeylerde genellikle mikro çatlaklar YKK içinde sonlanmaktadır. Ancak az sayıda ana faz malzemesine nüfuz eden mikro çatlak oluşumları ile karşılaşmıştır. Kıvılcım başına oluşan ısı enerjisi arttıkça çatlak derinliği ve boyutu artmaktadır. Diğer taraftan bu tarz çatlak oluşumları, düşük darbe sürelerinde darbe akımını artırarak azaltılabilmektedir. Ayrıca YKK kalınlığı;

dielektrik akışkan türü, elektrot boyutu ve işleme parametreleri ile kontrol edilebilir [29]. Ekmekci vd. (2005), yaptıkları çalışmada plastik kalıp çeliğini, gaz yağı ve deiyonize suda, bakır ve grafit elektrot kullanılarak işlemişlerdir. EKİ ile işlenen yüzeylerde en uzun darbe sürelerinde, en yüksek beyaz tabaka kalınlığı bulunmuştur. Yığılma sebebiyle üst üste binmiş kraterler kenarları daha kalındır. Krater merkezine doğru beyaz tabaka kalınlığı incelmektedir. Kullanılan takım elektrodu ve dielektrik sıvı malzemesi, krater kenarlarında yığılan katman oluşumunda etkilidir. Dielektrik olarak gaz yağı ve takım elektrodu olarak grafit kullanıldığında yığılan krater kenarları daha belirgin olmaktadır. Grafit elektrot yerine bakır elektrot kullanıldığında yığılma az da olsa azalırken, gaz yağı yerine deiyonize su kullanıldığında yığılmada belirgin bir azalma görülmektedir. Beyaz tabakanın ana faz malzemesine göre yüksek sertliğe sahip olduğu ve ısı etkilenmiş tabakaya doğru gidildikçe sertliğin düştüğü görülmüştür. Beyaz tabaka ve ısı etkilenmiş katman arasında koyu ince bir geçiş bölgesi oluşmuştur. Sonuç olarak beyaz tabakada sementit ve martenzit yapıları kalıntı östenit matris içine dendritik yapılar oluşturarak dağılmıştır. Beyaz tabaka içindeki kalıntı östenit fazının miktarı ve mikro çatlak yoğunluğu deiyonize su ile işlendiğinde çok daha düşük olmaktadır. Beyaz tabaka kalınlığı birkaç mikrondan 80 mikrometreye kadar yüzeyde bölgesel olarak değişmektedir. Darbe süresi ve akımın azalması beyaz tabaka kalınlığını azaltmıştır [30]. Ekmekci vd. (2016), Ti-6Al-4V alaşımını SiC toz katkılı deiyonize su içinde Al 6082 T6 takım elektrodu kullanarak işlemiştir. Deiyonize suya toz katkısı ile belirli akım ve darbe süresi kombinasyonlarında kıvılcımlar alt enerji seviyelerinde ikincil kıvılcımlara bölünerek farklı deşarj modelleri oluşturmuştur. Böylelikle yüzeye tek bir darbeye geçen enerji miktarı dağılarak yüzey ve yüzey altı yapıları farklılaşmıştır. Numunelerin kesit analizlerinde yüzeyin en üst katmanında yüksek darbe süresinde (400 μ s) kalın ve süreksiz yeniden katılmış koyu bir katman bulunmaktadır. Bu katmanlar çok miktarda çatlak ve düzensiz şekilli boşluklar içermektedir. İnce beyaz bir katman ise YKK'nin hemen altında tespit edilmiştir. En altta ise ısı olarak etkilenmiş temperlenmiş bir katman bulunmaktadır. Darbe süresinin değişmesiyle benzer katmanlar farklı kalınlıklarda gözlemlenmiştir. Darbe süresinin azalmasıyla (100 μ s) koyu katmanın ve ısı etkilenmiş bölgenin kalınlığı oldukça azalmıştır. Darbe süresi 25 μ s olduğunda dendritik ve koyu katman yüzeyde oluşmamıştır. Ancak darbe süresinin 6 μ s'ye inmesi koyu katmanın yeniden oluşmasına neden olmuştur. Ayrıca, ısı etkilenmiş bölge kalınlığı artmış ve 100 μ s işlenmiş yüzeylerle benzer bir görünüm sergilemiştir. Dielektrik sıvıya toz katkısı ile işleme sırasında oluşan ikincil kıvılcımlar kesit mikro yapısını farklılaştırmıştır. Bu değişimler işleme sırasında ana deşarj kanalından ayrılan ikincil kıvılcımların saçılma şekli ile ilişkilidir. Ana deşarj kanalı eşit veya dağınık biçimde

bölünebilmektedir. Bu sonuç, toz katkılı dielektrik sıvıdan işlenen yüzeye farklı malzeme transfer mekanizmalarının oluşumuna neden olur. Farklı şekillerde dağılandeşarj kanalları arasında kalan toz tanelerideşarj sonunda ergimiş metal havuzuna hücum ederek yüzeye nüfuz eder. Böylece tane şeklinde malzeme transferi meydana gelir. Diğer taraftan anadeşarj kanalının toz taneleri ile karşılaşması, taneleri kısmi veya tamamıyla plazma kanalı içinde ayrıştıracaktır. Ayrışan toz malzeme iyonları iş parçası ve elektrot arasında transfer olacaktır [6]. Öpöz vd. (2018), Ti-6Al-4V alaşımını deiyonize suda farklı konsantrasyonlarda SiC ilavesi ile Al 6081 T6 takım elektrot kullanarak işlemişlerdir. Çalışmada yüksek toz konsantrasyonlarında ve düşük darbe akımlarında, tane formunda malzeme transferinin geliştiği görülmüştür. İşlenmiş yüzeylerin kesit görünümü, en üstte koyu bir katman ve bu katmanı takip eden takip eden dendritik yapıli bir katman görünümü sergilemiştir. Beyaz ve temperlenmiş katmanlar bu yapıyı takip etmektedir. YKK kalınlığı SiC toz konsantrasyonunun artmasıyla azalmıştır. Ancak sertlik dielektrik sıvıdan malzeme transferi sebebiyle artmıştır. Toz katkı tanelerinin işlenmiş yüzeye transferi dielektrik sıvıya katılan SiC toz konsantrasyonu ile birlikte değişmektedir [31]. Prakash vd. (2017), β -Ti alaşımını, 0-2-4-6-8 g/l Si tozu ilave ederek 5-25 A darbe akımında 5-80 μ s darbe süresinde işlemişlerdir. Si toz katkısı ile birlikte YP ve mikro çatlaklar azalmıştır. 4 g/l Si toz konsantrasyonunda çatlaksız yüzeyler elde edilmiştir. Ayrıca en ince YKK ve en düşük nano gözeneklilik 4 g/l'de elde edilmiştir. Diğer konsantrasyonlardan sonra YKK kalınlığı ve nano gözeneklilik artış eğilimi göstermiştir [32].

1.5.4 Fonksiyonel Yüzeyler

Daha önce çalışmalarda da bahsedildiği gibi, EKİ sırasında dielektrik sıvı, dielektrik sıvıya eklenen toz katkısı, takım elektrot malzemesi işlenen yüzey mikro yapısını etkilemektedir. Farklılaşan mikro yapı ise mekanik, kimyasal ve fiziksel özellikleri değiştirmektedir. Ayrıca kıvılcımların bölünmesi işlenen yüzeylerde farklı yüzey dokularını oluşturmuştur. Yüzey dokuları, toz konsantrasyonu ve elektriksel parametre kombinasyonları ile kontrol edilebilmektedir [31]. Sonuç olarak, EKİ ile fonksiyonel yüzeyler oluşturmak yenilikçi bir yöntem olarak umut vadetmektedir.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar, takım elektrodundan iş parçasına yoğun malzeme transferi gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. EKİ'de T/M yöntemiyle üretilen takım elektrotları, işleme sırasında aşınmaya uğrayarakdeşarj bölgesinin toz konsantrasyonunu değiştirmektedir. T/M takım elektrotunu oluşturan bileşenleri arasında oluşan bağlar, işleme sırasındadeşarj bölgesine

salınan malzeme miktarını belirlemektedir. Diğer taraftan dielektrik sıvıya karıştırılan farklı malzeme tozları benzer biçimde sonuç doğurmaktadır. Yöntemle işlenen yüzeylerin sertlik, aşınma ve korozyon direnci gibi özellikleri, yüksek sıcaklık ve basınç etkisi altında gerçekleşen karmaşık malzeme taşınım mekanizmaları sonucunda değişmektedir. Elde edilen bulgular, EKİ'nin nano gözenekli ve biyouyumlu yüzeylerin elde edilebilmesinde alternatif bir yöntem olabileceği sonucunu ortaya koymaktadır.



BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

Ti ve alaşımları; düşük elastisite modülü, iyi yorulma dayanımı, korozyon direnci ve biyouyumlulukları sebebiyle biyomedikal parçalarda geniş bir kullanıma sahiptir [33, 34].

Geetha vd. (2009), Ti ve alaşımlarının mükemmel uyumluluk ve korozyon direnci olmasına rağmen, uzun süreli vücut içi performanslarda Al ve V iyon salınımı sebebiyle alzheimer ve nöropati gibi çeşitli sağlık problemlerine neden olduğu bilinmektedir. TiO₂ filmleri zayıf kayma mukavemetleri sebebiyle yüzeyden ayrılarak, kemik ve implant arasında yüksek sürtünme ve aşınma problemlerine neden olabilmektedir. Doku ve implant arasında gevşemelere sebep olan bu durum klinik uygulamalarda başarısızlığa yol açmaktadır [35].

Ti ve alaşımlarının yüzey modifikasyonları için çeşitli fiziksel, kimyasal ve mekanik yöntemler önerilmiştir. Liu vd. (2004)'e göre bu yöntemler, yüzey topografyasını ve yüzey metalurjisini değiştirerek dokuların implanta bağlanma kabiliyetini artırma ya da CaP gibi kemik benzeri biyouyumlu bir seramik yapıyla yüzeyi kaplama temeline dayanmaktadır [34].

EKİ'de elektriksel gerilimle yüklenen elektrot ve iş parçası arasında dielektriğin yalıtım direncinin kırılması ile kıvılcım meydana gelir. Kıvılcımın etki ettiği noktalarda sıcaklık ve basınç çok yüksektir. Elektriksel akımın sonlanmasıyla malzemenin buharlaşmasını ve kaynamasını engelleyen basınç da ortadan kalkmaktadır. Basıncın ortadan kalkmasıyla plazma boşluğu dielektrik sıvı ile dolmaktadır ve aşırı ısınan malzeme dielektrik sıvı içine püskürmektedir. Bu şekilde iş parçasının yüzeyinde yarım küre benzeri bir krater oluşturarak malzeme kaldırmaktadır. Krater boyutları ve şekilleri elektriksel parametrelerle değiştirilmekte ve iş parçası yüzeyi ortamla (elektrot, dielektrik ortam vb.) etkileşerek fonksiyonel yüzeyler oluşturulabilmektedir.

2.1 EKİ VE TK-EKİ İLE FONKSİYONEL VE BİYOUYUMLU YÜZEYLER

EKİ’de dielektrik sıvıdan işlenen yüzeye taşınan elementlerle yüzey alaşımlanmakta ve biyouyumlu yüzeyler oluşturulabilmektedir. Chen vd. (2008), Fe-Al-Mn alaşımını gaz yağında bakır elektrot kullanarak işlemişlerdir. Malzeme yüzeyinde nano yapıli gama fazında k-karbürler oluşmuştur ve bu durum biyouyumluluğu geliştirmektedir. Bu tarz karbürler kemiğe kaynama özelliğini artıran nano yapıli oksitler oluşması açısından önem taşımaktadır [36].

Peng vd. (2010), yaptıkları bir çalışmada ise grade IV Ti iş parçasını distile suda, bakır elektrot kullanarak işlemiş ve YKK’de nanogözenekli oksit oluşumunu gözlemlemişlerdir. [37]. Benzer biçimde, Yang vd. (2013), Ti-6Al-4V malzemesini distile suda Ti elektrot kullanarak işlemiş ve yüzeyde nanogözenekli oksit oluşumlarını gözlemlemiştir [38].

Mahajan ve Sidhu (2018), Co-Cr-Mo alaşımı grafit elektrot kullanarak saf dielektrik sıvıda işlenmiştir. Çalışmalarında in-vitro, hemoliz testleri yaparak yüzeylerin biyouyumluluk özelliklerini değerlendirmişlerdir. Düşük darbe akımı (5 A) ve yüksek darbe sürelerinde (200 μ s) işleme, biyouyumlu yüzeylerin elde edilmesi için uygun koşullardır. Makro pürüzlülük, mikro gözeneklilik ve işlenmiş yüzeyde yeniden çökelmiş damlacıkların varlığı, işlenmemiş referans numuneye göre daha yüksek hücre canlılığına ve çoğalmaya neden olmuştur. Bu tarz yüzeyler EKİ’de 960-1500 J enerji seviyelerinde işlemeyle elde edilmiştir. Yüzeylerde oluşan fosfit ve oksit fazlarının hücre canlılığına ve çoğalmasına katkı sağladığı düşünülmüştür [39].

TK-EKİ’de dielektrik sıvı içine toz katkısıyla biyouyumlu yüzeyler elde edilebilmektedir. Ayrıca implantın mekanik dayanımını etkileyecek yüzey çatlakları, toz katkısı ile beraber azaltılabilmektedir. Prakash vd. (2015), yaptıkları bir çalışmada Ti elektrot kullanarak β -Ti alaşımını dielektrik sıvıya Si toz katkısı kullanarak işlemişlerdir. İşleme sırasında dielektrik sıvıdan taşınan elementlerle işlenen yüzeyde biyoseramik oksit ve karbür fazlar oluşmuştur. Yüzeyde oluşan mikro kraterler üzerindeki nano gözenekli topografya ile birlikte biyoseramik oksit ve karbür fazların varlığı biyouyumluluğu geliştirmektedir. Sert ve kararlı biyoseramik oksit ve fazlar ayrıca korozyon direncini ve yüzey sertliğini de artırmaktadır [40].

Chen vd. (2014), Ti malzemesini deiyonize suya Ti tozu karıştırılarak EKİ ile işlemişlerdir. Uygun miktarlarda toz karışımı ile belirli parametrelerde yüzeyde oluşan çatlakların azaldığını

ve yok olduğunu, ıslanabilirliğin arttığını bulmuşlardır. Çalışmada belirli oranlarda toz katkısının YKK kalınlığını azalttığını göstermişlerdir. YKK'de TiO tabakası, Ti toz katkısı ile beraber incelenmiştir [41].

EKİ'de dielektrik ortamdan iş parçası yüzeyine malzeme transferi olduğu fikri ile dielektrik sıvıya kemik benzeri HA mineral toz katkısı Nihal Ekmekci ve Bülent Ekmekci (2015) tarafından ilk defa incelenmiştir. Çalışmalarında, HA toz çökelmiş yüzeyler üretmek için farklı elektriksel parametreler ve farklı oranlarda dielektrik sıvıya HA toz katkısı ile yüzeyleri incelemişlerdir. Ekmekci'ye göre işleme sırasında ikincil kıvılcımların oluşması, yüzeye HA göçü için kritik faktördür. Herhangi bir darbe akımında darbe süresi ayarlanarak toz göçü için uygun şartlar elde edilebilir. 22 A darbe akımı, 12 μ s darbe süresinde, pozitif elektrot kutuplaması ve 15 g/l veya üzere HA toz katkısı işlenen yüzeylerde HA kaplama elde etmek için uygun şartlardır [42].

Ou ve Wang (2016), yaptıkları çalışmada 70Ti-30Ta malzemesini Ti elektrot kullanarak distile suda 10 g/l HA toz katkısı kullanarak işlemişlerdir. Kaplama elde etmek için en iyi işleme parametreleri (Ca ve P atomlarının yüzeyde en yüksek olduğu) 3 A darbe akımı ve 100 μ s darbe süresi olarak belirtmişlerdir. Ayrıca EKİ ile işledikten sonra hidrotermal iyileştirmeyle yüzeyde taç yaprağı görünümünde HA kristalleri oluşarak yüzeyde ıslanabilirlik gelişmiştir. EKİ ile kaplama literatürde mikro ark oksidasyonu ve lazer kaplama mikro çizilme test sonuçları karşılaştırılmıştır. EKİ ile kaplanmış yüzeyler diğer yöntemlere kıyasla daha yüksek çizilme mukavemet değerlerini ortaya koymuştur [43].

Prakash vd. (2017) dielektrik sıvıda Si toz konsantrasyonunun EKİ ile işlenen yüzeylere etkilerini araştırmışlardır. Yüzey çatlak yoğunluğunda 4 g/l Si toz konsantrasyonu ile işlenmiş yüzeylerde belirgin bir azalma görülmüştür. Dielektrik sıvıda 8 g/l Si toz katkısı ile β -Ti alaşımı 15 A darbe akımı ve uzun bekleme sürelerinde işlendiğinde, YKK içinde birbirine bağlı 200-500 nm boyutunda gözenekli yüzey elde etmişlerdir. Elementel harita analizi, TK-EKİ'nin biyolojik uyumluluk geliştirici, karbür ve oksitler ile zenginleştirilmiş bir yüzey oluşturduğunu onaylamıştır [32].

Prakash ve Uddin (2017), deiyonize suya HA toz katkısıyla β -Ti alaşımını işlemişlerdir. Saf suda işleme ile karşılaştırıldığında, dielektrik sıvıya HA toz katkısının, yüzeyde küresel eklenti oluşumunu ve mikro çatlak gelişimini azaltarak, krater sırtlarını düzgünleştirdiğini

belirtmişlerdir. Yüzeyde $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaZrO_3 , Nb_8P_5 , CaO , TiP , Nb_4O_5 , TiO_2 gibi biyouyumlu fazların yanısıra nanogözenekli yapılar da elde edilmiştir. Ca, P ve O'nin varlığıyla birlikte biyoseramik oksitler, güçlü kimyasal bağlarla alt katmanlara bağlanmış ve delaminasyona karşı direnci artmış biyouyumlu yüzeyler EKİ yöntemiyle elde edilmiştir. Sertlik yüzeyde 1275HB ile işlem görmemiş ana faz numuneye göre 3 kat yüksektir. Ayrıca HA çökelmiş biyoseramik katmanlar işlenmiş yüzeyde korozyon direncini artırmıştır. In-vitro biyoaktivite sonuçlarından nanogözenekli HA katkılı yüzeylerin, işlenmemiş ya da saf dielektrikle işlenmiş numunelere göre biyouyumluluğun arttığı anlaşılmıştır [44].

Ou ve Wang (2017), deiyonize suda 0-15 g/l HA toz katkısı ile $\text{Ti}_{90}\text{Ta}_{10}$, $\text{Ti}_{80}\text{Ta}_{20}$, $\text{Ti}_{70}\text{Ta}_{30}$ alaşımlarını Ti (Gr 2) takım elektrot ile işlemişlerdir. MKO, TAO ve YP, Ta artışıyla artan ergime sıcaklığı ve termal iletkenlik ile düşmüştür. HA'nin elektriksel iletkenliğinin deiyonize suya göre düşük olması, kıvılcım atma aralığını azaltmıştır. Azalan kıvılcım atma aralığı deşarj bölgesinde yüksek basınç oluşturarak ergimiş metalin daha hızlı iş parçasından uzaklaşmasını sağlamıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l toz HA katkısıyla birlikte YP, MKO, TAO artmıştır. Dielektrik sıvıya 10 g/l HA toz katkısı yüzeyde daha küçük kraterler oluşturmuştur. YKK, Ca-P-O içermekte ve sertlik artmaktadır. Dielektrik sıvıda aşırı toz yoğunluğu ise kararsız işleme koşullarının oluşmasına neden olmaktadır. [45].

Prakash vd. (2018), Mg-Ca takım elektrot kullanarak, Mg-1Zn-5Mn alaşımını deiyonize suya nano HA toz (<100 nm) katkısı ile işlemişlerdir. İşlenmiş yüzeylerde birbirlerine bağlı gözenekli yapıların oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Gözenekler üzerine elektroforez etki nedeniyle nano HA toz göç etmiştir. Dielektrik sıvıda HA katkısının artırılması, nano HA toz tanelerinin gözenekleri kapatması ile sonuçlanmıştır. En yüksek konsantrasyonlu HA toz katkısıyla 5-10 μm boyutunda gözenekliliğe sahip yoğun yapılar yüzeyde oluşmuştur. Çökelmiş kaplama tabakasında intermetalik (CaMg;Mg-Zn, Mg-CaO, Mn-P, Ca-MnO gibi) bileşikler gözlemlenmiştir. Bu yapıların korozyona karşı direnç geliştirerek biyobozunma hızını azalttığını, birbirine bağlı nano HA toz içeren gözeneklerle birlikte biyoaktiviteyi ve kemiğe kaynama hızını artırdığını öne sürmüşlerdir. Ayrıca yüzeyde sertlik, işlenmemiş ana faz malzemeye göre 1.5 kat artmıştır. Nano HA toz katkısıyla YP, saf dielektrik sıvıda işlenmiş yüzeylere göre, düşmüştür [46]. Çalışmanın devamında minimum YP, YKK kalınlığı ve maksimum sertlik için en iyi şartlar Multi Objective Particle Swarm Optimization (MO-PSO) yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. HA toz içeren katman için en iyi işleme koşulları 5.28

g/l HA toz katkısı, 3.48 A darbe akımı, 40.33 μ s darbe süresi, 109.28 μ s bekleme süresi şeklinde belirlenmiştir [47].

Lamichane vd. (2019), nano HA toz katkısının işleme çıktılarına (MKO, TAO) ve YP'ne etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada nano HA toz katkısıyla beraber, darbe akımı, darbe süresi, bekleme süresi, açık aralık gerilimi, etkileri de değerlendirilmiştir. En düşük YP değeri (0.34 μ m), 24 A darbe akımı, 60 μ s darbe süresi, 90 μ s bekleme süresi ve 80 V açık aralık gerilimi işleme sırasında kullanıldığında elde edilmiştir. En yüksek MKO (19.01 mg/dk.) 28 A darbe akımı, 60 μ s darbe süresi, 120 μ s bekleme süresi ve 60 V açık aralık gerilimi kullanıldığında bulunmuştur. Çalışmada HA toz katkısıyla, mikro çatlak yoğunluğu düşük ve Ca-P bileşikleri içeren düzgün yüzeylerin yöntemle elde edilebildiği gösterilmiştir [48]. Singh vd. (2019), çalışmanın devamında ise TK-EKİ ile işlenen yüzeylerde biyoaktif Ca-P, kalsiyum karbonat ve intermetalik mangan silikat, mangan silikat karbür, krom karbür bileşiklerini tespit etmişlerdir. Ayrıca, suda HA toz katkılı EKİ ile elde edilen yüzeylerin mikrosertlikleri, işlem görmemiş ana faz malzemeye göre %160, saf hidrokarbon esaslı yağda işlenmiş numuneye göre ise %79 daha yüksektir [49].

Singh vd. (2019) 15 g/l TiO₂ toz katkılı EKİ ile işlemede 316L paslanmaz çeliği tungsten (W) elektrotla hidrokarbon esaslı yağ içinde işlemiştir. İşlenen yüzeylerin aşınma direncinin %80, sertliklerinin ise ana faz malzemeye göre %233 oranında arttığı görülmüştür. Silisit ve metaller arası alaşımların, titanyum karbür ve demirsilikat karbür gibi karbürlere bağlanarak, yüzeyde sertlik ve aşınma direncinin geliştiğini belirtmişlerdir. Dielektrik sıvıdan taşınan karbon atomları ile birlikte, toz katkısından taşınan Ti atomları işlenen yüzeyde titanyum karbür fazlarını oluşturmaktadır [50].

Farooq vd. (2020), Ti-6Al-4V ELI alaşımını Cu takım elektrot kullanılarak gaz yağında Si toz katkısıyla işlemişlerdir. İşlenmiş yüzeyde, darbe akımının ve darbe süresinin etkisini, toz katkısıyla beraber biyouyumluluk açısından irdelemişlerdir. 5 g/l toz konsantrasyonunda en düşük YP ve YKK elde edilmiştir. Yine bu konsantrasyonda 50-200 nm boyutlarında nanogözenekli yapılar yüzeylerde tespit edilmiştir. Dielektrik sıvıya 5 g/l'den daha yüksek Si toz ilavesi YP'nü ve YKK kalınlığını artırmıştır. Dielektrik sıvıda aşırı toz yoğunluğu kararsız koşulları geliştirmiş, deşarj enerjisinin dengesiz bir şekilde dağılmasına sebep olmuştur. Ayrıca yüzeylerde nano yapıli gözeneklerin yoğunluğu da azalmıştır [51].

Devgan ve Sidhu (2020), β -titanyum alaşımını farklı elektriksel parametreler ve farklı elektrot malzemeleri kullanarak işlemişlerdir. Deiyonize suya çok Duvarlı Karbon Nanotüp (MWCNT) ve HA katkısıyla işlenmiş yüzeylerin biyolojik performansını irdelemişlerdir. MWCNT katkısı işlenen yüzeylerde gözenekli ve homojen kraterler oluşturmuştur. İşleme sırasında yüzeyde oluşan biyofazlar biyoyumluluğu artırmaktadır. Dielektrik sıvıya HA toz katkısı ise nano gözenekli yapıları ve biyofazları yüzeyde oluşurmaktadır. Ancak MWCNT'ten farklı olarak, yüzey kraterlerin sırt şeklinde yapılar oluşturduğu gözlemlenmiştir. Topografik açıdan oluşan bu fark, MWCNT'lerin yüksek elektriksel ve termal iletkenliğe sahip olmasına bağlanmıştır. Sitotoksisite ve biyoyumluluk açısından ise her iki toz katkısı da benzer sonuçlar göstermiştir. En iyi parametreler dielektrik sıvıya 15 g/l HA toz katkısı için 15 A darbe akımı, 20 μ s darbe ve bekleme süresi, grafit takım elektrot ve negatif kutuplama ile işleme yapıldığında bulunmuştur. Dielektrik sıvıya 5 g/l MWCNT katkısında ise 25 A darbe akımında, 100 μ s darbe süresi, 20 μ s bekleme süresi, grafit elektrot ve negatif kutuplama en iyi işleme parametreleridir [52].

Bains vd. (2020), EKİ yağı içine nano HA tozu katarak, darbe akımı, darbe süresi ve bekleme süresi ile birlikte YP, MKO, aşınma ve korozyon üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. alışmalarında dielektrik sıvının temizleme performansını irdelemek için farklı i delik çaplarına sahip takım elektrotlar kullanılmıştır. Düşük darbe akımı seviyesinde dielektrik sıvıya nano HA toz katkısı MKO'yu hafifte olsa düşürürken, yüksek darbe akımı seviyelerinde MKO artmaktadır. Yüksek deşarj enerjisi, yüzey sertliğini de arttıran oksit oluşumlarını tetikleyerek, bir sonraki deşarj ile oluşan MKO'yu etkilemiştir. Büyük elektrot delik çapları daha iyi bir temizleme etkisiyle beraber MKO'yu artırmıştır. 4 mm delik çapı için akım ile YP doğru orantılıdır. İşleme sırasında kullanılan yüksek darbe süresi ile birlikte YP artmıştır. Bekleme süresi arttıkça düşük darbe sürelerinde YP artarken, yüksek darbe sürelerinde ise bekleme süresinin artmasıyla YP azalır. En yüksek YP, 2 mm delikli takım elektrot için düşük darbe süresinde (45 μ s), yüksek akımda (12 A), yüksek bekleme süresinde (90 μ s) ve toz katkısız dielektrikle işlemede bulunmuştur. 4 mm takım elektrot için yüksek akım (12 A) ve darbe süresi (90 μ s), düşük bekleme süresi (45 μ s) ve toz katkılı dielektrikle işlemede elde edilmiştir. Yüzeyde toz katkısıyla birlikte Ca, P, O içeren yapılar ve gözenekli topografya gözlemlenmiştir. Korozyon ve aşınma direnci nano HA partikül katkılı EKİ ile geliştirilmiştir [53].

Bui vd. (2019) Ti-6Al-4V yüzeylerinde gümüş katkılı YKK oluşturmak amacıyla hidrokarbon esaslı yağda Ag toz katkısı ve WC-%6Co takım elektrodu kullanarak işlemişlerdir. Çalışmada

Ag toz konsantrasyonunun etkisi deşarj enerjisi ile birlikte incelenmiştir. Dielektrik sıvıya Ag toz katkısıyla birlikte YP azalma eğilimindedir. Dielektrik sıvı direncinin azalması ve deşarj boşluğunun artması ile birlikte deşarj aralığının temizlenmesi kolaylaşmıştır. İşlenen yüzeylere aktarılan yüksek deşarj enerjisi ile birlikte krater çapları ve derinlikleri artarak YP'yi yükseltmiştir [54]. Bui vd. (2020) çalışmanın devamında düşük darbe enerjisi ve yüksek Ag toz katkısı ile işlenmiş yüzeylerde kalitatif ve kantitatif antibakteriyel testleri yapıldığında mükemmel antibakteriyel özelliklerin elde edildiğini öne sürmüşlerdir. Ag ihtiva eden kaplama tabakası S aureus ile birlikte yüzeylerde bakteri kümelenmelerini de azaltmıştır [55].

2.2 TM-ELEKTROT KULLANILARAK OLUŞTURULAN FONKSİYONEL VE BİYOUYUMLU YÜZEYLER

EKİ'de iş parçası yüzeyinin alaşımlanmasında kullanılan diğer bir teknik ise elektrottan iş parçası yüzeyine malzeme transferinin sağlanmasıdır. Mohri vd. (1993), yaptığı bir çalışmada tungsten karbür (WC) ve Co tozlarını belirli oranlarda (%80-%20, %90-%10, %95-%5) sinterleyerek takım elektrotları hazırlamış ve AISI-1049 çeliğini gaz yağı içinde işlemişlerdir. İşlenen yüzeylerde oluşan WC tabakasının ana metale tam bağlanamamasından ötürü, deney Cu elektrotla tekrarlanarak sorun giderilmiştir. Deneyler sonucunda işlenen yüzeyler çok sert bir WC katmanı ile kaplanmıştır. Yine Al ve kompozit Al elektrotlar ile EKİ yapılmış ve kompozit Al ile işlenen yüzeylerin aşınma ve korozyon direncinin arttığı gözlenmiştir [56].

Wang vd. (2002), EKİ' de elektrottan iş parçasına malzeme transferini sağlamak için preslenmiş Ti tozlarını takım elektrot olarak kullanmışlardır. Gaz yağında EKİ sonucunda işlenmiş yüzeylerde sert TiC seramik katman oluşmuştur [57].

Simao vd. (2003) yaptıkları bir çalışmada ise 6 mm x 55 mm ölçülerinde WC/Co (ağr. %6) kompozit takım elektrot kullanarak AISI H13 (600-640 HK_{0.025}) sıcak iş takım çeliğini hidrokarbon yağı (BP180) yağında işlemişlerdir. WC/Co kısmen sinterlenmiş takım elektrotların kullanılması, işlenmiş yüzeylerde nispeten az mikro çatlak oluşumuna, 30 µm'ye kadar ortalama kalınlığa sahip bir alaşımlı/değiştirilmiş yüzey tabakasının meydana gelmesine ve iş parçası yüzey mikro sertliğinde artışa neden olmuştur. Yüzeyde yüksek sertlik, çelik ve alüminyum alaşımlı şerit/levha üretiminde kullanılan sert krom kaplı soğuk haddelenmiş iş silindirlerinin kaplama öncesi yüzey koşulları açısından olumlu karşılanmaktadır [58].

Khanra vd. (2007), ZrB_2 -Cu takım elektrotları T/M ile üretmiş, çelik iş parçasını gaz yağında işlemişlerdir. İş parçası yüzeyinde kalıntı östenit, elektrot yüzeyinde ise ZrC oluşmuştur [59]. Ho vd. (2007) yaptıkları bir çalışmada Ti-6Al-4V alaşımını ticari su bazlı dielektrik sıvı içerisinde geleneksel Cu elektrot ve T/M Cu elektrot kullanarak işlemişler, oluşan yüzeyleri topografik açıdan karşılaştırmışlardır. T/M Cu elektrot kullanılarak yapılan EKİ, iş parçası yüzeyinde daha yüksek oranda alaşımlama meydana getirmiştir. T/M Cu elektrot kullanıldığında Cu tanelerinin birbirlerine zayıf bağlanması sonucu işleme sırasında deşarj aralığına daha yüksek Cu salınmaktadır. Geleneksel Cu takım elektrot ve negatif polarite ile işleme yapıldığında, işlenmiş yüzeylerde mikro sertlik 1100 HK_{0.025} ölçülmüştür. Sertliğin artışı yüzeyde oluşan TiO₂'ler ile açıklanmıştır. Negatif kutuplamada takım elektrodun daha fazla ısıya maruz kalarak aşındığı sonucuna varılmıştır. T/M Cu takım elektrotla, pozitif kutuplamada işleme daha kalın YKK oluşumuna neden olmuştur [60].

Patowari vd. (2011), WC60-Cu40 T/M takım elektrodu kullanarak çelik iş parçası (C-40) yüzeylerinde EKİ ile WC, W₂C, Cu ve Fe'den oluşan kompozit katmanlar oluşturmuşlardır. Yüzey sertliği ana faz malzemeye göre 5 kat daha yüksektir [61]. Mussada ve Patowari (2017), benzer şekilde W75-Cu25 kompozit takım elektrodu ile hidrokarbon yağda EKİ ile işlenmiş çelik yüzeylerinde Cu, W, WC ve W₂C oluşumu gözlemlemişlerdir [62].

Chen vd. (2013) Ti tozlarında T/M yöntemiyle takım elektrodu üreterek Al iş parçasını azot gazı altında işlemişlerdir. Al iş parçası yüzeyinde TiN seramik katman oluşumu gözlemlenmiştir [63]. EKİ'de istenen yüzey alaşımları doğru takım elektrotları ve dielektrik sıvı kombinasyonları kullanılarak elde edilebilmektedir. Tsai vd. (2003) Cu ve Cr tozlarını bir reçine içinde karıştırarak düşük basınç (20 MPa) ve sıcaklıkta (200 °C) kalıplayarak takım elektrodu üretmişlerdir. Üretilen bu takım elektrotları ile orta karbonlu çelikler işlendiğinde, yüzeyde Cr ve Cu bakımından zengin katmanlar elde edilmiştir. Cr tozlarınca yüksek orana sahip takım elektrot kullanımı, korozyon direnci daha yüksek işlenmiş yüzeylerin elde edilmesini sağlamaktadır [64].

Gülcan vd. (2015), yaptıkları çalışmada ise T/M takım elektrot bileşiminde Cu tozu (toz boyutu < 84.7 µm) ve Cr tozu (toz boyutu < 127 µm) kullanmışlardır. Cu ve Cr tozları üç farklı karışım oranında (%65-%35, %75-%25, %85-%15), üç farklı basınçta sıkıştırılmış (600 MPa, 700 MPa, 800 MPa) ve farklı sıcaklıklarda (800 °C, 850 °C, 900 °C) sinterlenmiştir. Uygun karışım oranında (örneğin %85Cu-%15Cr) Cu-Cr sinterlenmiş elektrotlar, elektrolitik Cu takım

elektrotu kullanımına göre daha yüksek işleme hızı sağlamıştır. Sinterlenmiş takım elektrotta Cr miktarı arttıkça MKO düşerken TAO azalmaktadır. Sinterleme basıncı ve sıcaklığının artmasıyla takım elektrodunun yoğunluğu ve elektrik iletkenliği artarken (tozların birbirine daha kuvvetli bağlanmaları sebebiyle) MKO artmaktadır [65]. Aynı araştırmacıların yaptığı farklı bir çalışmada Cu-Mo ve Cu-Cr T/M takım elektrotları farklı karışım oranlarında (%65-%35, %75-%25, %85-%15, %100), farklı basınç (600 MPa, 700 MPa, 800 MPa) ve farklı sıcaklıklarda (800 °C, 850 °C, 900 °C) üretilmiştir. T/M takım elektrotlarıyla 1040 çeliğini gaz yağında işlemişlerdir. Mo'nin Cr'a göre sahip olduğu yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, Mo katkılı takım elektrot ile işlemede MKO'yu artırırken TAO'yu azaltmıştır. EKİ'de Cr bazlı takım elektrot kullanımı, elektrolitik Cu ve Cu T/M takım elektrot kullanımına göre iş parçası YP'yi artırmıştır. Mo bazlı takım elektrotları kullanıldığında ise, Cr bazlı takım elektrotlarından daha düşük YP elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar takım elektrotlarının elektrik iletkenliğine bağlı olarak YP'nin değişimini göstermektedir. Takım elektrottan gelen Cu, Cr ve Mo ile dielektrik sıvıdan taşınan C, iş parçası yüzeyine taşınarak bir katman oluşturmaktadır. İşlenen yüzeyde YKK kalınlığı, Cr bazlı takım elektrotlarda Cr oranı arttıkça artış göstermektedir. İş parçası yüzeyinin sertliği, EKİ'de elektrolitik Cu takım elektrot kullanıldığında %180, Cu T/M takım elektrot ile %30, Cr esaslı takım elektrotlarda %40-80 ve Mo bazlı takım elektrot kullanımında %40-90 arasında artmıştır. T/M takım elektrotlarla işlenmiş yüzeyler ana faz metalden daha düşük korozyon yayılımı göstermiştir. Korozyon direncinin Cr ve Mo esaslı tüm kompozit elektrotlarda arttığı söylenebilir. EKİ'de iş parçası yüzeyinin aşınma direnci Cr esaslı takım elektrot kullanıldığında %110-160, Mo esaslı takım elektrot kullanıldığında %140-210 arasında artmıştır [66]. Coğun vd. (2016) saf Cu takım elektrot ve ağırlıkça %20B₄C-%80 Cu oranında T/M elektrotla 1040 çeliğini 3 A ve 6 A darbe akımında 25 µs ve 50 µs darbe süresinde pozitif kutuplama ile gaz yağı içinde işlemişlerdir. Tüm elektrotlar için darbe akımı ve darbe süresi arttıkça MKO ve HV sertlik değeri artmış YP ise bozulmuştur. MKO oranı en fazla E/Cu, en az ise TM/Cu-B₄C takım elektrot kullanıldığında elde edilmiştir. En yüksek TAO ise T/M Cu-B₄C takım elektrot kullanıldığında elde edilmiştir. Ancak T/M Cu-B₄C takım elektrotu kullanılarak işlenen yüzeylerde sert metaller arası fazlarca zengin bir yüzey katmanı elde edilmiştir. En düşük YP E/Cu takım elektrot, en yüksek YP ise T/M Cu-B₄C takım elektrot kullanıldığında elde edilmiştir. Tüm takım elektrotları için EKİ'de darbe süresi ve akımı arttıkça YP artmıştır. EKİ'de T/M Cu-B₄C takım elektrot kullanıldığında diğer takım elektrotlara göre daha yüksek (yaklaşık 2 katı, ana faz malzemeye göre 4 kat) yüzey sertlikleri ve aşınma dirençleri (1.5-2 kat) ölçülmüştür [67].

Balasubramanian ve Senthilvelan (2015) EN8 karbon ve D3 kalıp çeliğini, ayrı ayrı sinterlenmiş bakır, pirinç ve bronz takım elektrotlarla işlemişlerdir. İşlenen tüm yüzeyler RSM (Yüzey Cevap Metodu) yöntemi ile değerlendirilmiştir. EN8 karbon çeliği için MKO sinterlenmiş bakır takım elektrot kullanıldığında en yüksektir. TAO ve MKO oranı sinterlenmiş bronz takım elektrot kullanıldığında ise azalmaktadır. EKİ'de YP sinterlenmiş pirinç takım elektrodu kullanıldığında en düşük seviyededir. D3 kalıp çeliğinde ise sinterlenmiş bakır takım elektrot kullanıldığında ise en yüksek MKO oranı gözlemlenmiştir. TAO sinterlenmiş bronz takım elektrot için en düşük seviyededir. Sinterlenmiş pirinç takım elektrot kullanıldığında ise YP en düşük değerdedir [68].

Gill ve Kumar (2015) farklı oranlarda (%5Cr-Ni-%95Cu, %10Cr-Ni-%90Cu, %15Cr-Ni-%85Cu) metalik tozları 200 MPa basınçta presledikten sonra 850 °C de 60 dk. sinterlemişlerdir. Sinterlenmiş takım elektrotlarla yüksek karbonlu EN31 çeliğini EKİ ile işledikten sonra elde ettikleri sonuçları Taguchi metodu ile değerlendirmişlerdir. Yapılan değerlendirmelerde, EDS ve XRD sonuçlarına göre yüzeyde Fe₃C ve FeCrNi gibi intermetalik bileşikler içeren yüksek alaşımlı bir katman oluşumunu belirlemişlerdir. En iyi işleme parametrelerinde, işlenen yüzeylerde mikro çatlaklar oluşmamakta ve mikro sertlik yaklaşık 3 kat artmaktadır. Çalışmada yüzey mikro sertliğini etkileyen en önemli faktörün darbe akımı olduğu belirtilmiştir. Mikro sertlikteki artışın, alaşımlı katmanda krom içeren karbürlerin oluşmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır [69]. Bu çalışmanın devamı niteliğinde farklı bir araştırmada ise yine aynı oranlar kullanılarak (%5W-%95Cu, %10W-%90 Cu, %15W-%85) bakır ve tungsten kompozit takım elektrotlar üretilmiş ve EN31 yüksek karbonlu çelik işlenerek yüzey özellikleri incelenmiştir. EKİ ile işlenen yüzeylerde C %0.9'dan %1.98'e yükselirken, W %0'dan %2.62'ye çıkarak katman özelliklerini değiştirmiştir. Tungsten, karbon ile birleşerek yüzeyde tungsten karbürler oluşturmuş ve yüzey sertliğini artırmıştır. Sinterlenmiş takım elektrot kullanarak yapılan işlemlerde yüzeyde zengin alaşımlama yapılmış, mikro çatlak ve boşluk gibi yüzey hataları görülmemiştir. İşlenmiş yüzeyin mikro sertliği %150 oranında artmış, böylece düşük W içeriğine sahip alaşımlı çeliklerin uygulama alanını genişletmiştir [70]. Aynı araştırmacıların yaptığı bir diğer çalışmada ise, Cu ve Mn tozları sinterlenerek (%5Mn-%95Cu, %10Mn-%90Cu, %15Mn-%85Cu) elde edilen takım elektrot kullanılarak H11 sıcak kalıp çeliği EKİ ile işlenmiştir. İşlenen yüzeylerin YP, mikro sertlik gibi özellikleri Taguchi metodu yardımıyla incelenmiştir. Benzer biçimde, işlenen yüzeylerde ana faz malzemeye göre (%0.349 Cu, %0.346 Mn) daha fazla Mn (%5.05) ve C (%6.12) gözlemlenmiştir. Mikro sertliği olumlu yönde etkileyen mangan karbür ve sementitler işlenen yüzeylerde tespit edilmiştir. Ayrıca korozyon direncini artıracak bir miktar

bakırda yüzeyde saptanmıştır. Takım elektrot üretiminde toz konsantrasyonu ve işleme parametreleri, mikro sertliği etkilerken YP'yi önemli ölçüde değiştirmemiştir. Aynı zamanda işlenen yüzeylerde mikro çatlaklar oluşmamaktadır [71].

Senapati vd. (2016) geleneksel Cu elektrot ile T/M Cu-Cr-Ni takım elektrot kullanarak EKİ yağında H11 sıcak takım çeliğini işlemişlerdir. Cu-Cr-Ni tozları (%87 Cu-%5 Cr-%8 Ni) karıştırılmış ve 4 ton basınçta preslendikten sonra 800 °C'de sinterlemiştir. Elde edilen deney sonuçları DOC, TOPSIS, PCA gibi yöntemler kullanılarak en iyi işleme koşulları belirlenmiştir. Cu takım elektrotla işleme yapıldığında 3 A darbe akımı, 200 µs darbe süresi, 15 dk. işleme süresi en iyi işleme parametreleri olarak belirlenmiştir. EKİ'de T/M Cu-Cr-Ni takım elektrot kullanıldığında ise 6 A darbe akımı, 150 µs darbe süresi ve 15 dk. işleme süresi en iyi işleme parametreleridir. Ayrıca yüzeyde Cr ve Ni içeren bir katman oluşumu görülmüştür. Darbe akımının işlenmiş yüzeye etkisi en fazla olan işleme parametresidir [72].

Ahmed (2016), hidrokarbon yağı içinde Al iş parçasını Ti-B₄C-Al kompozit takım elektrotla işleyerek yüzeyde TiB₂ ve TiC içeren katmanlar elde etmiştir. Çalışmada sertliğin önemli miktarda arttığı raporlanmıştır [73].

Singh vd. (2017) yaptığı bir çalışmada hafifliği, korozyon direnci ve kaynaklanabilirlik özelliklerinden dolayı özellikle havacılık sektöründe tercih edilen AA6061/SiC (%10 SiC - %90 AA6061) kompozit malzemesini, %20 Cu - %80 W oranında sinterlenmiş takım elektrot ile işlemişlerdir. TAO, MKO ve YP'nü darbe akımı, darbe süresi, deşarj gerilimi ve bekleme süresini göze alarak değerlendirmişlerdir. Darbe akımı ve darbe süresinin TAO, MKO, YP üzerinde daha etkili olduklarını gözlemlemişlerdir. Uygun takım elektrot seçimi yapılarak iş parçası yüzeyinde istenilen özelliklere sahip yüzeylerin oluşturulabileceğini doğrulamışlardır. Sinterlenmiş takım elektrotla işlenmiş yüzey sertliği, Cu takım elektrotla işlenmiş yüzeylere göre 60 HV'den 85 HV'ye artış göstermiştir [74].

Hussain vd. (2018) yaptığı çalışmada Al₂O₃ tozlarını %1, %3, %5 oranında Cu ile sinterleyerek kompozit takım elektrot üreterek, takım elektrotların yoğunluk, sertlik ve aşınma mukavemetlerini incelemişlerdir. Kompozit elektrotta %Al₂O₃ oranı arttıkça yoğunluğun ve sertliğin arttığı, aşınma hızının ise azaldığı görülmüştür. Aşınma hızı sertlik, yoğunluk ve kompozit yüzey üzerindeki koruyucu oksit tabakası oluşumu ile ilişkilendirilmiştir [75].

Goyal vd. (2018), kardiyovasküler stent üretiminde kullanılan yüksek kromlu platin çeliğini geleneksel Cu ve Cu-Sn kompozit takım elektrotları kullanarak işlemişlerdir. Cu takım elektrotla EKİ'de darbe akımı 5 A'den 15 A'ye yükseltildiğinde MKO'da %96.31 artmıştır. Kompozit Cu-Sn elektrotla aynı koşullarda MKO %99.73 artmıştır [76].

Algodi vd. (2018), EKİ ile hidrokarbon esaslı dielektrik sıvı içinde yüksek hız çeliği (HSS) ve paslanmaz çelik (SS304) malzeme üzerine kaplama yapabilmek için sinterlenmiş TiC ve saf Cu takım elektrot kullanmışlardır. İşlemede sabit işleme parametreleri (darbe akımı 10 A, darbe süresi 8 µs, bekleme süresi 256 µs, deşarj gerilimi 230 V, negatif kutuplama) kullanarak karşılaştırma yapmışlardır. TiC/Fe kompozit kaplama her iki malzeme yüzeyinde elde edilmiştir. Kaplama mikro yapısı en dış yüzeyde eş eksenli ince taneli yapılar ve bunun hemen altında sütunsu yapılar şeklindedir. Kaplama ara yüzeyine doğru inildiğinde incelen eş eksenli taneli yapı görülmüştür. Bu durum EKİ ile işleme sırasında ergiyik malzemenin soğuma şeklini yansıtmaktadır. Aşınma direnci her iki altlık malzeme içinde yüzeyde TiC-Fe kaplama oluşmasıyla artmıştır. Cu takım elektrot kullanılarak EKİ yapıldığında TiC elektrot kullanımına göre yüzey aşınma direncinde daha düşük artış görülmüştür. İşlenmiş yüzeyde oluşan mikro çatlak ve gözenekli yapılar EKİ sonrası yüzeyin lazerle işlenmesiyle giderilmiştir. Ancak yüzeyi lazerle işlemek TiC yapılarını seyrelttiği ve taneleri irileştirdiği için, aşınma direncinde düşüşe sebep olmuştur. Ancak, düşüş yüksek yüklerde HSS iş parçası yüzeylerinde görülmemiştir. Bu durum abrazif aşınma mekanizmasının engellenmesine bağlanmıştır [77].

Tijo vd. (2018) farklı oranlarda (%60-%40, %70-%30, %80-%20) TiC ve Cu tozlarını sinterleyerek elde ettikleri takım elektrotlarla AISI 1020 çeliğini işlemişlerdir. Takım elektrotlar 300 MPa basınçla 2 dk. süreyle basılmış ve ardından sinterleme işlemine tutulmuştur. Sinterleme işlemini 900 °C de argon gazı beslemesiyle yapmışlardır. EKİ'de darbe akımı ve darbe süresi arttıkça, numune yüzeylerine malzeme transferi artmıştır. Ancak belirli bir eşikten sonra darbe süresi ve darbe akımının artması, işlemede malzeme kaldırma mekanizmasını tetiklemiş ve yüzeye malzeme transfer hızını düşürmüştür. Akım ve/veya darbe süresinin artması deşarj enerjisini artırarak işlenen yüzeyin YP'yi, mikro sertliğini ve aşınma direncini artırmıştır. Diğer taraftan aşırı darbe enerji seviyeleri EKİ'de kullanıldığında, işlenen yüzeyde düzensiz kaplamaya ve aşınma direncinde düşüşe sebep olmuştur [78].

Das vd. (2019) Al5052 alaşımını %40 TiB₂-%30 SiC-%30 Al T/M takım elektrotlar kullanarak işlemişlerdir. İşlenmiş yüzeyde kalınlığı 90 µm'ye ulaşan alaşımlanmış katman elde

etmişlerdir. EKİ'nin endüstriyel parçalarda istenen yüzey özelliklerini elde etmek için ekonomik ve verimli bir alternatif olacağı sonucuna varmışlardır. Alaşımlama sonrası işlenen yüzeyin YP 0.6 μm 'den 5 μm 'ye yükselmiştir [79].

Elaiyarasan vd. (2019) ZE41A magnezyum alaşım yüzeyinde sert bir katman elde etmek amacıyla EKİ'de %50 WC-%50 Cu T/M takım elektrot kullanmışlardır. Düşük sıkıştırma basıncında (150 MPa) sıkıştırılan takım elektrotları EKİ'de yükselen darbe akımı ve süresiyle MKO ve YP'de hızlı artışa sebep olmuştur. Hızlı işlemeye karşı takım elektrottan kontrolsüz malzeme taşınımı yüzey kalitesini hızla bozmuştur. Yüksek sıkıştırma basıncında (200 MPa) sıkıştırılan takım elektrotları ise, düşük darbe akım ve sürelerinde MKO'yu düşürürken yüzey kalitesini artırmıştır [80].

Prakash vd. (2019) Ti-6Al-4V yüzeyinde biyouyumlu katmanlar oluşturmak amacıyla Ti-Nb kompozit elektrotla Nb toz katkılı hidrokarbon yağında EKİ ile işlemişlerdir. İşleme sonucunda Ti-6Al-4V iş parçası yüzeyinde TiO_2 -TiC-NbO-NbC kompozit katman oluşmuştur. Çalışmada yüksek akım ve dielektrik sıvıda yüksek Nb konsantrasyonu kullanıldığında, işlenen yüzeye malzeme transfer oranının artarak mikro çatlak oluşumlarının azaltıldığı vurgulanmıştır. İşlenen yüzeylerde oluşan oksit ve karbürler yüksek korozyon direnci, sertlik ve aşınma mukavemeti sağlamaktadır. Ayrıca, implant gereksinimleri için ihtiyaç duyulan biyoaktivite elde edilebilmektedir [81].

Nath vd. (2010) yaptıkları bir çalışmada, laboratuvar ortamında saf HA sentezlemiş ve %10 oranında saf Ag tozu ile 1200 °C'de sinterlemişlerdir. Sinterlenmiş numunelerin sertlik tokluk gibi fiziksel özelliklerinin yanı sıra in-vitro sitotoksitesite ve antimikrobiyal testleri yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda Ag atomlarının HA kafes sistemine girerek sitokiyometrik olmayan HA oluşumuna ve kafes parametrelerinin değişmesine sebep olmuştur. Böylelikle 1300 °C'ye kadar HA'nın TCP (trikalsiyumfosfat)'ye dönüşmesi engellenerek, Ag ihtiva eden mükemmel kararlı HA yapısı elde edilmiştir. %10 Ag ilavesinin HA'nın in vitro sitotoksitesite özelliğinden ödün vermeden E.coli bakterilerine karşı mükemmel antimikrobiyal özellik sağladığı görülmüştür. Ayrıca daha yumuşak Ag partikülleri eklenmesine rağmen %10 Ag-%90 HA oranında tozların 1200 °C'de sinterlenmesi sonucunda 6.5 GPa sertlik elde edilmiştir. Toklaşma mekanizması çatlak dallanması ile gerçekleşirken tokluk 1 MPa $\text{m}^{1/2}$ ölçülmüştür [82].



BÖLÜM 3

AMAÇ DENEY DÜZENEĞİ ve YÖNTEM

3.1 GİRİŞ VE ÇALIŞMANIN AMACI

Ti ve alaşımları sahip olduğu mükemmel biyouyumluluk ve mekanik özelliklerinden dolayı implant malzemesi olarak yaygın biçimde kullanılmaktadır. Ancak zayıf osseointegrasyon, implant ile ilişkili enfeksiyonlar, bazı durumlarda iyon salınımı nedeniyle sitotoksik etki göstermektedir. TiO'nun zayıf kayma mukavemeti, implant ve biyolojik malzeme ara yüzeyinden taneler biçiminde ayrılarak, sert ve aşındırıcı tane davranışını sergilemesine yol açmaktadır. Hızlı osseointegrasyon ve bakteriyel enfeksiyona karşı direnç implant başarısında temel rol oynamaktadır. Sekiz yıllık bir dental implant çalışmasında, implant uygulamalarının %2.7 oranında başarısızlık ile sonuçlandığı görülmüştür. İmplant başarısızlıklarının %52,5'i kemik kaybı ve/veya enfeksiyon kökenlidir. %43.4'ü ise implant hareketliliğinden kaynaklanmaktadır. Elde edilen sonuçlar, hızlı osseointegrasyon ve bakteriyel direncin implant uygulamalarında önemini vurgulamaktadır [83].

Doku implant ara yüzeyinde biyofilm oluşumu ve zayıf bağışıklık, bakteri kolonizasyonu ve yüksek enfeksiyon duyarlılığından kaynaklanır. Bakteri yapışması ve bakteri kümelenmeleri nedeniyle biyofilm oluşumunu önlemek için Ti implant yüzeyleri çeşitli yöntemlerle modifiye edilmektedir. Literatürde, kaplamalar (antibiyotik yüklenmiş kaplamalar, organik veya inorganik antimikrobiyal ajanlar içeren kaplamalar, yapışma dirençli kaplamalar), Ti alaşım implant yüzeylerine antibakteriyel polimerlerle biyofonksiyonelleştirme gibi yüzey modifikasyon yöntemleri kullanılarak uygulanmıştır. Halen, implantlarda ortaya çıkan osseointegrasyon problemlerinin olası çözümleri için alternatif yüzey işleme teknikleri üzerinde araştırmalar devam etmektedir. Kaplamalar ve yüzey modifikasyonları arasında yer alan inorganik antimikrobiyal Ag geniş aralıkta antibakteriyel özellikler sergilerken osseointegrasyonu da geliştirmektedir. Ancak Ag iyon salınım hızı 35 ppb'den yüksek olduğunda hücreler üzerinde toksik etki yaratmaktadır. Bundan dolayı, Ag katkılı yüzeylerin Ag miktarları sınırlandırılmalıdır.

Patil vd. (2019) Ti-6Al-4V yüzeylerine DC püskürtme ve atmosfer ortamında 750 °C'de termal tavlama yaparak 5 ila 20 nm arasında değişen kalınlıklarda gümüşle kaplamamışlardır. Kaplanan yüzeylerde Ag içeriğinin ağırlıkça yüzde 4.285'den (kalınlık 20 nm) yüksek olması, Ag⁺ salınım hızının 35 ppb'nin üzerine çıkması sebebiyle insan dokuları için toksik etkiye neden olmaktadır. Bu nedenle, gümüşün 2.229 ağırlık yüzdesi (kalınlık 15 nm), antibakteriyel implantların geliştirilmesi için önerilmiştir [84].

EKİ yöntemi, içeriği kontrol edilebilen Ag katkılı yüzeylerin elde edilebilmesi açısından yenilikçi bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca biyouyumluluk açısından gereksinim duyulan yüzey modifikasyonlarının ve mikro yapısal değişimlerin bu yöntemle işlenen yüzeylerde elde edilebildiği literatürde kanıtlanmıştır. Daha önce yapılan çalışmalar temel alındığında, dielektrik sıvıya Ti, HA, MWCNT gibi toz katkıları, işlenen yüzeyde biyouyumluluk açısından olumlu değerlendirilebilecek topografik oluşumlar meydana getirmektedir. Üst üste binmiş kraterler içinde, birbirine bağlı nano gözenekli yapılar EKİ yüzeylerde oluşmaktadır. Deşarj enerjisinin etkisiyle biyoseramik oksit ve karbür fazları oluşmakta ve HA işlenen yüzeye taşınabilmektedir. Bui vd. (2020) EKİ'de deiyonize suya Ag toz ilavesi ile Ag katkılı yüzeyler elde ederek yüzeyin bakteriyel direncini geliştirmiştir [55]. Prakash vd. (2019) EKİ'de sinterlenmiş takım elektrot kullanımının biyouyumlu yüzeyler oluşturabileceği fikri literatürde yeterli seviyede çalışılmamıştır [81]. EKİ'de biyouyumlu ve antibakteriyel özelliklerin geliştirilmesini içeren herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Güncel bir yüksek lisans çalışmasında Ag-HA sinterlenmiş elektrot kullanılarak antibakteriyel yüzeyler geliştirilmeye çalışılmıştır. Çalışmada Ag'ün işlenen yüzeylere yüksek oranda taşınma eğilimi görülmüştür. Deneysel tasarımda ele alınan tüm işleme koşulları için çok yüksek oranda gözlemlenen Ag taşınımı, toksik etkinin giderilmesi için farklı kombinasyonlarda T/M elektrot tasarımı gereksinimini ortaya koymuştur [85].

Fe ve Co nispeten kolay bulunabilir ve ekonomik bir malzemedir. Ayrıca Ti ile birlikte gelişmiş biyouyumluluk ve korozyon direncine sahip alaşımlar Fe ve Co kombinasyonları ile elde edilebilmektedir. Ti-Fe alaşımları mekanik özellikleri Ti-6Al-4V alaşımına göre daha iyi seviyededir. Pahalı Nb ve V gibi β kararlaştırıcı elementler yerine, ucuz ve kolay bulunan Fe toz kullanımı son dönemlerde araştırmacıların ilgisini çekmektedir [86–88].

Çalışmamızda EKİ ile işlenen Ti-6Al-4V yüzeylerinde, antibakteriyel özelliğin geliştirilmesi için kullanılan Ag tozları ile birlikte Fe ve Co tozları sinterlenmiş takım elektrot bileşiminde

yer almaktadır. Sitotoksik etkiden kaçınmak için elektrot bileşiminde Ag konsantrasyonu düşük tutulmuştur. Ayrıca CaP tozları kullanılarak, biyouyumluluk açısından gelişmiş yüzeylerin elde edilmesi hedeflenmiştir. EKI'de %100 Ag-Fe-Co (A elektrot), %25 CaP-%75 Ag-Fe-Co (B elektrot), %35 CaP-%65 Ag-Fe-Co (C elektrot) ve %50 CaP-%50 Ag-Fe-Co (D elektrot) faktöriyel deneysel yaklaşımla denenmiştir. 7 A, 22 A ve 42 A darbe akımı seviyelerinde yapılan denemeler 22 A ve 42 A darbe akımlarında kararsız işleme koşulları geliştirdiğinden çalışmaya 7 A darbe akımı ile devam edilmiştir. 6 µs, 12 µs, 25 µs, 50 µs ve 100 µs darbe süreleri elektriksel işleme değişkenleri olarak ele alınmıştır. İşlenen yüzeylerde malzeme transfer mekanizmaları, mikro yapısal ve topografik yüzey değişimleri açıklanmaya çalışılmıştır.

3.2 DENEYSEL DÜZENEK VE YÖNTEM

3.2.1 İş Parçası Hazırlık Aşaması

Çalışmalarımızda iş parçası olarak ticari amaçla elde edilen Ti-6Al-4V Extra Low Interstitial (ELI) alaşımı kullanılmıştır. Ti-6Al-4V alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 3.1'de, fiziksel ve kimyasal özellikleri de Çizelge 3.2'de verilmiştir. 10 mm çapında çubuk şeklinde satın alınan malzeme 8 mm aralıklarla kesilmiştir (Şekil 3.1a). Protherm marka atmosfer kontrollü ısıtma fırınında numuneler 8 °C/dk. ısıtma hızında 600 °C'ye çıkarılarak, 1 saat gerilim giderme tavlmasına tabi tutulmuştur. Ardından fırında soğumaya bırakılmıştır (Şekil 3.1b). Sonrasında iş parçası ile elektrot yüzeyi arasında paralelliğin sağlanması amacıyla 120-400 mesh arası zımpara ile yüzeyler parlatılmıştır.

3.2.2 Toz Metalurjisi ile Elektrot Üretimi

T/M tekniği ile Ag-Fe-Co matrisine CaP tozları takviye edilerek farklı konsantrasyonlarda takım elektrotlar üretilmiştir. Üretimde kullanılan Ag-Fe-Co tozlarının ikincil elektron görüntüleri ve enerji dağılım analizi (EDS) Şekil 3.2, ICP-MS analizi Çizelge 3.3'de, CaP tozlarının ikincil elektron görüntüsü ve EDS analizi Şekil 3.3'te, partikül toz boyutu analizi ise Şekil 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.1 Ti-6Al-4V ELI alaşımasının kimyasal bileşimi (% ağırlık).

Ti	Al	V	Fe	O	C	N	H
89.551	6.15	4.06	0.10	0.09	0.02	0.028	0.001

Çizelge 3.2 Ti-6Al-4V ELI alaşımasının kimyasal fiziksel ve mekanik özellikleri (20 °C).

Yoğunluk	4.43 gr/cm ³
Özgül ısı	560 J/kg°C
Hacimsel elektrik direnci	170 Ω.cm
Termal iletkenlik	7.2 W/mK
Sertlik	36 Rockwell C
Elastisite modülü	114 GPa
Akma dayanımı (%0.2)	>850 MPa
Çekme dayanımı	>900 MPa

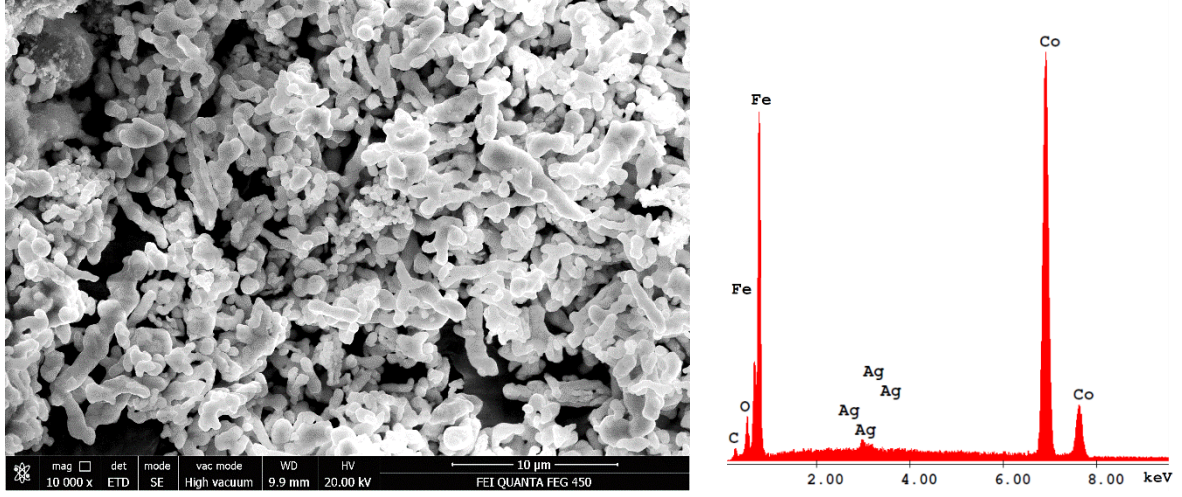


a)



b)

Şekil 3.1 Deneylerde kullanılan a) Ti-6Al-4V alaşımı iş parçası, b) Isıl işlem fırını.

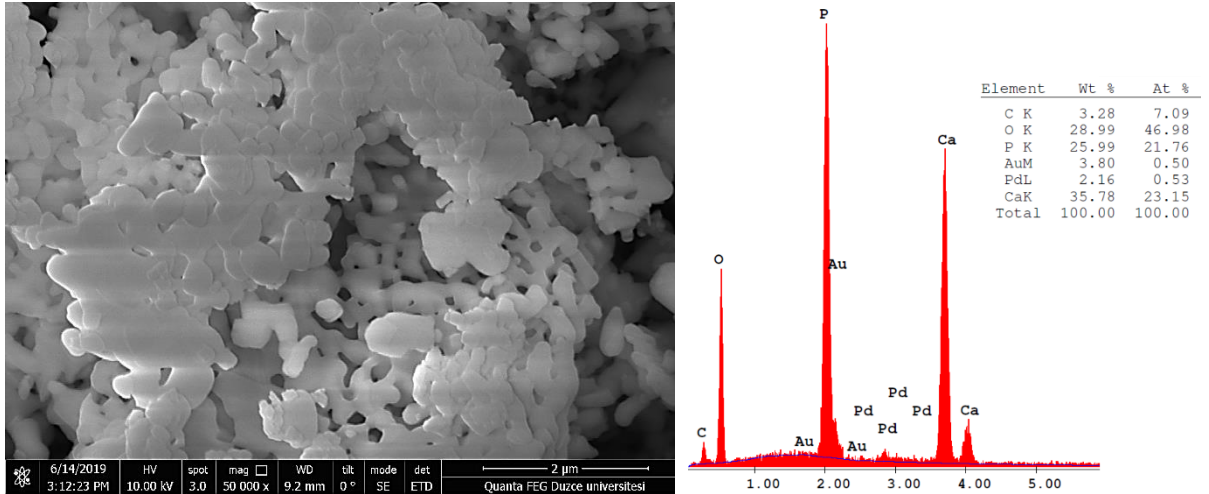


Şekil 3.2 Ag-Fe-Co tozlarının SEM ve EDS analizleri.

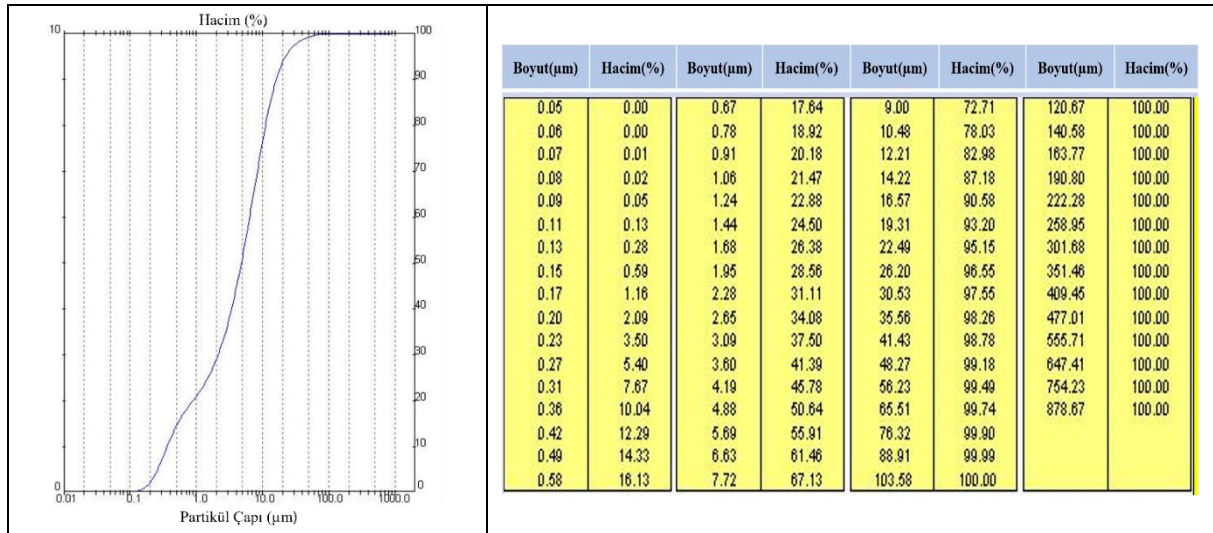
Çizelge 3.3 Ag-Fe-Co tozlarının ICP-MS analizi.

mg/kg	1
Ag	1.041
Co	21.135
Fe	44.346

Tozlar karıştırılmadan önce hacimce farklı oranlar ağırlıklarının yoğunluklarına bölünmesi ile elde edilmiştir. $V = \frac{m}{\rho}$ Hesaplamalarda ρ_{Ag} : 10.49 g/cm³, ρ_{HA} : 3.16 g/cm³ alınmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.3 CaP tozlarının SEM ve EDS analizleri.



Şekil 3.4 CaP tozlarının partikül boyut analizi.



Şekil 3.5 T/M ile elektrot üretmek için gereken toz ağırlık ölçümleri.

Hacimce %50 Ag-Fe-Co-%50 CaP; %65 Ag-Fe-Co-%35 CaP; %75 Ag-Fe-Co-%25 CaP ve %100 Ag-Fe-Co-%0 CaP oranında tozlar Fritsch-Pulvarisette-5 markalı bilyeli öğütme ile 300 d/dk. hızla, 1 saat süre ile karıştırılmıştır (Şekil 3.6). Karıştırma işlemi 10 dk. döndürme ve 2 dk. durdurma ile 6 periyotta toplam 72 dk. sürede yapılmıştır. Son periyotta bilyeli öğütme cihazı ters yönde döndürülmüştür. Ağırlıkça ½ toz-paslanmaz çelik bilye oranı kullanılmıştır. Preslenmeden önce 2 dk. kaşık yardımıyla manuel karıştırma yapılmıştır. Bilyeli öğütme cihazının firma kataloğundan alınan teknik özellikleri Çizelge 3.4’de verilmiştir.

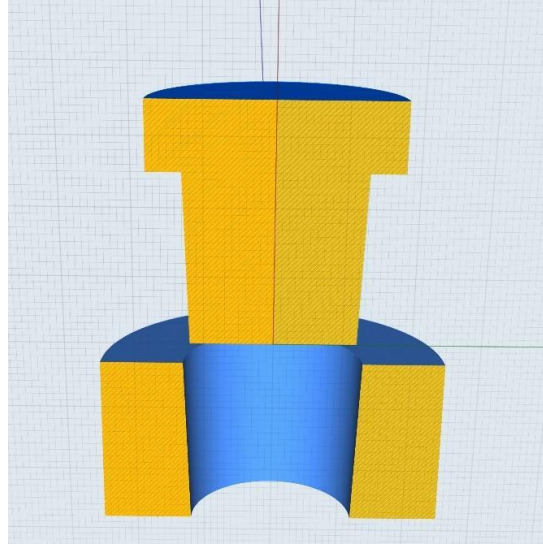


Şekil 3.6 Bilyeli öğütme cihazı.

Çizelge 3.4 Bilyeli öğütme cihazı teknik özellikleri.

Çalışma prensibi	Darbe etkili
Öğütme istasyonu sayısı	2
Öğütme araçları	Öğütme haznesi ve öğütme topları
Öğütme takımlarının malzemeleri	Akik, zirkonyum oksit, sertleştirilmiş paslanmaz çelik, sert metal tungsten karbür
Öğütme haznesi boyutları	125, 150, 250, 420, 500 ml
Bilye çapları	0.1 - 20 mm
Analitik inceliğe kadar tipik öğütme süresi	3 dk.
Öğütme haznelerinin max. dönme hızı	1600 d/dk.
Ana diskin dönme hızı	100-800 d/dk.
Santrifüj ivmesi ($g = 9.81 \text{ m / s}^2$)	64 g
Elektriksel değerler	200-240 V / 1 ~, 50-60 Hz, 2800 watt
Ağırlık	110 kg
Yükseklik x Genişlik x Derinlik	48 x 82 x 52 cm

T/M elektrot üretimi için iki parçalı özel konik kalıp tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan kalıp Zonguldak Merkez TTK Maden Fabrikaları Merkez Atölyesinde paslanmaz çelik malzemeden üretilmiştir. Üretilen elektrotların kalıptan daha kolay çıkması için kalıba yaklaşık 1-2° koniklik verilmiştir. Üretilen kalıbın teknik resmi ve görüntüsü Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7 T/M elektrot üretiminde kullanılan özel kalıp.

Tozlar kalıba dökülerek 12 mm çapında 10 mm yüksekliğinde silindirik elektrotlar hidrolik pres (Hidroliksan, HD20) ile 300 bar basınçta basılmıştır (Şekil 3.8). Kullanılan hidrolik presin firma katalog bilgileri Çizelge 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.8 Atölye tipi manuel hidrolik pres.

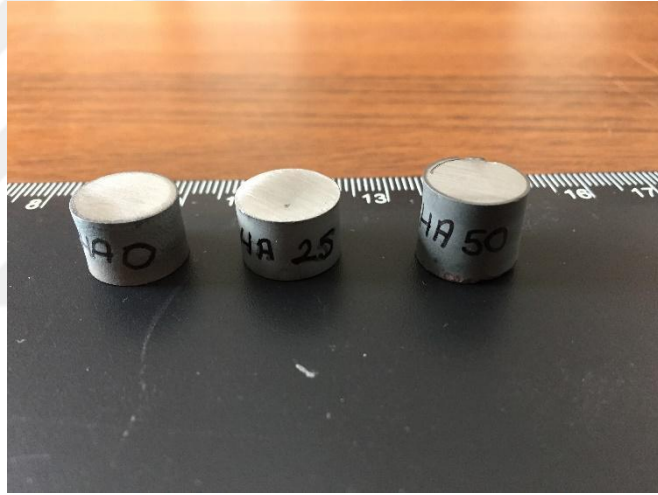
Çizelge 3.5 Atölye tipi manuel hidrolik pres teknik özellikleri.

Kapasite	20 ton
Çalışma ölçüsü	490 x 200
Strok	150 mm
İş alma yüksekliği	700 mm
Derinlik x Genişlik x Yükseklik	6700x8700x1900 mm
Ağırlık	200 kg

Preslenen elektrotlar Protherm marka fırında 8 °C/dk. ısınma hızıyla 900 °C'ye çıkarılmıştır (Şekil 3.9a). Bu sıcaklıkta 3 saat sinterlenmiş ve fırında soğumaya bırakılmıştır. Nihai elektrot görüntüsü Şekil 3.9b'de verilmiştir.



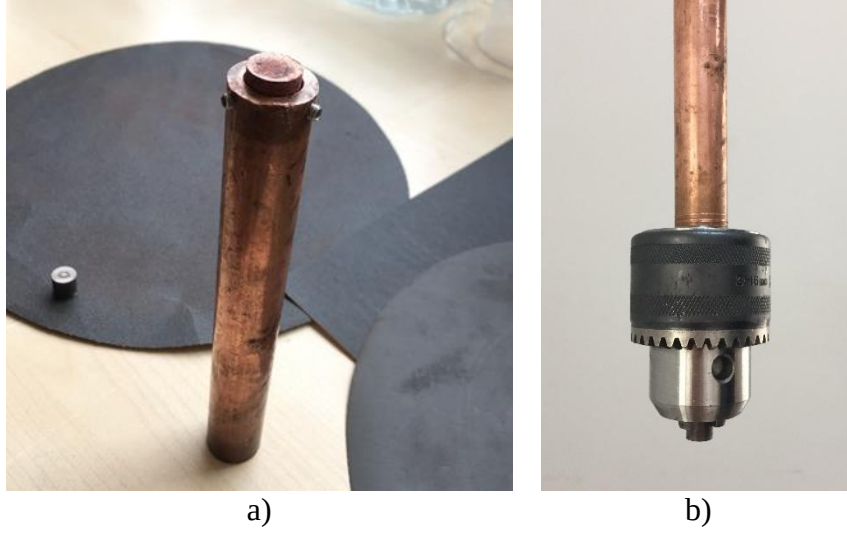
a)



b)

Şekil 3.9 T/M elektrot üretim aşamaları a) Sinterleme b) Nihai elektrot.

Üretilen kompozit elektrotlar bakır elektroda üç noktadan ayar vidaları ile sabitlenmiştir. Vidaların elektrot temas yüzeylerine tam oturmaması sonucu EKİ'de iş parçası ile takım elektrot arasında paralellik sağlanamamıştır (Şekil 3.10a). Daha sonra bakır elektroda dış açılarak mandrene vidalanmış ve mandren ağzı yardımıyla üretilen kompozit elektrotlar istenen paralellikte kolaylıkla tutturulmuştur (Şekil 3.10b).



Şekil 3.10 Elektrot bağlama şekilleri a) Ayar vidalı elektrot sabitleme, b) Mandrenle sabitleme.

Ajan EDM CNC 983 marka dalma tipi elektro erozyon cihazı ile iş parçası yüzeyinden 0.2 mm talaş kaldırılarak işleme yapılmıştır (Şekil 3.12a). Elektro erozyon cihazının firma kataloğundan alınan teknik özellikleri Çizelge 3.6’da verilmiştir. İşleme sırasında kullanılan deiyonize su NK marka su arıtma cihazından elde edilmiştir. Bu cihaz Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında mevcuttur (Şekil 3.11). Deiyonize suda toz kümelenmelerini ve kararsız işleme koşullarını önlemek amacıyla, dielektrik işleme havuzu Dragonlab marka mekanik karıştırıcı ile 1500 d/dk.’da karıştırılmıştır (Şekil 3.12b). Dielektrik sarfiyatını önlemek amacıyla polipropilen malzemeden (PP/5) yapılmış 3.5 lt hacimli silindirik kaplar işleme havuzu olarak kullanılmıştır.



Şekil 3.11 Su arıtma cihazı.

Çizelge 3.6 Dalma tipi erozyon tezgâhı teknik özellikleri.

ÇALIŞMA TABLASI	İş tablası ölçüleri	635x315 mm
	Maksimum iş parçası yüksekliği	250 mm
	Maksimum iş parçası ağırlığı	400 kg
	X ve Y eksenleri hareketi	420 x 270 mm
	T-Kanal sayısı ve genişliği	4 x 12 mm
	Maksimum iş-elektrot tablası açıklığı	460 mm
	Çalışma tankı boyutları	950 x 600 x 330
ÇALIŞMA BAŞLIĞI	Hareketli kolon kursu	250 mm
	Maksimum hareket hızı	600 mm/dk.
	Kafa yataklama kapasitesi	250 kg
	Maksimum elektrot ağırlığı	150 kg
	Elektriksel anma gücü	1.1 KVA
JENERATÖR	Ortalama elektrot akımı	50 A
	Maksimum anma gücü	4.5 KVA
	Darbe gerilimi	75 V
	Maksimum aşındırma hızı	600 mm ³ /dk.
	En pürüzsüz yüzey	0.5 µm
ÖLÇME SİSTEMİ	Derinlik durdurma hassasiyeti	±0.01 mm
	Vernier okuma ayrıntısı	0.05 mm
	Dijital okuma hassasiyeti	±0.01 mm



a)



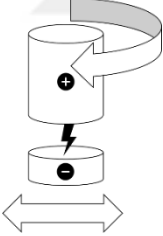
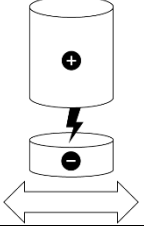
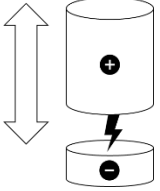
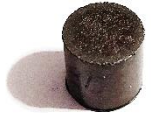
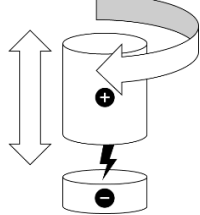
b)

Şekil 3.12 Deneysel sistem a) Genel görünüş b) İşleme havuzu.

3.2.3 Yöntem

Çeşitli hacim oranlarında oluşturulan kompozit elektrotlar ile çok sayıda ön deneyler yapılarak, uygun işleme parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Seri deneyler öncesi yapılan denemeler ve elde edilen gözlemler Çizelge 3.7’de özetlenmiştir. EKİ 6 μ s darbe süresinde B elektrodu kullanarak 7 A, 22 A, 42 A darbe akım seviyelerinde yüzeyler işlenmiştir. 22 A ve 42 A darbe akımları ile işleme yapıldığında aşırı ark oluşumu ve yüzey kalitesinde kötüleşme görülmüştür. Ayrıca 100 μ s darbe süresiyle yapılan işleme, yüksek oranda ark oluşumlarına neden olmuştur. Yapılan ön deneyler sonucunda, deneysel çalışmalar için 7 A darbe akımı sabit tutulmuş, darbe süreleri ise 6 μ s, 12 μ s, 25 μ s, 50 μ s ve 100 μ s olarak belirlenmiştir. Takım elektrot ile iş parçası arasında dalma ve dönme bağıl hareketi kullanılarak yüzeyler işlenmiştir. Farklı konsantrasyonlarda oluşturulan 4 farklı elektrotla toplam 17 adet deney yapılmıştır. Deneylerde kullanılan değişken işleme parametreleri Çizelge 3.8’de, sabit işleme parametreleri de Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.7 Parametre belirlemek için yapılan ön deneyler, Darbe süresi: 6 μ s, B Elektrodu.

Darbe Akımı	Bağıl Hareket	Gözlemler	Yüzey
7 A		Elektrot hızlı aşındı, iş parçası yüzeyi tam işlenmedi.	
7 A		Elektrot hızlı aşındı, iş parçası yüzeyi tam işlenmedi.	
7 A		Yüzeyler iyi işlendi, kenar bölge ile orta bölge arasında renk farkı oluştu. (Malzeme transferi homojen değil.)	
22 A		Bombeli yüzey oluşumu gözlemlendi, işleme sırasında aşırı ark oluştu.	

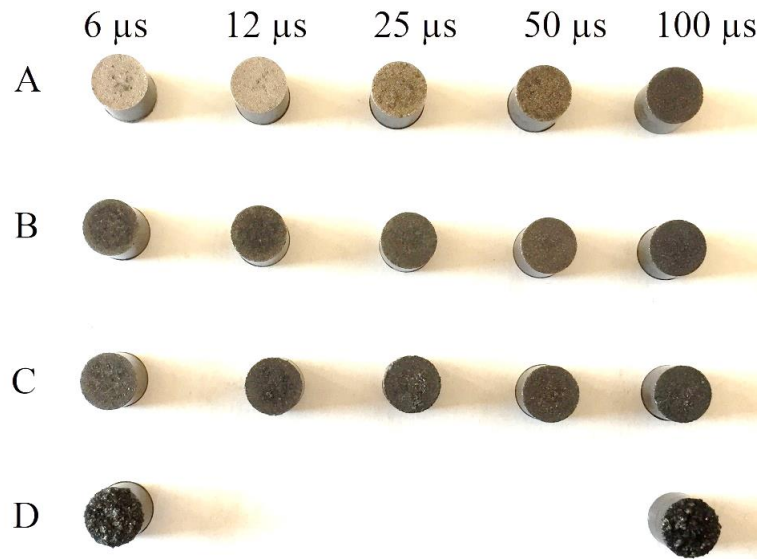
Çizelge 3.8 Deneylerde kullanılan işleme parametreleri.

Elektrot türü	Darbe akımı	Darbe süresi				
		6 μ s	12 μ s	25 μ s	50 μ s	100 μ s
%100 Ag-Fe-Co %0 CaP	7 A	A1	A2	A3	A4	A5
%75 Ag-Fe-Co %25 CaP	7 A	B1	B2	B3	B4	B5
%65 Ag-Fe-Co %35 CaP	7 A	C1	C2	C3	C4	C5
%50 Ag- Fe-Co %50 CaP	7 A	D1				D2

Çizelge 3.9 EKİ’de sabit parametreler.

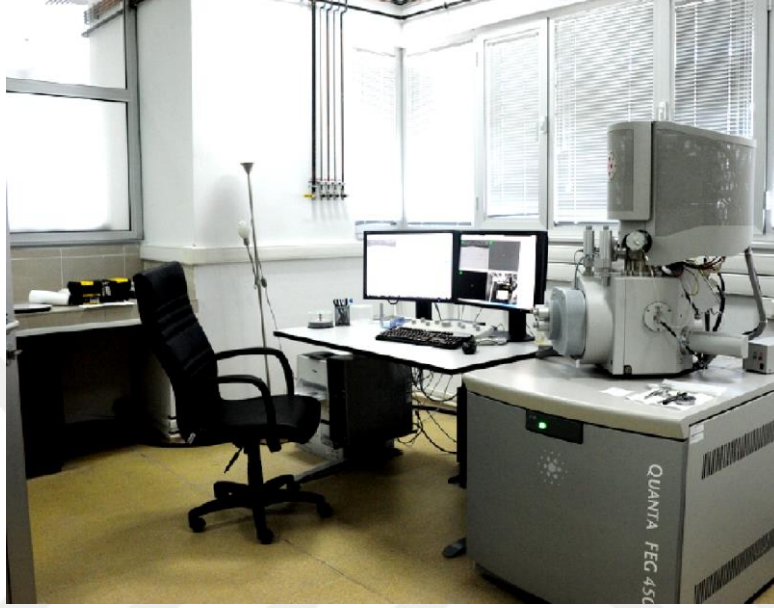
Dielektrik ortam	Deiyonize su
Elektrot kutbu	Pozitif kutuplama
İş parçası	Ti-6Al-4V
Karıştırma hızı	1500 d/d
Gap voltaj	100V

Farklı darbe sürelerinde, 7 A akım seviyesinde, değişik oranlarda CaP toz katkılı elektrotlar ile işlenen iş parçası yüzeylerinin makro fotoğrafı Şekil 3.13’de verilmiştir. Darbe süresi arttıkça iş parçası yüzeylerinin koyulaştığı görülmektedir.



Şekil 3.13 İşlenen parçaların görünüşleri.

İşlenen numunelerin yüzey topografyasının ve mikro yapısının incelenmesi Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (ARTMER) bünyesindeki Quanta 450 Field Emission Gun (FEG) SEM yüksek çözünürlüklü taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır. Ayrıca cihaza entegre X-Ray dedektörü ile yüzeyde oluşan farklı fazların kalitatif elementel analizleri (SEM-EDS) yapılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 Taramalı elektron mikroskobu.

EKİ ile elde edilen yüzeylerin BSED ve EDS analizleri incelenmiştir. Fazlar arası geçişleri değerlendirmek için, her bir elektrot tipi ile 6 μ s ve 100 μ s darbe süreleri ile işlenmiş 2 adet olmak üzere toplamda 8 adet numunenin XRD analizleri yapılmıştır. XRD kırınımları Cu K α (1.54056 Å dalga boyu) X ışını tüpü kullanılarak 10° ile 90° aralığında taranarak elde edilmiştir. Analizlerde Panalytical marka Empyrean model XRD cihazı kullanılmıştır ve 45 kV gerilim, 40 mA akım şiddeti ile X ışınları oluşturulmuştur (Şekil 3.15). Yüzeyde oluşan fazlar X'Pert HighScore Plus programı kullanılarak belirlenmiş ve sonuçlar Origin Pro programı ile düzenlenmiştir.



Şekil 3.15 XRD cihazı.

Kesit incelemeleri için numuneler Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında bulunan Metkon Micracut 201 markalı otomatik hassas kesme cihazı ile kesilmiştir (Şekil 3.16). Otomatik hassas kesme cihazının firma kataloğundan alınan teknik özellikleri Çizelge 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.16 Otomatik hassas kesme cihazı.

Çizelge 3.10 Otomatik hassas kesme cihazı teknik özellikleri.

Tekerlek çapı	Ø200 mm
Kesme kapasitesi	Ø75 mm, 40x150 mm
Konumlandırma aralığı, X-Y-Z eksen	25-165-45 mm
Kızak tabla boyutu	196x190 mm
Kızak boyutu	12 mm
Kesme gücü (S1)	0.75 kW
Kesme gücü (S3)	1 kW
Tekerlek hızı	500-5000 d/dk.
X eksen konumlandırma hassasiyeti	5 µm
Y eksen ilerleme hızı	20-1500 µ/s
Kesme yöntemi	Tabla beslemeli
Boyutları, Genişlik x Derinlik x Yükseklik	660x750x450 mm
Ağırlık	100 kg

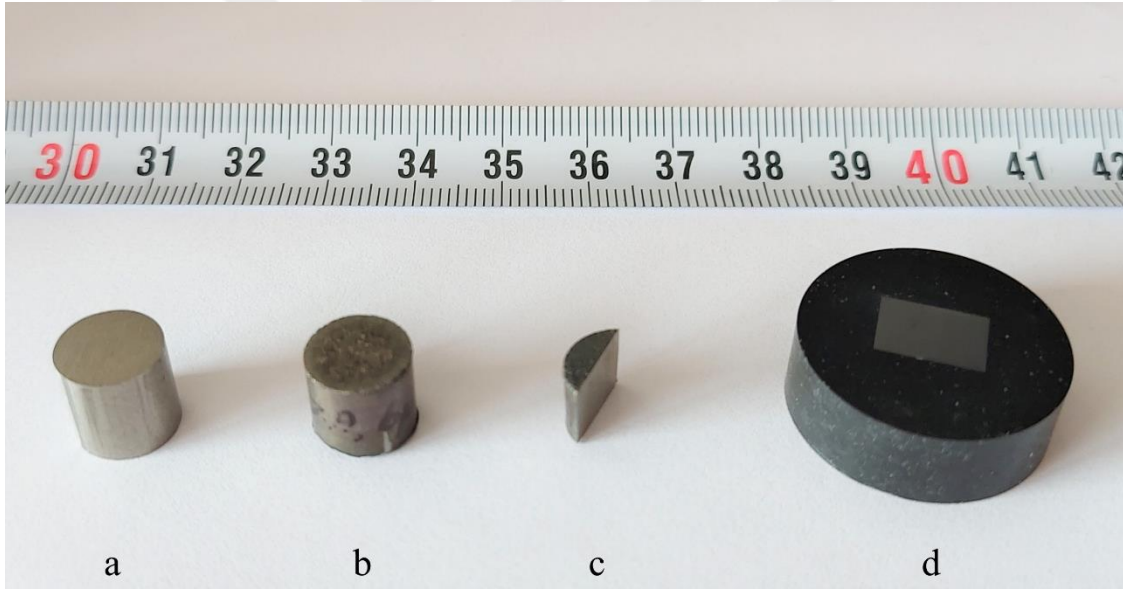
Kesiti alınan numuneler Metkon Ecopress-50 marka bakalit preste bakalite alınmıştır. Kalıplama için Metkon marka Epo sıcak kalıplama reçinesi kullanılmıştır (Şekil 3.17). 270 kg/cm² basınç ve 140 °C sıcaklıkta bakalite alınan numuneler 4 dk. süreyle bekletildikten sonra soğutulmuştur. Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında bulunan bakalit cihazı Şekil 3.18’de, bakalite alınan numunelerin görüntüleri ise Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.17 Sıcak kalıp reçinesi.



Şekil 3.18 Bakalit pres cihazı.



Şekil 3.19 Numune inceleme aşamaları a) İşlenmemiş numune b) İşlenmiş numune c) Kesiti alınmış numune d) Bakalite alınmış numune.

Kaliteli kesit görüntüleri alabilmek için yüzeye zımparalama ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Numune kesitleri sırasıyla 400-600-800-1000-1200-2000 mesh zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve 6 μm -1 μm elmas süspansiyonları ile parlatılmıştır. Zımparalama sırasında oluşan ısıyı ve aşınan partikülleri ortamdaki uzaklaştırmak için su kullanılmıştır. Metkon Forcipol 2V marka zımpara cihazı ile 200 d/dk. dönme hızı ile zımpara diskleri döndürülmüş ve Metkon Forcimat numune tutucu ile numunelere 5 N kuvvet uygulanmıştır. Parlatma sırasında çuhalar 100 d/dk. hız ile döndürülmüş ve numunelere minimum yük uygulanmıştır (Şekil 3.20).



Şekil 3.20 Zımparalama ve parlatma cihazı.

Parlatılan numunelerin yüzeylerinden mikro yapısal görüntü alabilmek için kimyasal dağlama işlemi uygulanmıştır. Tane sınırları kimyasal etkileşime daha duyarlıdır ve siyah çizgiler olarak gözükmürler. Farklı tanelerin kristalografik yönelimleri sayesinde kontrast yaratılır ve yüzeyin metalografik özellikleri incelenir. Bu işlemde metalografik incelemeler için numuneler Weck çözeltisi (5 gr amonyum biflorür +100 ml deiyonize su) içerisinde 10 sn süre ile bekletilmiştir. Leica marka optik mikroskopla kesitte 50-100-200 ve 500 büyütmede görüntüler alınmıştır (Şekil 3.21).



Şekil 3.21 Optik mikroskop.

Yapılan deneylerin çok yönlü yorumlanabilmesi için deneylerde kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri önem taşımaktadır. Çizelge 3.11’de deneylerde kullanılan malzemelerin temel fiziksel ve kimyasal özellikleri özetlenmiştir.

Çizelge 3.11 Deneylerde kullanılan malzemelerdeki elementlerin bazı özellikleri.

		Co	Ag	Cr	Fe	Al	Ti	V
Yoğunluk (g/cm³)	Katı haldeki	8.90	10.49	7.19	7.86	2.7	4.506	6
	Sıvı haldeki	7.75	9.32	6.3	6.98	2.375	-	5.5
Erime Noktası (°C)		1495	961.78	1907	1538	660.32	1668	1910
Kaynama Noktası (°C)		2927	2162	2671	2861	2470	3287	3407
Termal İletkenlik (W/mK)		100	429	93.9	80.4	237	22	31
Elektriksel İletkenlik (MS/m)		17	62	7.9	10	38	2.5	5
Elektriksel Direnç (nΩ·m)		62.4	15.87	125	96.1	26.5	420	197



BÖLÜM 4

BULGULAR

Bu bölümde yapılan seri deneyler ile edilen numunelerin detaylı incelemeleri verilmiştir. Ti-6Al-4V alaşımı farklı toz konsantrasyonlarında (%100 Ag-Fe-Co, %25 CaP-%75 Ag-Fe-Co, %35 CaP-%65 Ag-Fe-Co, %50CaP-%50 Ag-Fe-Co) hazırlanan takım elektrotlar ile 7 A darbe akımı kullanılarak 5 farklı darbe süresinde (6 μ s, 12 μ s, 25 μ s, 50 μ s, 100 μ s) EKİ yöntemiyle işlenmiştir. Toplamda 17 adet numunenin her biri için SEM, BSED, EDS ve XRD analizleri irdelenmiştir. Krater kenarları ve boyutları, çatlaklı ve çatlaksız bölge yoğunlukları, çatlak formları, eklentiler ve yoğunlukları, işlenen yüzeye malzeme transferi ve yüzey topografyası SEM-SE görüntüleri ile değerlendirilmiştir. Ayrıca yüzeyde oluşan fazların XRD analizleri, SEM-BSED ve EDS analizleri ile beraber değerlendirilerek doğrulanmıştır. Yüzey ve yüzey altı katmanları ve farklı fazları incelemek için daha önce anlatıldığı gibi hazırlanan numunelerin kesit fotoğrafları X50, X100, X200, X500 büyütmelemlerde alınarak, YKK, ısı etkilenmiş katman kalınlıkları ve mikro yapısal farklılıklar detaylandırılmıştır.

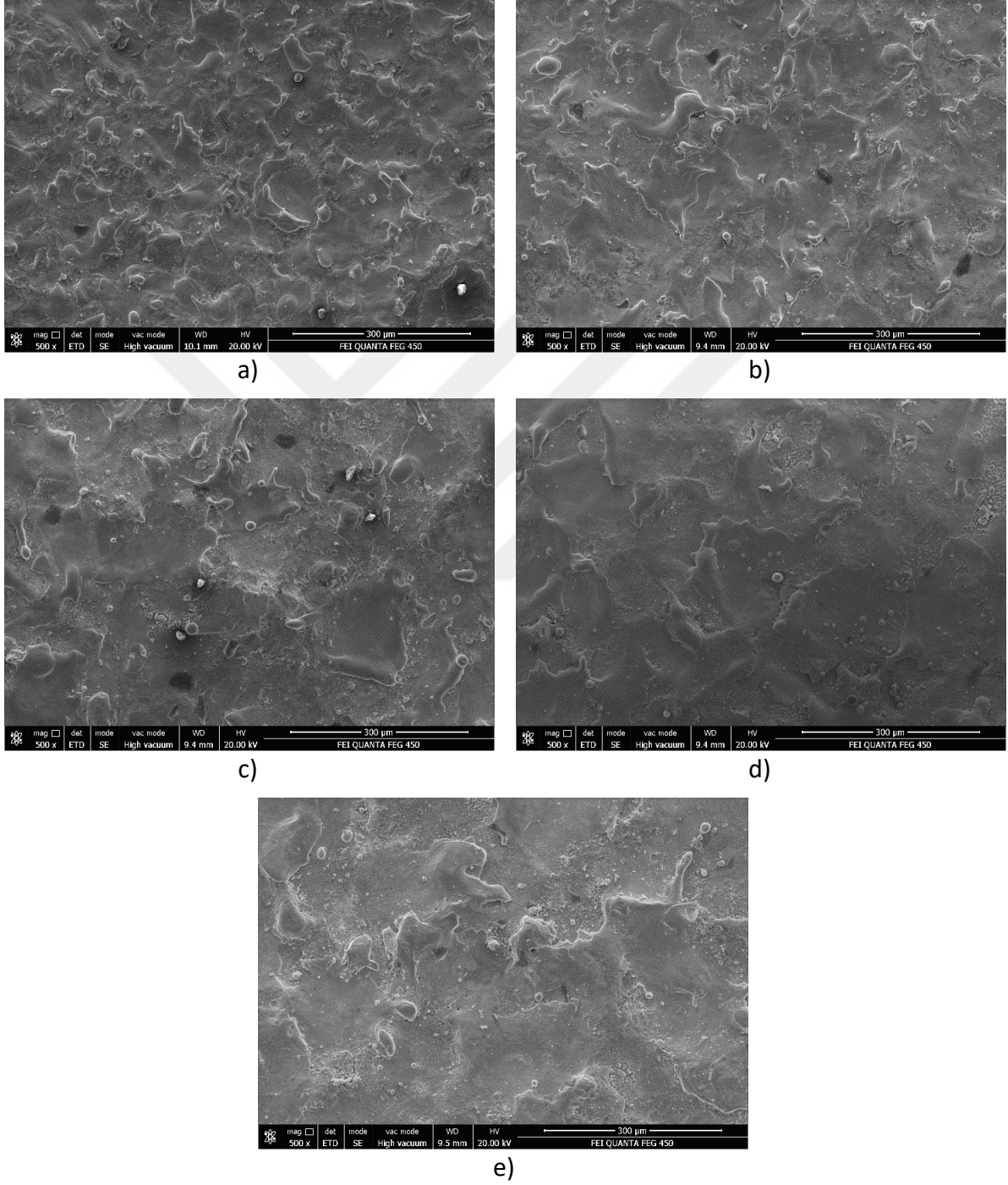
4.1 YÜZEY TOPOGRAFYASI

4.1.1 Elektrot A (%100 Ag-Fe-Co T/M)

A elektrodu için SEM fotoğrafları incelendiğinde EKİ'den beklenen ve bilinen yüzey morfolojileri ile benzer görünüm sergilemektedir. Darbe süresi sonunda deşarj kanalının kapanması basıncın aniden düşmesine neden olur. Küçük bir hacimde aşırı ısınan malzeme hızla ergir, kaynarak buharlaşmaya başlar. Ergiyik malzeme krater kenarlarında taşarak sırt oluşturur. Kaynama ile birlikte dielektrik sıvı içine püsküren malzemenin bir bölümü yüzeyden ayrılamadan damlacıklar halinde aniden katılaşır. Bu katılaşma genellikle küresel formda ve yüzeylerde oluşur. Ayrıca ardışık kıvılcımların etkisi sonucu yüzey üst üste binmiş kraterler görünümünü ortaya çıkarmaktadır. Krater çapları işleme sırasında kullanılan darbe süresinin artışıyla büyümektedir. Kraterlerin kenarlarında küçük bölgeli çatlak ağlarıyla örülü yapılar

görülmektedir. Bu yapılar düşük darbe sürelerinde işleme yapıldığında daha az görülürken 25 μ s ve 100 μ s darbe süresinde en yoğun seviyeye ulaşmaktadır.

50 μ s darbe süresinde işleme yapıldığında çatlaklı yapıların krater kenarlarına uzanan YKK'nin altlarında kaldığı görülmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Elektrot A SEM-SE görüntüleri, darbe süresi a) 6, b) 12, c) 25, d) 50, e) 100 μ s (500X).

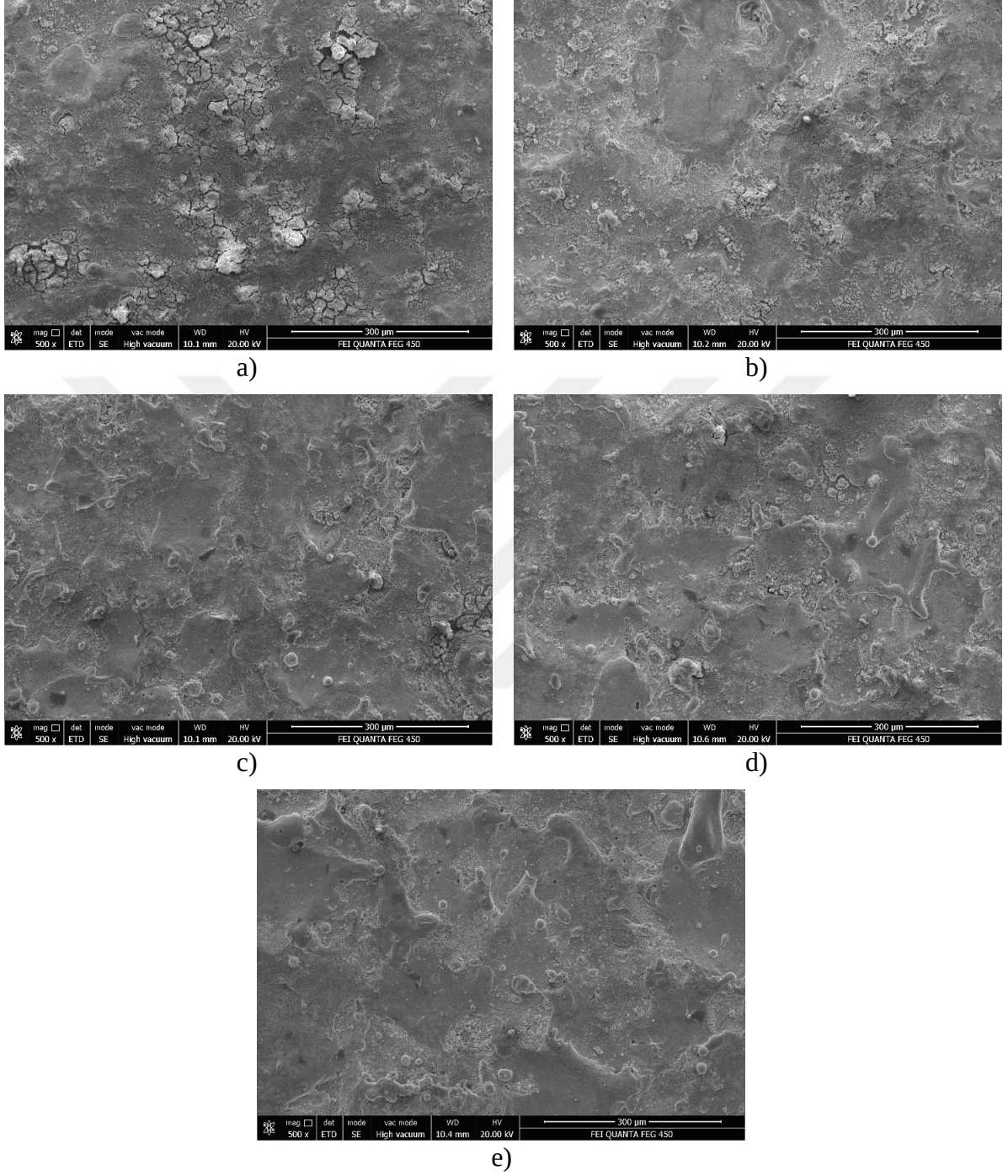
4.1.2 Elektrot B (%75 Ag-Fe-Co -%25 CaP T/M)

B elektrodu kullanılarak 6 µs darbe süresinde işleme yapıldığında yüzeyde çatlaklı bölgelerin yoğunluğu en yüksek seviyeye ulaşmıştır. Çatlaklı ve çatlaksız bölgeler iç içe geçmiş yapıdadır. Krater kenarları A elektroduna göre belirginliğini yitirmiştir ve EKİ yüzeylerine benzemeyen görünümündedir. Darbe süresi 12 µs'ye çıktığında, çatlaklı yapılar yüzeyde mevcuttur ancak yoğunluğu daha düşük seviyededir. 12 µs darbe süresinde yüzeyde 50 ve 100 µs darbe süresiyle işlemeye göre çok daha büyük çapta krater oluşumları görülmektedir. Bu durum kıvılcım kümelenmelerine ve kararsız işleme koşullarına işaret etmektedir. 6 µs ve 12 µs darbe süresinde işleme yapıldığında krater kenarları belirgin değildir. Ancak 25 µs, 50 µs ve 100 µs darbe sürelerinde işleme yapıldığında krater kenar belirginliği darbe süresiyle artmıştır. İşlenen yüzeylerde oluşan kraterlerin çapları genel olarak birbirlerine yakın büyüklüktedir. Ayrıca darbe süresinin artmasıyla yüzeyde oluşan küresel eklentilerin yoğunluğu da artmaktadır. 6 µs hariç diğer darbe sürelerinde işlenmiş yüzeylerde, krater kenar yapıları daha baskın olmakla birlikte gözenekli oluşumlar görülmektedir. Gözeneklilik 100 µs darbe süresi ile işleme yapıldığında en yüksek seviyededir. 25 µs, 50 µs ve 100 µs darbe süresi ile işlendiğinde çatlaklı yapılar genellikle üst üste binmiş kraterlerin aralarında yer almıştır (Şekil 4.2).

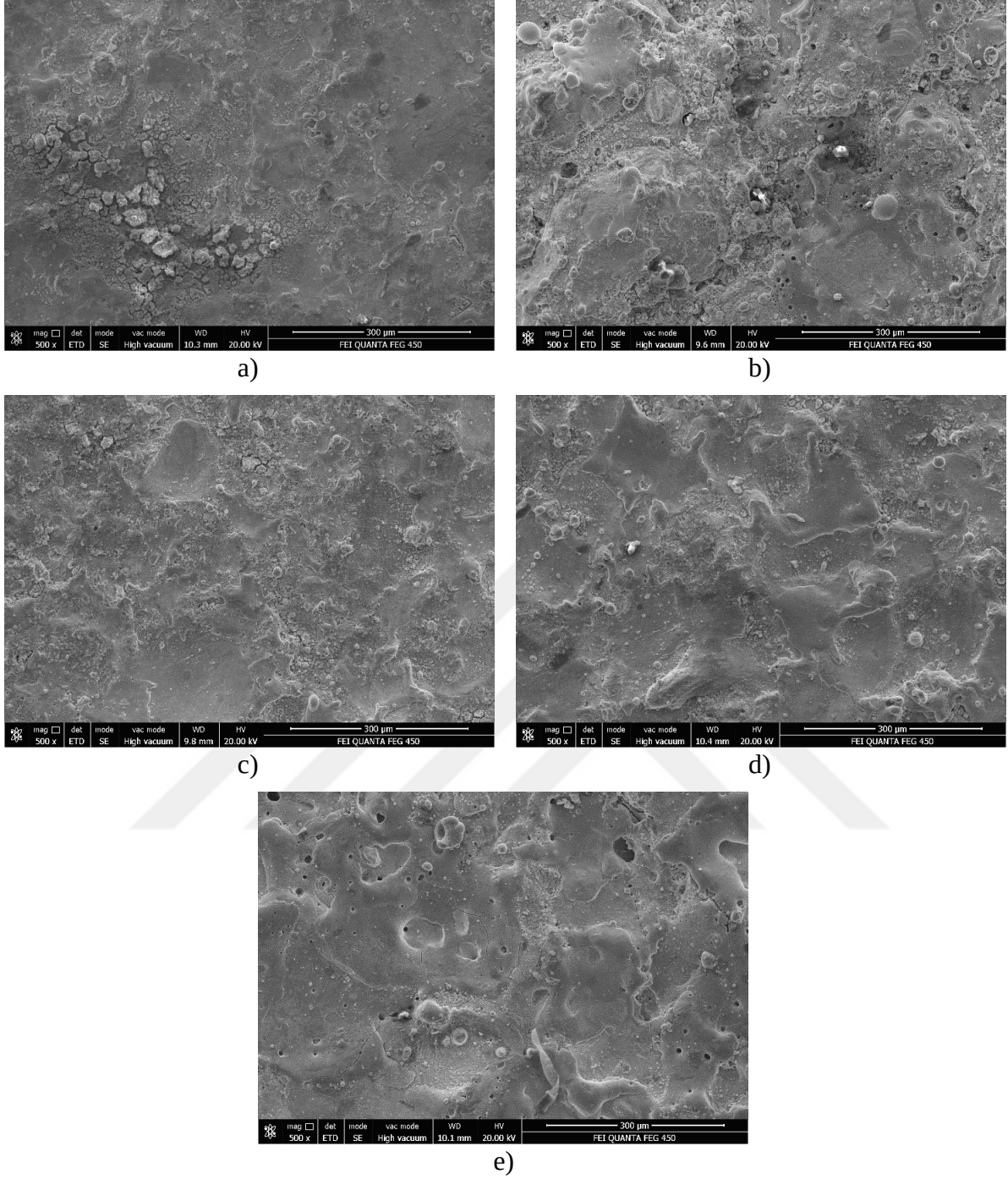
4.1.3 Elektrot C (%65 Ag-Fe-Co -%35CaP T/M)

C takım elektrodu kullanarak 6 µs darbe süresinde işleme yapıldığında, iş parçası yüzeylerinde çatlak ağlarıyla örülü yapılar yoğun bir şekilde görülmektedir. Bu yüzey görünümü B elektrodu 6 µs ve 12 µs darbe süresinde işlemeyle oluşan yüzeylerle benzerdir. 12 µs darbe süresi ile işlenmiş yüzeylerde yoğun gözenekler kaba görünümlü bir yapı sergilerken krater oluşumları belirgin değildir. Küresel eklentiler yüzeyin tamamına dağılmıştır ve nano boyuttan mikro boyuta geniş aralıklarda farklılaşmaktadır. 25 µs darbe süresi ile işleme yapıldığında yüzeyler, 6 µs darbe süresinde işleme kadar yoğun olmamakla birlikte, çatlak ağlarıyla örülü yapılar içermektedir. Gözeneklilik 6 µs ile işlenmiş yüzeylerle aynıdır. 50 µs darbe süresiyle işlemede ise üst üste binmiş kraterler arasında çatlak ağlarıyla örülmüş yapılar yüzeylerde gözlemlenmiştir. Düşük darbe süreleri kullanımına göre çatlak ağlarıyla örülü yapılar daha az yoğunluktadır. Yüzeyler 100 µs ile işlendiğinde ise çatlak ağlarıyla örülü yapılar krater kenarlarında oluşmaktadır ve yoğunluğu tüm darbe süreleri içinde en düşük seviyededir. Gözeneklilik ise 12 µs darbe süresi ile işlemeye göre en yüksek seviyededir. Ayrıca 25 µs ve

daha yüksek darbe sürelerinde krater kenarları belirginleşmiştir. Krater içlerinde sınırları keskin hatlarla belirginleşen şekilsiz formlarda oluşumlar görülmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.2 Elektrot B SEM-SE görüntüleri, darbe süresi a) 6, b) 12, c) 25, d) 50, e) 100 μs (500X).

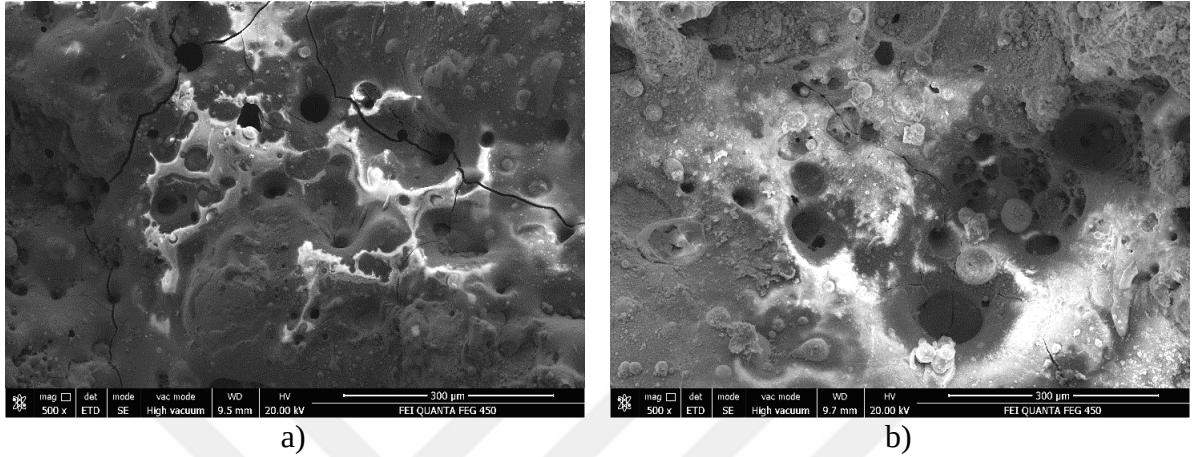


Şekil 4.3 Elektrot C SEM-SE görüntüleri, darbe süresi a) 6, b) 12, c) 25, d) 50, e) 100 μ s (500X).

4.1.4 Elektrot D (%50 Ag-Fe-Co -%50 CaP T/M)

D takım elektrodu kullanılarak 6 μ s darbe süresinde işlenmiş yüzeylerde iç içe geçmiş gözenekli yapılar ve etrafında oluşan çatlaklar fark edilmektedir. Gözeneklerin bazıları küresel eklentilerle kapanmıştır. Gözeneklilik boyutları geniş aralıkta (nano boyut ile 20-30 μ m) farklılaşmaktadır. Gözenekli formda oluşan yüzey topografyası kemik dokusu ile benzerlik

göstermektedir. 100 μ s darbe süresinde işleme, 6 μ s darbe süresinde işlemeye göre gözeneklilik kaba bir görünüm sergilemektedir. Küresel eklentiler 6 μ s deki darbe süresiyle işlenmiş yüzeylere benzer biçimde geniş aralıkta boyutlara sahiptir. Ayrıca çatlak genişliği 6 μ s darbe süresinde işlemeye göre daha incedir (Şekil 4.4).



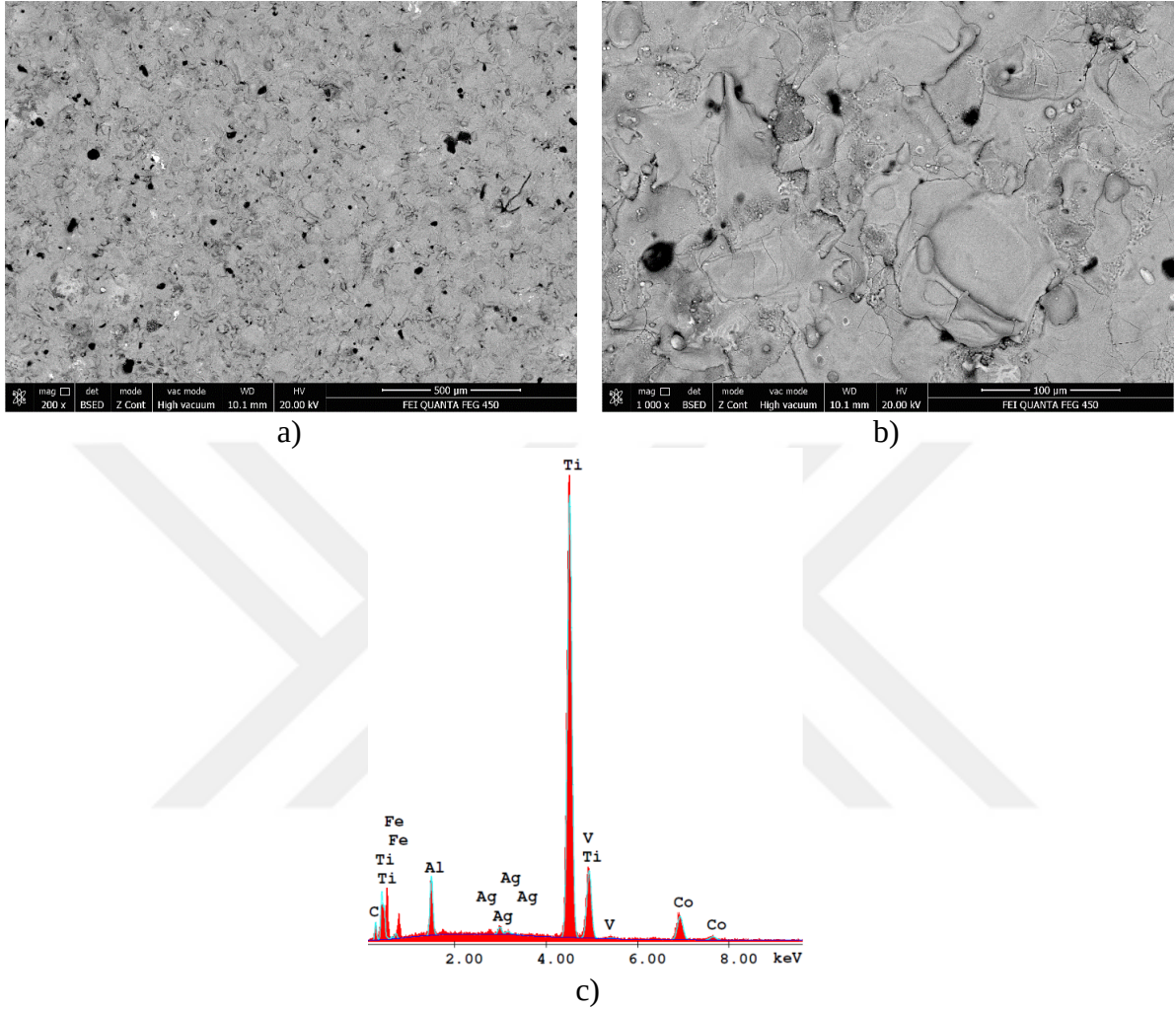
Şekil 4.4 Elektrot D SEM-SE görüntüleri, darbe süresi a) 6, b) 100 μ s (500X).

4.2 GERİ SAÇILMIŞ ELEKTRON GÖRÜNTÜSÜ VE ALANSAL ENERJİ DAĞILIM ANALİZİ

4.2.1 Elektrot A (%100 Ag-Fe-Co T/M) BSED

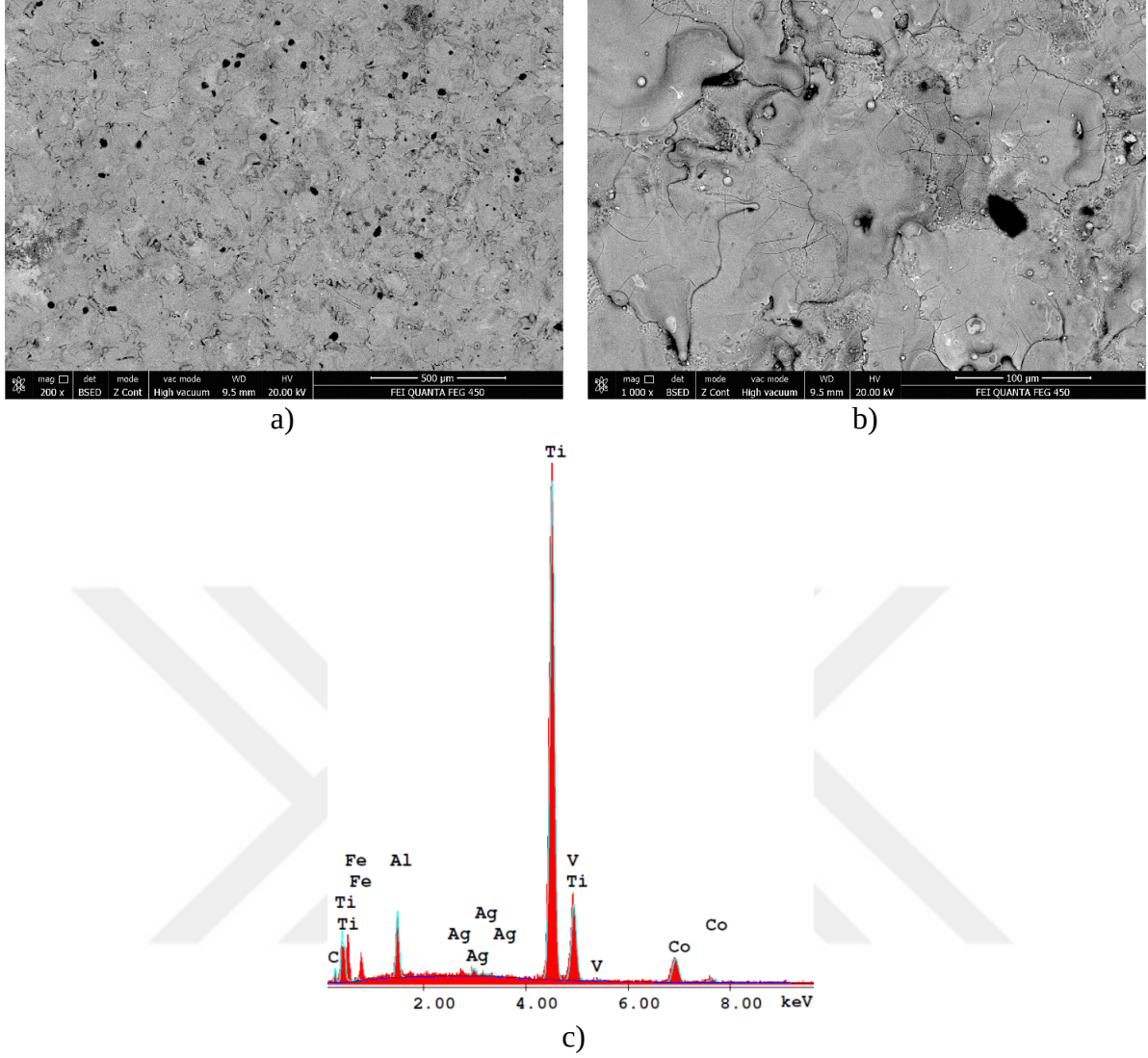
%100 Ag-Fe-Co sinterlenmiş takım elektrotla, 6 μ s darbe süresinde işleme yapıldığında yüzeylerde farklı fazlara ait olduğu düşünülen siyah renkli gözenekler görülmektedir. Farklı boyutlara sahip siyah şekilsiz yapılar yüzeyde homojen olarak dağılmıştır. Krater kenarlarında koyu gri yapılar daha yüksek büyütmelemlerde az da olsa fark edilebilmektedir. Ayrıca krater kenarlarında nano boyutta parlak beyaz küresel formda oluşumlar kendini göstermektedir. Üst üste binmiş kraterler ve içinde farklı yönlerde sıçramış kenar eklentileri yüzeylerin ana görünümünü sergilemektedir. Geri saçılmış elektron görüntüsünde çatlaklar daha belirgin görülmektedir. Genellikle krater kenarlarından içlerine doğru radyal yönde uzanmış çatlak ağları şeklindedir. Daha önce bahsedildiği gibi, bu tür çatlak yapıları ana faz malzemeye nüfuz etmeyen dönüşümsel gerilmeler kaynaklıdır. Krater kenarlarında nano gözeneklilik mevcuttur. Enerji dağılım analizlerinden ana malzemeye ait olan Ti, Al ve V dışında Fe, Co elementleri yüzeyde bulunmuştur. Ek olarak az da olsa Ag izleri enerji dağılım analizinde gözlemlenmektedir. V elementi yüzeyde neredeyse kaybolmuştur. Fe, Co ve Ag elementlerinin

işlenmiş yüzeyde varlığı, takım elektrottan iş parçasına malzeme transferinin gerçekleştiğini ortaya koymaktadır (Şekil 4.5).



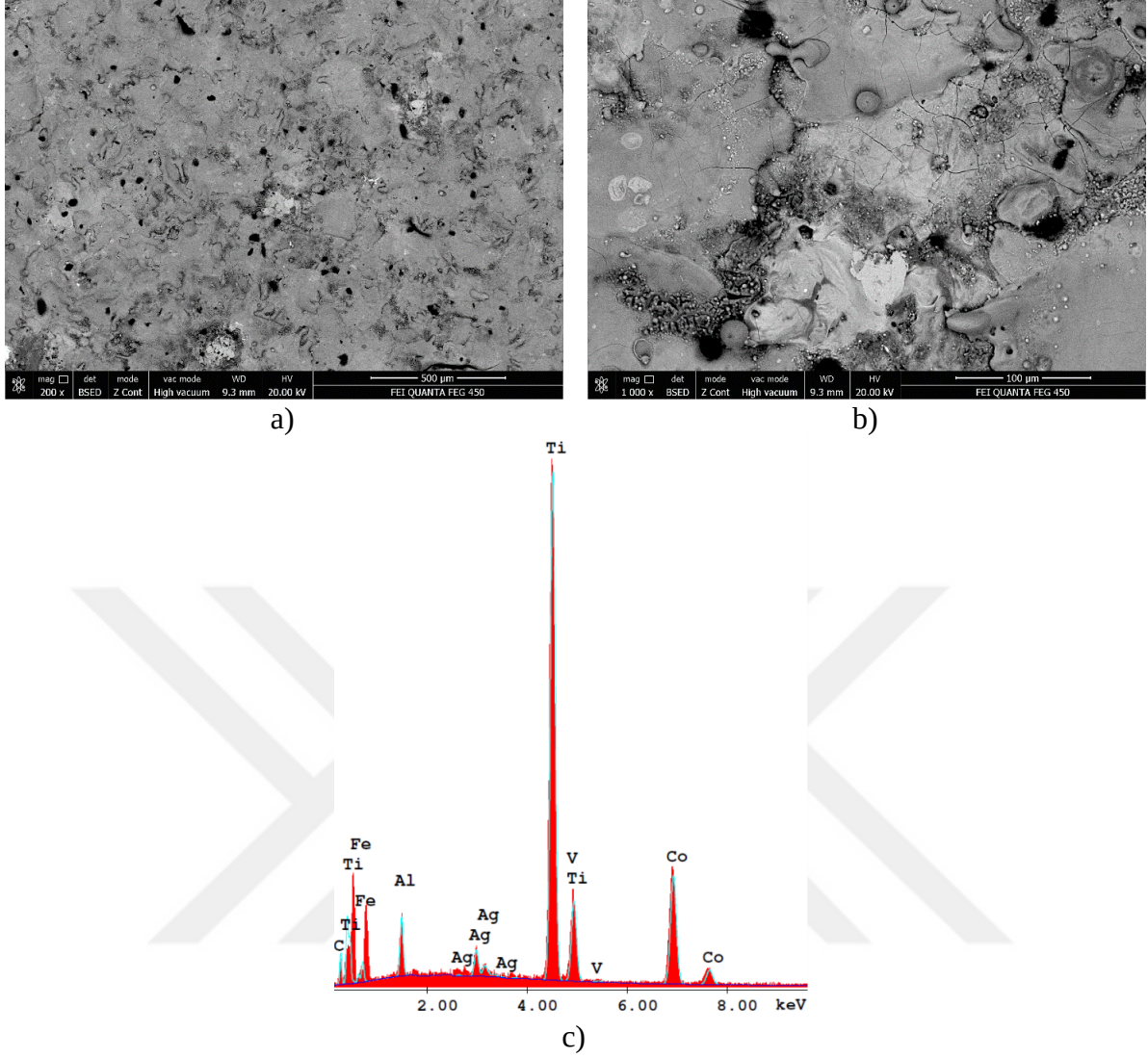
Şekil 4.5 Elektrot A SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 6 µs) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

12 µs darbe süresi ile işlenen numunelerin geri saçılmış elektron görüntüsü 6 µs darbe süresi ile işlenen yüzeylere benzerlik göstermektedir. Mikro çatlaklar az da olsa daha yoğun ve nispeten çatlak genişlikleri daha kalındır. Farklı yönde saçılarak sırt yapmış ve üst üste binmiş krater kenarlarının aralarında koyu gri renkte gözenek içeren bölgeler görülmektedir. Takım elektrot malzeme transferi ve yüzeydeki yapılar 6 µs darbe süresiyle işlemeye göre fark edilebilir bir değişiklik göstermemiştir (Şekil 4.6).



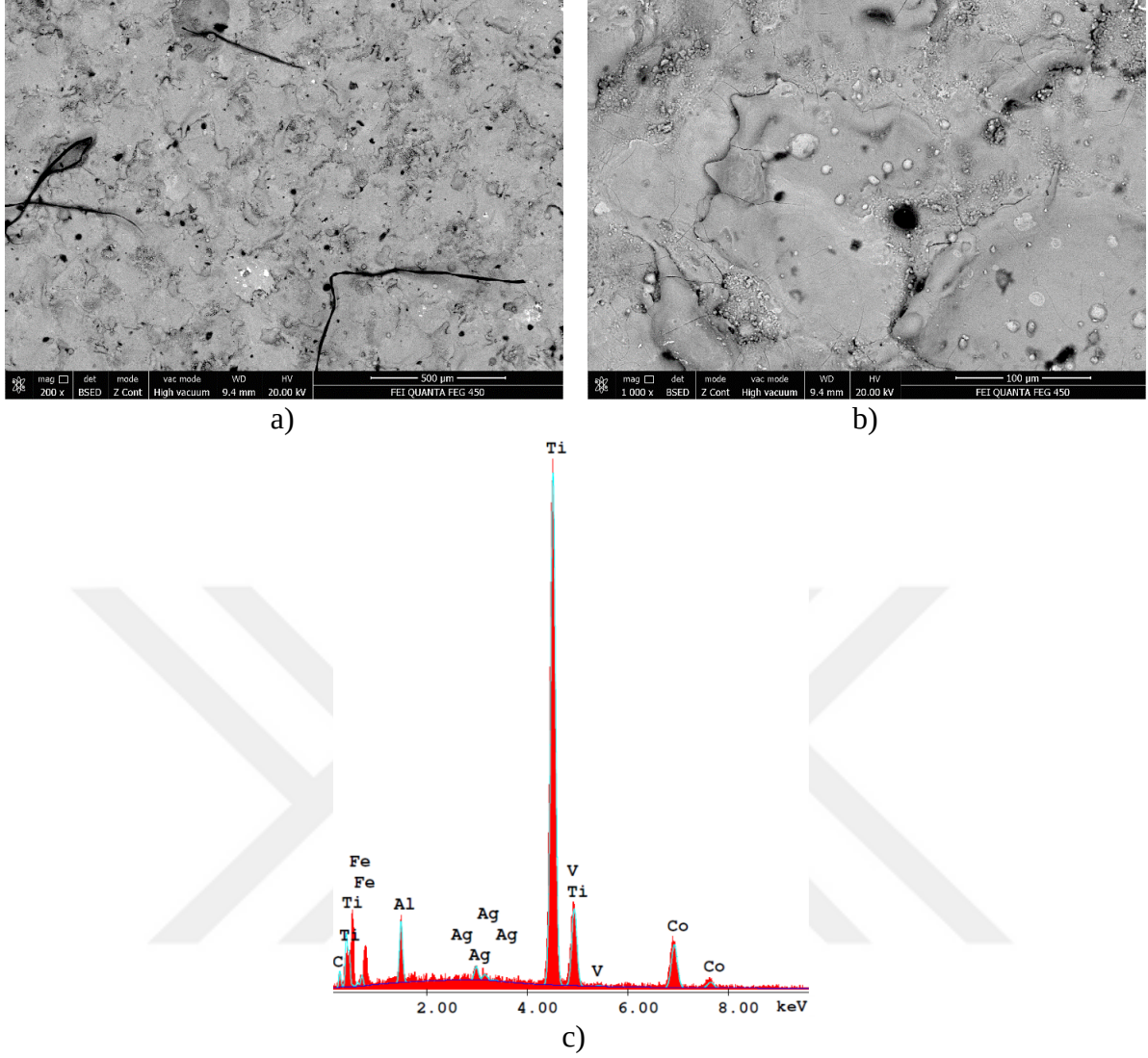
Şekil 4.6 Elektrot A SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 12 μ s) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

İş parçası 25 μ s darbe süresi ile işlendiğinde ise bazı bölgelerde beyaz yapı oluşumları görülmektedir (Şekil 4.7a). Detaylı incelemede beyaz bölge kenarlarında çatlak ağlarıyla örülü üstlerinde nano boyutta küresel damlacıklar bulunan koyu gri görünümlü yapılar tespit edilmiştir. Çatlak ağlarıyla örülü yapılar farklı yönlere saçılmış YKK kenarlarında bulunmaktadır. Çatlak ağlarıyla örülü koyu gri yapılar, 6 μ s ve 12 μ s darbe süresi ile işlemeye göre yüzeyde yoğundur. Takım elektrottan iş parçası yüzeyine malzeme transferinin arttığı EDS analizinden kanıtlanmıştır. İşlenmiş yüzeyde Fe, Co ve Ag en yüksek seviyededir. 25 μ s darbe süresi ile işlenmiş yüzeylerde çatlak oluşumları 12 μ s darbe süresi ile işlenmiş yüzeylerle benzerlik göstermektedir. Ti ana faz malzemesi büyük küresel eklentilerin yüksek büyütmedeki görüntülerinde görülebilmektedir (Şekil 4.7b).



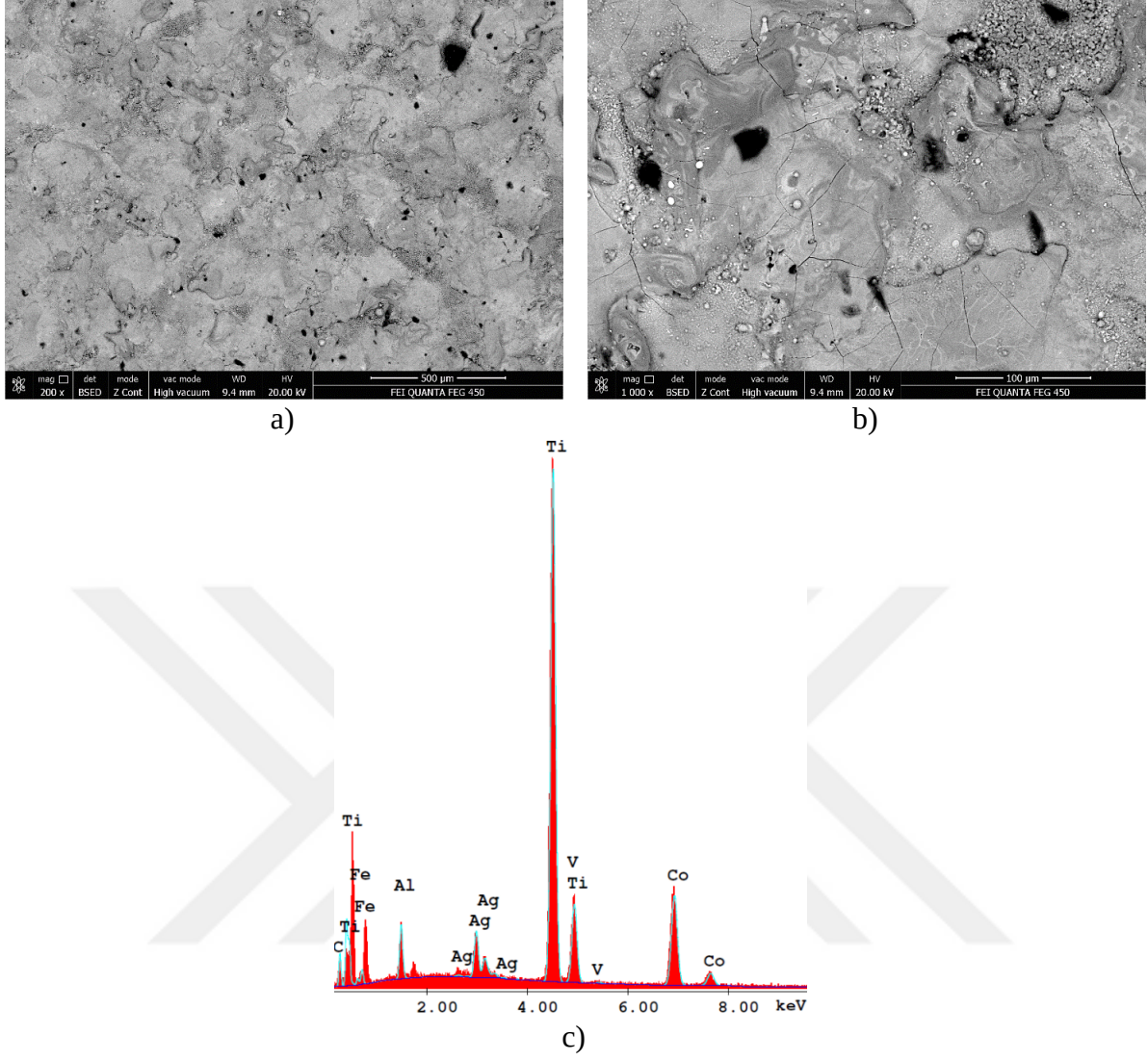
Şekil 4.7 Elektrot A SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 25 μ s) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

EKİ sırasında darbe süresi 50 μ s'ye çıkarıldığında çatlaklı koyu gri yapılar azalmış ve krater kenarlarında yoğunlaşmıştır. Çatlak yoğunluğu 6 μ s darbe süresinde işlenmiş yüzeylere benzer biçimde daha azdır. Dikkat çeken bir diğer nokta ise krater içlerinde ana faz malzemeden farklı renkte (açık gri) görülen küresel veya küresele yakın şekillerdeki eklentilerdir (Şekil 4.8). Ayrıca çatlak ağlarıyla örülü yapılar, yer yer koyu gri yer yer ise açık gri tonda gözlemlenmiştir. Bu yapıların genellikle sırt yapmış ve üst üste binmiş krater kenarlarının bitişinde görülmesi dikkat çekicidir. 50 μ s darbe süresi ile işlemeye göre yüzeye malzeme transferi daha az miktarda olmaktadır (Şekil 4.8c).



Şekil 4.8 Elektrot A SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 50 μ s) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

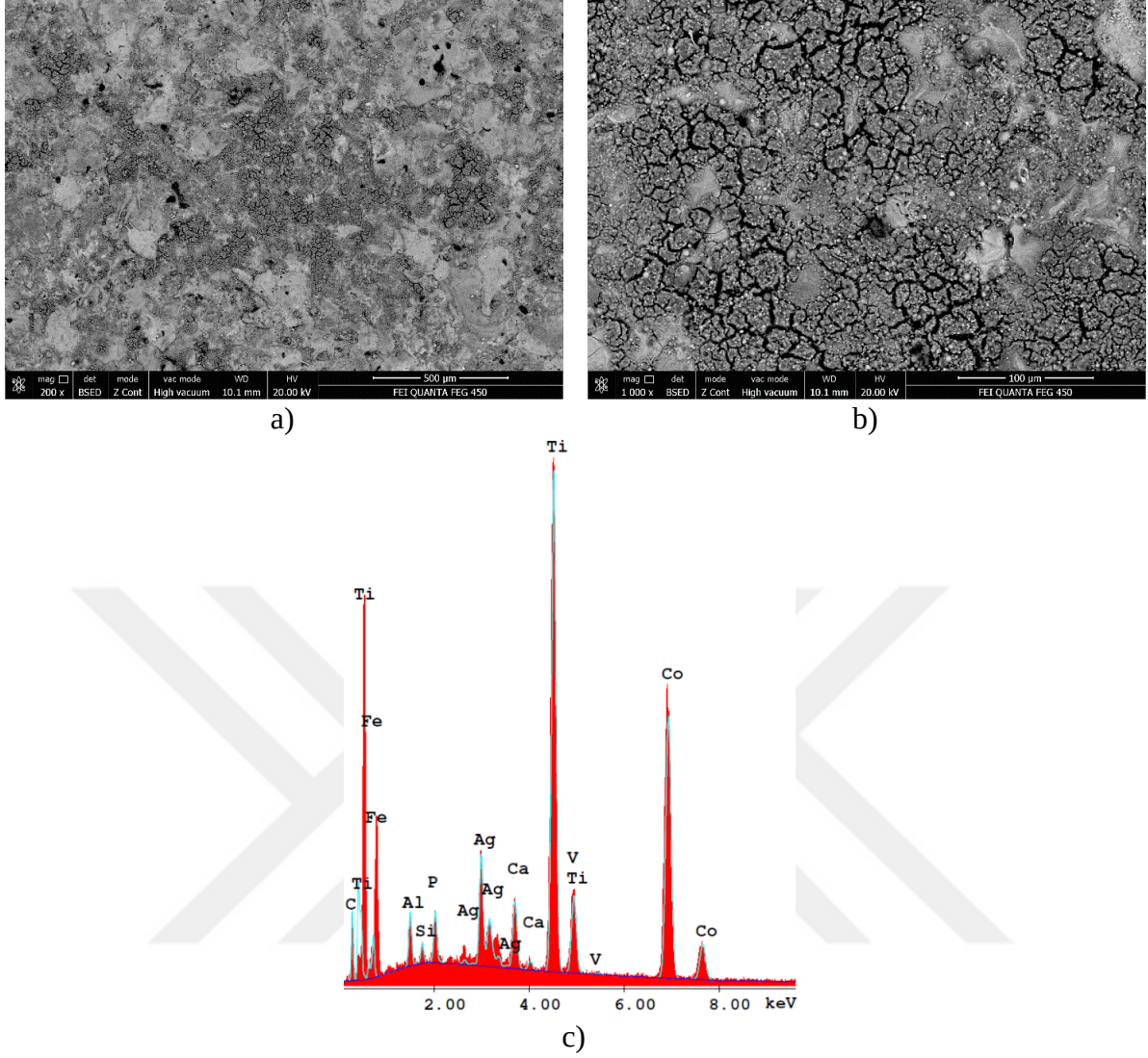
100 μ s darbe süresi ile işleme yapıldığında ise 50 μ s darbe süresi ile işlemeye göre yüzeyde çatlak ağlarının yoğunluğu artarak 25 μ s darbe süresinde işlemeye benzer bir görünüm sergilemiştir. EDS analizlerinden 25 μ s darbe süresi ile işlemeye birlikte yüzeye en yüksek malzeme transferi 100 μ s darbe süresinde tespit edilmiştir. Yüzeylerde en yüksek Ag miktarı 100 μ s darbe süresinde bulunmuştur. Krater kenarlarında yer alan çatlaklı bölgelerin daha geniş alan kaplaması ve krater içlerine doğru yayılması bu darbe süresinde görülmektedir. Ancak ardışık kıvılcımların etkisi ile oluşan üst üste binen kraterler mikro çatlakların krater boyunca yayılmasını kısıtlamıştır. Krater içlerinde dallanmış şekilde açık gri bölgelerle birlikte iç içe geçmiş açık ve koyu gri bölgeler gözlemlenmektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Elektrot A SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 100 µs) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

4.2.2 Elektrot B (%25CaP-%75 Ag-Fe-Co)

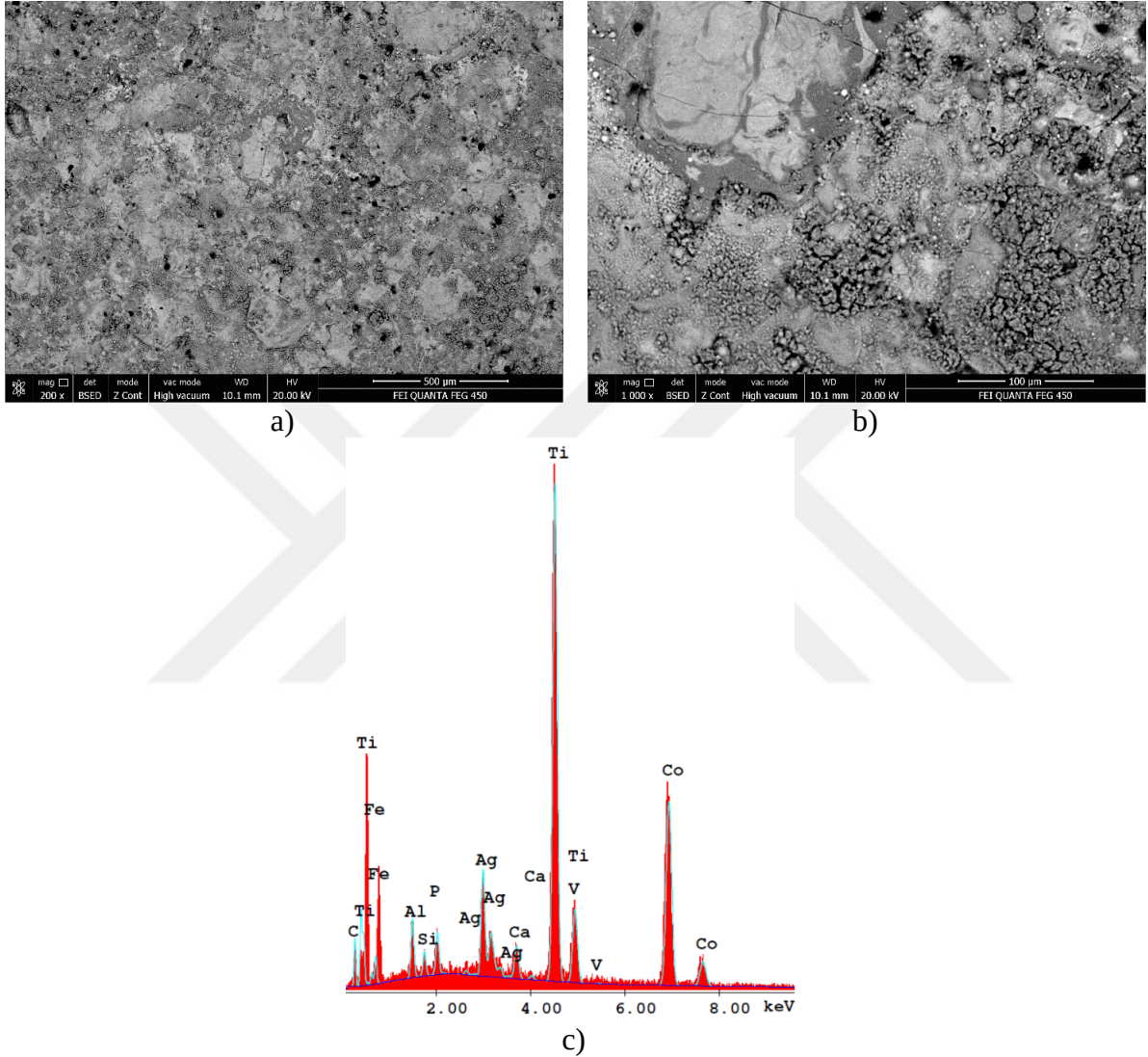
6 µs darbe süresinde Ag-Fe-Co matrisine Ca-P ilavesi ile sinterlenen takım elektrotlar EKİ’de kullanıldığında işlenmiş yüzeylerin görünümü farklılaşmaktadır. Çatlak ağlarıyla örülü yapılar yüzeyde baskın görünümü sergilemektedir. İş parçası yüzeyine takım elektrottan malzeme transferi de yüksek seviyededir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Elektrot B SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 6 µs) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

Benzer biçimde darbe süresi 12 µs'ye çıkarıldığında da yoğun çatlak ağlarıyla yapılı yüzeyler görülmektedir (Şekil 4.11). Ancak 6 µs darbe süresi ile işlemeye ile karşılaştırıldığında koyu gri renkte oluşan yapıların yer yer açık gri görünümü sergiledikleri fark edilmektedir. Koyu gri bölgelerde çatlaklar arasında daha büyük parçalar yer almaktadır. Açık gri bölgelerde ise parçalar çok daha küçüktür. Yüzeyin genel görüntüsünde yer yer büyük adacıklar şeklinde krater benzeri bölgeler görülmektedir. Bu bölgelerin kenarları genellikle çatlaksız koyu gri yapıda, içleri ise daha açık tonda görülmektedir. İkincil elektron fotoğrafları ile beraber topografik ve mikro yapı incelemeleri, bölgelerin birden fazla kraterin iç içe bulunduğu düzlükler olduğunu ortaya koymaktadır. Genellikle krater kenarlarında oluşan çatlaksız koyu gri bölgeler küçük krater kenarlarını betimlemektedir. Büyük kraterler etrafında genellikle koyu ve açık gri fazlar arasında yer alan bölgede dallanmış çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlaklı yapılar

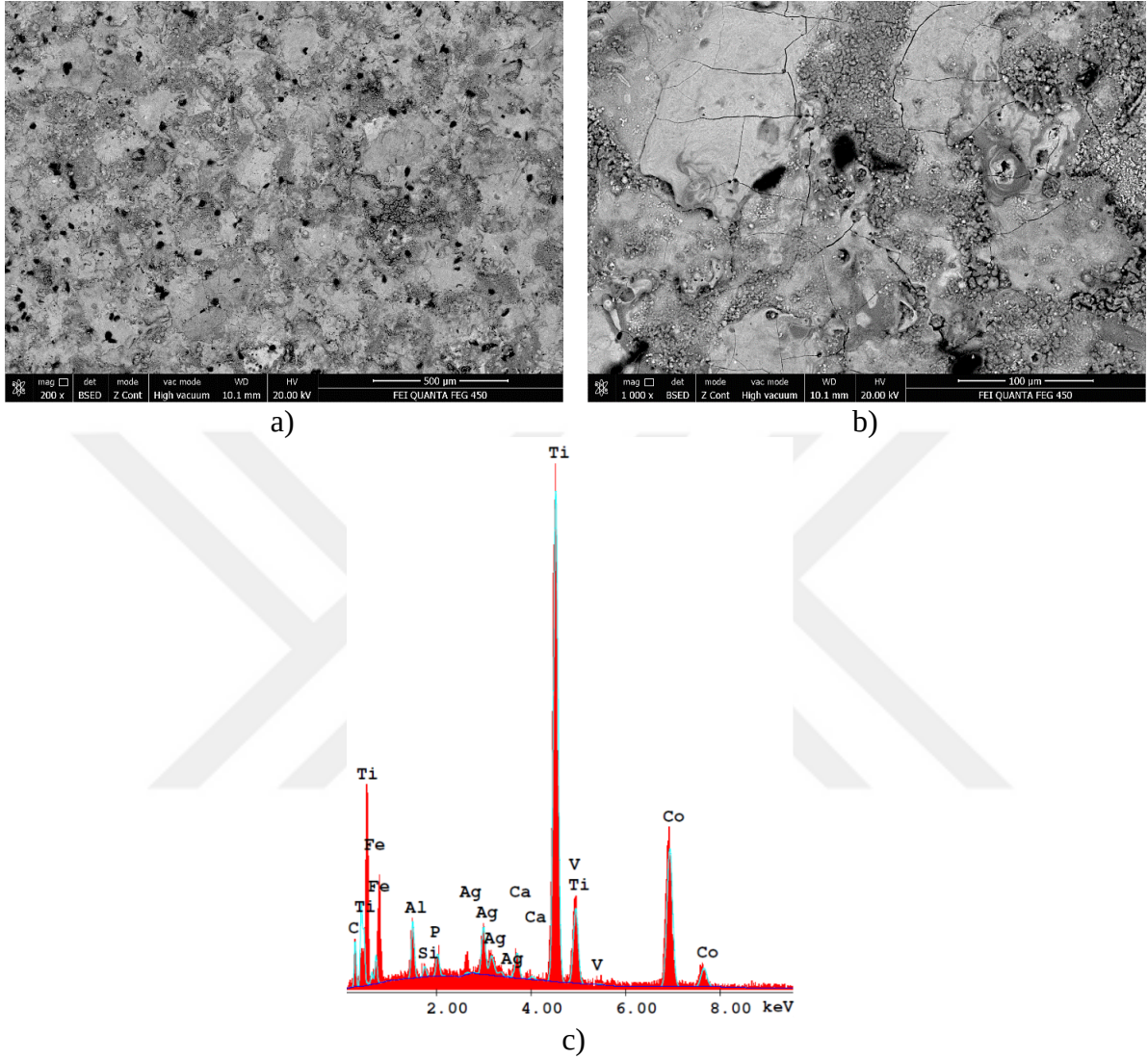
yer yer büyük adacık içlerinde de yer almaktadır. Büyük adacık içlerindeki çatlaklar koyu ve açık gri renkteki faz sınırlarını izlememiştir. 6 μ s darbe süresine göre enerji dağılım analizlerinden takım elektrottan yüzeye geçen malzeme transferinin az da olsa azaldığı görülmektedir (Şekil 4.11c).



Şekil 4.11 Elektrot B SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 12 μ s) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

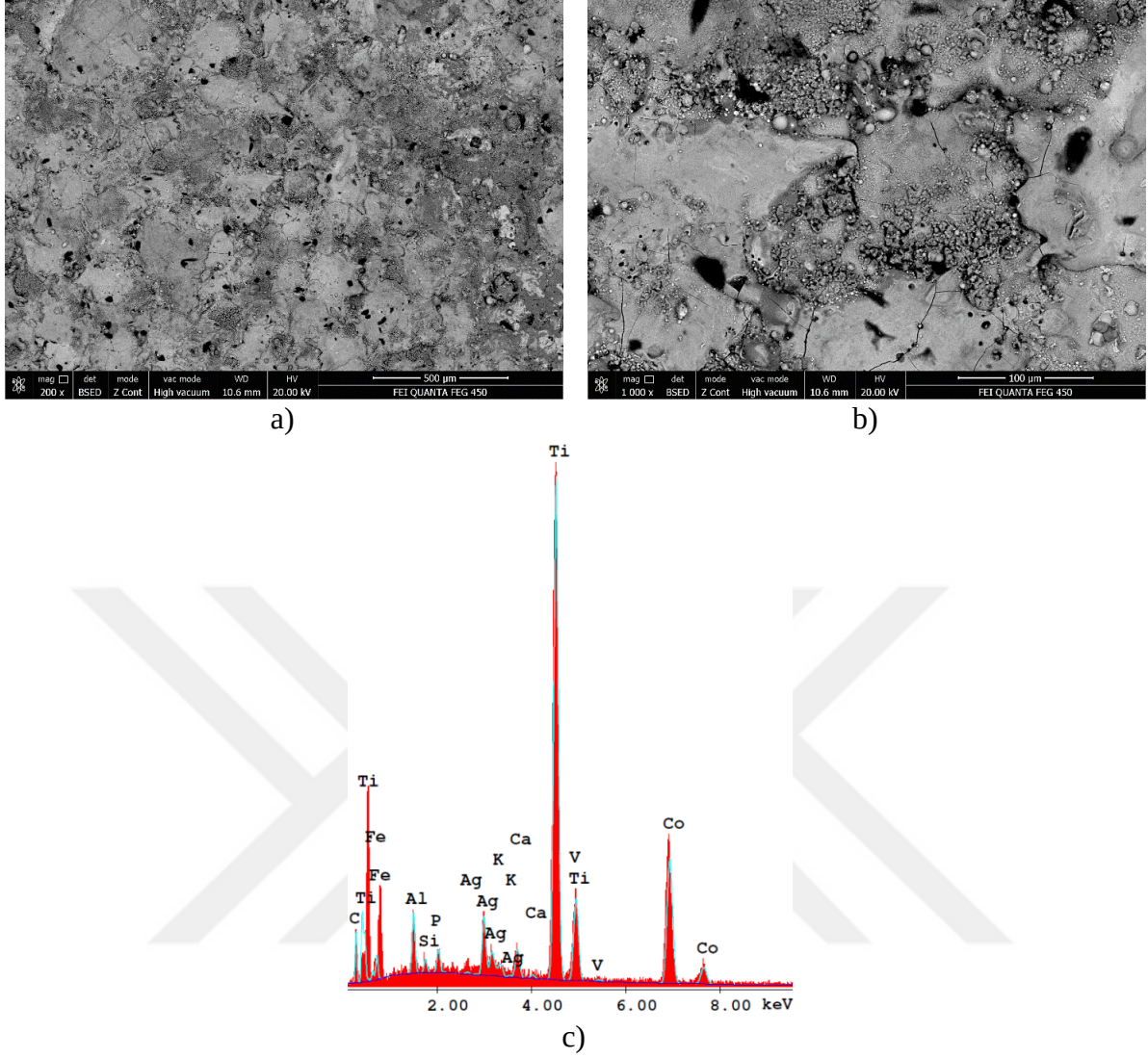
25 μ s darbe süresiyle işleme yapıldığında ise yüzeyde koyu gri çatlaklı yapılar genellikle krater kenarlarında yer almıştır. Çatlak yoğunluğu daha düşük darbe sürelerinde işlemeye göre azalmıştır. Kraterler çatlak ağlarıyla örülüdür ve yoğunluğu en yüksek seviyededir. Tıpkı 12 μ s darbe süresinde işlemede olduğu gibi büyük adacıklar yüzeyde görülmektedir. Koyu gri çatlaksız yapılar bazen krater oluşumunu destekleyen dairesel yapılarda görülür. Bazı bölgelerde ise ardışık kıvılcımların etkisiyle koyu gri yapılar karmaşık görünüm sergiler. Genel görünümde yüzeylerin diğer unsurları 12 μ s darbe süresiyle işlenmiş yüzeylere benzerlik

göstermektedir. EDS analizinden takım elektrot malzemesinden taşınan element izleri, 12 μ s darbe süresi ile işlenen yüzeylere benzerdir (Şekil 4.12).



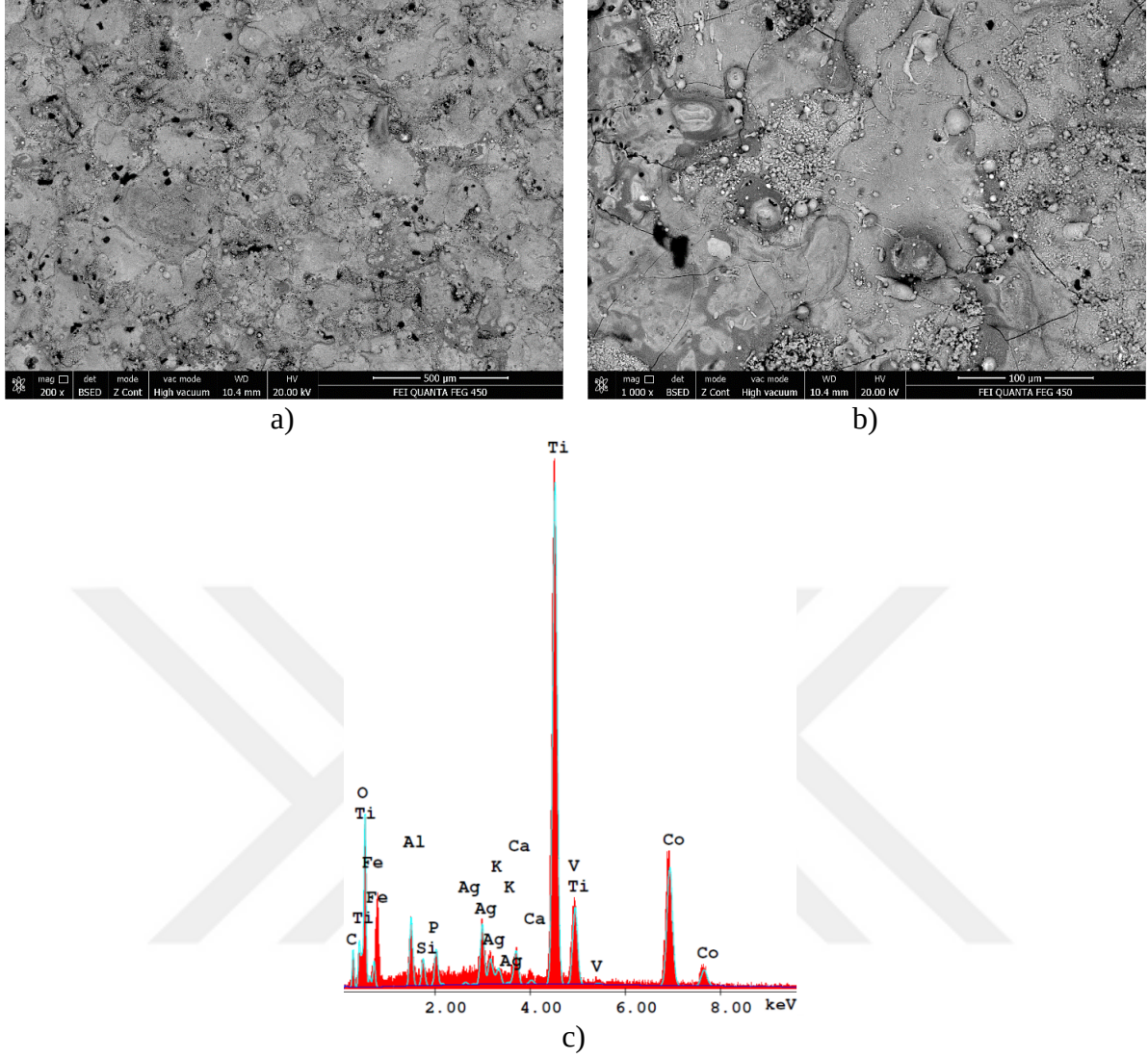
Şekil 4.12 Elektrot B SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 25 μ s) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

50 μ s darbe süresinde işlenen yüzeyler de 12 μ s ile işlenen yüzey özellikleri açısından benzer görünümündedir. Çatlak ağlarıyla örülü koyu gri ve yer yer açık gri bölgeler işlenen yüzeyde yer almaktadır. Krater kenarlarında küresel eklentilerin yoğunluğu ve boyutları, daha düşük darbe süreleri ile işlenen yüzeylere göre yüksektir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 Elektrot B SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 50 μ s) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

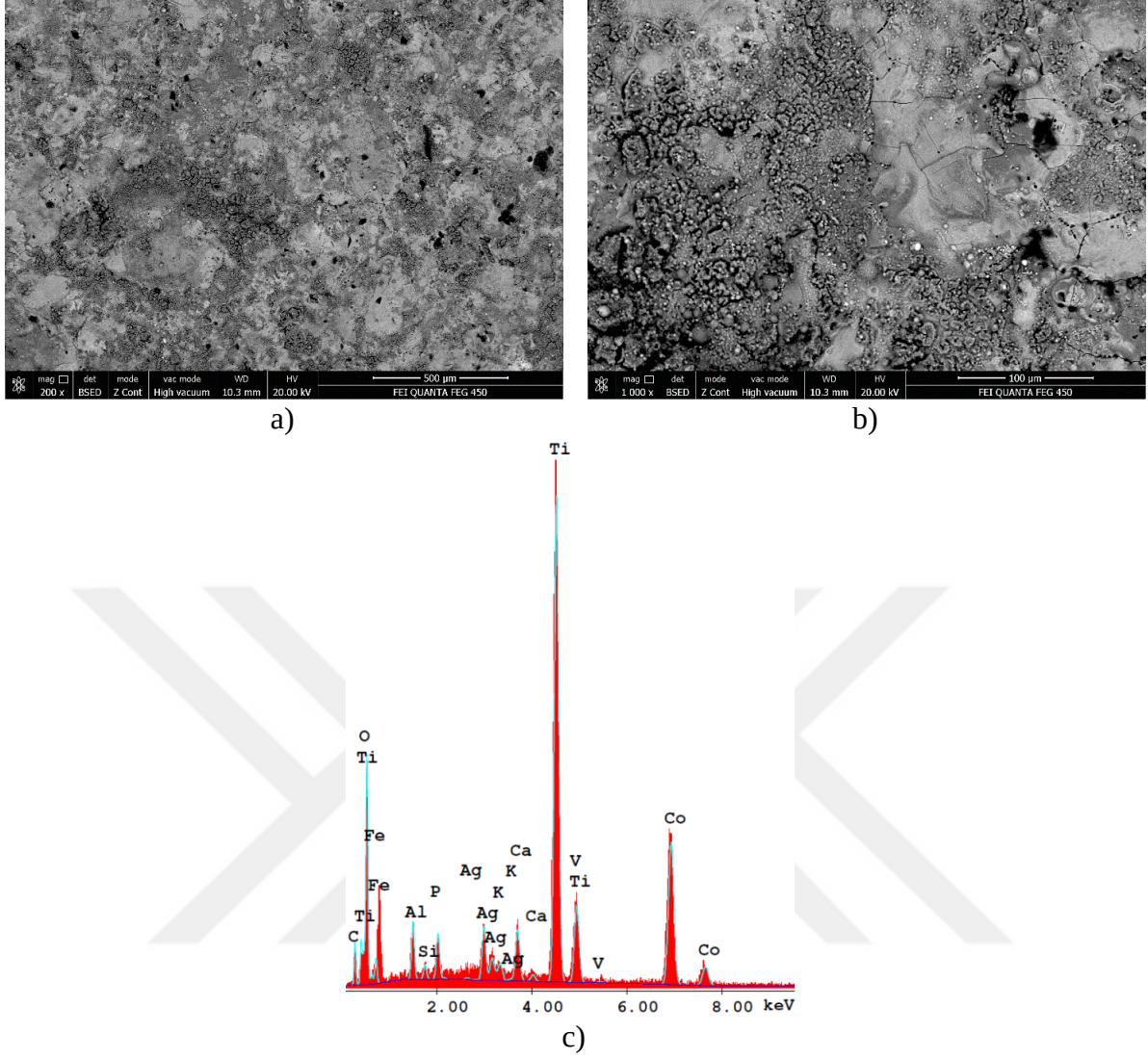
EKİ’de darbe süresinin 100 μ s’ye çıkartılmasıyla koyu gri bölgeler yerini çatlak ağlarıyla örülü açık gri bölgelere bırakmıştır. Çatlaklar daha sık ve çatlak ağları arasında kalan bölgeler gibi daha incedir. Küresel eklentiler yoğunluk ve boyut bakımından 50 μ s darbe süresi ile işlemeye benzerdir. 25 μ s, 50 μ s ve 100 μ s darbe sürelerinde %25 Ca-P takım elektrot kullanılarak işleme yapıldığında, yüzeye malzeme transferi belirgin farklılıklar göstermemiştir. Ag bakımından en zengin yüzeyler B elektrodu kullanıldığında 12 μ s darbe süresiyle işlendiğinde elde edilmiştir. Ca-P transferi bakımından yüzeyler ele alındığında 6 μ s ve 12 μ s darbe süresinin en uygun işleme koşulları olduğu görülmektedir (Şekil 4.14).



Şekil 4.14 Elektrot B SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 100 μ s) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

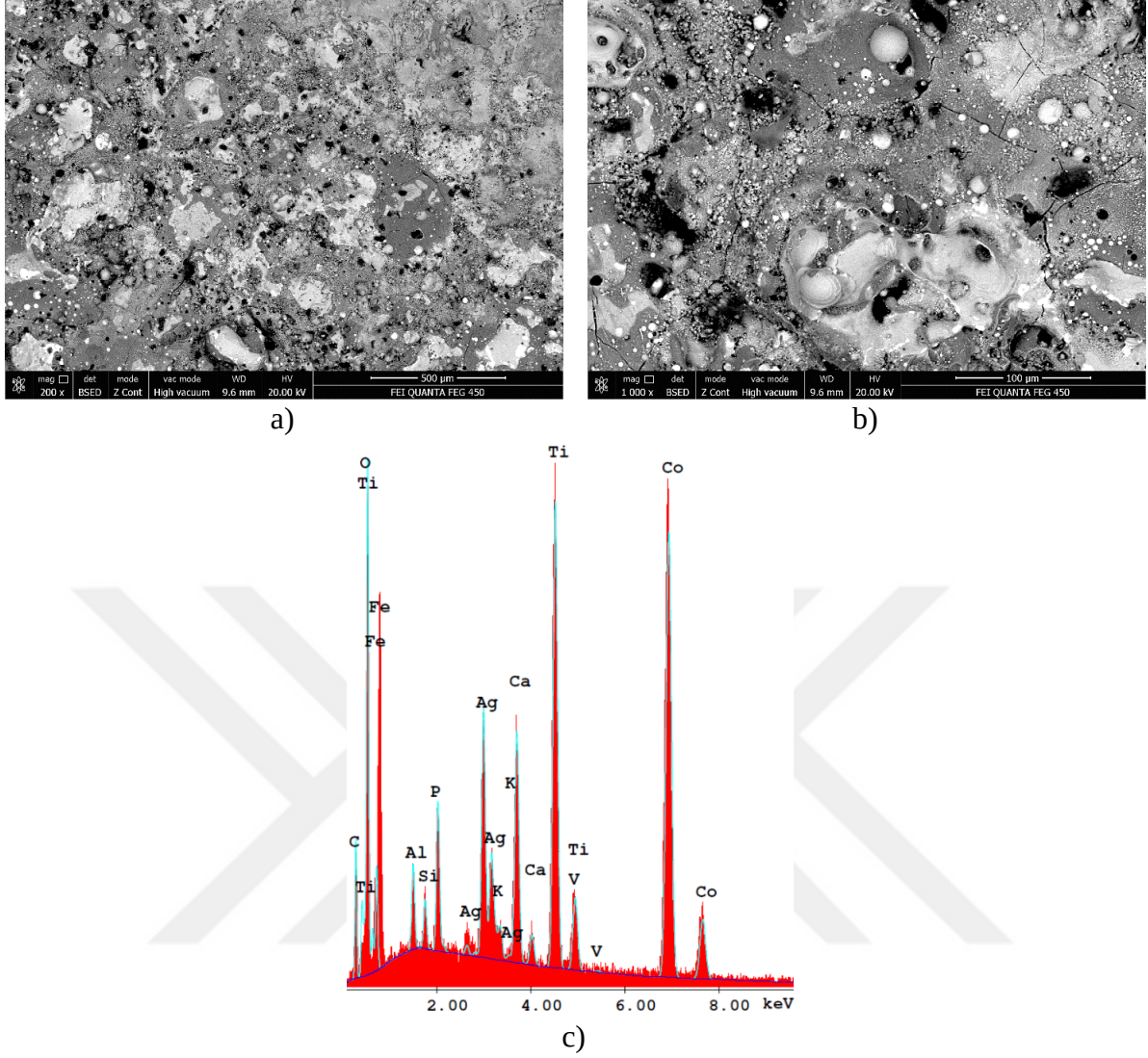
4.2.3 Elektrot C (%35 CaP-%65 Ag-Fe-Co)

Ca-P katkısının %35'e çıktığı C takım elektrodu kullanılarak 6 μ s darbe süresi ile işleme yapıldığında oluşan yüzeyler, B elektrodu kullanılarak 12 μ s darbe süresi ile işlenen yüzeylerle benzerlik göstermektedir. Çatlak ağlarıyla örülü yapılar genellikle krater kenarlarında oluşmasına rağmen yer yer krater içlerine doğru yönelmiştir. Büyük adacıkların kenarları ve iç bölgelerinde kıvılcım oluşumlarını destekleyen çizgisel çatlaksız koyu gri yapılar oluşmaktadır. Çatlaklar faz sınırlarında yoğunlaşmıştır. Çatlaklı bölgelerin iç bölümlerinde gömülmüş küresel eklentiler göze çarpmaktadır (Şekil 4.15).



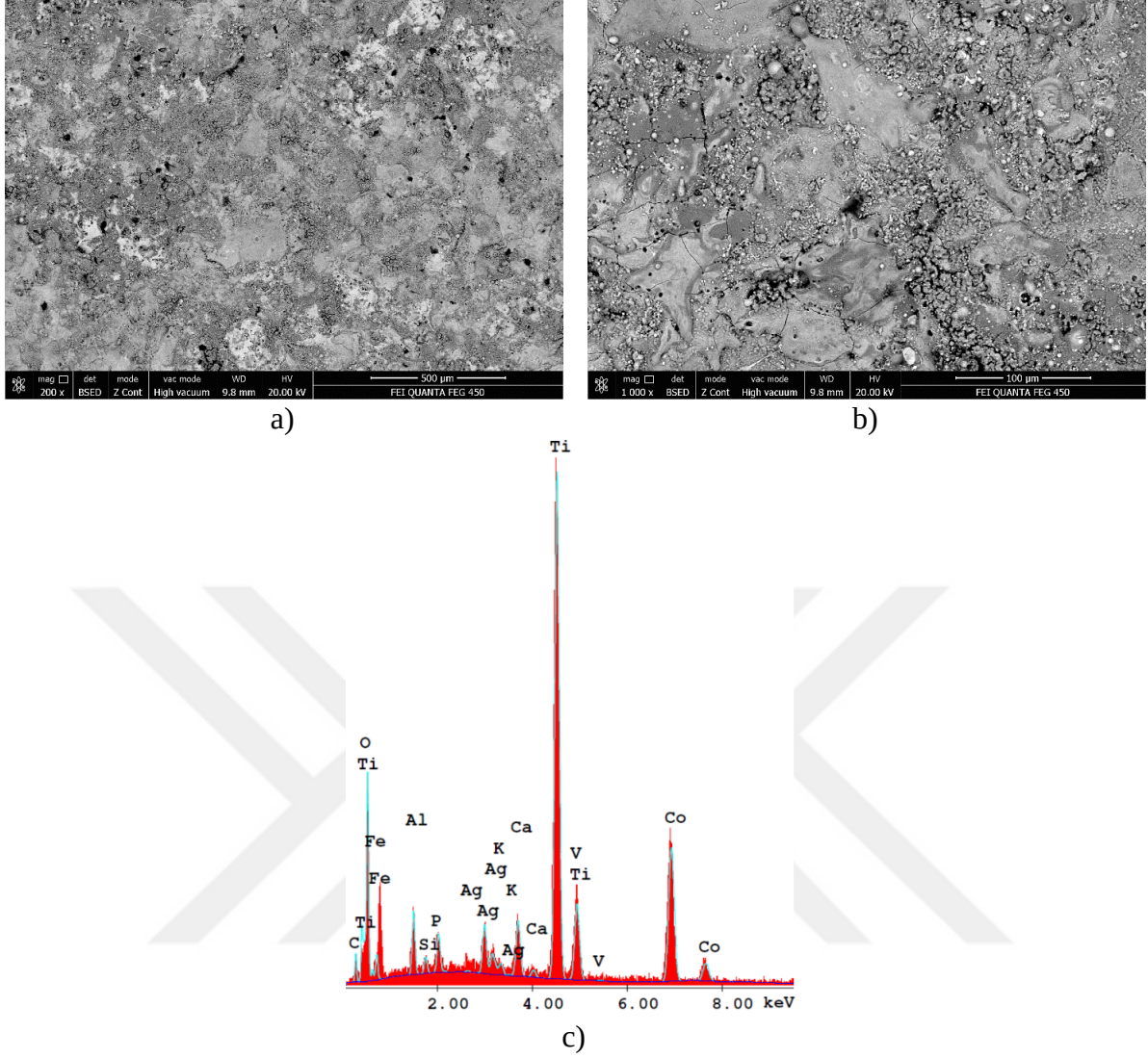
Şekil 4.15 Elektrot C SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 6 µs) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

EKİ ile 12 µs darbe süresi kullanılarak işleme yapıldığında yüzeyde çatlak ağlarıyla örülü yapılar baskınlığını kaybetmiş, çatlaksız koyu ve açık gri oluşumlar yüzeye hakim olmuştur. Küresel eklentiler yüzeyin tamamını kaplamıştır ve boyutları geniş aralıktadır. Çatlaksız koyu gri yapıların ortalarında şekilsiz açık gri oluşumlar yer almaktadır. Açık gri yapılar dairesel veya dairesel yakın geometriler şeklinde görülmektedir. Dairesel açık gri yapıların kenarlarında koyu gri, çatlaksız, çizgisel fazlar oluşmuştur. Ancak üst üste binen ardışık kıvrımların etkisi ile bu yapılar bazen karmaşık görünüm sergileyebilmektedir. Açık gri adacıkların etrafında oluşan çatlaklar çevresel çevrimini tamamlamadan dallanıp yön değiştirmektedir (Şekil 4.16).



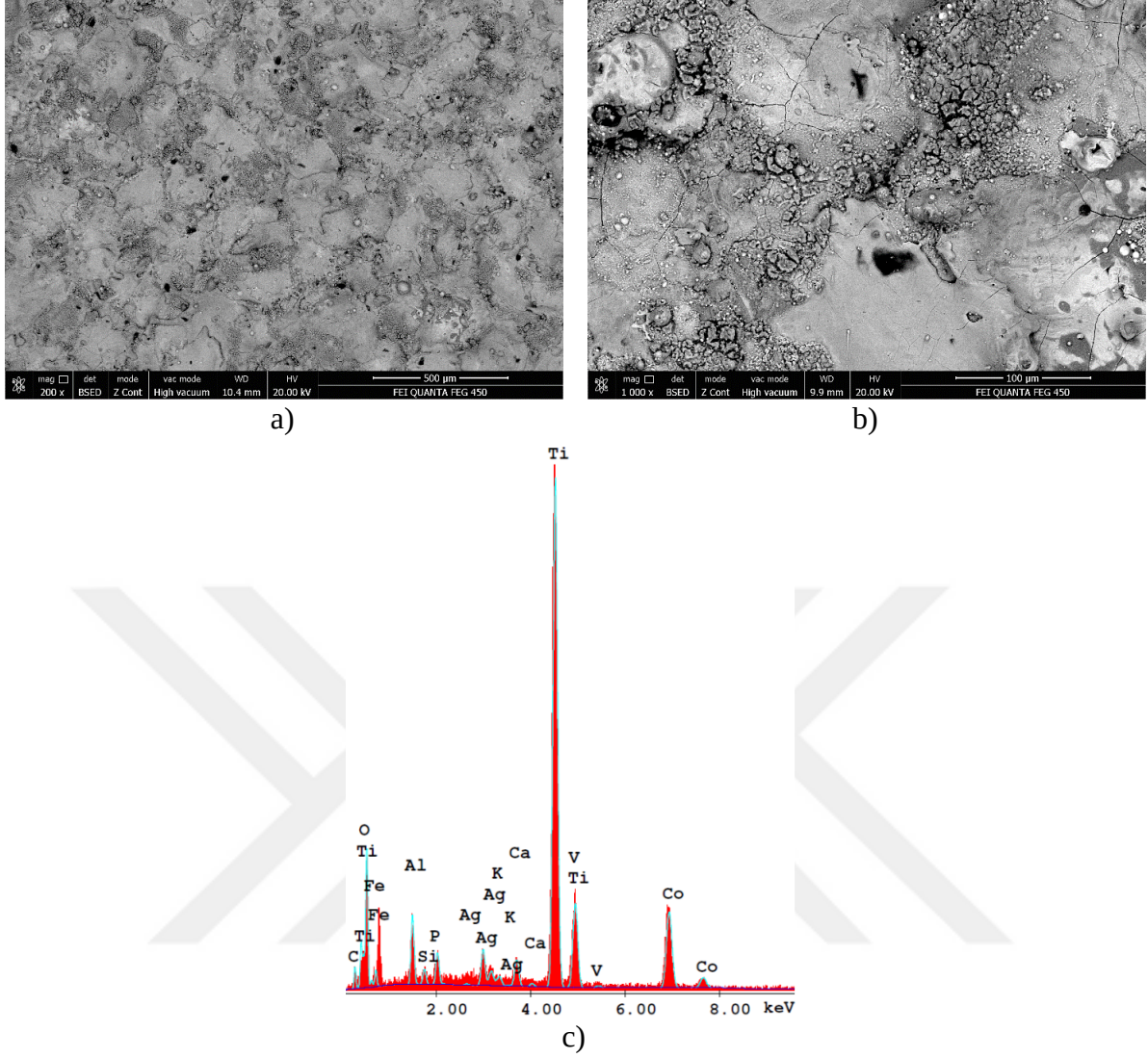
Şekil 4.16 Elektrot C SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi:12 µs) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

25 µs darbe süresi ile işlenmiş yüzeylerde koyu ve açık gri çatlaksız yapılar iç içe geçmiş biçimde gözlemlenmiştir. Yüzeyin genel görüntüsünde bazı bölgelerde koyu gri kenarların içlerinde açık gri yapılar fark edilmektedir. Ancak bu gibi yapıların oranı 12 µs darbe süresi ile işlemeye göre daha azdır. Çatlak ağlarıyla örülü yapıların yoğunluğu artmış ve çatlaksız yapılar iç içe geçmiştir. Çatlaksız yapıların üzerlerinde gözenekler yer almaktadır. Küresel ve farklı boyuttaki eklentilerin yoğunluğu da yüzeyde ciddi oranda azalmıştır (Şekil 4.17).



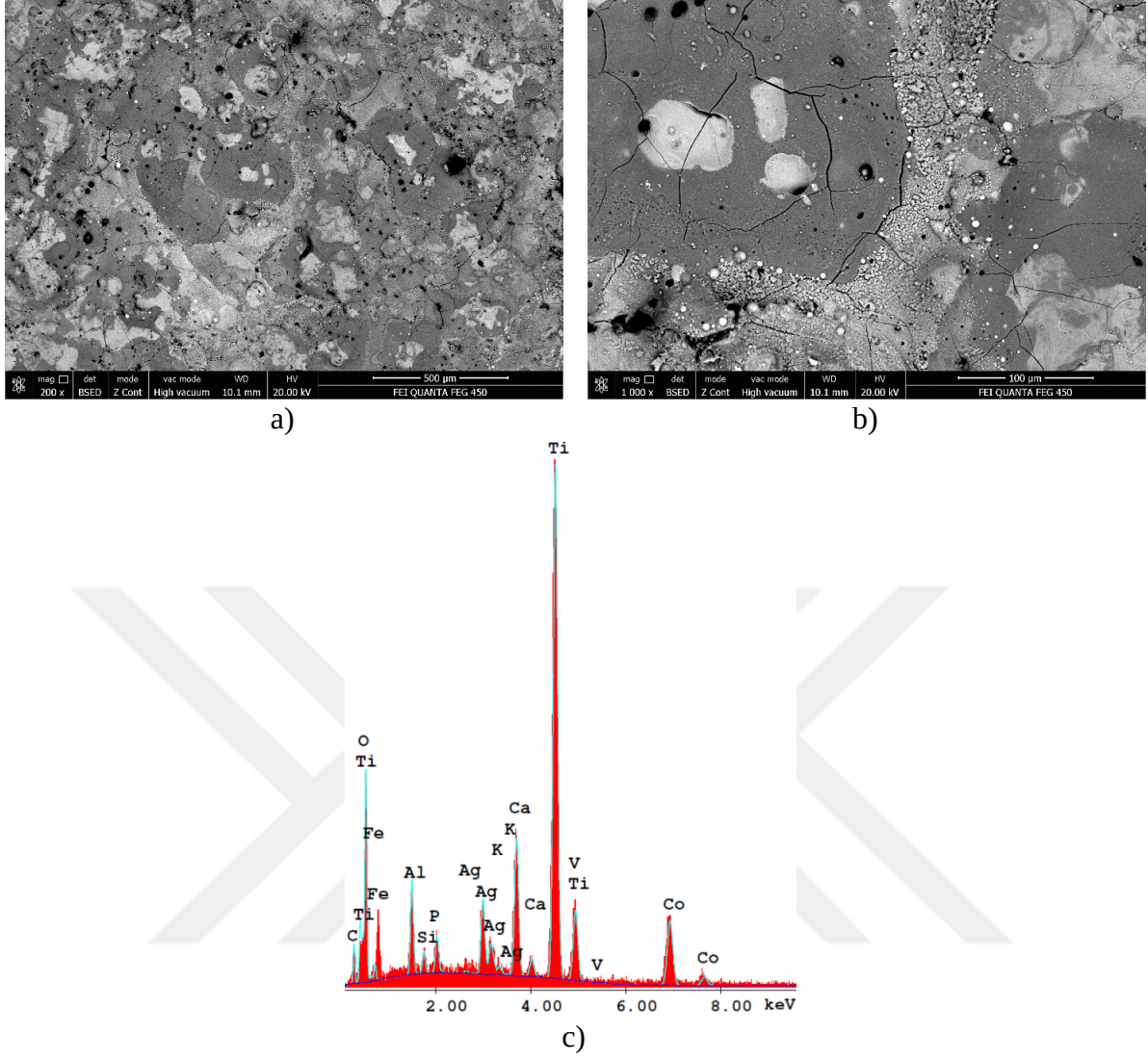
Şekil 4.17 Elektrot C SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 25 μ s) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

50 μ s darbe süresi ile işleme yapıldığında, yüzeyde açık gri şekilsiz yapılar ihmal edilebilir düzeydedir. Çatlak ağlarıyla örülü yapıların yoğunluğu 25 μ s darbe süresinde işlenmiş yüzeylere göre azalmıştır. Çatlaklar genellikle krater kenarlarında yoğunlaşmıştır. Krater kenarları daha belirgin ve gözeneklilik en az seviyededir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18 Elektrot C SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 50 µs) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

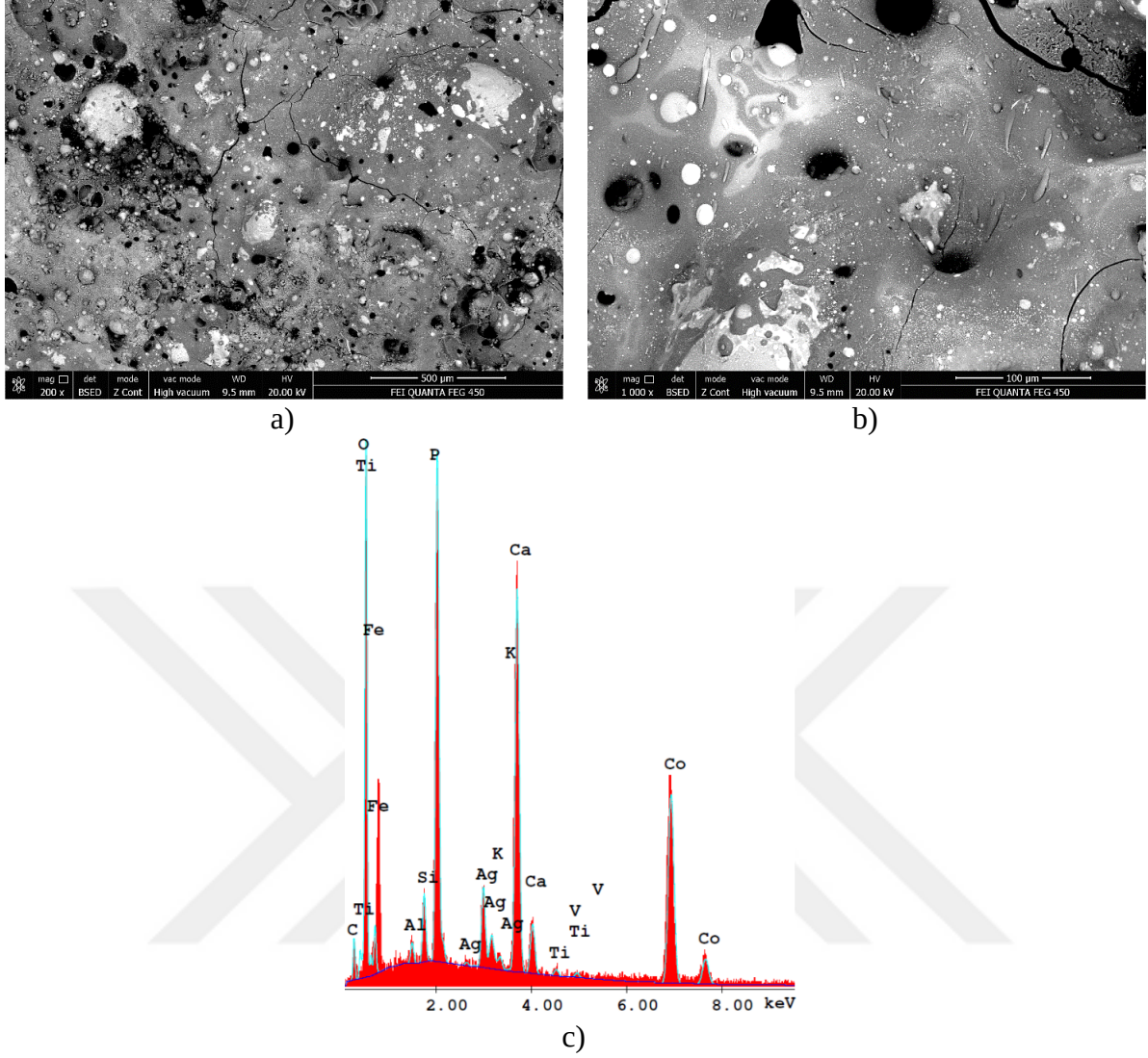
100 µs darbe süresi işleme yapıldığında yüzeyde koyu gri yapıların içlerinde şekilsiz açık gri oluşumlar yer almaktadır. Yüzey ağırlıklı olarak koyu gri bölgelerin çevresinde açık gri çatlak ağları bulunmaktadır. Ancak az da olsa yüzeyde yer yer 12 µs darbe süresi ile işlenmiş yüzeylere benzer büyük açık gri adacıklar etrafında koyu gri oluşumlar mevcuttur. Yüzeyde yoğun çatlak ağları görülmektedir. Küresel eklentiler daha çok krater kenarlarında bulunmaktadır. Bu eklentilerin yoğunluğu ve boyutları 12 µs darbe süresiyle işlenmiş yüzeylere göre daha azdır (Şekil 4.19).



Şekil 4.19 Elektrot C SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 100 μ s) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

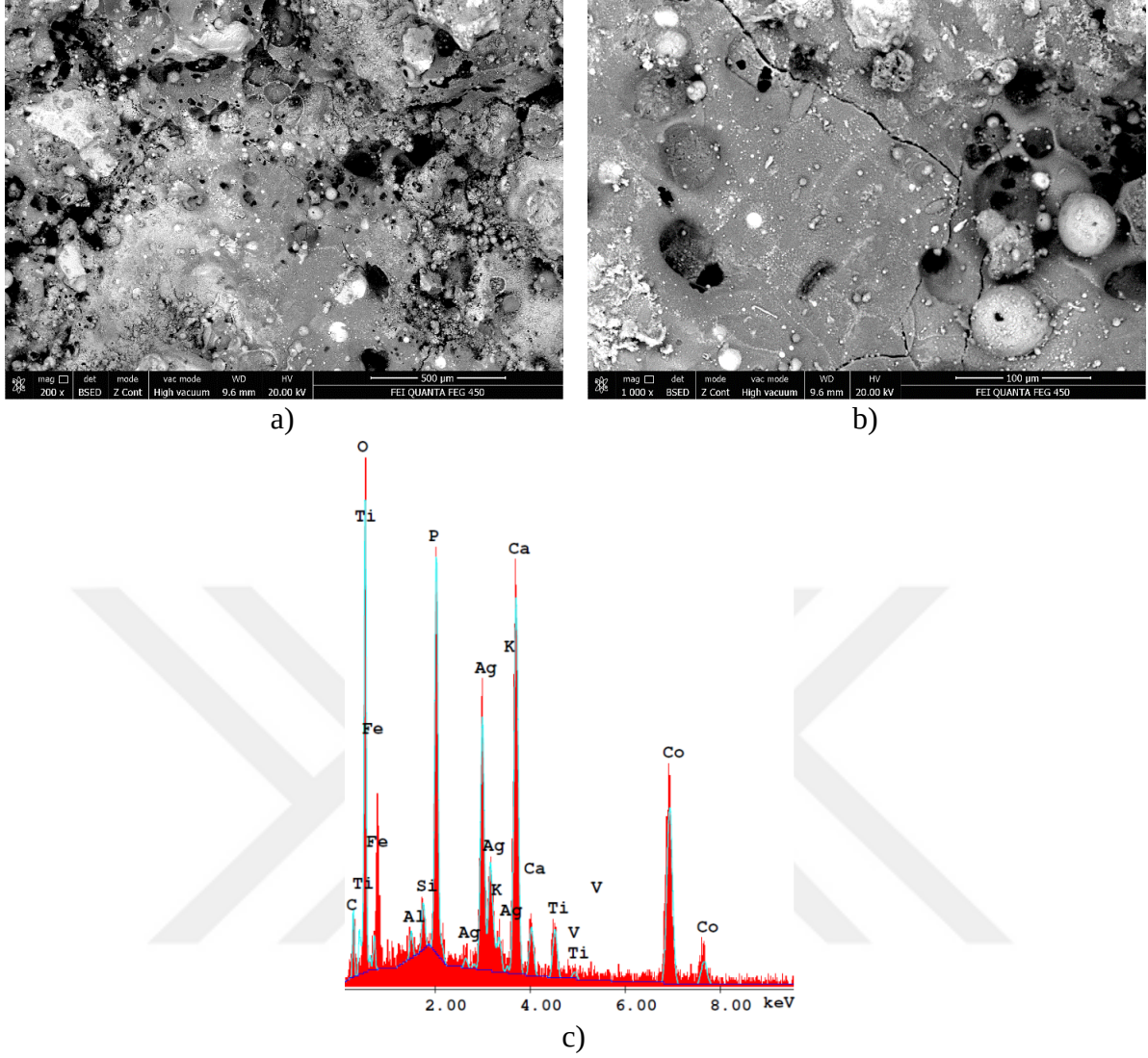
4.2.4 Elektrot D (%50 CaP-%50 Ag-Fe-Co)

%50 Ca-P oranına sahip takım elektrot ile işleme yapıldığında yüzeyler diğer tüm işleme koşullarına göre yoğun farklılıklar sergilemektedir. Yüzeylerde gözenekler yoğun bir şekilde varlığını göstermektedir. Yer yer bu gözenekler bölgesel olarak yoğunlaşarak birbirine bağlı iç içe geçmiş görünümündedir. Yüzey genelde koyu gri renktedir ancak farklı fazlara işaret eden bazı beyaz bölgeler ve küresel halde parlak beyaz eklentiler fark edilebilmektedir. Ayrıca gözenek içlerinde ve çevrelerinde farklı boyutlarda küresel eklentiler göze çarpmaktadır (Şekil 4.20a). Çatlak oluşan bazı bölgelerde iç içe geçmiş iğnemsî yapılar martenzit oluşumunu desteklemektedir (Şekil 4.20b). Enerji dağılım analizlerinde yüzeyde takım elektrottan taşınan elementler tespit edilirken, ana faz malzeme elementleri görülmemektedir (Şekil 4.20c).



Şekil 4.20 Elektrot D SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 6 μ s) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

100 μ s darbe süresi kullanılarak işleme yapıldığında, yüzeyde iç içe geçmiş ve birbirine bağlı gözenekli yapıların yoğunluğu artmıştır. Gözeneklilik etrafında ve iç bölgelerinde 6 μ s darbe süresi ile işlenmiş yüzeylere benzer küresel eklentiler mevcuttur. Koyu gri görünümünde oluşan fazlar yüzeyde baskındır. Açık gri ya da beyaz fazlar iç içe geçmiş karma yapıdadır (Şekil 4.21a).



Şekil 4.21 Elektrot D SEM-BSED görüntüleri ve EDS analizleri (darbe süresi: 100 µs) a) 200X, b) 1000X, c) EDS analizi.

4.3 X-IŞINLARI KIRINIM DİFRAKTOMETRESİ (XRD) ANALİZİ

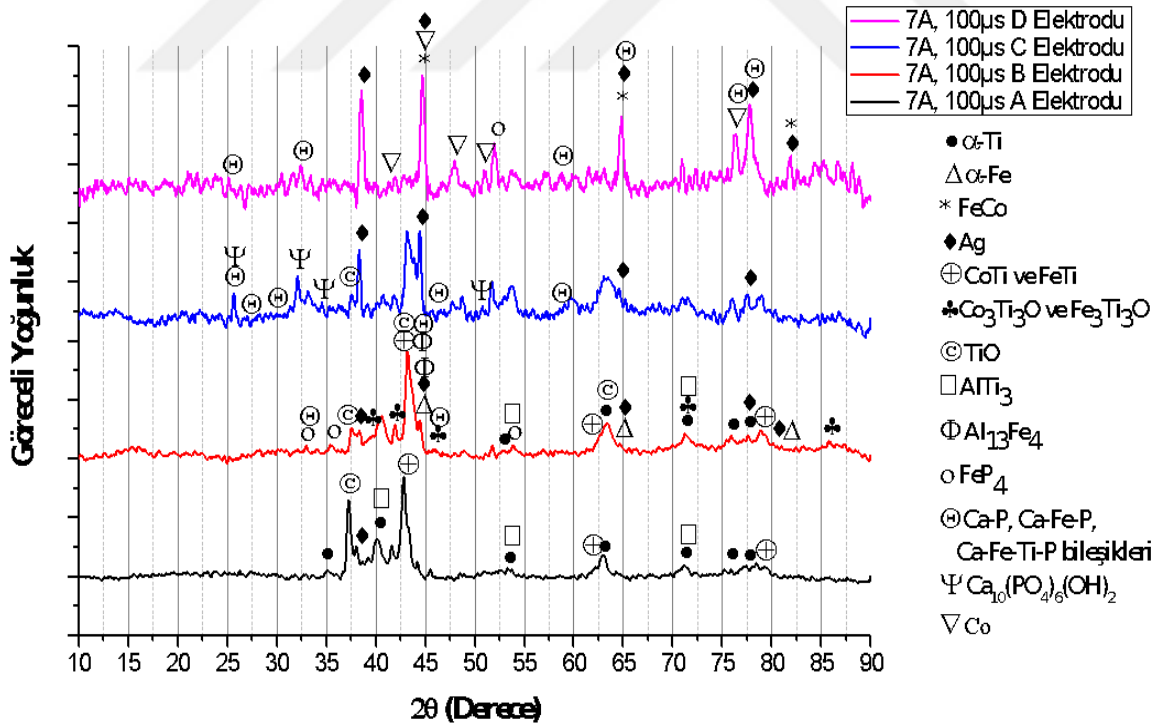
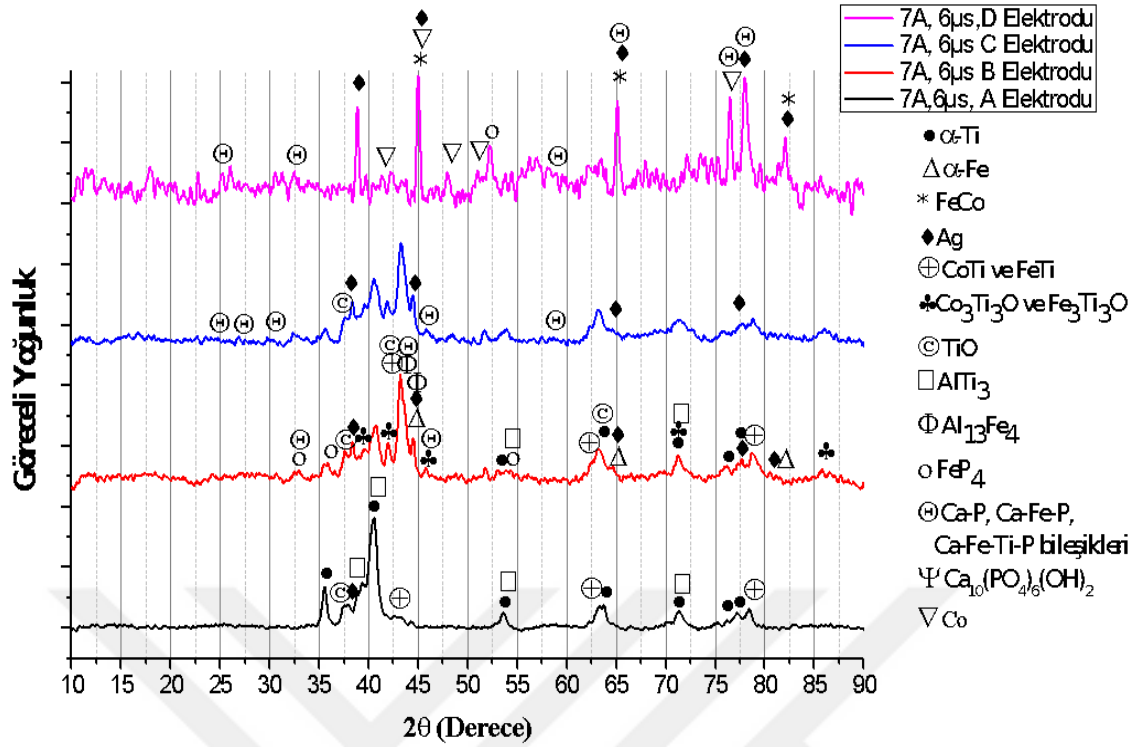
XRD analizleri BSED-SEM fotoğrafları ve EDS analizleri ile beraber ele alınmıştır. Yüzeyde birçok element bulunması sebebiyle ikili ve/veya üçlü faz diyagramları incelenerek yüzeyde oluşan mikro yapılar teyit edilmiştir. Yüzeyde tespit edilen fazlar Çizelge 4.1’de verilmiştir. Ayrıca Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’te XRD kırınım desenleri farklı parametreler için verilmiştir. Karşılaştırmalı olarak incelemeler yapılırken aynı ana pike sahip işleme koşullarında oluşan fazların miktarları hakkında değerlendirme yapmak için faz şiddetlerinin ana pike oranına bakılmıştır. EKİ A takım elektrodu kullanılarak 6 µs darbe süresiyle işlendiğinde yüzeyde α -Ti fazı ve AlTi₃ intermetalik bileşiği bulunmuştur. Ayrıca TiO₂, Ag ve FeTi-CoTi izlerine de rastlanmıştır. İşleme 100 µs darbe süresi ile yapıldığında α -Ti yerini FeTi-CoTi bileşiğine

bırakmıştır. Ayrıca dikkate değer oranda TiO bileşiği bulunmuştur. B takım elektrodu kullanılarak 6 µs darbe süresi ile işleme yapıldığında yüzeyde baskın faz yine FeTi-CoTi bileşiği olmaktadır. Ayrıca, yüzeyde α -Ti, α -Fe, Ag fazları ile birlikte Ca-P, FeP₄, Fe₃Ti₃O-Co₃Ti₃O izlerine rastlanmıştır. B takım elektrodu kullanılarak 100 µs darbe süresi ile işleme yapıldığında Ag pik şiddetinin azalması dışında 6 µs darbe süresi ile işlemeye göre fark edilebilir bir değişiklik görülmemiştir. Ancak D takım elektrotla 100 µs darbe süresinde işleme yapıldığında α -Fe (FeCo) ve FeTi-CoTi bileşikleri ile birlikte yüzeyde HA belirginleşmiştir. Ayrıca Ag ve/veya FeP₄ piklerinin artışı da gözlemlenmektedir. D takım elektrotla işlenmiş yüzeylerde ana faz tamamen α -Fe (FeCo)'dır. Ayrıca Ag ve Ca-P bileşiklerinin pik şiddetleri oldukça artmıştır. EKİ'de darbe süresi 100 µs olduğunda Ag pik şiddeti az da olsa artmış, Ca-P bileşikleri ise azalmıştır.

Çizelge 4.1 XRD analizlerinden tespit edilen fazlar.

Yüzeyde Belirlenen Faz	Görüldüğü aç (2θ) (Derece)
α -Ti	40,41*/35,30/53,21/63,20/70,78
α -Fe, FeCo	44,67*/65,02/82,33
Co	44,37*/47,3/76
Ag	38,26*/44,47/64,71/77,74/81,91
HA, Ca ₁₀ (PO ₄) ₈ (OH) ₂	25,8*/32*
FeTi-CoTi	42,96*-43,12*/62,37-62,30/78,72-78,61
TiO	43,36*/62,96/37,32
AlTi ₃	40,89*/38,78/53,78/71,71
Al ₁₃ Fe ₄	43,14*/44,16/44,34
FeP ₄	32,37*/38,18/35,77/53,86
Fe ₈₃ P ₁₇	51,97*/60,50
Fe ₃ Ti ₃ O-Co ₃ Ti ₃ O	42,11*-42,03*/39,60-39,52/46,53-45,96/86,94-86,75
CaH ₅ O ₆ P	65,18*/76/78,3
Ca-Fe-P/Ca-Fe-Ti-P-O bileşikleri	42,8/45,57

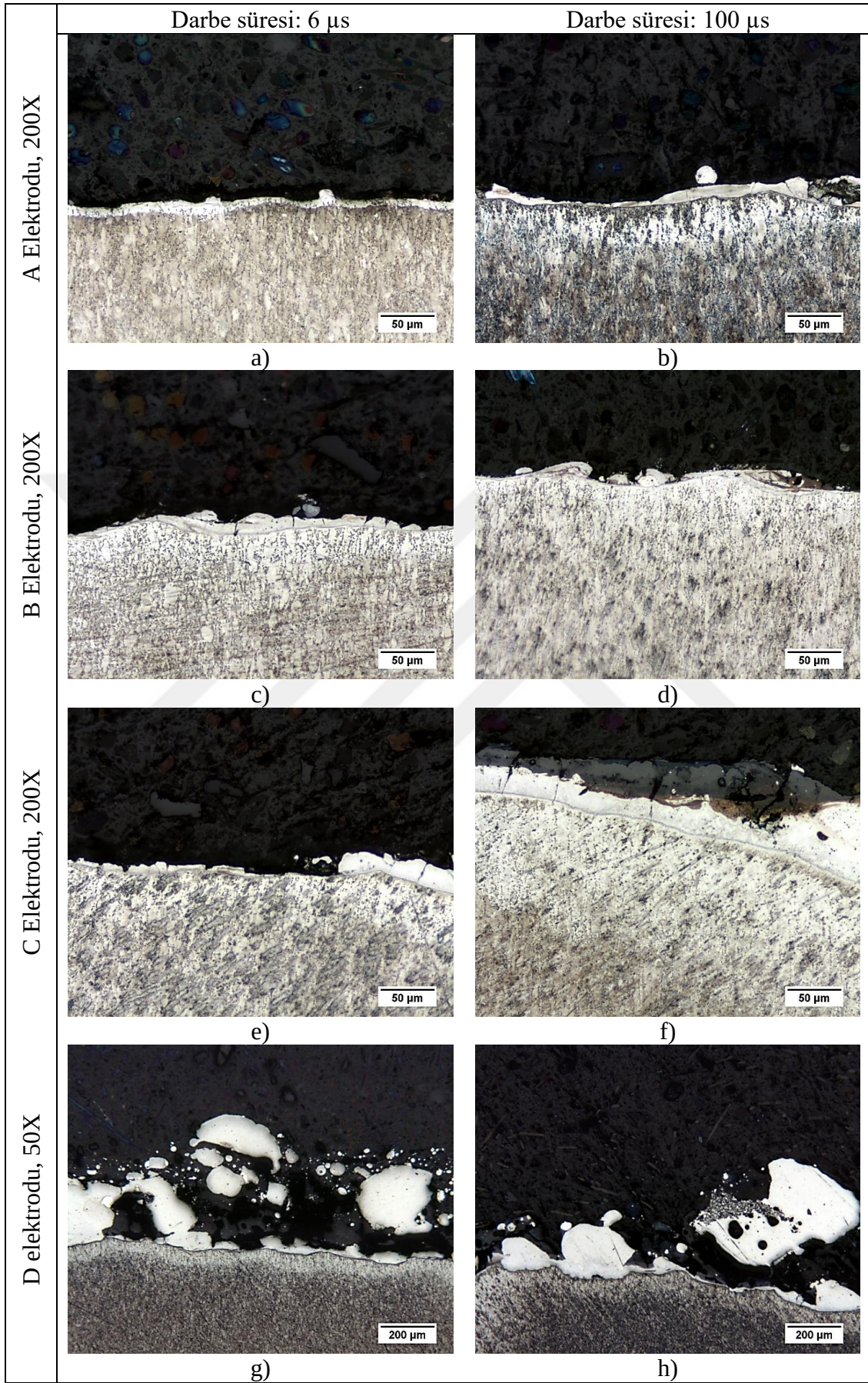
*Ana pik (En şiddetli pik)



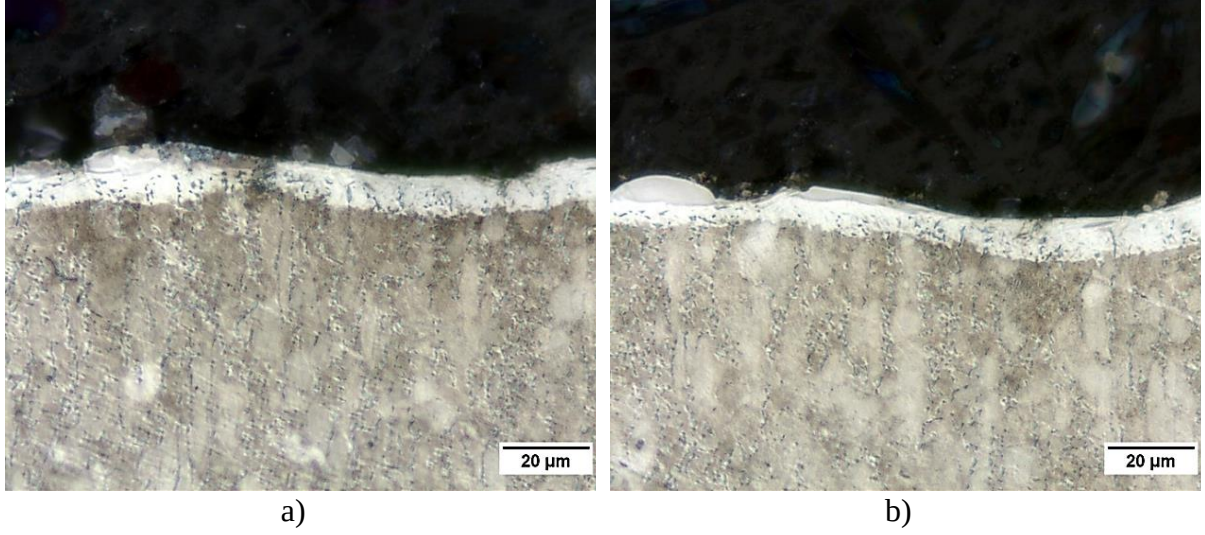
4.4 KESİT MİKRO YAPISI

Bir elektriksel kıvılcım ile malzeme yüzeyine elektronların ve iyonların bombardımanı yüksek noktasal sıcaklıklar meydana getirir. Kıvılcımı oluşturan plazma kanalı, eş zamanlı olarak yüzeyde yüksek basınç oluşturarak aşırı ısınan malzemenin buharlaşmasını engeller. Darbe süresinin sonunda plazma kanalının kapanması ile basınç ortadan kalkacak ve çok yüksek sıcaklıklara çıkmış malzeme buharlaşacak ve/veya ergiyecektir. Buharlaşan malzemenin bir bölümü dielektrik sıvı içine püskürerek uzaklaşırken, geri kalan bölümü yüzey üzerinde katılaşacaktır. Dielektrik sıvının taşınım ve oda sıcaklığında ana faz malzemesinin ısı iletimiyle yüzey hızla soğuyacaktır. Sonuç olarak, yüzey ve yüzey altında farklı mikro yapı özelliklerine sahip katmanlar oluşacaktır. Yüzeyin en üst bölümünde sıvı fazda yüzeyden uzaklaşamayan ve/veya buhar fazında dielektrik içine püskürerek katı faza geçmeden yüzeye çökerek katılaşan malzemenin oluşturduğu YKK bulunmaktadır. YKK altında ise katı faz dönüşümlerinin gerçekleştiği ısı etkilenmiş katman yer almaktadır. En altta ise özellikleri değişime uğramamış ana faz malzemesi bulunmaktadır. EKİ işlenmiş yüzeylerde oluşan farklı mikro yapılara sahip katmanların kalınlıkları, işleme sırasında uygulanan darbe süresi, akımı ile birlikte iş parçasının ısı özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. İşlenmiş yüzeylerin kesit fotoğrafları darbe süresi ve işlemede kullanılan takım elektrot türüne göre Şekil 4.24'te sunulmuştur.

%100 Ag-Fe-Co takım elektrotla (A elektrot) 6 μ s darbe süresinde işleme yapıldığında YKK süreksizdir ve genellikle krater kenarlarında yığılmalar göstermektedir. Isı etkilenmiş katman kalınlığı ise çoğunlukla 10 μ m'nin altında kalmaktadır (Şekil 4.24a). Mikro yapısal olarak değerlendirildiğinde ise YKK'den farklı olarak en üst katmanda yer yer keskin köşelere sahip büyük parçalı yapılar görülmektedir (Şekil 4.25a). Ayrıca nadir de olsa kahverengi rengine küçük taneli oluşumlar en üst yüzeyde fark edilmektedir (Şekil 4.25b).

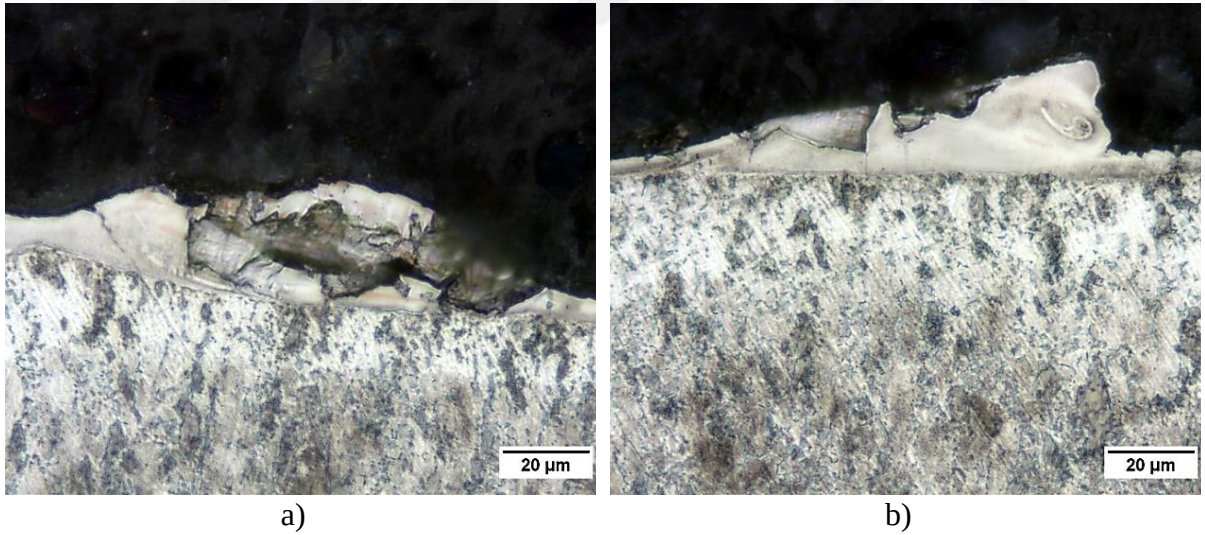


Şekil 4.24 EKİ ile işlenmiş numunelerin yüzey kesitleri.



Şekil 4.25 Elektrot A kesit mikro yapısı (darbe süresi: 6 µs, 500X).

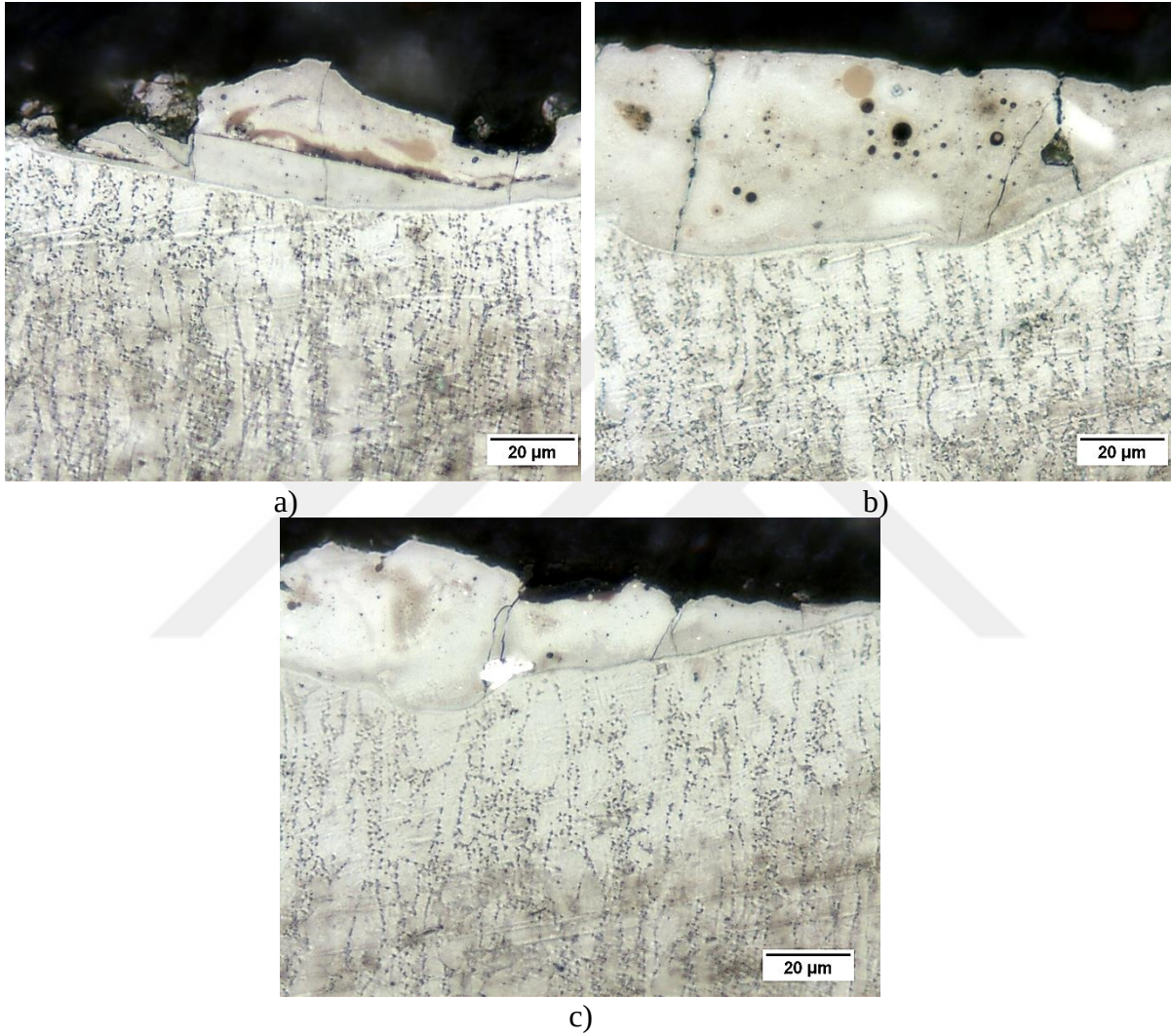
100 µs darbe süresi ile işleme yapıldığında YKK daha kalın ve süreklidir. Ancak kalınlıkları düzensizdir. YKK içinde çatlaklar yer almakta ve ısıl etkilenmiş katmana ulaşmadan ara yüzeyde sonlanmaktadır (Şekil 4.24b). Yüzeye malzeme transferinin artması sonucu YKK'da kahverengi, siyah ve açık gri yapıların iç içe geçtiği karmaşık yapılar oluşmuştur. En üste koyu renkli küçük parçalı ince bir katman yer almaktadır (Şekil 4.26).



Şekil 4.26 Elektrot A kesit mikro yapısı (darbe süresi: 100 µs, 500X).

%25 Ca-P takım elektrotla (B elektrot) 6 µs darbe süresi ile işlenen yüzeylerde YKK kalınlıkları düzenli olmamakla birlikte süreklidir. Ayrıca katman kalınlıkları kayda değer miktarda artmıştır. A elektrodu ve 100 µs darbe süresiyle işlenen kesitlerle kıyaslandığında ise YKK kalınlığında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir. Ancak ısıl etkilenmiş katman kalınlığı az da olsa artmıştır. Ayrıca kesitte ortogonal çatlak yoğunluğu artmıştır (Şekil 4.24c). Kahverengi,

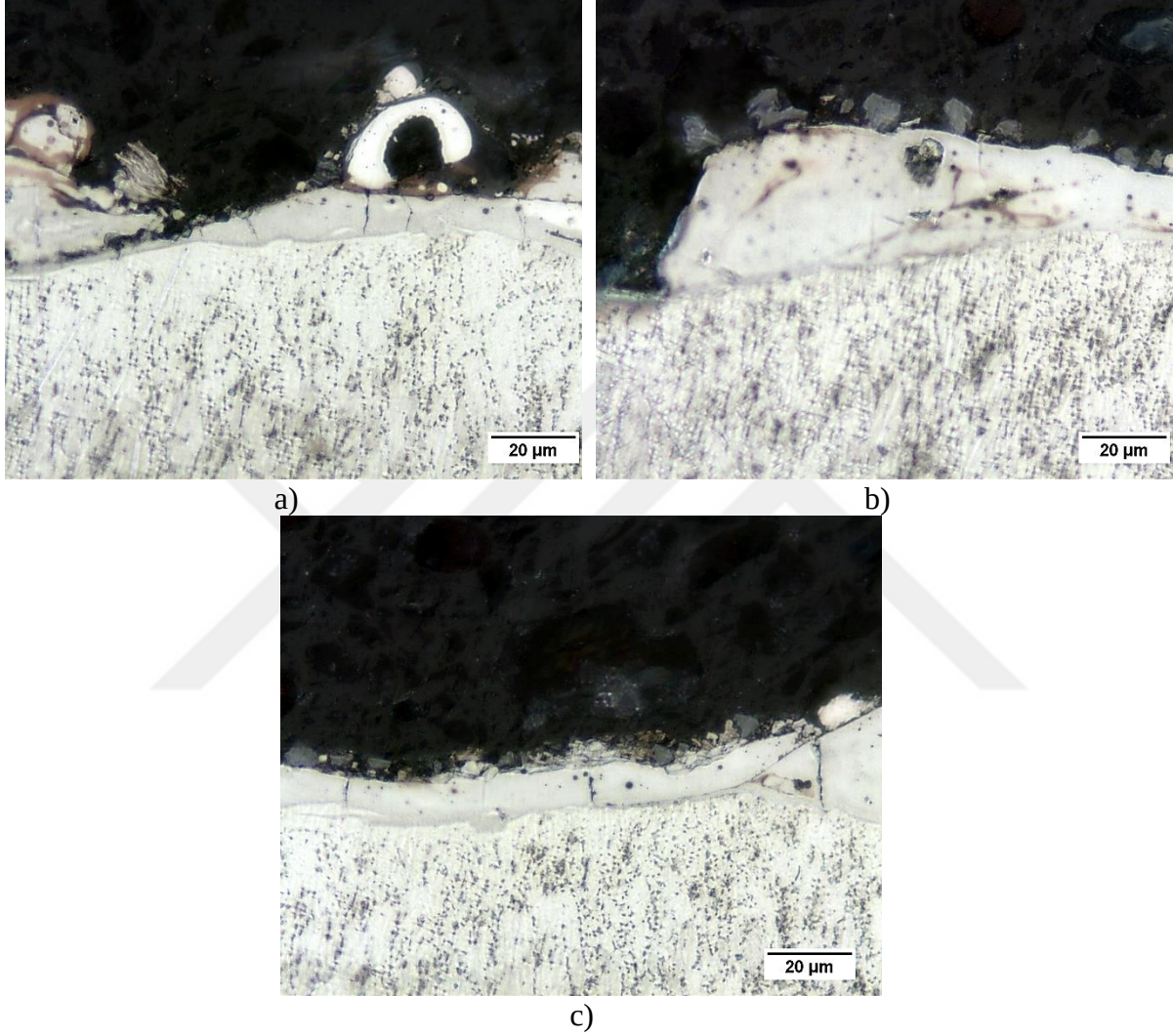
siyah ve açık gri renkte iç içe geçmiş yapılar görülebilmektedir. En üst katmanda ince taneli koyu renkli yapılarla yoğun olarak karşılaşılmalıdır (Şekil 4.27a). Ayrıca YKK içinde daire şeklinde ve farklı boyutlarda kahverengi ve siyah mikro yapılar görülmektedir (Şekil 4.27b). İç içe geçmiş açık ve koyu gri yapılar takım elektrodundan malzeme transferini vurgulamaktadır. Şekil 4.27c’de parlak görülen beyaz bölgenin gümüş olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.27 Elektrot B kesit mikro yapısı (darbe süresi: 6 µs, 500X).

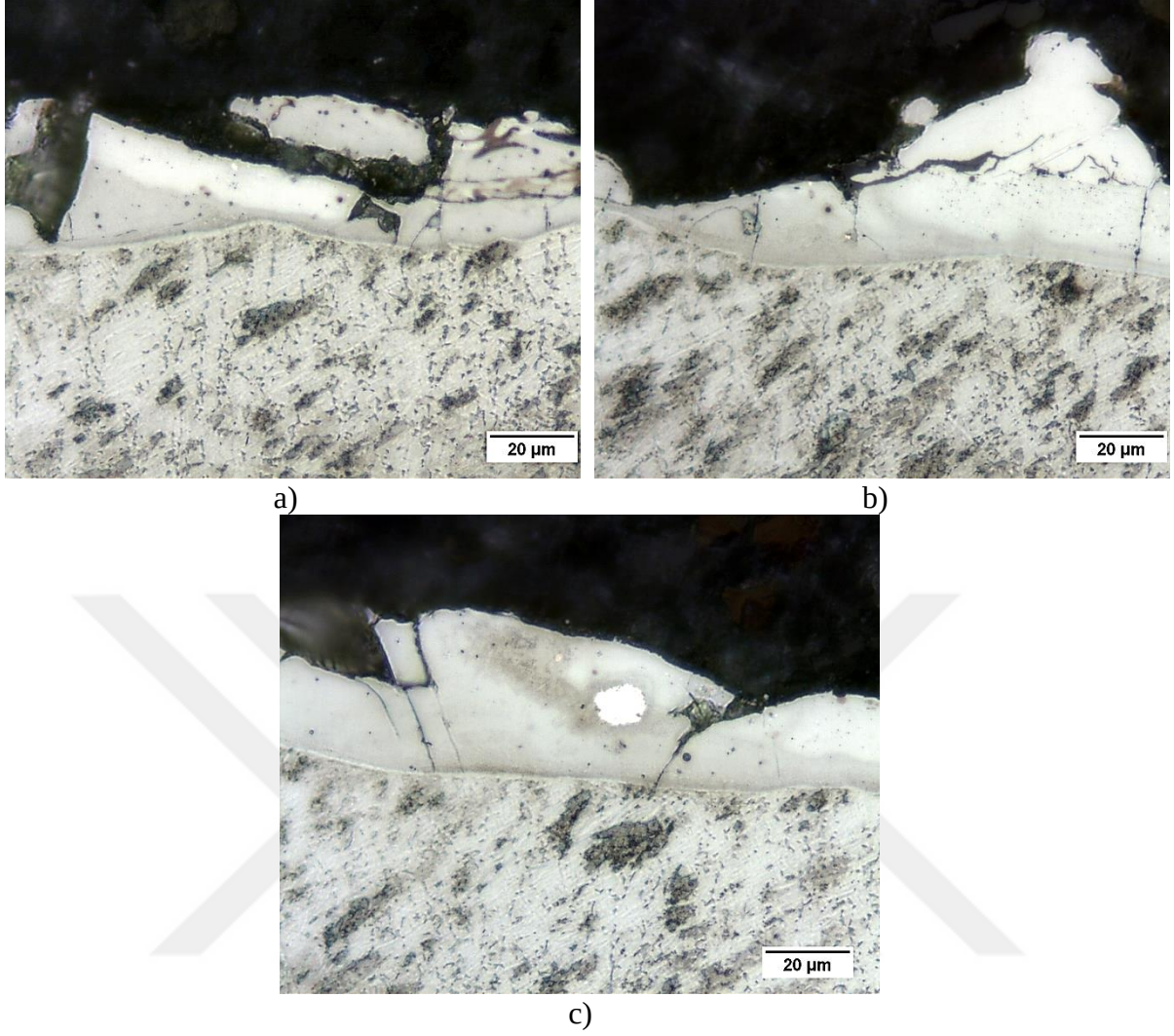
B takım elektrodu kullanılarak 100 µs darbe süresi ile işleme yapıldığında, 6 µs darbe süresi ile işlemeye göre YKK ve ısı etkilenmiş katman kalınlığında belirgin bir fark görülmemiştir. Ancak daha önce bahsedilen mikro yapıların belirgin şekilde yüzey katmanlarında yer aldığı görülmektedir (Şekil 4.24d). Şekil 4.28a’da kahverengi, siyah, koyu ve açık gri yapıların iç içe geçtiği karmaşık oluşumlar görülmektedir. Ardışık kıvılcımların etkisi ile üst üste binen kraterler paralel çatlaklarla ayrılmaktadır. Bu tür çatlaklar YKK içindeki farklı fazların termal genleşme katsayıları arasındaki farklılıklar sebebiyle oluşmaktadır. YKK’nin üstünde farklı

boyutlarda, gri ve kahverengi oluşumlar görülmektedir. Benzer yapıları temsil eden bir örnek Şekil 4.28b’de verilmiştir. Keskin köşelere sahip koyu gri yapılar YKK’nin üzerinde net bir biçimde fark edilebilmektedir. Ayrıca Şekil 4.28c’de farklı boyutlara sahip koyu gri, açık gri, kahverengi taneli yapılar en üst katmanda görülmektedir.



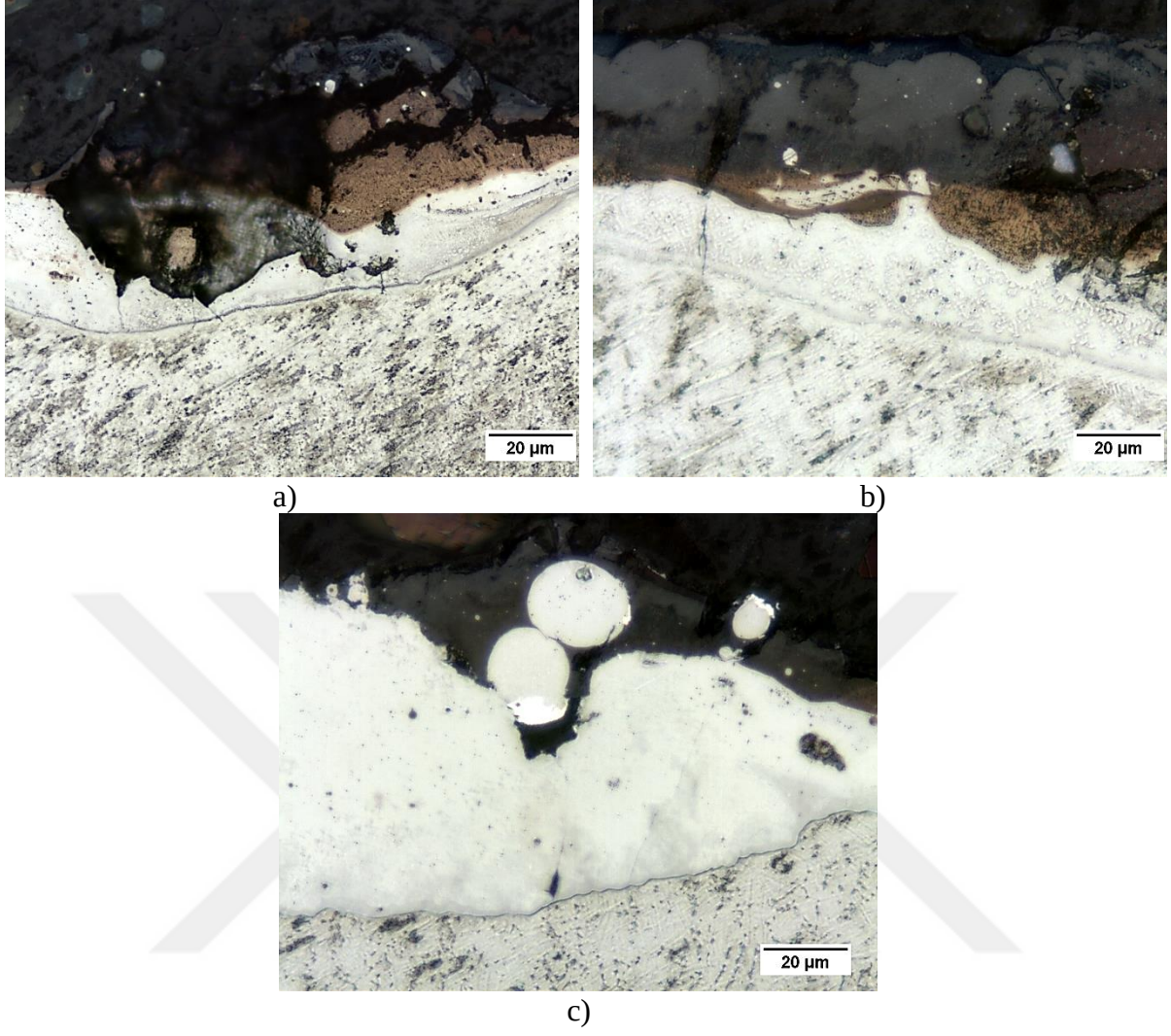
Şekil 4.28 Elektrot B kesit mikro yapısı (darbe süresi: 100 µs, 500X).

C takım elektrodu kullanılarak 6 µs darbe süresinde işlenmiş yüzeylerde ısı etkilenmiş katman yer yer belirginliğini yitirmiştir. YKK kalınlığı ve işlenmiş yüzeylerin mikro yapısı (Şekil 4.29a). B takım elektrodu kullanılarak 6 µs darbe süresi ile işlenen yüzeylere oldukça benzerdir (Şekil 4.24e). Takım elektrotta Ca-P oranının %35’e çıkması iş parçasına malzeme transferinin yoğunlaştırdığı Şekil 4.29b’de görülmektedir. Aynı şekilde YKK içinde parlak beyaz renkteki gümüş olduğu düşünülen yapı Şekil 4.29c’de görülmektedir.



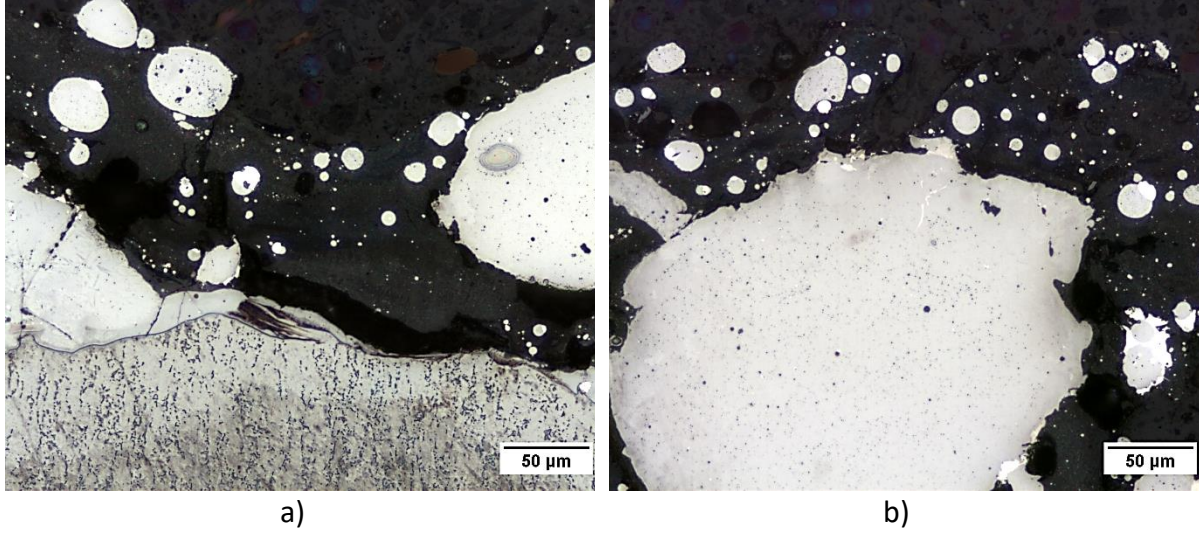
Şekil 4.29 Elektrot C kesit mikro yapısı (darbe süresi: 6 µs, 500X).

C takım elektrodu ile 100 µs darbe süresinde işleme sonucu yüzeyde YKK ve ısıl etkilenmiş katman kalınlıkları oldukça artmıştır (Şekil 4.24f). Kahverengi, siyah, koyu ve açık gri bölgeler çok daha geniş alanlara yayılmaktadır. Ayrıca dallanmış, siyah renkte bir mikro yapı kendini göstermektedir. En üst katmanda, koyu mavi bölgede iç içe geçmiş iğnemi yapılar görülmektedir (Şekil 4.30a). Bu katmanın altında koyu gri bölge ve hemen altında ise kahverengi ve siyah tonlarındaki bölgeler yer almaktadır. Kahverengi bölgelerin içlerinde dendritik yapılar görülmektedir. Ayrıca YKK ve ısıl etkilenmiş katmanlar arasında dendritik yapıda ince koyu bir ara katman yer almaktadır. YKK'nin iç bölümlerinde ise ardışık kıvrımların neden olduğu karmaşık dendritik mikro yapılar göze çarpmaktadır (Şekil 4.30b). Ayrıca, farklı boyutlarda daire benzeri beyaz ya da parlak beyaz tanecikler YKK içinde dağılmıştır (Şekil 4.30c).



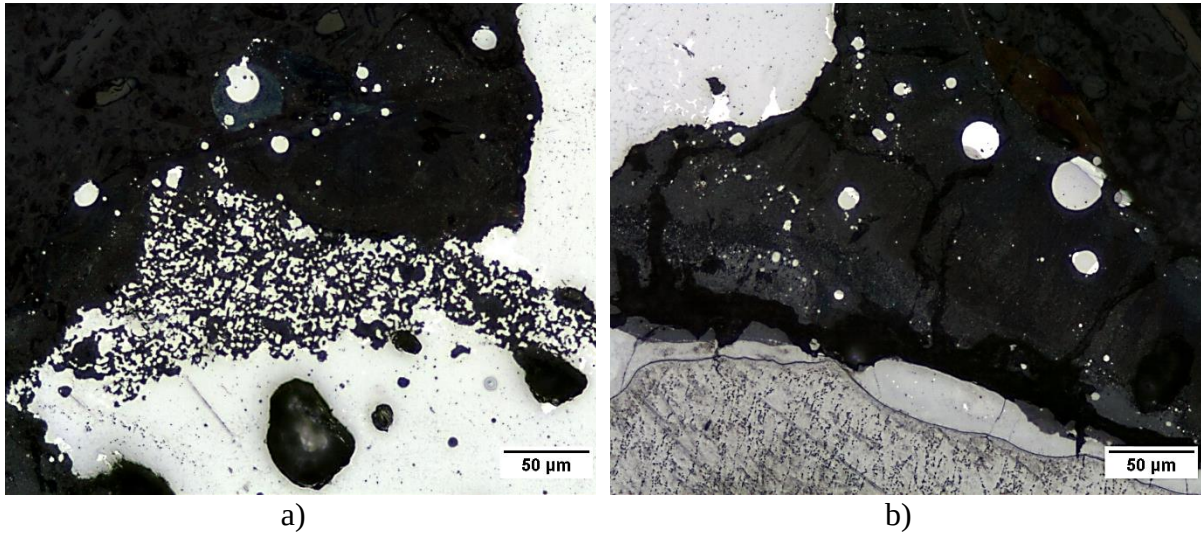
Şekil 4.30 Elektrot C kesit mikro yapısı (darbe süresi: 100 µs, 500X).

Ca-P oranının %50'ye çıkarıldığı D takım elektrodu kullanılarak 6 µs darbe süresi ile işleme yapıldığında YKK kalınlığı yaklaşık 400 µm'ye kadar ulaşmaktadır. YKK, koyu gri ve siyah yapı içinde dağılmış büyük şekilli beyaz yapılar görünümündedir. Beyaz görünümlü yapılar farklı boyutta küresel tanelerden oluşmaktadır (Şekil 4.24g). C takım elektrodu kullanılarak 100 µs darbe süresinde işlenen yüzeylere benzer yapılarla karşılaşılacaktır. Koyu gri yapı ışığı dağıtan, parlak olmayan mat bir görünüme sahiptir. Yapı içinde farklı boyutlarda düzenli dağılmış küresel taneler bulunmaktadır (Şekil 4.31a). Beyaz bölgelerin içinde koyu renkte farklı boyutlarda küresel tanecikler göze çarpmaktadır (Şekil 4.31b).



Şekil 4.31 Elektrot D kesit mikro yapısı (darbe süresi: 6 μ s, 200X).

100 μ s darbe süresi ile işleme yapıldığında YKK içinde büyük, şekilsiz beyaz tanelerin yoğunluğu artmıştır (Şekil 4.24h). Bunun dışında YKK, 6 μ s darbe süresi ile işlenen yüzeylerde oluşan katmanlarla benzerlik göstermektedir. Isıl etkilenmiş katman ile YKK arasında son derece belirgin, ince, koyu renkte bir ara yüzey mevcuttur. Ayrıca büyük beyaz yapılar içinde birbirine bağlı gözenekli oluşumlar görülebilmektedir (Şekil 4.32a). Gözeneklerin beyaz yapılar içinde dallanmış halde yer alan Ag'ün sahip olduğu düşük ergime ve buharlaşma sıcaklığı nedeniyle, işleme sırasında buharlaşarak ortamdan uzaklaşması nedeniyle oluştuğu düşünülmektedir (Şekil 4.32b).



Şekil 4.32 Elektrot D kesit mikro yapısı (darbe süresi: 100 μ s, 200X).



BÖLÜM 5

DEĞERLENDİRMELER

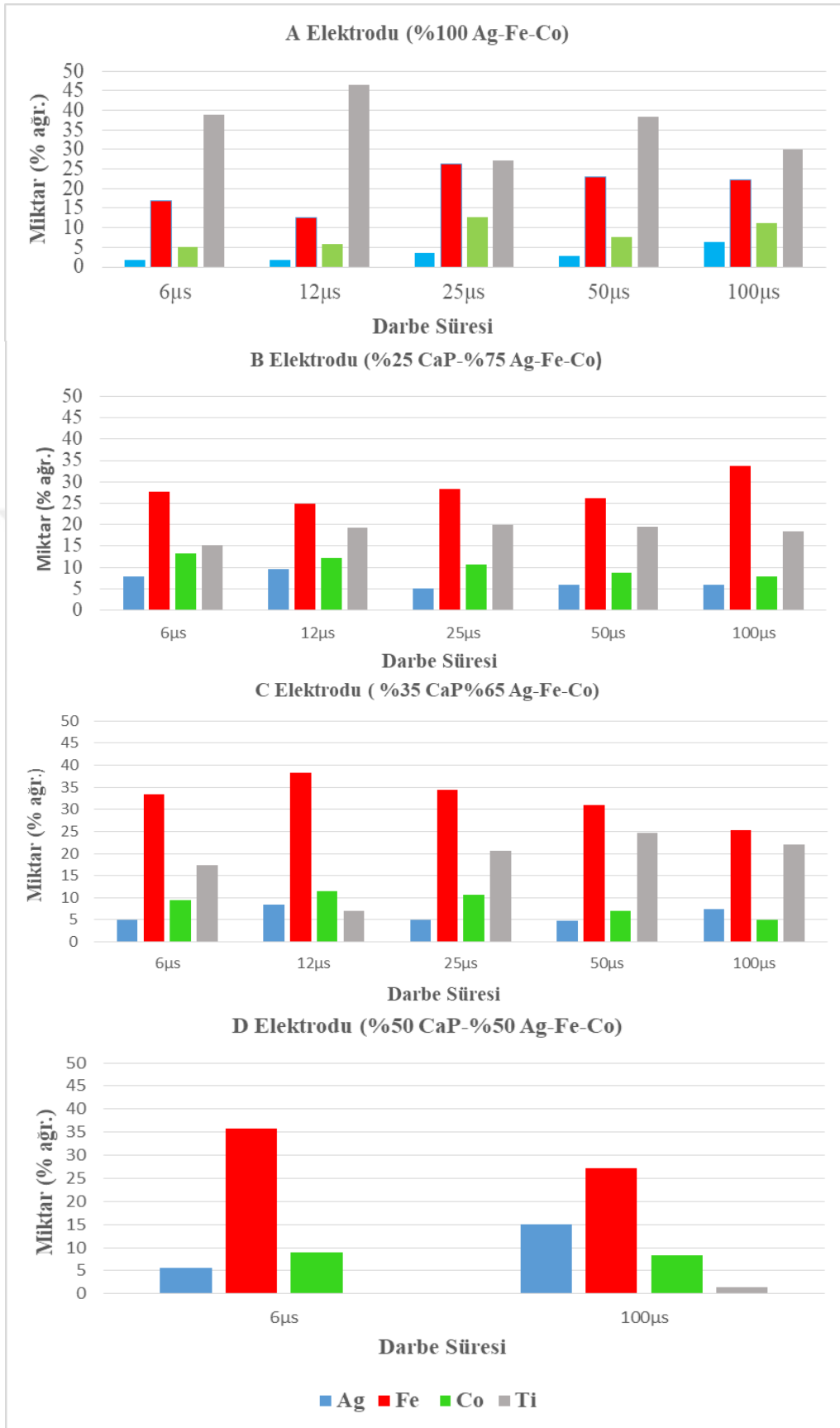
Bu bölümde malzeme transferinin parametrelere bağlı olarak ilişkisi ve YKK içinde oluşan mikro yapısal değişimler ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. İşlenmiş yüzeylere göç eden elementlerin ağırlıkça yüzdeleri dikkate alınarak takım elektrot, iş parçası ağırlık kayıpları ve işleme süreleri ilişkilendirilerek yorumlanmıştır. Yüzeye malzeme transferi sonucu oluşan mikro yapısal değişimler, SEM fotoğrafları ile birlikte elementel analizler ve XRD analizleri ile birlikte değerlendirilmiştir. EKİ ile işleme parametreleri ve işleme süresi Çizelge 5.1’de verilmiştir. Ayrıca yüzeydeki Ag, Fe, Co ve Ti’un yüzde ağırlıkça oranları elementel analizlerden alınarak grafik formunda sunulmuştur (Şekil 5.1, Şekil 5.2).

A takım elektrodu kullanılarak 6 μ s darbe süresi ile işleme yapıldığında takım elektrot ağırlık kaybı 0.05 g olmaktadır. Bu değer 12 μ s darbe süresi ile işlemeye göre daha yüksektir. Elektrodun gözenekli yapısı hatalı ölçümlere sebep olsada takım elektrotta ağırlık kayıpları işlenen yüzeye malzeme taşınımı açısından bilgi vermektedir. Takım elektrodun yüksek oranda aşınması deşarj aralığına işleme sırasında yüksek miktarda toz salınımına işaret etmektedir. Ayrıca takım elektrodu pozitif kutba bağlandığında elektronlar elektroda doğru yönelmektedir. Düşük darbe sürelerinde işleme yapıldığında, elektron bombardımanı yoğunluğu iyon bombardımanına göre daha yüksek seviyede olmaktadır. Düşük darbe süreleri ile çalışılırken takım elektrodundaki aşınma, yüksek seviyede elektron bombardımanından dolayı fazla olacaktır. İşleme sırasında darbe süresi artırıldığında plazma kanalı içinde iyon yoğunluğu da artacak ve büyük kütleli iyonlar malzeme kaldırma mekanizmasında rol alacaktır. 12 μ s darbe süresi kullanılarak yüzeyler işlendiğinde iyon yoğunluğu artarak iş parçası yüzeyine malzeme transferini sınırlandıracaktır. Sonuç olarak 12 μ s darbe süresi ile işleme yapıldığında 6 μ s darbe süresinde işlemeye göre takım elektrottan daha az malzeme transferi gerçekleşecektir. 25 μ s darbe süresi ile işleme yapıldığında yüzeyde (Şekil 5.3a) görülen beyaz yapılar Fe-Co içermektedir.

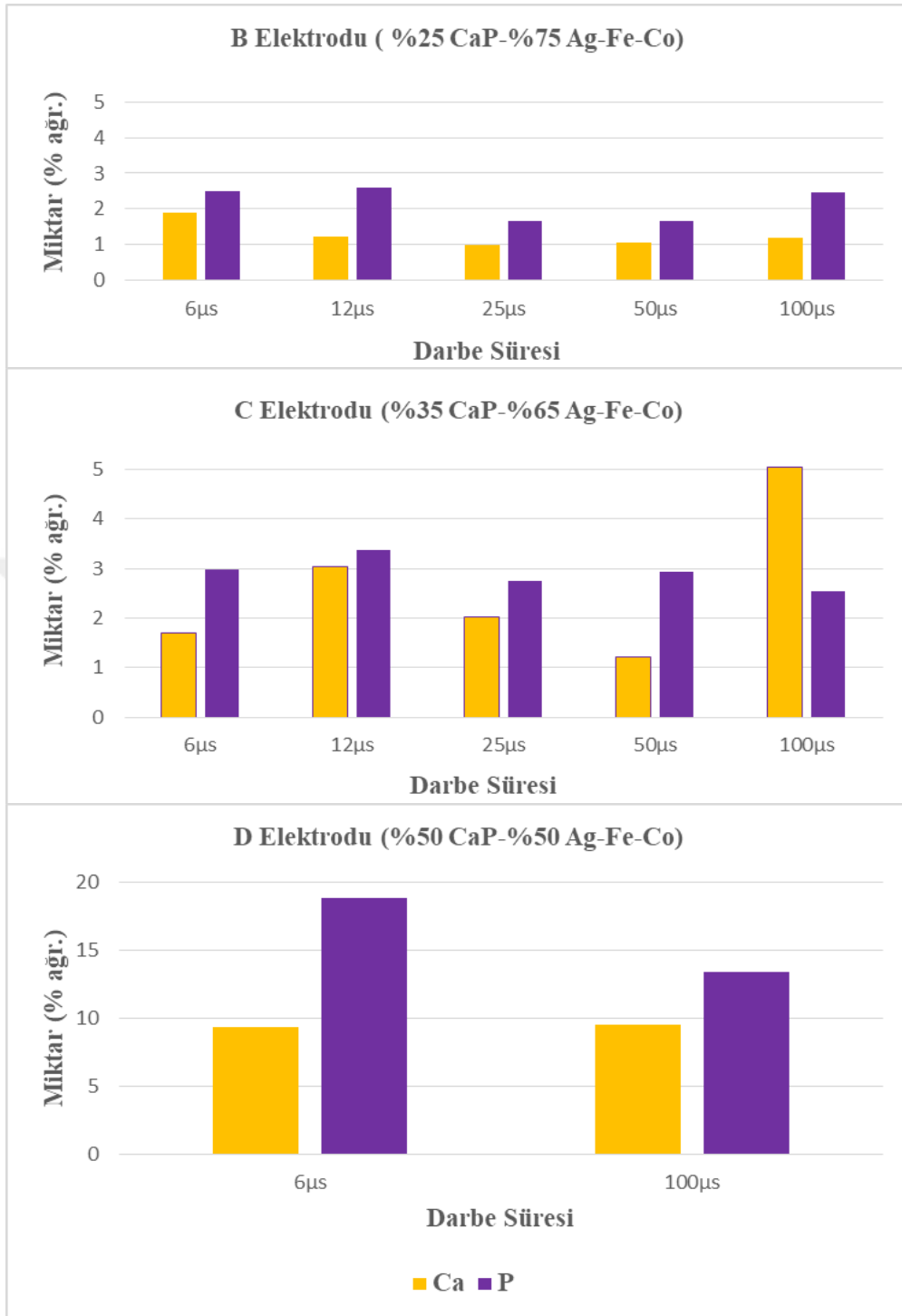
Ayrıca koyu gri çatlaklı bölgelerde Ti-Fe-Co elementlerinin ağırlıklı olarak yer aldığı tespit edilmiştir (Şekil 5.3b). İşleme sırasında takım elektrottan deşarj aralığına salınan malzeme iş parçası yüzeyinde Ti ile reaksiyona girerek Ti-Fe-Co intermetalik bileşikler oluşturmuştur. A takım elektrodu ile 6 ve 12 μ s darbe süreleri ile işleme yapıldığında yüzeylerde, krater kenarlarında yer alan koyu gri çatlaklı bölgelerin az miktarda oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.5 ve Şekil 4.6).

Çizelge 5.1 İşleme ile ağırlık değişimleri ve işleme süresi.

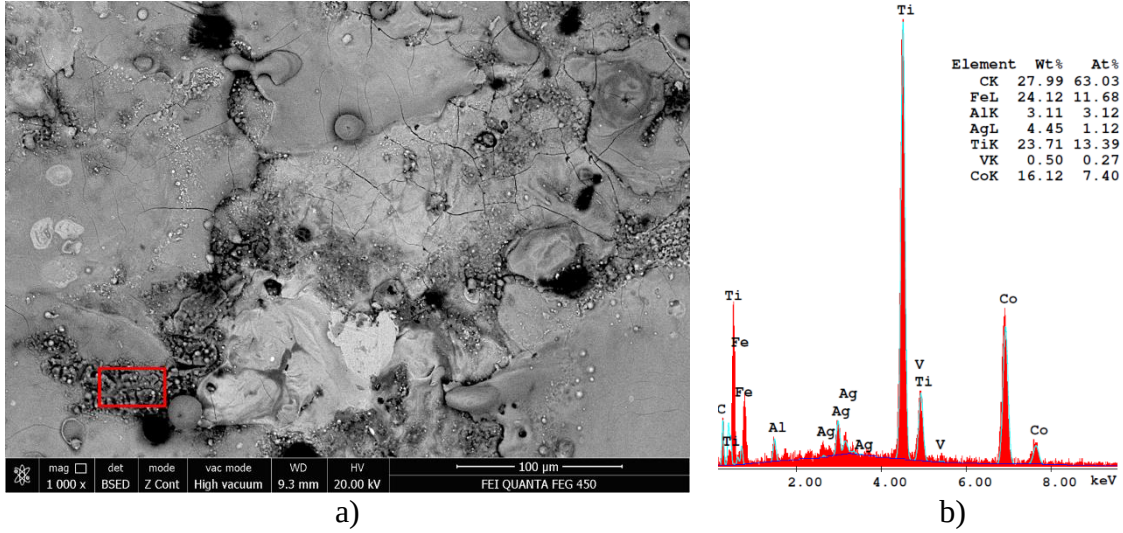
Elektrot tipi	Darbe süresi	Elektrot ağırlığı		İş parçası ağırlığı		İşleme süresi
		İşlem öncesi	İşlem sonrası	İşlem öncesi	İşlem sonrası	
A (%0 CaP-%100 Ag-Fe-Co)	6 μ s	5.64 g	5.59 g	3.21 g	3.17 g	10 dk. 35 sn.
	12 μ s	6.90 g	6.91 g	3.45 g	3.42 g	7 dk. 32 sn.
	25 μ s	5.73 g	5.63 g	3.45 g	3.41 g	7 dk. 55 sn.
	50 μ s	6.95 g	6.98 g	3.44 g	3.40 g	9 dk. 04 sn.
	100 μ s	5.95 g	5.90 g	3.51 g	3.42 g	16 dk. 39 sn.
B (%25 CaP- %75 Ag-Fe-Co)	6 μ s	4.77 g	4.74 g	3.32 g	3.27 g	6 dk. 55 sn.
	12 μ s	4.91 g	4.91 g	3.32 g	3.27 g	7 dk. 17 sn.
	25 μ s	4.95 g	5.05 g	3.36 g	3.34 g	5 dk. 24 sn.
	50 μ s	4.99 g	4.96 g	3.21 g	3.16 g	5 dk. 50 sn.
	100 μ s	4.62 g	4.53 g	3.28 g	3.24 g	6 dk. 10 sn.
C (%35 CaP- %65 Ag-Fe-Co)	6 μ s	6.10 g	6.12 g	3.29 g	3.24 g	10 dk. 31 sn.
	12 μ s	4.57 g	4.57 g	3.44 g	3.44 g	5 dk. 56 sn. (*)
	25 μ s	6.38 g	6.38 g	3.44 g	3.46 g	8 dk. 30 sn.
	50 μ s	6.59 g	6.49 g	3.22 g	3.19 g	11 dk. 06 sn.
	100 μ s	6.00 g	5.90 g	3.27 g	3.24 g	19 dk. 51 sn.
D (%50CaP- %50 Ag-Fe-Co)	6 μ s	4.96 g	4.75 g	3.46 g	3.56 g	43 dk. 27 sn.
	100 μ s	4.75 g	4.50 g	3.45 g	3.56 g	105 dk.



Şekil 5.1 EKİ yüzeylerinin Ag-Fe-Co-Ti elementel dağılımları (%Ağırlıkça).



Şekil 5.2 EKİ yüzeylerinin Ca-P elementel dağılımları (%Ağırlıkça).



Şekil 5.3 Çatlaklı koyu gri bölge (Elektrot A, darbe süresi: 25 µs), a) SEM-BSED görüntüsü (1000X), b) İşaretli alanın EDS analizi.

İşleme 25 µs darbe süresi ile yapıldığında ise yüzeyde koyu gri görünümlü yapılar artmıştır (Şekil 5.1). 6 ve 12 µs darbe sürelerinde işleme yapıldığında takım elektrottan aşınan malzemenin plazma kanalı etrafında manyetik alan etkisiyle yoğunlaşarak, darbe süresinin sonunda plazma kanalının kapanmasıyla oluşan negatif basınç etkisiyle ergiyik yüzeye hücum ederek alaşımlamanın gerçekleştiği öngörülmektedir. T/M ile üretilen elektrotlar katı elektrotlara göre taneler arasında daha zayıf bağlarla bağlanmıştır ve daha yüksek yoğunlukta boşluklar içermektedir. Yüksek deşarj enerjisi ile işleme yapıldığında takım elektrot bileşenlerinin birbirlerine zayıf bağlanma mukavemeti, işleme sırasında deşarj aralığına daha fazla miktarda takım elektrot malzemesinin salınımı ile sonuçlanacaktır. Takım elektrottan salınan malzemeyle yalıtım direnci düşen dielektrik sıvı kıvılcımların kümelenmesine yol açacaktır. 25 µs darbe süresiyle işleme yapıldığında A takım elektrodu aşınmasının 0.10 g ile en yüksek değere ulaştığı görülmektedir (Çizelge 5.1). İşleme süresi takım elektrottan salınan büyük taneleri aşındırmak için geçen zaman sebebiyle artmıştır. İşleme sırasında kullanılan yüksek darbe süreleri, yoğun ve büyük taneler halinde takım elektrot malzemesinin deşarj aralığına salınımı ile sonuçlanacaktır. Dielektrik sıvı sirkülasyonunun yetersiz kalmasıyla kararsız işleme koşulları işleme süresini arttıracaktır. Deşarj enerjisinin artışı elektrotla iş parçası arasında aşındırma etkisinin de artışıyla takım elektrottan malzeme transferi sınırlanacaktır (Şekil 5.1). Ayrıca, yüksek darbe süreleriyle birlikte artan kararsız işleme koşulları takım elektrot malzemesinden taşınımı sınırlayabilmektedir. Sonuç olarak, darbe süresinin belirli optimum değere kadar artışıyla işleme sırasında yüzeye malzeme taşınımı kolaylaşacaktır. Ancak, optimum darbe süresinden sonra deşarj enerjisinin aşındırıcı etkisi yüzeye malzeme transferini sınırlandırılacaktır.

EKİ’de en yüksek seviyede yüzeye malzeme transferi 25 μ s darbe süresinde A takım elektrodu kullanıldığında elde edilmiştir. 50 ve 100 μ s darbe süreleri kullanıldığında nispeten karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmiştir. A elektrodu kullanılarak 100 μ s darbe süresi ile işlenmiş yüzeylerde Ag miktarı en fazla olmaktadır. Ag ve diğer elementler için fiziksel özellikler Çizelge 3.11’de verilmiştir. Bu çizelgeye göre elektrot bileşiminde Ag en düşük ergime ve buharlaşma sıcaklığına sahiptir. Ayrıca ısı iletkenlik katsayısı en yüksek elementtir. İşleme sonunda yüksek sıcaklıkta daha yüksek basınca sahip olması nedeniyle yüzeyden daha kolay uzaklaşacaktır. Ancak darbe enerjisinin artması plazma kanalını genişleterek enerji yoğunluğunu azaltacaktır. Deşarj kanalının etki ettiği yüzey alanının artışı ısının hızla yayılmasıyla sonuçlanacaktır. Böylelikle Ag’ün yüzeyde kalma ihtimali artacaktır.

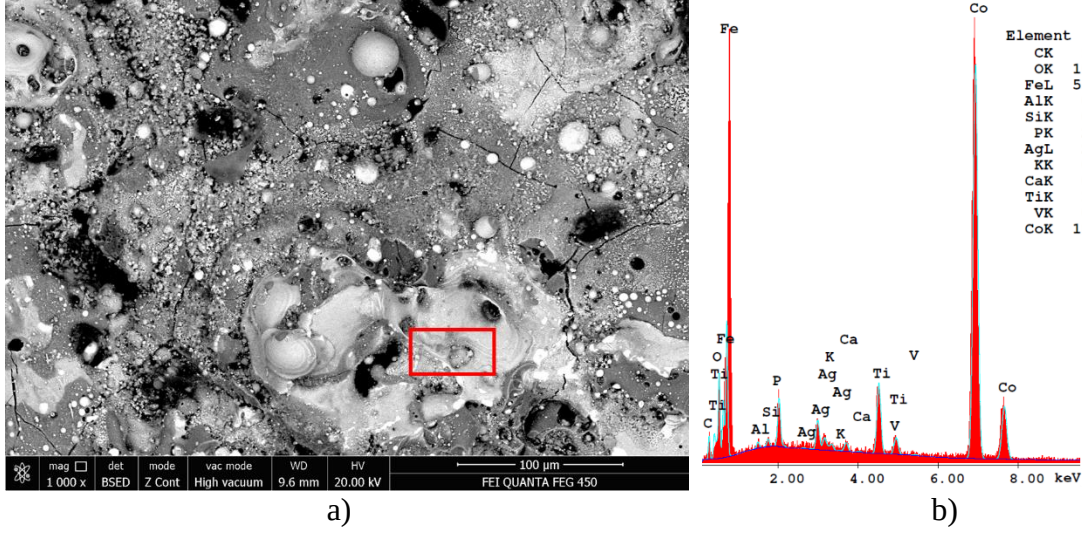
Ag-Fe-Co matrisine %25 CaP ilavesi ile üretilen takım elektrotların birleşimindeki tanelerin bağlanma mukavemetleri saf Ag-Fe-Co takım elektroda göre daha düşüktür. Sert CaP taneleri matrisin plastik deformasyonunu kısıtlayarak bağlanma mukavemetini düşürecektir. Ayrıca CaP’in elektriksel ve termal iletkenliği diğer matris elementlerine göre düşüktür. Sonuç olarak takım elektrodun elektriksel iletkenliği düşeceğinden işleme sırasında kıvılcım atma aralığı azalacaktır. Buna karşılık işleme sırasında takım elektrottan daha kolay malzeme salınımı gerçekleşecektir. Takım malzemesinin sahip olduğu metalik tozlar dielektrik sıvının yalıtım direncini düşürerek deşarj aralığını genişletecektir. Ancak aşırı toz yoğunluğunun, dielektriğin yıkama kabiliyetini düşüreceği ve kararsız koşulları oluşturacağı unutulmamalıdır. B takım elektrodu kullanılarak 6 μ s darbe süresi ile işlenen yüzeylerin büyük bir bölümü koyu gri, çatlaklı yapılarla kaplıdır. İlginçtir ki tüm darbe sürelerinde krater kenarlarında görülen bu yapılar B takım elektrodu kullanılarak 6 μ s darbe süresinde işlenen yüzeylerde krater içlerinde de görülmektedir. XRD analizlerinden yüzeydeki baskın fazın FeTi-CoTi intermetalik bileşiklerinin oluşturduğu tespit edilmiştir. Kesit mikro yapıları incelendiğinde ısı etkilenmiş ve YKK’nin A takım elektrodu kullanılarak 100 μ s darbe süresi ile işlenmiş yüzeylerle karşılaştırılabilir olması ikincil kıvılcım oluşumlarına işaret etmektedir. Ekmekçi vd. (2016) deşarj bölgesinde toz tanelerinin düzenli elektriksel alanı bozarak plazma kanalının alt enerji düzeylerine böldüğünü belirtmiştir. Plazma kanalı alt enerji düzeylerine bölünmüş birden fazla deşarj kanalı şeklindedir. Bölünmüş plazma kanallarının etrafında sıkışan tozlar, darbe süresi sonunda negatif basınç etkisiyle ergiyik yüzeylere hücum edecektir [6]. Plazma kanalının alt enerji düzeylerine ayrılması, kaynayan malzemenin püskürme basıncını da düşürecektir. Böylelikle ergiyik bölgeden uzaklaşamayan malzeme katılarak yüksek kalınlıktaki YKK oluşacaktır. Fe-Co’nın sahip olduğu manyetik özellikler plazma kanalı etrafında elektrottan

kopan toz yoğunluğunu artırarak ikincil kıvılcım oluşmasını kolaylaştıracaktır. Darbe süresi 12 μ s'ye çıktığında takım elektrottan malzeme transferi kısmen azalmıştır (Şekil 4.2b) Yüzeylerde büyük ölçülü krater oluşumları kararsız işleme koşullarına işaret etmektedir. Darbe süresinin artmasıyla deşarj bölgesinde oluşan aşırı toz yoğunluğu ark gibi kararsız deşarjlardan sorumludur ve malzeme transferini azaltmıştır. Ancak yer yer kararsız koşullar olsa da krater içlerinde oluşan malzeme transferi, ikincil kıvılcımların varlığını 12 μ s darbe süresi ile işleme için de onaylamıştır. 12 μ s darbe süresi için işleme süresinin 6 μ s darbe süresindeki işlemeye göre artması kararsız koşulları desteklemektedir. 25 μ s darbe süresi ile işlemede artık ikincil kıvılcımların etkisi yok olmuştur ve yüksek deşarj enerjisi ile malzeme kaldırma etkisi artmıştır. Buna rağmen deşarj bölgesindeki yüksek toz konsantrasyonu ve yüksek manyetik özellikler malzeme transferinin daha düşük darbe sürelerine göre karşılaştırılabilir olmasını sağlamıştır. Yüksek deşarj enerji seviyelerindeki işleme koşulları, işleme süresini de kısaltmıştır. Ayrıca 25 μ s ve daha yüksek darbe enerjileri ile işlemede çatlaklı koyu gri bölgeler, yeniden krater kenarlarında görülmektedir (Şekil 4.12). Malzeme transferi ise daha önce bahsedilen nedenlerle hala yüksek seviyelerdedir. 100 μ s darbe süresi ile işlenmiş yüzeylerin XRD desenlerindeki pik yoğunlukları ve katman kalınlıkları 6 μ s darbe süresi ile işlenmiş yüzeylerle benzerdir.

Elektroda CaP (düşük elektriksel iletkenlik sebebiyle) ilavesi ile elektriksel iletkenliği düşen elektrotla iş parçası işlendiğinde kıvılcım atma aralığı azalacaktır. Buna karşılık toz partiküllerin daha zayıf bağlanma mukavemeti ve daha düşük elektriksel ve termal iletkenlik sebebiyle elektrottan daha fazla malzeme salınacaktır. Böylelikle deşarj bölgesindeki dielektrik içindeki asılı kalan tozlar kıvılcım atma boşluğunu artıracaktır. Sonuç olarak deşarj bölgesinde uygun toz konsantrasyonu sağlandığında ikincil kıvılcımlar oluşacaktır. Bu nedenlerle B elektrodu için tüm darbe sürelerinde malzeme transferi A elektroduna göre daha yüksektir (Şekil 5.1). B elektrodu için yüzeyde en fazla Fe miktarı 100 μ s darbe süresiyle işlendiğinde olmaktadır. Co için ise en yüksek malzeme transferi 6 μ s darbe süresi ile işleme için geçerlidir (Şekil 4.10). Darbe süresi arttıkça yüzeyde biriken Co miktarı düşmüştür. Azalan Co miktarı ile birlikte yüzeydeki çatlak ağlarıyla örülü koyu gri bölgeler daha açık renkte görülmektedir (6 μ s için Şekil 4.10 ve 100 μ s için Şekil 4.14). Bu durum darbe süresinin artmasıyla daha düşük ergime ve buharlaşma noktalı Co esaslı bileşiklerin oluşması için yeterli süre sağlanması ile mümkündür ve deşarj sonunda deşarj bölgesinden kolaylıkla uzaklaşması ile oluşmaktadır. Deiyonize su içindeki O ile reaksiyona giren Co düşük ergime ve buharlaşma noktasına sahip CoO oluşumu buna bir örnek olabilir. Yüzeyde Ag miktarının en fazla olduğu darbe süresi sırasıyla 12 μ s ve 6 μ s'dir. Daha önce de bahsedildiği gibi püskürme basıncının düşmesi

yüzeyde Ag miktarını artırabilmektedir. 6 μ s ve 12 μ s darbe süreleri ile işlenmiş yüzeylerdeki yüksek Ag miktarları ikincil kıvılcımların oluşumunu yeniden onaylamıştır. Ca ve P bakımından ise en zengin yüzeyler sırasıyla 6 μ s, 12 μ s ve 100 μ s darbe sürelerinde işleme ile olmaktadır. 25 μ s ve 50 μ s darbe süresi ile işleme için tekil kıvılcımların aşındırıcı etkisinden dolayı malzeme transferi düşmüştür. 100 μ s darbe süresi ile işlemede plazma kanalı genişleyerek deşarj gücü azalmış böylelikle malzeme transferi artmıştır.

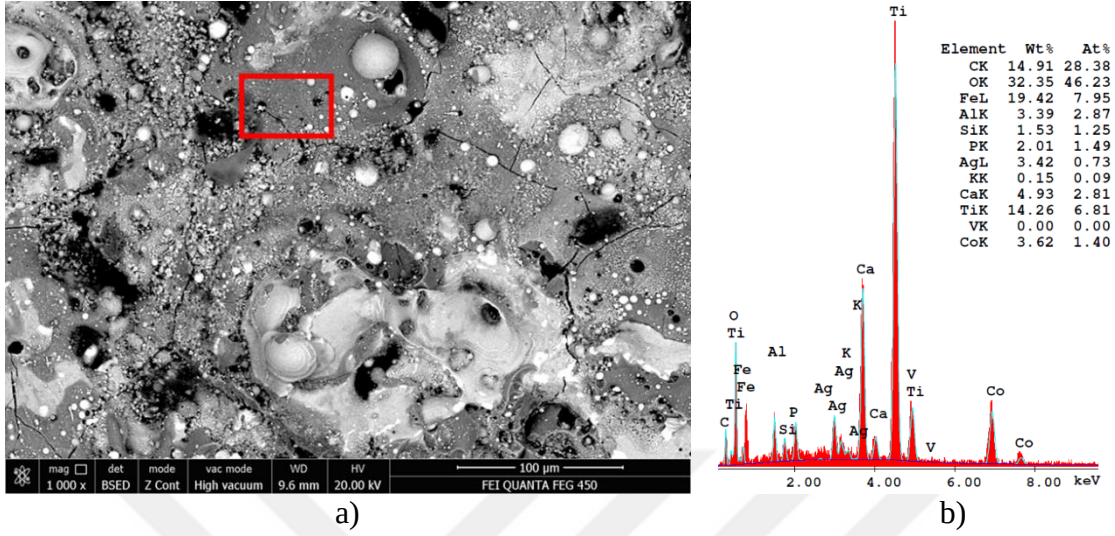
C elektrodu için 6 μ s darbe süresi ile işlenmiş yüzeyler, B elektrodu ve 12 μ s darbe süresi ile işlenmiş yüzeylere benzerdir. Burada da krater içlerinde malzeme transferi ve kararsız koşulları destekleyen büyük ölçülü kraterler görülmektedir. CaP oranının %35'e çıkması aşırı toz konsantrasyonunun olduğu darbe süresini azaltmıştır. Farklı bir deyişle yukarıdaki açıklanan nedenlerle elektrottan salınan malzeme miktarı CaP oranının artmasıyla artmıştır. Bu durum işleme süresinin B elektrodu 6 μ s darbe süresinde işlemeye göre artmasıyla da teyit edilmiştir. Darbe süresi 12 μ s'ye çıktığında ise yüzey topoğrafik olarak farklılaşmakta ve kaba görünüm sergilemektedir. Ag-Fe-Co matrisi ve CaP takviyesinin termal genleşmesinin farklılıkları ardışık kıvılcımların termal çevrimi etkisiyle elektrottan büyük parçalar şeklinde malzeme kopmasına neden olmuştur. Elektrodun bağıl hareketi ve dielektrik akışkanın yetersiz yıkama kabiliyeti sayesinde iş parçası yüzeyine düşen bu parçalar yüksek elektriksel alan yoğunluğu sebebiyle kıvılcım atma noktalarını oluşturmuştur ve aynı noktada kıvılcım kümelenmeleri meydana gelmiştir. Deşarj sırasında büyük parçalar elektrottan kopmaya devam etmiş ve elektrodun ve dielektriğin bağıl hareketi ile iş parçası yüzeyinin farklı bir noktasına transfer olarak kıvılcım atma noktaları için farklı bölgeler oluşturmuştur. Bu bölgelerin EDS analizlerinde elektrottan kopan Fe ve Co ağırlıklı malzemeler olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.4). Böylelikle çoğunlukla elektrodun aşınması gerçekleşmiştir. Aşınan elektrot malzemesi iş parçası yüzeyini deşarj enerjisinin etkisiyle alaşımlamış ve/veya kaplamıştır.



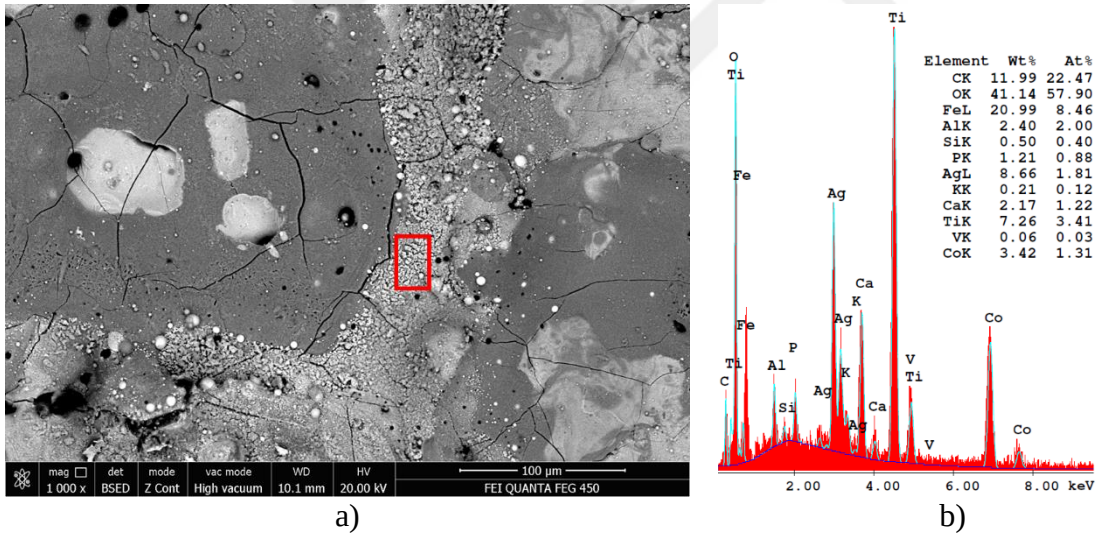
Şekil 5.4 Beyaz renkte keskin sınırlarla ayrılmış bölge (Elektrot C, darbe süresi: 12 μ s), a) SEM-BSED görüntüsü (1000X), b) İşaretli alanın EDS analizi.

12 μ s darbe süresinden sonra 25 μ s ve 50 μ s darbe süreleri için malzeme kaldırma mekanizması baskın hale gelmiş ve yüzeye transfer olan malzeme miktarını sınırlandırmıştır. Ag için en yüksek miktarlar 12 μ s ve 100 μ s darbe süreleriyle işlenmiş yüzeylerde bulunmuştur. İşleme sonunda oluşan beyaz bölgelerin Fe, Co ve P yönünden, çatlaksız koyu gri bölgelerin ise Ca, Ti ve Fe bakımından zengin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 5.5). Sonuçlar bize deşarj enerjisinin etkisiyle elektrot bileşimindeki CaP fazının bozulduğunu ve ortamdaki elementlerle farklı fazlar oluşturduğunu göstermektedir. Ayrıca yüzeylerdeki beyaz bölgeler detaylı bir şekilde ele alındığında ikincil kıvılcım oluşumlarını destekleyen iç içe geçmiş krater yapıları onaylanmıştır (Şekil 5.4). Darbe süresi 100 μ s'ye çıktığında işlenmiş yüzeyler 12 μ s darbe süresiyle işlenmiş yüzeylere oldukça benzemektedir. Yüksek darbe süresinde artan deşarj alanı ile azalan deşarj gücü ve hızlı soğuma, malzeme kaldırma etkisini düşürecektir. Böylelikle yüzeydeki malzeme transferi artacaktır. C elektrodu için Ca bakımından en yüksek miktar 100 μ s darbe süresi ile işlenmiş yüzeylerde bulunmuştur. P için en yüksek miktar 12 μ s darbe süresi için geçerlidir. Ag için bakıldığında ise en yüksek miktar sırasıyla 12 μ s ve 100 μ s darbe sürelerinde tespit edilmiştir (Çizelge 5.2). Bu durum ikincil kıvılcımların etkisi ve plazma kanalının genişlemesiyle açıklanabilmektedir. Ayrıca parlak beyaz renkteki yapılar incelendiğinde Ag olduğu teyit edilmiştir (Şekil 5.6). XRD analizlerine bakıldığında ise yüzeylerdeki HA oluşumu ve Ca-P'un Fe ve Ti ile yaptığı bileşikler ait oldukları açılardaki pik şiddetlerinden fark edilebilmektedir. Bu darbe süresi için Ca/P oranı 1.54 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 5.2). Bu değer tüm işleme parametreleri içinde HA'e (1.67) en yakın değerdir. C elektrodu, 100 μ s darbe süresinde işlenmiş yüzeyler için daha önce FeTi-CoTi olan ana fazın yerini FeCo ve FeTi-CoTi

bileşikleri almıştır. Ek olarak Ag pik yoğunluğu da artış göstermektedir (Şekil 4.23). Tüm bu bulgular artan malzeme transferini onaylamaktadır.



Şekil 5.5 Çatlaksız koyu gri bölge (Elektrot C, darbe süresi: 12 μ s), a) SEM-BSED görüntüsü (1000X), b) İşaretli alanın EDS analizi.



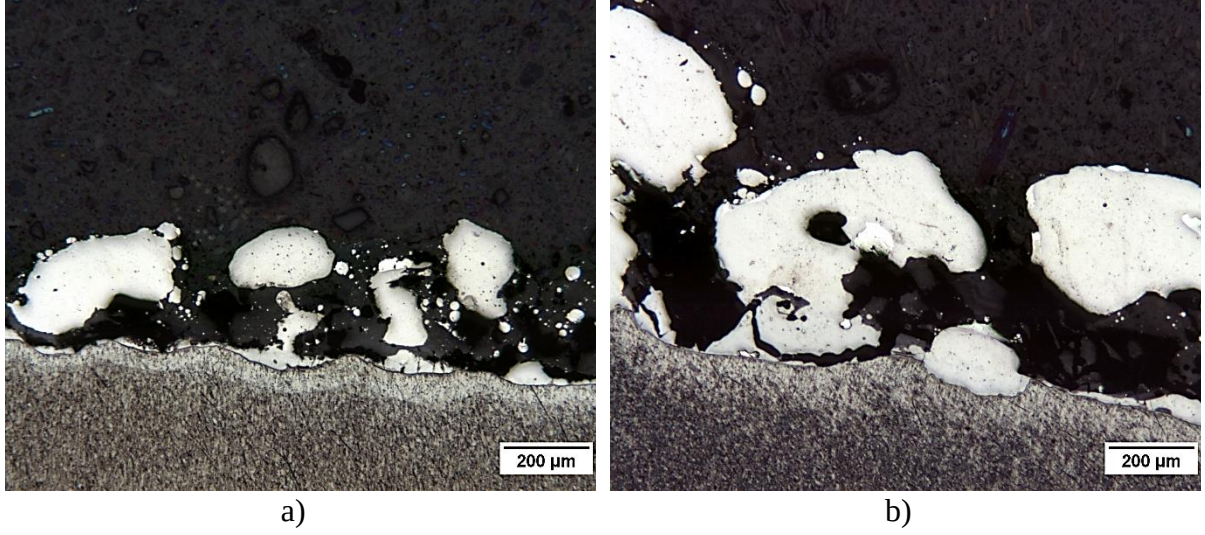
Şekil 5.6 Parlak beyaz bölge (Elektrot C, darbe süresi: 100 μ s), a) SEM-BSED görüntüsü (1000X), b) İşaretli alanın EDS analizi.

Çizelge 5.2 İşleme parametrelerine göre elementel dağılım.

Elektrot Türü	Element	Darbe Süresi				
		6 μ s	12 μ s	25 μ s	50 μ s	100 μ s
A (%100 Ag-Fe-Co)	Ag (%ağr.)	1.76	1.87	3.58	2.73	6.28
	Fe (%ağr.)	16.86	12.57	26.28	22.95	22.11
	Co (%ağr.)	5.09	5.85	12.82	7.72	11.31
	Ca (%ağr.)	-	-	-	-	-
	P (%ağr.)	-	-	-	-	-
	Ca/P (%at)	-	-	-	-	-
	Ti (%ağr.)	38.99	46.49	27.21	38.29	29.96
B (%25 CaP-%75 Ag-Fe-Co)	Ag (%ağr.)	7.99	9.68	5.09	5.97	5.91
	Fe (%ağr.)	27.6	24.85	28.31	26.27	33.64
	Co (%ağr.)	13.31	12.13	10.71	8.66	7.87
	Ca (%ağr.)	1.9	1.22	0.98	1.06	1.18
	P (%ağr.)	2.48	2.61	1.66	1.67	2.47
	Ca/P (%at)	0.59	0.36	0.45	0.49	0.37
	Ti (%ağr.)	15.12	19.35	20.05	19.56	18.51
C (%35 CaP-%65 Ag-Fe-Co)	Ag (%ağr.)	5.01	8.36	5.03	4.82	7.42
	Fe (%ağr.)	33.47	38.23	34.36	31.02	25.23
	Co (%ağr.)	9.46	11.45	10.56	6.97	5.05
	Ca (%ağr.)	1.69	3.03	2.02	1.21	5.05
	P (%ağr.)	2.99	3.37	2.74	2.94	2.53
	Ca/P (%at)	0.44	0.69	0.57	0.32	1.54
	Ti (%ağr.)	17.40	6.92	20.66	24.58	21.95
D (%50 CaP-%50 Ag-Fe-Co)	Ag (%ağr.)	5.59				14.95
	Fe (%ağr.)	35.78				27.25
	Co (%ağr.)	9.04				8.23
	Ca (%ağr.)	9.35				9.49
	P (%ağr.)	18.85				13.41
	Ca/P (%at)	0.38				0.54
	Ti (%ağr.)	0.21				1.52

(EDS analizlerinden düzenlenmiştir).

Elektrot bileşimindeki CaP oranının %50'ye çıkması ile düşük darbe enerjilerinde de elektrottan büyük parçalar halinde iş parçası yüzeyine malzeme transferi olduğu görülmüştür. Elektrottaki malzeme kaybının (0.21 g) ve iş parçasının ağırlığındaki artışın (0.10 g) artan malzeme transferinin göstergesidir. CaP oranının %50'ye yükselmesi, düşük genleşme miktarlarında oluşan gerilmelerin bile partiküller arasındaki bağlanma mukavemetini aşmasına ve takım elektrodundan büyük boyutta parçaların kopmasına neden olacaktır. Büyük parçalar dielektriğin yıkama basıncını düşürerek işleme atıklarının uzaklaşmasını zorlaştıracaktır. Deşarj aralığındaki büyük parçaların bariyer etkisi ve artan viskoz kuvvetlerin etkisi dielektrik akışkan basıncının düşme nedenlerindendir. Sonuç olarak kararsız koşullar işleme süresini oldukça artırmıştır (Çizelge 5.1). Artık yüzeyde ana malzeme bileşenine rastlanmamakta ve yüzeyler neredeyse elektrot bileşimindeki malzemelerden oluşmaktadır (Şekil 5.1). CaP partiküllerinin boyutu ve matris içindeki homojen dağılma durumunun yüzey pürüzlülüklerini etkileyeceği düşünülmektedir. Darbe süresi 6 μ s olduğunda Ca ve P miktarı 100 μ s'ye göre daha yüksek bulunmuştur. Ag miktarı ise daha önceki işleme koşullarına benzer olarak 100 μ s darbe süresiyle işlenmiş yüzeylerde daha yüksektir. Ancak deşarj koşullarının kararsız olması ve/veya her bir kıvılcımın deşarj enerjilerinin farklılaşması, işleme parametrelerini malzeme transfer mekanizması ile ilişkilendirmeyi zorlaştırmaktadır. Yine de topografik olarak yüzeyler incelendiğinde 6 μ s ve 100 μ s darbe süreleriyle işlenmiş yüzeyler oldukça gözenekli ve pürüzlü yapıya sahiptir. Kesit analizlerine bakıldığında darbe süresinin artmasıyla kopan partikül büyüklüğünün arttığı görülmektedir (Şekil 5.7). XRD analizlerinden ise ana fazın her iki darbe süresi içinde tamamen FeCo alaşımından oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca pik şiddetlerinin ana faz pik şiddeti ile kıyaslanarak yapılan değerlendirmeler sonucunda darbe süresinin 100 μ s'ye çıkması ile Ag pik şiddetinin arttığı, CaP bileşiklerinin pik şiddetlerinin azaldığı onaylanmıştır. D elektrodu için beyaz bölgelerin Fe ve P ağırlıklı bölgeler olduğu tespit edilmiştir. Yüzeyde baskın olan koyu gri bölgenin ise Fe, Co, Ca ve P'dan oluştuğu EDS analizlerinden teyit edilmiştir. P'un Fe içindeki çözünmesi Fe'in Co çözünürlüğünü azalttığı düşünülmektedir.



Şekil 5.7 Elektrot D kesit fotoğrafı, darbe süresi a) 6 μ s, b) 100 μ s (50X).

5.1 SONUÇLAR

Bu tez çalışmasından derlenen sonuçlar maddeler halinde sunulmuştur:

- ✓ Elektrottaki CaP oranı arttıkça elektrot bileşimindeki elementler yüzeye daha fazla transfer olmuştur.
- ✓ Ag bakımından iş parçası yüzeyine malzeme transferi için en iyi şartlar ikincil kıvılcımların etkili olduğu darbe süreleri B elektrodu 12 μ s (9.68), C elektrodu 12 μ s (8.36) ve B elektrodu 6 μ s (7.99)'dir. Ayrıca deşarj gücünün azaldığı yüksek darbe süreleri (100 μ s) Ag transferi için uygun şartlardır.
- ✓ Elektrot bileşimindeki CaP oranının artmasıyla yüzeye Ca ve P transferi de artmıştır.
- ✓ Darbe süresinin artmasıyla Co miktarı azalma eğilimindedir.
- ✓ C elektrodu 100 μ s ile işlenmiş yüzeylerde kemik benzeri HA yapı bulunmuştur. Diğer tüm şartlarda CaP yüksek deşarj enerjisi sebebiyle bozunmuştur.
- ✓ Elektrottaki CaP konsantrasyonu %50'ye çıktığında yüksek pürüzlü yüzeyler ve yüksek işleme süresine rağmen, topografik olarak iç içe geçmiş yapılar ve mikro yapısal olarak CaP bileşikler yüzeylerde var olmaktadır. Ayrıca bu elektrotta yüzey tamamen kaplanmış ana faz FeCo olmuştur. FeO bulunmaması yapıdaki Ca'un oksijene olan afinitesiyle (reaksiyona girme eğilimi) ilişkilendirilmiştir.

- ✓ C takım elektrodu ve 100 μ s darbe süresi ile işlendiğinde ısı etkilenmiş katman kalınlığı en yüksektir. YKK kalınlığı için ise D takım elektrodu ve 100 μ s darbe süresi ile işlendiğinde en yüksek olmaktadır.
- ✓ Yüzeyde Ti-6Al-4V malzemesinin EKİ ile işlenmesinden sonra yüzeylerde V elementinin ihmal edilebilir seviyedeki azlığı ve Al elementinin yüksek seviyelerdeki varlığı Fe elementinin β -Ti oluşturmalarını engellediğinden XRD analizlerinde β -Ti pikleri belirgin olmamaktadır.

5.2 İLERİYE DÖNÜK ÇALIŞMALAR

Farklı malzeme bileşimlerinin dinamik etkisi çalışmada görüldüğünden yüzeyde istenen fazlar, uygun parametreler ve uygun elektrot bileşimleriyle ayarlanarak elde edilebilir. Örneğin α -Ti, β kararlaştırıcı elementler kullanılarak yüzey katmanlarında β -Ti fazı oluşturulabilir. Düşük elastisite modülüne sahip β -Ti malzemesi kemikle daha uyumlu çalışarak kalıntı gerilmeleri engelleyecektir. Ayrıca β -Ti malzemesi üretimi için yüksek maliyetleri düşürecektir.

T/M ile üretilen elektrotlardaki partiküllerin tane boyut etkisi literatürde hiç çalışılmamıştır. Burada tane boyutunun değişimi ile yüzey özelliklerinin farklılaşması aydınlatılması gereken bir boşluktur.

Mevcut çalışma bizlere birbiri içinde tam çözünmezlik sağlayan elementler kullanıldığında ve bu elementlerin farklı fiziksel ve termal özellikleri (ergime, kaynama buharlaşma noktası, elektriksel iletkenlik, termal iletkenlik, yoğunluk vb.) sayesinde skaffold denilen kemik benzeri iç içe geçmiş, gözenekli yapıların oluşturulabileceğini göstermiştir. Bu yüzden yüzeyde bu tarz yapıların EKİ ile T/M elektrot kullanılarak oluşturulması ilginç bir çalışma olacaktır.

Hem T/M sinterlenmiş elektrot ve hem de dielektriğe toz katkısı kullanılarak uygun malzeme kombinasyonları ile yüzeyde istenilen özelliklerin elde edilmesi geniş bir çalışma alanı olarak öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Ho K H and Newman S T** (2003) State of the Art Electrical Discharge Machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (13): 1287–1300.
- [2] **Kumar S, Singh R, Singh T P and Sethi B L** (2009) Surface Modification by Electrical Discharge Machining: A Review. *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (8): 3675–3687.
- [3] **Kunieda M, Lauwers B, Rajurkar K P and Schumacher B M** (2005) Advancing EDM Through Fundamental Insight into the Process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 54 (2): 64–87.
- [4] **Jameson E C** (2001) *Electrical Discharge Machining*. ISBN: 0-87263-521-X, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 329.
- [5] **Chow H M, Yang L D, Lin C T and Chen Y F** (2008) The Use of SiC Powder in Water as Dielectric for Micro-slit EDM Machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 195 (1–3): 160–170.
- [6] **Ekmekci B, Yaşar H and Ekmekci N** (2016) A Discharge Separation Model for Powder Mixed Electrical Discharge Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 138 (8): 1–9.
- [7] **Kansal H K, Singh S and Kumar P** (2005) Parametric Optimization of Powder Mixed Electrical Discharge Machining by Response Surface Methodology. *Journal of Materials Processing Technology*, 169 (3): 427–436.
- [8] **Ming Q Y and He L Y** (1995) Powder-Suspension Dielectric Fluid for EDM. *Journal of Materials Processing Technology*, 52 (1): 44–54.
- [9] **Wong Y S, Lim L C, Rahuman I and Tee W M** (1998) Near-Mirror-Finish Phenomenon in EDM Using Powder-Mixed Dielectric. *Journal of Materials Processing Technology*, 79 (1–3): 30–40.
- [10] **Chow H M, Yan B H, Huang F Y and Hung J C** (2000) Study of Added Powder in Kerosene for the Micro-Slit Machining of Titanium Alloy Using Electro-Discharge Machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 101 (1): 95–103.
- [11] **Yan B H, Lin Y C, Huang F Y and Wang C H** (2001) Surface Modification of SKD 61 During EDM with Metal Powder in the Dielectric. *Materials Transactions*, 42 (12): 2597–2604.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [12] **Yih-Fong T and Fu-Chen C** (2005) Investigation into Some Surface Characteristics of Electrical Discharge Machined SKD-11 Using Powder-Suspension Dielectric Oil. *Journal of Materials Processing Technology*, 170 (1–2): 385–391.
- [13] **Khan A A, Mohiuddin A, Al-Hazza M H F and Norhamzan N H** (2018) Enhancement of Machining Performance During Electrical Discharge Machining of Stainless Steel with Carbon Nanotube Powder Added Dielectric Fluid. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13 (9): 7076–7080.
- [14] **Shabgard M and Khosrozadeh B** (2017) Investigation of Carbon Nanotube Added Dielectric on the Surface Characteristics and Machining Performance of Ti–6Al–4V Alloy in EDM Process. *Journal of Manufacturing Processes*, 25: 212–219.
- [15] **Bhaumik M and Maity K** (2017) Effect of Machining Parameter on the Surface Roughness of AISI 304 in Silicon Carbide Powder Mixed EDM. *Decision Science Letters*, 6 (3): 261–268.
- [16] **Gosai N D and Joshi A Y** (2016) Experimental Investigation and Optimization of Process Parameters Used in the Silicon Powder Mixed Electro Discharge Machining of Ti–6Al–4V Alloy Using Response Surface Methodology. *Journal for Manufacturing Science and Production*, 16 (1): 21–32.
- [17] **Abdul-Rani A M, Nanimina A M, Ginta T L and Razak M A** (2017) Machined Surface Quality in Nano Aluminum Mixed Electrical Discharge Machining. *Procedia Manufacturing*, 7: 510–517.
- [18] **Ekmekci B** (2009) White Layer Composition, Heat Treatment, and Crack Formation in Electric Discharge Machining Process. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 40 (1): 70–81.
- [19] **Ekmekci B and Ersöz Y** (2012) How Suspended Particles Affect Surface Morphology in Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM). *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 43 (5): 1138–1148.
- [20] **Shabgard M, Seyedzavvar M and Oliaei S N B** (2011) Influence of Input Parameters on the Characteristics of the EDM Process. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 57 (9): 689–696.
- [21] **Cusanelli G, Hessler-Wyser A, Bobard F, Demellayer R, Perez R and Flükiger R** (2004) Microstructure at Submicron Scale of the White Layer Produced by EDM Technique. *Journal of Materials Processing Technology*, 149 (1–3): 289–295.
- [22] **Arooj S, Shah M, Sadiq S, Jaffery S H I and Khushnood S** (2014) Effect of Current in the EDM Machining of Aluminum 6061 T6 and Its Effect on the Surface Morphology. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39 (5): 4187–4199.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [23] **Ramasawmy H, Blunt L and Rajurkar K P** (2005) Investigation of the Relationship Between the White Layer Thickness and 3D Surface Texture Parameters in the Die Sinking EDM Process. *Precision Engineering*, 29 (4): 479–490.
- [24] **Mannan K T, Krishnaiah A and Arikatla S P** (2013) Surface Characterization of Electric Discharge Machined Surface of High Speed Steel. *International Journal of Advanced Materials Manufacturing and Characterization*, 3 (1): 161–167.
- [25] **Gostimirovic M, Kovac P, Sekulic M and Skoric B** (2012) Influence of Discharge Energy on Machining Characteristics in EDM. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (1): 173–179.
- [26] **Lee L C, Lim L C, Wong Y S and Lu H H** (1990) Towards a Better Understanding of the Surface Features of Electro-Discharge Machined Tool Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 24 (C): 513–523.
- [27] **Ghanem F, Braham C, Fitzpatrick M E and Sidhom H** (2002) Effect of Near-Surface Residual Stress and Microstructure Modification from Machining on the Fatigue Endurance of a Tool Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11 (6): 631–639.
- [28] **Hasçalık A and Çaydaş U** (2004) Experimental Study of Wire Electrical Discharge Machining of AISI D5 Tool Steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 148 (3): 362–367.
- [29] **Jha A K, Sreekumar K and Sinha P P** (2010) Role of Electro-Discharge Machining on the Fatigue Performance of 15-5PH Stainless Steel Component. *Engineering Failure Analysis*, 17 (5): 1195–1204.
- [30] **Ekmekci B, Elkoca O and Erden A** (2005) A Comparative Study on the Surface Integrity of Plastic Mold Steel Due to Electric Discharge Machining. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 36 (1): 117–124.
- [31] **Öpöz T T, Yaşar H, Ekmekci N and Ekmekci B** (2018) Particle Migration and Surface Modification on Ti6Al4V in SiC Powder Mixed Electrical Discharge Machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 31: 744–758.
- [32] **Prakash C, Kansal H K, Pabla B S and Puri S** (2017) Experimental Investigations in Powder Mixed Electric Discharge Machining of Ti–35Nb–7Ta–5Zr β -Titanium Alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 32 (3): 274–285.
- [33] **Mahajan A and Sidhu S S** (2018) Surface Modification of Metallic Biomaterials for Enhanced Functionality: A Review. *Materials Technology*, 33 (2): 93–105.
- [34] **Liu X, Chu P K and Ding C** (2004) Surface Modification of Titanium, Titanium Alloys, and Related Materials for Biomedical Applications. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 47 (3–4): 49–121.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [35] **Geetha M, Singh A K, Asokamani R and Gogia A K** (2009) Ti Based Biomaterials, the Ultimate Choice for Orthopaedic Implants - A review. *Progress in Materials Science*, 54 (3): 397–425.
- [36] **Chen S L, Lin M H, Chen C C and Ou K L** (2008) Effect of Electro-Discharging on Formation of Biocompatible Layer on Implant Surface. *Journal of Alloys and Compounds*, 456 (1–2): 413–418.
- [37] **Peng P W, Ou K L, Lin H C, Pan Y N and Wang C H** (2010) Effect of Electrical-Discharging on Formation of Nanoporous Biocompatible Layer on Titanium. *Journal of Alloys and Compounds*, 492 (1–2): 625–630.
- [38] **Yang T Sen, Huang M S, Wang M S, Lin M H, Tsai M Y and Wang Wang P Y** (2013) Effect of Electrical Discharging on Formation of Nanoporous Biocompatible Layer on Ti-6Al-4V Alloys. *Implant Dentistry*, 22 (4): 374–379.
- [39] **Mahajan A and Sidhu S S** (2018) Enhancing Biocompatibility of Co-Cr Alloy Implants via Electrical Discharge Process. *Materials Technology*, 33 (8): 524–531.
- [40] **Prakash C, Kansal H K, Pabla B S and Puri S** (2015) Processing and Characterization of Novel Biomimetic Nanoporous Bioceramic Surface on β -Ti Implant by Powder Mixed Electric Discharge Machining. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24 (9): 3622–3633.
- [41] **Chen S L, In M H, Huang G X and Wang C C** (2014) Research of the Recast Layer on Implant Surface Modified by Micro-Current Electrical Discharge Machining Using Deionized Water Mixed with Titanium Powder as Dielectric Solvent. *Applied Surface Science*, 311: 47–53.
- [42] **Ekmekci N and Ekmekci B** (2016) Electrical Discharge Machining of Ti6Al4V in Hydroxyapatite Powder Mixed Dielectric Liquid. *Materials and Manufacturing Processes*, 31 (13): 1663–1670.
- [43] **Ou S F and Wang C Y** (2016) Fabrication of a Hydroxyapatite-Containing Coating on Ti-Ta Alloy by Electrical Discharge Coating and Hydrothermal Treatment. *Surface and Coatings Technology*, 302: 238–243.
- [44] **Prakash C and Uddin M S** (2017) Surface Modification of β -Phase Ti Implant by Hydroxyapatite Mixed Electric Discharge Machining to Enhance the Corrosion Resistance and In-Vitro Bioactivity. *Surface and Coatings Technology*, 326 (Part A): 134–145.
- [45] **Ou S F and Wang C Y** (2017) Effects of Bioceramic Particles in Dielectric of Powder-Mixed Electrical Discharge Machining on Machining and Surface Characteristics of Titanium Alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 245: 70–79.
- [46] **Prakash C, Singh S, Pabla B S and Uddin M S** (2018) Synthesis, Characterization, Corrosion and Bioactivity Investigation of Nano-HA Coating Deposited on Biodegradable Mg-Zn-Mn Alloy. *Surface and Coatings Technology*, 346: 9–18.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [47] **Prakash C, Singh S, Singh M, Verma K, Chaudhary B and Singh S** (2018) Multi-Objective Particle Swarm Optimization of EDM Parameters to Deposit HA-Coating on Biodegradable Mg-Alloy. *Vacuum*, 158: 180–190.
- [48] **Lamichhane Y, Singh G, Bhui A S, Mukhiya P, Kumar P and Thapa B** (2019) Surface Modification of 316L SS with HAp Nano-Particles Using PMEDM for Enhanced Biocompatibility. *Materials Today: Proceedings*, 15 (Part 2): 336–343.
- [49] **Singh G, Lamichhane Y, Bhui A S, Sidhu S S, Bains P S and Mukhiya P** (2019) Surface Morphology and Microhardness Behavior of 316L in Hap-PMEDM. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 17 (3): 445–454.
- [50] **Singh G, Sidhu S S, Bains P S and Bhui A S** (2019) Improving Microhardness and Wear Resistance of 316L by TiO₂ Powder Mixed Electro-Discharge Treatment. *Materials Research Express*, 6 (8): 086501.
- [51] **Farooq M U, Mughal M P, Ahmed N, Mufti N A, Al-Ahmari A M and He Y** (2020) On the Investigation of Surface Integrity of Ti6Al4V ELI Using Si-Mixed Electric Discharge Machining. *Materials*, 13 (7): 1549.
- [52] **Devgan S and Sidhu S S** (2020) Surface Modification of β -Type Titanium with Multi-Walled CNTs/ μ -HAp Powder Mixed Electro Discharge Treatment Process. *Materials Chemistry and Physics*, 239: 122005.
- [53] **Bains P S, Bahraminasab M, Sidhu S S and Singh G** (2020) On the Machinability and Properties of Ti–6Al–4V Biomaterial with N-HAp Powder–Mixed ED Machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 234 (2): 232–242.
- [54] **Bui V D, Mwangi J W and Schubert A** (2019) Powder Mixed Electrical Discharge Machining for Antibacterial Coating on Titanium Implant Surfaces. *Journal of Manufacturing Processes*, 44: 261–270.
- [55] **Bui V D, Mwangi J W, Meinshausen A-K, Mueller A J, Bertrand J and Schubert A** (2020) Antibacterial Coating of Ti-6Al-4V Surfaces Using Silver Nano-Powder Mixed Electrical Discharge Machining. *Surface and Coatings Technology*, 383: 125254.
- [56] **Mohri N, Saito N, Tsunekawa Y and Kinoshita N** (1993) Metal Surface Modification by Electrical Discharge Machining with Composite Electrode. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 42 (1): 219–222.
- [57] **Wang Z L, Fang Y, Wu P N, Zhao W S and Cheng K** (2002) Surface Modification Process by Electrical Discharge Machining with a Ti Powder Green Compact Electrode. *Journal of Materials Processing Technology*, 129 (1–3): 139–142.
- [58] **Simao J, Lee H G, Aspinwall D K, Dewes R C and Aspinwall E M** (2003) Workpiece Surface Modification Using Electrical Discharge Machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (2): 121–128.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [59] **Khanra A K, Sarkar B R, Bhattacharya B, Pathak L C and Godkhindi M M** (2007) Performance of ZrB₂-Cu Composite as an EDM Electrode. *Journal of Materials Processing Technology*, 183 (1): 122–126.
- [60] **Ho S K, Aspinwall D K and Voice W** (2007) Use of Powder Metallurgy (PM) Compacted Electrodes for Electrical Discharge Surface Alloying/Modification of Ti-6Al-4V Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 191 (1–3): 123–126.
- [61] **Patowari P K, Mishra U K, Saha P and Mishra P K** (2011) Surface Integrity of C-40 Steel Processed with WC-Cu Powder Metallurgy Green Compact Tools in EDM. *Materials and Manufacturing Processes*, 26 (5): 668–676.
- [62] **Mussada E K and Patowari P K** (2017) Post Processing of the Layer Deposited by Electric Discharge Coating. *Materials and Manufacturing Processes*, 32 (4): 442–449.
- [63] **Chen H J, Wu K L and Yan B H** (2013) Dry Electrical Discharge Coating Process on Aluminum by Using Titanium Powder Compact Electrode. *Materials and Manufacturing Processes*, 28 (12): 1286–1293.
- [64] **Tsai H C, Yan B H and Huang F Y** (2003) EDM Performance of Cr/Cu-based Composite Electrodes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 (3): 245–252.
- [65] **Gülcan O, Uslan İ, Usta Y ve Çoğun C** (2015) Elektro Erozyon ile İşlemede Cu-Cr T/M Elektrot Kullanımının İşleme Performansına Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30 (3): 381–94.
- [66] **Gülcan O, Uslan İ, Usta Y and Çoğun C** (2016) Performance and Surface Alloying Characteristics of Cu–Cr and Cu–Mo Powder Metal Tool Electrodes in Electrical Discharge Machining. *Machining Science and Technology*, 20 (4): 523–546.
- [67] **Çoğun C, Esen Z, Genç A, Çoğun F and Aktürk N** (2016) Effect of Powder Metallurgy Cu-B₄C Electrodes on Workpiece Surface Characteristics and Machining Performance of Electric Discharge Machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230 (12): 2190–2203.
- [68] **Balasubramanian P and Senthilvelan T** (2015) A Comparative Study on the Performance of Different Sintered Electrodes in Electrical Discharge Machining. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68 (1): 51–59.
- [69] **Gill A S and Kumar S** (2015) Surface Alloying by Powder Metallurgy Tool Electrode Using EDM Process. *Materials Today: Proceedings*, 2 (4–5): 1723–1730.
- [70] **Gill A S and Kumar S** (2018) Investigation of Micro-Hardness in Electrical Discharge Alloying of En31 Tool Steel with Cu–W Powder Metallurgy Electrode. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43 (3): 1499–1510.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [71] **Gill A S and Kumar S** (2016) Surface Roughness and Microhardness Evaluation for EDM with Cu-Mn Powder Metallurgy Tool. *Materials and Manufacturing Processes*, 31 (4): 514–521.
- [72] **Senapati N P, Tripathy S and Samantaray S** (2016) A Multi-Objective Optimization Using a Combined Approach of Principal Component Analysis and TOPSIS During Electric Discharge Machining of H-11 Die Steel Using P/M Processed Cu-Cr-Ni Metal Matrix Composite. *International Conference On Electrical, Electronics, And Optimization Techniques*, 3-5 March 2016, Chennai, India, ISBN: 978-1-4673-9940-1, 1207–1212.
- [73] **Ahmed A** (2016) Deposition and Analysis of Composite Coating on Aluminum Using Ti-B4C Powder Metallurgy Tools in EDM. *Materials and Manufacturing Processes*, 31 (4): 467–474.
- [74] **Singh B, Kumar J and Kumar S** (2017) Optimization and Surface Modification in Electrical Discharge Machining of AA 6061/SiCp Composite Using Cu-W Electrode. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 231 (3): 332–348.
- [75] **Hussain M Z, Khan U, Jangid R and Khan S** (2018) Hardness and Wear Analysis of Cu/Al₂O₃ Composite for Application in EDM Electrode. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 310: 012044.
- [76] **Goyal P, Kumar S and Kumar R** (2018) Effect of High Chromium Platinum Steel with Composite Copper-Tin Material Electrode on Electric Discharge Machining Performance. *Materials Today: Proceedings*, 5 (14 (Part 2)): 27726–27731.
- [77] **Algodi S J, Murray J W, Brown P D and Clare A T** (2018) Wear Performance of TiC/Fe Cermet Electrical Discharge Coatings. *Wear*, 402–403: 109–123.
- [78] **Tijo D, Kumari S and Masanta M** (2018) Ceramic-Metal Composite Coating on Steel Using a Powder Compact Tool Electrode by the Electro-Discharge Coating Process. *Silicon*, 10 (4): 1625–1637.
- [79] **Das S, Raman R K, Devarani N and Joshi S N** (2019) Surface Alloying of Titanium Di-Boride (TiB₂) and Silicon Carbide (SiC) on Aluminium Al 5052 Using Electric Discharge Processing. *Procedia Structural Integrity*, 14: 119–126.
- [80] **Elaiyarasan U, Satheeshkumar V and Senthilkumar C** (2018) Experimental Analysis of Electrical Discharge Coating Characteristics of Magnesium Alloy Using Response Surface Methodology. *Materials Research Express*, 5 (8): 086501.
- [81] **Prakash C, Singh S, Pruncu C I, Mishra V, Królczyk G, Pimenov D Y and Pramanik A** (2019) Surface Modification of Ti-6Al-4V Alloy by Electrical Discharge Coating Process Using Partially Sintered Ti-Nb Electrode. *Materials*, 12 (7): 1–16.

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- [82] **Nath S, Kalmodia S and Basu B** (2010) Densification, Phase Stability and In Vitro Biocompatibility Property of Hydroxyapatite-10 wt% Silver Composites. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 21 (4): 1273–1287.
- [83] **Schwartz-Arad D, Laviv A and Levin L** (2008) Failure Causes, Timing, and Cluster Behavior: An 8-Year Study of Dental Implants. *Implant Dentistry*, 17 (2): 200–207.
- [84] **Patil D, Wasson M K, Aravindan S, Vivekanandan P and Rao P V** (2019) Antibacterial and Cytocompatibility Study of Modified Ti6Al4V Surfaces Through Thermal Annealing. *Materials Science and Engineering C*, 99: 1007–1020.
- [85] **Özdemir D** (2021) Elektriksel Kırılıcılımla İşlemede Sinterlenmiş Gümüş- Hidroksiapatit Toz Katkılı Elektrotların Biyolojik Uyumluluk Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak, 1-139.
- [86] **Ehtemam-Haghighi S, Prashanth K G, Attar H, Chaubey A K, Cao G H and Zhang L C** (2016) Evaluation of Mechanical and Wear Properties of Ti-xNb-7Fe Alloys Designed for Biomedical Applications. *Materials and Design*, 111: 592–599.
- [87] **Abdelrhman Y, Gepreel M A H, Kobayashi S, Okano S and Okamoto T** (2019) Biocompatibility of New Low-Cost ($\alpha + \beta$)-Type Ti-Mo-Fe Alloys for Long-Term Implantation. *Materials Science and Engineering C*, 99: 552–562.
- [88] **Kriegel M J, Wetzel M H, Fabrichnaya O and Rafaja D** (2022) Binary Ti–Fe System. Part II: Modelling of pressure-dependent phase stabilities. *Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry*, 76: 102383.