

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEMEDE HİDROKSİAPATİT TOZ KATKISININ
YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNE ETKİSİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YASİN EFE

OCAK 2020

ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEMEDE HİDROKSİPATİT TOZ KATKISININ
YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNE ETKİSİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yasin EFE

DANIŞMAN: Doç. Dr. Nihal EKMEKÇİ

ZONGULDAK

Ocak 2020

KABUL:

Yasin EFE tarafından hazırlanan “Elektriksel Kıvılcımla İşlemede Hidroksiapatit Toz Katkısının Yüzey Bütünlüğüne Etkisi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 24/01/2020

Danışman: Doç. Dr. Nihal EKMEKÇİ

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

Üye: Prof. Dr. Rahime Seda TIĞLI AYDIN

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet BOY

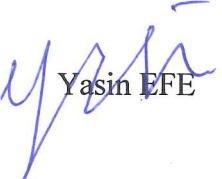
Karabük Üniversitesi, TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım./..../2020

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.”


Yasin EFE

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEMEDE HİDROKSİAPATİT TOZ KATKISININ YÜZEY BÜTÜNLÜĞÜNE ETKİSİ

Yasin EFE

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Nihal EKMEKÇİ
Ocak 2020, 75 sayfa

Elektriksel Kıvılcımla İşleme (EKİ), sertliğinden bağımsız ve karmaşık şekilli malzemelerin kolaylıkla işlenebildiği alışılmamış imalat yöntemidir. Yalıtkan bir sıvı içerisinde iş parçası ve elektrot arasında oluşturulan elektriksel kıvılcımları etkisiyle mekanik bir temas olmaksızın malzeme kaldırma yöntemine dayanmaktadır. Yöntemi daha etkin kılabilmek için dielektrik sıvı içerisine toz katkıları ilave edilmektedir. Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcımla İşleme (TKEKİ) olarak adlandırılan bu yöntem sayesinde malzeme kaldırma oranı, takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve sertlik gibi özellikler iyileşmektedir. Bu amaçla, dielektrik sıvıya titanyum, alüminyum, silisyum karbür grafit gibi çeşitli tozların katıldığını literatürde görmekteyiz. Dielektrik sıvı içerisinde Hidroksiapatit (HA) toz katkısının kullanımına ise son yıllarda rastlanmaktadır. Bu çalışmada biyouyumlu bir malzeme olan Ti6Al4V alaşımının, Hidroksiapatit Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcımla İşleme (HA-TKEKİ) yöntemiyle işlenmesi ele alınmıştır. Çünkü biyouyumlu malzemeler, vücut sıvılarıyla etkileşime geçebilmekte, iyon salınımı, toksik ve kanserojen etkileri sebebiyle vücutla daha uyumlu bir malzeme ile yüzey modifikasyonuna ihtiyaç duymaktadır. Yöntemde, mikronize (mikro) ve nano boyutlarda HA

ÖZET (devam ediyor)

toz katkısı kullanılmıştır ve karşılaştırması yapılmıştır. İşleme sırasında yüzeye toz katkısı transferi ve buna bağlı yüzey ve yüzeyaltı özelliklerinin değişimi değerlendirilmiştir. İşlemeler 4 akım seviyesinde (4A, 12A, 22A ve 42 A) ve 10 darbe süresinde (3µs-1600 µs) gerçekleştirilmiştir. Öncelikle yüzeylerin pürüzlülükleri ölçülmüştür. İşlenen yüzey özellikleri Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) ve X Işını Kırınımı (XRD) ile analiz edilmiştir. Kesit özelliklerine ise optik mikroskopla bakılmıştır. Sonrasında ise kesitte oluşan tabakalardan mikrosertlik ölçümleri alınmıştır. Nano HA tozlarının mikroya göre pürüzlülüğü daha da artırdığı görülmüştür. Suda işlemlerde ise düşük darbe sürelerinde pürüzlülüğün az olduğu yüksek darbe sürelerinde ise toz katkılıya göre hızla arttığı görülmüştür. Toz katkısı nüfuziyetinin daha çok krater çeperlerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Nano toz katkısı kullanıldığında en fazla HA yoğunlaşması 7A darbe akımında, en az yoğunlaşma ise 22A'de gerçekleşmektedir. Mikro toz katkısı için ise en fazla yoğunlaşma 22A darbe akımında, en az yoğunlaşmanın ise 42A'de gerçekleşmektedir. Mikro ve nano toz katkılı ve saf suda gerçekleştirilen işlemlerde oluşan katman kalınlıkları da değerlendirilmiştir. Kalınlıklar, parametrelere göre 20 µm'den 140 µm'ye kadar değişmektedir. Nano HA-TKEKİ'de düşük darbe sürelerinde katman kalınlıkları mikro HA-TKEKİ'ye göre daha fazla fakat yüksek darbe sürelerine çıkıldıkça aynı seviyelerde seyretmektedir. Ayrıca tabakalardan sertlik ölçümleri alınarak karşılaştırılmıştır. Buna göre ana malzemedeki (Ti6Al4V) ortalama sertlik 365 HV iken, ısıl etkilenmiş katmanda 400-500 HV olmaktadır. Eriyip tekrar katılan katmanda ise TKEKİ'de 1600-1800 HV değerine ulaşmaktadır. Saf suda yapılan işlemlerde ise 2000 HV'a çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Elektriksel Kıvılcımla İşleme, EKİ, Hidroksiapatit, HA, Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcımla İşleme, TKEKİ

Bilim Kodu: 625.02.05

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

THE EFFECT OF HYDROXYAPATITE POWDER ADDITIVES ON SURFACE INTEGRITY IN ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Yasin EFE

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

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Nihal EKMEKÇİ

january 2020, 75 pages

Electrical Discharge Machining (EDM) is an unusual manufacturing method in which complex materials, which are independent of their hardness, can be easily machined. It is based on the method of material removal without mechanical contact due to the electrical sparks generated between the workpiece and the electrode in an insulating liquid. In order to make the method more effective, powder additives are added to the dielectric liquid. As an advantage of this method, which is called Powder Mixed Electrical Discharge Machining (PMEDM), properties such as material removal rate, tool wear, surface roughness and hardness improve. For this purpose, in the literature that various powders such as titanium, aluminum, silicon carbide graphite are added to the dielectric liquid. The use of Hydroxyapatite (HA) powder additive in dielectric liquid has been observed in recent years. In this study, machining of Ti6Al4V alloy, which is a biocompatible material, with Hydroxyapatite Powder Mixed Electrical Discharge Machining (HA-PMEDM) method is discussed. Because biocompatible materials can interact with body fluids, they require surface modification with a more compatible material with the body due to ion release, toxic and

ABSTRACT (continued)

carcinogenic effects. In the method, micronized (micro) and nano-size HA powder additives were used and compared. During the machining, powder additive transfer and change of surface and sub-surface properties were evaluated. Machining was carried out at 4 pulse currents (7A, 12A, 22A and 42 A) and 10 pulse times (3 μ s-1600 μ s). First of all, the roughness of the surfaces was measured. The processed surface properties were analyzed by Scanning Electron Microscope (SEM), Energy Dispersive Spectrometry (EDS) and X Ray Diffraction (XRD). The sectional properties were examined with an optical microscope. Then, microhardness measurements were taken from the layers formed in the section. Nano HA powders were found to increase the roughness even more than the micro. In water machinings, it was observed that at low pulse durations, roughness was low, and at high pulse durations, it increased rapidly compared to powder additives. It appears that the penetration of the powder additive is mostly concentrated in the crater walls. When nano powder additive is used, the highest HA concentration occurs at 7A pulse current and the least concentration is at 22A. For micro powder additive, the highest concentration is at 22A pulse current and the least concentration is at 42A. Layer thicknesses formed with micro, nano powder additive and pure water treatments were also evaluated. Thicknesses vary from 20 μ m to 140 μ m according to the parameters. In nano HA-TKEKI, layer thicknesses are lower than the micro HA-TKEKI, but at the same level as high pulse durations are observed. In addition, microhardness measurements were taken from the layers and compared. Accordingly, while the average hardness in the main material (Ti6Al4V) is 365 HV, it is 400-500 HV in the heat-affected layer. It reaches 1600-1800 HV value in TKEKI in the recast layer. In pure water, it increases to 2000 HV.

Keywords: Electrical Discharge Machining, EDM, Hydroxyapatite, HA, Powder Mixed Electrical Discharge Machining, PMEDM

Science Code: 625.02.05

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL:	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
BÖLÜM 1 GİRİŞ	1
1.1 ALIŞILMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİ.....	1
1.2 TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ	1
1.3 TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİNİN AVANTAJLARI	2
1.4 TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİNİN DEZAVANTAJLARI	2
1.5 TALAŞSIZ İMALAT YÖNTEMLERİ.....	3
1.6 ALIŞILMAMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİ	3
1.7 ALIŞILMAMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI	3
1.8 ENDÜSTRİDE YAYGIN OLARAK KULLANILAN ALIŞILMAMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI	4
1.8.1 Su jeti ile işleme.....	4
1.8.2 Ultrasonik İşleme	4
1.8.3 Elektrokimyasal işleme	4
1.8.4 Elektrokimyasal Honlama.....	5
1.8.5 Kimyasal İşleme.....	5
1.8.6 Elektriksel Kıvılcım ile İşleme (EKİ) ve Tel Erozyon ile İşleme.....	5
1.9 EKİ MEKANİZMASI	6
1.10 EKİ SİSTEM BİLEŞENLERİ VE ETKİN PARAMETRELER	7

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
1.10.1 Deşarj Gerilimi.....	7
1.10.2 Darbe Akımı.....	7
1.10.3 Darbe Süresi.....	7
1.10.4 Bekleme Süresi ve Geçikme Zamanı	8
1.10.5 Dielektrik Sıvı ve Sirkülasyon Yöntemi	8
1.11 TOZ KATKILI ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME (TKEKİ).....	8
1.12 HİDROKSİAPATİT (HA)	8
1.13 HA KAPLAMA YÖNTEMLERİNDEN BAŞLICALARI	9
1.13.1 Biyomimetik Yöntem.....	9
1.13.2 Sol Jel Yöntemi.....	9
1.13.3 Plazma Püskürtme Yöntemi.....	10
1.14 TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARININ İNCELENMESİ.....	10
BÖLÜM 2 LİTERATÜR TARAMASI VE ÇALIŞMANIN AMACI.....	13
2.1 ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME (EKİ) YÖNTEMİNİN GELİŞİMİ VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	13
2.2 TOZ KATKILI ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME(TKEKİ) YÖNTEMİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	15
2.3 TKEKİ'DE Ti6Al4V ALAŞIMI VE HİDROKSİAPATİT (HA) NÜFUZİYETİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	17
2.4 ÇALIŞMANIN AMACI.....	18
BÖLÜM 3 DENEY DÜZENEGİ.....	19
3.1 NUMUNE VE ELEKTROT ÖZELLİKLERİ	19
3.2 EKİ TEZGAH ÖZELLİKLERİ.....	20
3.3 DİELEKTRİK SIVI VE TOZ KATKISI.....	22
3.4 DENEY PARAMETRELERİ.....	23
3.5 ANALİZLER İÇİN KULLANILAN CİHAZLAR	23

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4 DENEYSEL SONUÇLAR	29
4.1 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ	29
4.2 SEM ANALİZLERİ	31
4.3 EDS ANALİZLERİ VE NÜFUZİYET	46
4.4 KESİT MİKROYAPISI VE KATMAN KALINLIKLARI	56
4.5 KESİT MİKROYAPISI VE MİKROSERTLİK ANALİZLERİ.....	60
4.6 X-IŞINLARI KIRINIM DİFRAKTOMETRESİ (XRD) ANALİZİ	64
 BÖLÜM 5 SONUÇLAR.....	 67
 KAYNAKÇA	 69
 ÖZGEÇMİŞ	 75



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 Alfa ve beta kristal yapılarının kafes parametreleri	11
Şekil 3.1 İşlenmek üzere kesilmiş numuneler.....	19
Şekil 3.2 Gerilim gidermede kullanılan fırın.....	20
Şekil 3.3 Torna tezgahı.....	20
Şekil 3.4 Ajan CNC Model 983 dalma tip erozyon tezgahı ve adapte edilen işlem havuzu....	21
Şekil 3.5 Deneylerde kullanılan beher, hassas terazive arıtma cihazı.....	22
Şekil 3.6 TylorHobson yüzey pürüzlülük cihazı.....	23
Şekil 3.7 Metkon Mıcracut 201 marka hassas testere	24
Şekil 3.8 Metkon Ecopress 50 marka bakalit presisi	25
Şekil 3.9 Metkon Forcimat zımparalama ve parlatma cihazı.....	25
Şekil 3.10 Amonyum Biflorür.....	26
Şekil 3.11 Shimadzu marka HVM-G21 model Vickers mikro sertlik ölçüm cihazının ara yüzü.....	26
Şekil 3.12 Shimadzu marka HVM-G21 (Vickers, Knoop Indenter) model mikro sertlik ölçüm cihazı.....	27
Şekil 3.13 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	27
Şekil 4.1 Farklı dielektrik ortam ve darbe sürelerinde 7A ve 12A darbe akımı için ortalama yüzey pürüzlülüğü.....	30
Şekil 4.2 Farklı dielektrik ortam ve darbe sürelerinde 22A ve 42A darbe akımı için ortalama yüzey pürüzlülüğü.....	31
Şekil 4.3 6 µs darbe süresi ve düşük akımlarda nano HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.....	33
Şekil 4.4 6 µs darbe süresi ve yüksek akımlarda nano HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.....	34
Şekil 4.5 6 µs darbe süresi ve düşük akımlarda mikro HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.....	35
Şekil 4.6 6 µs darbe süresi ve yüksek akımlarda mikro HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.....	36
Şekil 4.7 100 µs darbe süresi ve düşük akımlarda nano HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.....	38
Şekil 4.8 100 µs darbe süresi ve yüksek akımlarda nano HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.....	39

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.9 100 µs darbe süresi ve düşük akımlarda mikro HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.	40
Şekil 4.10 100 µs darbe süresi ve yüksek akımlarda mikro HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.	41
Şekil 4.11 800 µs darbe süresi ve düşük akımlarda nano HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.	42
Şekil 4.12 800 µs darbe süresi ve yüksek akımlarda nano HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.	43
Şekil 4.13 800 µs darbe süresi ve düşük akımlarda mikro HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.	44
Şekil 4.14 800 µs darbe süresi ve yüksek akımlarda mikro HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.	45
Şekil 4.15 HA-TKEKİ'ye maruz yüzeylerde krater çeperlerinde yoğunlaşan HA tozları (7A, 1600 µs)	46
Şekil 4.16 HA-TKEKİ'ye maruz yüzeylerde bir bölgede yoğunlaşan HA tozları (7A, 1600 µs).	47
Şekil 4.17 Nano HA-TKEKİ'ye maruz numunelerde krater çeperlerinde yoğunlaşan HA.	48
Şekil 4.18 MikroHA-TKEKİ'ye maruz numunelerde krater çeperlerinde yoğunlaşan HA	50
Şekil 4.19 NanoHA-TKEKİ ile işlenmiş numunede alansal EDS izleri (7 A, 200 µs).....	53
Şekil 4.20 MikroHA-TKEKİ ile işlenmiş numunede işaretli kısımlardaki EDS izleri (22 A, 200 µs)	54
Şekil 4.21 Nano HA-TKEKİ yöntemiyle işlenen numunelerde işlem parametrelerine göre Ca+P ağırlık yüzdesi değişimi.	55
Şekil 4.22 Mikro HA-TKEKİ yöntemiyle işlenen numunelerde işlem parametrelerine göre Ca+P ağırlık yüzdesi değişimi.	56
Şekil 4.23 HA-TKEKİ yöntemiyle işlenmiş numune kesiti.....	57
Şekil 4.24 NanoHA-TKEKİ'ye maruz numune kesitinde katman kalınlıkları (12A, 400 µs). 57	
Şekil 4.25 Nano HA toz katkılı EKİ yöntemiyle işlenmiş numunelerde oluşan tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması.....	58
Şekil 4.26 Mikro HA toz katkılı EKİ yöntemiyle işlenmiş numunelerde oluşan tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.27 Nano HA-TKEKİ'ye maruz numune kesitlerindeki mikrosertlik değişimleri.....	61
Şekil 4.28 MikroHA-TKEKİ'ye maruz numune kesitlerindeki mikrosertlik değişimleri.	62
Şekil 4.29 Saf suda EKİ yöntemiyle işlenmiş numune kesitlerindeki mikrosertlik değişimleri.	63
Şekil 4.30 Nano HA-TKEKİ yöntemiyle işlenmiş numunenin XRD izlerinin karşılaştırması 64	
Şekil 4.31 Mikro HA-TKEKİ yöntemiyle işlenmiş numunenin XRD izlerinin karşılaştırması	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 Ajan CNC Model 983 dalma tip erozyon tezgahı özellikleri.....	21
Çizelge 3.2 İşlem parametreleri.	23
Çizelge 3.3 Darbe süreleri ve darbe akımları.	23
Çizelge 4.1 Saf suda işlenen numune kesitlerindeki katman kalınlıkları (800 µs)	60





SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

A	: Amper
V	: Volt
μ s	: Mikro Saniye
$^{\circ}$ C	: Santigrat Derece
Ti	: Titanyum
Al	: Alüminyum
V	: Vanadyum
Ca	: Kalsiyum
P	: Fosfor
O	: Oksijen
H	: Hidrojen
g	: Gram
TiC	: Titanyum Karbür
SiC	: Silisyum Karbür
l	: Litre
HV	: Vickers Sertlik Değeri
KW	: KiloWat
β	: Beta
α	: Alfa
α -Ti	: Alfa Titanyum
β -Ti	: Beta Titanyum
μ m	: Mikro Metre

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

KISALTMALAR

ZBEÜ	: Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
EKİ	: Elektriksel Kıvılcımla İşleme
HA	: Hidroksiapatit
PMEDM	: Powder Mixed Elektrical Discharge Machining
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
TKEKİ	: Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcımla İşleme
XRD	: X-ışınları Kırınım Difraktometresi
HA-TKEKİ	: Hidroksiapatit Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcımla İşleme

BÖLÜM 1

GİRİŞ

İmalat yöntemleri genel olarak alışılmış ve alışılmamış imalat yöntemleri olarak ikiye ayrılmaktadır. Alışılmış imalat yöntemlerine tornalama, delme, frezeleme, broşlama, yarma, taşlama örnek verilebilirken, aşındırıcı jet ile işleme, ultrasonik işleme, su jeti ve elektriksel kıvılcımla işleme alışılmamış imalat yöntemlerinden bazılarıdır.

1.1 ALIŞILMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİ

Alışılmış yöntemler kesici uç, matkap ucu veya taşlama taşı gibi araçlarla fiziksel teması sonucu mekanik kuvvetlerle plastik deformasyon oluşturan ve kayma gerilimleri oluşturarak talaş kaldıran yöntemlerdir. Alışılmış imalat yöntemleri de talaşlı ve talaşsız imalat yöntemleri olarak ikiye ayrılabilir.

1.2 TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİ

Talaşlı imalat genellikle metallerin işlenmesi için kullanılan yöntemdir. Malzeme mühendisliğinin gelişimi, üretim yöntemlerinde bilgisayarların kullanılmaya başlanması, gibi gelişmeler talaşlı üretim yöntemlerinde kaliteli ürün elde etmeyi kolaylaştırmıştır. Genel olarak talaşlı imalat yöntemleri şu şekilde sıralanabilir: torna, freze, planya, vargel, matkap, testere, taşlama ve broşlama. Talaşlı imalat yöntemleri arasında en sık kullanılan yöntem delme yöntemidir. Aşındırıcı jet ile işleme, ultrason işleme ve lazer kesme gibi imalat yöntemleri endüstride geniş uygulama alanına sahip olmasına karşın, matkap ile delik delme diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha ekonomik ve basit olmasından dolayı en yaygın kullanılan imalat yöntemidir. Döküm, dövme ve haddeme gibi diğer şekillendirme yöntemleriyle üretilmiş malzemelerin kullanıma uygun hale gelmesi için genellikle talaşlı imalat yöntemleri uygulanır. Talaşlı imalat yöntemleriyle yarı mamul, döküm, dövülmüş, haddelenmiş halde olan malzemeler istenilen geometriye getirilmesi için uygun tezgah ve kesici takım kullanılır.

Kesici takım ile malzemeden talaş kaldırılması için takım ile iş parçası arasında bağıl hareket gerçekleşir. Kesme hızı birincil hareket, ilerleme hızı ise ikincil hareket ile gerçekleşir. Kesici takımın malzemenin yüzeyinden içeri girmesiyle istenilen geometride malzeme üretilir. Talaşlı imalat yöntemlerinde kesme eylemi, iş parçasının yüzeyinden kayma deformasyonu oluşturularak talaş kaldırılması ve çıkan talaşın uzaklaştırılıp yeni yüzeylerin meydana gelmesidir (Groover 2012).

1.3 TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİNİN AVANTAJLARI

Talaşlı imalat yöntemleriyle işlenecek iş parçaları oldukça geniş yelpazede yer almaktadır. Neredeyse bütün katı metaller bu yöntemle işlenebilmektedir. Plastik ve plastik kompozitler de talaşlı imalat yöntemleriyle işlenebilir. İstenilen dairesel delikler, düz yüzeyler, silindirler gibi düzenli geometriler bu yöntemler ile kolaylıkla elde edilir. Bunun yanında T kanal ve vida dişi gibi düzensiz geometrilerde olan parçalarda üretilebilmektedir. Karmaşık yapılarıdaki çeşitli şekiller, sırasıyla uygulanan farklı talaşlı imalat yöntemleriyle işlenebilir. Boyutsal olarak hassasiyet gerektiren malzemeler talaşlı imalat yöntemleri ile istenilen tolerans değerleri içerisinde üretilebilmektedir. Bu yöntem ile neredeyse ayna parlaklığında pürüzsüz yüzeyler elde etmek mümkündür. 0.4 mikrondan daha düşük pürüzlülükte yüzeyler elde edilebilmektedir (Groover 2012).

1.4 TALAŞLI İMALAT YÖNTEMLERİNİN DEZAVANTAJLARI

Talaşlı imalat yöntemleri malzeme kaldırmada uygulanan teknik gereğince malzeme israfı oluşturur. Yöntem sonucu oluşan talaş atık malzemedir. Döküm gibi diğer imalat tekniklerine göre kıyasla talaşlı imalat yöntemleri daha uzun sürelerle ihtiyaç duyar. Mikro ve nano boyutlarda malzeme işlemek neredeyse imkansızdır. İş parçasına doğrudan temas olduğu için istenmeyen gerilmelere, titreşimlere ve ısıl çevrimlere sebep olabilmektedirler. Kesici takım maliyetleri yüksektir (Groover 2012).

Talaşlı imalat yöntemlerinde uygulanan gücün neredeyse tamamı ısıya dönüşmektedir. Oluşan ısının bir kısmı takıma geçerken diğer bir kısmı iş parçasına diğer bir kısmı ise oluşan talaşa geçer. Geçen bu ısı iş parçasında faz değişimlerine, yüzey bütünlüğünün bozulmasına oluşan ısıl genleşmeler neticesinde takım aşınmasına sebep olur. Trent ve Wright (2000) uygulanan gücün %99'unun ısıya dönüştüğünü ileri sürmektedirler.

1.5 TALAŞSIZ İMALAT YÖNTEMLERİ

Talaşsız imalatta malzemenin kütlesi korunmaktadır. En çok kullanılan yöntemler arasında eriyik malzemenin bir kalıba dökülerek soğuyup şekil alması olarak bilinen döküm, plastik deformasyonla malzemenin şekillendirildiği plastik şekil verme, toz haldeki metal ve alaşımlarının birbirine karıştırılarak ısı ve basınçla birleştirildiği toz metalürjisi, bilgisayarlarda tasarlanan üç boyutlu çizimlerle elde edilen fiziksel modeller olarak ele alınan hızlı prototipleme ve kaynaklı birleştirme yer almaktadır.

1.6 ALIŞILMAMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİ

Üstün özelliklere sahip yeni malzemelerle mikro boyutlarda üretimin mümkün olması mühendislerin çalışma alanını genişleterek yeni ürünlere talebi arttırmıştır ve alışılmamış imalat yöntemlerine yönlendirmiştir.

Alışılmamış imalat yöntemleri takım ve iş parçası arasında temas gerekmeksizin, kolay kinetik hareketlerle, bilgisayar kontrollü olarak, sertlik ve mukavemet önemsenmeden geniş malzeme yelpazesini işleyebilmektedir.

1.7 ALIŞILMAMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Alışılmamış imalat yöntemleri malzeme kaldırmada kullanılan enerji tipine göre 3 kategoride sınıflandırılır:

- Mekanik İşleme: Malzeme kaldırırken mekanik aşındırma ve kesme uygulamaktadır. Örneğin, ultrasonik işleme, dönel ultrasonik işleme, aşındırıcı jet ile işleme, su jeti ile işleme.
- Kimyasal ve Elektrokimyasal İşleme: Asit ve alkali türlerindeki aşındırıcılarla ısıl reaksiyonlar oluşturarak malzeme kaldırmaktadır. Malzeme kaldırma kapasitesi yüksektir. Örneğin, elektrokimyasal işleme, elektrokimyasal taşlama, elektrokimyasal honlama, elektrokimyasal çapak alma, kimyasal işleme.
- Termoelektrik işleme: Malzeme kaldırma işlemi kontrollü kıvılcımların oluşturduğu ısıl enerji ile meydana gelmektedir. Örneğin, EKİ, telli elektro erozyon ile işleme, lazer ile işleme, elektron ışını ile işleme, plazma ile kesme.

1.8 ENDÜSTRİDE YAYGIN OLARAK KULLANILAN ALIŞILMAMIŞ İMALAT YÖNTEMLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Günümüzde 30'un üzerinde alışılmamış imalat yöntemi mevcuttur ve teknolojik gelişmeye bağlı olarak bu sayı hızla artmaktadır.

1.8.1 Su jeti ile işleme

İş parçasının yüzeyinden malzemeleri kaldırmak için yüksek hızlı su jeti kullanılan geleneksel olmayan bir işlemdir. Plastik, kauçuk veya ahşap gibi yumuşak malzemeleri kesmek için kullanılabilir. Metal veya granit gibi daha sert malzemeleri kesmek için, suya aşındırıcı bir materyal karıştırılır. Aşındırıcı su jeti ile işlenen parçalar tanecikteki keskinliğin, basıncın ve hızın kayıplara uğraması yüzeyde çizikleri ortaya çıkarmaktadır. Hassas uygulamalar için tercih edilmemektedir (Ohlsson 1995). Aşındırıcı su jeti sistemleri ile hemen hemen her türlü malzeme işlenebilmektedir. Metal endüstrisinde kullanılması 1982 yılından sonra olmuştur. İlk yatırım maliyetleri ve kesme özellikleri sebebiyle kullanımlarını yaygınlaştırmıştır (MDC 1980).

1.8.2 Ultrasonik İşleme

Ultrasonik işleme, mekanik grup işlemleri altında gruplandırılmıştır. Ultrasonik işlemede, istenen şekle sahip bir alet, iş parçası üzerinde yaklaşık 15 - 50 µm amplitüdündeki ultrasonik frekansta (19 ~ 25 kHz) titreşir. Takım ile iş parçası arasında işleme bölgesi, genellikle su bazlı bir bulamaç formunda sert aşındırıcı parçacıklarla doludur. Takım yüksek frekanslı titreşim uygulayarak aşındırıcı olan bu sıvılarla iş parçasına çarptırılarak aşındırma yapar. Ultrasonik işleme temel olarak elektrik iletkenlerinin zayıf olduğu ve dolayısıyla Elektrokimyasal ve elektriksel kıvılcımla işlenemeyen kırılabilir malzemelerin işlenmesinde kullanılır. Özellikle sert ve gevrek malzemelerin işlendiği çalışmalar mevcuttur (Zhang et al. 2013).

1.8.3 Elektrokimyasal işleme

Faraday elektroliz prensibine bağlı çalışan bu sistemde amaç, anot durumundaki iş parçasından metal iyonlarının kopması ve elektrotlar tarafından uzaklaştırılarak iş parçası malzemesinin işlenmesidir. Bu nedenle malzeme kaldırma oranı veya işleme, iş malzemesinin

mekanik veya fiziksel özelliklerine bağlı değildir. Sadece iş malzemesinin atom ağırlığına ve iletken olmasına bağlıdır. Elektrokimyasal işleme yöntemi bu şekilde iş malzemesinin sertliğinden, mukavemet değerlerinden hatta termal özelliklerinden bağımsız elektriksel olarak iletken herhangi bir iş malzemesini işleyebilir. Ayrıca elektrokimyasal işleme atomik seviyede çözünmeye yol açtığı için yüzeyde neredeyse hiç gerilim ve termal hasar oluşturmamaktadır.

1.8.4 Elektrokimyasal Honlama

Elektrokimyasal honlama, elektrokimyasal işleme prosesi ve klasik honlama prosesinin kombinasyonudur. Hon gövdesi katot olarak elektrokimyasal işleme yaparken gövde üzerindeki hon taşları mekanik işleme yaparak silindir yüzeyindeki konikliği giderir, dalgalı yapı ve salgıyı alır, iş parçası yüzeyindeki elektrokimyasal işlemeden kalan artıkları temizler. İşleme hızı geleneksel honlamaya göre 3-5 kat, iç delik taşlamaya göre ise 4 kat daha yüksektir.

1.8.5 Kimyasal İşleme

En eski alışılmamış imalat yöntemidir. Kimyasal işleme, iş parçasının yüzeyinin kontrollü bir şekilde asit ya da alkali kimyasallarla aşındırılarak işlenmesini esas alır.

1.8.6 Elektriksel Kıvılcım ile İşleme (EKİ) ve Tel Erozyon ile İşleme

Elektriksel Kıvılcım ile İşleme (EKİ) yönteminin sertlikten bağımsız bir şekilde termal enerji ile elektriksel olarak iletken parçaları işlemesi; kalıp, otomotiv, havacılık ve cerrahi bileşenlerin imalatında kendine özgü avantajı olmuştur. EKİ elektrot ile iş parçası arasında doğrudan temas kurmadığından mekanik baskıları ve titreşim sorunlarını ortadan kaldırmaktadır. Küçük ve narin iş parçaların işlenebilmesi, yönteme olan ilgiyi oldukça arttırmaktadır.

Tel erozyon ile işlemede sürekli olarak hareket eden tel önceden belirlenmiş bir yol boyu hareket ederek iş parçasını keserken elektriksel boşalım sayesinde işleme yapar. Tel Erozyon uygulamalarında kullanılan elektrotun boyutları, malzemesi ve performansı değişkenlik gösterebilir. Önemli işleme parametrelerinden biri de tel elektrotur ve işleme

sürecinin kararlılığını sağlamak için doğru elektrot seçimi çok önemlidir. Çoğunlukla tel erozyon uygulamalarında tercih edilen tel çapları 0.25-0.33 mm dir.Pirinç kaplamalı tel elektrotlar yaygın olarak kullanılmaktadır (Prasad et al. 2015). İş parçasının sertlik gibi özelliklerinin prosesde etkili olmaması, çapaksız olması iş parçasında stres oluşmaması, maliyetinin düşük olması, tasarım değişikliklerinin kolay ve çabuk şekilde uygulanması, yüzey kalitesi iyi olması, hurda oranı düşük olması gibi avantajlara sahiptir. Proseslerde yaygın olarak kullanılan aşındırıcılar $FeCl_3$, $CuCl_2$, HNO_3 , HF ve alkali aşındırıcılarıdır.

Diğer yandan keskin köşeler elde edilememesi, kalın malzemelerin kimyasal olarak işlenme zorluğu, aşındırıcıların işçiler için tehlikeli olma potansiyeli, atık çevresel risk taşıması dezavantajlarındandır.

1.9 EKİ MEKANİZMASI

EKİ mekanizması elektrik enerjisinden yararlanır, elektrot ile iş parçası dielektrik bir akışkanın içine batırılmış halde ve birbirine temas etmemektedir. Elektrik kaynağından elektrota yaklaşık olarak 100V- 400V arası açık aralık gerilimi uygulanır. Bir kontrolcü ile kontrol edilen servo motor elektrodu iş parçasına yaklaştırır. Elektriksel alan elektrot ile iş parçasının en yakın oldukları noktada en yüksek seviyeye ulaşır. Dielektrik sıvının polarize olmasıyla kutuplar etrafındaki iyon sayısı artar. Dielektrik sıvı oluşan elektriksel alanı taşıyamaz, yalıtım özelliğini kaybeder ve artık yalıtamaz. Açılan düşük dirençli plazma kanalından elektronlar hızla akmaya başlar. Açık aralık gelimi düşer. Elektriksel akımın şiddeti artmasıyla gerilim düşer. Her iki elektrot yüzeyinde çok yüksek noktasal sıcaklıklar oluşur. Elektrot yüzeyine, iyonların ve elektronların hızla çarpmasıyla oluşan kinetik enerji termal enerjiye dönüşür. Elektron ve iyon bombardımanı sonucu sıcaklık yaklaşık 20.000 $^{\circ}K$ değerine ulaşabilir. Düşük dirençli plazma kanalı genişlemeye çalışır fakat deşarj kanalında biriken iyonlar kıvılcımı dar bir alana hapseder akım geçişinin çok küçük bir alanda kalmasını sağlar. Elektrot ile iş parçası arasında meydana gelen elektriksel boşalmalar iş parçası yüzeyinde küçük bir bölgeyi eritir. Deşarj kanalında etkili olan yüksek basınç sebebiyle ergiyen malzeme henüz yerinden ayrılmamıştır. Darbe geriliminin sonlandırılmasıyla akım ve gerilim sıfır olur. Yüksek basıncın etkisini kaybetmesiyle eriyik haldeki malzeme hızla buharlaşır dielektrik sıvı içine karışır. Buharlaşan malzeme soğuk dielektrik sıvı içinde düzensiz geometriye sahip şekillerde katılaştır.

1.10 EKİ SİSTEM BİLEŞENLERİ VE ETKİN PARAMETRELER

EKİ mekanizmasının üç ana kısmı vardır; servo sistemi, dielektrik sıvı sistemi, güç kaynağı ünitesi. Elektrotla iş parçası arasındaki mesafe servo sistem ile sağlanır. Elektrot başlangıç noktasından servo sistem ile referans gerilimini buluncaya kadar ilerler. Referans gerilimini bulduğunda deşarj gerçekleşir, düşen gerilim algılanarak servo sistem elektrot ile iş parçası arasındaki aralığı dengede tutar. İstenilen elektrik akımı darbe süresince uygulanır. Dielektrik sıvının işleme bölgesine uygulanması sıvı haznesi, pompa ve bazı durumlarda karıştırıcıdan oluşur.

EKİ' de uygulanan parametreler; darbe akımı, darbe süresi, bekleme süresi ve deşarj gerilimi, dielektrik sıvı, elektrot özellikleridir.

1.10.1 Deşarj Gerilimi

Açık aralık gerilimi darbe süresince iş parçası ve elektrot arasında uygulanmaktadır. Kıvılcım atlamasının gerçekleştiği gerilim deşarj gerilimidir. Dielektrik sıvıda iyonizasyon oluşuncaya kadar açık aralık gerilimi artar. Oluşan akımın akmaya başlamasıyla açık aralık gerilimi düşer. Açık aralık geriliminin artması malzeme kaldırma, takım aşınma oranlarını ve yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır. Bu çalışmada kullanılan tezgah AJAN CNC 983 dalma erozyon tezgahının açık aralık gerilimi 75 V – 150 V arasındadır.

1.10.2 Darbe Akımı

Darbe akımı yüzey kalitesini ve talaş kaldırma hızını etkileyen en önemli parametredir. Kıvılcım atlaması esnasında oluşan akımın değerine darbe akımı denir. Bu çalışmada kullanılan akım seviyeleri 7A, 12A, 22A, 42A'dir.

1.10.3 Darbe Süresi

Darbe süresi mikro saniyelerle tekrarlanan kıvılcım atlama süresidir. Talaş kaldırma işleminin gerçekleştiği süredir. Bu çalışmada uygulanan darbe süreleri: 3 μ s, 6 μ s, 12 μ s, 25 μ s, 50 μ s, 100 μ s, 200 μ s, 400 μ s, 800 μ s, 1600 μ s'dir.

1.10.4 Bekleme Süresi ve Geçikme Zamanı

Bekleme süresi dielektrik sıvının iş parçasından koparılan talaşları ortamdan uzaklaştırmasındaki geçen süredir. İki kıvılcım arası beklenen süre de diyebiliriz. Bu sürede elektriksel alan oluşmamaktadır.

Bekleme süresi iş parçasına uygulanan voltaj zamanından deşarj oluşumuna kadar geçen süreyi ifade eder.

1.10.5 Dielektrik Sıvı ve Sirkülasyon Yöntemi

İşlem sırasında oluşan atık malzemenin bölgeden uzaklaştırılması elektrot ve iş parçası yüzeylerinin soğutulması ve kıvılcım atlama boşluğunu kontrol altında tutmak amaçlanır. Standard bir CNC tezgahında dielektrik sıvı bir pompa yardımı ile depodan işleme bölgesine aktarılır kirlenen dielektrik sıvı filitreleme ve dinlendirme işlemlerinden sonra temizlenerek uygun sıcaklıkta tekrar pompalanır. Toz katkılı EKİ'de ise tezgaha zarar verilmemesi için sisteme ayrı bir sirkülasyon sistemi adapte edilir.

1.11 TOZ KATKILI ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME (TKEKİ)

Dielektrik sıvı içersine ilave edilen tozların EKİ yöntemini geliştirmesi amaçlanmıştır. Dielektrik sıvının yalıtım direncini düşürmek ve elektriksel boşalımları kolaylaştırmak işleme performansını arttırarak daha hızlı talaş kaldırmak, daha iyi yüzey kalitesi elde etmek amacıyla toz ilavesi yapılmaktadır. Elektrot ile iş parçası arasında asılı halde bulunan toz tanelerinin hızları boşalım gerçekleştiğinde artar ve iş parçasıyla elektrot arasında parçacık zinciri oluşturur. Tozların oluşturduğu köprü ile deşarj kanalı uzar ve genişler. Bu durumun malzeme kaldırma ve yüzey pürüzlükleri üzerinde olumlu etkisi olduğuna dair literatürde çalışmalar mevcuttur.

1.12 HİDROKSİAPATİT (HA)

Hidroksiapatit (HA) veya $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$, biyomedikal alanındaki birçok uygulama için biyoaktif madde olarak kullanılan bir kalsiyum fosfat seramiktir. Gunawan et al. (2014) Ayrıca HA, kimyasal yapısı kemiğe benzer Tönsuaadu et al. (2011). Bu nedenle, HA

biyoyumluluk konusunda mükemmeldir ve hücrenin büyümesini teşvik etme yeteneğine sahiptir Sopyan et al. (2007) HA insan vücuduna implante edildiğinde çevreleyen kemik dokusu ile gerçek bir bağ oluşturur. Pattanayak et al. (2011) kemik, dentin gibi sert dokuların organik ve inorganik bileşenlerinden oluşan ve doğal yapıda bulunan bir kompozit malzemedir.

Bütün diğer seramikler gibi gevreklerdir. Bir implat malzemesinin kırılma tokluğu kemiğinkinden daha büyük olmak zorundadır. HA'nın zayıf yanlarından biri mekanik özellikleridir. HA, yapay dişler veya kemikler gibi ağır yüklü implantlar için tek başına kullanılamaz. Sert doku implantı olarak kullanılması için titanyum ve titanyum alaşımları ile birlikte kullanılmalıdır.

1.13 HA KAPLAMA YÖNTEMLERİNDEN BAŞLICALARI

Büyük oranda biyoyumluluk amaçlayan araştırmacılar çeşitli kaplama yöntemlerini kullanmışlardır bunlar; plazma – püskürtme, gaz atmosferli plazma püskürtme, elektrofez yöntemi, sulu püskürtme, elektrokimyasal kaplama, darbeli lazer kaplama, biyomimetrik kaplama, sol jel metodu gibi yöntemlerdir.

1.13.1 Biyomimetik Yöntem

Apatit polimer ve apatit metal kompozit malzemelere duyulan ihtiyacı karşılamak için kullanılan bir yöntemdir. 7.4 pH seviyesi ve 37 °C'de, insan vücudu için biyoyumlu ortamda kimyasal çöktürme yöntemiyle yapay vücut sıvısı içerisinde kalsiyum fosfat kaplama işlemidir. Yarı kararlı tampon çözelti olan ve iyon konsantrasyonu bakımından kan plazmasına eşdeğer yapıda olan yapay vücut sıvısı; KCl, NaCl, HCl, CaCl₂ H₂O, NaHCO₃, Na₂HPO₄ 2H₂O, MgCl₂ 6H₂O, (CH₂OH)₃CNH₂, Na₂SO₄ kimyasalları kullanılarak hazırlanır (Aydın 2013).

1.13.2 Sol Jel Yöntemi

Yöntem için öncelikle saf yapıda olan başlangıç maddelerinin homojen yapıda çözeltileri hazırlanır. Alkoksitler, metal tuzları ya da nitratlar gibi gerekli malzemelerin ilavesi yapılarak çözelti sol hale getirilir. Devamında sol üzerinde kondenzasyon reaksiyonları oluşturularak jel

durumuna geçmesi sağlanır. Viskozitelerinin düşüklüğünden dolayı ince film elde etmek için uygun bir yöntemdir.

1.13.3 Plazma Püskürtme Yöntemi

Plazma püskürtme yöntemi, püskürterek biriktirme amacı ile kaplanmak istenen altlık malzeme üzerine erimiş veya yarı erimiş halde farklı metalik yada metalik olmayan kaplama uygulamaları için kullanılan bir yöntemdir. Ergimiş yada yarı ergimiş halde olan partikküller gaz veya atomize jetlerle hazırlanmış olan yüzeye hızla yönlendirilir. Partiküllerin yüzeye çarpmasıyla mekanik bağlanma gerçekleşir. Yönlendirilmiş olan partiküllerin birbirine çarpması ve bağlanmasıyla kaplama gerçekleşir. İnce halde bulunan partiküller hızlı bir şekilde soğur ve altlık yüzeyinde katılışır (Kıyıcı 2011).

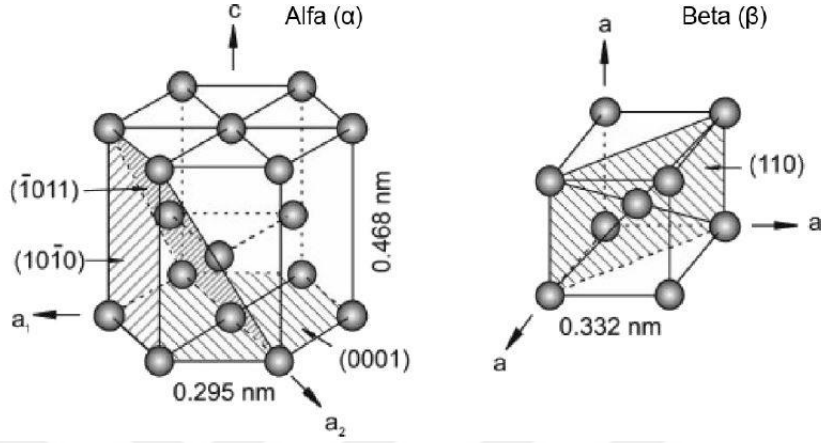
1.14 TİTANYUM VE TİTANYUM ALAŞIMLARININ İNCELENMESİ

Titanyumun doku uyumu, ilk olarak 1940 yılında araştırılmaya başlanmıştır. 1951 yılında tavşanlarının kemik ve yumuşak dokularına titanyum yerleştirilmesiyle ilgili çalışmalar yapılmıştır. Elektrokimyasal yöntemler uygulandığında Titanyumun mükemmel korozyon dayanımına sahip olduğunu saptanmıştır. Titanyum ve alaşımları 1960 yılından itibaren biyomalzeme olarak geliştirilmiş ve tıbbi araçlar olarak kullanılmıştır.

Titanyum yeryüzünde en çok bulunan elementler arasında 9'uncu metaller arasında 4'üncü sıradadır. Kömür küllerinde, bitkilerde ve insan vücudunda bulunmaktadır. Atom numarası 22 sembolü Ti ve atom ağırlığı 47.9 olan bir elementtir. Saf halde parlak beyaz olan Titanyum düşük yoğunluğa, düşük elastik modüle, yüksek mukavemete ve mükemmel bir korozyon direncine sahiptir.

Saf halde bulunan Titanyum mekanik özellikleri açısından zayıftır, çoğunlukla protez üzerine poroz kaplama olarak kullanılmıştır. Poroz kaplamalar, kaplamada bulunan porların içinde kemik büyümesini sağlamak amacıyla kullanılır. Yaygın olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı, paslanmaz çelikler ve kobalt – krom alaşımlarına kıyasla yaklaşık yarısı kadar bir elastik modüle sahiptir.

Titanyum oda sıcaklığında hegzagonal kristal yapıya sahiptir (Şekil 1.1). Alfa faz yapısındadır. 883°C üzerine çıktığında hacim merkezli kübik yapıya dönüşmektedir. Beta faz yapısına sahip olur. Alaşımlandırmayla alfa, alfa + beta ve beta alaşımları oluşturulabilir (Brunette et al. 2001).



Şekil 1.1 Alfa ve beta kristal yapılarının kafes parametreleri (Lütjering and Williams 2007).



BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI VE ÇALIŞMANIN AMACI

2.1 ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME (EKİ) YÖNTEMİNİN GELİŞİMİ VE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Katot yüzeyinde elektrik deşarjlarının bıraktığı erozyon kraterlerini ilk olarak İngiliz kimyager Joseph Priestley 1766'da keşfetmiştir. Keşifle birlikte, elektriksel deşarjların yani kıvılcım atlamasının aşındırıcı etkisiyle metallerin işlenebileceği fikri de ortaya çıkmıştır. Akabinde, 1943 yılında, Sovyet bilim insanları Boris Lazarenko ve Natalya Lazarenko, bir elektrik boşaltımının yıkıcı etkisinden faydalanarak, elektrik iletkeni olan malzemelerin işlenmesi için denetimli bir süreç geliştirmek fikrine kapılmışlardır. İşte bu fikir ile birlikte Elektriksel Kıvılcımla İşleme (EKİ) yöntemi doğmuştur. Lazarenko çifti, yalıtkan bir sıvı tabakasıyla birbirinden ayrılan iki iletken arasında oluşan ard arda elektrik boşalım sürecini geliştirecek bir devre tasarladılar ve bu devreye Lazarenko devresi denildi. Bugün çoğu EKİ tezgâhında Lazarenko devresinin gelişmiş bir sürümü kullanılmaktadır (Rao 2009). 1950'lerde bu alana olan ilgi artarak, EKİ teknolojisinin kullanıldığı tezgahların üretimi ile ilgili yeni çalışmalara başlanmıştır. 1960'larda yarı iletken endüstrisinin gelişimi, EDM tezgahlarındaki gelişmeyi daha da ileri taşıdı. DC güç kaynağına bağlı olan elektrot ile iş parçası arasında işleme alanının aşırı ısınması, bu işlemin uygulamalarını kısıtlamaktaydı. 1960'larda ve 1970'lerin başında sayısal kontrolün bulunmasıyla elektrotların hareketleri daha kusursuz kontrol edilebilir hale geldi. 1970'lerde mikroişlemcinin gelişimi ve bilgisayarlı sayısal kontrol sisteminin (CNC) geliştirilmesi, EKİ'nin performansını daha da geliştirdi (P N Rao, 2009). Malzemelerin kontrollü işlenmesi ve darbe zamanının tutarlı ve güvenilir bir şekilde kontrol edilmesi için basit bir servo kontrol devresi kullanıldı. Böylece, elektrot ile iş parçası arasındaki boşluğu korumak ve kontrol etmek kolaylaşmıştır (Jameson 2001). Ayrıca, sertliğinden bağımsız olarak elektriksel olarak iletken olan herhangi bir malzemenin işleme süreci gelişmiştir. 1974 yılında, EKİ yöntemi ile işlenen bakır ve çelik malzeme yüzeylerinin kompleks yapısı, optik ve taramalı elektron mikroskopu ile incelenmiştir. Yöntemin doğası

gereği gerçekleşen hızlı ısınma ve soğumanın yanında, arda arda oluşan kıvılcımların yüzeyleri karmaşıklaştırdığı ve konvansiyonel pürüzlülük ölçümlerinin bu yüzeylerde kısıtlı kaldığı belirtilmiştir. Ayrıca, işleme koşulları, takım elektrodu, dielektrik sıvı ya da darbe enerjisi miktarları ne olursa olsun eriyen malzemenin tamamı iş parçasından ayrılamadığı ve işlenen malzeme yüzeyinde eriyip katılaştıran bir tabakanın varlığı gözlemlenmiştir (Crookall ve Khor 1974). Bundan sonraki aşamalarda EKİ yöntemi, malzeme kaldırma oranı yada elektrot aşınmasını azaltmanın yanında işlenen yüzey özelliklerini geliştirmek üzerine de yoğunlaşmıştır. Literatürde bu alanda birçok çalışma mevcuttur. Bakır – tungsten elektrot kullanarak EKİ yöntemiyle işlenen kalıp çeliklerinin yüzeyinden başlayıp yüzey altında devam eden eriyip tekrar katılaştıran bölgede ve ısıl etkilenmiş bölgede sertlik değerinin arttığı gözlemlenmiştir. İşleme sırasında elektrottan iş parçasına ve iş parçasından da elektrotta malzeme nüfuziyetinin olduğu da kaydedilmiştir (Soniand Chakraverti 1996). Grafit elektrotla karbon çeliğinin işlenmesinde, işleme aralığına oksijen gazı püskürtüldüğünde, talaş kaldırma oranının arttığı gözlemlenmiştir. Oksijen gazı püskürtülmesiyle, işleme yüzeyinde oluşan kraterin hacmi büyümekte ve daha sık kıvılcımın meydana gelmesi nedeniyle bu durumun oluştuğu belirtilmiştir (Kunieda et. al. 1991). İşleme sırasında hızla gerçekleşen ısısal çevrimler ve yüksek basınç çeşitli yüzey kusurlarına sebep olmaktadır. Yüzeyden başlayarak yüzey altına kadar uzanan çatlaklar, yorulma dayanımını da önemli ölçüde düşürmektedir ve eriyip tekrar katılaştıran tabakadaki karbon yoğunluğu da artmaktadır (Abu Zeid 1997). EKİ ile işlemede oluşan kalıntı gerilmeler (Ekmekci 2007) yüzeyden malzeme içine doğru hızla artarak, yeniden katılmış katmanın altında en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu bağlamda, plastik kalıp çeliğinin, bakır ve grafit elektrotla gazyağında işlenmesinde yüzeyde oluşan kalıntı gerilmelerin derinliğe bağlı değişimini tahmin etmek için deneye dayalı bir model sunulmuştur (Ekmekci 2006). Ayrıca, bakır elektrot kullanarak martenzitik çelikler hidrokarbon bazlı dielektrik sıvıda işlendiğinde, yüzeye yakın tabakalarda oluşan karbon yoğunluğunun, ana malzemedekine göre dokuz kat daha fazla olduğu saptanmıştır. Bu artışın ya takım elektrotundan yada dielektrik sıvıdan yüzeye karbon geçişiyle sağlanacağı belirtilmiştir (Rebelo et. al. 1998). Bununla birlikte, yüksek darbe akımlarında hızla gerçekleşen ısınma ve soğuma çevrimleri sonucu meydana gelen gerilmeler, yüzeyden başlayıp ana malzemeye kadar uzanan mikro çatlakların oluşmasına neden olmaktadır (Ekmekci et al. 2005). Yöntemle işlenen numunelerde kesit üzerinde yapılan incelemelerde, işlenmiş yüzeyden ana metale inildikçe farklı görünüm ve karakteristiğe sahip katmanların oluştuğu da gözlenmektedir (Ekmekci 2009). Ultrasonik titreşim desteğiyle EKİ yöntemi ile bakır elektrot kullanılarak işlenmiş çelik malzemenin yüzey pürüzlülüğünün tahmini için bir

model geliştirilmiş, voltaj, darbe akımı ve darbe sürelerinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün de arttığını belirtmiştir (Zhang et. al. 2005). Dielektrik sıvının özellikleri ya da farklı sıvılar kullanılması da işlenen yüzey özelliklerini etkilemektedir. EKİ yöntemiyle işlenen DIN 1.4442 çift fazlı çeliğinde eriyip tekrar katılacak katmanın mikro sertliği incelenmiştir. Dielektrik sıvı olarak su kullanıldığında yeniden katılacak katmanın sertliği değişmediği, hidrokarbon bazlı dielektrik sıvı kullanıldığında ise katman sertliğinin yüzeye yoğun karbon difüzyonu nedeniyle önemli ölçüde arttığı belirtilmiştir (Ekmekci 2016). Tabakalarda oluşan sertlik değerlerini alışımda kullanılan elementler de etkilemektedir. Vanadium ve azot gibi elementleri çelikte alaşım elementi olarak kullanılmaktadır. Azot varlığı, eriyip tekrar katılacak katmandaki martensit oluşumunu azaltmakta ve böylece bu katmandaki sertliğin ısı etkilenmiş katmandakine göre daha az olmasına neden olmaktadır (Ekmekci ve Keskin 2019).

2.2 TOZ KATKILI ELEKTRİKSEL KIVILCIMLA İŞLEME(TKEKİ) YÖNTEMİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

EKİ yönteminde, dielektrik sıvı içerisine abrasiv (aşındırıcı) tozlar katılmak suretiyle işlemin verimliliğini arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcımla İşleme (TKEKİ) olarak da bilinen bu yöntemde, daha düşük enerji kullanılarak, yüzey özellikleri ve mekanik özellikler iyileştirilmekte ve daha etkin işleme yapılabilmektedir. Dielektrik sıvı içerisindeki toz tanelerinin alt ve üst kısımlarında sıralanan pozitif ve negatif elektrik yükleri, toz zincirleri oluşturmakta akabinde elektrik alan yoğunluğu azalarak yalıtkanlık bozulmaktadır. İletken olan tozlar, iş parçası ile elektrot arasındaki kıvılcımları daha kararlı ve yoğun hale getirmektedir. Böylece talaş kaldırma oranı artmakta, yüzey kalitesi iyileşmektedir. Erden ve Bilgin (1980), dielektrik sıvıya eklenen toz katkı miktarını arttırarak işleme hızının arttığını bununla birlikte toz konsantrasyonunun belirli limitleri aşmasının kısa devrelere neden olarak işlemin kararsız hale getirebildiğini belirtmişlerdir. Gazyağı dielektrik sıvısına 4 gr/l oranında ortalama 10 µm boyutlarında grafit tozu ilave ederek yapılan elektro erozyon işleminde, talaş kaldırma oranında %60 ve takım aşınmasında %15'lik bir artış tespit edilmiştir (Jeswani 1981). Alüminyum tozları kullanarak işlenen SKH – 51 malzemesinde ayna yüzeyine yakın kalite elde edilmiştir (Wong et. Al. 1998). Çelik iş parçasının bakır elektrotla işlenmesinde, dielektrik sıvıya katılan 10 µm tane boyutlu ve 40 gr/l konsantrasyonda alüminyum tozları, talaş kaldırma oranını 2.06 mm³/dak' dan 3.4 mm³/dak' ya (%70) yükseltmiştir (Zhao et al. 2002). Bununla birlikte dielektrik sıvıya

eklenen homojen dağılmış alüminyum tozları ile EKİ'nin saf dielektrik sıvı versiyonlarına oranla yüzey pürüzlülüğü yaklaşık %60 oranlarında iyileştiği gözlemlenmiştir (WuIn 2005). Inconel 718 nikel alaşımının TKEKİ yöntemiyle işlenmesinde toz katkısının beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bunun için, 2 ve 10 gr/l olmak üzere iki farklı karışım oranlarında alüminyum ve silisyum tozları kullanılmıştır. Sonuç olarak, alüminyum tozları ile yapılan deneylerde en düşük beyaz tabaka kalınlığı ve en yüksek talaş kaldırma oranının elde edildiğini göstermişlerdir (Klocke et. al. 2004). Taguchi yöntemini kullanarak yapılan deneysel çalışmada, uygun miktarda grafit tozları ile talaş kaldırma oranının arttığı, yüzey pürüzlülüğünün ve elektrot aşınmasının azaldığını tespit edilmiştir (Kansal et. Al. 2005). Elektrot geometrisinin de yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmada, 64 cm² yüzey alanına sahip elektrot kullanılarak dielektrik sıvıya 2 gr/l oranında silisyum tozu ilave edilerek yüzey pürüzlülüğü 0.57 µm olarak ölçülürken, bu değer 1 cm² alanlı elektrot kullanıldığında 0.09 µm'a kadar düşürülmüştür (Pecas ve Henriques, 2003). TKEKİ'de kullanılan toz katkıları işlenen yüzey ve yüzey altında oluşan katmanların mikrosertlik değerlerinde de değişimlere sebep olmaktadır. Özellikle eriyip tekrar katılan katmanın ana malzemeye göre sertliğinin hayli yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Dielektrik sıvıya Al ve Cr tozlarının ilavesiyle TKEKİ'ye tabi tutulan SKD – 61 çeliğinin korozyon direnci ve yüzey sertliğinin iyileştiği vurgulanmıştır. Ayrıca dielektrik sıvıya katılan tozların işlenen yüzeye de nüfuz ettiği belirtilmiştir (Hwa Yan 2001). Hidrokarbon bazlı dielektrik sıvıda, titanyum tozları kullanıldığı zaman iş parçasının yüzeyinde TiC tabakası oluştuğu ve 2000 HV tabaka sertliğine ulaşıldığı gözlemlenmiştir (Frutani et al. 2009). Benzer şekilde, dielektrik sıvıya manganez tozu ilavesiyle iş parçası yüzey mikrosertliğinin ana malzemesine göre yaklaşık %73 oranlarında yükseldiği belirtilmiştir. Ayrıca 12g/l konsantrasyonlu ince grafit tozları dielektrik sıvıya eklenerek işleme hızı %26.85 oranında geliştirilmiştir (Kumar et al. 2010). Daha önce elektrottan iş parçasına, iş parçasından da elektrotta malzeme nüfuziyetine değinilmişti. Literatürdeki çalışmalar, dielektrik sıvıya katılan tozların da işlenen yüzeye nüfuz ettiğini göstermektedir. İşleme sırasında dielektrik sıvı içerisinde asılı tozlar belli işleme koşullarında farklı alaşımlama mekanizmaları geliştirmektedir. Deşarj kanalı etrafında bulunan toz taneleri, işlem sırasında, katılaşmadan önce eriyik havuza nüfuz etmek için ivmelenip yeterli hıza ulaşmaktadır. Bu da yüzeyde toz tanecikleri oluşumunu sağlamaktadır. Yüzeye yapışmış bu toz tanecikleri aynı zamanda çatlak oluşumunu da engellemektedir. Buna rağmen yüksek gerilmelerden dolayı oluşmuş çatlaklar toz katkısından etkilenmemektedir (Ekmekci ve Ersöz 2012). SiC toz katkılı elektriksel kıvılcımla işlenmiş plastik kalıp çeliği üzerine yapılan çalışmada, ikincil deşarjların ve yüzeye

yapışmış toz taneciklerinin sanıldığı gibi rastgele oluşmadığı, belirli özel parametrelerde bu yapışmanın kontrollü bir şekilde sağlanabildiği belirtilmiştir. Yüzeye yapışmış taneciklerin en yoğun olduğu akım ve darbe süresi parametreleri de önerilmiştir (Ekmekci et al. 2015).

2.3 TKEKİ'DE Ti6Al4V ALAŞIMI VE HİDROKSİAPATİT (HA) NÜFUZİYETİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Titanyum ve alaşımları yüksek dayanım ağırlık oranı, yüksek korozyon direnci ve iyi biyouyumluluk özelliklerinden dolayı özellikle hava araçlarında, otomobillerde, deniz araçlarında, kimya endüstrisinde ve biyomedikal alanında kullanılmaktadır (Habazakiet al. 2007). Aynı zamanda biyomedikal cihazlarda ve bileşenlerde, özellikle sert doku replasmanlarında ve ayrıca kardiyak ve kardiyovasküler uygulamalarda, nispeten düşük elastisite modülü, iyi yorulma mukavemeti, şekillendirilebilirlik, işlenebilirlik, korozyon direnci, ve biyouyumluluk özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir (Liu et al. 2004). Bununla birlikte, titanyum ve alaşımları tüm klinik gereklilikleri karşılayamaz. İnsan vücudundaki eser miktardaki metal elementler, genellikle yiyecek ve sudan alınmasına rağmen, vücuda implante edilen biyomalzemelerden kaynaklanır. Metal iyonları, vücuttaki yapay eklemler, kemik plakaları ve vidalar vb. gibi metalik biyomalzemelerden salınır. Serbest kalan metal iyonları, organlarda birikme, alerji ve kansere sebep olabilir. Çok miktarda metal iyonu salınırsa, genellikle insan sağlığı için zarar da büyük olur. Metal iyonu salımını araştırmak için malzemelerin elektrokimyasal analizleri için birçok çaba sarf edilmektedir (Hanawa et al. 2004). Bu nedenle, biyolojik, kimyasal ve mekanik özellikleri iyileştirmek için genellikle yüzey modifikasyonu yapılır. Bu yüzey modifikasyonlarından bazıları, yüzey pürüzlendirme (Barriuso et al. 2011), oksidasyon yöntemleri (Krzysztof et al. 2018), plazma ve iyon ışını (WeihongJin 2018) ve sol-jel kaplamadır (Juan 2016). Biyoaktivite sağlamak için titanyum gibi biyouyumlu malzemeler genellikle hidroksiapatit (HA) ile kaplanır. Sentetik HA, kemiğin inorganik bileşenlerine çok benzer $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ bileşimidir. HA kaplı titanyum üretmek için en yaygın kullanılan teknik, plazma püskürtme yöntemidir (Cheol ve Kim 2003).

Bu bağlamda, Ti6Al4V alaşımı, HA ve TKEKİ yöntemi bir araya getirilirse, biyouyumlu malzemelerin biyoaktivitesini artırmak için TKEKİ yönteminin kullanımı aklı gelmektedir. Ti6Al4V alaşımının TKEKİ yöntemiyle işlenmesi yanında, dielektrik sıvıya katılan HA tozlarının işlenen yüzeye nüfuz ederek biyomedikal uygulamalar için fonksiyonel yüzeylerde de edilmesi üzerinde durulmaktadır. TKEKİ yöntemiyle, metalik malzemelerin yüzeylerinin

HA ile zenginleştirilmesine dair çalışmalara son yıllarda rastlanmaktadır. Bu sebeple, bu alanda ilk çalışma niteliğindeki TKEKİ yöntemiyle Ti-6Al-4V alaşımı üzerine HA çökeltilmesi ve çökelmenin gözlemlendiği parametrelerin belirlenmesi üzerine yapılan çalışma önem arz etmektedir. (Ekmekci ve Ekmekci 2013). Devamı olan 2016'daki çalışmada ise HA nüfuziyeti için optimum parametreler 22A darbe akımı ve 12 µs darbe süresi olarak belirlenmiştir (Ekmekci ve Ekmekci 2016). Aynı şekilde Ti implantlarında korozyon direncinin artırılması için HA-TKEKİ yöntemi uygulanmış ve biyoyumlu fonksiyonel yüzeyler elde edilmiştir (Prakash ve Uddin 2017). TKEKİ yöntemiyle üretilen nano gözenekli yüzey, kemik büyümesine ve sağlıklı bir arayüz oluşturulmasına olanak sağlamakta böylece osteoblast benzeri hücrelerin daha yüksek oranda yapışarak büyümesini kolaylaştırmaktadır (Prakash et al. 2017). Dielektrik sıvıdaki HA konsantrasyonu, yüzeyler üzerinde hücrel aktiviteyi ve biyo uyumluluğu artırmadaki en etkili faktörlerden biri olmaktadır (Öpöz et. al. 2019). Ayrıca Ti-6Al-4V alaşımı, mikronize HA toz katkılı EKİ yöntemiyle 4 farklı akım seviyesinde (7A, 12A, 22A ve 42 A) ve her bir akım seviyesi için 10 farklı darbe süresi (3µs- 1600µs) uygulanarak işlenmiştir. Burada en iyi nüfuziyetin 22 A darbe akımı ve 100 µs ve 800 µs darbe sürelerinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir (Ekmekci ve Akbaş 2019).

2.4 ÇALIŞMANIN AMACI

Mühendislik ve tıp alanında gelişmeler, biyomalzemelere duyulan ihtiyacın her geçen gün arttığını göstermiştir. Mekanik özellikleri ve sahip oldukları korozyon direnci sayesinde medikal uygulamalarında Titanyum alaşımları tercih edilmektedir. Fakat insan vücudu korozif bir ortama sahiptir. Vücut da oluşan bölgesel korozyonlar ve çevresindeki dokulara zarar verici iyon salınımı gibi istenmeyen durumlar oluşmaktadır. İstenmeyen durumların engellemek amacıyla titanyum alaşımların yüzeylerini biyoyumlu malzemelerle kaplama ihtiyacı doğmuştur. HA kemik dolgularında kullanılan biyoyumlu bir seramiktir. HA çevresindeki dokularla etkileşime girmemekte ve bakteriyel bir risk oluşturmamaktadır. Bu yüzden medikal amaçlı kullanılan metallerin kaplanması tercih edilmektedir. Bu çalışmada Hidroksiapatit Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcımla İşleme (HA-TKEKİ) yöntemi ile işlenen titanyum alaşımlarının yüzey morfolojileri ve mikroyapıları incelenerek HA yönünden zengin fonksiyonel yüzeylerin oluşturulması hedeflenmiştir. Çalışmada, nano ve mikro boyutlarda HA tozları kullanılmış ve karşılaştırma yapılmıştır.

BÖLÜM 3

DENEY DÜZENEGİ

Bu çalışmada toplamda 120 adet numune EKİ yöntemiyle işlenmiştir. Bunlardan 40 tanesi dielektrik sıvı olarak saf suda, 40 tanesi dielektrik sıvı olarak saf suya nano HA tozları katılarak, 40 tanesi ise dielektrik sıvı olarak saf suya mikronize (mikro) HA tozları katılarak işlenmiştir. Öncelikle numuneler istenilen standart boya getirilmiş ve ardından gerilim giderme işlemi uygulanmıştır. Numuneler kum zımparalarla ayna parlaklığında parlatılmıştır. EKİ ve TKEKİ yöntemiyle işlenen numunelerin, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), X Işını Kırınım Difraktometresi (XRD) ve Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) ile yüzey analizleri yapılmıştır. Bunları takiben optik mikroskop ile kesit analizleri ve mikrosertlik cihazı ile de sertlik ölçümleri yapılmıştır. Analiz, ölçüm ve işlemlerin tamamı Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi ve Makine Mühendisliği Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

3.1 NUMUNE VE ELEKTROT ÖZELLİKLERİ

İş parçası olarak, tıp alanında biyoyumluğu sebebiyle tercih edilen grade 5 titanyum alaşımı kullanılmıştır. EKİ tezgahında işlenmek üzere 10 mm çapında 8 mm boyunda (Şekil 3.1). Ti-6Al-4V (Grade 5) 120 adet numune hazırlanmıştır. Numunelere 600 C° gerilim giderme işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.2). Sonrasında numuneler elektrot yüzeyiyle numune yüzeyininin paraleliğinin sağlanması amacıyla kum zımparalar ile parlatılmıştır.



Şekil 3.1 İşlenmek üzere kesilmiş numuneler.



Şekil 3.2 Gerilim gidermede kullanılan fırın.

Saf titanyum (Ti), içeriğinde bulunan oksijen elementi oranına göre Grade 1 ile Grade 4 arasında derecelendirilir. Bu yöntemde elektrot ile numune arasında malzeme transferi gerçekleştiği için saflık derecesi yüksek olan 25 mm çapında Titanyum (Grade 2) elektrot kullanılmıştır. İşlenen her numune sonrasında paralelliği sağlamak amacıyla elektroda alın tornalama işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Torna tezgahı.

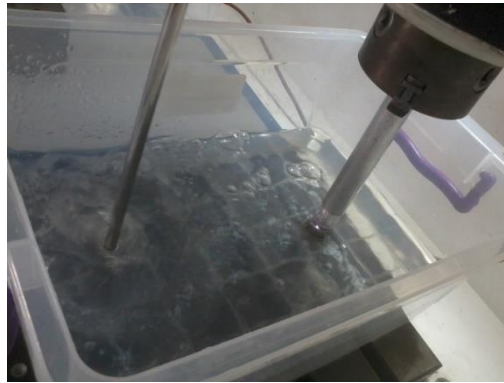
3.2 EKİ TEZGAH ÖZELLİKLERİ

Deneyler Ajan CNC Model 983 4 eksenli dalma tip erozyon tezgahında gerçekleştirilmiştir (Çizelge 3.1). Kullanılan toz katkısının tezgaha zarar vermemesi için mevcut sirkülasyon sistemi devre dışı bırakılıp yerine deney için uygun hazırlanmış işlem havuzu devreye alınmıştır. İşleme sırasında toz katkısını homojen bir şekilde yaymak ve malzemedeki kaldırılan atıkları işleme bölgesinden uzak tutmak amacıyla 1000 devir/dak hızla çalışan

mekanik karıştırıcı sisteme ilave edilmiştir (Şekil 3.4). 120 numuneden oluşan parametrik bir deney dizisi oluşturulmuştur.

Çizelge 3.1 Ajan CNC Model 983 dalma tip erozyon tezgahı özellikleri.

AJAN CNC MODEL 983		
ÇALIŞMA BAŞLIĞI	İş Tablası Ölçüleri	625x215 mm
	X Eksen Hareketi	420 mm
	Y Eksen Hareketi	270 mm
	Z Eksen Hareketi	250 mm
ÇALIŞMA TABLASI	Mak. Hareket Hızı	600 mm/dk
	Elektriksel Anma Gücü	1.1 KW
JENERATÖR	Ortalama Elektrot Akımı	50 A
	Mak. Anma Gücü	4.5 KW
	Darbe Gerilimi	75-150 V



Şekil 3.4 Ajan CNC Model 983 dalma tip erozyon tezgahı ve adapte edilen işlem havuzu.

3.3 DİELEKTRİK SIVI VE TOZ KATKISI

40 adet numune EKİ, 80 adet numune ise TKEKİ yöntemi ile işlenmiştir. EKİ yönteminin uygulandığı numunelerde dielektrik sıvı olarak sadece saf su kullanılmıştır. TKEKİ’de ise 40 adet numune Nano HA Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcımla İşleme (nano HA-TKEKİ), diğer 40 adet numune ise Mikro HA Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcımla İşleme (mikro HA-TKEKİ) yöntemiyle işlenmiştir. HA’nın kalsiyum (Ca) fosfor (P) molar oranı 1.67 civarındadır (Legeros 2008). Kullanılan mikro HA tozlarının parça boyutu 2-10 μ m, saflık oranı %99, rengi beyaz, morfolojisi küreseldir. Nano HA tozları ise %99 saflıkta, beyaz renkli, ortalama 20 nm parçacık boyutuna sahip, özkütlesi 0.8 g/cm³ olan tozlardır. Her iki toz da Ege Nanotek Kimya Sanayiinden temin edilmiştir. Hazırlanan işlem havuzlarına 3 litre (l) saf suya 45 gram (g) mikro ve nano boyutlarda HA tozları ilave edilmiştir. Dielektrik sıvı konsantrasyonu 15g/l olarak ayarlanmıştır. Kullanılan beher, hassas terazi ve deiyonize su arıtma cihazı Şekil 3.5’de görülmektedir.



Şekil 3.5 Deneylerde kullanılan beher, hassas terazi ve arıtma cihazı.

3.4 DENEY PARAMETRELERİ

Elektrot, iş parçası ve dielektrik sıvı özellikleri Çizelge 3.2’de, darbe süreleri ve darbe akımları ise Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.2 İşlem parametreleri.

DİELEKTRİK SIVI	SAF SU (3/1)	MİKRO HA TKEKİ(15g/l)	NANO HA TKEKİ(15g/l)
ELEKTROT	Saf Ti Grade 2	Saf Ti Grade 2	Saf Ti Grade 2
İŞ PARÇASI	Ti Grade 5	Ti Grade 5	Ti Grade 5
KARIŞTIRICI	1000 devir/dk	1000 devir/dk	1000 devir/dk

Çizelge 3.3 Darbe süreleri ve darbe akımları.

DARBE SÜRELERİ									
3µm	6µm	12µm	25µm	50µm	100µm	200µm	400µm	800µm	1600µm

DARBE AKIMLARI			
7A	12A	22A	42A

3.5 ANALİZLER İÇİN KULLANILAN CİHAZLAR

Belirlenen parametrelerde HA-TKEKİ yöntemiyle işlenen numunelerin ilk olarak yüzey pürüzlükleri Tylor Hobson yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçülmüştür (Şekil 3.6). Burada ölçüm uzunluğu 4 mm ve pürüzlülük profilinin toplam maksimum mesafesi 100 µm (en büyük tepe yüksekliği ile en büyük çukur derinliğinin toplamı) alınmıştır.



Şekil 3.6 TylorHobson yüzey pürüzlülük cihazı.

Numuneler kesit incelemeleri için Metkon Micracut 201 marka hassas testere vasıtasıyla işleme yüzeyine dik olarak kesilmiştir (Şekil 3.7). Bu işlem sırasında karşılaşılan zorluklardan biri Ti6Al4V malzemesinin çok sert olması ve bir diğeri ise hassas testerenin fazla ısınması sonucunda numuneye zarar verebilmesidir. Kesim esnasında soğutucu sıvı kullanarak numunelerin ısıl etkilenmesini engellenmiştir.



Şekil 3.7 Metkon Micracut 201 marka hassas testere

Kesilen numuneler Metkon Ecopress 50 marka bakalit presi kullanılarak,200 bar basınç altında 190 C° sıcaklıkta 8 dakika bekletilerek bakalite alınmıştır (Şekil 3.8). Saydam bakalit tozlarının ışık yansımaları yapması ve görüntü almakta yaşanan problemlerin önüne geçmek amacı ile siyah bakalit tozu kullanılmıştır.



Şekil 3.8 Metkon Ecopress 50 marka bakalit presi

Bakalite alınan numunelerden daha iyi yüzey görüntüsü alabilmek ve yüzeylerini istenmeyen malzemelerden temizlemek amacıyla Metkon Forcimat zımparalama ve parlatma cihazından yararlanılmıştır (Şekil 3.9). Numuneler sırası ile 1200, 2500 grid kum zımparalama işlemi sonrasında 6, 1, 0.25 μm elmas solüsyonlar ve çuhalar kullanılarak parlatılmıştır.



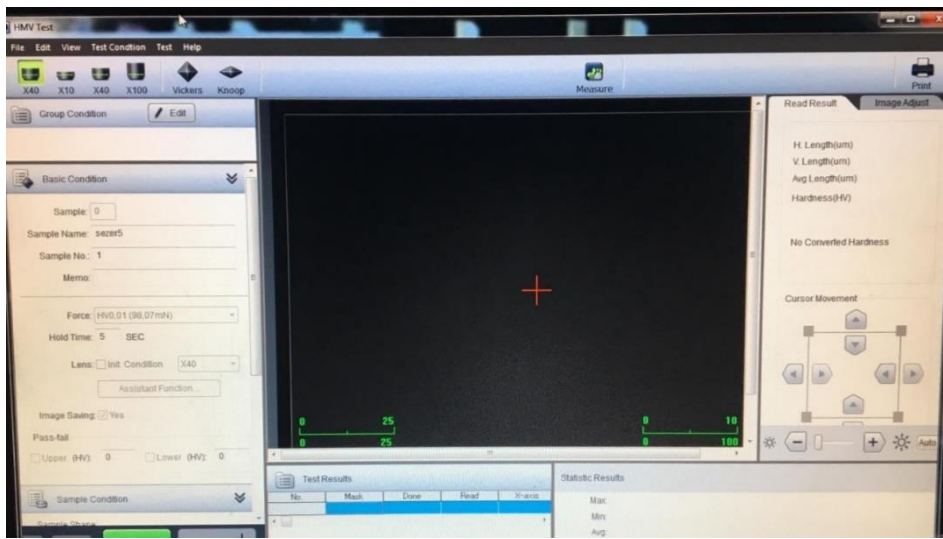
Şekil 3.9 Metkon Forcimat zımparalama ve parlatma cihazı.

Parlatılan numunelerin yüzeylerinden görüntü alabilmek için Weck dağlama ajanı kullanılmıştır. Weck dağlama ajanı 5 g amonyum biflorür (Şekil 3.10) ile 100 ml deiyonize suyun karıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Dağlama işleminde numuneler ajan içerisinde 20 sn tutulmuştur.

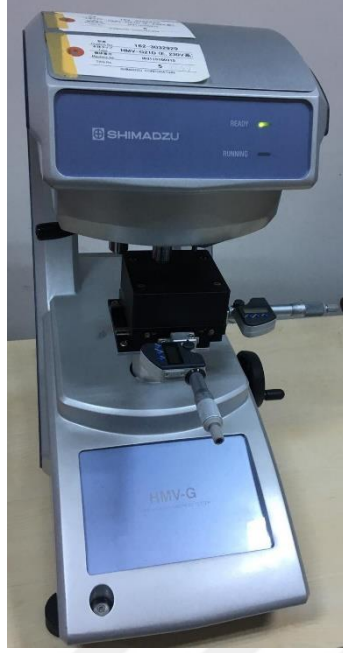


Şekil 3.10 Amonyum Biflorür

Dağlanan numunelerin kesitlerinde oluşan oluşumların ve katmanların özelliklerinin gözlemlenebilmesi için optik mikroskoptan yararlanılmıştır. Devamında, numunelerin kesitlerinde EKİ yönteminin doğası gereği gözlemlenen katmanlar üzerindeki sertlik değişimlerini analiz etmek için Shimadzu marka HMV-G21 model Vickers mikro sertlik cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.11-3.12). Kesitler üzerindeki ana malzeme, ısıl etkilenmiş katman, geçiş bölgesi ve eriyip tekrar katılaştıran katman üzerinde vickers uç ile sertlik ölçümleri alınmıştır. Sertlik analizi yaparken uygun olan yükü bulmak için çeşitli yük denemeleri yapılmıştır. 25 gramdan daha ağır yükler uygulandığında eriyip yeniden katılaştıran katmanda kırılmalar gözlemlenmiştir. Bu sebeple sertlik ölçüm parametresi 25 g yük ve 25 sn saniye olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.11 Shimadzu marka HMV-G21 model Vickers mikro sertlik ölçüm cihazının ara yüzü.



Şekil 3.12 Shimadzu marka HMV-G21 (Vickers, Knoop Indenter) model mikro sertlik ölçüm cihazı.

EDS (Enerji Dağılım Spektrometresi) donanımlı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile işlenen yüzeylerin topografik ve elementel analizi yapılmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).



BÖLÜM 4

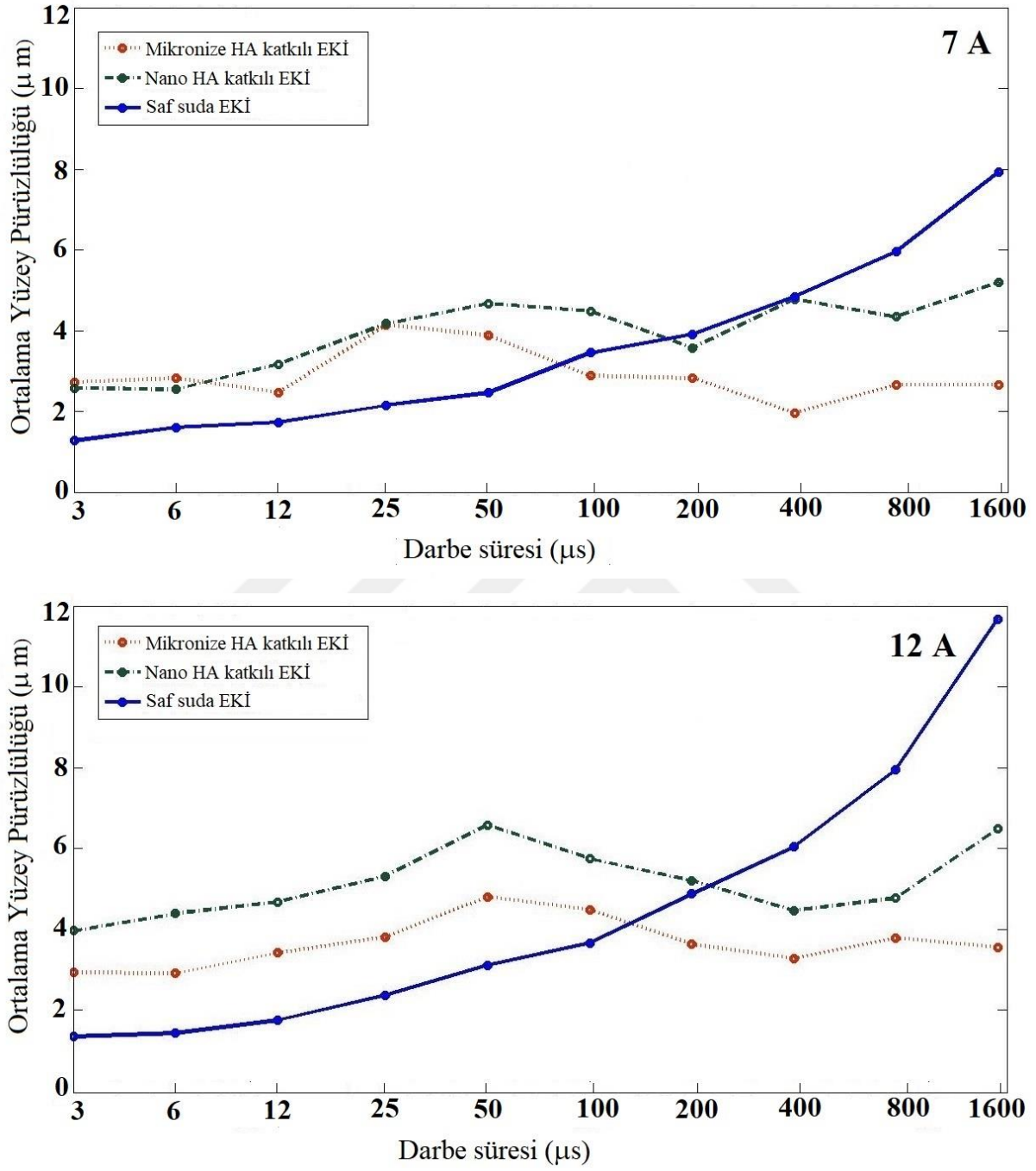
DENEYSEL SONUÇLAR

4.1 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

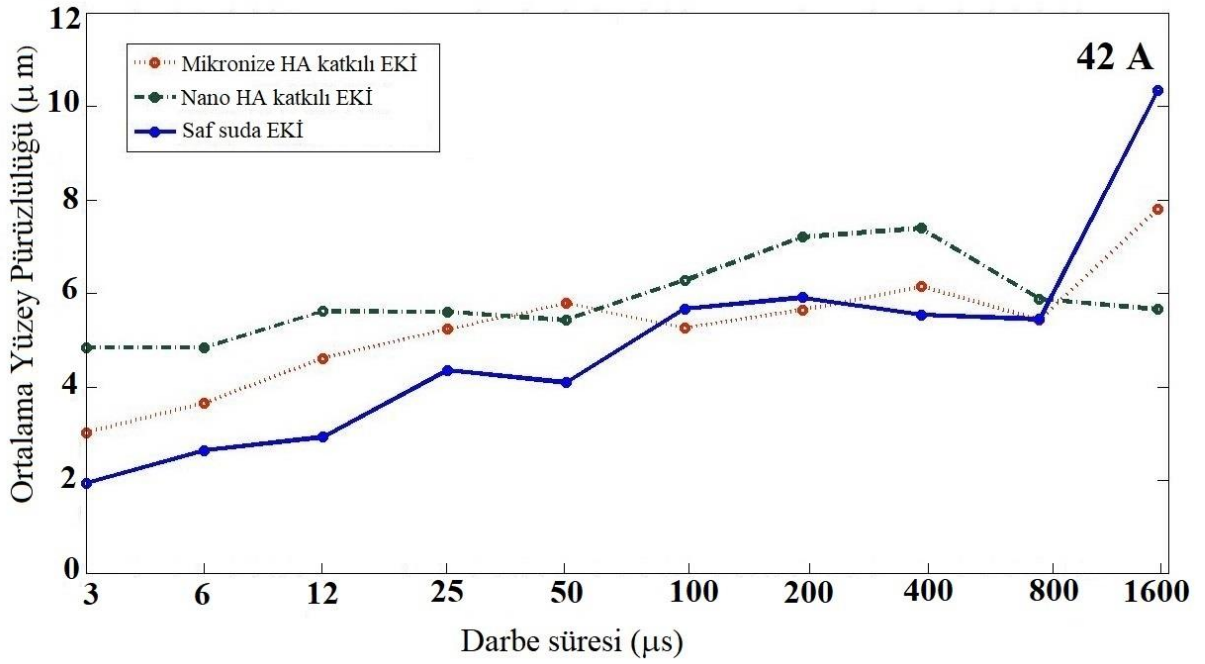
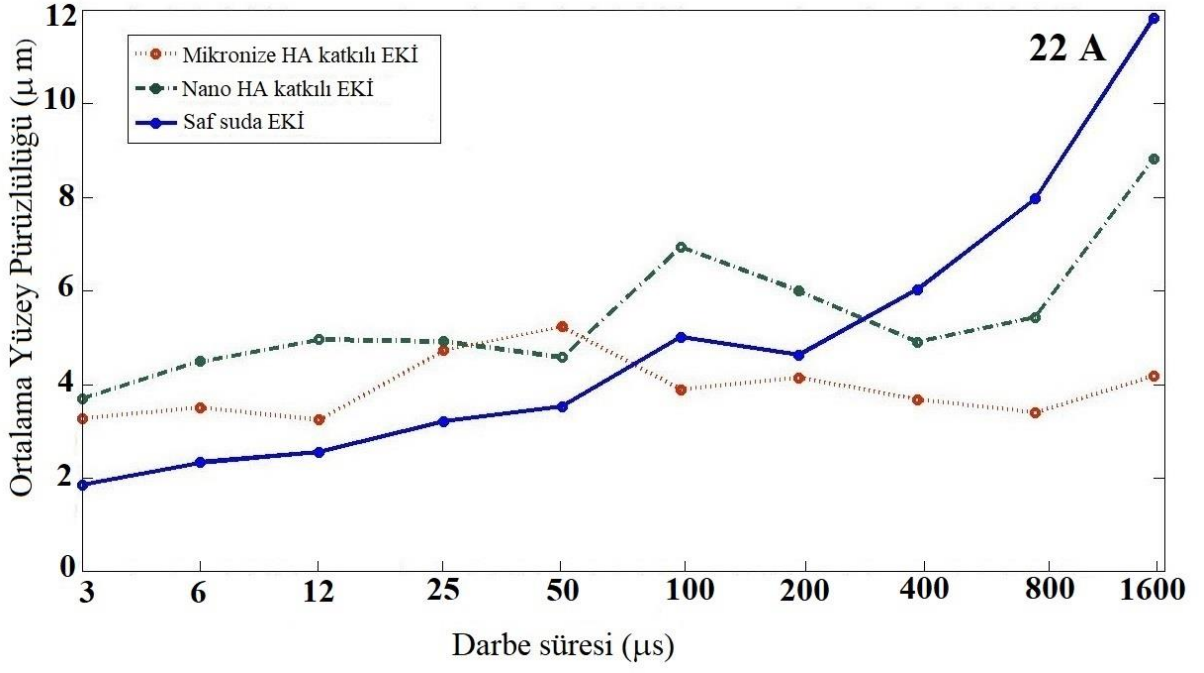
Mikro ve nano HA-TKEKİ yöntemiyle işlenen numune yüzeylerinden 10 adet pürüzlülük ölçümü alınmış ve buna göre ortalama yüzey pürüzlülükleri hesaplanmıştır. Ayrıca toz etkisinin de gözlemlenebilmesi için saf suda işlenen numunelerin de pürüzlülükleri değerlendirmeye katılmıştır. Yöntemde; dielektrik sıvı, darbe süresi, darbe akımı, numune ve elektrot malzemesi gibi etken birçok parametre mevcuttur. Bütün bunlar yüzey ve yüzey altı özelliklerini ve karakteristiğini doğrudan etkilemektedir.

Darbe süresinin ve kıvılcım atmasının son bulmasıyla eriyip dielektrik sıvıya karışan malzemenin oluşturduğu kraterler, yüksek darbe akımlarında daha derin, yüksek darbe sürelerinde ise daha yayvan olmaktadır. Oluşan kraterlerin pürüzlülük üzerinde etkisi yadsınamaz. Fakat pürüzlülüğü salt darbe akımı ve süresine bağlamak doğru değildir. Bunun yanında dielektrik sıvı ve toz katkılarının da pürüzlülükte etkisi görülmektedir (Şekil 4.1-4.2).Düşük darbe sürelerinden (3 μ s) orta darbe sürelerine (100-200 μ s) kadar saf suda yapılan işlemlerde, pürüzlülüğün TKEKİ'ye göre daha az olduğu görülmektedir. Bu değerden sonra ise 42A (Şekil 4.2) akımdaki sapma hariç hızla artmaktadır. Genel olarak nano tozlarda pürüzlülük değerleri daha yüksek olmaktadır. Saf suda yapılan işlemlerde darbe süresinin artmasıyla pürüzlülüğün de düzgün bir şekilde arttığı gözlemlenmekle birlikte TKEKİ'de aynı düzen devam etmemektedir. Mikro ve nano olmak üzere her iki toz katkısında da bütün akım seviyelerinde orta darbe sürelerine (100-200 μ s) kadar pürüzlülük artmakta bundan sonraki sürelerde kısmen düşmektedir. En düşük pürüzlülük değeri yaklaşık 1.5 μ m ile 7 A akım seviyesinde (Şekil 4.1) ve en yüksek pürüzlülük ise yaklaşık 12 μ m ile 22 A (Şekil 4.2) akım seviyesinde saf suda yapılan işlemlerde gerçekleşmiştir. TKEKİ'de ise; en düşük pürüzlülük değeri yaklaşık 2 μ m ile 7 A darbe akımı 400 μ s darbe süresinde mikro HA toz katkısı ile yapılan işlemede gerçekleşmiştir. Aynı şekilde en yüksek pürüzlülük değeri ise yaklaşık 9

μm ile 22 A darbe akımı 1600 μs darbe süresinde nano HA toz katkısı ile yapılan işlemlerde meydana gelmiştir.



Şekil 4.1 Farklı dielektrik ortam ve darbe sürelerinde 7A ve 12A darbe akımı için ortalama yüzeY pürüzlülüğü.



Şekil 4.2 Farklı dielektrik ortam ve darbe sürelerinde 22A ve 42A darbe akımı için ortalama yüzey pürüzlülüğü.

4.2 SEM ANALİZLERİ

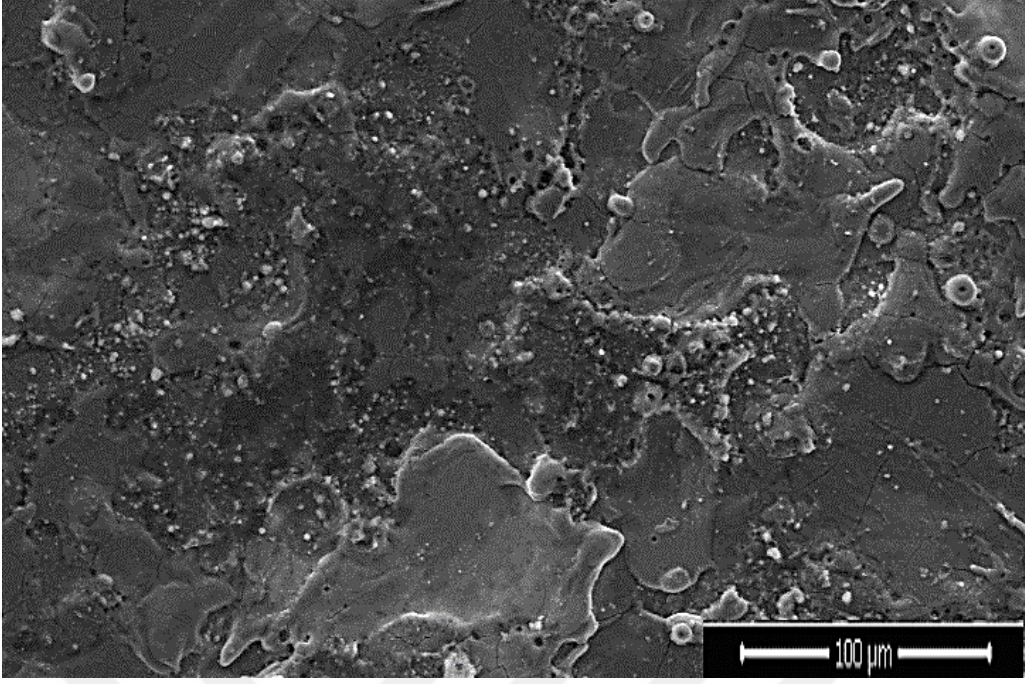
TKEKİ yönteminde, darbe süresi boyunca olgunlaşan elektriksel alanın kırılmasıyla tekil kıvılcıklar yanında ikincil hatta daha alt kollara ayrılmış kıvılcıklar oluşmaktadır. Farklı formlarda oluşan kıvılcıklar, işlenen yüzeyde dalgalanmalara ve farklı krater yapılarının oluşumuna neden olmaktadır. İşleme sırasında dielektrik sıvıya katılan tozlar sirkülasyonla

sıvı içerisinde asılı halde tutulmaktadırlar. Deşarj kanalı etrafında bulunan bu tozlar işleme sırasında ivmelenecek eriyik metal havuzuna hücum etmekte ve eriyik malzemenin aniden katılaşmasıyla işlenen yüzeye saplanıp kalmaktadır. Böylece bir çeşit alaşımlama mekanizması geliştirmektedirler (Ekmekci and Ersöz 2012).

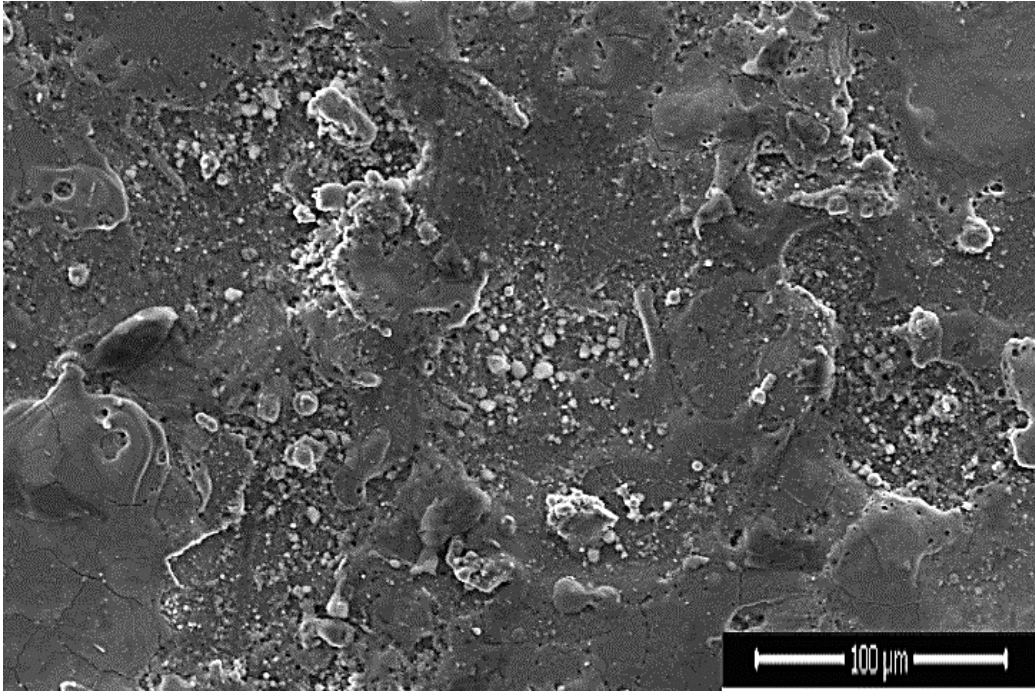
İşlenen numune yüzeylerinde mikrosaniyeler içerisinde meydana gelen birbiri ardına gerçekleşen kıvılcımların ve eriyip uzaklaşan malzemenin bıraktığı kraterler, krater merkezinden başlayıp çeperlere uzanan yönelim izleri ve hızla gerçekleşen ısısal çevrimler karşısında aynı hızla katılaşan parçacıkların oluşumu görülmektedir. Ayrıca dielektrik sıvıya katılmış olan ve işleme sırasında eriyik metale saplanıp kalan HA tozları da yüzeylerde gözlemlenmektedir (Şekil 4.3-4.14).

Nano HA ile 6 μ s’de gerçekleşen işlemlerde yüzeyde yönelim izlerinin hakim olduğu göze çarpmaktadır. 7A ve 12 A darbe akımında işlenen numunelerde (Şekil 4.3) yüzeye yer yer yayılmış ana metalden daha açık renkte gözlemlenen HA tozları göze çarpmaktadır. Bununla birlikte 22A akım seviyesinde yapılan işlemede HA tozları belli bölgelerde kümelenmekte, ana malzeme ise belirgin çatlak ağları ile birlikte daha büyük oranda gözlemlenmektedir. 42A akım seviyesinde birbirine topaklanmış HA tozları görülmektedir (Şekil 4.4).

Mikro HA ile 6 μ s’de yapılan işlemlerde buharlaşan malzemenin hızla katılaşmasıyla oluşan küre benzeri eklentilerin hakim olduğu görülmektedir. 7A darbe akımında kümelenmiş (Şekil 4.5) ve 22A’de (Şekil 4.6) ise kısmen az miktarda yüzeye yayılmış HA tozları gözlemlenirken, 12 A’de (Şekil 4.5) yönelim izleri ve gözeneklerin çoğunlukta olduğu, 42 A’de (Şekil 4.6) ise gözenek ve çatlakların azaldığı görülmektedir.

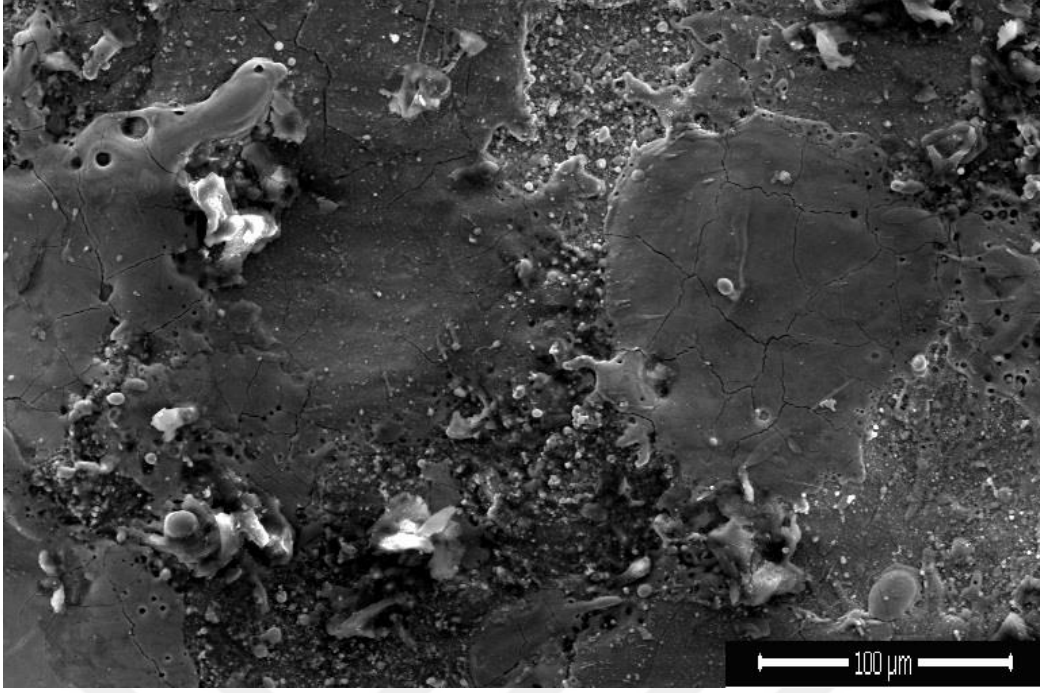


a) 7A darbe akımı

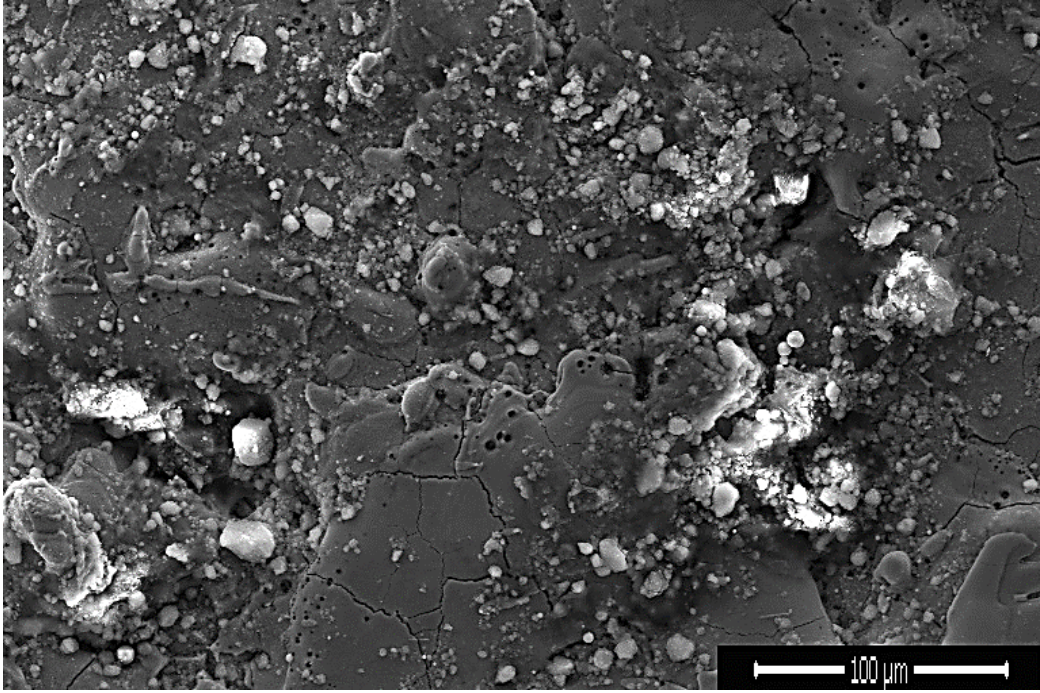


b) 12A darbe akımı

Şekil 4.3 6 μs darbe süresi ve düşük akımlarda nano HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.

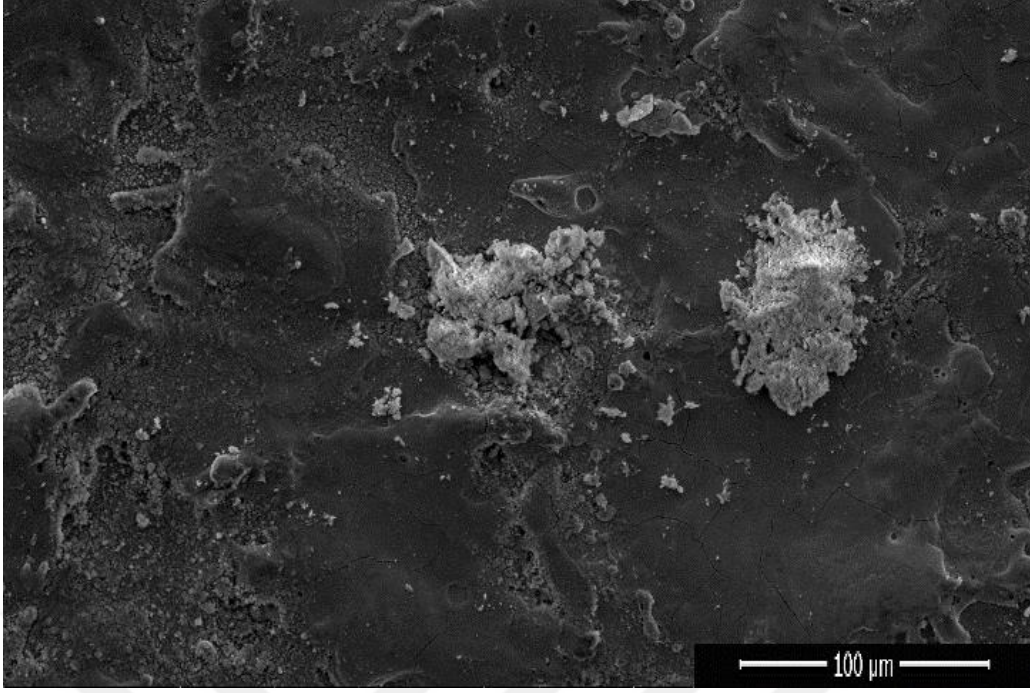


a) 22A Darbe akımı

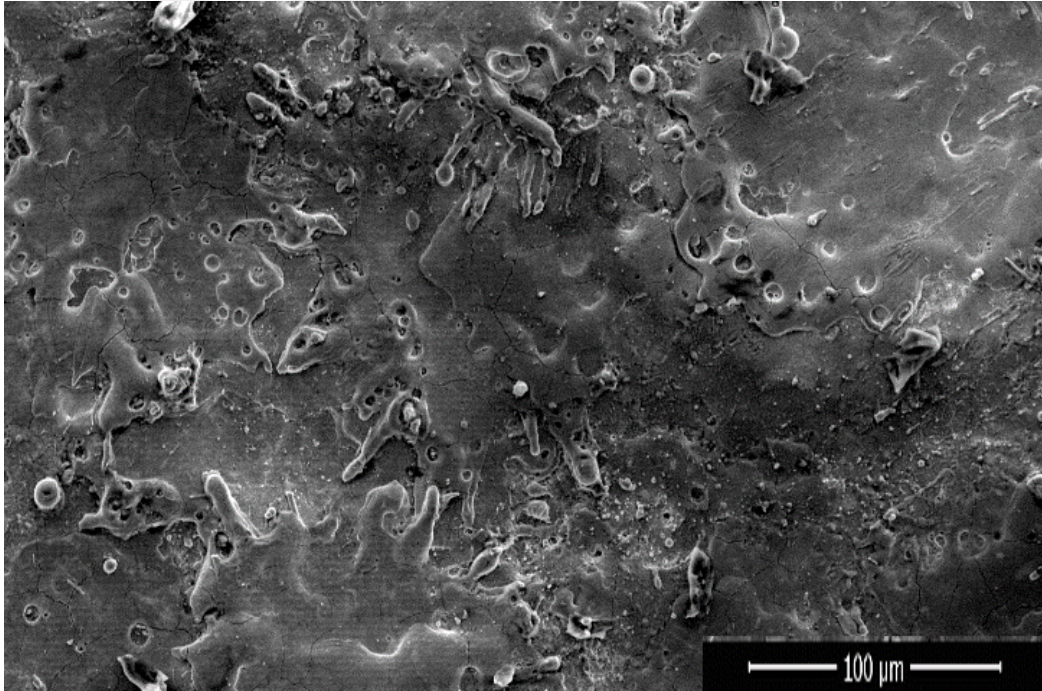


b) 42A Darbe akımı

Şekil 4.4 6 μ s darbe süresi ve yüksek akımlarda nano HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.

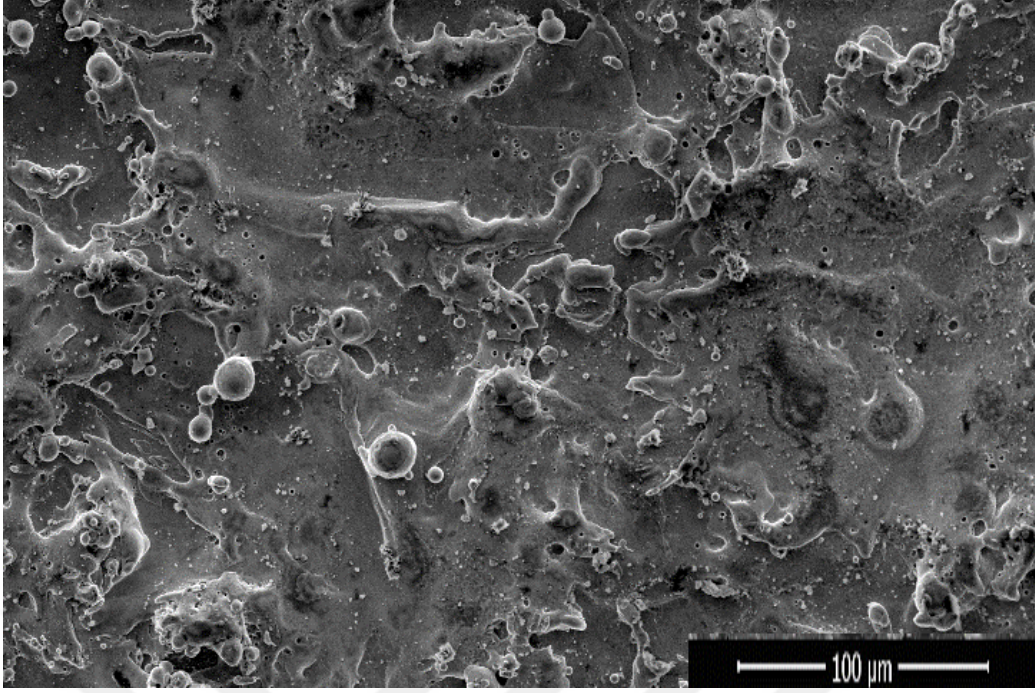


a)7A Darbe akımı

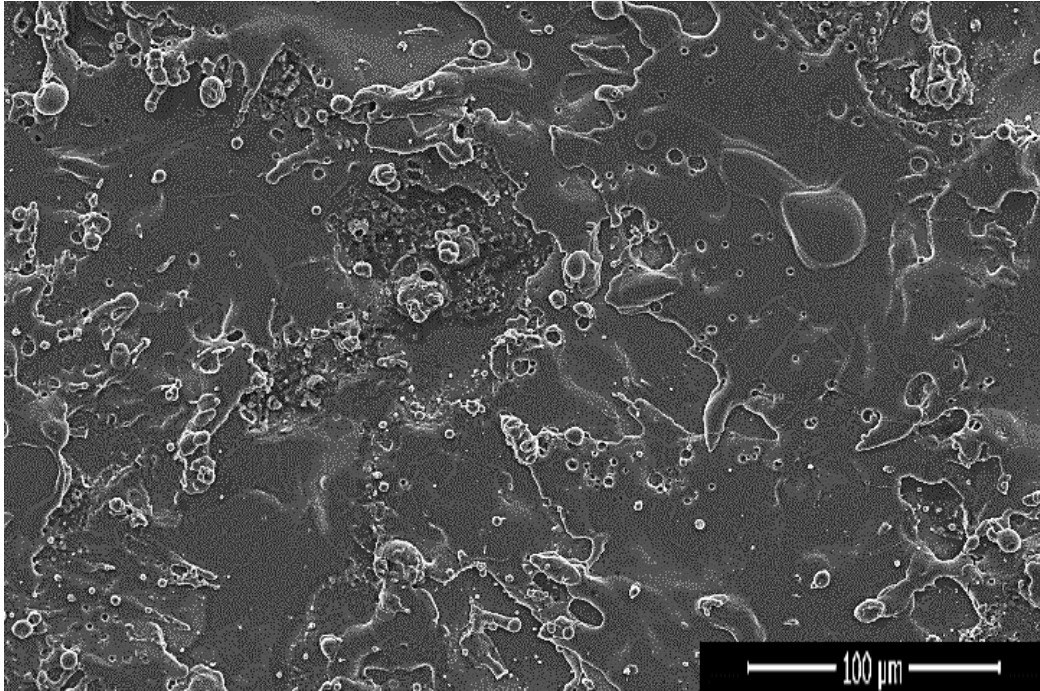


b)12A Darbe akımı

Şekil 4.5 6 μ s darbe süresi ve düşük akımlarda mikro HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.



22A Darbe akımı



b) 42A Darbe akımı

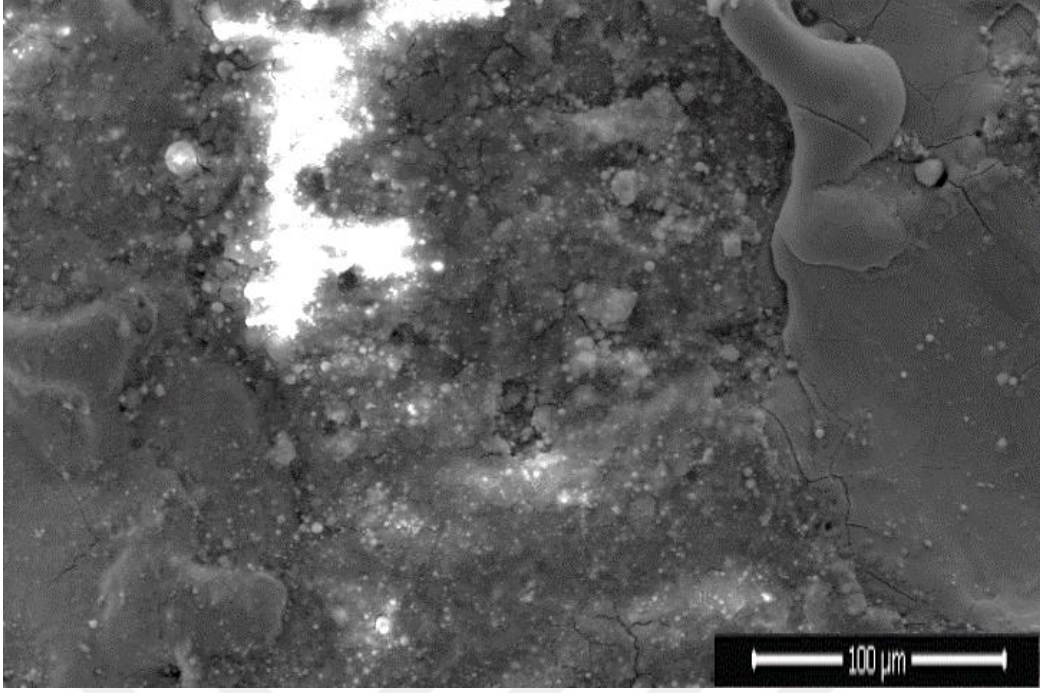
Şekil 4.6 6 µs darbe süresi ve yüksek akımlarda mikro HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.

100 μ s'de yapılan işlemlerde kraterlerin daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Nano HA-TKEKİ'de 7A ve 12A darbe akımlarında gözenekler ve eriyip tekrar katılaştıran metalin oluşturduğu yığınlarla birlikte yüzeye dağılmış HA tozları gözlemlenmektedir (Şekil 4.7). 22A ve 42A darbe akımlarında gözeneklerin ve eriyip buharlaşan malzemenin aniden katılmasıyla oluşan küre benzeri eklentilerin arttığı göze çarpmaktadır (Şekil 4.8).

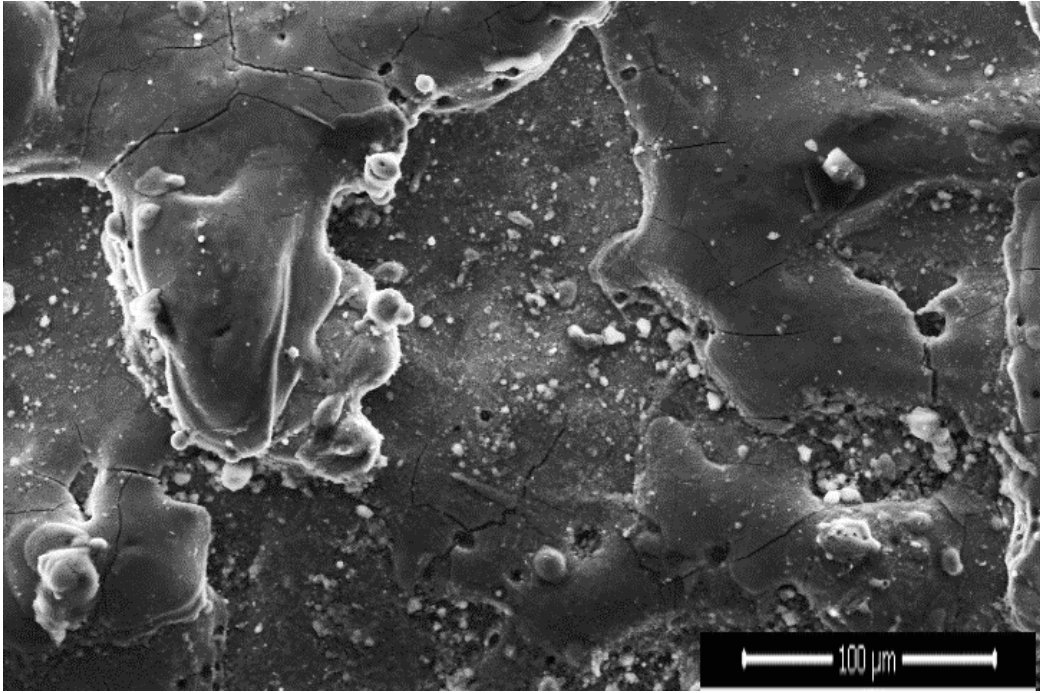
100 μ s'de mikro HA-TKEKİ'de (Şekil 4.9-4.10) yüzey üzerinde dalgalanmalar, ergiyik metalin oluşturduğu krater çeperlerine doğru yönelim izlerinin yanında az sayıda gözenek ve küre benzeri eklentiler görülmektedir. Yüzeyde çatlak ağları hakim olmakla birlikte, HA tozları ise kısmen daha az gözlemlenmektedir.

800 μ s'de yapılan işlemlerde iyice büyüyen ve yüksek darbe akımlarında da derinleşen kraterlerin görülmektedir. Nano HA-TKEKİ'de (Şekil 4.11-4.12) krater içlerinden başlayıp çeperleri aşan derin çatlaklar göze çarpmaktadır. Tüm akım seviyelerinde yoğun eklentilerle birlikte gözeneklere de rastlanmakta ve çatlak çeperlerinde bir kanal şeklinde beliren HA tozları gözlemlenmektedir. 42 A darbe akımında ise (Şekil 4.12) artan ve iç içe oluşmuş gözenekler ve krater boyunca uzanan belirgin çatlaklar gözlemlenmektedir.

Mikro HA-TKEKİ'de ise gözeneklerin çok daha az olduğu görülmektedir. Krater çeperlerinde dalgalanmalar, daha büyük formda küresel eklentiler (Şekil 4.13), küçük küresel eklentiler ile birlikte oluşan gözenekler ve üst üste binen yönelim izleri yanında büyük gözenekler (Şekil 4.14) yüzeylerde hakimdir. Mikro HA-TKEKİ'de yüzeyde tozların nanoya göre daha az yoğunlaştığı görülmektedir.

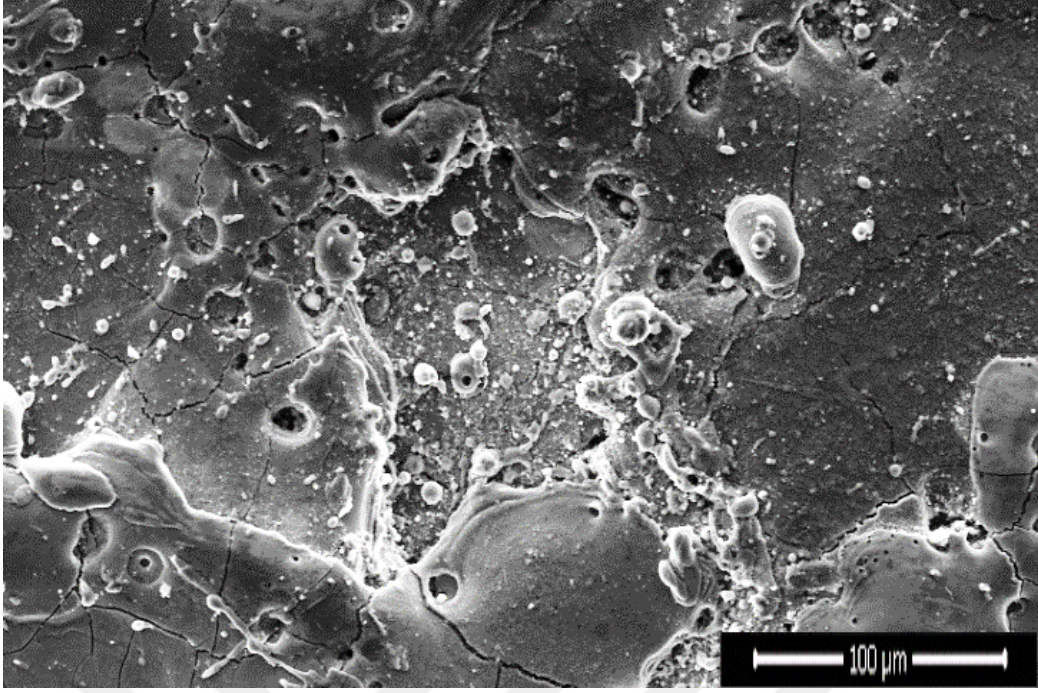


a) 7A Darbe akımı

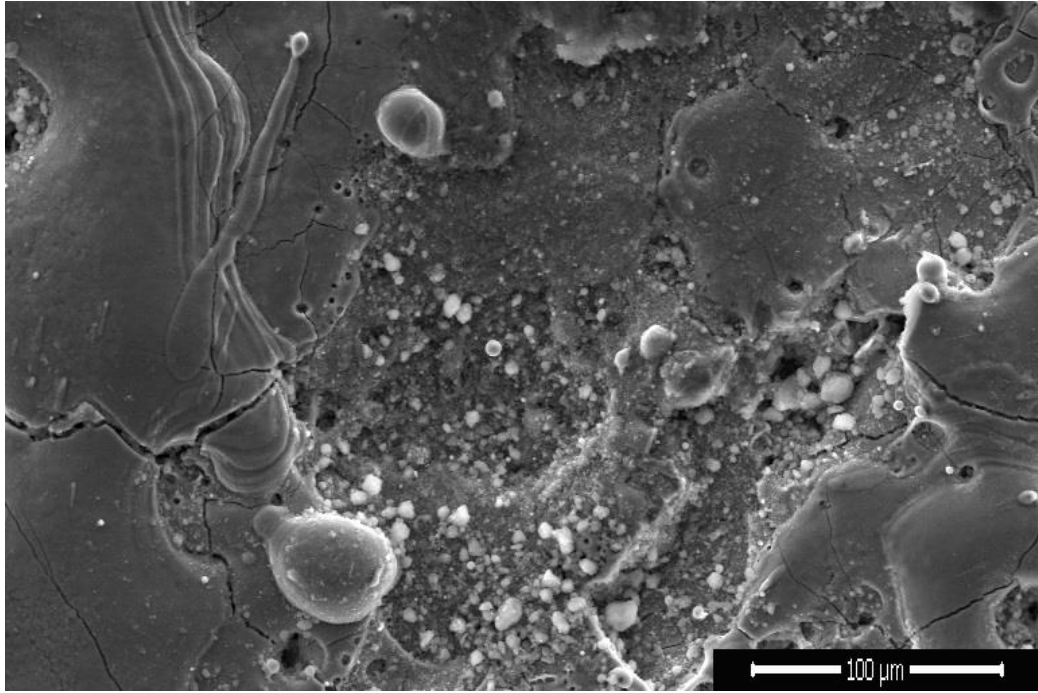


b) 12A Darbe akımı

Şekil 4.7 100 μs darbe süresi ve düşük akımlarda nano HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.

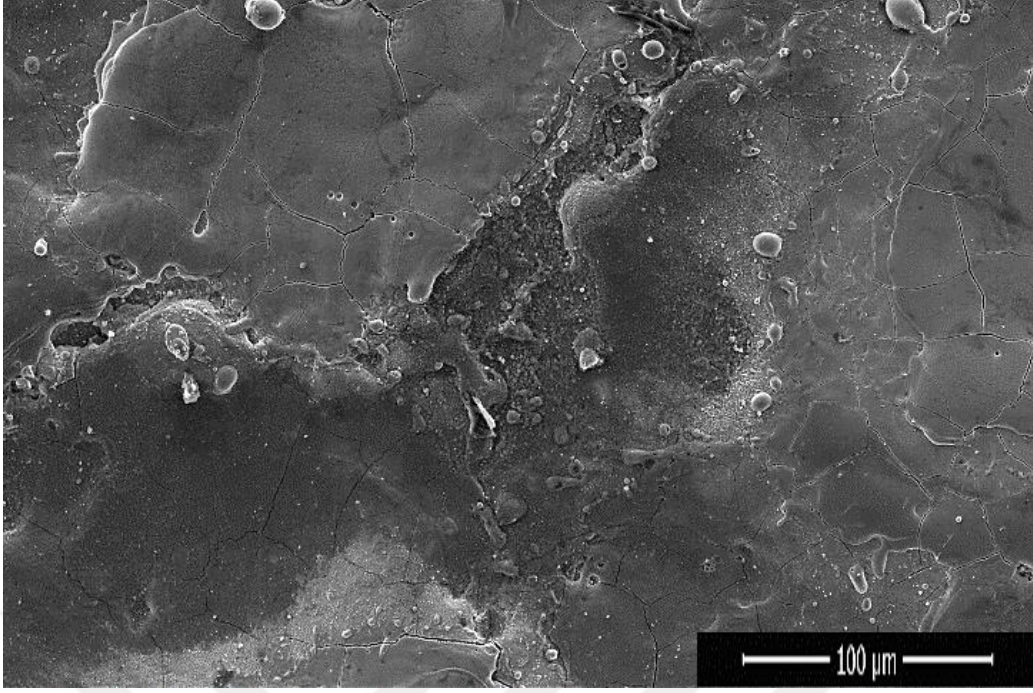


a) 22A Darbe akımı

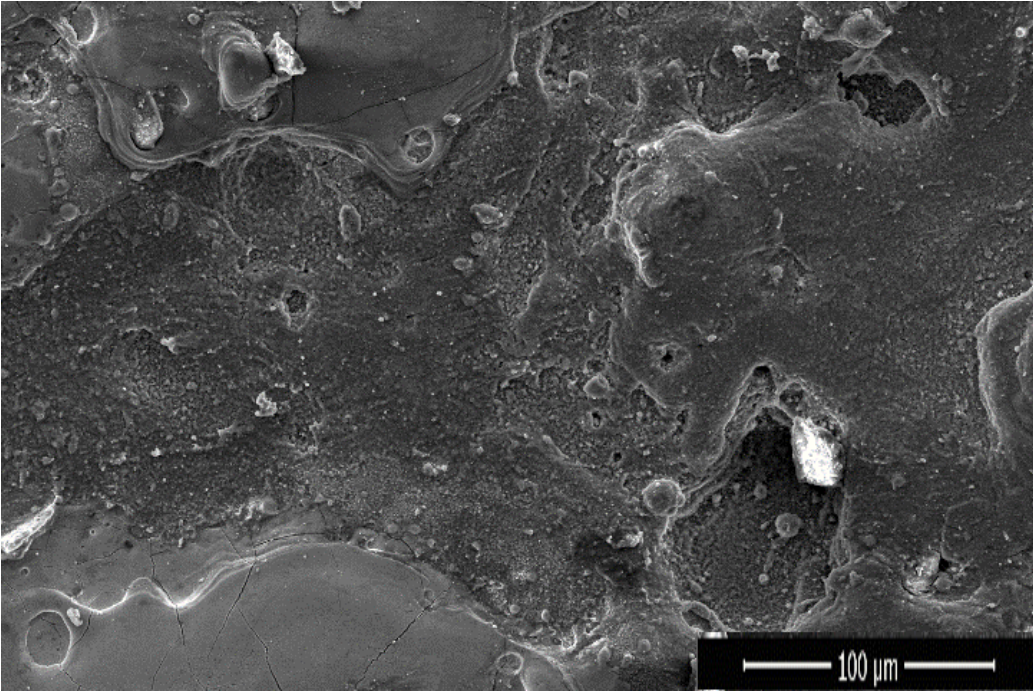


b) 42A Darbe akımı

Şekil 4.8 100 μs darbe süresi ve yüksek akımlarda nano HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.

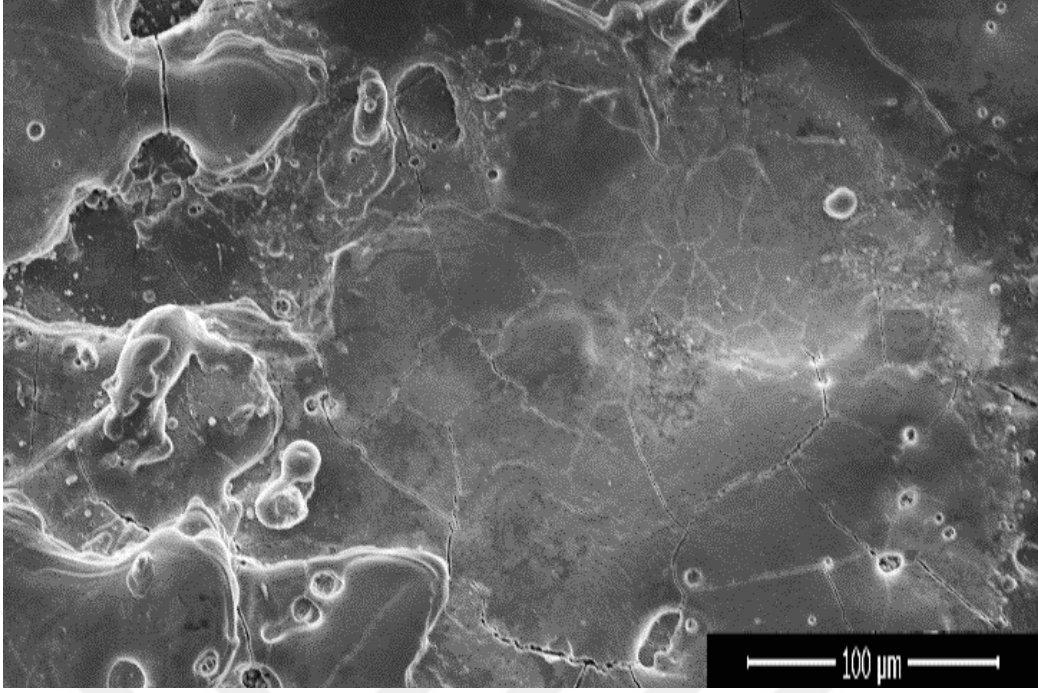


a) 7A Darbe akımı

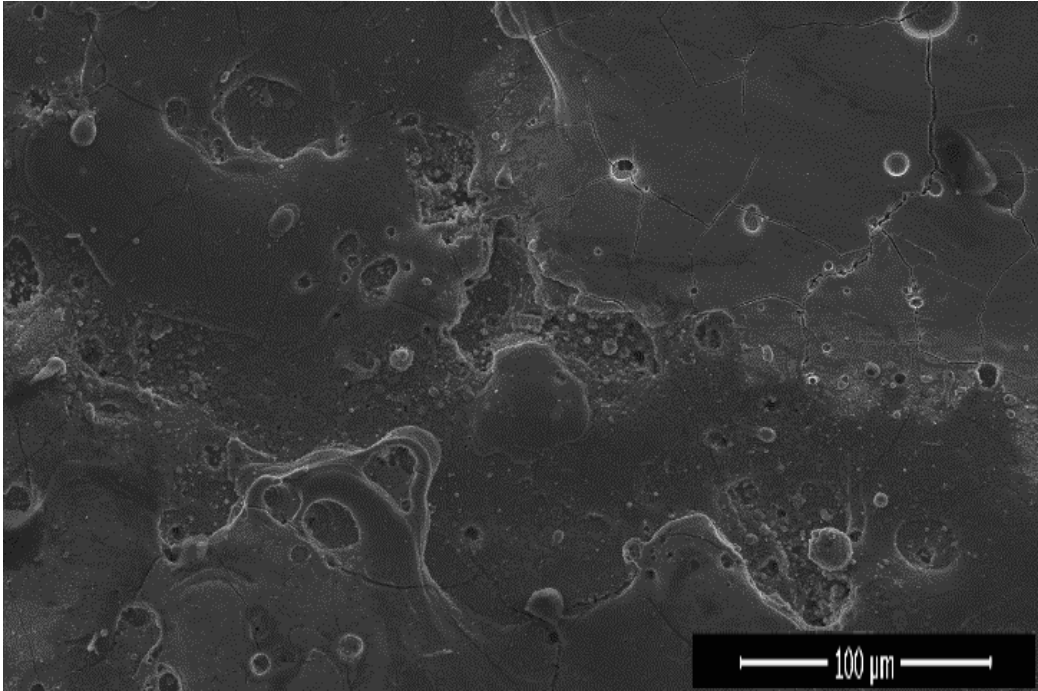


b) 12A Darbe akımı

Şekil 4.9 100 μs darbe süresi ve düşük akımlarda mikro HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.

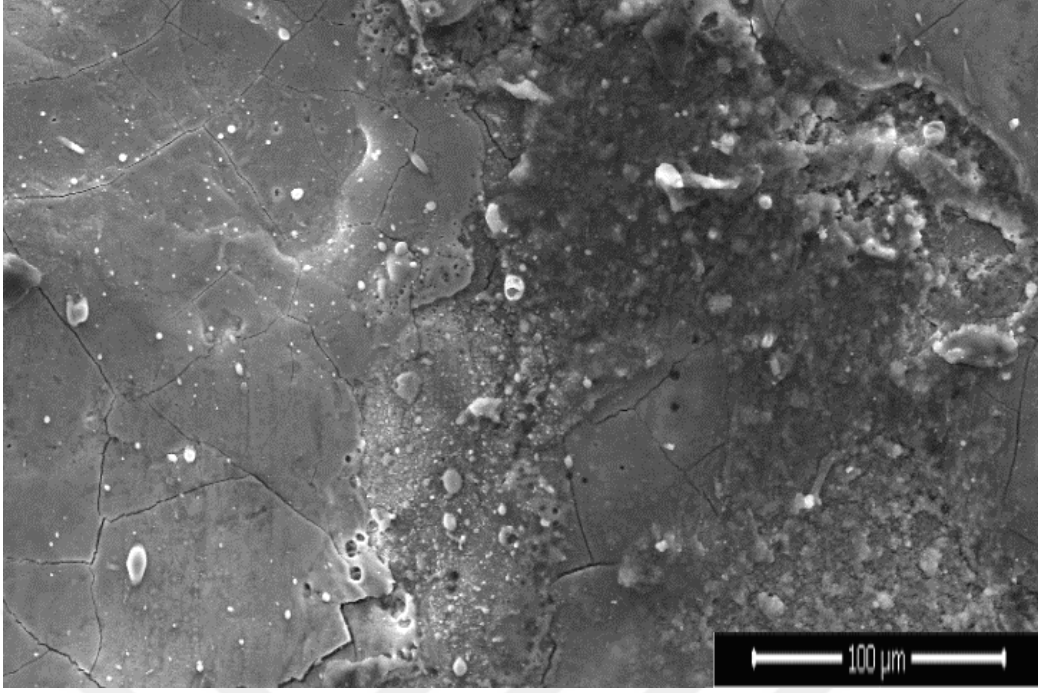


a) 22A Darbe akımı

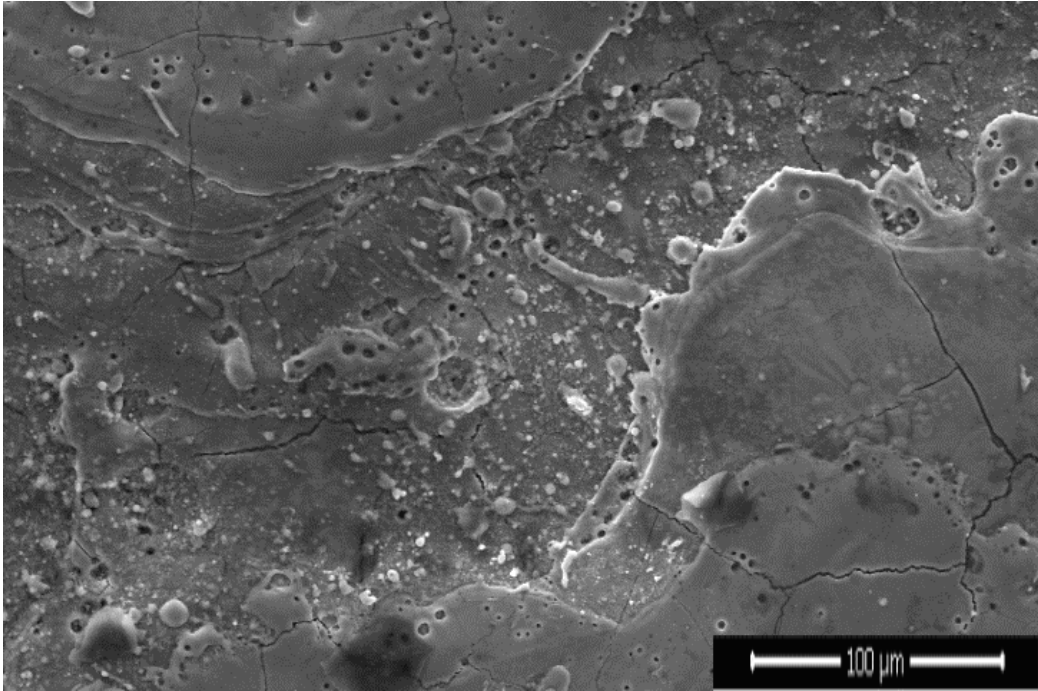


b) 42A Darbe akımı

Şekil 4.10 100 μ s darbe süresi ve yüksek akımlarda mikro HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.

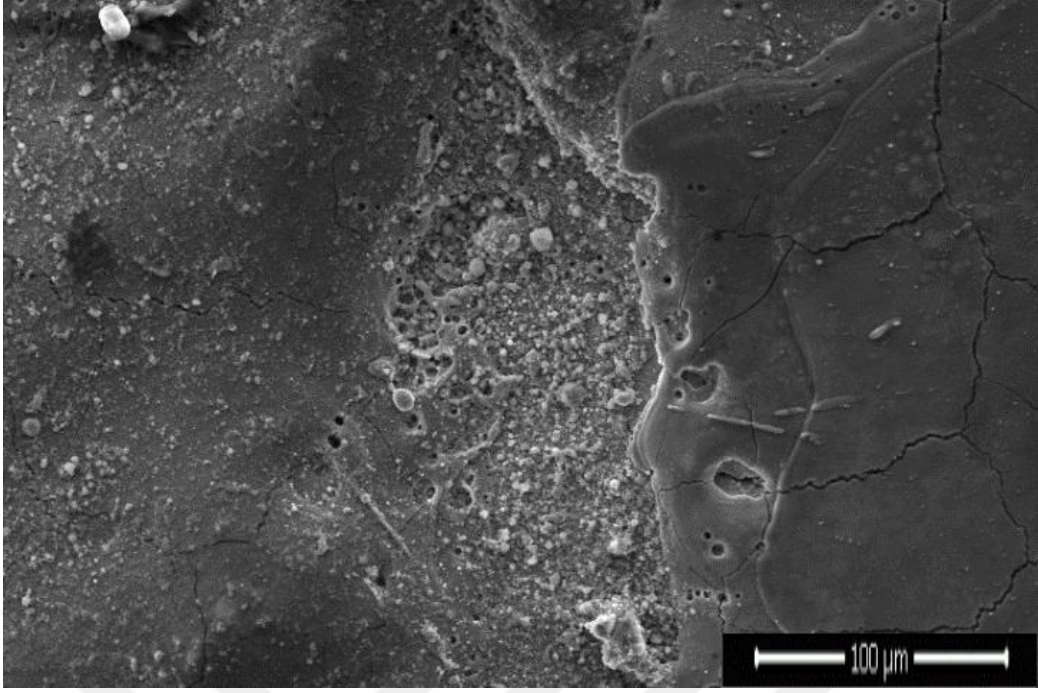


a) 7A Darbe akımı

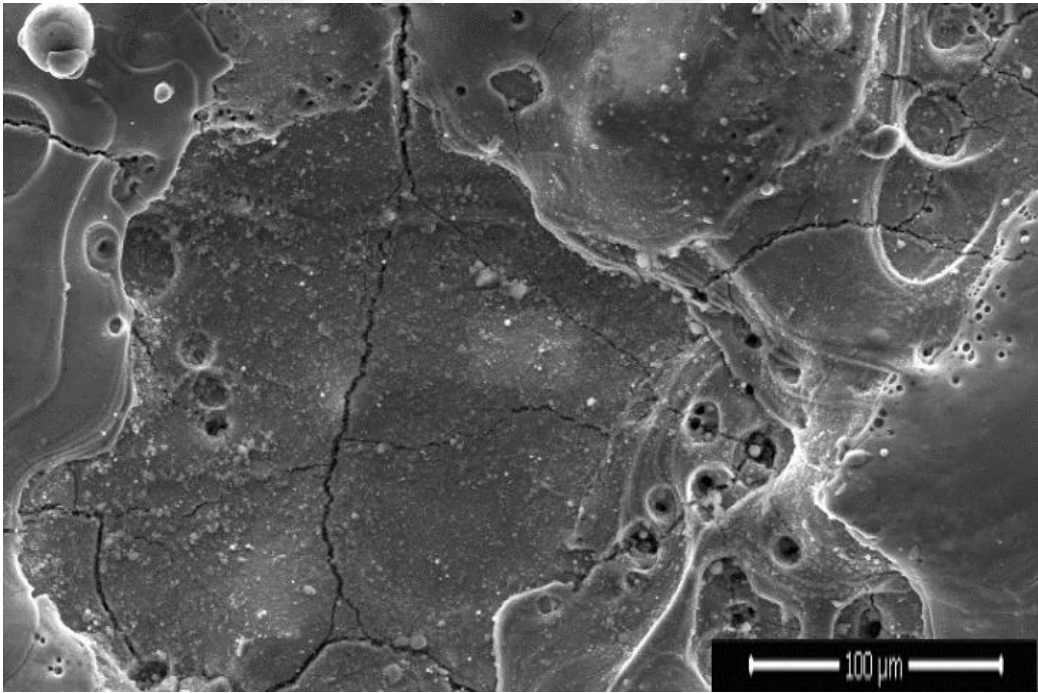


b) 12A Darbe akımı

Şekil 4.11 800 μs darbe süresi ve düşük akımlarda nano HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.

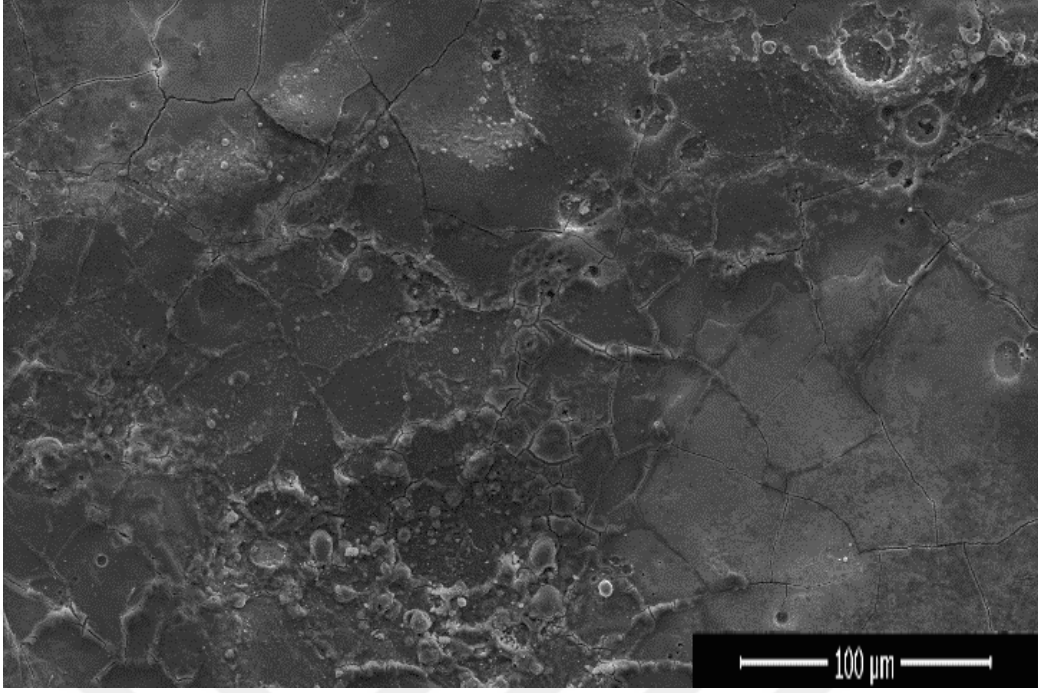


a) 22A Darbe akımı

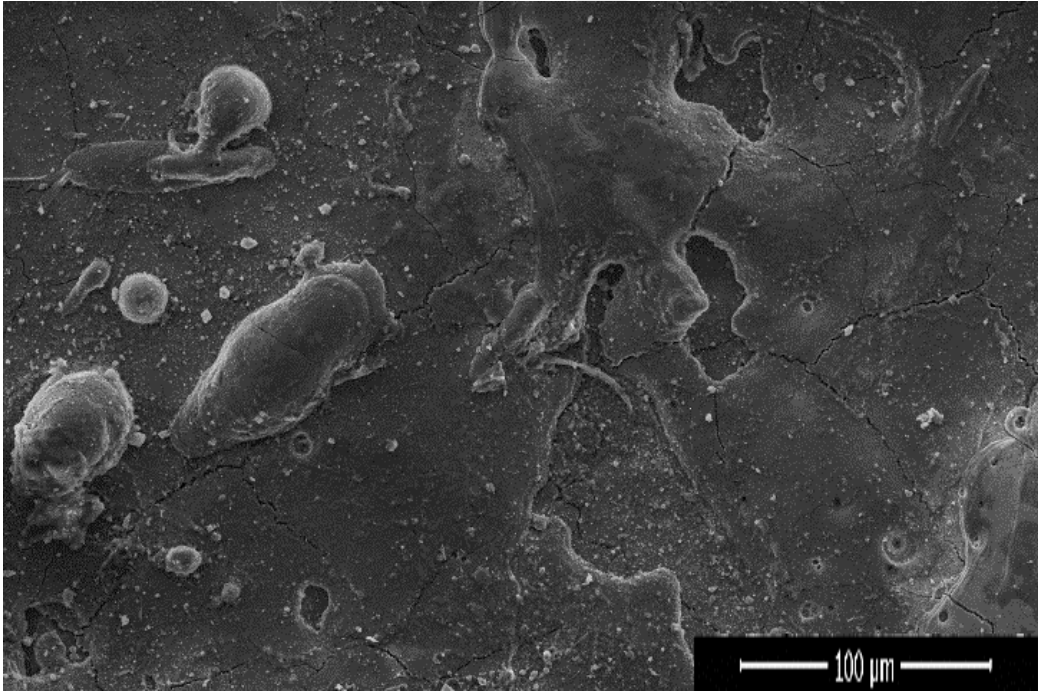


b) 42A Darbe akımı

Şekil 4.12 800 μ s darbe süresi ve yüksek akımlarda nano HA-TKEKI'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.

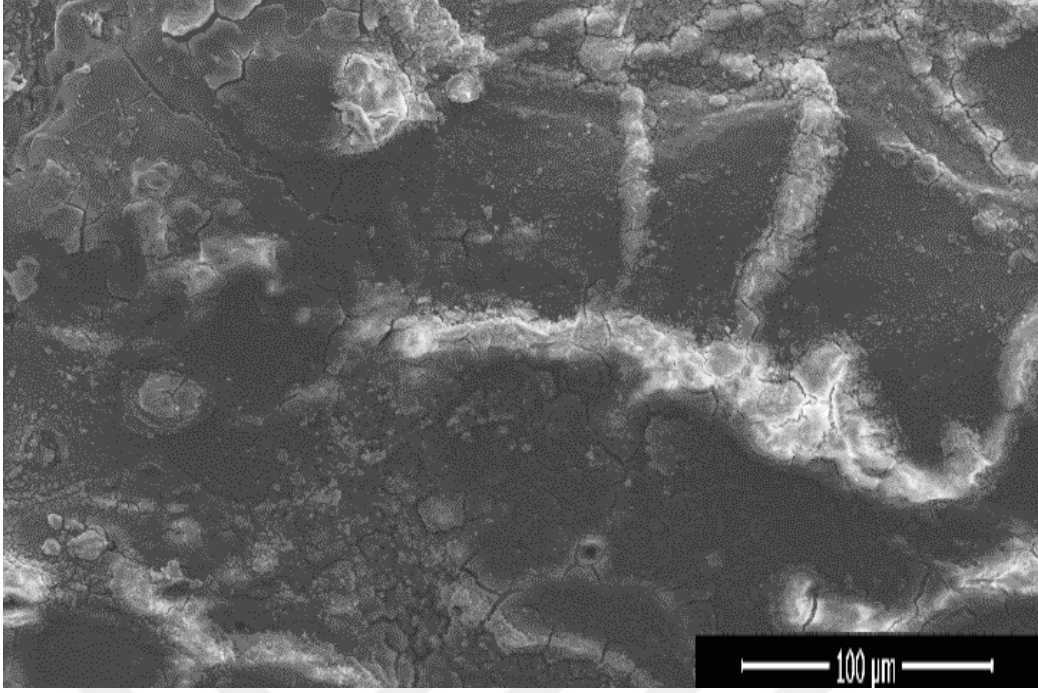


a) 7A Darbe akımı

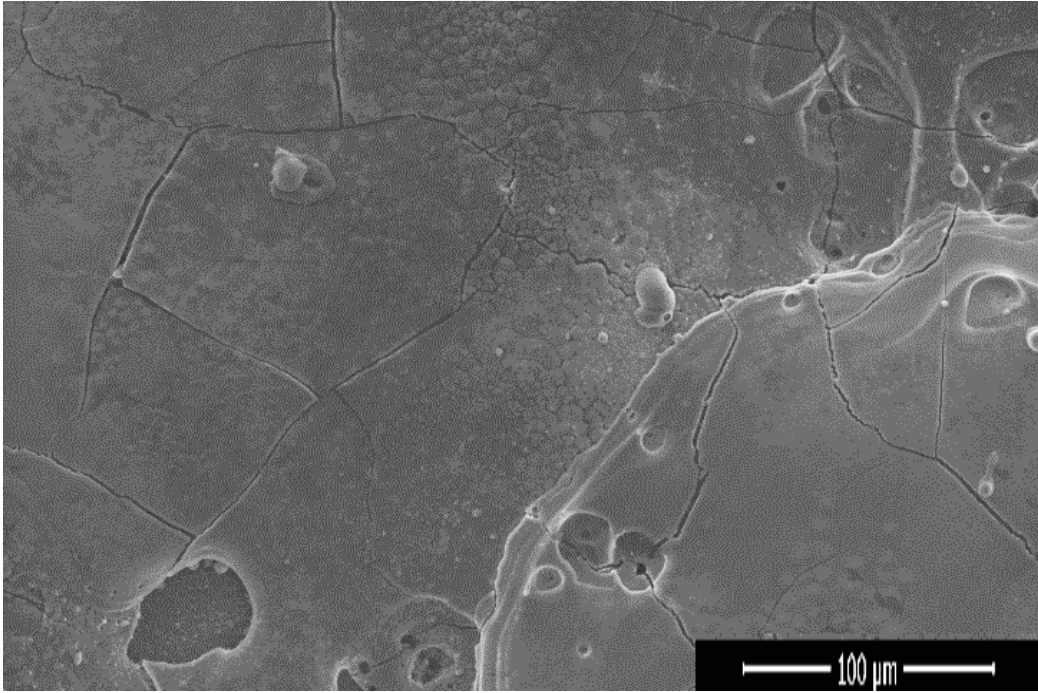


b) 12A Darbe akımı, 800 μs darbe süresi

Şekil 4.13 800 μs darbe süresi ve düşük akımlarda mikro HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.



a) 22A Darbe akımı



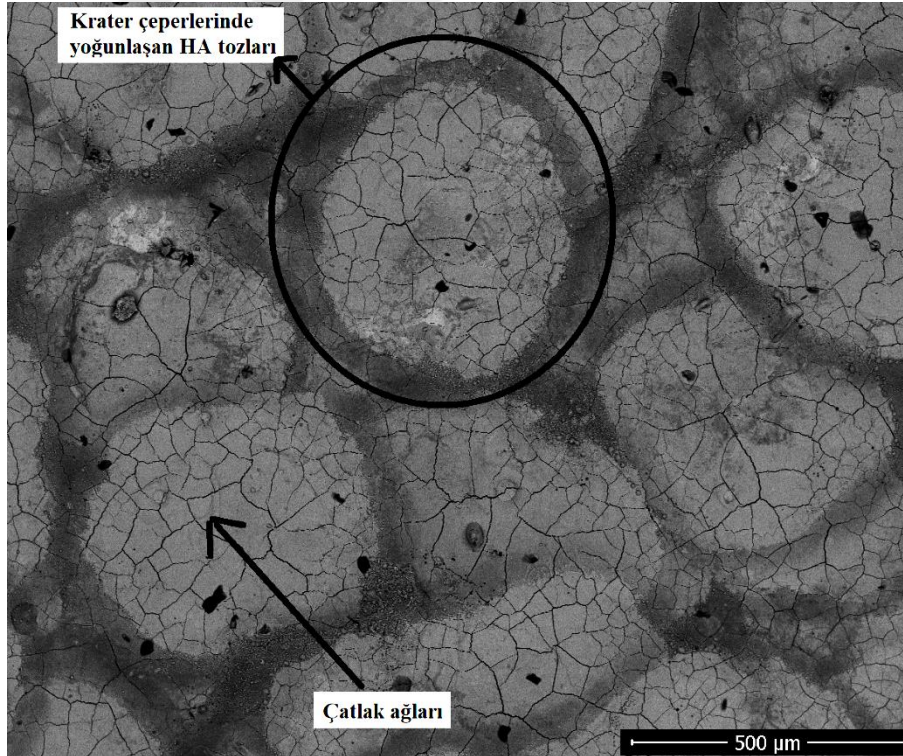
b) 42A Darbe akımı

Şekil 4.14 800 μs darbe süresi ve yüksek akımlarda mikro HA-TKEKİ'ye tabi tutulan numunelerin SEM görüntüsü.

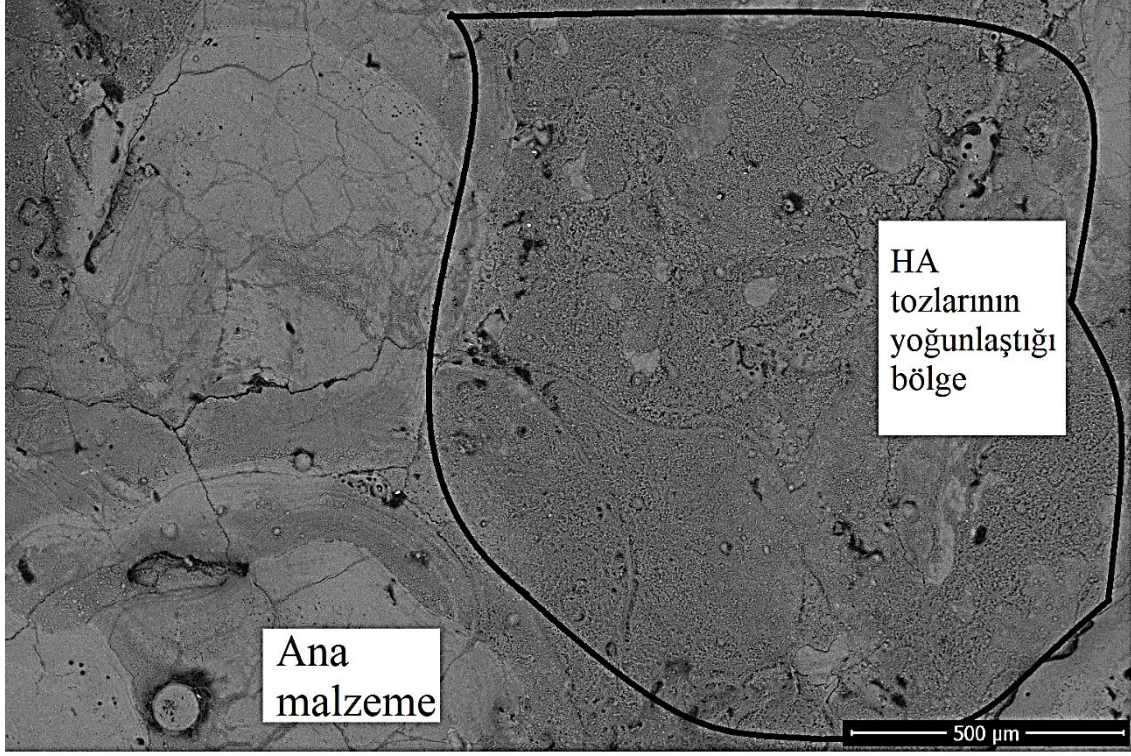
4.3 EDS ANALİZLERİ VE NÜFUZİYET

TKEKİ yönteminde numunelerin işlenmesi sırasında yüzeye gerek dielektrik sıvıdan gerekse elektrottan malzeme göçü gerçekleşmektedir (Ekmekci ve Ekmekci 2016) ve yüzey üzerinde farklı özelliklere sahip bölgelerin oluşmasıyla fonksiyonel yüzeylere ulaşılabilir (Ekmekci ve Akbaş 2019). HA'nın medikal uygulamalardaki önemi yadsınmaz. Özellikle HA yönünden zengin yüzeylerin elde edilebilmesi tıbbi uygulamalarda talep edilen bir durumdur.

İşleme parametrelerine göre farklılıklar gösterse de nano ve mikroHA-TKEKİ yöntemiyle işlenen tüm numune yüzeylerinde, dielektrik sıvıdan yüzeye akın eden HA yapılarına rastlanmıştır. SEM analizlerinde HA'nın özellikle enerji yoğunluğunun yüksek olduğu krater çeperlerinde yoğunlaştığı gözlemlenmektedir (Şekil 4.15). Ayrıca alansal olarak tozların dağılımında ise HA yönünden zengin bölgeler ana malzemeye göre daha koyu renkte göze çarpmaktadır (Şekil 4.16).



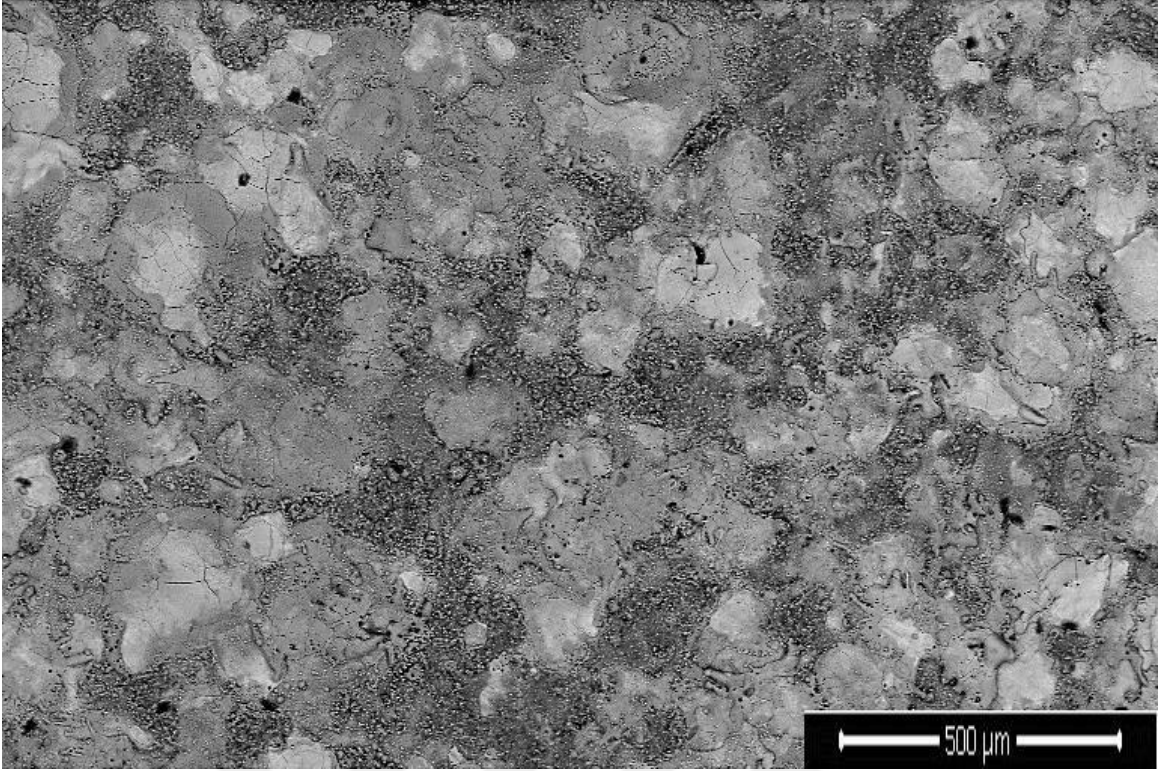
Şekil 4.15 HA-TKEKİ'ye maruz yüzeylerde krater çeperlerinde yoğunlaşan HA tozları (7A, 1600 µs)



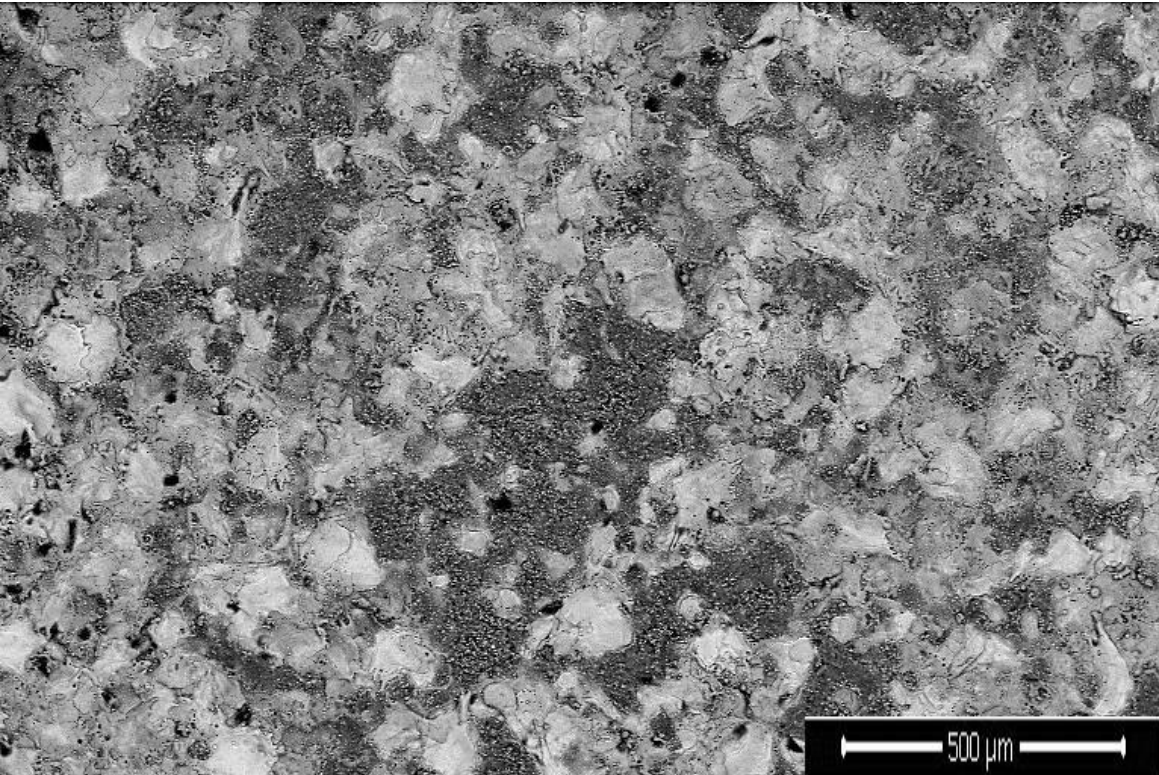
Şekil 4.16 HA-TKEKİ'ye maruz yüzeylerde bir bölgede yoğunlaşan HA tozları (7A, 1600 µs).

Nano HA-TKEKİ'ye maruz numunelerde özellikle 7A darbe akımı ve düşük darbe sürelerinde krater çeperlerinde yoğunlaşmış HA tozlarına rastlanmaktadır (Şekil 4.17). Özellikle HA taneleri daha koyu ve tane yapılarıyla ana malzemeden rahatlıkla ayırt edilebilmektedir.

MikroHA-TKEKİ'ye maruz numunelerde ise yine 7A darbe akımı fakat bu defa yüksek darbe sürelerinde benzer kümelenmelere rastlanmıştır (Şekil 4.18). Burada kraterler yüksek darbe sürelerinden dolayı daha büyük olarak öne çıkmaktadır. Krater içlerinde yoğun çatlaklar görülmektedir.

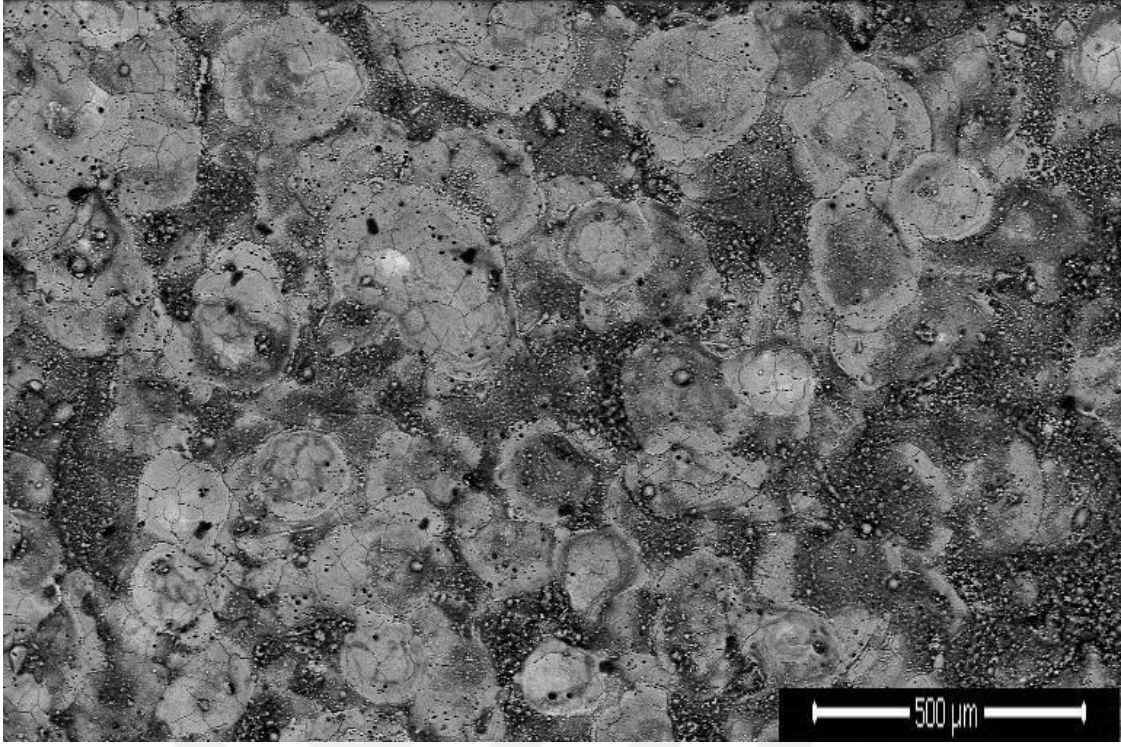


a)7A Darbe akımı, 3 µs Darbe süresi



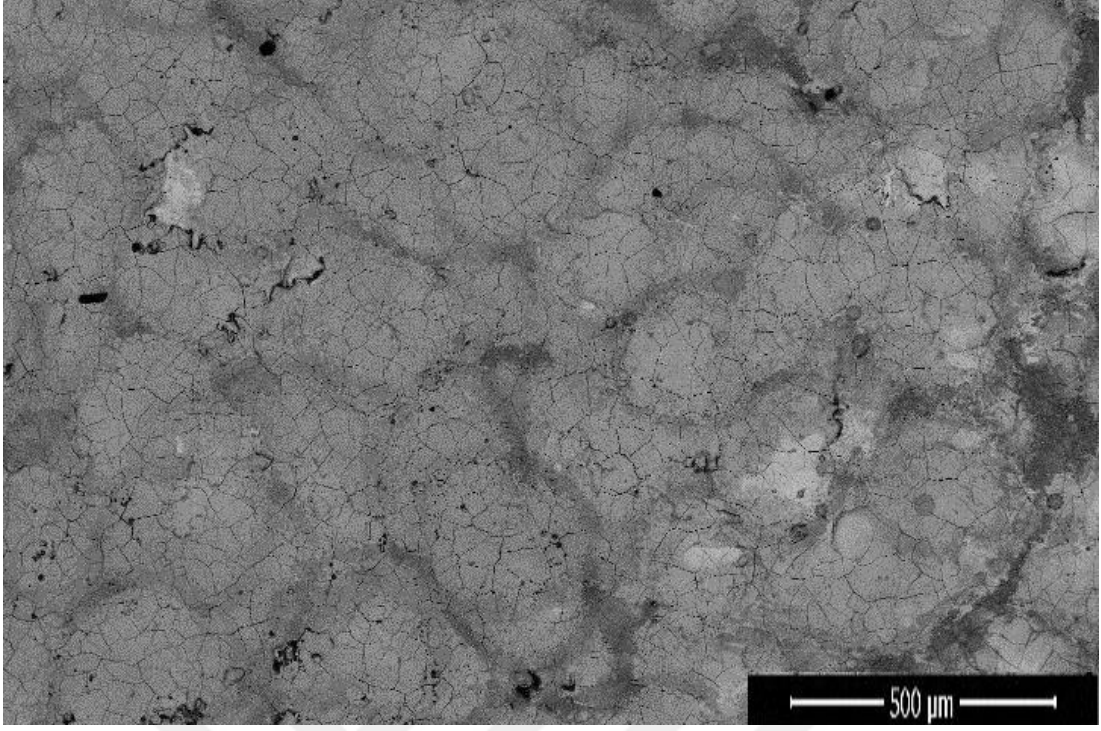
b)7A Darbe akımı, 6 µs Darbe süresi

Şekil 4.17 Nano HA-TKEKİ'ye maruz numunelerde krater çeperlerinde yoğunlaşan HA.

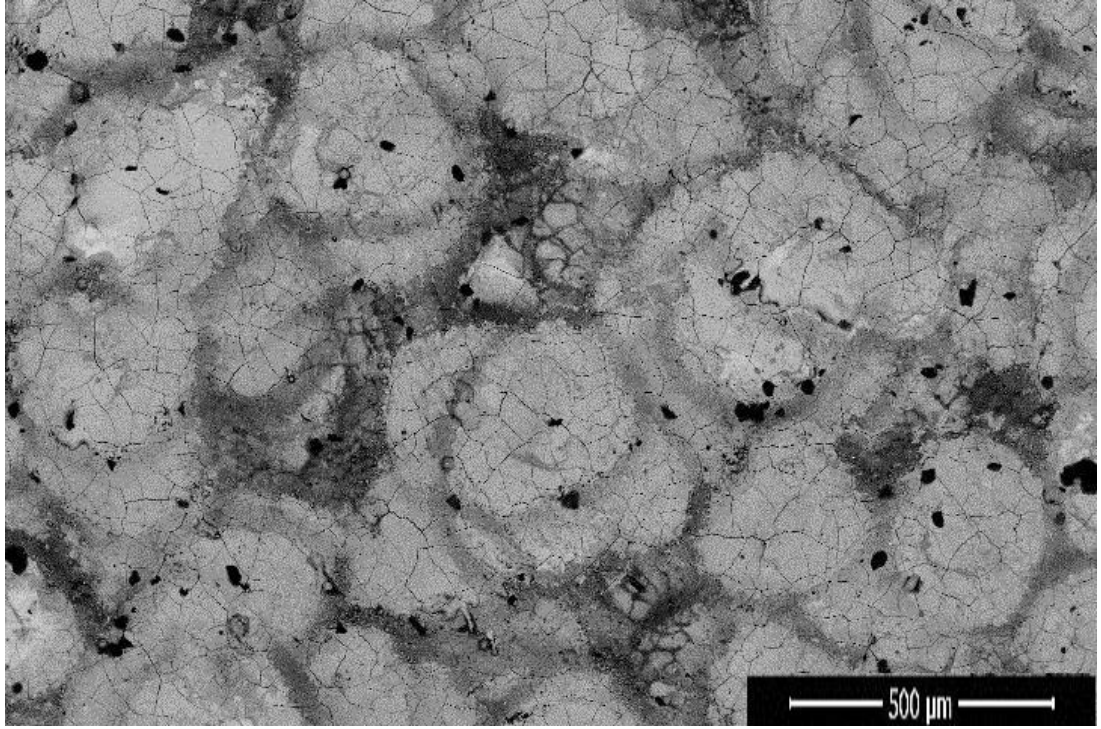


c)7A Darbe akımı, 200 µs Darbe süresi

Şekil 4.17 (devam ediyor)

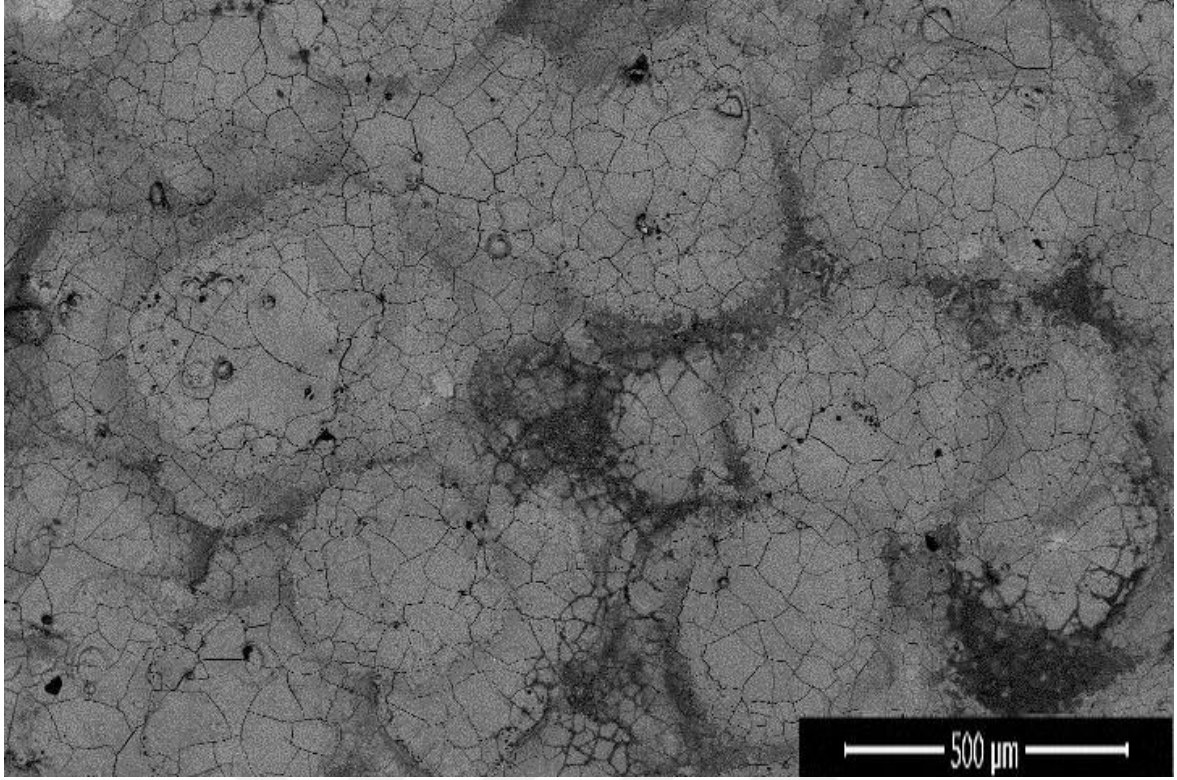


a)7A Darbe akımı, 200 μ s Darbe süresi



b)7A Darbe akımı, 400 μ s Darbe süresi

Şekil 4.18 MikroHA-TKEKİ'ye maruz numunelerde krater çeperlerinde yoğunlaşan HA



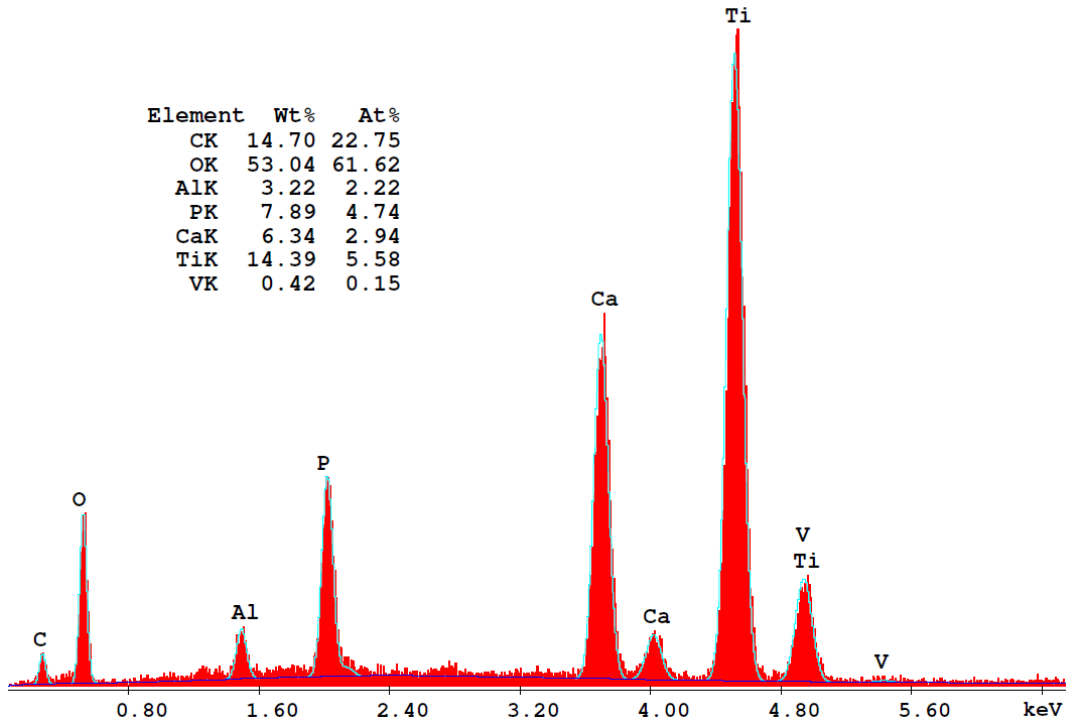
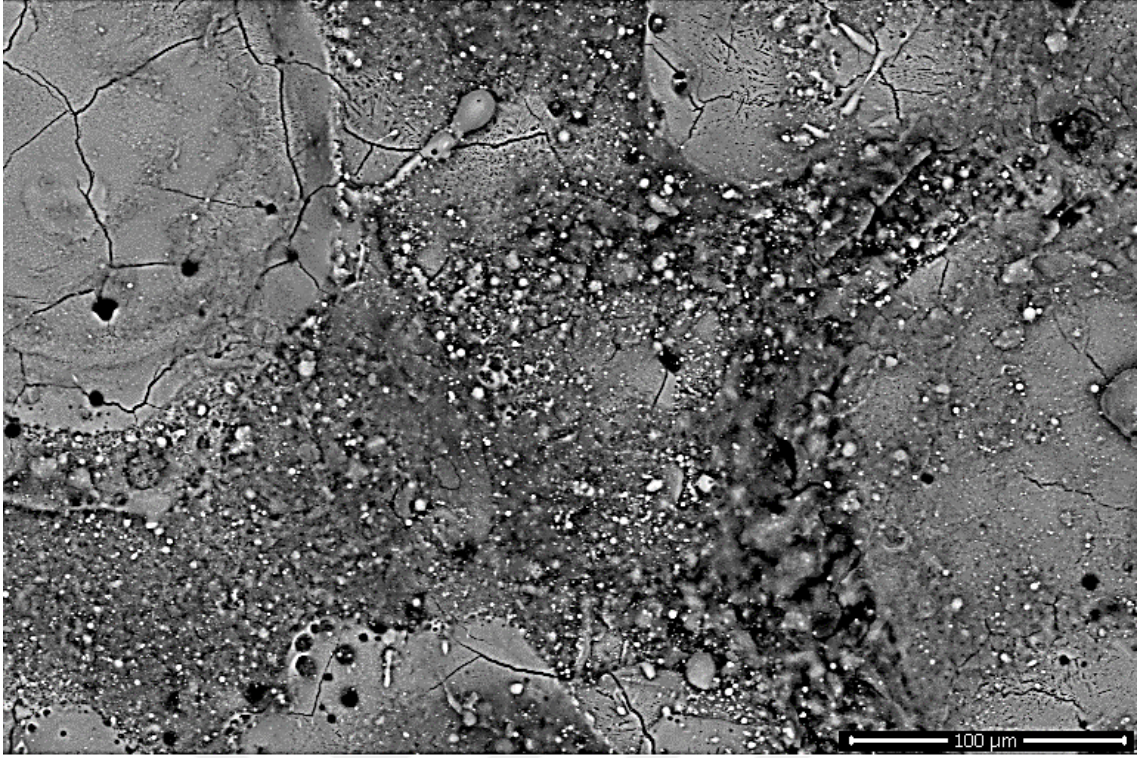
c)7A Darbe akımı, 800 μs Darbe süresi

Şekil 4.18 (devam ediyor)

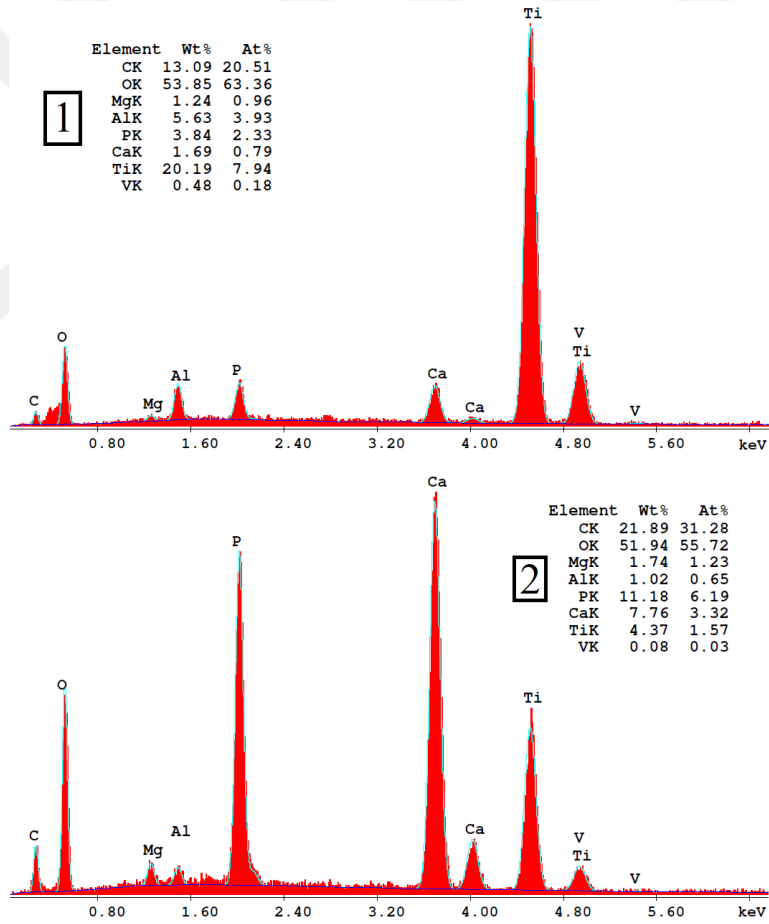
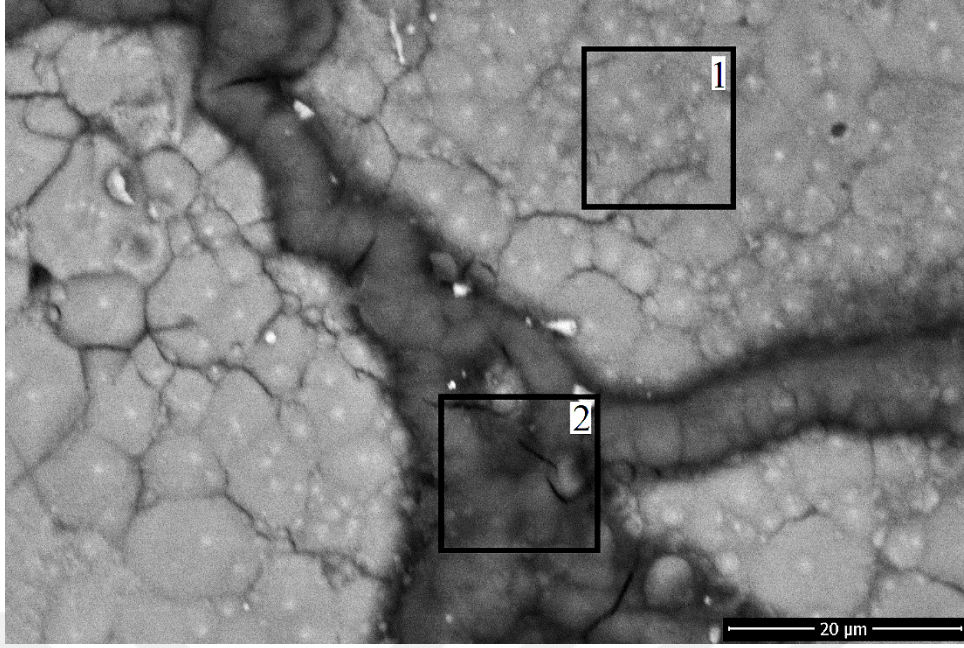
HA yapısındaki Ca/P oranı, mol yüzdesi yaklaşık olarak 1,67 olarak literatürde yer almaktadır. İşlenen numunelerden alınan EDS izlerinde yüzeyde yer alan elementlerin ağırlık ve atomsal yüzdeleri mevcuttur. Bu bağlamda EDS analizleri değerlendirilirken ağırlık yüzdeleri referans alınmıştır. Burada analizlerde ortaya konulan Ca ve P ağırlık yüzdeleri dielektrik sıvıya katılan HA'dan kaynaklanmaktadır. Numuneler işlendikten sonra analizlerden önce bir kalıntı kalmaması için yüzeyleri su ile iyice temizlenip kurutulmaktadır. Nano ve Mikro HA-TKEKİ yöntemiyle işlenen 80 adet numunenin EDS izleri değerlendirilerek, Ti, Ca, P, O ve diğer elementlerin (Al, V, C, N gibi) ağırlık yüzdelere bakılmıştır. Fakat yüzey üzerindeki HA oranları değerlendirilmek istendiğinden her bir numunedeki Ca+P ağırlık yüzdesi ele alınmıştır. Yüzeydeki HA bakımından zengin bölgeler daha koyu ve taneli karakteristikleriyle ana metalden bariz bir şekilde ayırt edilebilmektedir. EDS izleri alınırken bu bölgelere odaklanılmıştır. Tüm görüntüyü kapsayan alansal izler yanında (Şekil 4.19), özellikle HA'nın yoğunlaştığının düşünüldüğü yerlerdeki bölgeler işaretlenmek suretiyle bölgesel izler (Şekil 4.20) de alınarak HA yoğunlaşması teyit edilmiştir.

İşlenen yüzey üzerindeki Ca+P ağırlık yüzdeleri değerlendirildiğinde nano HA-TKEKİ yöntemiyle işlenen numunelerde (Şekil 4.21) darbe akımlarına göre değerlendirme yapıldığında aralarında bariz farklar olmamakla birlikte en çok HA yoğunlaşmasının ağırlıkça % 10.7 ile 7A'de, en az yoğunlaşmanın ise % 4.5 ile 22A'de gerçekleşmiştir. Tüm akım seviyelerinde işlendikten sonra yüzeydeki genel HA ağırlık yüzdesi % 7.2 olmaktadır.

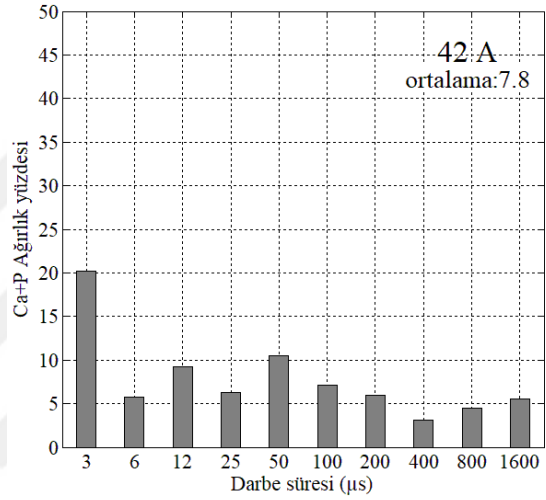
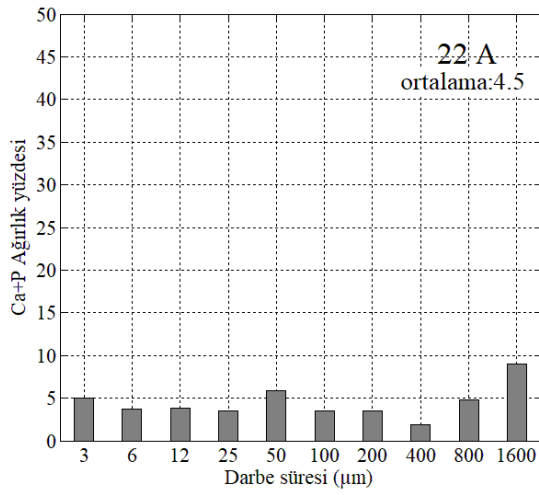
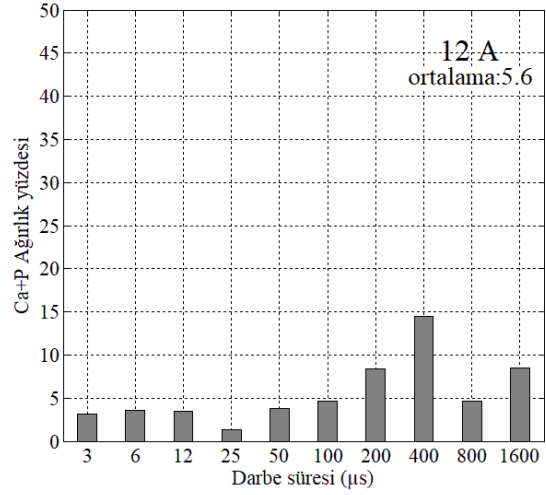
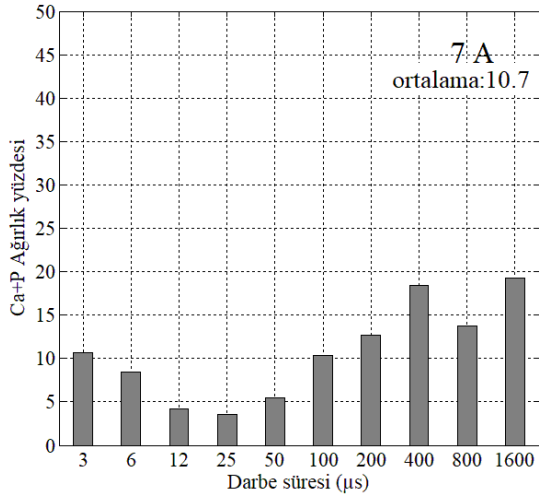
Mikro HA-TKEKİ yöntemiyle işlenen numunelerde (Şekil 4.22) ise darbe akımlarına göre değerlendirme yapıldığında aralarında farkların arttığı görülmektedir. Buna göre en çok HA yoğunlaşmasının ağırlıkça % 14 ile 22A'de, en az yoğunlaşmanın ise % 4.6 ile 42A'de gerçekleşmiştir. Tüm akım seviyelerinde genel HA ağırlık yüzdesi % 8.6 olmaktadır. Bu oran nano tozlarla işlemeye göre %20'lik bir artışa tekabül etmektedir. Her iki toz karşılaştırıldığında nano tozda az olan oran mikro tozda daha çok olmaktadır. Yoğunlaşma fazladan aza doğru sıralandığında her iki toz için 12 A akım seviyesi üçüncü sırayı korumaktadır.



Şekil 4.19 NanoHA-TKEKİ ile işlenmiş numunede alansal EDS izleri (7 A, 200 µs)

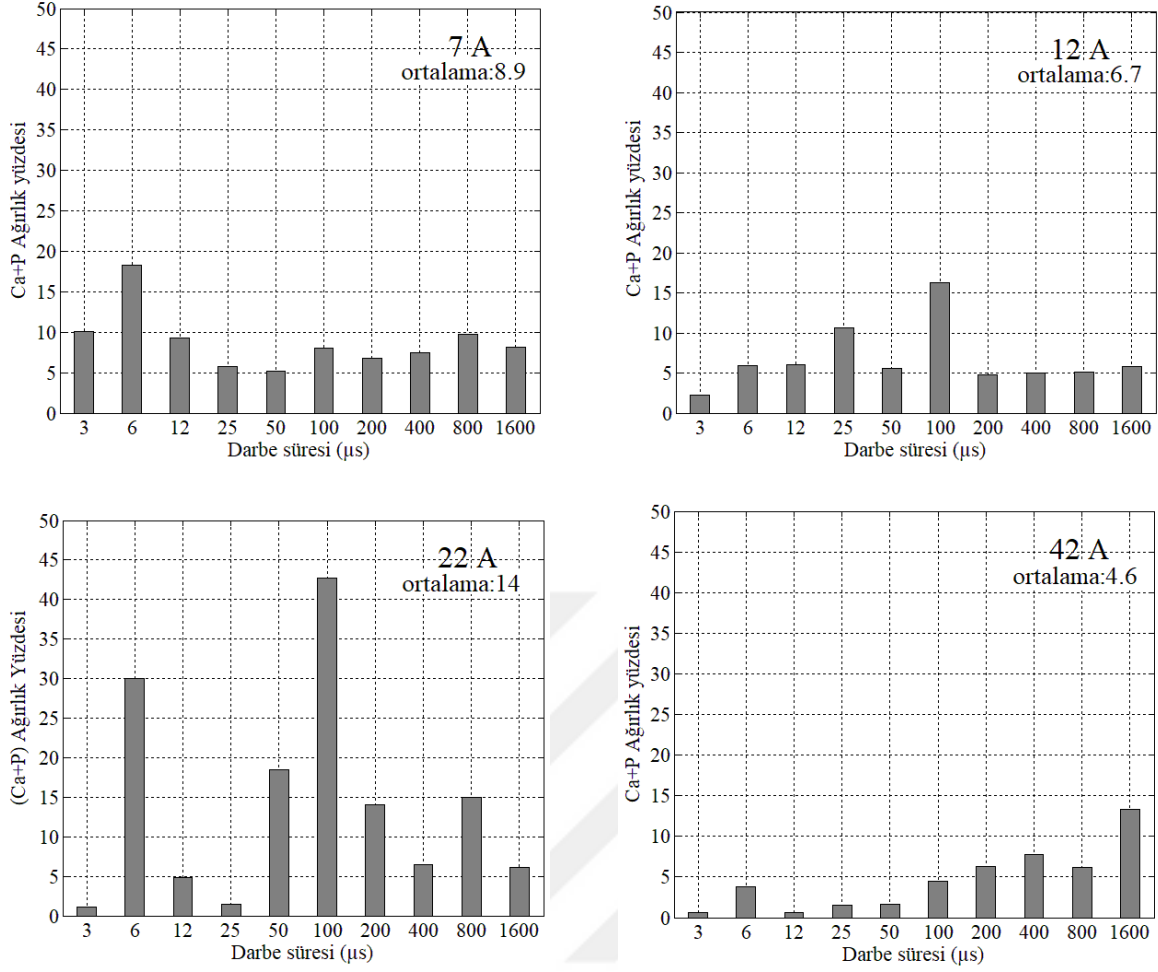


Şekil 4.20 MikroHA-TKEKİ ile işlenmiş numunede işaretli kısımlardaki EDS izleri (22 A, 200 μs)



Şekil 4.21 Nano HA-TKEKİ yöntemiyle işlenen numunelerde işlem parametrelerine göre Ca+P ağırlık yüzdesi değişimi.

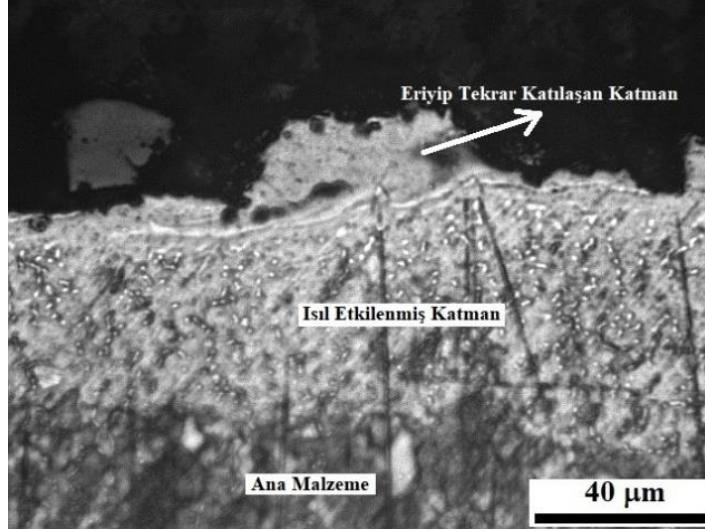
EDS analizlerine göre, işlenen yüzeylerdeki diğer elementlerin de ağırlık yüzdeleri değerlendirilmiştir. Buna göre nano HA-TKEKİ yöntemiyle işlenmiş numunelerde tüm darbe akımı ve darbe sürelerinde ortalama % 18.9 Ti, % 50.8 O ve % 23.1 diğer elementler (Al, V, C, N) yer almaktadır. Mikro HA-TKEKİ yöntemiyle işlenmiş numunelerde ise ortalama % 39 Ti, % 33.1 O ve % 19.3 diğer elementler (Al, V, C, N) yer almaktadır.



Şekil 4.22 Mikro HA-TKEKİ yöntemiyle işlenen numunelerde işlem parametrelerine göre Ca+P ağırlık yüzdesi değişimi.

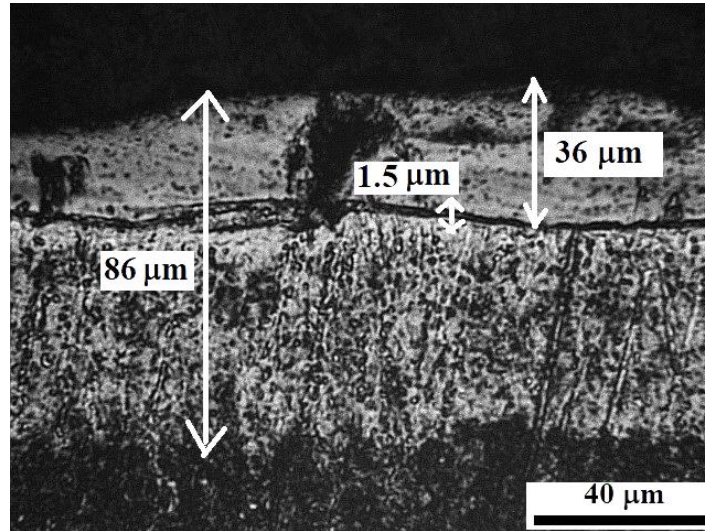
4.4 KESİT MİKROYAPISI VE KATMAN KALINLIKLARI

EKİ yöntemiyle işlenen ve işlenen yüzeyden itibaren kesilerek bakalite alınan numunelerde işlenmiş yüzeyden ana malzemeye doğru ilerledikçe kesit üzerinde farklı özelliklere ve görünüme sahip tabakalar yer almaktadır. Buna göre en üstte yer alan tabaka, dağlamaya dirençli ve ana malzemeye göre çok daha sert ve genellikle beyaz renkte gözlemlenmektedir. Eriyip tekrar katılan bu katmanı ısı etkilenmiş katmandan ayıran ince bir geçiş tabakası göze çarpmaktadır. Hızlı ısısal çevrimler sonucu oluşan ısı etkilenmiş katmanı ise nihayet ana malzeme takip etmektedir (Şekil 4.23).

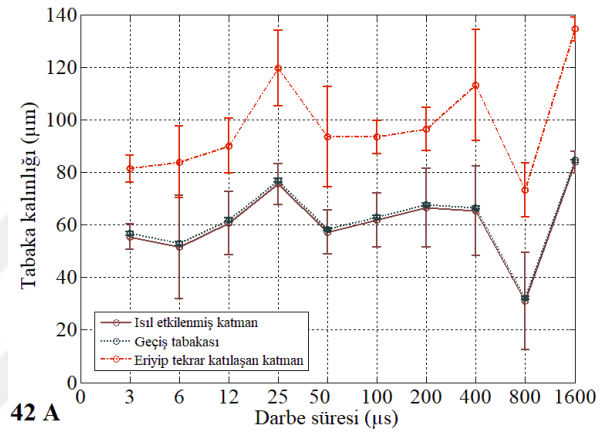
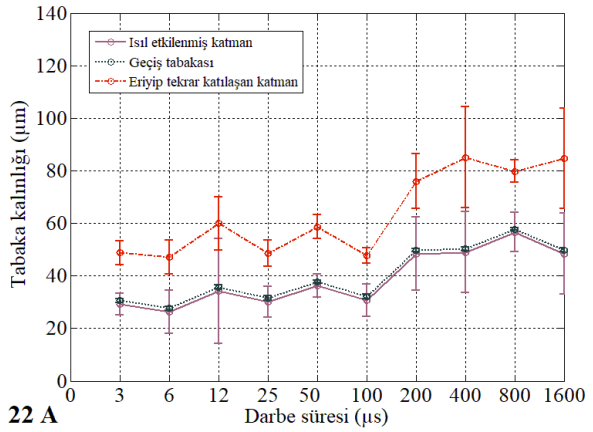
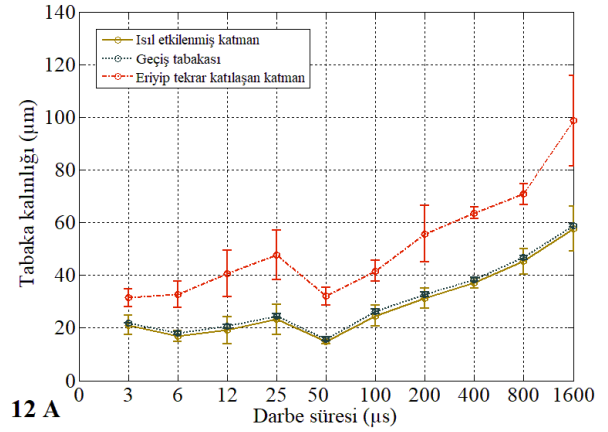
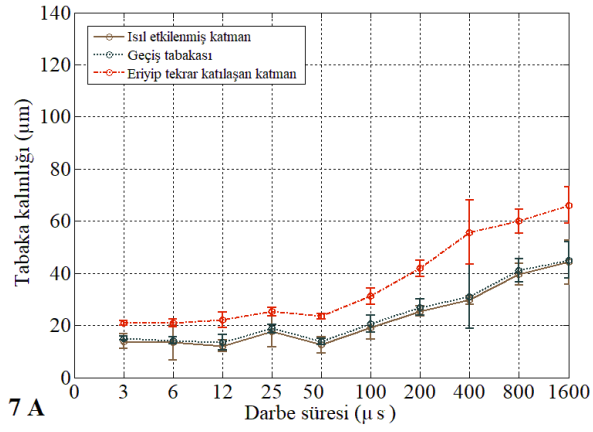


Şekil 4.23 HA-TKEKİ yöntemiyle işlenmiş numune kesiti.

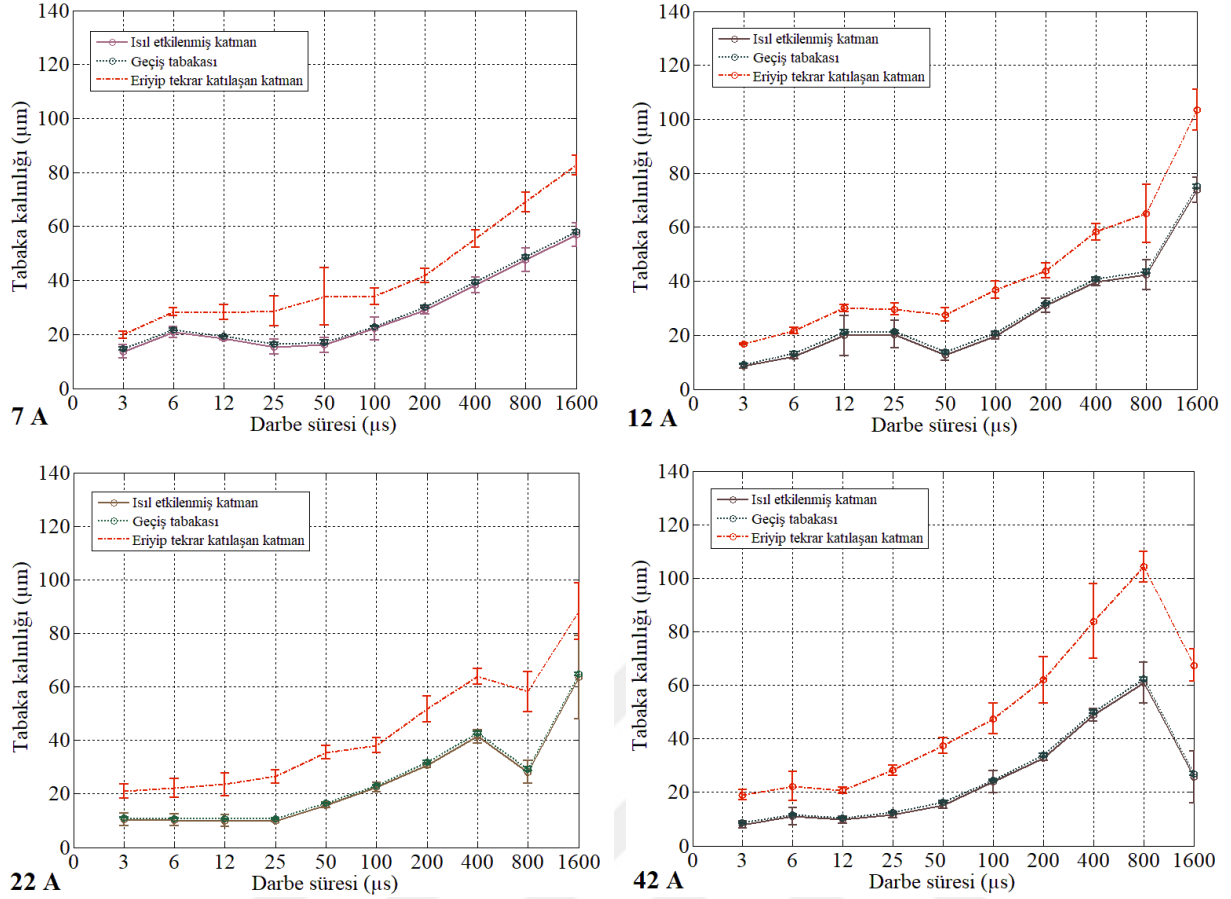
İşlem parametreleri ve toz katkıları katman kalınlıklarını (Şekil 4.24) da etkilemektedir. Yüksek darbe akımı ve sürelerinde katmanların daha kalın olduğu bilinmektedir. Fakat toz katkılarının etkisi hakkında bir sonuca varmak için tüm değişkenler (tane boyutu, işlem parametreleri) açısından değerlendirmek gerekmektedir. Bu sebeple nano (Şekil 4.25) ve mikro (Şekil 4.26) HA-TKEKİ yöntemiyle işlenen numunelerin kesitleri üzerinde oluşan katmanların kalınlıkları ölçülmüştür.



Şekil 4.24 NanoHA-TKEKİ'ye maruz numune kesitinde katman kalınlıkları (12A, 400 µs)



Şekil 4.25 Nano HA toz katkılı EKİ yöntemiyle işlenmiş numunelerde oluşan tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması.



Şekil 4.26 Mikro HA toz katkıli EKİ yöntemiyle işlenmiş numunelerde oluşan tabaka kalınlıklarının karşılaştırılması

42 A darbe akımında işlemlerde bazı sapmalar hariç bütün numunelerde darbe akımının ve süresinin artmasıyla katman kalınlıkları da artmaktadır. Nano HA-TKEKİ’de düşük darbe sürelerinde katman kalınlıkları mikro HA-TKEKİ’ye göre daha fazladır. Yüksek darbe sürelerinde ise yaklaşık aynı değerlere ulaşmaktadır. Karşılaştırma yapmak için suda işlenen numunelerde 4 akım seviyesinde ve 800 µs darbe süresinde işlenen birer numune üzerinde katman kalınlıkları ölçülmüştür. Buna göre suda işlenen numunelerde katman kalınlıklarının daha az olduğu görülmektedir (Çizelge 4.1).

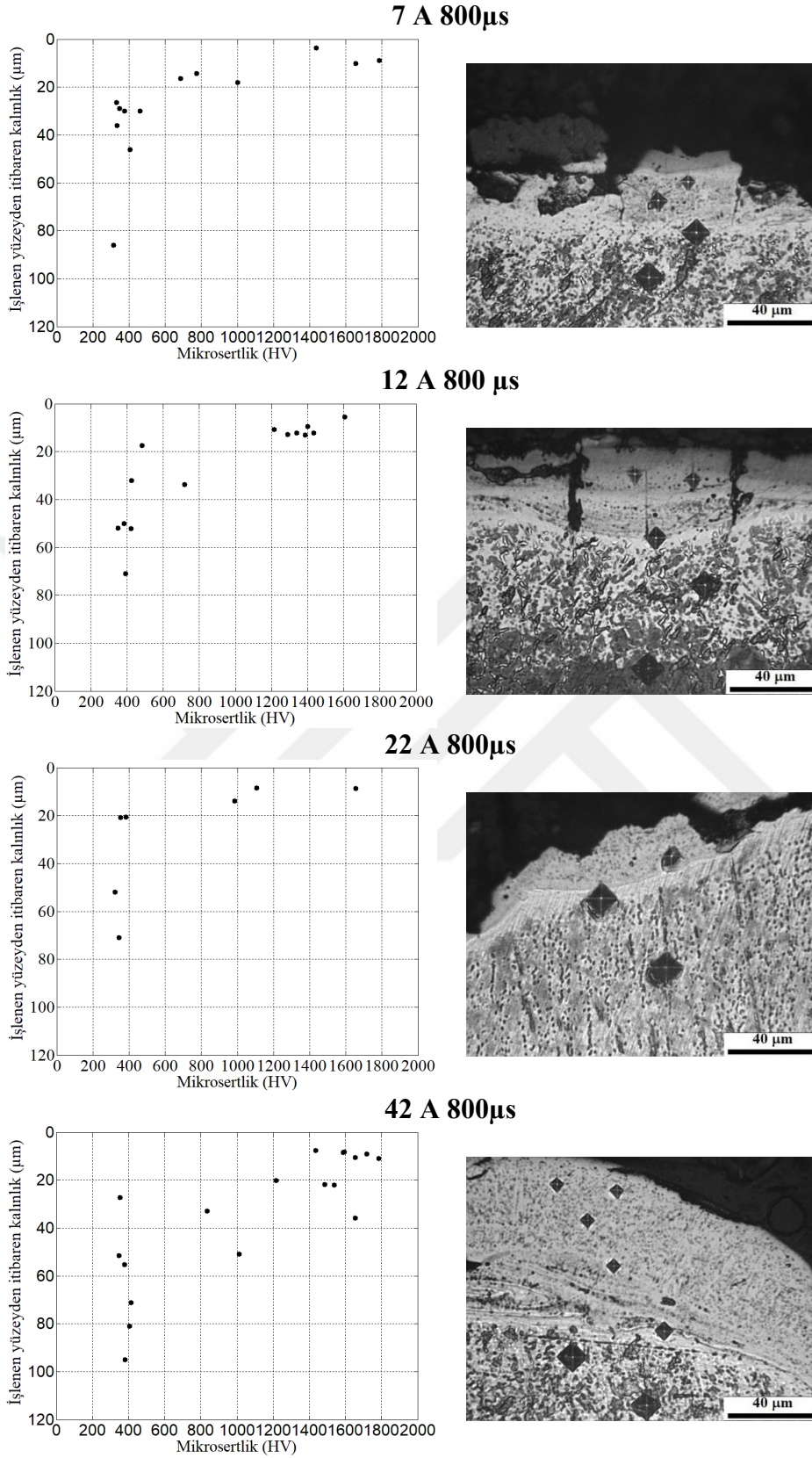
Çizelge 4.1 Saf suda işlenen numune kesitlerindeki katman kalınlıkları (800 µs)

	Eriyip tekrar katılan katman	Standart sapma	Geçiş tabakası	Standart sapma	Isıl etkilenmiş katman	Standart sapma
7A	22.389	4.847	1.145	0.627	36.445	13.389
12A	18.472	5.497	1.277	0.721	43.445	3.848
22A	24.754	9.05	1.533	0.722	42.627	5.548
42A	34.334	13.389	1.389	0.621	53.417	7.335

4.5 KESİT MİKROYAPISI VE MİKROSERTLİK ANALİZLERİ

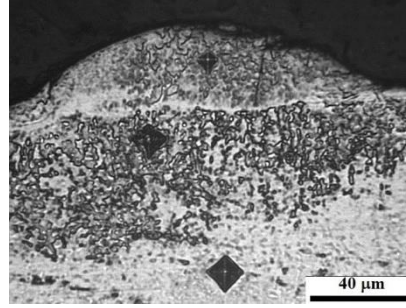
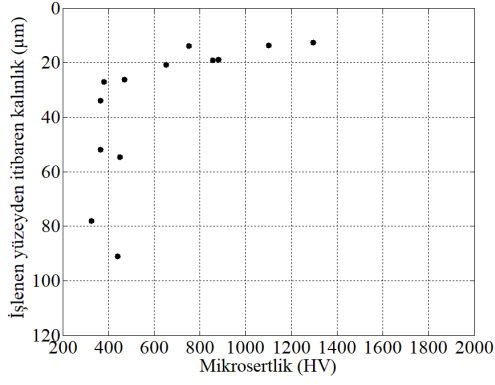
EKİ’de mikrosaniyeler içerisinde gerçekleşen ısısal çevrimler neticesinde oluşan çok ince katmanlardan mikrosertlik değerleri almak bir hayli güç olmaktadır. Katman kalınlıkları dielektrik sıvı yanında işlem parametrelerine de doğrudan bağlı olmakla birlikte aynı numune üzerinde bile bölgeden bölgeye değişimler göstermektedir. Sertlik ölçümleri nano ve mikro HA-TKEKİ’ye maruz numunelerde ve saf suda yapılan işlemlerde 4 akım seviyesinde ölçülmüştür. Darbe süresi ise sabit tutularak 800 µs olarak seçilmiştir. Yüksek darbe süresinin seçilme sebebi ise katman kalınlığının düşük sürelerle göre daha fazla olması dolayısıyla sertlik izlerinin daha kolay alınabilmesidir. Ölçümlerde Vickers uç ile HV 0.025 kg (245.175 mN) yük 25 saniye boyunca uygulanmıştır. Böylece işlenen yüzeyden başlayarak her katman üzerinden ana malzemeye doğru sertlikler ölçülmüştür. Ölçüm sayıları oluşan katmanların elverdiği ölçüde yapılmıştır ve sabit bir ölçüm sayısı yoktur.

Ölçümlere göre, sertliğin en yüksek olduğu katman eriyip tekrar katılan katmandır. Ana malzemeye doğru inildikçe sertliğin logaritmik olarak düştüğü ve ana malzeme ortalama sertliğin ortalama 365 HV olduğu görülmektedir. Nano HA-TKEKİ’ye maruz numunelerde sertlik değerleri eriyip tekrar katılan katmanda 1800 HV’a (Şekil 4.27), mikroHA-TKEKİ’ye maruz numunelerde ise 1600 HV’a (Şekil 4.28) ulaşmaktadır. Saf suda yapılan işlemlerde kısmen daha yüksek 2000 HV’a varan sertlik değerleri ölçülmüştür (Şekil 4.29). Isıl etkilenmiş katmandaki sertlikler ise 400 HV-500 HV civarında ölçülmüştür. Toz katkısının sertlik değerlerini önemli ölçüde etkilemediği görülmektedir.

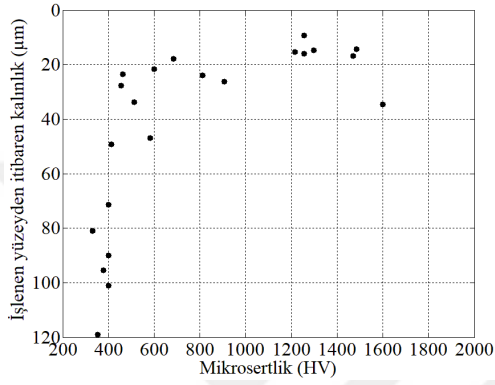


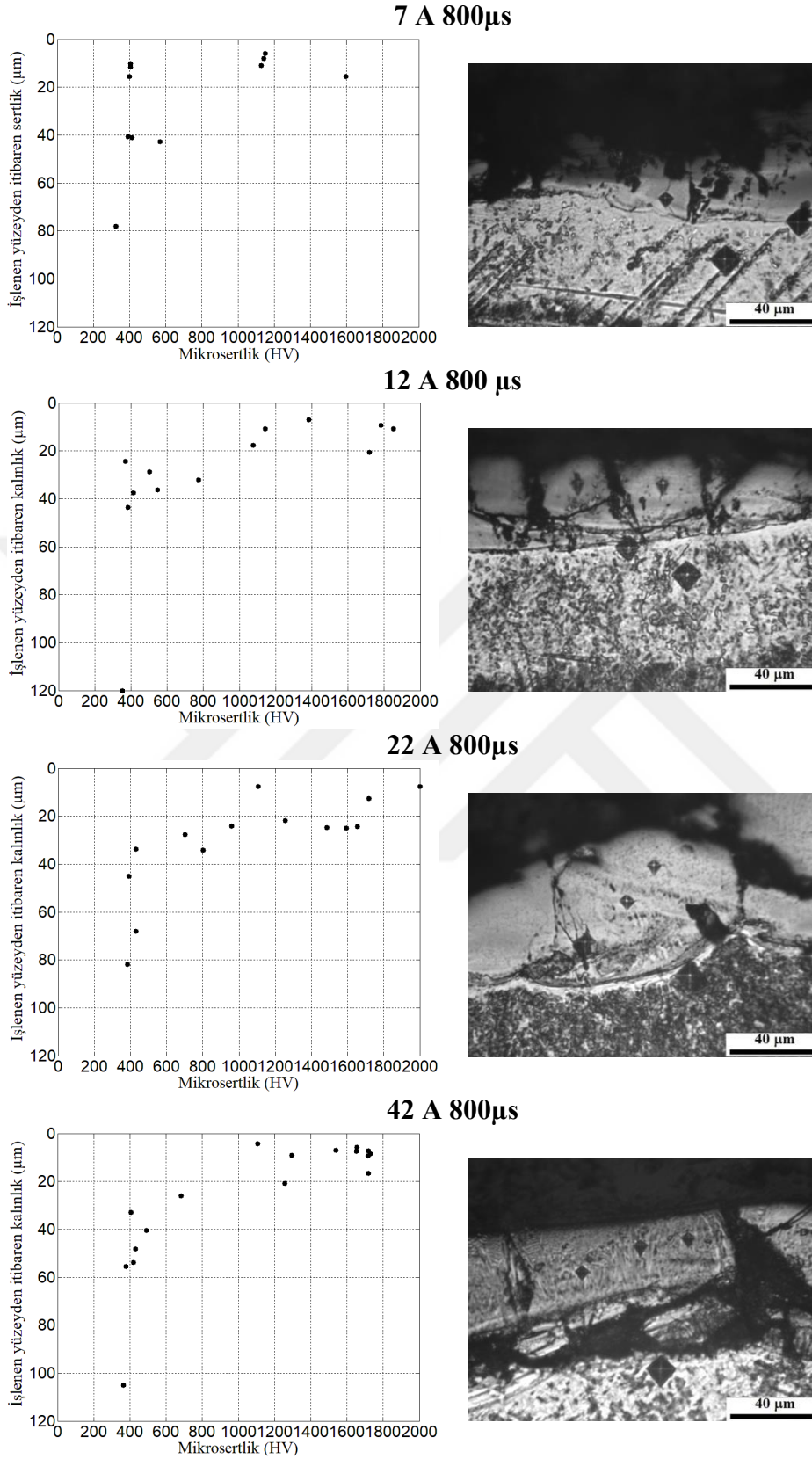
Şekil 4.27 Nano HA-TKEKİ'ye maruz numune kesitlerindeki mikrosertlik değişimleri.

7 A 800 μ s



12 A 800 μ s

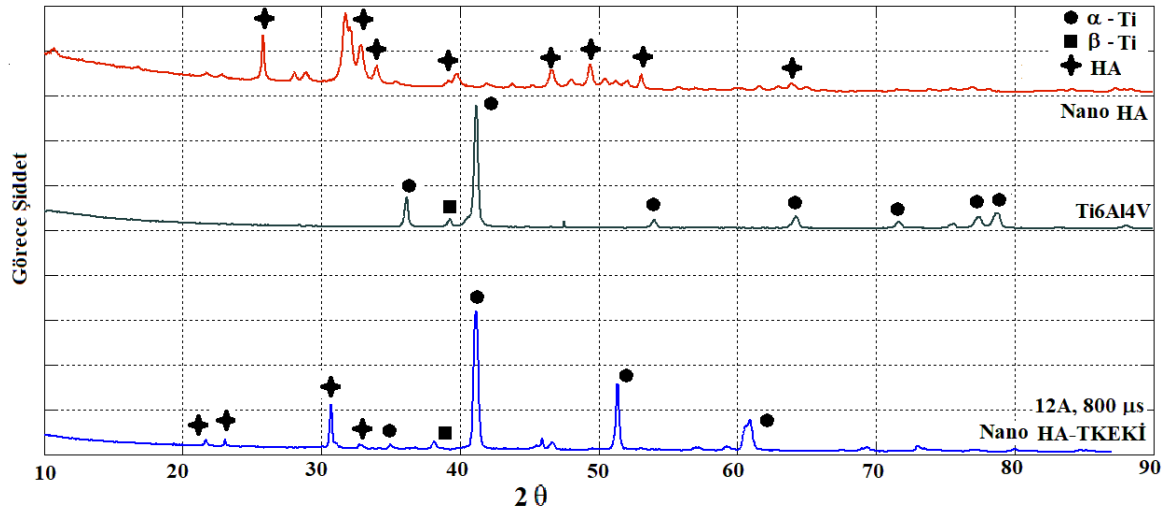




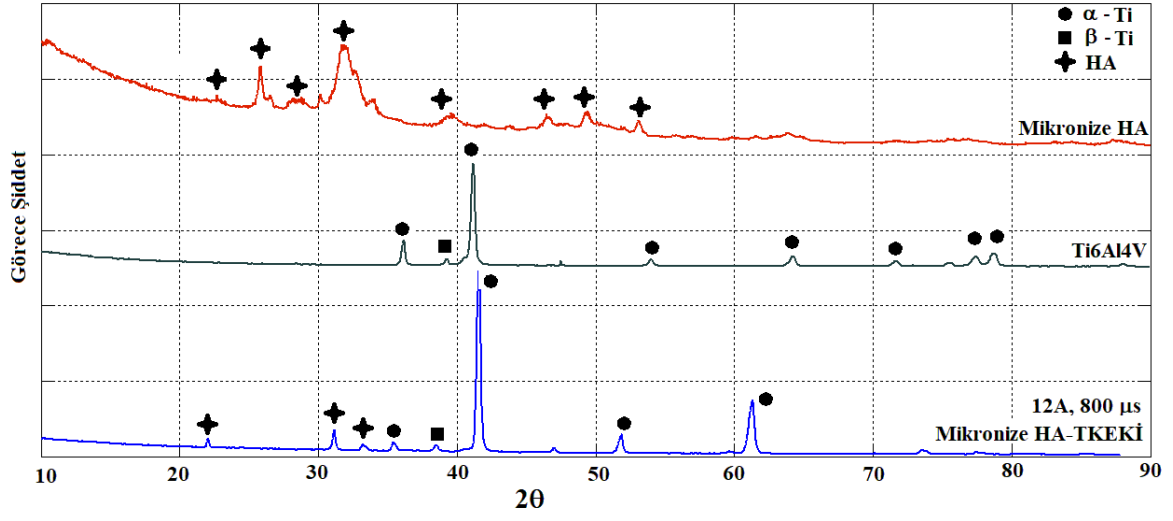
Şekil 4.29 Saf suda EKİ yöntemiyle işlenmiş numune kesitlerindeki mikrosertlik değişimleri.

4.6 X-IŞINLARI KIRINIM DİFRAKTOMETRESİ (XRD) ANALİZİ

X-Işını Kırınım yöntemi (XRD), malzemelerin kristalografik özellikleri ile birlikte içerdikleri fazların da belirlenmesini sağlar. Atomik dizilimlerine bağlı olarak her bir fazın X-ışınlarını belli karakteristik bir düzende kırması ilkesine dayanır. Bu kırınım izleri, her bir kristalin faz için bir çeşit parmak izi gibidir ve o kristali tanımlamaktadır. Bununla birlikte içerdiği fazların bilinmediği numunelerde elde edilen izler veri tabanları ile karşılaştırılarak da bu fazlar belirlenebilir. Bu amaçla işleme sırasında yüzeye transfer olan ve eriyik metale saplanıp kalarak yüzeyde katılaştıran HA tozlarının varlığı ve yoğunluğunun belirlenmesi için nano ve mikro HA-TKEKİ yöntemiyle işlenmiş numunelerden seçilenler XRD analizine tabi tutulmuştur. Burada her bir akım seviyesinde 800 µs darbe süresindeki numuneler incelenmiştir. Darbe süresinin yüksek seçilmesi katman kalınlıklarının da kalın olması ve metalürjik değişimlerin daha kolay gözlemlenmesi açısındandır. Ölçümler, 10–90 derece arasında alınmış ve analizlerde Panalytical marka Empyrean model XRD cihazında 45 kV, 40 mA konfigürasyonunda, Cu (α) 1.54056 Å X- ışını tüplü cihaz kullanılmıştır. İşlenmiş numunelerden elde edilen izler üzerindeki pikler, nano ve mikro boyutlardaki HA tozlarının ve işlenmemiş numunenin pikleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.30-4.31).



Şekil 4.30 Nano HA-TKEKİ yöntemiyle işlenmiş numunenin XRD izlerinin karşılaştırması



Şekil 4.31 Mikro HA-TKEKİ yöntemiyle işlenmiş numunenin XRD izlerinin karşılaştırması



BÖLÜM 5

SONUÇLAR

- Darbe süresi boyunca oluşan kıvılcıklar dielektrik sıvı içerisindeki toz tanelerine çarparak kıvılcıkları bölmektedir. Böylece daha homojen şekilde tozların ergiyik metale saplanıp kalması sağlanmaktadır. Farklı parametrelerde farklı kıvılcım formları oluşmaktadır. Ekmekci et al.(2016) büyük bir kıvılcımdan ayrılan ikincil, üçüncül kıvılcımları da içeren beş farklı kıvılcım formu önermişlerdir. Kıvılcım formları rassal olmayıp yüzey morfolojisini de doğrudan etkilemektedir. Bu formlar, yüzeyde toz katkısı yoğunluğu, oluşan katman kalınlıkları ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde de etkilidirler.
- Toz katkılarının yüzey pürüzlülüğünü azalttığına dair çalışmalara literatürde yer verilmiştir. İşlemlerde düşük darbe sürelerinde bu durum gerçekleşmezken, yüksek sürelerde ise geçerli olmaktadır. Dielektrik sıvıdan ergiyik metal havuzuna hücum eden tozlar, ergiyik malzemenin krater çeperlerine doğru akıp kümelenmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca tozlar, buharlaşan metal ve sıvı baloncuklarına çarparak, onların katılma sırasında ergiyik metal içerisinde boşluklar oluşturmasını engelleyerek, pürüzlülüğü azaltabilmektedirler. Küçük darbe sürelerinde kraterler henüz yayvanlaşmamışken kıvılcım atlaması son bulmaktadır. Pürüzlü bir yüzey oluşturacak ısısız çevrimler, yüksek sürelerdeki kadar etkin değildir. Pürüzlülük üzerinde etkin olan diğer bir parametrede toz katkılarıdır. Toz katkılarını ana boşalım kanalını bölerek, yoğun ve bütüncül kıvılcımı dallara ayırmakta ve yüzeye homojen bir dağılım sağlayarak pürüzlülüğü azaltmaktadır.
- Kıvılcım atmasının son bulmasıyla plazma kanalında oluşan ani basınç düşmesi neticesinde dielektrik sıvının ergiyik metal havuzuna hücum etmesi ve akabinde içindeki toz katkılarının havuza saplanmasıyla toz katkısı yönünden zenginleşmiş fonksiyonel yüzeyler elde edilebilmektedir. Nano ve mikro toz katkılarının farklı parametrelerde yüzeye nüfuz ettiği gözlemlenmektedir. EDS analizlerine göre Ca+P ağırlık yüzdelerine göre değerlendirme yapıldığında, nano toz katkısı için en fazla HA yoğunlaşmasının 7A darbe akımında, en az yoğunlaşmanın ise 22A'de gerçekleştiği belirlenmiştir. Aynı şekilde mikro toz katkısı

değerlendirildiğinde ise en fazla yoğunlaşmanın 22A darbe akımında, en az yoğunlaşmanın ise 42A'de gerçekleştiği belirlenmiştir.

- Yüksek darbe süreleri ve akımlarında kesit üzerinde iyice kalınlaştığı gözlemlenen katmanlarda süreksizlikler ve çatlaklar, oyuklar içerisinde hapsolan tanecikler yer almaktadır. Bu durum, dielektrik sıvıdaki toz tanelerinin, işleme sırasında dielektrik sıvıya karışan metal malzemelerin yada buharlaşan malzemenin oluşturduğu baloncukların ergiyik metal henüz katılaşmamışken içine saplanarak ve daha sonra ani soğumayla oldukları yerde kaldığı şeklinde açıklanabilir.

- Nano ve mikronize HA-TKEKİ yöntemiyle yüksek darbe süreleri ve akımlarda tabaka kalınlıkları hızla artmaktadır. Kalınlıklar, parametrelere göre 20 µm'den 140 µm'ye kadar değişmektedir. Nano HA-TKEKİ'de düşük darbe sürelerinde katman kalınlıkları mikro HA-TKEKİ'ye göre daha fazla fakat yüksek darbe sürelerine çıkıldıkça aynı seviyelerde seyretmektedir. Yüksek akımlarda birim alanda oluşan enerji arttığından daha kalın katmanlar oluşmaktadır. Ayrıca katman kalınlıklarında kıvrılcım formları da etkindir. İşlemelerde kalın bir ısıl etkilenmiş katman göze çarpmaktadır. Bunun nedeni toz katkılarının dielektrik sıvının yalıtım direncini düşürerek işlenen malzemeye daha fazla enerjinin geçmesine sebep olması olarak açıklanabilir.

- Yapılan sertlik ölçümlerinde, kesit üzerinde ana malzemedeki işlenen yüzeye doğru ilerledikçe sertliğin logaritmik olarak arttığı saptanmıştır. Ana malzemedeki ortalama sertlik 365 HV iken, ısıl etkilenmiş katmanda 400-500 HV ve eriyip tekrar katılaşan katmanda ise TKEKİ'de 1600-1800 HV değerine ulaşmaktadır. Saf suda yapılan işlemlerde ise 2000 HV'a çıkmaktadır. Toz katkısının suda işlemeye göre sertliği artırıcı yönde etkisi olmadığı gözlemlenmiştir.

- Medikal uygulamalarda implant ve protezlerde kullanılan malzemeler, biyouyumlu olmalarına rağmen metallerin doğası gereği iyon salınımı ve korozyon etkisi yaratmaları gibi sebeplerden HA gibi kemikle daha uyumlu malzemelerle kaplanmaları yada yüzeylerinin HA yönünden çeşitli yöntemlerle zenginleştirilmeleri gereği doğmaktadır. Ayrıca HA'nın kemikle bütünleşmesi ve entegrasyonu daha iyidir. Bu bağlamda TKEKİ yöntemi HA yönünden zengin yüzeyleri elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Ayrıca yöntemin doğası gereği oluşan ısıl çevrimler ve dielektrik sıvının işleme bölgesine hücum etmesiyle gerçekleşen hızlı soğumalar mikro çatlakları olası kılmaktadır ve bu noktada medikal uygulamalar için porozitif fonksiyonel yüzeylerin elde edilebilmesi de istenen bir durumdur.

KAYNAKÇA

- Abu Zeid O A** (1997) On the effect of electro discharge machining parameters on the fatigue life of AISI D6 tool steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 68(1): 27–32.
- Aydın İ** (2013) Yeni Bir Tampon Ortamında Ti6Al4V Alaşımlarının Üzerine Biriktirilen Hidroksiapatit Kaplamaların Kırılma ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Manisa, 131 s.
- Barriuso S, Lieblich M, Multigner M, Etxeberria I, Alberdi A, González-Carrasco J L** (2011) Roughening of metallic biomaterials by abrasivelesswaterjet peening: Characterization and viability. *Wear*, 27: 634-639.
- Brunette D M, Tengvall P, Textor M, Thomsen P** (2001) Titanium in medicine: Material Science, Surface Science, Engineering, Biological Responses, and Medical Applications. *Springer Verlag*, 31-34.
- Cheol Y K and Sang S J** (2003) Hydroxyapatite formation on bioactive-glazed alumina. *Journal of the European Ceramic Society*, 23:1803-1811.
- Crookall J R and Khor B C** (1974) Electro-discharge machined surfaces. *Proceedings of the Fifteenth International Machine Tool Design and Research Conference*, September 18-20, England, 373-384.
- Ekmekci B, Elkoca O, Erden A** (2005) A comparative study on the surface integrity of plastic mold steel due to electric discharge machining. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 36(1): 117-124.
- Ekmekçi B** (2006) A semi-empirical approach forresi dual stresses in electricdischarge machining (EDM). *International Journal of Machina Tools and Manufacture*, 46(7-8): 85-86.
- Ekmekci B** (2007) Residual Stresses and White Layer in Electric Discharge Machining (EDM). *App. Surf. Sci.*, 253(23): 9234-9240.
- Ekmekci B** (2009) White LayerComposition, Heat Treatment And Crack Formation In Electric Discharge Machining Process. *Metall. Mater. Trans.*, 40B: 70-81.
- Ekmekci B and Ersöz Y** (2012) How suspended particles affect surface morphology in powder mixed electrical discharge machining (PMEDM). *Metallurgical and Materials Transactions B.*, 43: 1138-1148.

KAYNAKÇA (devam ediyor)

- Ekmekci B and Ekmekci N** (2013) Hydroxyapatite Deposition onto Ti-6Al-4V Surface in Powder Mixed Electrical Discharge Machining. *Advanced Materials Research*, 856: 205-209.
- Ekmekçi B, Ulusöz F, Ekmekci N and Yaşar H** (2015) Suspended SiC particle deposition on plastic mold steel surfaces in powder mixed electrical discharge machining. *Proc. I Mech E Part B: J Engineering Manufacture*, 1–12.
- 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.
- Ekmekci N** (2016) Farklı dielektrik ortamlarda elektriksel kıvılcımla işlenmiş DIN 1.4442 çift fazlı çeliğin mikroyapı ve mikrosertlik değişimleri. *Karaelmas Fen ve Müh. Dergisi*, 6(2): 412-422.
- Ekmekci N and Keskin İ** (2019) Surface characteristics and hardness variations in electrical discharge machining of enhanced nitrogen in vanadium steels. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 50(B):98-109.
- Ekmekci N ve Akbaş S** (2019) Mikronize Hidroksiapatit Toz Katkılı Elektriksel Kıvılcımla İşlenmiş Ti-6Al-4V Alaşımının Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi ve Yüzeğe Toz Katkısı Nüfuziyetinin Değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24: 193-206.
- Erden A and Bilgin S** (1980) Role of impurities in electric discharge machining. *Proceedings of 21th International Machine Tool Design and Research Conference*, Macmillan, London, 345–350.
- Furutani K, Saito H and Suzuki M** (2009) Influence of Electrical Conditions on Performance of Electrical Discharge Machining With Powder Suspended In Working Oil For Titanium Carbide Deposition Process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(11-12): 1093-1101.
- Gunawan S, Suryanto I and Naqshbandi A** (2014) Zinc-doped Biphasic Calcium Phosphate Nanopowders Synthesized Via Sol-gel Method. *Indian J. Chem A*. 53: 152-8.
- Groover M P** (2012) *Fundamentals of Modern Manufacturing*. 5th edition, John Wiley, New York, 292 pp.
- Habazaki H, Onodera T, Fushima K, Konno H and Toyotake K** (2007) Spark anodizing of β -Ti alloy for wear-resistant coating. *Surface and Coatings Technology*, 201(21): 8730-8737.
- Hanawa T** (2004) Metal ion release from metal implants, *Materials Science and Engineering* 24: 745–752.

KAYNAKÇA (devam ediyor)

- Jameson E C** (2001) Descriptio and development of electrical discharge machining (EDM).in: *Electrical Discharge Machining, Society of Manufacturing Engineers*, Dearbern, Michigan, 1-2.
- Jeswani M L** (1981) Effects of the Addition of Graphite Powder to Kerosene Used as the Dielectric Fluid in Electrical Discharge Machining. *Wear*, 70: 133-139.
- 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: 427–436.
- Kıyıcı İ A** (2011) Plazma Püskürtme Yöntemiyle Üretilen Hidroksiapatit-Cam Kompozit Kaplamaların Karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul, 12-57.
- Klocke F, Lung D, Antonoglou G and Thomaidis D** (2004) The effects of powder suspended dielectrics on the thermal influenced zone by electro discharge machining with small discharge energies. *J Mater Process Technol*, 149: 191–197.
- Krzysztof A, Adrian B and Marian K** (2018) Modelling the structure and mechanical properties of oxide layers obtained on biomedical Ti-6Al-7Nb alloy in the thermal oxidation process. *Vacuum*, 154: 309-314.
- Kumar A, Maheshwari S, Sharma C and Beri N** (2010) Realizing Potential of Graphite Powder in Enhancing Machining Rate in AEDM of Nickel Based Super Alloy 718. *Proc. Of Int. Conf. On Advances in Mechanical Engineering*, 50-53.
- Kunieda M and Furuoya S** (1991) Improvement of EDM efficiency by supplying oxygen gas into gap. *Annals of the CIRP*, 40(1): 215-218.
- Liu X, Chu P K and Ding C** (2004) Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for bio medical applications. *Materials Science Engineering R-Reports*, 47: 49–121.
- Lütjering G and Williams J C** (2007) Engineering Materials and Processes. *Titanium. Springer-Verlag*, London, 442 pp.
- Machinability Data Center** (1980) *Machining data handbook*, 3rd edition, , Techsolve, Inc., Cincinnati, 2: 10-65.
- Juan-Díaz M J, Martínez-Ibáñez M, Hernández-Escolano M, Cabedo L, Izquierdo R, Suay J and Gurruchaga M** (2014) Development of hybrid sol–gel coatings for the improvement of metallic biomaterials performance. *Progress in Organic Coatings*, 77: 1799–1806.
- Ohlsson L** (1995) The theory and practice of abrasive water jet cutting, *PhD Thesis, Lulea University of Technology.*, Sweden, 81-93.

KAYNAKÇA (devam ediyor)

- Öpöz T T, Yaşar H, Murphy M F, Ekmekci N and Ekmekci B** (2019) Ti6Al4V Surface Modification by Hydroxyapatite Powder Mixed Electrical Discharge Machining for Medical Applications. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*. 1-10.
- Pattanayak D K, Rao B T and Mohan T R R** (2011) Calcium Phosphate Bioceramics and Bioceramic Composites. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*. 59: 432-47.
- Pecas P and Henriques E** (2003) Influence of Silicon Powder Mixed Dielectric on Conventional Electrical Discharge Machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43: 1465-1471.
- Prakash C, Kansal H K, Pabla B S and Puri S** (2017) On the Influence of Nanoporous Layer Fabricated by PMEDM on β -Ti Implant: Biological and Computational Evaluation of Bone- Implant Interface. *Materials Today: Proceedings*, 4: 2298-2307.
- 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 & Coatings Technology*, 326: 134-145.
- Rebelo J C, Morao Dias A, Kremer D and Lebrun J L** (1998) Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 84: 90–96.
- Prasad, N B V, Parameswara R, Ch V S and Sivanaga M R** (2015) Studies on Wire Selection for Machining with WEDM, *International Journal of Computer Science Trends and Technology*, 300-303.
- Sopyan I, Mel M, Ramesh S and Khalid K A** (2007) Porous Hydroxyapatite for Artificial Bone Applications. *Science and Technology of Advanced Materials*. 8: 116-23.
- Soni J S and Chakraverti G** (1996) Experimental investigation on migration of material during EDM of T 215 Cr12 die steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 56 : 439–451.
- Tõnsuaadu K, Gross K A, Plūduma L and Veiderma M** (2011) A Review on the Thermal Stability of Calcium Apatites. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 110: 647-59.
- Trent E M and Wright P K** (2000) Butterworth-Heinemann. *Metal cutting*, 4th edition, Oxford, 352 pp.
- Wong Y S, Lim L C, Rahuman I and Tee W M** (1998) Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric. *J. of Materials Processing Technology*, 79: 30–40.
- Weihong J and Paul K C** (2018) Surface functionalization of bio materials by plasma and ion beam. *Surface & Coatings Technology*, 336: 2-8.

KAYNAKÇA (devam ediyor)

- Wu K L, Yan B H, Huang F Y and Chen S C** (2005) Improvement of surface finish on SKD steel using electro-discharge machining with aluminum and surfactant added dielectric. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45: 1195–1201
- 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.
- Zhang C, Feng P and Zhang J** (2013) Ultrasonic vibration-assisted scratch-induced characteristics of C-planes app hire with a spherical indenter, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 64: 38-48
- Zhang Q H, Zhang J H, Ren S F, Niu Z W and Ai X** (2005) A theoretical model of surface roughness in ultrasonic vibration assisted electrical discharge machining in gas. *Int. J. Manufacturing Technology and Management*, 7: 381-390.
- Zhao W S, Mengand Q G and Wang Z L** (2002) The application of research on powder mixed EDM in rough machining. *J. Mater. Process. Technol.*, 129: 30–33.



ÖZGEÇMİŞ

Yasin EFE 1989 yılında İzmit’de doğdu. İlköğretim ve Lise öğrenimini İzmit’de tamamladı. 2012 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü’ne başladı ve 2016 yılında mezun oldu. 2017 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği yüksek lisans eğitimine başladı.

İLETİŞİM BİLGİLERİ:

E-posta: yyaasin.efe@gmail.com