

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROSPARK BİRİKTİRME YÖNTEMİYLE
MİKRO ALAŞIMLI ÇELİKLERİN
TUNGSTEN KARBÜR İLE KAPLANMASI

Kemal KORKMAZ
DOKTORA TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ

GEBZE
2008

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROSPARK BİRİKTİRME YÖNTEMİYLE
MİKRO ALAŞIMLI ÇELİKLERİN
TUNGSTEN KARBÜR İLE KAPLANMASI

Kemal KORKMAZ
DOKTORA TEZİ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Orhan ŞAHİN

GEBZE
2008



**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 01/02/2008 tarih ve 2008 / 05 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 27/02/2008 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Kemal KORKMAZ' ın tez çalışması Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof.Dr. Orhan ŞAHİN

ÜYE

: Prof.Dr. Alexandr Vasili RIBALCO

ÜYE

: Prof.Dr. Eyüp Sabri KAYALI

ÜYE

: Prof.Dr. Arif Nihat GÜLLÜOĞLU

ÜYE

: Doç.Dr. Muhammed Hasan ASLAN

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : ELEKTROSPARK BİRİKTİRME YÖNTEMİYLE MİKRO ALAŞIMLI ÇELİKLERİN TUNGSTEN KARBÜR İLE KAPLANMASI

YAZAR ADI : Kemal KORKMAZ

Bu araştırmada, Elektrospark Biriktirme (ESD) yöntemi kullanılarak mikro alaşımlı çelik numuneler üzerinde tungsten karbür elektrotlar ile kaplama deneyleri yapılmıştır. Numuneler üzerinde daha kalın, üniform ve daha kaliteli kaplama tabakası elde etmek amacıyla ESD prosesin elektrik parametreleri incelenmiş ve prosesin daha efektif kullanılması için gerekli şartlar araştırılmıştır.

Proseste uygulanan elektrik pulse parametrelerinde bir değişiklik yapmadan işlem elektrotunun erozyonunun arttırılması için yeni bir yöntem düzenlendi. Bu maksatla geleneksel ESD prosesden farklı olarak C Plus dilinde yazılmış bir program içeren bir bilgisayar kontrollü yeni bir ESD ekipman sistemi kullanılmıştır. Bu metot bir grup içinde birbirinden farklı veya aynı elektrik parametrelerine haiz peşi sıra pulse ların veya pulse grupların uygulanması ile ESD kaplama prosesin gerçekleştirilmesi üzerine dayanmaktadır. Bu pulse ların düzeni, sayıları, enerjileri ve birbirleri arasındaki bekleme süreleri yeni ekipman sistemi sayesinde ayarlanabilmektedir. Böylece tek bir pulse grubun aksiyonu ile ESD kaplama prosesi kontrol edilebilmekte ve neticede arzu edilen bazı özelliklere sahip kaplama elde edilebilmektedir. Gruplar içinde akım şiddeti 200-500 A, süreleri 100-400 μ s ve gruplar içindeki bekleme süreleri 0-1800 μ s olan bir aralıktaki pulse ların kullanıldığı deneysel çalışmalar ile ESD prosesin parametrelerinin analizleri yapılmıştır. Bu yeni metodun kullanımı ile deneysel çalışmalarda işlem elektrotundaki erozyon miktarında % 50 ye varan bir artış sağlanabilmektedir.

Ayrıca bu çalışmada pulse formlarının kaplamanın yüzey pürüzlülüğüne ve kütle transferine etkisi de incelenmiş olup kullanılan üçgen ve dikdörtgen pulse şekilleri arasında bir mukayese yapılmıştır.

SUMMARY

THESIS TITLE : COATING MICRO ALLOYED STEELS WITH
TUNGSTEN CARBUR VIA ELECTRO SPARK
DEPOSITION METHOD

AUTHOR NAME : Kemal KORKMAZ

In this study, by using Electro Spark Deposition (ESD), experiments of coating with tungsten carbur electrodes on the micro alloyed steel samples have been carried out. In order to achieve a thicker, more uniform and more quality alloying surface, electrical parameters of ESD process have been investigated and conditions which are required to use the process more effectively have been searched.

Without any changes to the electrical pulse parameters applied in the process, a new procedure has been organized to increase the erosion of the treating electrode. With this purpose, a new ESD equipment system was used. This was different from the traditional ESD process and was including a computer controlled program in the C Plus language. This method based on alloying by application of pulse groups and the sequence of individual pulses in a group which have the same or different electrical parameters. The order of individual pulses, their number, energy and duration time between them could be chosen with the new equipment system. Thus, with a single pulse group's action, ESD coating process could be controlled and eventually a coating with some desired properties could be obtained. The experimental results and analysis of processing parameters of ESD by the employment of various electrical pulse parameters in group, amplitude of current 200-500 A and duration of pulses 100-400 μ s, and duration between pulses in groups for the range of 0-1800 μ s were performed. With the employment of this new method, up to 50 % increasing of the amount of anodic erosion in the treating electrode was achieved.

Also, in this study, effect of pulse forms on coating surface roughness and mass transferring has been investigated and triangle and rectangular pulse shapes have been compared.

TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanması esnasında değerli katkılarını ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım Mühendislik Fakültesi Dekanı, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Orhan ŞAHİN'E, Elektro-Spark Deposition konusundaki engin tecrübe ve bilgi birikimlerini paylaşan diğer danışmanım Prof. Dr. Alexandr Vasili RIBALKO' YA ve Rusça kaynakların taranmasında lisan bilgisinden faydalandığım Uzman teknisyen Ahmet NAZIM'A teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora eğitimim boyunca sürekli olarak maddi ve manevi desteğini gördüğüm GYTE Rektörü, Sayın Prof.Dr. Alinur BÜYÜKAKSOY'A en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmayı, tüm tahsil hayatım süresince bana cesaret veren, maddi ve manevi desteklerini karşılık beklemeden sunan kıymetli aileme atfederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTROSPARK BİRİKTİRME PROSESİ	4
2.1. Elektro-Spark Biriktirme Yönteminin Gelişim Süreci ve Uygulamaları:	4
2.2. Elektro-Spark Biriktirme (ESD) Yönteminin Kullanımındaki Amaçlar ve Uygulama Alanları:	7
2.3. Elektro-Spark Biriktirme (ESD) Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları:	9
2.4. Elektro-Spark Biriktirme (ESD) Yöntemi ile Kaplama:	11
3. PROBLEMİN TAYİNİ	13
3.1 Elektro-Spark Yoluyla Erozyon ve Polar Transfer Proseslerin Oluşumu Üzerinde Spark Discharge'ın Elektrik Parametreleri Etkilerinin Karakteristikleri.	13
3.1.1. Spark Kanalin Oluşumu ve Elektrotların Isınmasının Sebepleri.	15
3.1.2. Bulgular:	23
3.2. ESD Proses İçin Kullanılan Ekipmanların Gelişim Süreci:	24
3.2.1. Akım impulse larını elde etme yöntemleri;	24
3.2.2. İmpulse jeneratörlerin sınıflandırılması;	25
3.2.3. İmpulse jeneratörlerin (üreteçlerin) bazı tipik devreleri;	26
3.2.4. Bulgular:	32
3.3. ESD Teknolojisi Alanında Yeni Gelişmeler;	33
3.3.1. Bulgular:	41

3.4. Genel Bulgular:	43
3.5. Araştırmanın Amacı ve Yapılması Düşünülenler:	46
4. ARAŞTIRMANIN METOTLARI ve EKİPMANLARI	47
4.1 Spark Kanalında Spark Enerjiyi Oluşturan Prosesin	
Elektrik Parametrelerinin Araştırılması.	47
4.1.1. Discharge Devresindeki Parametrelerinin Saptanması;	54
4.2 Araştırmanın Metodolojisi	56
5. DENEYSEL UYGULAMALAR ve BULGULAR	63
5.1. Deneysel Prosedür	63
5.1.1. Kaplama Numunelerin Hazırlanması;	63
5.1.2 Numunelerin Karakterizasyonu;	63
5.2. Deneysel Teknik	64
5.3. Deneysel Sonuçlar;	68
5.3.1. Özdeş Pulse ların Kullanıldığı Pulse Gruplarının	
Uygulanması;	68
5.3.2. Pulse Enerjileri Artan Bir Şekilde Farklı Enerjili İki Pulse	
İçeren Pulse Gruplarının Uygulanması;	82
5.3.3. Uygulanan Pulse Şeklinin Yüzey Pürüzlüğüne ve Kütle	
Transferine Etkileri:	103
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR	113
ÖZGEÇMİŞ	119

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ESD	: Electro-Spark Deposition, Elektro spark biriktirme
EDM	: Electro Discharge Machining, Elektrik discharge ile şekil verme
HAZ	: Heat Affected Zone, Isıl yüklere maruz kalmış bölge
IEG	: Inter Electrode Gap, Elektrotlar arasında spark discharge ın oluştuğu boşluk
R	: Elektrik devresindeki direnç
R _{sh}	: Shunt (devreyi veya devre elamanını koruyucu) direnç
L	: Elektrik devresindeki indüktans
C	: Elektrik devresindeki kapasitans
U	: Elektrik devresindeki gerilim
I	: Elektrik devresindeki akım
Q	: Elektrik yükü
W	: Enerji
P	: Güç
T,t	: Zaman
RC	: Resistance-Capacitance içeren devre
RLC	: Resistance-Capacitance-Inductance içeren devre
CC	: iki kapasitans içeren devre
E	: Elektrotlar arasındaki elektrik alan
E _{kr}	: Elektrotlar arasında spark oluştuğu andaki elektrik alan
V _{gap}	: Elektrotlar arasındaki gerilim
L	: Elektrotlar arasındaki mesafe
α	: Isı yayılım katsayısı
λ	: Termal iletkenlik katsayısı
c	: Özgül ısı kapasitesi
ρ	: Yoğunluk
PWM	: Pulse genliği modülatörü
PFM	: Pulse frekansı modülatörü
PG	: Pulse jeneratörü
MG	: Master jeneratör
T _{1,2,3}	: 1,2 ve 3 numaralı Tristörler
EMF	: Electro Magnetic Force, İndüktans oluşturan elektromanyetik kuvvet

R_a	: Roughness, pürüzlülük değeri
ΔM	: Kütle değişim miktarı
ΔM_a	: Anottaki kütle değişim (erozyon) miktarı
ΔM_c	: Katottaki kütle değişim (transfer) miktarı
I	: İmpulse akım
I_a	: Maksimum impulse akım
U_a	: Maksimum impulse gerilim
E	: İmpulse enerji
t_p	: İmpulse süresi
t_r	: Maksimum impulse akımına ulaşma süresi
t_b	: İmpulse ın maksimum akım değerinden sıfıra düşme süresi
f	: İmpulse ların birim zaman içinde tekrarlanma sayısı
T	: İmpulse ların periyodu
T_p	: Toplam impulse süresi
T_{pause}	: İmpulse lar arası süre
q	: Rölatif pulse süresi
U_S	: Spark kanalındaki gerilim
U_R	: Devredeki aktif dirençler üzerindeki gerilim
U_W	: Kapasitörde ki charge voltajı
W_p	: Spark discharge da verilen enerji
W_C	: Kapasitörde biriken enerji
I_{shc}	: Kısa devre akımı
$A_{1,2}$	: Kısa devre anında osiloskop ta okunan akım genlikleri
T_d	: Discharge periyotunun zamanı
δ	: İmpulse dalgaının sönümleme miktarı
η	: Ekipmanın (sistemin) verimi
$t_{ps}(=0)$	: İmpulse lar arası bekleme süresi sıfır, bitişik pulse lar
$t_{ps}(=Max)$	: İmpulse lar arası bekleme süresi maksimum, 1800 μs .
$t_{ps}(=Var)$	: İmpulse lar arası bekleme süresi değişken
p.gr.2	: Özdeş iki pulse içeren pulse grubu
p.gr.4	: Özdeş dört pulse içeren pulse grubu
M_a	: Anottaki maksimum erozyon miktarı
M_c	: Katotta maksimum kütle kazanımı

H	: İndüktans birimi, Henry
J	: Enerji birimi, Joule
A	: Akım şiddeti birimi, Amper
V	: Gerilim şiddeti birimi. Volt
C	: Yük birimi, Coulomb
W	: Güç birimi, Watt
F	: Yük birimi, Farad
Hz	: Frekans birimi, Hertz
mg	: Kütle birimi, miligram
s	: Zaman birimi, saniye
μ s	: Zaman birimi, mikrosaniye
μ m	: Uzunluk birimi, mikrometre
cm	: Uzunluk birimi, santimetre

ŞEKİLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. En basit haliyle Elektro-Spark Deposition (ESD) prosesin temsili	11
2.2. ESD de kullanılan basit bir RC devresi.	12
2.3. Basit bir ESD ünitesi; titreşimli bir elektrot tutucu, osiloskop ve bir pulse jeneratörü.	12
3.1. Farklı yapıda single discharge kanalı modelleri	16
3.2. Bir CC impulse jeneratörün devresi.	26
3.3. Transformatörlü bir impulse jeneratörün (PG) devresi.	27
3.4. Tristörler vasıtasıyla charging ve discharging devreleri birbirinden bağımsız hale getirilebilen tristörlü bir impulse jeneratör devresi.	28
3.5. Yarım dalga doğrultmaçlı, üç fazlı ayırık devreli jeneratör modeli.	29
3.6. Çok çevrimli, ayırık devreli, tristörlü bir jeneratör modeli.	29
3.7. Tek faz köprü doğrultmaçlı (rectifier) impulse jeneratör modeli.	30
3.8. Transistör lü bir impulse jeneratörün basit bir devresi.	31
3.9. Başlangıç da nonlineer olan anottan erozyon olan (Δm_A) ve katoda transfer olan (Δm_K) kütle artış miktarların zamanla değişimi.	34
3.10. St35 çelik numune yüzeyinin ESD kaplama prosesiyle WC-Co(8) kaplanması sonucu elde edilen kaplamanın kesiti boyunca LineEDX analizi.	34
3.11. Artan pulse enerji ile anottan erozyon olan (Δm_A) ve katoda transfer olan (Δm_K) kütle artış miktarlarındaki değişim.	35
3.12. Yüzey pürüzlülüğünde maksimum bir değerden sonra keskin bir düşüş ESD kaplama prosesin sona erdiğinin belirtisidir.	36
3.13. Farklı pulse enerjilerinin kullanıldığı bir kaplama prosesinde her 30 sn sonra ki katot da ve anot da kütle değişimi değerleri.	37
4.1. Bir pulse akımını çevrimini tamamlayan zaman evreleri;	48
4.2. Charge ve discharge devreleri birbirinden bağımsız bir impulse jeneratör devresi ve impulse parametrelerini deneysel olarak ölçen cihazların bağlantı şeması.	49
4.3. EMF özindüksiyon sebebiyle değişen akım ve şekli bozulan pulse	50
4.4. Osillosgram üzerinde, spark kanalındaki gerilim düşmesine ait ölçülen sinyale EMF katkısının telafi edilmesi gösterilmektedir	50

- 4.5.** Osilosgram, EMF özindüksiyon değerinin belirlenmesi imkanını ve spark kanalının kapalı (kısa devre) olduğu durum için (2), ölçülen sinyalde toplam gerilim düşümünün hesaba katıldığı durum için (1) onun karakterinin değişimini göstermektedir. 51
- 4.6.** Osilosgram, akım $I(t)$ ve spark aralığındaki gerilim düşümünü $U_s(t)$ göstermektedir. 51
- 4.7.** IEG de kısa devre anında kapasitörün discharge anındaki osilosgramı. 54
- 4.8.** Bir güç transistor ünün açılıp-kapanması yoluyla pulse osilatöründen (MG) elde edilen voltaj pulse larından (a), ESD ünitenin discharge devresinde dikdörtgene yakın bir akım pulse ın (b) elde edilmesi 58
- 4.9.** Birim üçgen pulse dan başlayarak pulse parametrelerinde değişim şeması; a) basit üçgen bir pulse da pulse süresinin artımı, b) ve c) pulse sürelerinin modülasyonu ile (birim üçgen impulse ların süperpozisyonu ile pulse sürenin artımı) değişim. 59
- 4.10.** ESD proses de farklı teknolojik amaçların uygulanabilme imkanların oluşturulabilmesi açısından belli bir periyottaki (T) temel impulse grup içine ilave akım pulse veya pulse enerjilerin araya katılması metotları. 60
- 4.11.** Tüm ekipmanları ile bilgisayar kontrollü bir ESD kaplama prosesi araştırma ünitesi 61
- 4.12.** Dört yollu otomatik olarak hareket edebilen ESD kaplama ünitesi. 62
- 5.1.** İki özdeş pulse içeren pulse gruplarının içinde pulse lar aralarındaki bekleme sürelerinin sıfır ile maksimum arasındaki değişimine göre pulse gruplarının yerleşim düzenini temsil eden şematik görünüm. 65
- 5.2.** Dört özdeş pulse içeren pulse gruplarının içinde pulse lar aralarındaki bekleme sürelerinin sıfır ile maksimum arasındaki değişimine göre pulse gruplarının yerleşim düzenini temsil eden şematik görünüm. 66
- 5.3.** Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 200A ve pulse süresi $t_p=100\mu s$ dir. 73
- 5.4.** Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafiği. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 200A ve pulse süresi $t_p=100\mu s$ dir. 74
- 5.5.** Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kaplama yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafikleri. Her bir

- pulse ın parametreleri, akım şiddeti 200A ve pulse süresi $t_p=100\mu s$ dir 75
- 5.6.** Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 200A ve pulse süresi $t_p=300\mu s$ dir. 76
- 5.7.** Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafiği. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 200A ve pulse süresi $t_p=300\mu s$ dir. 77
- 5.8.** Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 400A ve pulse süresi $t_p=100\mu s$ dir. 78
- 5.9.** Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafikleri. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 400A ve pulse süresi $t_p=100\mu s$ dir. 79
- 5.10.** Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kaplama yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafikleri. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 400A ve pulse süresi $t_p=100\mu s$ dir. 80
- 5.11.** Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 400A ve pulse süresi $t_p=300\mu s$ dir. 81
- 5.12.** Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve $100\mu s$ ve ikinci pulse ın parametreleri 200A ve $200\mu s$ dir. 89
- 5.13.** Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve $100\mu s$ ve ikinci pulse ın parametreleri 200A ve $200\mu s$ dir. 90
- 5.14.** Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve $100\mu s$ ve ikinci pulse ın parametreleri 200A ve $200\mu s$ dir. 91
- 5.15.** Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler)

ve katodun kütle değişimi grafikleri. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 100µs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 200µs dir. 92

5.16. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 100µs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 200µs dir. 93

5.17. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 100µs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 200µs dir. 94

5.18. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Birinci pulse ın parametreleri 400A ve 100µs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 200µs dir. 95

5.19. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 400A ve 100µs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 200µs dir. 96

5.20. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 400A ve 100µs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 200µs dir. 97

5.21. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 300µs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 300µs dir. 98

5.22. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 300µs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 300µs dir. 99

5.23. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 300µs ve ikinci pulse ın

parametreleri 400A ve 300 μ s dir.	100
5.24. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse oluşturulan kaplamaların yüzey morfolojileri. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 100 μ s ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 200 μ s dir. Pulse lar arası bekleme süreleri a) tps=Max ve b) tps=384 μ s dir.	101
5.25. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse oluşturulan kaplamanın a) yüzey morfolojisi ve b) enine kesit görünümü. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 300 μ s ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 300 μ s dir. Pulse lar arası bekleme süresi t _{ps} =75 μ s dir.	102
5.26. ESD kaplama prosesinde uygulanan pulse formları.	103
5.27. Aynı pulse enerjisine sahip (0,018J), a) üçgen ve b) dikdörtgen pulse formlarında yapılan ESD kaplamanın yüzey morfolojisini gösteren SEM resimleri.	106
5.28. Aynı pulse enerjisine sahip (0,071J), a) üçgen ve b) dikdörtgen pulse formlarında yapılan ESD kaplamanın yüzey morfolojisini gösteren SEM resimleri.	107
5.29. Pulse parametreleri Tablo 5.3. de verilen üçgen (Tr) ve dikdörtgen (Rq) pulse formlarında yapılan ESD kaplama prosesi sonucu yüzeyde oluşan splash çaplarının pulse enerjisine göre değişimi.	108
5.30. Üçgen ve Dikdörtgen pulse formlarında ESD yöntemi ile 30 sn kaplama prosesine tabi tutulan yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin (Ra) pulse enerjisine göre değişimi.	109
5.31. Üçgen ve Dikdörtgen pulse formlarında ESD yöntemi ile 30 sn kaplama yapıldıktan sonra pulse enerjisine göre anot (içi dolu işaretler) ve katottaki kütle değişim (ΔM) miktarlarının grafiği.	110

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
5.1. ESD kaplama prosesinde uygulanan pulse ların elektrik parametreleri ve anottaki kütle kaybı (erozyon) miktarları.	83
5.2. Farklı pulse grupları ile ESD kaplama metodu sonucu elde edilen maksimum kütle değişimlerinin referans değerlerine göre artış miktarları.	88
5.3. Üçgen (T) ve Dikdörtgen (R) pulse formları.	104

1. GİRİŞ

Günümüzde kullanılan makine, cihaz ve mekanizmalara ait parçaların çalışması incelendiğinde, büyük çoğunluğunda bunların sadece yüzeylerinin genelde çalıştığını ve bu nedenle en çok bu yüzeylerin yıprandığını fark edebiliriz. Ayrıca bu yüzeylerin, amaca göre düşük veya yüksek sürtünme katsayısına sahip, makinenin çalışan bu parçasının tamamına nazaran ısıya, korozyona ve aşınmaya daha çok dayanıklı, daha sert v.s. olması gerektirdiğini görebiliriz.

Bu şartların yerine getirilmesi, diğer bir deyişle bu yüzeylere söz konusu yeni fiziksel ve kimyasal özelliklerin kazandırılması amacıyla bazen oldukça zor olan ve çok değişik teknolojik prosesler kullanılmaktadır. Bunların içinde, birbirlerinden bağımsız olduğu gibi birkaçı ile birlikte komplike olarak da kullanılabilen mekanik, kimyasal, elektrokimyasal, termal, radyasyon v.s. birçok farklı yöntemler bulunmaktadır. Söz konusu böyle herhangi bir prosesin uygulanması sonucunda esas malzemenin yüzeyi (altlık), farklı özelliklere sahip başka bir malzemeyle bir kat (veya ihtiyaca göre birkaç kat) kaplanır. Neticede başka bir malzeme (yeni yüzey) direk olarak çalışırken, parçanın yani esas malzemenin ana yüzeyinin kendi kimyasal ve fiziksel özellikleri ise önemli ölçüde değişikliğe uğramamaktadır. Aksi takdirde söz konusu etkilerin sonucunda esas parçanın (malzemenin) ana yapısında belirli bazı fiziksel ve kimyasal yapı değişiklikleri meydana gelirdi.

İstenilen düzeyde fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip makine parçaların çalışan yüzeylerinin elde edilmesi oldukça zor bir konu olup bu yüzeylerin parametrelerine uygulanan taleplerde (istenen özelliklerde) gün geçtikçe artmaktadır. Ayrıca, bu koşulların tamamının karşılanması için ortak bir yüzey işleme prosesi de bulunmamaktadır. Bu nedenle her geçen gün orijinal yeni yüzey kaplama veya alıştırma prosesleri devamlı olarak ortaya çıkmaktadır. Elektrik-spark alıştırma (depozisyon), yani esas malzemenin işlem gören yüzeyine üzerine başka bir tür malzemenin elektro-spark discharge yoluyla aktarılması prosesi de bu yöntemlerden biridir.

Elektro-spark alaşım (depozisyon) prosesinde; alaşımı sağlayan malzeme (anot malzemesi), alaşımlanan yzeyin (katot yzeyin) üzerinde yzey ile çok sağlam bir şekilde tutunan bir kaplama tabakası oluşturmaktadır. Bu durumda alaşımlama sonucu hem kaplama malzemesiyle ana malzeme arasında belirgin bir ayırıcı sınır oluşmaz ve hemde anot malzemenin esas malzemeye karışımı gerçekleşir.

Bu depozisyon prosesi, anot malzemesinin esas malzeme yzeyinin üzerinde sadece bir kaplama tabakası oluşturmayıp bu yzeye kendi yapısal elemanlarıyla karışımı sonucu onu zenginleştirir (alaşımlar).

Kaplamanın kimyasal kompozisyonun analizi göstermektedir ki tabakanın en st kısmın yzeyinde depose edilen anot malzemenin miktarı % 100 e yakın olmasına rağmen ana malzemeden de (katot) az bir miktar vardır. Kaplama tabakası içinde kaplama kalınlığı boyunca anot malzemenin yzdesi sıfıra inmekte ve bu küçük bir eğimle gerçekleşmektedir.

Proses sadece alaşımlama yapılmak istenen belirli yerlerde (0,1 mm ve üzeri kadar çaptaki bir bölgede), parçanın kalan yzey kısmını korumaya gerek kalmaksızın uygulanabilir. Prosesin tamamı mikro hacimde ve hızla gerçekleşmekte bu yzden deposit edilen yzeyde (altlık malzeme) ısı birikimi gerçekleşmez. Çünkü ESD da her bir spark çok küçük bir zamanda oluştuğu için ergimiş duruma gelmiş anot altlık olan ana malzemeyi ısıdırmaz. Isıya maruz kalınca karakteristikleri değişebilen malzemelerin kaplanması için bu yöntem daha uygundur.

ESD yönteminde kaplanacak yzeye özel hazırlık gerektirmez, sadece eğer varsa yzey yağının temizlenmesi gerekebilir.

ESD için elektrik iletkenliği olan her metal, alaşım ve kompozisyon (içinde karbid, boron, bazı silikon içerenler) için kaplama yapmak mümkündür.

Elektro-spark alaşım (depozisyon) yönteminin teknoloјisi çok basit olup, bunun için gereken cihazlar ise küçük boyutlu, ağır olmayan yani bir insan için taşınabilir özelliktedir. ESD prosesinin pratikliği, ekipmanın oldukça düşük maliyette cihazlar ile kurulabilmesi, bu yöntemin endüstride kolayca geniş bir alanda kullanılmasına

olanak sağlamıştır. Ayrıca ESD prosesin teknolojisi ve teçhizatı konusunda ortaya koyulan problemlerin analizi bu teknolojinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesinde yeni perspektifler olduğunu göstermiştir.

Bu proses ortaya çıktığı günden beri, yukarıda sıraladığımız bazı özelliklerinden dolayı bilim adamlarının dikkatini çekmiş ve daha da geliştirilmesi için birçok çalışma yapılmıştır.

Fakat tüm bu üstünlüklere rağmen metal yüzeylerin elektro-spark alayım (depozisyon) prosesi, yıllarca sadece değişik aletlerin çalışan yüzeylerinin sağlamlaştırılmasında ve tamir-yenileme çalışmalarında kullanılmıştır. Bunun nedeni, alayım prosesinin yeterince araştırılmamış olması ve bu yöntemin makineleştirilmesi (otomatikleştirilmesi) konusunun çoğu zaman olumsuz biçimde sonuçlanması olmuştur. Günümüzde söz konusu sorunlar bilgisayar çağımızın olanakları sayesinde olumlu çözümlere kavuşmaya başladığından, yöntemin kullanım alanları da genişlemiştir. Çalışan yüzeyleri elektro-spark alayım yöntemle kaplanan makine ve cihaz parçaları, gün geçtikçe daha fazla sayıda ortaya çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında, yukarıda bahsedilen sorun üzerinde çözümlerin araştırılması için ESD yönteminin öncelikle genel çizgilerle teorik temelleri ve pratik olarak kullanım alanları, gereken verilerin nasıl seçimi yapılabileceği ve prosesin daha da geliştirilmesi üzerinde yeni teoriler uygulamaları ile birlikte sunulacaktır.

2.ELEKTRO-SPARK BİRİKTİRME PROSESİ

2.1. Elektro-Spark Biriktirme Yönteminin Gelişim

Süreci ve Uygulamaları:

Eski Yunanlı filozofların sürtünmeyle oluşan elektrik yükünün discharge esnasında ortaya çıkan kıvılcımları gözlemlediklerinden beri elektrik-spark olayı bilinmekteydi. Genellikle “elektro-spark” teriminin kullanımı, bitişik denecek kadar birbirine yakın cisimler arasındaki potansiyel farkın kritik bir değeri aştığı zaman elektrik discharge’ın meydana gelmesi anlamına gelmektedir ve elektro-spark’ı basitçe çok kısa süreli bir mikro-ark olayı olarak da düşünebiliriz.

Elektirik discharge’ların yol açtığı elektro-spark’ın metaller üzerinde bir eroziv etkisinin olduğu, ilk defa 1768 yılında İngiliz bilim adamı Joseph Priestley tarafından yapılan elektrik discharge lar üzerindeki deneyler sonucunda fark edildi [Priestley, 1775]. Fakat elektrik discharge esnasında oluşan bu elektro-spark’ların metalik malzemelerin yüzey karakteristiklerine iyi yönde bir katkıda bulunabileceğini ilk kez 1924 yılında H.S.Rawdon tarafından rapor edildi. Rawdon demir bir blok yüzeyi ile yine demirden yapılmış ince bir kalem boyutlarındaki bir elektrot arasında yüksek bir gerilim uygulamış ve meydana gelen elektrik boşalmasıyla spark (spark discharge) lar sonucu demir blok üzerinde olduğundan çok daha sert yeni bir yüzeyin oluştuğunu keşfetmiştir. Rawdon demir blok yüzeyindeki sertliğin artışı, elektirik spark lar neticesinde aşırı ısınmış ve kaynama noktasına gelmiş bu yeni demir yüzeyin çok ani bir şekilde soğumasının neticesinde demirin yapısında martenzit bir dönüşümün gerçekleşmesinden dolayı olduğu şeklinde yorumlamıştır [Rawdon, 1924].

1957 yılında da N.C.Welsh, çelik yüzeyler üzerinde sürtünme ile oluşan ısınmanın yüzeyler üzerindeki etkilerini incelemek isterken Rawdon’un daha önce gözlemlediği aynı olayla karşılaşmıştır. Welsh sürtünme sonucu oluşan ısıl etkiyi simule etmek için elektirik- spark’ların termal etkisinden faydalanmıştır. Welsh daha sonraki çalışmalarında da elektro-sparkın, nitrojen veya karbon gibi elementlerin

kolayca absorbe edilebildiği atmosfer veya yağlayıcıların bulunduğu farklı ortamlarda gerçekleştirilmesi durumunda yüzey sertliğinde kayda değer bir biçimde artış meydana geldiğini göstermiştir. Örneğin yağ içinde titanyum yüzeyler üzerinde elektro-spark oluşturulması neticesinde, TiC konsantrasyonu yüksek yüzeyler meydana gelmiş ve bunun sonucunda aşınmaya karşı zayıf direnci olan bir malzeme daha sert, düşük sürtünmeli ve yüzeyi daha dayanıklı bir malzeme haline dönüşmüştür [Welsh, 1957; 1958]. Welsh ve Watts başka çalışmalarında da aynı metot ile çelik yüzeylerin WC veya TiC elektrotlar kullanılarak kaplanabileceğini ve bu şekilde elde edilen sertleşmiş çelik yüzeyin, karbürleme gibi diğer bazı yöntemlerle elde edilen çeliklere göre ya da Co veya Ni-Cr-B esaslı çeliklere göre 6 ila 30 kat arasında daha yüksek bir aşınma direncine sahip olabileceğini göstermişlerdir [Welsh, 1959–1962].

Batıda yukarıda bahsedildiği üzere elektro-spark konusunda çalışmalar genelde yüzey sertleştirme prosesi olarak uygulanırken, gerçek manada yani elektro-spark deposition ile kaplama prosesi olarak kullanılması ilk defa Rusya da gerçekleşmiştir. 1943 yılında Lazarenko ve meslektaşları elektro-spark yöntemi ile ilk kez metal aparatların işlenmesi proseslerini ve metal yüzeylerin bir deposit tabakası ile kaplanması çalışmalarını yapmışlar ve böylece elektro-spark tekniğinin temellerini oluşturmuşlardır. Son dünya savaşı sırasında ve sonrasında Rusya da elektro-spark kaplama prosesi konusunda kayda değer birçok ilerleme olmuş, kalıp ve çalışan makine parçalarının sertleştirilmesi, aşınmaya maruz kalan metal işleme parçalarının (torna takımları, matkap uçları, freze bıçakları, kam milleri gibi) ömrünün uzatılması v.s. gibi konularda olumlu sonuçlar elde edilmiştir [Lazarenko's, 1944; 1964].

Bu prosesin sahip olduğu çeşitli avantajları sebebi ile pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılabileceği fark edilmiş ve metodun geliştirilmesi için günümüze kadar pek çok çalışma yapılmıştır. Bunların neticesinde bu kaplama tekniğinin uygulamaları karşımıza çok geniş bir yelpazede çıkmaktadır.

Nükleer enerji veya kömür gibi fosil yakıtların kullanıldığı enerji santrallerinde, yüksek sıcaklıklarda kompleks gaz karışımı (O_2 , S_2 , H_2S , Cl , HCl gibi) veya sıvı sodyum gibi ortamlarda korozyona ve erozyona maruz kalan komponentlerin metalik (çoğunlukla çelik) yüzeyleri üzerine ESD ile CrC gibi

seramik veya Fe-Al gibi alaşımlar (Cr, B, Nb, C, Mo, Zr içeren) kaplanmak suretiyle komponentlerin hizmet süreleri uzatılmıştır [Natesan, 1987–1997; Johnson, 1974–1984].

Endüstrinin hemen hemen her sahasında çok yaygın bir şekilde kullanılan çeliğin korozyona karşı korunması dışında kullanıldığı yere göre mevcut mekanik özelliklerini daha da geliştirmek veya başka özellikler kazandırmak için çelik üzerine ESD yoluyla kaplamalar yapılmış ve bunlar bazı testlere tabi tutulmuştur. Bu amaçla 316 paslanmaz çelik üstüne kaplanmak üzere WC, CrC gibi çok sert, Co içeren orta sertlikteki alaşımlar veya Ag gibi yumuşak metaller içeren farklı elektrot malzemeler seçilmiştir. Bu elektrotlar ile paslanmaz çelik numuneler üzerine yapılan kaplamalar şiddetli aşınma ve burulma testlerine maruz bırakılmış, paslanmaz çelik numunelerin aşınma ve burulma mukavemet değerleri üzerinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir [Sheldon, 1995].

AISI 1020 ve 1018 karbon çelik numuneler üzerinde ESD ile TiB₂ kaplanarak ultra sert yüzeyler elde edilmiştir [Agarwal,1998; 1999]. HSS takım çelikler üzerinde yapılan kaplamalarda da takım çeliklerin ömrü % 2000 arttırılmıştır [Brown, 1990]. AISI 304 paslanmaz çelik üzerine ESD ile Cr₇C₃ gibi seramik tabaka veya Fe bazlı amorf alaşım (Fe, Cr, Mo, Cd, C, B) elektrot kullanılarak 1542 Hv sertlikte kaplama elde edilmiştir [Frangini,2002; Liu,2007].

Düşük karbonlu çelik ve saf titanyum altlıklar üzerine WC-bazlı (Co, Mo, Ta v.s.) sert alaşımlar ESD yöntemiyle kaplanarak çelik ve saf titanyum üzerinde sırasıyla 4,3 ve 1,4 kat aşınmaya karşı dirençli bir kaplama oluşturulmuştur [Parkansky, 1993; 1998].

Çelik dışında endüstride çok yaygın bir şekilde kullanılan Ti6Al4V alaşımına da daha yeni özellikler kazandırmak amacıyla saf Ni elektrot kullanılarak ESD ile kaplama prosesinde çatlaksız, üniform ve metalurjik bağlı Ni-Ti alaşım bir deposit tabaka elde edilmiştir [Sheldon, 1988].

Son yıllarda ESD proses yoluyla yapılan kaplamalarda, elde edilen yeni özellikleri maksimum derecede arttırmak için daha değişik elektrot çiftleri

kullanılması metodu dışında proses esnasında verimi arttırmak için kullanılan ekipman ve proses üzerinde de çalışmalar yapılmıştır. Eski pulse jeneratörlerinde kullanılan R-C devrelerin yerine yarı iletken teknolojisinden faydalanılarak üretilen transistör lü devrelerin bilgisayar kontrollü ESD kaplama sistemlerin kullanılması ile proses daha hızlı ve daha verimli hale getirilmeye çalışılmış mevcut kaplama kalınlıkları 3 ila 4 kat arasında arttırılmıştır [He,2002; Wang,1997; Staia,2001].

Bu metodun gelecek içinde artan ihtiyaçlara paralel olarak teknolojisinin gelişmeye açık olduğu aşikâr olup bu tez çalışmasının amacı da bu gelişmeye katkıda bulunabilmektir.

2.2. Elektro-Spark Biriktirme (ESD) Yönteminin Kullanımındaki Amaçlar ve Uygulama Alanları:

Kaplama teknolojisi, bir makinenin veya teçhizatın çalışan bir komponentinin sadece yüzeyinde bir takım özellikleri değiştirmekle onun çalışma koşullarına bütünüyle uyum ve tepkisini geliştirmeyi amaçlayan geniş bir aralıktaki bir takım metotları kapsamaktadır. Aşağıdaki gibi ESD bir kaplama prosesinden de beklenen özellikler bir veya birkaç spesifik amaçları içerebilir;

- Bakım maliyetlerini azaltmak
- Yüksek çalışma sıcaklıklarında termal yükleri azaltmak
- Aşınma, erozyon ve aşındırma direncini geliştirmek
- Korozyon direncini arttırmak
- Oksitlenmeyi azaltmak veya engel olmak
- Sıcak korozyonu ya da sülfidasyonu azaltmak veya engel olmak
- Aşındırabilme ve boyutsal restorasyon için

ESD proses ile yapılan oldukça sert kaplamalar, aşınmaya dayanıklı yüzeylerde, yüksek sıcaklıklarda, oksitlenmeye ve korozyona maruz koşullar altında çalışan büyük komponentler de uygulandığı gibi belli başlı küçük komponentlerin (mil yatakları, torna ve matkap aynaları, pompalar, shaft tertibatında, araç-gereçlerde, kalıp ve lokmalarda, valf yatakları, blade (kanatçık), dişliler, enjektör

uçları gibi vs) dayanıklılığını arttırmak ve onların yüzeylerini korumak için kullanılmaktadır. Bunlara ilaveten ayrıca bu proses döküm kalıpcılığında olduğu gibi girintili çıkıntılı küçük yüzeylerdeki hataların giderilmesi için yada mevcut komponentlerin küçük tamir ve onarımlarında da kullanılmaktadır.

Aşağıdaki ana başlıklar altında bu uygulamaların kullanıldığı sahalar görülmektedir [Johnson,1986-2002; Reynolds,2003; Maksimov,1988];

- Nükleer, fosil ve jeotermal enerji ortamlarda
- Havacılık ve uzay uygulamaları için yüksek sıcaklık komponentlerinde
- Buhar ve gaz türbin kanatçıkları kaplamalarında
- Endüstriyel kesici takımlarında
- Metal işleme ve El aletlerinde
- Gemi inşası ve komponentlerinde
- Tıp ve dişçilik de cerrahi ve muayene aletlerinde
- Çok büyük boyutlardaki tarım ve tekstil ekipmanların aşınmaya dirençli yüzeylerinde
- Metal kesme makaslarında
- Ormancılıkta; tomruk, ağaç ve kağıt ürünleri işleme aletlerinde
- Atıkların geri kazanımı ve su arıtma santrallerinde
- Yüksek sıcaklık sensörlerinde
- Petrokimya ve ilaç endüstrisinde kullanılan sistemlerde
- Modern spor ekipmanların da
- Kalıp dökümcülüğünde vs.

Kalıp dökümcülüğündeki örnek olarak belli başlı uygulamaları;

- Kalıplardaki ısıl çatlakların engellenmesi ve onarımında
- Çizik ve çentiklerin önüne geçilmesinde ve onarımında
- Kaynak altı, iğne delikleri (pinholes) ve küçük çatlaklar gibi kaynak hatalarının onarımında
- Plastik ve lastik (kauçuk) üretimi için kullanılan döküm kalıplarında üretim esnasında oluşan çapakların önüne geçmek için kalıp perde hatlarının onarımında

- Kalıp kanallarındaki oyukların ve izlerin onarımında, aşınmaların engellenmesinde
- Kalıp kanallarındaki değişikliklerde ve modifikasyonlarda
- Kalıplar üzerindeki kavite (kovuk) artıklarını önlemede
- Kalıplarda kayma deformasyonu (slide-shear) sonucu oluşan bölgelerin onarımı ve tamirinde kullanılması,

şeklinde genel hatları ile sıralanabilir.

2.3. Elektro-Spark Biriktirme (ESD) Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları:

ESD prosesin bir kaplama tekniği olarak yukarıda bahsedilen birçok alanda yaygın bir şekilde kullanılması, bu prosesin diğer bazı yüzey modifikasyon yöntemlerine göre aşağıda da sıralandığı gibi belli başlı bazı avantajlara sahip olmasından kaynaklanmaktadır [Johnson,1986–2002; Reynolds,2003];

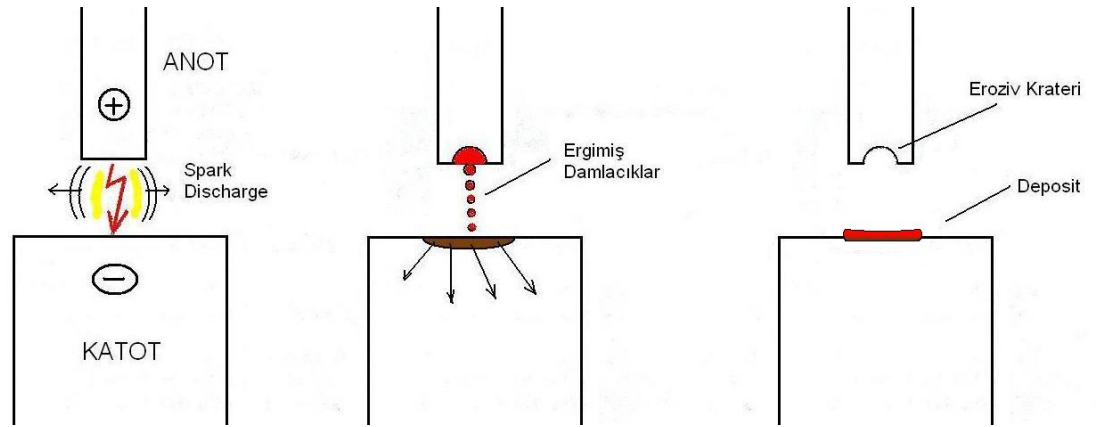
- Bir mikro-ark kaynak metodu olmasına rağmen, her bir spark da ki enerji çok küçük olup başka bir deyişle transfer edilen enerjinin düşük olması, altlık malzeme içinde biriken ısıyı düşük tutar böylece altlık ortam sıcaklığı civarında kalır.
- Isıya maruz kalmış bölge (HAZ, Heat Affected Zone) çok küçük bir bölge olup yalnızca birkaç mm derinliğe kadardır (komponentin bir bütünü göz önüne alınırsa çok küçük bir ısınmış bölge söz konusudur).
- Kaplama altlığın bulk özelliklerini değiştirmez, altlıktaki bozunumlar ve metalürjik değişimler minimum düzeyde kalır.
- Bazı alaşımlar amorf yapıda olabilirken, yüksek hızlı soğumadan dolayı nano yapılar meydana gelebilmektedir.
- Bu kaplamalar benzer kimyadaki bazı kaplamalar ile mukayese edildiğinde yüksek yapışma mukavemetli birbiri ile kaynaşmış metalürjik bağ, geleneksel kaplamalara göre çok daha iyi nitelikte aşınma ve erozyon özellikleri göstermektedir.

- Altlık ile elektrot malzeme arasında bir alaşım oluşturulmakta ve byylece ara yüzey de ıslatmayı sağlamak için ayrıca bir ara tabakaya gerek duyulmaz.
- Kaplamalar çeşitli kalınlıkta ve kompozisyonda oluşturulabilir. Öyle ki bu prosesin alaşımları çok yaygındır (kobalt-krom bazlı ve haynes alloys), ayrıca WC-TaC-Co gibi kompozitler içinde bu metod kullanılabilir.
- Metal ve / veya sermet kaplamaların elektro spark deposisyonu, minimum düzeyde yüzey ön hazırlık gerektirmekte ve metal yüzeyle direkt tatbik edilebilmektedir.
- Herhangi bir elektriksel iletken malzeme bir metalik altlık üzerine depose (biriktirme) edilebilmektedir.
- Bu sistem portatif olup, tüm ekipmanın kurulması düşük bir maliyet gerektirmekte ve bakımı kolayca yapılabilir, ayrıca istenen yere taşınabilmekte ve kolayca kurulmasına olanak sağlamaktadır.
- Zararlı atık sular ve maddeler v.s yok
- Kullanıcıyı koruyucu ekipmana gerek yok
- Bu proses çok basit olup, kullanıcı, yüzey mühendisinin kendi el becerisini kullanarak en uygun uygulamaları geliştirmesine olanak sağlayacak şekilde bir hüner ve düşük maliyet gerektirir.

Diğer kaynak metotlarında olduğu gibi, ESD kaplama malzemesi ergimeden sonra hızla katılaşır ve bu nedenle daima kalıcı i gerilmeleri oluşur. Bunun bir sonucu olarak ESD kaplamalar sıklıkla çatlar ve genellikle yorulmaya maruz kalan kritik komponentler için çok uygun değildirler. rnek olarak yorulmaya karşı hassas olan trbın motor parçalarının onarımında kullanılmazlar. Bunların yanında spark kaynağı alev alabilen ortamlarda kullanılmamalı ve atık gazlar fark edilmez olduğunda (kadmiyum kullanılıyorsa) zel kontrol tedbirleri gerektirir. Ayrıca elektrot boyutunun küçük ve deposite hızının düşük olması sebebi ile büyük kaplama alanları için uygun değildir fakat küçük yüzeyler ve hatta girintili- çıkıntılı geometrilerde çok iyidir.

2.4. Elektro-Spark Biriktirme (ESD) Yöntemi ile Kaplama:

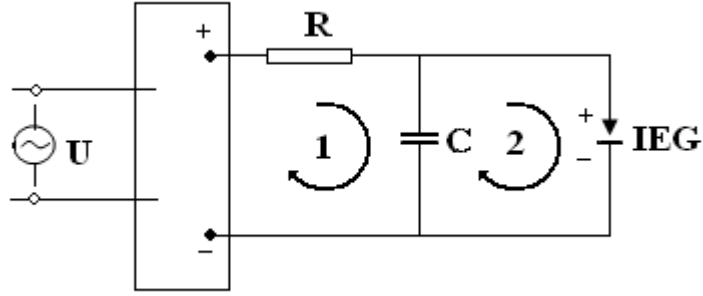
ESD prosesi kısaca metal yüzeylerin fiziko-kimyasal karakteristiklerini modifiye etmek amacıyla dielektrik bir ortam (gaz, atmosfer v.s.) içinde birbirlerine periyodik olarak temas ettirilen bir elektrot (anot) ve altlık (katod) çifti arasında RC esaslı bir elektrik devresinin yardımıyla bir dizi kısa süreli (anlık) yüksek akımlı pulse ların meydana getirilmesi ile oluşturulan elektro-sparklar neticesinde küçük elektrot parçacıklarının ergimiş (hatta yarı buhar) damlacıklar halde altlık malzemeye transferiyle deposit edildiği bir kaplama yöntemidir.



Şekil 2.1. En basit haliyle Elektro-Spark Deposition (ESD) prosesin temsili.

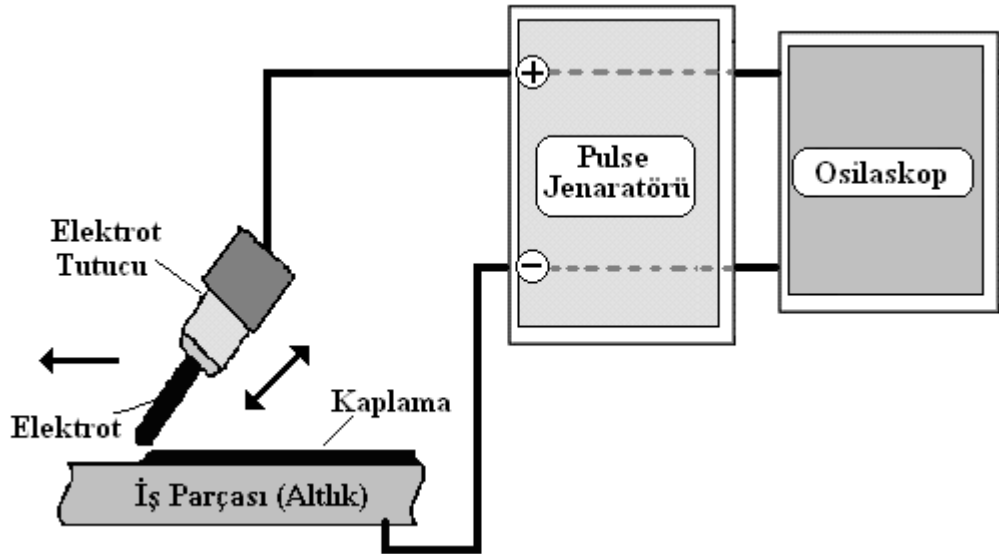
Her bir yüksek akımlı elektrik pulse ın IEG de discharge'ı esnasında spark adını verdiğimiz çok kısa süreli bir mikro-ark oluşur. Her spark ın oluşmasından sonra ergimiş hale gelmiş çok küçük bir elektrot parçası elektrottan ayrılarak altlık yüzeyi üzerine ulaşır ve onun üzerinde katılaşarak birikir (Şekil2.1.).

Kısa süreli yüksek akımlı pulse ları oluşturmak için, öncelikle gerekli elektrik yükünün depolanması amacıyla yüksek sığalı kapasitans ın oluşturduğu bir charging devresi (1) ve bu yükün elektrot ile altlık arasındaki boşlukta (Inter Electrode Gap, IEG) discharge olması için bir discharge devresi (2) gerekir. Şekil 2.2. de charge ve discharge devrelerinin oluşturduğu RC (Resistance-Capacitance) esaslı basit bir ESD prosesi devresi görülmektedir.



Şekil 2.2. ESD de kullanılan basit bir RC devresi

Tekrarlı bir şekilde charging - discharging ve dolayısıyla spark olayının gerçekleştirilebilmesi için elektrot ile altlık arasında kontrollü bir şekilde temasın sağlanması gerekir. Bunun için Şekil 2.3. de görüldüğü gibi elektrik pulse ların şiddetini, uygulanma süresini ve frekansını ayarlayan bir pulse jeneratörüne, bir osilaskopa ve ayrıca teması belli bir frekansta gerçekleştirmeye yarayan titreşimli bir elektrot tutucuya (elektrot holder, applicator) ihtiyaç vardır.



Şekil 2.3. Basit bir ESD ünitesi; titreşimli bir elektrot tutucu, osiloskop ve bir pulse jeneratörü.

3. PROBLEMİN TAYİNİ

3.1 Elektro-Spark Yoluyla Erozyon ve Polar Transfer Proseslerin Oluşumu Üzerinde Spark Discharge'ın Elektrik Parametreleri Etkilerinin Karakteristikleri.

ESD ve EDM (Electro Discharge Machining) proseslerin temeli, metal yüzeylerin bir dielektrik ortam içinde anot ve katot elektrotlar arasında oluşturulan bir spark discharge neticesinde meydana gelen elektrik erozyonu ve bu erozyon sonucu oluşan eroziv kütlenin anottan katod altlık yüzeyine transferine (malzeme transferi) yani polar transferi olayına dayanır [Lazarenko's, 1951; 1976].

Eşit şartlar altında olmak kaydı ile elektrik erozyonun yönü (+, -; kutuplar) ve miktarı aşağıdaki maddeler ışığı altında belirlenir [Lazarenko's, 1958];

- Elektrot malzemelerin kimyasal kompozisyonu ile
- Elektrotların bulunduğu ortamın hali (gaz, sıvı, vakum) ve ortamın kimyası ile
- Elektrotların bağlı olduğu devrenin elektrik parametreleriyle.

Atmosfer ortam içinde ESD proses de erozyonun esas değeri (miktarı) elektrot malzemelerin kimyasal kompozisyonu ve spark kanalında oluşturulan (salıverilen) enerjinin parametrelerine bağlı olacaktır. Açıkça ESD prosesin teknolojik göstergeleri de bu faktörlere bağlıdır. Aynı elektrot çifti için ESD prosesini sadece impulse ın temel elektrik parametreleri belirler.

Genel halde elektrotların erozyonu, birbirlerine bağlı bir seri transient prosesin (safha) sonucu olarak belirlenir;

- Elektromanyetik transient proses; discharge devresi içinde bir pulse lı akımın oluşturulduğu periyot, safhadır.

- Plazma transient proses; bir kanal içinde spark discharge'ın oluşturduğu plazma safhadır.
- Termal transient proses; discharge devresinin elektrotları üzerinde (içinde) akım impulse ları ve plazma tarafından oluşturulan ısı safhasıdır.

Elektromanyetik transient prosesi, impulse ların elektrik parametrelerinin zaman içinde nasıl geliştiği belirler. Bu elektrik parametreleri; akımın büyüklüğü (şiddeti) ve onun pik değerine ulaşma hızı (akımın artma hızı), pulse'ın oluşum şekli ve onun süresi (pulse duration) ve bu impulse ın enerji miktarı ile karakterize edilir. Bu parametreler transformatör güç kaynağının voltajı ve spark kanalında oluşan dirençte dâhil olmak üzere tüm devrenin direnci ve ündüktansı ile belirlenir (R,L,C). Elektrotların malzemesi elektromanyetik geçiş prosesin temel performansına kayda değer bir etki yapmaz [Namatkov,1978].

Plazma transient proses spark kanalındaki silindirik plazmanın eleman ter (kısmi) safhalarının zaman içindeki gelişimi, gaz dinamiği parametreleri ve ayrıca elektrotlar ile plazma koridoru arasındaki arayüzeylerinin zaman içindeki değişimi ile karakterize edilir. Her iki ara yüzeyde gerçekleşen prosesin bu safhası elektrotların yüzeyinden içeri giren ısının doğasını (karakterini) belirler. Birkaç yüz amper şiddetindeki bir impulse discharge ın oluşturduğu bir plazmanın spark sona erdikten sonra sönümlenme (bitme) zamanı yaklaşık 10^{-8} - 10^{-7} sn de gerçekleşir [Namatkov,1978]. Diğer bir deyişle pratik olarak bu zaman elektromanyetik safhanın sona erme zamanı ile çakışmakta (örtüşmekte) dir. Elektrotlar arasındaki boşluğun (IEG) çok küçük olduğu durumlarda, elektrotların malzemesinin plazmanın bitme (sönümlenme) hızı üzerinden prosese çok güçlü bir etkisi vardır. Mesela yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerdeki plazma safhası Cu gibi malzemelerde olduğundan daha uzun süreli gerçekleşmektedir.

Termal transient proses, elektrot yüzeylerinin spark kanalındaki plazmayla teması ile yüzeylerdeki ısının zaman içinde değişimi, ve buna bağlı olarak bu yüzeylerdeki malzeme fazının değişim dinamiği (buhar, sıvı, katı; üç faz halin nasıl değiştiği), farklı dinamik hallerde farklı erozyon şiddeti, anot ve katottan çıkan erozyon demetlerinin ortada karşılaşp birbirleriyle etkileşimi (malzemenin % 30'u burada saçılır), anottan katoda transfer olan kütleinin miktarı ve transfer olan bu

kütlenin katot üzerinde birikip katılaşmasının şartları (yüksek ısı birikimi yavaş katılaşmaya, az ısı birikimi hızlı katılaşmaya yol açar) gibi hususlar ile karakterize edilir. Kütle enjeksiyonun da 10^{-6} sn de başladığı tespit edilmiştir [Nमितokov,1978]. Anot un katottan daha fazla ısınması neticesinde anottan ergimiş haldeki damlacık katodun yüzeyine transfer olur ve bu yarı buhar halindeki damlacık katodun yüzeyine çok yakın bölgelerde ısı transferi alanları yaratır. Bu ısı kısmen yüzeye önce buhar, sonra ergimiş sıvı halde taşınır ve daha sonra yüzeyden içeriye katodun katı bölgelerine yayılır.

ESD kaplama prosesin uygulanabilirliğinin bu üç transient prosesin bazı parametreleri ile ilişkili olduğu aşıkardır. Bu üç safhanın her biri diğerine (plazma proses elektromanyetik prosese, termal proses plazma prosese) bağlıdır ve birbirleri ile etkileşimi muhakkak anodik erozyonu, anottan katoda kütle transferini (polar transfer) ve kaplamanın fiziko-mekanik özelliklerini etkileyecektir. Dolayısıyla ESD kaplamanın kalınlık, pürüzlülük, kütle transferi v.s. gibi özelliklerinde etkileri olması muhtemeldir.

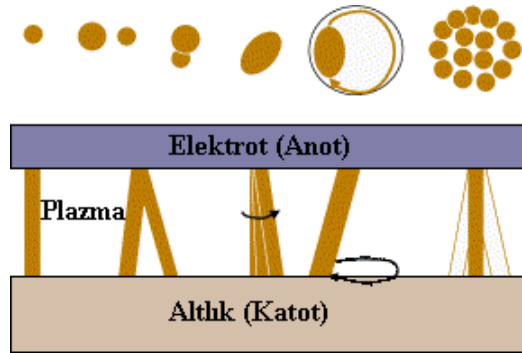
Elektrotlar arası mesafenin (IEG) çok küçük ve düşük voltajlı bir discharge oluşumu durumunda, plazma elektrotlar arasında çok dar bir bölgede oluşacağından plazmanın serbest şekil alma ve hareket etme imkanı yoktur. Bu koşullarda bu prosesin gelişiminde ESD yönteminin kendine özgü özellikler göstermesi muhtemeldir. Bu bağlamda bir spark discharge ve onun neticesi olan eroziv bir prosesin gelişimi hakkındaki fiziksel kurallardan yola çıkarak prosesin geliştirilmesi hakkındaki bazı noktalara açıklık getirmeyi mümkün kılmaya çalışabiliriz.

3.1.1. Spark Kanalın Oluşumu ve Elektrotların Isınmasının Sebepleri.

Spark discharge kanalının kendi oluşumunun şartlarına bağlı olarak gelişiminin iki farklı mekanizması vardır [Nमितokov,1978]. Bunlardan ilki elektrotların temas ettiği durum, ikincisi elektrotlar arası mesafenin 10^{-4} - 10^{-6} cm kadar çok yakın olduğu durum. Bir discharge başlangıcı olan ve sparkın uyarılmasına (tetiklenmesine) neden olabilen temas mekanizması, bir patlamanın sonucu şeklinde elektrotların

yüzeylerindeki temas noktalarında erime ve buharlaşmaya yol açar. Elektrotlar arası mesafe çok çok yakın olduğu durumda, sparkın oluşması yüksek yoğunluklu elektron emisyonu ve elektrotlar arasında yüksek sıcaklıktaki elektrot malzemesinin buhar halinde olması sonucu gerçekleşir. Elektrik akımının ilk geçişi elektrotların buhar halindeki kısmından gerçekleşir (35 kV/cm^2 gibi bir gerilim alanında elektron emisyonu başlar. Elektrotlar arasında elektron ve iyon transportu sonucunda ergime, buharlaşma ve patlama gözlemlenir).

Araştırmacıların çoğu bir plazma discharge ın yapısında tek (single) kanallı oluşum modelini benimserler ki bizde çalışmamızda bu modeli temel aldık. Verilen enerjinin miktarına göre discharge kanalının çapı genişler ve bu stasyoner hal (statik hal) için gerekli transient şartlarını belirler. Bununla birlikte çok kanallı modeli kabul eden çalışmalar da vardır [Nekrashevich, 1960].



Şekil 3.1. Farklı yapıda single discharge kanalı modelleri [Rehbein, 2004].

Discharge'ın sınıflandırılması; elektrosark discharge teriminin tam anlaşılması ve doğru kullanılabilmesi için aşağıdaki sınıflandırmadan bahsetmek gerek [Nemitokov,1978].

“**Spark discharge**”, 10^{-7} - 10^{-8} sn gibi çok küçük pulse süresi (duration time), 10^6 - 10^8 A/cm^2 gibi yüksek akım yoğunluğu ve discharge kanalındaki yaklaşık 10^4 - $10^5 \text{ } ^\circ\text{K}$ ne yakın yüksek elektron sıcaklığı ile karakterize edilir. Sıcaklık plazmanın başlıca parametresidir (çünkü iyonizasyon derecesini belirler). Ortamdaki gazın türü, basınç v.s aynı olduğu şartlarda sıcaklığı belirleyen ana faktör akımın büyüklüğü, şiddetidir. Spark discharge ın gelişiminde meydana gelen enerji (elektrik alan) başlıca i) plazmanın iç enerjisinin değişimine (iyonizasyon, parçacıkların kinetik

enerjisinin artması v.s.), ii) gaz dinamiklerine (kanalın genişlemesi, gaz kütlesinin karışımı v.s.) ve iii) anottan katoda kütle transferi için harcanır [Rowenskii,1977]. Bir spark discharge ın meydana gelmesi 10^{-6} sn den daha kısa bir zamanda gerçekleştiği için, bu zaman içindeki plazma kanalın genişlemesi milimetrenin onda biri hatta daha da azı (0.1-0.05 mm) kadar olur [Nमितokov,1978] ve bu yüzden plazma elektrotların yüzeyinde genişleyerek hareket eder.

“**İmpulse discharge**”, pulse uzunluğu (pulse duration) 10^{-2} sn veya daha az olan bir discharge için kullanılmıştır [Nमितokov,1978]. Bu zaman (10^{-2} sn) ve sonrası için spark kanalında oluşan plazma durağan (stabile) hale geçer, yani plazma kanalının çapı, plazmanın sıcaklığı ($17\ 000\ ^\circ\text{K}$), iyonizasyonun derecesi, direnç, yoğunluk v.s. stabile (stasyonier) haldedir. Bu zaman eşit şartlarda kanala gelen enerjinin miktarı, bu enerjinin spark discharge kanalına ulaşım hızına (pulse akımın artma hızı) ve onun devam etme süresi (pulse duration) ile karakterize edilir. Düşük gerilimli impulse discharge durumunda discharge kanalına verilen enerjinin ulaşım hızı ($\text{J}/\mu\text{sec.}$) kanalın genişleme hızını belirler.

Discharge kanalında verilen enerjinin yüksek hızı kanalın stabile hale geçmesine yeterli zaman vermemektedir (enerji ulaşım hızı büyük olduğundan spark kanalındaki geçiş prosesleri stasyonier hale ulaşamaz). Çünkü elektronların sıcaklığı ortamın (spark kanalın) ortalama sıcaklığından oldukça farklıdır, ikisinin dengelenmesi için zamana gerek vardır. Spark başlangıcında önemli derecede fark vardır ve akım ne kadar büyük olursa akımın artma hızı o kadar büyük olur. Bu sebeple 10^{-3} sn den daha uzun süreçlerde termal etkinin özgül (spesifik) gücü daha az hale gelir. Kanalın kesit alanı ve buna bağlı olarak elektrotların etkilenen yüzeyi artar.

Pulse ın uzunluğu (duration time) 10^{-2} sn ve daha üstü ile karakterize edilen bölge “**impulse ark**” olarak ifade edilmektedir. Burada discharge kanalı stasyonier (stabile) hale ulaşır ve stasyonier hale ulaşma şartları kanalın çapı, sıcaklığı, iyonizasyon derecesi, kanalın direnci v.s. ile belirlenir (karakterize edilir). Plazma kanalının elektrik iletkenliğinde etkin olarak akımın iyonik bileşeni (iyonlar) görülür. İmpulse discharge rejimine göre mukayese edildiğinde, akımın yoğunluğu ve buna bağlı olarak kanalın sıcaklığı düşer. Katot un yıpranma derecesinin arttığı görülür.

Bu belli şartlar altında, elektrotlardan kütle transferinin polarlılığı nın (işareti, yönü) değişmesini (anotdan-katoda olan kütle transferi katotdan anota) yani belli bir yöndeki transferin ters yöne gerçekleşmesidir. Polar (kutupsal) etkinin mevcudiyeti ve ayrıca onun discharge ın elektrik parametreleri ile bağlı olması, katot ve anoda enerjinin farklı iletim mekanizmaları ile açıklanır. Plazma anotta stabile olup, katotta hala dinamik ve katot yüzey üzerinde kanalın ucu hareketlidir, kanalın kesiti boyunca sürekli gezmektedir (Şekil 3.1.). Discharge kanalında stabile ve yarı stabile (durağan) zamanlar, eşit şartlar altında kanala etki eden enerji (verilen enerji) ye ve pulse ın artma hızına bağlı olacaktır.

Eğer discharge zamanı birkaç milisaniyeyi aşmaz ise böyle bir zaman boyunca elektrotların tamamı (ya da büyük bir kısmı) ısı iletkenlik değerlerinin bir sonucu olarak ergime noktasına kadar ısınmaz. Böylece bu olay bize ESD metodunun önemli özelliklerinden biri olan “soğuk” kaplama imkânını tanır, yani ESD ile kaplama esnasında malzeme (altlık) fazla ısınmaz ve kendisine has özelliklerini değiştirmez. Impulse süresinin 10ms den daha az olduğunda, prosesi adyabatik olarak kabul edebiliriz.

Erozyon modeli hakkında, Rovenskii’nin düşüncesine göre; Elektrotlar arasında (IEG) belirli bir bölgeden akımın geçmesi ile katot ve anot un belirli bölgelerinde yoğunlaşmış bir enerji salıverilir [Rowenskii,1977]. Anoda verilen enerji miktarı; oluşan elektronların enerjisi ve katodun yaydığı ışın demetinin enerjisinin (spark enerjisi) toplamıdır. Katot üzerindeki iyonların enerjisi, katoda yakın bir bölgedeki radyasyon enerjisi, ışın demetinin enerjisi ve ısının hacimsel yayınımindan ($W=I^2R$, anottan geçen akımın oluşturduğu ısı) ibarettir. Hem anot hem katoda verilen enerji, metalin ısınmasına, onun ergimesine ve buharlaşmasına harcanır. Malzemenin ısınması ve katot yüzeyinde biriken iyonların güçlü pozitif yüklü elektrik alanı, katotdan elektronların emisyonuna neden olur.

Elektrotların erozyonu hakkında çoğunlukla yüzeydeki ısı kaynağının neden olduğu hipotezi kabul görmektedir. Elektrotlar üzerindeki erozyon, ilk iki transient prosesin (elektromanyetik ve plazma) etkisinin bir sonucu olarak elektrotların yüzeyi üzerinde ısının gelişimine bağlı olup, bu yüzeyler üzerinde faz değişim (katı, sıvı, buhar) kuralları, elektrot malzemelerin termal ve fiziko-mekanik özellikleri,

elektrotların boyutları ve şekilleri, discharge ın meydana geldiği ortam (hava, sıvı, vakum) ile karakterize edilir. Bunun yanında erozyonun miktarı, kanalın katot yüzey üzerindeki hareketine, discharge kanalı içindeki basit püskürtmelere bağlıdır, discharge kanalı ne kadar sıkışmışsa patlama o kadar güçlü ve doğal olarak erozyon o kadar şiddetli olur. Bu proseslere elektrik ve manyetik alanların etkisi yanında dışarıdan (manyetik, mıknatıs gibi) etkilerde olabilir [Namiotkov,1978].

Hrenov'a göre erozyonun nispi oranı (verilen birim enerji miktarı için erozyon olan kütle miktarı, mg/Watt) yani birim erozyon miktarı arkın uzunluğuna (impulse arkın duration time) bağlı değildir [Hrenov,1949]. Bu şu sonucun elde edilmesine imkân verir, elektrotun ısınması sadece elektrotun malzemesine bağlıdır ve buna bağlı olarak erozyon, arkın gerilimine ve gücüne bağlı değildir.

Goloveiko ve arkadaşları metallere dikdörtgen şeklindeki impulse ları kullanarak belli miktarlarda enerjinin verilmesi durumunda ve bu miktarların farklı zamanlarda sıcaklık alanına etkilerini incelemişlerdir ($W=U.I.t$; U =sabit, belli W değerleri için I ve t değişken) [Goloveiko,1981]. Enerjinin bu belirli değerlerini elde etmek için şu yöntemler kullanılmıştır; kısa zaman aksiyonlu yüksek yoğunluklu ısı akısı ve uzun zamanlı düşük yoğunluklu ısı akısının etkisi incelenmiştir. Bu konu ile ilgili deneyler göstermektedir ki ısı impulse ları, enerjinin değişmez sabit miktarlarında, zaman ve etkinin şiddeti (yoğunluğu) açısından birbirlerinden ayrılırlar ve buda metal üzerinde ısıl etkinin farklı sonuçlarını sergiler, farklı erozyon gibi. Uzun süreli impulse, yüksek termal yayınlı metallere derinlere kadar etki (yüzeyden içlere yayılım) eder, fakat bunun yanında ana metal (altlık) malzeme anota göre büyük bir kütle olduğu için bu ısı zayıf kalır. Böylece, metal yüzeyinin az ısınmasından dolayı isotermik ergime impulse ın ancak sonunda gerçekleşir. Kısa süreli impulse lar ise, metalin yüksek sıcaklığa çıkmasını sağlar ve bunun neticesinde meydana gelen sıcaklık alanı metalin yüzeyi üzerinde yoğunlaşmış olur. Bu durumda da üç boyutlu küçük bir hacimde yoğunlaşmış sıcaklık alanın, yüzey üzerindeki etkisi sonucu isotermik ergime impulse ın sonuna kadar devam eder. Doğal olarak verilen belirli bir enerji (W) için kısa ve uzun impulse süreleri arasında isotermik ergimenin maksimum seviyede olduğu bir impulse aralığı vardır ki bu hesaplamalarla kanıtlanmıştır [Goloveiko,1981]. Termal bir impulse ın etkisinin her bir metal için metalin kendi özelliği olduğu (farklı olduğu) da unutulmamalıdır.

Erozyon olan metalin buhar ve sıvı hallerinin birbirleri arasındaki korelasyon pulse discharge ın enerjisi ve pulse ın sürecine belirli derecede bağımlıdır. Aslında bu enerji ve zamanın arasındaki ilişkinin bir neticesidir ve ayrıca atılan (uzaklaştırılan) metalin oranını etkilemektedir. Bu oran ile isotermik ergime ile kopan metal parçasının tüm ergimiş metal kısmına oranı kastedilmektedir. Discharge impulse ın sürecinin artması iyi ısı iletimli malzemeler için atılan metalin büyük bir kısmı ergimiş fazda, çok az kısmı buhar fazında olacaktır. Yüksek ergimede yani zayıf, kötü ısı iletkenliği olan malzemeler için daha çok buhar fazında gerçekleşecektir, bu da elektrotların birbirine yapışmaya eğilimini azaltır. Namitokov'a göre erozyon olmuş metal atıldıktan sonra yaklaşık 10^{-3} sn içinde elektrotun yüzeyinde kalan kısım (anot üzerinde buhar haline yakın haldeki atılan kısımdan sonra geride kalmış ergimiş haldeki kalan kısım) sıvı halde yada sıvımsıya çok yakın kalabilir [Namitokov,1978]. Bu zamanın değişimi (10^{-3} sn artması veya azalması) elektrot metalin termofizik özelliklerine ve discharge parametrelerine bağlıdır. O halde, biz bu hususları erozyon olan malzemenin kütlesini arttırmak hatta tamamını atmak (anottan uzaklaştırıp katoda depozite etmek) için kullanabiliriz.

Anot üzerinde yukarıda bahsedilen sıvı-buhar karışımı metal uzaklaştırıldıktan sonra bir krater (spot) oluşur. Anot üzerinde oluşan bu kraterin geometrik özellikleri, elektrot malzemelerin termal fizik özelliklerine ve discharge enerjisine (pulse ın zaman içinde etki etme gücüne) bağlıdır. Aynı süredeki (uzunluktaki) impulse ın enerjisinin artması ile kraterin çapı artar. Kraterin derinliği de aynı şekilde çok az miktarda olsa artıyor olmasına rağmen pulse enerjisine bağımlılığı çok azdır (yani derinlik, çap ile aynı oranda etkilenmiyor).

Namitokov, trackogram metodu ile erozyon olan kütlenin zamana bağlı olarak kopmasını (uzaklaşmasını) incelemiştir [Namitokov,1978]. Buna göre erozyon olan malzemenin bir kısmı discharge ın gelişmeye başladığı ilk anda atılıyor (discharge ın başlamasından birkaç $10\mu\text{sn}$ ye geçmesinden sonra, daha erken değil) ve geriye kalan sonraki kısmı da discharge ın bitimine yakın ya da bitmesinden sonra atılıyor.

Zolotykh'in metal enjeksiyon proses denemelerinde x-ray görüntü analizleri yardımıyla yapılan çalışmalarından anlaşılıyor ki, esasen sıvı halde metal

enjeksiyonun yoğunluğu pulse akım verildikten sonra meydana geliyor [Zolotykh,1957–1959]. Yani elektrotlardan ergimiş kısmın tamamı atılmıyor. Ekseriye görülmektedir ki, ergimiş metalin büyük bir yoğunluğu krater çemberinin uçlarında ve kraterin dip kısmında kalmaktadır. Enjeksiyon katsayısı (atılan, enjeksiyon olan metal kütlesinin, ergimiş metal kütlesine oranıdır) discharge oluşum şartlarına bağlıdır, bu değerler 0-1 arası değişmekte olup ya sıfıra yakın yada bire yakındır (erozyon ya çok iyi yada çok kötü). Metal enjeksiyon prosete farklı kuvvetlerin katkı oranı çevreye, ortama bağlı olduğu gibi impulse akımın parametrelerine de bağlıdır.

Erozyonun boyutlarını (miktarını) hesaplamak ve tahmin etmek için ergimiş metalin kütlesinin miktarını bilmek yeterli değildir. Fakat erozyonun miktarını hesaplamak için enjeksiyon katsayısını yada bunun 1'e ne kadar yakın olduğunu bilmek önemlidir. Akım geçişi esnasında veya sonrasında ergimiş metale çeşitli kuvvetler etki eder, bunlar aktif kuvvetler olup ergimiş metalin uzaklaşması (fırlatılması) için davranırlar. Bu kuvvetler elektromanyetik, yerçekimi, gaz dinamiği kuvvetleri v.s. diye adlandırabiliriz. Bunların yanında bu uzaklaşmaya karşı koyan kuvvetlerde vardır (yüzey gerilme kuvveti, adhesion). Bahsedilen bu kuvvetlerin etkileşimi sonucu metalin bir kısmı atılıyor bir kısmı da olduğu yerde kalıyor.

Malzemelerin büyük bir yoğunluğunda görülen elektrik erozyonunu meydana getiren enerjinin temel kaynağı birbirine yakın elektrotlar arasındaki elektromanyetik alandır. Voltaj (gerilim) düşmesinin gerçekleştiği elektrotlar arasındaki alanda (gap içinde) uçan (hareket halinde) parçacıkların kinetik ve potansiyel enerjisinin bir kısmı veya tamamı elektrotlara transfer olur. Butkevich'e göre eğer akımın yoğunluğu yeteri kadar büyük ve elektrot malzemenin elektrik özdirenci de yeteri kadar yüksek ise elektrotlardaki yüzeysel ısı kaynağı haricinde, aynı zamanda hacimsel (volumetrik) bir ısı kaynağı (joule ısısı) da meydana gelir (akımın geçtiği silindirik hacimde $W=I^2.R$ gereğince hacimsel bir ısı enerjisi meydana gelir) [Butkevich,1978].

Krijanskii ve arkadaşlarının yaptığı deneysel çalışmalara göre; discharge sürecinin başlangıç aşamasında sadece malzeme buharlaşmıyor, aynı zamanda elektrotlar arasındaki boşlukta basınç artmaktadır ve bunun sonucu discharge kanalı

genişlemektedir ve bu da yüzeydeki erozyon (enjeksiyon malzemesi) şartlarını değiştirmektedir [Krijanskii,1972].

A.Erden ve B.Kaftanoglu elektro erozyon prosesinin bir çalışma modeli olarak termo-matematiksel bir yaklaşım benimseyip aşağıdaki genelleştirmeleri kabul etmişlerdir [Erden,1981]. Discharge'ı oluşturan elektrik parametreleri ve elektrot malzemelerin kimyasal özelliklerine bağlı olarak, altlık yüzeye transfer olan kütle miktarının buharlaşmış haldeki kısmı, her spark discharge dan sonra anotda oluşan erozyon kraterin hacimce yaklaşık %10-%15'ne eşittir. Yani kraterin geri kalanı sıvı halde altlık yüzeyine transfer olmaktadır. Anot yüzey üzerinde ergimiş fakat olduğu gibi hala orda kalan miktar ise bu altlık yüzeye transfer olan anot üzerindeki kraterin son hacminin 8, 10 katına eşittir. Zolotykh de benzer şekilde sıvı halde olduğu gibi yerinde kalan miktarı % 85-90 olarak hesaplamıştır [Zolotykh,1959]. Erozyonun en büyük miktarı son aşamada oluşmaktadır. Discharge ın bitiminden sonra, elektrotların üzerindeki ergimiş metalin üstündeki discharge ın oluşturduğu basınç azalmaktadır ve daha az basınç altındaki gazlar genişler bunun sonucu elektrotlardan (yüzeyden) ergimiş metalin uzaklaştırılmasına sebep olur. Metalin belli bir miktarı kraterin son hacminin yaklaşık %10-15 elektrostatik kuvvetler tarafından uzaklaştırılır (koparılır, enjeksiyon olayı).

Kulagin ve Nikolaev'a göre anot üzerindeki arkin spotundaki (discharge krateri) elektrik akımın yoğunluğu elektrotların soğuyup soğumadığına bağlıdır, yani anodun sıcaklığına bağlıdır [Kulagin,1969].

Zingerman'nın yaptığı kabullere göre de ergimiş malzemenin uzaklaştırılma (enjeksiyon) prosesi esnasında koparılan ergimiş kısmın derinliği, discharge ın bitiminde atılan kısmın derinliğine göre nispeten birkaç kat fazladır [Zingerman, 1960].

3.1.2. Bulgular:

1. Yukarıda bahsettiğimiz literatürdeki çalışmalardan elde ettiğimiz bilgiler ışığı altında vardığımız sonuca göre ESD prosesin uygulanabilirliği açısından impulse sürecinin süresi belli zaman aralığı içinde sınırlıdır. Bu süreç zamanın küçük olan kısmına doğru (10^{-8} - 10^{-7} sn) sınırlama impulse üreten jeneratör ekipmanının imkanlarından kaynaklanmaktadır (10^{-6} sn, kural olarak). Büyük olan kısmına doğru (yaklaşık 10^{-3} - 10^{-2} sn) ise plazma kanalında prosesler stabile hale geçer ve bunun sonucu olarak elektrotlardaki malzeme transferi yönü kutupsal olarak değişir (anottan katoda değil, artık katotdan anoda doğru) ve katot elektrotun bir bölümü aşırı derecede ısınır. Bunların neticesinde doğal olarak ortaya çıkan bu imkan yani ESD için uygulanan impulse süreç zaman aralığı öyle bir alana tekabül ediyor ki plazma kanalındaki geçiş prosesleri aynı zaman aralığı içinde oluşturulabilir (10^{-6} - 10^{-3} sn). Diğer bir deyişle bu bize impulse parametreleri vasıtasıyla elektrotlardaki ısı transferi prosesinin kontrolü fikrinin çok geniş bir imkânını sunar.

2. Kanalin genişleme hızı ve buna bağlı ısı akısının düşmesi (azalması) discharge ın başlangıç aşamasında en yüksek değerdedir. Fakat impulse akımının artış hızı (A/ μ s) yeteri kadar yüksek olduğu durumda impulse ın başlangıç aşamasındaki ısı akısının değeri impulse ın sonundaki değerinden çok çok fazladır. Demek ki akım pulse ın oluşum şeklini belli bir kurala göre değiştirerek ısı akısını da bir şekilde değiştirme imkânını elde edebiliriz.

3. Belirgin bir kütle enjeksiyonun başlaması impulse ile birlikte başlamaz, bir miktar gecikmekte ve impulse sona erdikten sonrada kraterin (spot) genişlemesinin (enjeksiyonun) devam ettiği gözlemlenmektedir (birikmiş olan yoğun ısı enjeksiyon sürecin bir süre devam etmesine neden olur). Gecikmenin miktarı elektrot malzemesinin ısı yayılım hızı değeri ile ilgilidir, $\alpha = \lambda / c \cdot \rho$; λ = termal iletkenlik katsayısı, c = özgül ısı kapasitesi, ρ = yoğunluk. Anottan kütle enjeksiyon süreci impulse' ın bitiminden yaklaşık 10^{-3} sn sonra devam eder. Açıkçası, bu zaman içerisinde, temel aktif kuvvetlerin (elektrik karakterli kuvvetler) elektrottan ergimiş metalin enjeksiyonuna etkisi olmaz (prosesse iştirak etmezler çünkü impulse ın bitimiyle bu kuvvetler ve onların etkileri de ortadan kalkmış olurlar).

3.2. ESD Proses İçin Kullanılan Ekipmanların Gelişim Süreci:

İlk ESD ekipmanların kurulumundan günümüze kadar, geleneksel olarak yapılan kaplamaların özelliklerine etki etmenin temel metodu, hem bu prosese etki etmenin en basit ve en pratik yolu olması ve hem de kaplama malzemelerinin çok çeşitliliği açısından kullanılan elektrot malzemelerinin değiştirilmesi üzerineydi. Diğer bir başka metot ise pulse ın elektrik parametrelerine müdahale etmek olup endüstri tarafından üretilen ilk ESD ekipmanların kapasiteleri açısından son derece kısıtlı olmalarından dolayı spark kanalına verilen enerjinin elektrik parametrelerini pratik olarak değiştirebilme imkanı vermemekteydi. Bu nedenle ESD prosesin kaplamaya etkileri üzerine ilk uygulamaların ve bilimsel çalışmaların gelişimi sınırlı kalmıştı. Neticede, yapılan kaplamanın karakteristiğine etki etmede kullanılan ve birbiri ile bağlantılı bu iki yöntemin uygulanabilme imkanları arasında belirgin bir fark oluştu. Çünkü elektrot malzemelerini değiştirmek daha kolay ve pratiktir. Bu nedenle bizim bakış açımıza göre, bu yöntemin tam anlamıyla kullanılabilme imkanını sınırlandırdı. ESD prosesin zaman içinde gelişimini görmek için ve kullanılan ekipmanların gelişmesindeki esasa, yani akım pulse ların oluşumu üzerinde rol alan devrelerin çözümlerini (charging ve discharging devrelerin geliştirilmesi) ve bunların spark aralığında (10^{-2} - 10^{-8} sn) uygulanmalarına ait modern yaklaşımlarını ortaya koymak için, literatürde [Popilov,1971; Livshits,1983; Saushkin,2002] verilen bilgilere kısaca bir göz atalım.

3.2.1. Akım impulse larını elde etme yöntemleri;

Mevcut kurallara göre, sürekli tekrar eden akım pulse ları aşağıdaki yöntemlerle elde edilebilir. Bunlardan ilki, alternatif akımın ya da doğru akımın kontrol edilebilen geçiş (diyot, transistör, tristör) elemanları sayesinde akım impulse larına dönüştürülmesi (invert metodu). İkinci metod toplama metodu (süperpoze) olup, sabit akım (voltaj) üzerine unipolar veya bipolar akımın çeşitli formlarını ekleme yöntemidir (unipolar veya bipolar dalgalı akım ya da voltaj elde etmek için). Genelde, toplam harmonik akım (voltaj) serilerinin bir üst üste bindirilmesi (süperpozisyon) olup bu bize periyodik bir akım (voltaj) pulse şeklini verir.

3.2.2. İmpulse jeneratörlerin sınıflandırılması;

ESD kaplama proste çoğunlukla faydalanan impulse jeneratör tipleri aşğıdaki şekilde sınıflandırılabilir;

1. Biriken enerjinin hangi prensibe göre biriktirildiği (kapasitifmi, indüktifmi)
2. İmpulse jeneratörün parametreleri üzerinden elektrotlar arasındaki boşluğun (IEG) fiziksel özelliklerine etki etme derecesine göre [bağımlı devre (etkili) veya bağımsız devre (etkisiz)]
3. Akım kaynağı devresi ile IEG arasındaki bağlantısının derecesi ile (bağı, temas halinde ya da değil)
4. İmpulse türlerine göre (unipolar, bipolar veya bunların belli bir sabit pozitif ya da negatif değere ilavesi ile elde edilmiş impulse türleri)
5. Devrede kullanılan komutasyon (kontrol) elemanların tipine (transistör, tristör v.s.) göre.

Kapasitiv ve indüktif yükün depolanması (charging), transformatör gibi voltaj kaynaklarından direkt akım şeklinde veya sabit güç ($P=I.U$) şeklinde yapılabilir. Yükleme (charging) yaparken voltaj kaynağı olarak çoğunlukla endüstri frekanslı, şebekeden faydalılır, bu yüzden yükleme (charging) yapılırken akımın sınırlanması için aktif ve reaktif akım sınırlandırıcı devre elemanları kullanılır. Bu da aktif dirençli cihazlarda kaybolan, israf edilen enerji anlamına gelir ve depolanmak istenen enerjinin belirgin bir oranı kadar olabilir. Bu önemli bir kusur olarak göze çarpar.

Herhangi bir charging devresinde, bizim kullanacağımız belirli bir güç için en uygun olanı sabit güç kaynağından kondansatörün depolanmasıdır. Fakat sanayideki gelişmeler ve güç kaynaklarının voltaj kaynağı dönüşümünde kullanımı yeteri kadar yaygın olmaması ve muhtemelen basit ve efektif çözümlerin noksanlığından dolayı sistem sadece güç kaynağı olarak kalmış herhangi bir gelişme sağlanamamıştır.

Voltaj dönüşümleri için üç tip doğrultucu (transducer) kullanılmaktadır; i) dinamik tepkili transducer, ii) kontrollü doğrultmaç (rectifier) ve iii) pulse modölatör olup, pulse modölatörü de kendi içinde pulse genliği modölatörü (PWM),

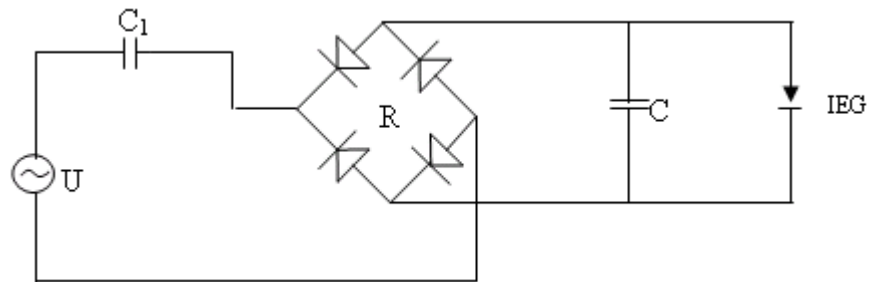
pulse frekansı modülatörü (PFM), pulse amplitude ve bunların üçünün kombinasyonları şeklinde olabilir.

3.2.3. İmpulse jeneratörlerin (üreteçlerin) bazı tipik devreleri;

ESD kaplama proses ekipmanları içinde kullanılan ilk impulse jeneratörleri bir direnç-kondansatör (RC) devresinden ibaretti. Bu jeneratör devresinde; sabit bir güç (voltaj) kaynağına seri olarak akımı sınırlandırıcı bir direnç ve IEG'ye paralel bir kondansatör bağlanmıştır. Bu tip jeneratörün en belirgin kusuru düşük verimli olması ve genellikle ancak çok küçük güçlerde kullanılmak üzere yapılmış olmasıdır. Diğer kusuru, pulse uzunluğunun (süresi) büyük olması durumunda kapasitörün charging'i için uzun zaman gereklidir ve dolayısıyla pulse uzunluğunun-pulse periyoduna oranı büyüktür. Bu tip jeneratörlerin karakteri olan impulse'ların frekansı (impulse ların tekrarlanma hızı), amplitude büyüklüğü ve pulse uzunluğunun v.s. hepsi IEG'nin fiziki şartları ile belirlenir.

Rezistans-İndüktans-Kapasitans dan ibaret olan RLC tip jeneratörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü charging devresinde ki direnç kayıplarının daha az olmasından dolayı bu tip jeneratörler yüksek verimlidir. RLC tip jeneratörlerin avantajlarından bir diğeri de plazma kanalının deiyonizasyonu şartlarının daha iyi gerçekleşmesidir. Bunun yanında kısa devre akımının büyük olması da bu tip jeneratörlerin bir dezavantajı olarak ortaya çıkmaktadır.

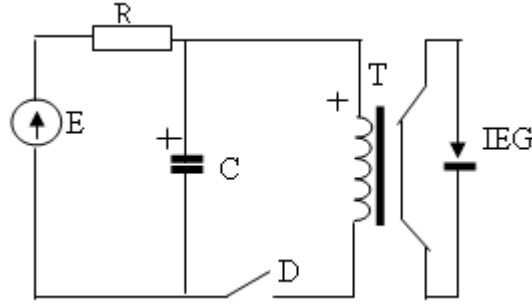
Bir başka tip jeneratör devreside, aynı anda iki kondansatörün kullanıldığı CC tip jeneratörlerdir. Bunlardan C_1 kondansatörü akımı sınırlandırıcı eleman olarak kullanılmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Bir CC impulse jeneratörün devresi.

Bir transformatör ile tümleşik pulse jeneratörleri (PG); transformatörün birincil (voltaj düşürücü) kısmına kondansatör, ikincil (voltaj yükseltici) kısmında IEG'e bağlanırsa, transformatörde biriken manyetik alan enerjisi, IEG de ters kutuplu (ters yönde) bir akım pulse meydana getirir. Bu zıt yönlü akımı doğrultmak için IEG'e zıt yönde doğrultucu içeren bir kapı (D, diyot) bağlanır (Şekil 3.3).

Eğer transformatörün birincil (yüksek voltajlı) kısmına pulse jeneratörü devresi bağlanırsa, impulse ların pulse frekansı IEG in fiziksel özelliklerinden bağımsız olması ve devrenin ilk (birincil) kısmındaki akımların da küçük olması gibi avantajlar sağlanılabilir.

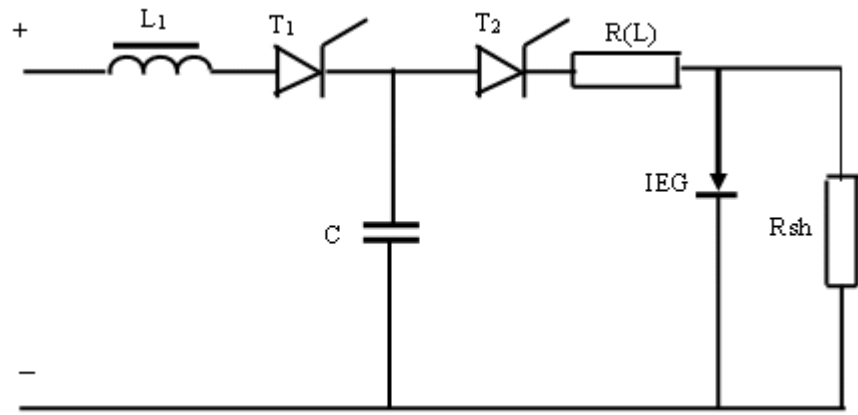


Şekil 3.3. Transformatörlü bir impulse jeneratörün (PG) devresi.

Bu tip PG'lerin kusurları; akımı sınırlayıcı olarak direnç kullanılmasından dolayı düşük verim, yüksek gerilimin mevcut olması (kusur gibi gözükse de özellikle sonucu açısından bazı devrelerde istenebilir) ve transformatörün boyutları ve ağırlığı nedeniyle sistemin aşırı büyümesidir. Buna ilaveten, transformatörlü PG'lerin pulse tekrarı (frekansı) 20kHz den daha büyük olması mümkün değildir. Çünkü transformatördeki indüktans oluşan pulse ların sürelerinin uzamasına neden olur. Fakat bu tip PG'lerin sahip olduğu en önemli kusur; kondansatörün charge olma seviyesi dolaylı olarak IEG'e bağlıdır, bu nedenle özdeş impulse ların (aynı enerjili) oluşturulmasını mümkün kılmaz.

Tristörlü impulse jeneratörleri; transformatörlü PG'lerde ortaya çıkan özdeş impulse oluşturabilme problemini gidermek için Şekil 3.4. deki gibi hem charging hem de discharging devresini birbirinden ayırmak amacıyla için her iki devreye tristörler bağlanmıştır. Bunların temel özelliği akım geçiş koşullarında başlangıçta

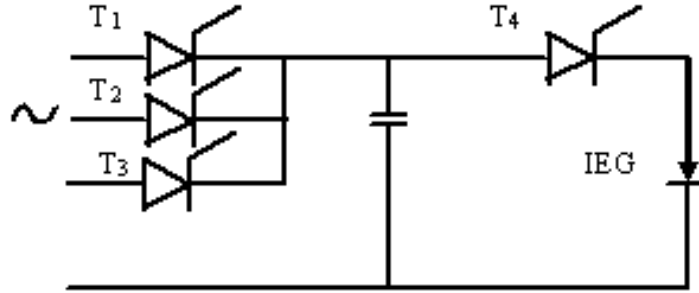
akım yüksek, voltaj düşük ve kapanışta akım sıfıra inerken, voltajın maksimum olmasıdır. Sistem, akım sınırlayıcı olarak L_1 indüktif elemanı içermektedir ve bu eleman kondansatörün charge'ı esnasında T_1 anahtarlı tristör ile, discharge'ı esnasında da T_2 anahtarlı tristör ile kontrol edilmektedir ve $R(L)$ elemanın yardımıyla da impulse akımın oluşum şekline kumanda edilmesine imkan vermektedir. IEG'e paralel bağlanan R_{sh} resistörü devre açıkken, yani boştayken (pulse lar arası) kondansatörün discharge olmasını sağlar (IEG in direnci çok küçüktür belli bir sabit voltaj da çok büyük bir akım geçebilir bu yüzden paralel R_{sh} bağlıdır).



Şekil 3.4. Tristörler vasıtasıyla charging ve discharging devreleri birbirinden bağımsız hale getirilebilen tristörlü bir impulse jeneratör devresi.

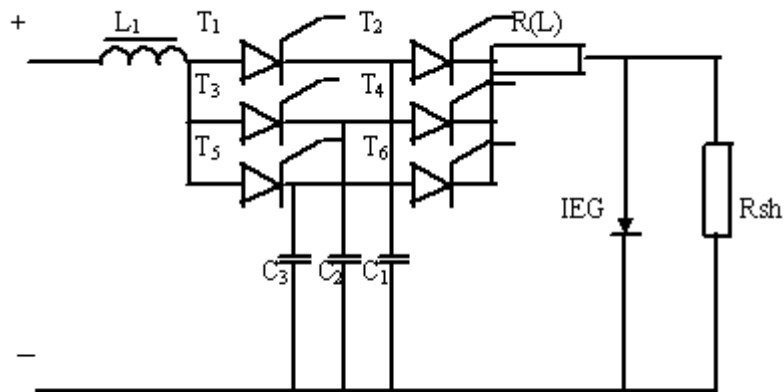
Yukarıdaki şekildeki devre aşağıdaki gibi çalışır. Devrede T_1 açıldığında L_1 indüktansından geçen akım C kapasitörünü charge eder. T_1 tristörü kapandıktan sonra charge akımı sıfıra iner, T_1 in güvenli bir şekilde kapanması için, belli bir zaman sonra T_2 tristörü açılır ve kapasitör IEG üzerinden discharge olur. Kapasitördeki voltaj, spark ı meydana getirecek voltajdan daha küçük olduğu zaman, kapasitörün discharge kesilir ve T_2 tristörü kapanır. Bu sisteminde kusura vardır, impulse ın tekrarlanma hızının (frekans) charge ve discharge devrelerindeki RLC parametrelerine bağlı olduğunu biliyoruz ve bu sistemde ayrıca açma-kapama için kullanılan tristörlerin hızlarına da bağlıdır. RLC parametrelerinin küçük olması durumunda frekans yaklaşık 10 KHz ile sınırlı kalmaktadır.

Üç faz yarım dalga doğrultmaçlı impulse jeneratörleri; şebekeden gelen üç fazlı dalganın negatif kısmına geçit vermeyen, ayırık devreli (charging-discharging devreleri birbirinden bağımsız) tristörlü bir impulse jeneratör modeli Şekil 3.5. de gösterilmektedir. Negatif dalga değerlerini bertaraf eden bu tip PG'lerin bilinen kusuru, impulse elektrik parametreleri ve impulse ın tekrar etme hızı (frekans) şehir cereyanının (şebeke) üç fazlı frekansına bağımlı olmasıdır. Bunu azaltmak mümkündür ama tamamen ortadan kaldıramayız.



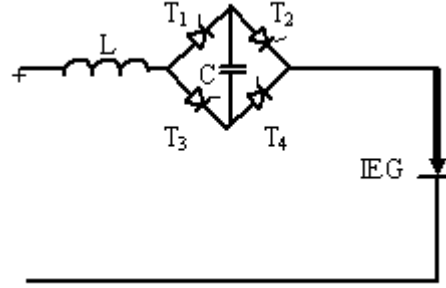
Şekil 3.5. Yarım dalga doğrultmaçlı, üç fazlı ve bağımsız ayırık devreli jeneratör modeli.

Çok çevrimli, ayırık devreli, tristörlü impulse jeneratörleri; Şekil 3.4. de verilen PG'lerin impulse frekansları Şekil 3.6. deki gibi bir kaç birbirine paralel bağlı devrelerin IEG de birbiri ardı sıra çalışmasıyla arttırılabilir. Fakat sistemde kullanılan devre ve devre elaman sayısı birden 3 kat artması sonucu arızalanma ihtimalinden dolayı sistemin güvenilirliği azalır ve ayrıca fiyatı da artar.



Şekil 3.6. Çok çevrimli, ayırık devreli, tristörlü bir jeneratör modeli.

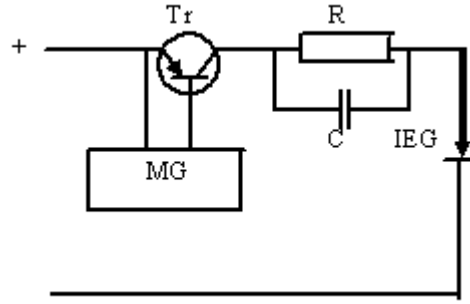
Tek faz köprü doğrultmaçlı (rectifier) impulse jeneratör modeli; Şekil 3.7. da tek fazlı köprü dönüştürücülü bir jeneratör devresinin yapısı gösterilmektedir. T_1 , T_4 tristörlerin (anahtarları) açılmasıyla akım kapalı olan T_3 , T_2 yoluyla kapasitör ve IEG den geçerek charging gerçekleşir. T_1 , T_4 kapanıp T_3 , T_2 tristörleri açıldıktan sonra kapasitör tekrar akım geçmesiyle IEG üzerinden discharge olur. Bu çevrim arka arka defalarca tekrar gerçekleşir.



Şekil 3.7. Tek faz köprü doğrultmaçlı (rectifier) impulse jeneratör modeli.

Bu modelin kusurları da mevcuttur. Bu sistemde impulse jeneratörün çalışma frekansı kapasitörlerin tekrarlı charge-discharge devresi frekansı ile son derece bağımlı hale gelmiştir ve ESD kaplama proses için gerektiğinde sığası büyük olan kapasitörler kullanıldığında frekans 1-2 KHz den fazla olamaz.

Transistor lü impulse jeneratör modeli; son yıllarda pek çok ülkede sanayide yüksek akımlı transistorlerin üretilip kullanıyor hale gelmesi, ESD sistemlerde ki impulse jeneratörlerin amplitude-frekans karakteristiklerinde de önemli gelişmelere imkan vermiştir. Bu tür transistor lü impulse jeneratörleri, akım sınırlandırıcı olarak bir direncin bağlı olduğu bir discharge devresinden daha çok dikdörtgen pulse lı voltaj lar üretmek için seçilebilirler. Şekil 3.8. de bu tür jeneratörlerin en basit devre şekli verilmektedir. Bu devre içinde, IEG de discharging esnasında ani voltaj veya akım yükselmelerinden sistemi korumak ve akımı kontrol etmek amacıyla akım sınırlayıcı bir direnç kapasitöre paralel bağlanmıştır. Ayrıca impulse lar arasındaki boşlukta (pause time) kapasitörün discharge ı bu direnç üzerinden gerçekleşir. Devrede tüm kontrol bir master generatör (MG) ve ona bağlı bir transistor tarafından gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3.8. Transistör lü bir impulse jeneratörün basit bir devresi.

Bu devrenin de kusuru; discharge devresinde akım sınırlayıcı olarak direncin mevcut olmasından dolayı impulse jeneratörün veriminin düşmesidir. Ayrıca akım genliğinin bu direncin büyüklüğüne de bağlı olması da diğer bir dezavantajdır. Bazı devrelerde akım sınırlayıcı direnç yerine verimin düşmesine engel olmak için bir indüktif akım sınırlayıcı eleman kullanılmaktadır.

ESD kaplama ve EDM (Electro Discharge Machining) erozyon prosesler için kullanılan bazı ekipmanları ve bu tip impulse jeneratörleri üreten belli başlı firmalar arasında Amerikada; Elox, Ex-Cell-O, Cincinnati, Milacron – Japonyada; Mitsubishi, Japax – İsviçrede; AGIE, Charmiles – Almanyada; AEG-Eloterm, Nassovia-Krupp ve Türkiyede; Furkan Metal'i örnek verebiliriz.

Metal yüzeylerin alaşımlamasında kullanılan ESD proses ekipmanları içinde impulse jeneratörler kadar önemli, olmazsa olmaz bir diğer aparatda elektromanyetik titreşimli holder ya da onun benzeri cihazlardır. Bu cihazlar işlem elektrotu ile iş parçası arasındaki periyodik kontağı sağlarlar ve böylece kullanılan akım jeneratörlerin tipine bağlı olarak onların aralarındaki boşluğun mesafesini (IEG) ve birbirlerine temas ettiği anı tayin ederek spark kanalın oluşumunu gerçekleştirirler.

Mevcut literatürdeki, akım impulse larının süperpozisyonu için kullanılan elektrik discharge komutasyon metotlarını incelediğimizde; bu tip impulse üretim sistemlerin kullanımı, bakış açısına göre ESD kaplama prosesin teknolojik olarak gelişmesinde iyi yada kötü yönde belirgin bazı özellikler ortaya koyduğu (özellikle impulse enerji 0.5 J ve daha az olduğunda verimin düşmesi gibi) anlaşılmıştır

[Ribalko,2001;1999]. Bu tip cihazların verimliliğinin azalmasındaki ana etkenler aşağıdaki gibidir;

- Tümüleşik elektrik gücünde (enerji) azalma; hassas modlara (çok küçük enerjili rejim) geçişte birim zaman içinde IEG de ortaya koyulan toplam elektrik gücündeki (enerji) azalma olur ve bunu impulse ların tekrarlanma hızını (frekans) arttırmakla telafi etme imkanı yoktur. Çünkü bu frekans hemen hemen holderin titreşim frekansı ile belirlenir ve genellikle de değişmez, sabit kalır.

- Spark discharge gelen enerjinin payında ki azalma; karşılıklı elektrotların birbirlerine yaklaşıp onların temas etmesinden sonra bir impulse enerjisinden spark kanalına geçen spark discharge enerjisinde azalma olur. Çünkü akım impulse ın sadece bir kısmı spark discharge tarafından kullanılır, geri kalan kısmı elektrotların temasından sonra kısa devreden dolayı impulse generatörün discharge devresinde yayılır.

- Spark discharge ı oluşturan faydalı impulse ların miktarında azalma; elektrotların tam kısa devre olduğunda işe yaramayan impulse ların miktarı artar. Böylece elektrotların pürüzlü yüzeylerinde mikro hacimdeki patlamalar ve bunları oluşturacak spark kanalı için mevcut enerji yetersiz kalır.

3.2.4. Bulgular:

1. ESD prosesin gerçekleşmesi için kullanılan impulse jeneratörleri, yaklaşık 8-10 kHz arasındaki bir frekans aralığında sınırlıdır. Bunun nedeni impulse jeneratör devrelerinde kullanılan RLC parametrelerinin mevcut değerlerinin büyük olmasından dır. Büyük değerli RLC aparatları impulse jeneratörlerin boyutlarının ve ağırlıklarının büyük olmasına, onların aktif kullanımlarının düşük olmasına yol açar. Ayrıca oluşan impulse ların dinamik karakteristiğinin de düşük olmasına neden olur.

2. Spark discharge oluştururken kullanılan mevcut aparatların (elektrot holder, vibratör) frekansı 1Khz ile geçemeyecek şekilde sabittir, arttıramıyoruz. Buda iş parçası yüzeyinin istenen verimlilikte tarayarak alaşımlama prosesi teknolojisini geliştirme imkânını vermemektedir.

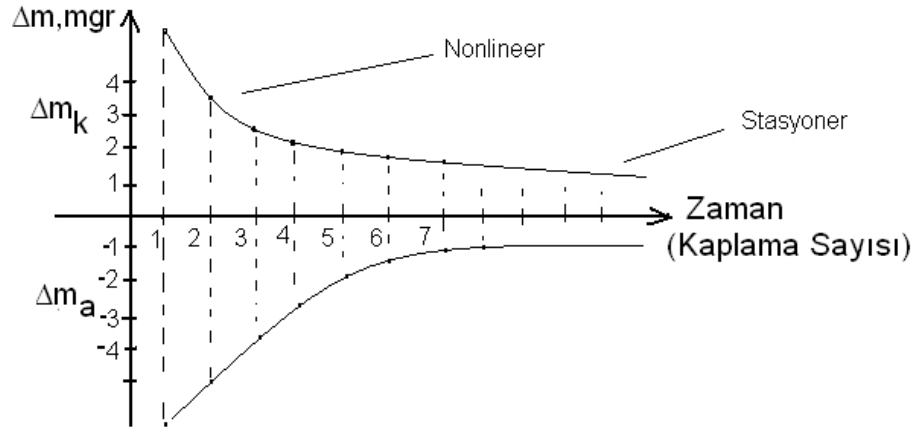
3.3. ESD Teknolojisi Alanında Yeni Gelişmeler;

Konumuz olan çelik yüzeyi sertleştirmek için yüzey üstüne ESD yöntemiyle yapılan tungsten-karbür kaplama konusundaki literatürdeki çalışmalar bir gözden geçirilirse; bazı deneysel çalışmalardan [Ribalko,2002-2005], değişen impulse ın elektrik parametreleri (25-4000 μ s pulse sürelerinde ve 15-1000 A akım şiddetleri aralıklarında) ile alaşım prosesinin fiziği ve yapılan kaplamanın özellikleri arasında nasıl bir bağlantı olduğu anlaşılabilir.

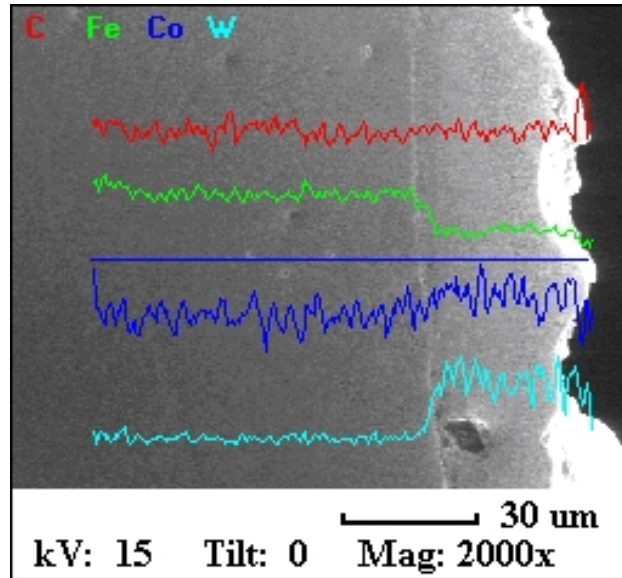
Bu konuyla ilgili yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarının irdelenmesi açısından, kaplamanın üzerinde alaşımlama ile birlikte oluşan bozunmanın (kırılma, çatlak vs.) ana sebeplerinin araştırılmasına ihtiyaç vardır. Bu sebeplerden esas olanı, henüz kaplanmış kaplama tabakasının hemen altında ya da daha iç kısımlardaki, spark discharge tarafından oluşturulan yüzeysel ısı kaynağı ve transfer olan kütleyle biriken yoğunlaşmış ısı kaynaklarının neden olduğu buhar haline gelmiş malzemenin kaplama tabakasının üst yüzeyine çıkmasıdır. Kaplamada, alttaki malzemenin üst yüzeydeki malzemeye göre daha düşük ergime noktasına sahip olması alt kısmın daha erken ergiyip hatta buhar haline gelip balon gibi patlayarak tazyik ile yukarı fışkırmaya yol açmaktadır. Dolayısıyla daha sert ve gevrek olan seramik üst katmanın ısı bir etkiden ziyade mekanik bir etkiyle kırıldığını ifade edebiliriz.

Deneylerden de anlaşılmaktadır ki, kullandığımız impulse parametreler üzerine yaptığımız incelemede değişik impulse aralıklarının hepsinde daima kaplamanın belirli bir aşamasında kaplamada bir bozunma (failure) olayı meydana gelmektedir. Bu prosesin bir kaidesi olarak kabul edilebilir. Bir diğer vazgeçilemez kaide de, bu yöntemde yüksek alaşımlı elektrotlar ile yapılan kaplamanın ilk aşamasından sonra anottan kütle erozyonu miktarı artışları lineer değildir (Şekil 3.9.). Çünkü altlık elektrotun (katot) başlangıç yüzey özellikleri proses süresince sabit kalmayıp sürekli değişmektedir. Kaplamanın EDX analizi gözden geçirilirse kaplama kalınlığı boyunca altlık yüzeyin kimyasal yapısının değiştiği görülmektedir (Şekil 3.10.). Her kaplama prosesi sonucu altlığın (katot) ve anotun yüzey özellikleri birbirlerine yaklaşmakta (başlangıç şartlarına göre) ve böylece spark discharge ın esas sebebi olan bu yüzeylere yakın bölgelerdeki voltaj düşmeleri farkı azalmaktadır. Bunun

neticesinde spark discharge ısı akıları azalacaktır ve dolayısıyla anottan erozyon olan kütle miktarında bir azalma görülecektir. Prosesi etkileyen üç parametreden ilki elektrot malzemelerin özelliklerinin değişimi ve katod yüzeyindeki kaplamanın WC - çelik yüzdesi alaşımlama süresince değişince neticede eroziv plazma da değişir hatta yok olur ve kütle erozyonu da sona erer.

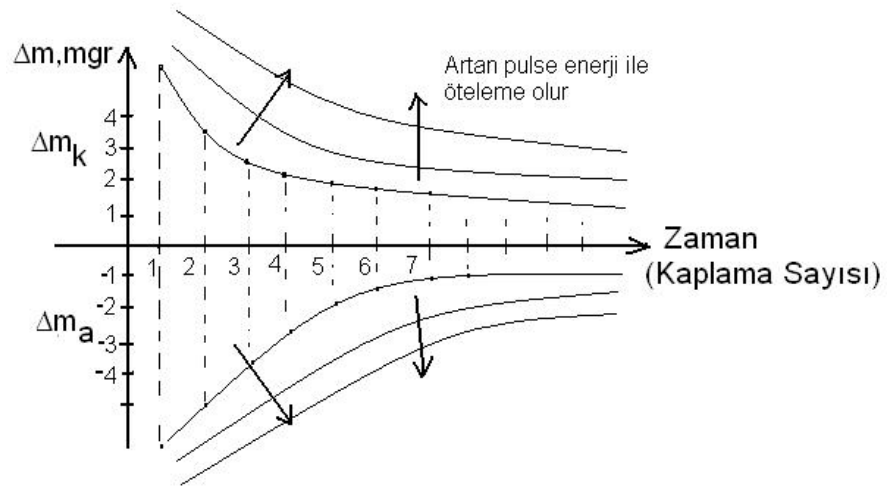


Şekil 3.9. Başlangıç da nonlinear olan anottan erozyon olan (Δm_A) ve katoda transfer olan (Δm_K) kütle artış miktarları zamanla (kaplama sayısı arttıkça) stasyoner hale gelir ve artık proses sona erer.



Şekil 3.10. St35 çelik bir numune yüzeyinin ESD kaplama prosesiyle WC-Co(8) kaplanması sonucu elde edilen kaplamanın kesiti boyunca LineEDX analizi.

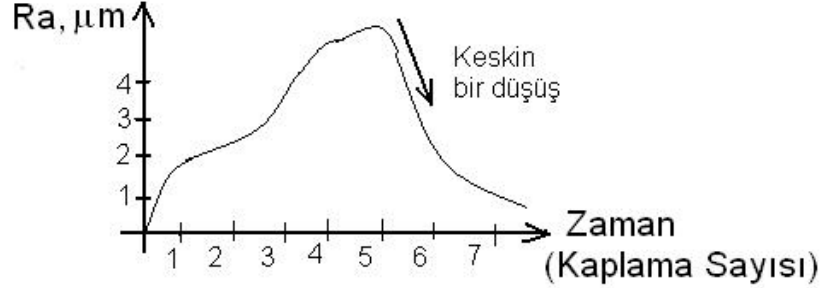
Elektrot yüzeylerinin fizikokimyasal özelliklerinin sabit hale gelmesi ile yani aynı olmasıyla, anotdan kütle erozyonun nispi miktarı (ölçümler arasındaki oran $\Delta m_K/\Delta m_A$) kaplama süresince çok az fark eder hatta kaplamanın daha ileriki aşamalarında belli bazı sabit miktarları etrafında az değişir (inip, çıkar). Eğer verilen enerjinin miktarı artarsa bu sabitlenen anodik kütle erozyonun miktarı da artar ve bu değere çok kısa bir zamanda ulaşır. $\Delta m_K/\Delta m_A$ ölçümleri zaman ile grafik edilirse bu değerlerde bir artış (öteleme) olur. Fakat bu ötelemeyle birlikte kaplama sayısında bir azalma görülür, yani prosesin karakteristiği çok daha erken stasyoner hale gelir. Nonlinear kısmın süresi daha az olur (Şekil 3.11.).



Şekil 3.11. Artan pulse enerji ile anotdan erozyon olan (Δm_A) ve katoda transfer olan (Δm_K) kütle artış miktarlarındaki değişim.

Kaplama prosesi ile ilgili deneyler bize gösteriyor ki, yapılan sert alaşımlamada kusur (kaplamada kırılma, çatlak vs.) başlangıcı; işlem elektrotun (anot) relatif erozyon miktarının stabile hale gelmesi, katot tarafından alınan relatif kütle miktarının sıfıra veya negatif değerlere ulaşması ile yada “yüzey pürüzlülüğü-kaplama süresi (Ra-time)” grafiğinde eğrinin devam etme karakteri ile belirlenebilir. Bir maksimum noktadan sonra düşüşe geçmesi (Şekil 3.12.), prosesin artık kütle transferi yapmadığı erosiv plazmadan ziyade uç noktaların, tepelerin törpülediği anlamına gelir. Sübjektif olarak kaplama esnasında çatlağın tam başladığı zamanını kaplama prosesin sesinin farklılaşmasında da anlayabiliriz (zaten küçük enerjiler için grafiklerden anlamak çok zor, nerdeyse değerler hep sabit). Ayrıca ikinci ve sonraki kaplama tabakaların oluşumu esnasında spark discharge ın boyutlarının bir miktar artması ile kaplama yapılan elektrotun kesit yüzeyinin artmasında bize ipucu verir

(plazma boyutlarının artması ile plazmanın temas yüzeyi de artar). Bununla beraber kaplamadaki çatlakların tam başlangıç anını tespit etmek, relatif kütle transferi katsayısı-zaman grafiğinde eğrideki bir değişim anı ile de mümkün olabilir.



Şekil 3.12. Yüzey pürüzlülüğünde maksimum bir değerden sonra keskin bir düşüş ESD kaplama prosesin sona erdiğinin belirtisidir.

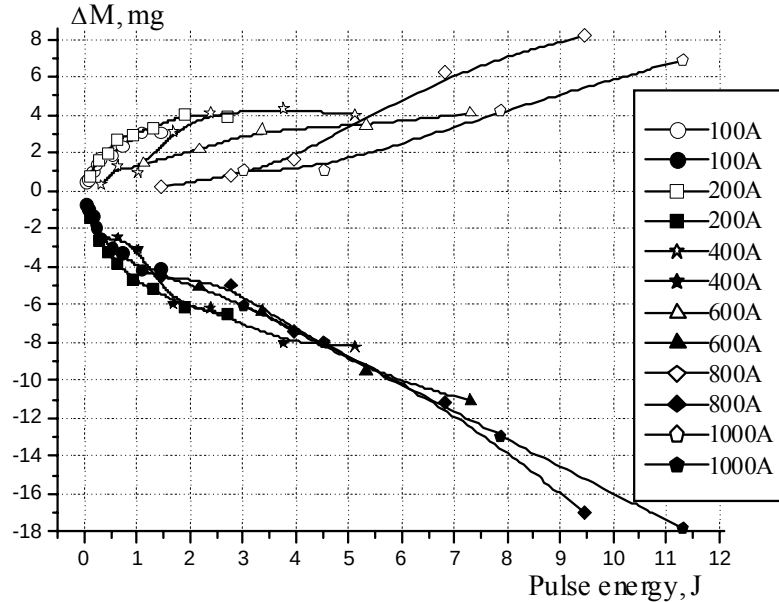
Bu bağlamda, ESD teknolojilerine önerilen önemli tavsiyelerden biri kaplamada çatlak oluşumu başlayana kadar küçük enerjiler ile mümkün olduğunca kaplama tabakasının yapılmasına devam edilmesidir. Ayrıca şuda bilinmelidirki, kaplamada yapılabilecek kaplama miktarı (kaplama tabaka sayısı) nın ESD prosesin parametrelerinden olan ortalama akımdan bağımsız olmasıdır. Fakat kaplama yapmak için kullandığımız herhangi bir ESD ünitenin impulse elektrik parametreleri hakkında bilgi sahibi olmamız ESD teknolojisinin bu ünitelerin elektrik rejimlerine bağımlılığını ortadan kaldıramaz. Çünkü bu ESD ünitelerin ortalama akımlarında üniteden üniteye büyük fark olabilir. Deneylerin de gösterdiği gibi, incelediğimiz bir aralıkta kullandığımız impulse elektrik parametreleri için kaplama tabakasının 1. ya da 3. tabakasında arasında çatlak başlangıcı görülebilir (0.03 Joule için). Bizim yapacağımız kaplamanın tabaka sayısını belirleyen, çatlak başlangıç anı, yani altlık dan buharlaşma olayının meydana gelmeye başladığı andır.

Şurası göz önüne alınmalı ki, ESD proseste harcanan elektrik miktarı sabit tutulurken (bizim çalışmamızda bu değer 3 Coulomb), birinci katmanın alaşımlanma zamanı (tarama süresi) ESD için kullandığımız impulse parametrelerine bağlı olarak değişebilir. Örnek olarak büyük enerji miktarları için 20 sn, küçük enerji miktarlarında ise 70 sn dir. Deneyler gösteriyor ki, tek (single) discharge kullanılarak eroziv kütlenin kaplandığı alanın farklı boyutlarda olmasının sebebi sadece transfer

olan kütlenin miktarının artması değildir. Ayrıca katodun üzerindeki discharge spot un boyutlarının belirli miktarda artması ve bu spot un eroziv kütle ile doldurulma mekanizmasının bağlı olduğu impulse uzunluğu (duration time) ile akımın şiddetinin de artmasıdır.

ESD şartlarının değişmez olduğu durumda ikinci ve daha fazla tabakanın kaplanmasında elektrotların kütle değişiminin nonlinearlığı ve impulse parametrelerin değişken şartlarında da bu nonlinearlığın farklı düşmesi (rejimin farklılaşması), bizim bu kaplama prosesin kütle karakteristiğini mukayese edebilme imkânımızı engeller. Bu mukayese sadece ilk tabaka kaplandığı sırada elde edilen sonuçlar ile mümkündür, katod malzemesinin özellikleri değişmemekte, aynı kalmaktadır ve anodun kütle kaybı karakteristiği ile katodun kütle kazanımı lineerdir.

İmpulse enerjinin artması ile birlikte anodun erozyonu ve katodun kütle kazanma miktarı lineer kalmaz; özellikle başlangıç kısmında, anodun kütle erozyonu ve katodun kütle kazanımı spark proste harcanan elektrik enerjisine bağlıdır, anotta yaklaşık 10-12 mg/J ve katot da 9 mg/J kadardır (0.25 J enerji miktarı için). Şekil 3.13. de de bu gözlemlenmektedir.



Şekil 3.13. Farklı pulse enerjilerinin kullanıldığı bir kaplama prosesinde her 30 sn sonra ki katot da ve anot da kütle değişimi değerleri [Ribalko, 2006].

İmpulse ın enerjisinin 1J den fazla olduğu durumlarda, spark proses üzerinde harcanan birim enerji için anottaki kütle kaybının miktarı 1.42 mg/J seviyesinde stabil olur (eğim sabit, x eksenini ile yapılan açı 1J den sonra 1.42 de sabit olur). Enerjinin bileşenleri, akım şiddeti ve pulse uzunluğu (duration time) miktarların değişimi ile özellikle başlangıç kısmında anottaki kayıp kütle miktarı değerleri ortalama değerlerin oluşturduğu bir çizgiden çok az miktarda bir sapma verir. Bununla birlikte katodun aldığı kütle ise impulse enerjisiyle değişimi grafiklerinde, bu sapmalar (artma-azalma) özellikle küçük süreli pulse lar kullanılırsa 200A den fazla akımlı impulse lar için oldukça büyüktür. Örneğin 1.5 J enerjili impulse ların kullanımında, 200A, 400A, 600A ve 800A akım lar için katodun aldığı kütle değerleri 3.5, 2.5, 1.7 ve 0.25 mg dır (buna göre enerjinin sabit tutulduğu durumda, küçük pulse süreleri için büyük akımlı impulse lar daha uygundur). Bu veriler birbirinden 14 kat fark oluştururken, bu esnada anottaki erozyon miktarları sanki birbirinden önemsizce farklıdır. İlk kaplama tabakasında katoda transfer olan kütledeki kaybın sebebi, alaşımlamada büyük akımlı (200A den fazla) impulse lar kullanıldığında spark discharge plazma altlık malzemeyi buharlaştırıp etrafa sıçratır (washing away) ki bu olaya doğal olarak spark kanalındaki çok şiddetli gaz dinamiği prosesi de eşlik eder (akım şiddeti ne kadar büyükse o kadar şiddetli gaz dinamiği etkisi olur ve bu gaz dinamiklerinin etkisi de o derecede plazmayı genişletip, basınç ile etrafa saçılan malzeme miktarını arttırır). Bu saçılmanın (washing away) derecesi, impulse parametrelerine yani impulse akım – zaman grafiğinde başlangıç kısmındaki akımın eğimi ile (akımın artma hızı) ilgilidir. Büyük akımlı küçük impulse süreli pulse lar için (yani yüksek eğim) işlem elektrotundan altlığa kütle transferi gerçekleşmeden önce altlık yüzeyinden etrafa sıçratılan kütlenin miktarında büyük artış olur, büyük miktarda altlık malzemesi kütle transferinden önce buharlaşıp etrafa saçılır. Pulse sürelerinin nın artması (pulse uzunluğunun artması) ile de altlığın kaybettiği bu malzeme miktarında anottan transfer olup gelen malzeme miktarına göre azalma olur (çünkü washing away çoğunlukla pulse ın başlangıcında olur).

Bu sonuçlara göre, ilk tabakanın oluşturulmasında yukarıda bahsedilen koşullardaki impulse elektrik parametrelerinin kullanılması durumunda yapılan bir ESD kaplamada prosesin verimliliğinin tesbiti için kütle transfer katsayılarından faydalanmak tamamen doğru olmaz.

Oluşan yüzeydeki pürüzlülüğün karakteri (geometrisi) ve miktarı, spark discharge prosesin plazma içindeki gaz dinamikleri ve anottan transfer olan kütle ile doğrudan ilgilidir ve çoğunlukla pürüzlülüğü, ilk tabaka kaplanırken gaz dinamikleri daha sonraki tabakalar kaplanırken de anottan düzenli transfer olan kütle belirler. Küçük enerjili impulse ların kullanıldığı ESD proste katod üzerindeki kütle transferi oluşum mimarisi krater karakterlidir. Pulse enerjisinin artmasıyla birlikte bu kraterlerin kenarları büyür ve pürüzlülük miktarının aniden artmasına neden olur. Fakat katot üzerinde üstten leke, yandan görünüşü bir krater gibi duran bu katılaşmış splash ların görünüşü impulse enerjisinin daha da artması ile birlikte değişir. Çünkü ESD proste büyük impulse enerjilerin kullanıldığı belli bir aşamada, spark discharge ın sona ermesinden sonra anottan gelen eroziv kütle ile bu kraterlerin iç kısımları dolmaya başlar, dolayısıyla artık bu kraterlerin yandan görünüşleri düzleşme eğiliminde olur. Çünkü artan enerji ile transfer olan sıvı haldeki eroziv kütlenin viskozitesi artan sıcaklıkla düşer ve daha vıcık haldeki bu splash dahada yüzeye düzgünce yayılır. Neticede artan pulse enerjisi ile pürüzlülük değerlerin de bütünüyle azalma görülür.

Kaplama süresinin çatlak başlangıcının oluşum anı ile sınırlandığı şartlar altında yapılan bir kaplamada, muhtemel ortalama kaplama kalınlığı üzerine literatürdeki [Ribalko,2002-2005] bilgileri kısaca aşağıdaki gibi özetleyebiliriz.

Kaplamadaki tabaka sayılarının dolayısıyla kaplamanın ortalama kalınlığının çatlak oluşumu problemi ile bağlantısı yüzünden sınırlı olması koşulu göz önünde bulundurursak, geleneksel yöntemlerdeki yaklaşımlarla anottan erozyon olan kütle miktarı ve onun katoda transfer olan miktarının doğrudan arttırmanın imkanı olamayacağı aşıkardır.

Sadece tek bir tabakanın kaplandığı alaşımlama durumunda, yapılan kaplamada elde edilebilir ortalama kalınlık miktarı sadece en yüksek spot (splash) tepenin muhtemel (örnek 180 μ m) kalınlık miktarı ile ve ayrıca spotun kenarında oluşan kalınlık (buda 20 μ m aşmaz) miktarı da göz önüne alınarak belirlenir. Doğal olarak, bu düzensizliği (max ve min değerlerin dağılım aralığı) bir şekilde azda olsa giderilse, örneğin bu spotların birbiri üstüne gelmesinin (overlapping) derecesini değiştirmekte oluşan kaplamanın ortalama kalınlığını belirli bir miktarda arttırmak

mümkündür. Fakat daha önceden de belirtildiği üzere, kütle transferinin olduğu belli bir noktaya yüksek ısı kütlelerin aşırı derecede transferinin o noktada aşırı ısı birikmesine yol açacağı ve bununda buharlaşma prosesini başlatacağından dolayı bahsettiğimiz kalınlık arttırma imkanları üzerinde daha başka denemeler ve çözümler getirmek gerektirmektedir.

Açıkça anlaşıyor ki, düzgün ve daha geniş boyutlarda, kontrollü yerleşmiş spot (splash) lar dan oluşan üst üste kaplama tabakalarının elde edilmesinin ancak otomatik sistemlerin kullanılması yoluyla yapılan yüzeydeki taramalar (elektrotun altlık üzerinde kaplama esnasında gezdirilmesi) ile mümkündür.

İncelediğimiz akım impulse ları aralığında, alaşımlamada yaklaşık 1000µs pulse süreli impulse ların kullanılması durumunda kaplamada köpüksü bir yapıda tabaka elde edildiği görülmektedir (kaplama tabası içinde altlık malzemeye kadar kaynamadan kaynaklanan içi boş baloncuklarından oluşmuş bir yapı). Hatta sıklıkla, altlıkta bile karşılaşılmaktadır. Bizim düşüncemize göre, oluşan bu köpüksü kaplamanın mekanizması şu şekilde açıklanabilir; impulse ın pulse süresinin belli bir değerine kadar, katot üzerine anottan yeteri kadar büyük bir miktarda aşırı ısınmış kütle transferi zaten yapılmıştır ve impulse devam ederken spark kanalından gelen ısının devam ediyor olması, aşırı bir şekilde ısınmış transfer olan anot kütlesi ile birlikte katodun üst yüzeye yakın bölgesinin aşırı ısınmasına ve onun kaynamasına neden olmaktadır. Alaşımlamanın buna benzer rejimlerinde, kaplamanın üst yüzeyinden 1000µm mesafeye kadar belirli bir miktarda termal sertleşme oluşur.

400µs den daha fazla pulse sürelerinin kullanıldığı alaşımlama prosesi spark kanalından yayılan bir ultraviyole radyasyonun oluşmasına neden olur ki buda kaplamayı yapanın fonksiyonuna rahatsızlık (verimsiz çalışmasına) veren özel bir uygunsuzluklar yaratır. Böyle bir durum, yüzeyin kaplanması esnasında kontrollü bir şekilde spotların süperpoze edilmesini sınırlar. Sonuç olarak alaşımlama yapan kişi açısından prosesin impulse elektrik parametrelerinin bu aralığı (400-1000µs) proses için uygun değildir.

3.3.1. Bulgular:

1. Bir tabakanın ESD ile alaşımlama prosesinde özel bir zamanda tabakanın içinde kusurlar (çatlak, kaplamanın harap olması, kırılma) meydana gelmektedir. Spark discharge ın etkisi altında bu bozulmanın oluşma nedeni kaplamanın yüzeyi üzerinde yüksek ısı bir alanın oluşmasından dolayıdır. Yapılan kaplamanın kalitesinin korunması amacıyla kaplama prosesi bu anda durdurulmalıdır. Bu nedenledirki üst üste (overlap) tabaka konma sayısı sınırlıdır ve ayrıca transfer olan kütlenin miktarı dolayısıyla da superimpose tabakaların kalınlığı da sınırlı kalır. Bu zamana kadar (kusur oluşana kadar) oluşan yüzey pürüzlülüğü de düzenli kütle transferi ile uyumludur.

2. İlk tabakadan sonraki alaşımlama sürecinde anottan erozyon olan kütlenin miktarının nonlineer azalmasının sebebi, süperimpose tabakaların kalınlığının tabaka sayısının artmasıyla birlikte düşmesidir. Bu yüzden, bir numunenin yüzeyi üzerinde defalarca (kat kat) kaplama yaparak kaplama kalınlığını aşırı arttırabilme metodu her zaman geçerli değildir. Pulse enerjisi küçük olan enerjilerde, harcanan birim enerji için anotta erozyon olan kütle miktarı oranı, $\Delta m_a / \text{enerji}(j)$, büyüktür.

3. Kaplamanın kalınlığı ile ilgili veriler ve oluşturulan kaplamanın morfolojisinin analizlerinden yola çıkarak, şiddetli bir radyasyon oluşturmadan kaplama prosesinin tam gerçekleşmesinin metodu; manüel yapılan ESD kaplama için pulse sürelerin 400µs ile ve akım şiddetlerinde 400A e kadar bir sınırlandırma ile prosesi gerçekleştirmektir (hatırlarsak, şiddetli radyasyonun sebebi elektromanyetik geçiş prostesten termal geçiş prosese devam ederken, elektron sayıları azalırken iyon sayıların artmasıydı).

4. Enerji miktarı büyük impulse ların kullanıldığı alaşımlamalarda sadece bir tabaka kaplamak mümkündür. Oluşturulan kaplamanın ortalama kalınlık seviyesini arttırmak için bu kaplama da ancak kullanacağımız bir bypass zaman taramalı sistem vasıtasıyla overlap eden spotların (splash) doğru seçilmesini ve yerleşmesini sağlayabiliriz. Böylece yapılan kaplamanın ortalama kalınlığını belirgin bir şekilde arttırabiliriz (her hat boyunca ileri, geri gidip gelebilen, spark discharge sayılarına

göre yüzeyin otomatik olarak tarandığı bir sistemle üst üste binecek spotlar öyle bir yerleşir ki daha önce koyulan spotların aralarına düşüp buradaki boşlukları örter ve doldurur). Ayrıca kaplamanın minimum olduğu yerdeler de de kaplama kalınlığının bir miktar artması yoluyla da aynı anda pürüzlülük seviyesini azaltabiliriz.

5. ESD prosesin teknolojik karakteristikleri üzerinde spark discharge içindeki plazma geçiş proseslerin önemli etkisi olduğu anlaşılmıştır (özellikle elektrotlar üzerindeki termal geçiş prosesin etkisi). Bu etkiden faydalanılarak, jeneratörün discharge devresindeki elektromanyetik geçiş prosesin karakteristiklerinin kontrol edilmesi yoluyla alaşımlama prosesin parametrelerini ayarlamak mümkün olabilir (plazma geçiş proseslerin kontrolü ile ısı akısı yoğunluğunu ve böylece prosesin karakteristik özelliklerini ayarlayabilmek).

3.4. Genel Bulgular:

ESD teknolojisi ve teçhizatı alanındaki şimdiye kadar yapılan yeni gelişmelerin bir analitik özetini çıkarırsak, aşağıdaki genelleştirmeleri yapabilmemiz mümkündür.

İlk ESD ekipmanların oluşturulduğu günden günümüze kadar, geleneksel olarak, oluşturulan kaplamanın özelliklerine etki etmenin en basit ve en kolay yolu çeşitli işlem elektrotu malzemesinin kullanılmasıydı. Bu sonuç, farklı malzemeli elektrotları değiştirmenin pratik oluşundan ve ayrıca deposit edilecek malzemelerin çok çeşitliliği sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu ekipmanların spark kanalında yaydığı pulse enerjisinin parametrelerini değiştirebilme imkanı o günkü şartlarda yok denecek kadar azdı. Bu nedenle ESD metodun yaygın bir şekilde uygulanabilmesi ve bilimsel olarak gelişebilmesi sınırlı kaldı ve yapılan kaplamanın karakteristiğine etki etmede kullanılan birbiri ile bağlantılı bu her iki yöntemin uygulanabilme imkanları açısından aralarında belirgin bir fark oluştu (elektrik parametrelerini değiştirme metodundan ziyade daha çok elektrot malzemesini değiştirme metodu üzerinde durulmuş). Bizim bakış açımıza göre, ikinci yöntemin yani elektrik parametrelerini değiştirme yöntemi üzerinde durulmayınca bu metodun bütünüyle geliştirilebilme imkanlarının sınırlı kalmasına yol açmıştır. Aslında günümüzdeki ekipmanlar ile impulse elektrik parametrelerinin geniş bir spektrumda geliştirilebilmesi, spark discharge daki plazma geçiş proseslerine etki edebilme perspektifini bize sunacaktır ve doğal olarak bu bize elektrotlara ısının verilme şekline, onların erozyonuna, anottan katoda kütle transferinin karakterine yani yapılan kaplamanın fiziko-mekanik karakteristiklerine etki edebilme imkanını tanıyacaktır [Ribalko,2003;1998].

Açıkça görülüyor ki ESD prosesin verimliliğini arttırmak için daha önceleri kullanılan geleneksel metotta ki gibi çok küçük akımlı rejimlerde (yaklaşık 20-30A pulse akımlı kaplamalarda) ve periyodik olarak elektrotların temas ettirilerek spark kanalı oluşturma fikrin (ideolojisini) den özellikle vazgeçmek gereklidir (çünkü elektrot holder'un frekansı ile elektromanyetik geçiş proses aralığında bize bu istediğimiz impulse ları oluşturabilme imkanını vermez). Elektrot tutucu sistemin titreşim zaman aralığı bize herhangi bir anda pulse oluşturabilme imkanı vermelidir.

Aksi takdirde pulse ın oluşumu esnasında spark kanalı kısa devre olur ve istenen pulse değerinden sapma, akım da ani artış olur. Böyle sistemlerin analojisi, kendi eksenini etrafında dönen disk şeklindeki katot, ileri-geri hareket ettirilen anot elektrotlar ya da kendi eksenini etrafında dönen anot ile sabit katot elektrotlar şeklindeki gibi olup, ESD uygulamalarında pratik olarak genişçe uygulanabilmektedir. Bu sistemin avantajı daimi bir kontak var ve aşırı ısınma yok. Bu tip benzer ekipmanlar ile katot yüzeyi üzerinde elektrotlardan herhangi birinin osilasyonu ile katot-anot arasındaki spark kanalını oluşturma şartlarını yerine getirebiliriz. Ayrıca katot yüzeyinin anoda en yakın noktasının temas edip patlatılmasıyla da mikro-pürüzlülük şartları da sağlanmış olur. Alaşımlamanın devamlılığı için gereken elektrik kontağının sürekliliği de katodun üzerinde işlem elektrotunu kaydırarak korunmuş olur [Ribalko,2000].

İmpulse jeneratör devrelerin analizlerine tekrar bir göz atarsak, devredeki kapasitörde biriken charge voltajın miktarını değiştirmek ile değişik kaplama rejimleri için impulse enerjilerin miktarını değiştirmenin mümkün olduğunu hatırlarız. İmpulse enerji (E) devredeki kapasitörün sığası (C) ve uygulanan charge voltajı (U) ile doğru orantılıdır [3.1.].

$$E = \frac{CU^2}{2} \quad (3.1.)$$

Kurulu devredeki kapasitörü değiştiremeyiz (C=3Coulomb, sabit) fakat kapasitör üzerinden U^2 bileşeninde değişiklik yaparak impulse elektrik parametrelerini kontrol edebiliriz. ESD proses de hassas rejimlere doğru geçerken, voltajın azalması ile birlikte (impulse enerjisi azalmakta) pulse akımın artış hızı da azalmaktadır. Nitekim ESD proses esnasında spark discharge üzerindeki voltaj düşmesi (spark gap daki direnç ten dolayı) değişmez sabit kalırken, kapasitördeki charge voltajı azalır ve böylece spark discharge üzerindeki voltaj düşmesinin (U_s) kapasitör üzerindeki voltaja (U_c) göre oranı gittikçe artar hale gelir. Bu olay spark discharge da serbest bırakılan enerjinin dinamiğinin azalmasına yol açar. Bu nedenle spark discharge ı oluşturma ve onun sürekliliğini sağlama imkanları açısından problem oluşturur (olması gerekenden daha düşük spark discharge enerjisi, sparkın meydana gelme ihtimalini ortadan kaldırır).

Bu durumda çalışılan (uygulanan) voltaj değerini değiştirmek yerine onu sabit bırakıp pulse uzunluğunu değiştirmek ile enerji miktarını kontrol etme yolunun tercih edilmesi daha makuldür. Böylece spark kanalın oluşma şartları ve bir akım pulse ın varlığının devam etmesinin sağlanması şartları açısından belirgin bir şekilde iyileşme sağlanacak ve neticede ESD prosesin verimliliği de artmış olacaktır. Ancak bu yol bize mevcut her ESD ekipmanı için verilen enerjinin parametrelerini çok geniş bir aralıktaki kontrol etme imkanını bize vermez. Buna rağmen bu ekipmanların kabiliyetlerinin analizi, bize onların en önemli noksanlıklarını belirleme imkanını sağlamış ve ayrıca impulse ların oluşturulma ve onların sürekliliğini sağlanması konusunda yeni fikirler sunmuştur.

Pulse enerjisinin artması ile birlikte kaplama süresi boyunca pürüzlölük de artmaktadır ve doğal olarak ESD proses için R_a değerleri büyük bir aralıktaki oluşmaktadır (R_a -kaplama zamanı grafiklerinde, artan pulse enerjisi ile R_a eğrileri yukarı doğru öteleme yapar). Fakat bu istenmeyen teknolojik bir faktördür. Pürüzlölüğü azaltmanın ESD dışında da çeşitli yolları vardır. Fakat bunların hepsinin ortak noktası katoda alaşımlama yapıldıktan sonra yani ESD procesten sonra uygulanan pürüzlölük azaltıcı işlemlerdir (silindir ile ezmek gibi). Nitekim bu istenmeyen olay ESD metodunun kendi özelliği olup bunu gene ESD metodu içinde bir takım yollar ile gidermek gereklidir. Bizim alışmamızda da bu proses ile birlikte giderilmeye çalışılan bir başka problem gözü ile bakılmaktadır.

3.5. Araştırmanın Amacı ve Yapılması Düşünülenler:

i) Discharge devresinde yüksek dinamik pulse karakteristikli ve minimum RLC değerlerine sahip yeni ESD kaplama proses ünitesi oluşturmak. Ayrıca bu üniteyi akım impulse ların elektrik parametrelerini (akım şiddeti, pulse süresi ve enerjisi) ve bu pulse lardan grup pulse ları oluşturabilmeyi, onların sıralanışını ve aralarındaki bekleme süreleri düzenlemek için destekleyen bir yazılım programın geliştirilmesi.

ii) Grup pulse ların kullanımı durumunda, elektromanyetik geçiş proseslerin ve elektrotlardaki termal geçiş proseslerin zaman içinde süperpozisyonu (üst üste binmesi) prensibi ile anodik eroziv kütle miktarını arttırma metotlarını incelemek ve geliştirmek. Grup pulse lar kullanımında başlangıçtaki pulse eroziv kütlenin artması için büyük enerjili seçilebilir. Mesala önce overlap sonra pulse grup gerçekleşmeli (başlangıçta önce termal sonra elektromanyetik geçiş prosesin çalışması gibi).

iii) Grup impulse larını kullanarak öncelikle anottan eroziv olan kütlenin katoda polar transferini sağlamak bunun dışında ikinci hedef olarak katoda transfer olan bu kütlenin ESD ile yüzeyleri kaplarken aynı anda oluşan pürüzlülüğü elektroeroziv aşındırma ile düzeltmek. İki hedefinde aynı anda teknolojik bir uygulama içinde kullanımını geliştirmek ve incelemek.

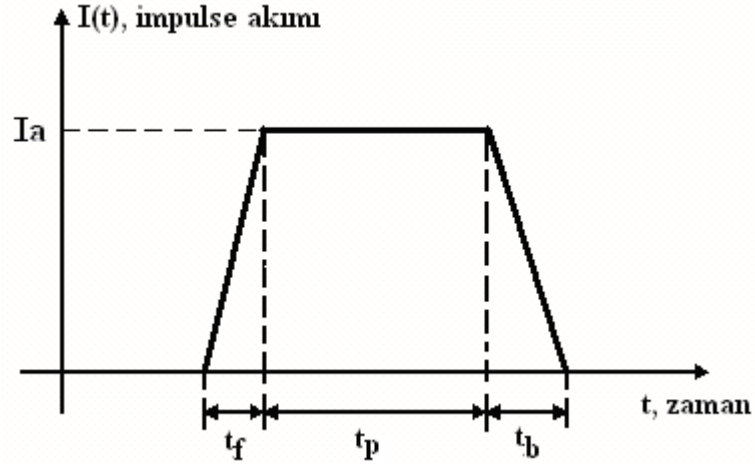
iv) Değişik fonksiyonlara hitap edebilen (içeren) pulse grupları kullanarak ESD alıştırma yoluyla, metal yüzeylerin birçok özelliklerini teknik açıdan tek bir etkiyle yüzey modifikasyonu değiştirebilme fikrini iyileştirmek ve bunu geliştirmek. Bunların sanayide uygulanabilirliği için de öneriler sunmak

4. ARAŞTIRMANIN METOTLARI ve EKİPMANLARI

4.1 Spark Kanalında Spark Enerjiyi Oluşturan Prosesin Elektrik Parametrelerinin Araştırılması.

ESD prosesini karakterize eden ilk iki parametrenin sabit tutulduğu yani aynı ortam (atmosfer) ve aynı anot elektrot, aynı katot elektrot çiftinin kullanıldığı ESD prosesi durumunda meydana gelen erozyon miktarı, spark kanalında oluşturulan (verilen) enerjinin miktarı ve bu enerjinin onun oluşturulma dinamiği ile belirlenir [Namitokov,1978]. Açıkçası ESD prosesinin teknolojik özelliklerini bu parametreler belirler. Bu parametreleri kontrol etmek için kullanılan cihazların tüm rejimleri için spark kanalında verilen bir enerjinin nasıl ve hangi kurala göre oluşturulduğu hakkında yeterli derecede bilgi ve veriye sahip olmak gerekir. Aksi takdirde aynı vasıflardaki ekipmanları içermesine rağmen cihazdan cihaza aynı özelliklerin, aynı sonuçları sağlayıp sağlamadığının kesin kontrolü yapılmadan, dengeli, uygun ve yararlı tipik bir ESD teknolojisini geliştirmek ve çoğaltmaktan (*sanayiye benzerlerini üretmek* gibi) bahsedemeyiz. Maalesef, bu tip ekipmanların teknik kullanım kılavuzlarında bu konuda açıklayıcı bilgiler verilmiyor. Bu nedenle, bizim görüşümüze göre bu ekipmanların üreticileri bu alışımlama yönteminin kullanımının yaygınlaşmasını sınırlandırmaktadır. Öncelikle bu impulse elektrik parametrelerin ölçüm tekniğini ve akım impulse miktarının artma, azalma dinamiğini belirleyici roldeki devreyi oluşturan parametrelerini detaylıca bir gözden geçirmek gerekir.

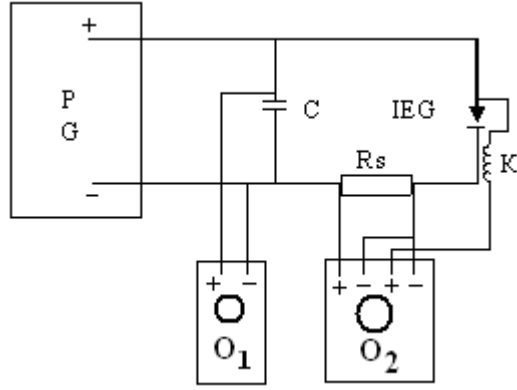
Kanitatif büyüklük olarak, akım pulse (I), voltaj (U) olup bunların maksimum değerleri (I_a) ve (U_a) ile ve zaman karakteristikleri, impulse süresi t_p , pulse ın ön kısmı yani pulse oluşum süresi t_r ile ve arka kısmı yani pulse ın sona erme süresi t_b ile ifade edilmektedir (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Bir pulse akımını çevrimini tamamlayan zaman evreleri; akımın maksimum değeri I_a oluncaya kadar geçen süre t_f , akımın tekrar sıfır değerini alıncaya kadar geçen süre t_b ve aradaki pulse akımının maksimum değerde etkin olduğu zaman aralığı t_p dir.

Akımın artış hızı performans konsepti ön taraftaki eğim miktarıdır ($\Delta I / \Delta t_f$). Bir pulse ın arka arka tekrar etme hızı yani onun frekansı f , periyodu T ($f=1/T$) dir. Toplam pulse süresi $T_p = t_f + t_p + t_b$ toplamıdır. Pulse lar arası süreye de T_{pause} dersek rölatif pulse süresi $q = T/T_{\text{pause}}$ ve $f = 1 / T = 1/q.T_{\text{pause}}$ dir. Bu gösterilen spesifik parametreler bir impulse ın enerjisini, W , belirler. Bizim için gerekli enerji miktarını tespit etmek (ölçmek için) akım değeri $I(t)$, spark kanalındaki voltaj düşmesi $U_s(t)$ ve kullanılan kapasitördeki charge voltajını ölçmek için osiloskop cihazları kullanırız. Ölçüm cihazları Şekil 4.2. de gösterildiği gibi impulse jeneratörlerine bağlanır. Şekil 4.2. de görülen impulse jeneratörlü basit bir RC devre veya charge, discharge devreleri birbirinden bağımsız (transformatörlü, tristörlü veya transistor lü) bir impulse jeneratör devresi olabilir (Bkz. Bölüm 3.2.2).

Charge devresindeki voltaj parametrelerini ölçmek için O_1 osiloskopu ve discharge devresindeki enerji parametrelerini tespit etmek için de iki çıkışlı (probe lu) O_2 osiloskopu kullanılır.



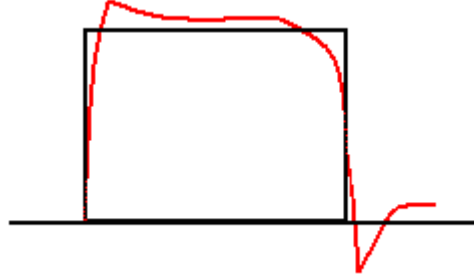
Şekil 4.2. Charge ve discharge devreleri birbirinden bağımsız bir impulse jeneratör devresi ve impulse parametrelerini deneysel olarak ölçen cihazların bağlantı şeması.

Pulse süresinin çok kısa (10^{-4} s) fakat akım şiddetinin çok yüksek olduğu durumu göz önünde bulundurursak, verilen enerjinin karakteri hakkında güvenilir data elde etmek bir sorundur. Bu problem, spark aralığında akım ve voltaj değerlerini saptamak istediğimiz zaman ortaya çıkan ve dinamik hatalar adı verilen bir takım ölçümlerin varlığından kaynaklanmaktadır. Bu durumda akım osilosgrafları için voltaj düşümü değerlerini tespit edip hesaba katmak gerekir. İnceleme altındaki devrenin belli bir kısmının sinyal ölçümünde, EMF (Electro Magnetic Force) öz indüksiyonun belirgin şekildeki katkısını azaltılmalı ve bunun için düşük indüktif sargılı bir Shunt (R_{Sh}) osiloskopa bağlanılır. Bildiğimiz gibi voltaj değeri ve çalıştığımız devrenin indüktansı (öz indüktans, L) artan akımın bir fonksiyonu olarak aşağıdaki ilişki ile bağlıdır [4.1.]; (buradaki indüktans katkısı U , bizim için istenmeyen bir değerdir ve mümkün olduğunca azaltmak gerekir)

$$U = -L \frac{di}{dt} \quad (4.1.)$$

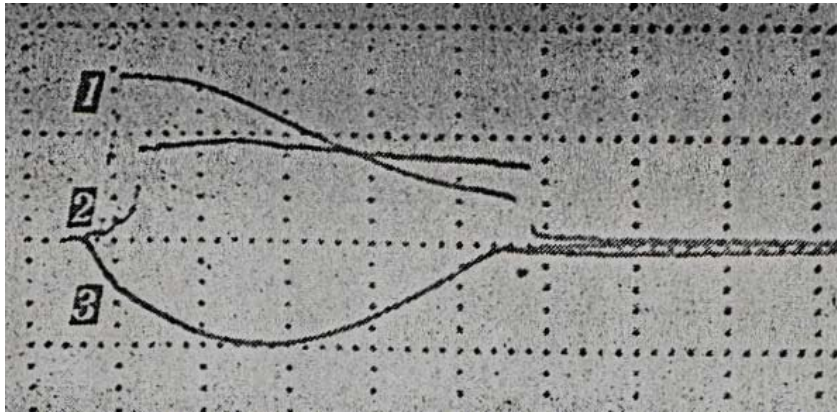
Spark aralığında voltaj düşümü hakkında bilgi edinirken ortaya çıkan ölçüm hatasının ana katkısı discharge devresi kısmındaki öz indüksiyon EMF tarafından verilmektedir. Buna ölçüm devresinin aktif direncinin katkısı olan voltaj düşmesi de dâhildir (discharge devresinin ölçüm kısmındaki giriş sensörüne bağlanan anot ve katot uçlarının bağlantı kısımlarını da içerir).

Elektrospark proses koşullarında, incelediğimiz devrenin indüktans değeri dikkate alınmayacak kadar küçük olsa bile, toplam ölçüm içindeki EMF özindüksiyon sinyalinin etkisi hayli yüksektir (akım değerinin hızlı artmasından dolayı, di/dt nin etkisi). Bu sadece ölçülen akımın değerini bozmaz, ayrıca pulse ın şeklini de bozar (Şekil 4.3.).



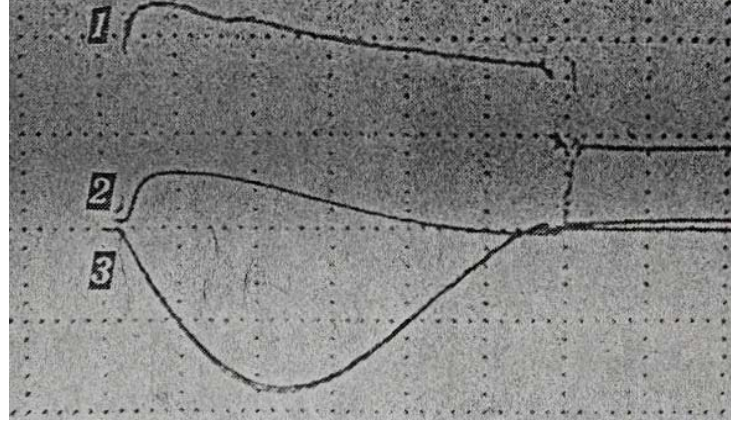
Şekil 4.3. EMF özindüksiyon sebebiyle değişen akım ve şekli bozulan pulse

Bu mahsuru gidermek amacıyla ölçülen değere onun katkısını elimine etmek için telafi edici K bobininin (sargı) ilave edilmesine ihtiyaç duyulur (Şekil 4.2.), ya da IEG de ki kısa devre halinde emisyon edilen enerjinin aynı miktarı hesaba katılır [Ribalko,1988]. Şekil 4. de spark kanalında voltaj düşümü için özindüksiyonun telafi edilmiş ve telafi edilmemiş olan voltaj grafiği gösterilmektedir.



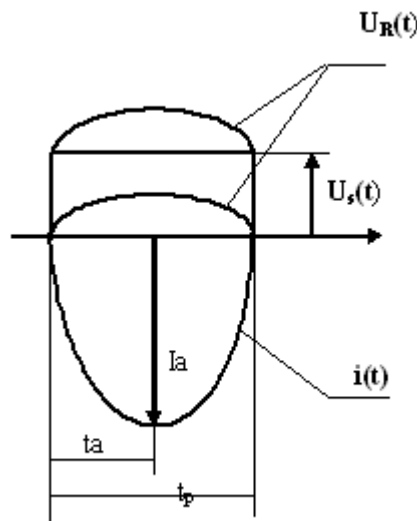
Şekil 4.4. Osilosgram üzerinde, spark kanalındaki gerilim düşmesine ait ölçülen sinyale EMF katkısının telafi edilmesi gösterilmektedir (birim ölçek için, $U = 20V$, $I = 500A$ ve $\tau = 20\mu s$ dir). Burada (1) devredeki voltaj grafiğinde gerilim düşmesini, (2) gerilim düşümünün telafi edilmiş halini ve (3) devreden geçen akımın grafiğini ifade etmektedir [Ribalko,1988].

Şekil 4.5. deki osilosgram da bu EMF etkinin katkısı açıkça deneysel olarak gösterilmektedir. (1) ve (2) ile sınırlı aradaki alan spark kanalındaki gerilim düşmesindeki farkı ifade etmektedir.



Şekil 4.5. Osilosgram, EMF özindüksiyon değerinin belirlenmesi imkanını ve spark kanalının kapalı (kısa devre) olduğu durum için (2), ölçülen sinyalde toplam gerilim düşümünün hesaba katıldığı durum için (1) onun karakterinin değişimini göstermektedir. Devredeki akımı (3) ifade etmektedir (birim ölçek için, $U = 20V$, $I = 500A$ ve $\tau = 20\mu s$ dir) [Ribalko,1988].

Benzer şekilde ölçülen sinyalden aktif dirençlere karşılık gelen $U_R(t)$ voltaj düşümünü aynı şekilde çıkartılır (Şekil 4.6.).



Şekil 4.6. Osilosgram, akım $I(t)$ ve spark aralığındaki gerilim düşümünü $U_s(t)$ göstermektedir.

Spark'ı direnç gibi farz edilirse,

Ohm yasasına göre devredeki toplam gerilim $U = I.R$,

U_S : spark kanalındaki gerilim,

U_R : devredeki aktif dirençler üzerindeki gerilim dersek

$U = U_S + U_R$ ve herhangi bir t anındaki spark kanalındaki gerilim,

$U_S(t) = U(t) - U_R(t)$ dir.

Bundan sonraki aşamalarda enerjinin karakteristikleri aşağıdaki adımlar ile saptanır.

1. Önce kapasitörde biriken enerji miktarının hesaplanması gerekir. Kapasitördeki charge voltajının (U_w) tespit edilmesi O_1 osiloskop un yardımı ile belirlenir (Şekil 4.2.). Daha sonra bu ölçülen değeri kullanarak, biriken elektrik enerjisini denklem ile [4.2.]saptanabilir,

$$W_C = \frac{CU_w^2}{2} \quad (4.2.)$$

2. Pulse aksiyonu sırasındaki elektromanyetik transient proseslerin oluşturduğu enerjinin parametreleri olan akım $I(t)$ ve spark arağındaki voltaj düşmesi $U_s(t)$ O_2 osilaskopun (Şekil 4.2.) hafızasına aldığımız kayıtlardan (osilosgramlardan) faydalanılarak tesbit edilebilir.

Kayıt edilen osilosgramlardan şu değerler saptanabilir;

pulse ın süresi, t_p (sn)

akımın amplitude değeri (genliği), I_a (Amper,A)

$$I_a = \frac{U_{ashunt}}{R_{shunt}} \quad (4.3.)$$

U_{ashunt} ; shunt deki gerilim düşmesinin amplitude (genliği), (Volt,V)

R_{shunt} ; shunt ün direnci, (Ohm)

t_a ; akımın amplitude (max) değerine ulaşması için gerekli zaman, (sn)

3. Teorik olarak spark aralıkta verilen (harcanan) W_p enerji, denklem [4.4.] deki gibi pulse akım ve voltajının pulse süresi (t_p) boyunca entegrasyonudur;

$$W_p = \int_0^{t_p} U_s(t) i(t).dt \quad (4.4.)$$

ESD prosesi ile ilgili birçok sayıdaki cihaz üzerinde yapılan araştırmada [Ribalko, 1988] spark gap deki enerjinin (W_p) pratik olarak hesaplanması için osiloskop dan elde edilen akım ve voltaj osilosgramlardan $U_s(t)$ ve $I(t)$ grafiklerin altında kalan alanın (S_{up}) entegre edilmesi ile yöntemi tercih edilmiştir.

U_s ; spark aralığındaki gerilim düşmesi ,(V), bu değer her bir teknik proses için ayrı bir sabit olup elektrotların fiziko-kimyasal özellikleri ve IEG elektrotlar arasındaki mesafe ile belirlenir (bizim deneylerde 17 V).

S_{up} ; osilosgramdaki $I(t)$ akım eğrisi ile sınırlanmış eğrinin altındaki alanın değeri, Amper_xsaniye, (A.sn)

Bu değerlerden sonra artık spark discharge da verilen enerjinin W_p (Joule,J) miktarı denklem [4.5.] den hesaplanabilir.

$$W_p = S_{up} U_s \quad (4.5.)$$

RC generatörler için kısa devre akımı (I_{shc} , short circuit) aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$I_{shc} = \frac{I_{ashc}}{\sqrt{2}} \quad (4.6.)$$

Kısa devre akımın amplitude değerini (I_{ashc}) osiloskop yardımı ile ölçebiliriz.

Pulse frekansını (pulse ın tekrarlanma sayısı) f , Hz(Hertz) ;

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.7.)$$

ile hesaplanır, buradaki T pulse ın tekrar etme süresi (μs) dir (Şekil 4.7.).

4.1.1. Discharge Devresindeki Parametrelerinin Saptanması;

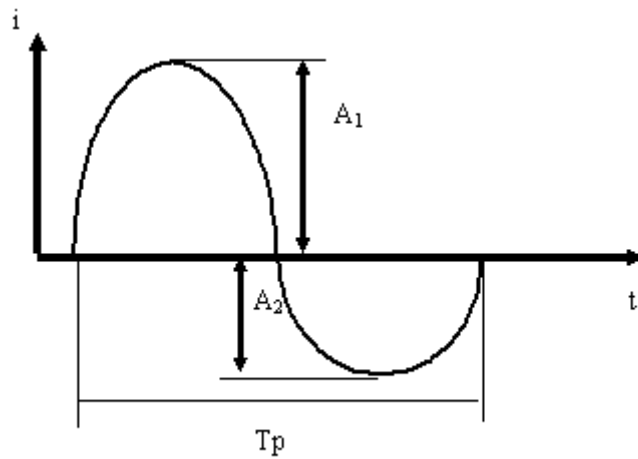
Discharge devresinin indüktansı L , Henry (H) denklem [4.8.] ile hesaplanabilir.

$$L = \frac{T_d^2}{4\pi^2 C} \quad (4.8.)$$

C ; discharge kapasitörün kapasitans değeri ($10^{-6}F$, Farad)

T_d ; discharge periyotunun zamanı (sn)

T_d yi hesaplamak için kapasitörün discharge olurken elektrotlar arasındaki mesafe (IEG) de temas olduğu (kısa devre) zaman osiloskop ile kayıt ettiğimiz osilagramlardan faydalanırız (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. IEG de kısa devre anında kapasitörün discharge anındaki osilosgramı.

Discharge devresindeki aktif direnç denkelem [4.9.] ile hesaplanabilir;

$$R = 2.\delta.L \quad (4.9.)$$

Buradaki δ ; sönümlenme miktarı (1/sn) olup,

$$\delta = \frac{\ln A_1/A_2}{T/2} \quad (4.10)$$

eşittir.

A_1 ve A_2 akım değerleri iki yarı periyot için kısa devre anında kapasitörün aperiyodik (tam periyodik değil) discharge eğrisinden (grafîğinden) saptanabilirler (Şekil 4.7).

Ekipmanın (sistemin) verimi, $\eta\%$, kapasitörün discharge devresinde spark aralığında verdiği enerjinin (W_P) kapasitörde biriktirilen enerjiye (W_C) oranıdır.

$$\eta = \frac{W_P}{W_C} . 100 \quad (4.11.)$$

4.2 Araştırmanın Metodolojisi

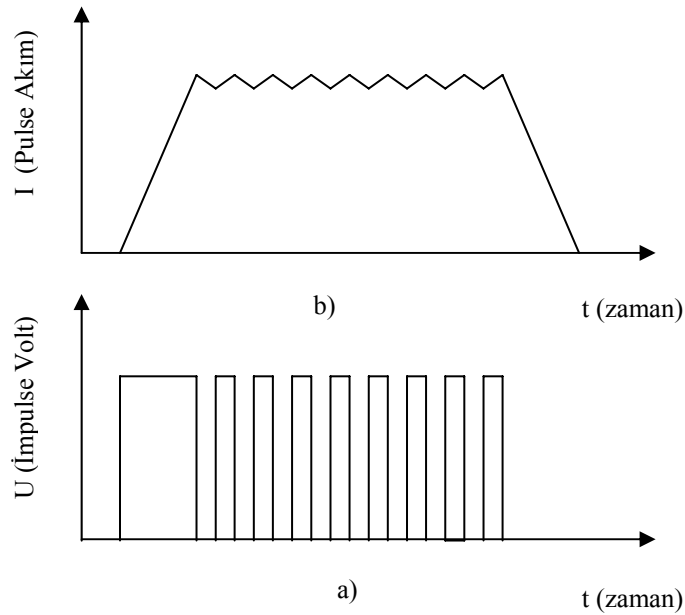
Bilindiği üzere metallerin elektro-spark yöntemi ile alaşımlanması ve aynı zamanda bu yöntemle metallere şekil verilmesi prosesinin esası altında yatan, bir gaz ortam içinde elektrotlar arasında spark discharge sonucunda elektro-erozyondur [Lazarenko's, 1976; 1958]. Alaşımlayan anot elektrottaki erozyonun miktarı ve altlık'a yani katot elektrota transfer olan kütlenin miktarı elektrotlar içindeki termal geçiş proseslerinin hangi kaidelere göre geliştiği ile belirlenir. Aynı zamanda bu prosesler sırasıyla spark discharge ın plazma parametrelerini ve bu yolla impulse ın elektrik performanslarını belirler. Bu parametrelerin ekseriyeti (plazma kanalın çapı, sıcaklığı ve plazmanın iyonlaşma derecesi, elektrik direnci vs.) elektrotlardaki ısı akısının yoğunluğunu da belirler. Eşit şartlar altında, spark kanalının plazması içindeki geçiş proseslerinin periyotları, kanala etki eden enerjinin miktarı, impulse akımının şiddetinin artma hızı ve onun süresi (pulse uzunluğu) ile belirlenir. Bir kural olarak, pulse uzunluğu nun 10^{-2} sn den daha fazla olduğunda plazma parametrelerinin belli bir değerde stabil hale geçeceği ve bu durumda plazma kanalının iletkenliği esasta çoğunlukla iyonik komponentler ile gerçekleşeceğinden bahsetmiştik (Bkz Bölüm 3.1.1). ESD ekipmanları içindeki discharge devrelerinin elektrik parametrelerinin (U,R, L, C) sağladığı imkanlar sayesinde (jeneratörün 100 V aşmayan gerilimlerin için), alaşımlama için minimum düzeyde gerekli akım şiddeti değerine ulaşmak ve gerekli impulse süresini geliştirmek için yeteri kadar zaman aralığı bulunabilir ve bunu yaklaşık olarak 10^{-6} sn kadar geliştirmek mümkündür. Bu durum da da plazma kanalının iletkenliği artık çoğunlukla elektron bileşenler ile gerçekleşir [Namiotkov,1978]. Kısacası 10^{-6} - 10^{-2} sn gibi bir zaman aralığındaki periyotta spark discharge ın plazma kanalının iletkenliğini belirleyen bileşenlerinin (iyon ve elektron) katkı yapma derecesine bir müdahale imkanımız oluşur. Doğal olarak plazma kanalın çapı, plazmanın sıcaklığı, iyonizasyon derecesi, elektrik direnci v.s. gibi diğer plazma parametrelerine müdahalemiz de olasıdır. Discharge kanalında oluşan plazma içindeki geçiş prosesleri kurallarına riayet ederek elektrotlardaki termal geçiş proseslerine etki etme imkanı doğal olarak bize ESD alaşımlama metodunun teknolojik imkanlarını da genişletecektir.

Kullandığımız impulse lar arasındaki bekleme sürelerinin (pause time) seçimi yapılırken sadece elektrotlar üzerindeki termal geçiş proseslerin gelişmesine bir katkı yapılması düşünülmemeli, ayrıca özel impulse ların da aralara ilave edilmesi gibi bir yöntem ile teknik açıdan kaplamada splashlar arasını doldurma (pürüzlülüğü azaltmak için) gibi uygulamalarda bir katkı yapabilmeyi göz önünde bulundurmalıyız. Bununla beraber bu metodun ESD alaşımlama prosesi üzerinde sağlayacağı önemli avantajlarından biride alaşımlanan metalin yapısının deforme olmadan sürekliliğinin sağlanması için aşırı derecede ısınmaya maruz kalmadan alaşımlamanın yapılabilmesidir (ısının altlık tarafından hemen absorbe edilip yayılması).

Spark discharge şartlarını oluşturan dinamik şartların (değişkenler) varlığının devamı için impulse dan impulse a geçerken elektromanyetik geçiş proseslerin gelişimi de aynı şartlarda sağlanmalıdır. Bu yüzden istenilen akım şiddetlerinde ve pulse sürelerinde üretilen impulse lar, voltaj, kapasitans, direnç ve indüktans gibi devreye ait sabit değerlerden bağımsız olmalıdır yani bunları değiştirmeye gerek kalmamalıdır. Bunun yanında, pürüzlülüğü gidermek amacıyla yapılan alaşımlama için hassas rejimlerine geçişte belli bir verimliliğin sağlanması ve korunması amacıyla impulse jeneratörün tekrar eden impulse bant (frekans) aralığı $1-10^5$ Hz olmalıdır ve bu frekanslar elektrotların karşılıklı konumlarını, prosesin herhangi bir anında spark kanalın oluşumu ve gelişimi ile uyum göstermelidir.

ESD ekipmanların üretimi ve gelişiminin temeli üstte verilen şartlar üzerine kurulmalıdır. Kullandığımız sistem için üstteki şartlarda üretilen ESD donanımın elektrik parametreleri ve oluşturulan impulse ların elektrik değerleri şu şekildedir; sistemin tükettiği güç 180 W, stabil çıkış voltajı 40 V, oluşturulan impulse ların enerji miktarlarının değişimi $0,25 \times 10^{-3}$ -15 Joule ve zaman aralığı da 2-8000 μ s dir. Pulse ların kontrol edilebildiği frekans aralığı 2-120000 Hz dir (bu impulse ların üst frekansları olup akım şiddeti değerinin 15 A den sonrası için geçerlidir). Oluşturulan devrenin tüm direnci (empedansı dâhil) göz önüne alınarak seçilen bir çalışma geriliminde (bizim çalışmamızda 17 V) maksimum amplitude değeri olan 1000A'e ulaşmak için akımın ortalama artış hızı (akım impulse grafiğinin de ön tarafın eğimi) 14,4 A/ μ s dir.

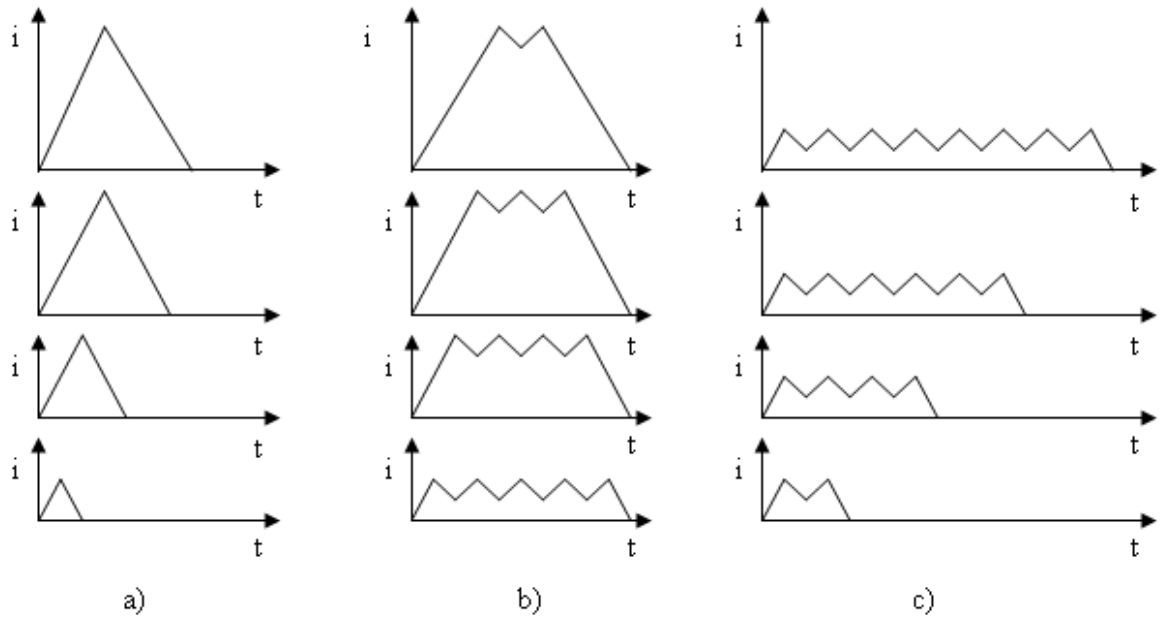
Yukarıda bahsedilen özelliklere sahip ESD ünitesi için transistör dönüştürücülü (komütatörlü) tek çevrimli elektrik akım impulse jeneratör (Şekil 3.8.) devresine switchboard gibi çalışan bir transistör ilave edilmiştir. İstedğimiz şekilde akım pulse ların oluşumu PDM (Pulse Duration Modulation) metodu ile gerçekleştirilmektedir. PDM metodu, discharge devresindeki her bir birim elektromanyetik transient proseslerin üst üste bindirilmesi (overlapping) yoluyla tümleşik bir akım pulse'ı oluşturmak amacıyla gerekli voltaj pulse ların önceden programı yapılmış bir master osilatör (MG) ile transistorün açılıp-kapatılmasına dayanır. Şekil 4.8. de transistor ün açılıp kapanmasıyla elde edilen voltaj pulse lardan master osilatör (MG) ile yaklaşık olarak dikdörtgen şeklinde tümleşik bir akım pulse gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Bir güç transistorünün açılıp-kapanması (switching on-off) yoluyla pulse osilatöründen (MG) elde edilen voltaj pulse larından (a), ESD ünitenin discharge devresinde dikdörtgene yakın bir akım pulse ın (b) elde edilmesi.

Yüksek hızlı bir mikro işlemci ile çalışan bir master osilatör en küçük 200 ns pulse süreli birim pulse voltajı üretebilir. Bu birim zaman aralığında (200ns) ESD ünitenin discharge devresinde akım pulse ın şiddeti 3 Ampere (en küçük) ulaşabilir. Bu metot ile 200ns pulse süreli birim dikdörtgen pulse voltajı ve onun 3 A lik birim akım impulse ları kullanarak devreyi oluşturan sabit parametrelerde (U, R, L, C) bir değişikliğe gerek duyulmadan istediğimiz farklı şekillerde akım pulse larını elde

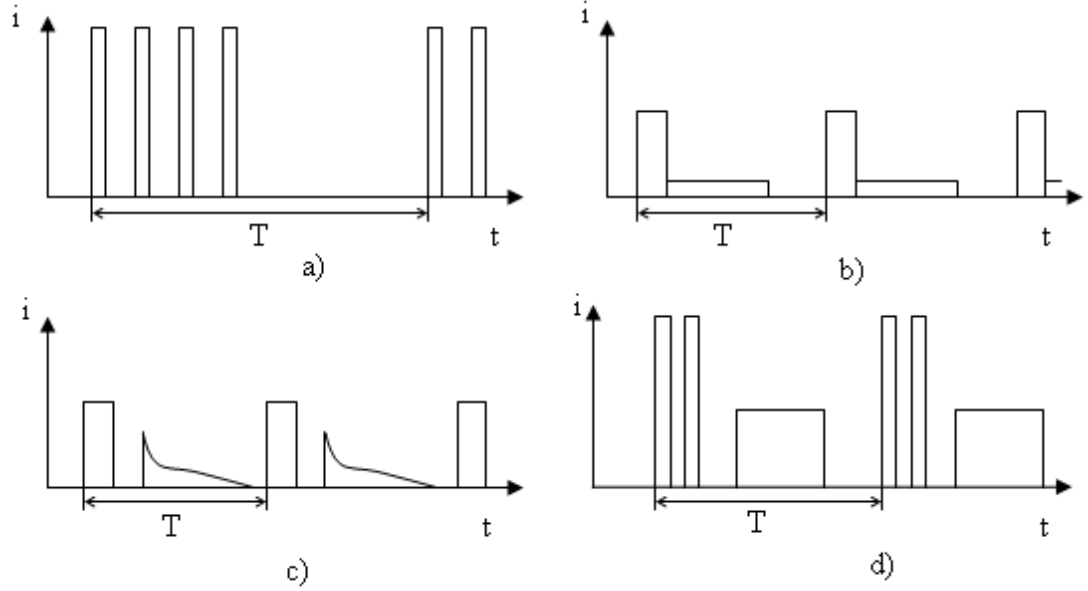
etmemiz mümkündür (Şekil 4.9.). Birim 3 Amperlik akım impulse lardan yola çıkarak master osilatörün kontrolü ile pulse süresini ve şiddetini istediğimiz şekilde düzenleyebiliriz (Şekil 4.9.a). PDM metodu ile gerek duyulursa başka şekillerde de pulse lar elde etmemiz olasıdır (Şekil 4.9.b-c).



Şekil 4.9. Birim üçgen pulse dan başlayarak pulse parametrelerinde değişim şeması; a) basit üçgen bir pulse da pulse süresinin artımı, b) ve c) pulse sürelerinin modülasyonu ile (birim üçgen impulse ların süperpozisyonu ile pulse sürenin artımı) değişim.

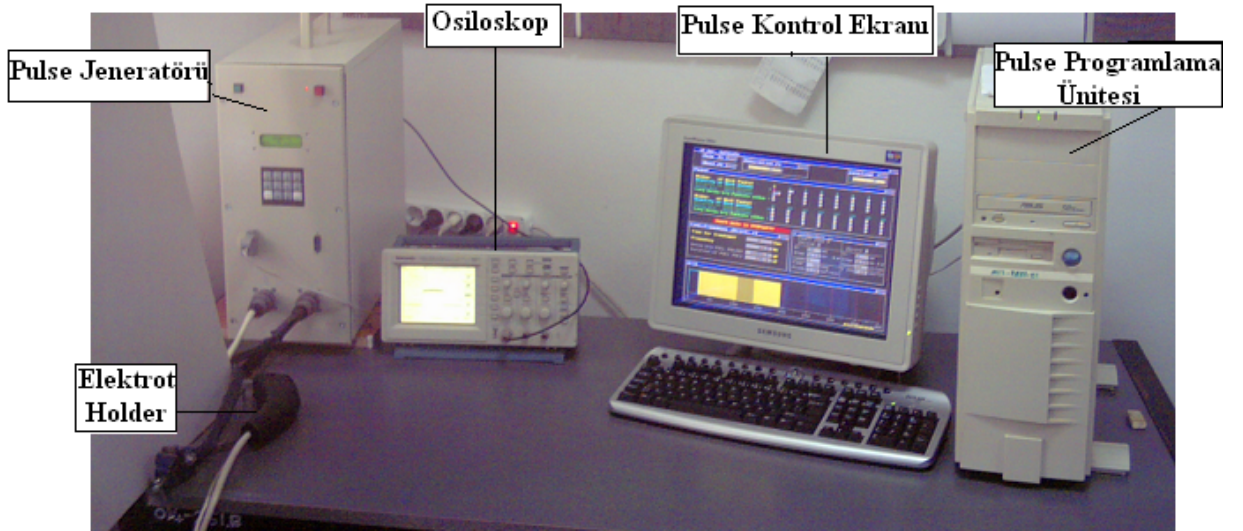
Bilgisayarda çalıştırılan özel bir paket program bize çok değişik parametrelili impulse ları oluşturabilme imkanı sağlar ve aynı zamanda bu paket program bize tekrar eden asıl impulse paketi (grup) içine ilaveten başka bir pulse paketini katabilme gibi teknolojik bir imkanı da verir (Şekil 4.10.). Ayrıca tek bir proseste farklı teknolojik operasyonları birleştirme imkanı da sağlar. Paket impulse grupların kullanılması ile elektrotlardaki termal rejimleri değiştirerek ESD prosesin teknolojik sonuçlarına etki edilebilir. İlave spark discharge lar ile uygulanan enerjiyi belli bir kurala uygun olarak değiştirirsek (Şekil 4.10.b) katod üzerine transfer olan sıvı haldeki kütlenin kristalleşme (katılaşma) rejimini kontrol etmek mümkün olabilir. Belli bir pulse paket de, pulse lar arasında sabit seviyede bir impulse akım

oluşturmak ile (Şekil 4.10.c) veya farklı pulse lar ilave ederek (Şekil 4.10.d) elektroeroziv prosesi hem kütle transferinde ve hemde yüzey pürüzlülüğünü azaltmada uygulanabilir.



Şekil 4.10. ESD proses de farklı teknolojik amaçların uygulanabilme imkanların oluşturulabilmesi açısından belli bir periyottaki (T) temel impulse grup içine ilave akım pulse veya pulse enerjilerin araya katılması metotları.

Yeni bilgisayar (mikroişlemci) kontrollü bir ESD ünitesinde, uygulayacağımız akım impulse ın elektrik parametreleri hakkında gerekli bilgileri bir pulse kontrol ekranında izleyebilir, istediğimiz şekilde ve amaca göre değiştirebilir ve tekrar kullanılabilmek için kayıt edebiliriz (istediğimiz rejimde programı yapıp, kayıt ederiz ve bunu istediğimiz zaman kullanabiliriz). Böylece istediğimiz impulse lara ait parametreleri istersek kaplamada kütle transferi için, istersek kaplamanın pürüzlülüğünü azaltmak için ya da ikisi için birlikte uygulayabiliriz. Bütün bunları, yani sistemdeki rejim değişikliklerini sisteme bağlı bir klavye yardımı ile yapabiliyoruz (Şekil 4.11).



Şekil 4.11. Tüm ekipmanları ile bilgisayar kontrollü bir ESD kaplama prosesi araştırma ünitesi

Mikroişlemciler bunun dışında alaşımlama prosesine katkı yapan farklı ekipmanların kontrolüne de olanak sağlar, örneğin 4 yollu otomatik ESD kaplama cihazı (Şekil 4.12.).



Şekil 4.12. Dört yollu otomatik olarak hareket edebilen ESD kaplama ünitesi.

Böyle donanımlı bir ESD sistemi, ESD kaplama prosesin geniş çapta bilimsel olarak araştırılmasında ve geliştirilmesinde yeni imkanlar sunar. Bu ünitenin kontrolü minimum konfigürasyonlu (IBM PC uyumlu) bir dijital personel bilgisayar ile sağlanabilir.

5. DENEYSEL UYGULAMALAR ve BULGULAR

5.1. Deneyisel Prosedür

5.1.1. Kaplama Numunelerin Hazırlanması;

Biz kaplama deneylerimizde altlık olarak yüzey özelliklerini modife etmeyi düşündüğümüz düşük karbonlu çelik (St35) malzemeyi seçtik. Bir yüzeyi markalamak için numaralandırılmış ve diğer beş yüzeyi kaplamak için boş bırakılmış çelik numuneler yaklaşık 10 mm boyutlarında küp şeklindedir. ESD prosesin bir özelliği olarak numunelerin bir ön hazırlığa ihtiyacı yoktur. Fakat uzun süre saklanabilmesi için çelik numuneler gres yağına bandırılmış olduklarından kaplama öncesi her numune benzin ve alkol ile temizlenmektedir.

ESD proses ile yapılan kaplamalar da kullanılacak elektrot malzemeler elektrik iletkenliğe sahip olması şartıyla geniş bir yelpazede seçilebilir. İşlem elektrot olarak sert bir alaşım olarak bilinen ve ESD metoduyla yüksek sertlikte, aşınmaya dirençli kaplama elde etmek için yaygın bir şekilde kullanılan WC(92)-Co(8) elektrotlar seçilmiştir. Ağırlıkça % 92 WC ve % 8 Co toz karışımın, presle şekil verildikten sonra sinterlenmesi ile üretilmiş, yaklaşık 8 mm² kesit alanına sahip ince dikdörtgen çubuk şeklindeki standartları belli elektrotlarımız hazır olarak piyasadan temin edilmiştir.

5.1.2 Numunelerin Karakterizasyonu;

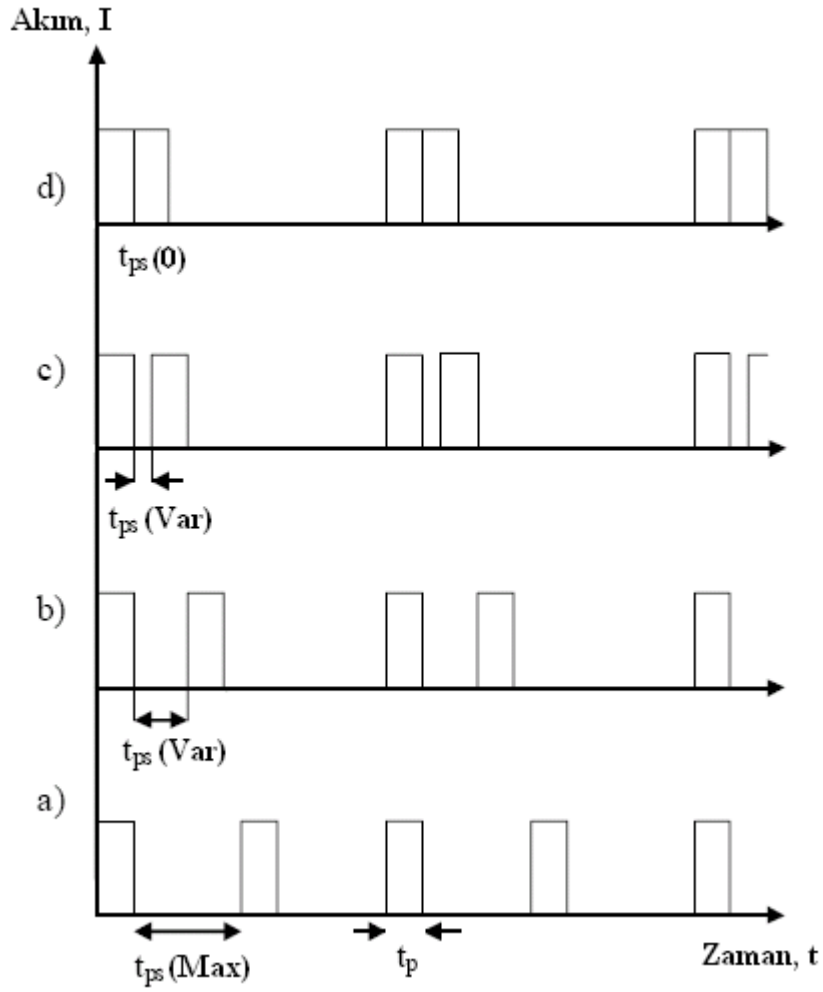
ESD prosesinin karakterize edilebilmesi için, proses sonucu kaplamada transfer edilen kütle miktarını ve kaplama yüzeyinde oluşan pürüzlülük değerlerini ölçümü metodunu deneylerimizdeki kullanılan tüm numunelerimize uyguladık. 0.1 mg duyarlılıktaki Metter Toledo 200 marka hassas bir terazi ile her altlık numunenin kaplama öncesi ve sonrası ve ayrıca işlem elektrotunun her seferinde ağırlıkları ölçülerek kaplama prosesi esnasında altlık numunelere transfer edilen ve işlem

elektrotundan erozyona uğrayan (kayıp) kütle miktarları relatif olarak elde edilmiştir. Her proseste kullanılan numunenin beş yüzeyinde kaplama yapıldığı için sonuçlar beşe bölünerek ortalaması olarak alınmıştır. Pürüzlülük ölçümleri içinde $0.01\ \mu\text{m}$ hassaslıkta SJ-400 Mitutoyo marka bir profilometre kullanılmıştır. Ortalama pürüzlülük değerlerini elde etmek için, her proseste beş yüzeyi kaplanan numunenin her bir yüzeyi için rasgele seçilen beş farklı doğrultularda ve 8mm mesafelerde ölçümler halinde yapılmıştır.

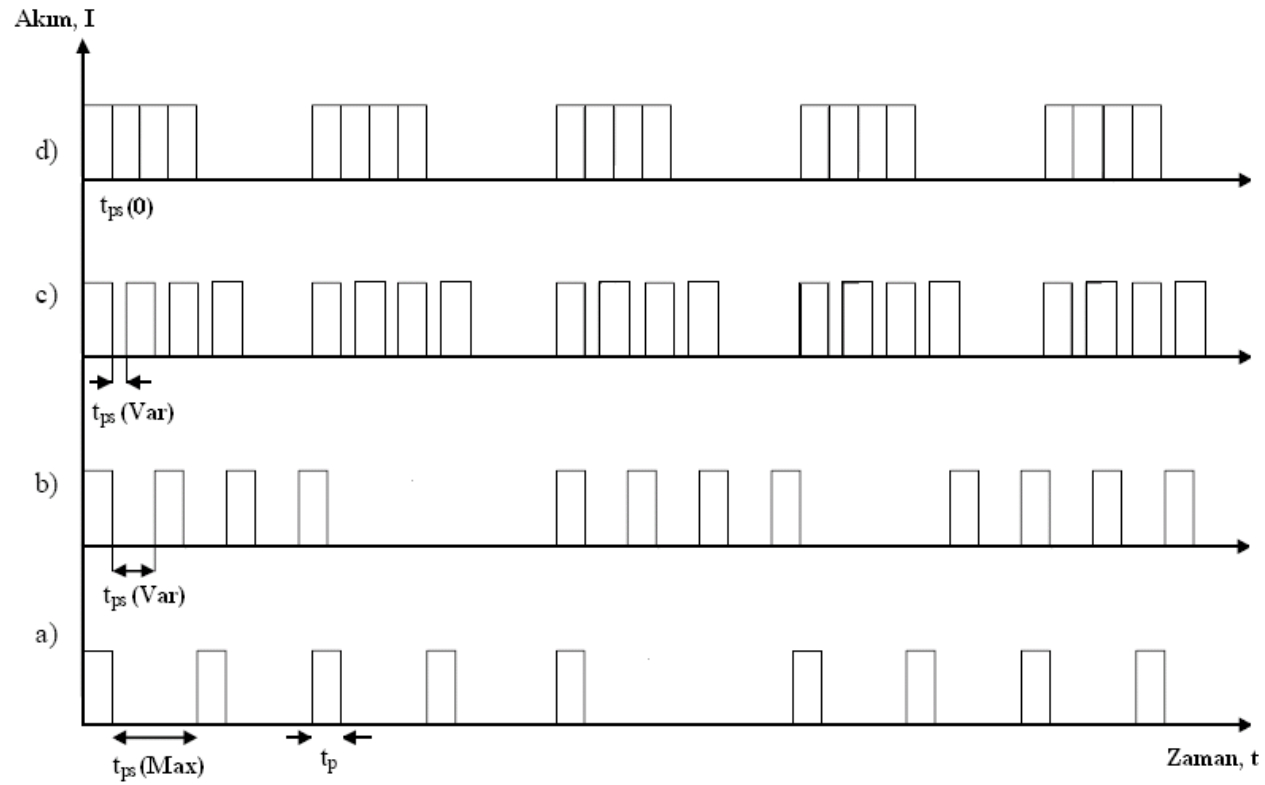
Kaplanan numunelerden bir kaçı standart metalografik metotlarla hazırlanarak yüzey morfolojisi ve EDX analizleri için Philips XL 30 SFEG model bir Taramalı Elektron Mikroskobu ile incelenmiştir. İncelenecek numuneler önce Struers-Minitom model bir hassas disk kesicilerde kaplama yüzeyini dikey kesecek şekilde kesilmiş ve daha sonra bakalitler içine alınmıştır. Bakalite oturtulmuş numuneler SEM de incelemeye hazır hale gelmesi için sırasıyla 500, 800, 1000 ve 1200 gritlik zımparalarla Struers Labopol-5 marka parlatma cihazı kullanılarak parlatılmıştır. Daha sonra $3\ \mu\text{m}$ 'lik pasta sürülen keçeyle parlatmaya tekrar tabi tutulmuştur. Ayrıca numuneler ultrasonik titreşimle alkol içinde temizlendikten sonra %2 lik Nital ile dağlanmıştır.

5.2. Deneysel Teknik

ESD kaplama prosesinde elektrik pulse parametrelerinde bir değişiklik yapmaksızın işlem elektrotunun erozyon miktarının arttırılması için deneysel yeni bir yöntem uygulandı. Bu metot bir grup içinde özdeş peşi sıra pulse ların ve pulse gruplarının uygulanması ile alaşımlama üzerine dayanmaktadır. Bu pulse ların düzeni (sıralanışı), sayıları, süreleri ve birbirleri arasındaki bekleme süreleri doğal olarak enerjileri öyle bir seçilebilmedir ki tek bir pulse grubunun aksiyonu şeklinde ESD proses uygulanmakta ve kontrol edilebilmekte ve neticede arzu edilen özelliklere sahip bir kaplama elde edilebilmektedir. Deneysel olarak uyguladığımız bu tekniğin ideolojisi Şekil 5.1. ve 5.2. deki grafikler ile izah edilmiştir.



Şekil 5.1. İki özdeş pulse içeren pulse gruplarının içinde pulse lar aralarındaki bekleme sürelerinin sıfır ile maksimum arasındaki değişimine göre pulse gruplarının yerleşim düzenini temsil eden şematik görünüm. Burada pulse lar arası sürenin; a) maksimum ($t_{ps}=\max$) iken, b) ve c) azalarak değişirken ($t_{ps}=\text{Var}$) ve d) sıfır ($t_{ps}=0$) iken yani iki pulse bitişikken görünümü temsil edilmektedir. t_p ise uygulanan pulse ın süresidir.



Şekil 5.2. Dört özdeş pulse içeren pulse gruplarının içinde pulse lar aralarındaki bekleme sürelerinin sıfır ile maksimum arasındaki değişimine göre pulse gruplarının yerleşim düzenini temsil eden şematik görünüm. Burada pulse lar arası sürenin; a) maksimum ($t_{ps}=\text{max}$) iken, b) ve c) azalarak değişirken ($t_{ps}=\text{Var}$) ve d) sıfır ($t_{ps}=0$) iken yani iki pulse bitişikken görünümü temsil edilmektedir. t_p ise uygulanan pulse ın süresidir.

ESD proses deneylerinde önce sonuçların mukayesesi için baz (referans) data olarak seçilmiş geleneksel bir rejim içinde birbiri peşi sıra pulse akımı ve daha sonra grup içindeki pulse lar arasındaki sürenin ayarlanabilmesi yoluyla geçiş (transient) proseslerin süperpozisyonu imkanının sağlandığı (Bkz. Böl.4.2.) bir veya iki farklı pulse ları içeren pulse gruplarının oluşturduğu pulse paketleri uygulanmıştır. Uygulanan akım pulse lar arası süre, sıfırdan 1800 μ s ye kadar çıkan (bekleme süresi $t_{ps}=0$, yani bitişik pulse lar deneysel sonuçları mukayese etmek için bir baz olarak düşünülmüştür) geniş bir aralıkta değişmektedir.

Dikdörtgen şeklindeki pulse ların süreleri 100 ve 400 μ s arasında değişmekte olup, tatbik edilen akımların şiddeti 200 A den 500 A'e kadardır. Seçilen bu pulse parametreleri için referans [Ribalko, 2006] deki sonuçlardan faydalanılmıştır. Pulse ların ön kısmının eğimi yani pulse akımın artma hızı 14.4 A/ μ s ve ESD prosesin de uygulanan elektrik miktarı (IEG'de elektrotlar arasındaki boşluktan geçen yük) sabit tutulmuş olup (deneysel sonuçların birbiri ile mukayesesi için sabit alınmıştır) 3 C dur. Bu yük değeri işlem elektrotunun kesit alınının küçük olması sebebiyle aşırı ısınmaya yol açmaması açısından seçilmiştir. Her kaplama deney şartı için pulse gruplarının frekansı da ESD prosesin elektrik miktarının sabit tutulması şartı göz önünde bulundurularak hesaplanan değer uygulanmıştır (Tablo 5.1.). Elektrotların özellikleri sabit olduğu için (3C elektrik yükü ve 1cm² yüzey alanı) her kaplama prosesinde tek bir tabakanın deposition (kaplanma) süresi için yaklaşık 50 sn ye kadar toplam proses zamanı kullanılmıştır. Yapılan deneylerde proses esnasında işlem elektrotunun (anot) kütle kaybı yani erozyonu ve altlığın (katot) kütle kazancı, kaplamanın pürüzlülük (Ra), kalınlık, üniformluluğu, porosite ve çatlak oluşumu (kırılma) v.s. özellikleri ve ayrıca prosesin parametrelerinin bazılarının performansa katkıları incelenmiştir.

5.3. Deneysel Sonuçlar

5.3.1. Özdeş Pulse ların Kullanıldığı Pulse Gruplarının Uygulanması;

Ana fikrini daha önce deneysel teknik kısmında ifade ettiğimiz çalışmamızın, ilk deney serisinde her birinin akım şiddeti 200 A, pulse süresi 100 μ s ve pulse enerjisi 0.268 J olan dikdörtgen pulse lar, tek bir pulse (p.gr.1), ikili pulse (p.gr.2), dörtlü pulse (p.gr.4) ve sekizli pulse (p.gr.8) lar şeklindeki gruplar halinde tatbik edilmiştir (Şekil 5.1. ve 5.2.). Pulse gruplarında kullanılan pulse lar arasındaki süreler (bekleme süreleri, t_{ps}) 0 ile 1800 μ s arasında değişen bir aralıkta uygulanmıştır (Şekil 5.3.).

Aynı şekilde akım şiddetleri ve pulse süreleri sırasıyla 200 A ve 300 μ s (Şekil 5.6.), 400 A ve 100 μ s (Şekil 5.8.), 400 A ve 300 μ s (Şekil 5.11.) olan pulse ların oluşturduğu pulse grupları, 0 ile 1800 μ s arasındaki değişen bekleme süreleri ile kaplama porsesinde uygulanmıştır.

Aynı elektrik parametrelerin kullanıldığı deneylerde her bir deney için sonuçların mukayese edilebilmesi amacıyla seçilen özdeş bir pulse ile oluşturulan grup pulse larında, uygulanan bekleme süresi maksimum değer 1800 μ s için ($t_{ps}=\max$) elde edilen veriler referans (temel) olarak ele alınmıştır. Grafiklerde de daha elverişli olması açısından tek bir nokta olarak değil bir referans çizgi (kırmızı) ile temsil edilmiştir.

Şekil 5.3. deki grafikte, üstte verilen şartlara göre yapılan kaplama deneyinde anot ve katot'un kütle değişimleri sunulmaktadır. Grafiğin negatif kısmı anottan yani işlem elektrotundan kayıp olan (erozyon) kütle miktarını, pozitif olan kısım ise katottan yani altlığa transfer olan (alaşımlanan) kütle miktarını temsil etmektedir. Grafikten, anot ve katot da ki kütle değişimlerinin hem grup içindeki pulse sayısına ve hem de pulse lar arasındaki süreye bağlı olduğu buna karşın transient proseslerin süperpozisyonları ile beklenen etkileri, pulse lar arasındaki bekleme sürelerinin 600 μ s ile 1800 μ s bir aralık içinde gözlemlenmediği anlaşılmıştır. Hatta 4 ve 8 li pulse

ları içeren pulse grupları için anot ve katot da ki kütle değişimleri temel aldığımız referans çizginin bile altında kalmıştır. Beklenen etki yani anottan erozyon olan ve katodun aldığı kütle miktarlarının referans değerlerin den daha fazla olması durumu (referans çizginin üstünde olması) pulse lar arasındaki bekleme süresinin ancak 2 pulse lı da 600 μ s ve daha altında, 4 pulse lı da 250 μ s ve daha altında, 8 pulse lı da 100 μ s ve daha altında kaldığı zaman gözlemlenmiştir. Ayrıca 2, 4 ve 8 li pulse ları içeren her durum için, pulse bekleme sürelerinin bütün aralığında beklenen kütle karakteristikleri pulse ların bitişik olduğu $t_{ps}=0$ (pulse lar arası sıfır süre) daki değerlerine ulaşamadığı anlaşılmaktadır. Buna rağmen 2 li pulse grup kullanılan kaplamada, pulse lar arası 128 μ s bekleme süresi için anottaki maksimum erozyon miktarı $M_a=4.95$ mg ve 77 μ s bekleme süresi için de katotta maksimum kütle kazanımı $M_c=3.39$ mg elde edilmiştir. Bu noktalarda referans olarak aldığımız 1800 μ s (t_{ps} , max) bekleme süresine göre anottaki erozyon miktarı en çok % 37 ve katottaki kütle kazanımı en çok % 79 daha fazla arttırılmıştır. Ayrıca katodun kazandığı kütle ile anodun kayıp ettiği kütle arasındaki oranı yani kütle transfer katsayısının değeri incelenirse 77 μ s (maksimum) ve 128 μ s de en çok artışların olduğu farkına varılır (Şekil 5.4.). Aslında bu katsayının değeri kütle transferi prosesinin verimini ifade etmektedir ve katsayıdaki artışların sebebinin prosesin başlangıcında altlık malzemeden etrafa saçılan ergimiş haldeki malzeme miktarındaki azalmadan dolayı olduğu aşikârdır. Bu şartlar altında yapılan kaplamanın yüzey pürüzlülüğü değerleri Şekil 5.5. de verilmektedir. Dikkat edilirse yüzey pürüzlülüğü sonuçları kütle transferi sonuçları ile bir uyum içindedir.

Şu ana kadar yapılan denemelerin, ne katodun kazandığı kütle oranında ve anodun erozyon olan kütle oranında ne de grup içinde pulse lar arasındaki bu kütle transferi ve erozyon olayının devamı hakkında beklenen kayda değer sonuçları açığa çıkarmadığını ifade etmek mümkündür. Bir spark discharge ın gerçekleşmesinden sonra elektrotlar daki ergimiş faz 1 ms veya daha fazla bir zaman kadar var olmaya devam etmektedir [Zolotih,1957]. Bu durum ancak spark discharge ların sayısındaki azalma ile açıklanabilir. Çünkü geleneksel metotta impulse jeneratörler tarafından sağlanan periyodik sabit akımlı pulse lar ile aynı elektrik parametreleri kullanılmasına rağmen tecrübe ettiğimiz yoğunlaştırılmış pulse lı proseste beklenen etkilerinin gerçekleşmemesi ilk iki pulse dan sonraki pulse ların spark discharge'ı

oluşturamamasından kaynaklanmaktadır. Bu iddiayı kontrol etmek maksadıyla literatür bilgilerin yardımı ile IEG de spark discharge ların meydana gelmesi ve gelişimi şartlarının incelenmesi (kontrolü) bir osiloskop kullanılarak gerçekleştirildi [Ribalko,1988].

Osiloskop incelemelerden anlaşıldığı kadarı ile 2 pulse lı bir grup ile oluşturulan kaplamada ilk pulse dan sonra ikinci pulse ın tatbik edilmesi esnasında pulse lar arası bekleme süresine bağlı olarak IEG de kısmen veya tam bir kısa devre oluşmaktadır. Bu nedenle ilkinden sonraki pulse lar spark discharge oluşturamamaktadır. Eksik sayıdaki spark discharge lar neticesinde gerçekleşmesi beklenen anottaki erozyon miktarında bir düşüş gözlemlenmiştir.

4 ve 8 li pulse ları içeren grup pulse ları ile yapılan kaplamada da benzer incelemeler sonucu teorik olarak beklenen dışında pratik olarak bu grup pulse ların her birinde ikinci pulse da kısmen, daha sonra geriye kalan diğer pulse lar için spark discharge ların tamamen oluşmadığı anlaşılmıştır. Bu yüzden anottan erozyon olan kütle miktarında keskin bir düşüş gözlemlenmiştir. Doğal olarak, grup içindeki pulse ların sayısı artarken erozyon miktarı artmayacak tam tersine azalacaktır. Bizim görüşümüze göre bu spark discharge ların oluşumu için gerekli koşulun yokluğunun sebebi, bir önceki spark discharge dan sonra elektrotların erozyonu sırasında oluşan sıvı fazın elektrotlar arasındaki boşluğu (IEG) doldurması ve bu sıvı fazın elektrotlar arasında bir temas sağlamasından dolayıdır. Bu şartlar altında bir spark discharge ya oluşur ya gecikir ya da bazen hiçbir şekilde meydana gelmez. Bunun neticesinde sonraki (sonradan gelen) pulse ın elektrik enerjisi, elektrotlar arasında bir plazma kanalını oluşturmaya ve dolayısıyla erozyon olacak kütlenin patlatılması (çekip alınması) için yeterli olmayacaktır.

Pulse süresinin genişletilmesi ile enerjisi arttırılmış (örneğin 200A, $t_p=300\mu s$) daha fazla enerjili grup pulse lar ile yapılan kaplamalarda da, deneylerin analizleri sonucunda anodun erozyonunun arttığına dair herhangi bir kanıt ortaya çıkmamıştır (Şekil 5.6). 2 pulse içeren pulse grup ile yapılan kaplamada sadece 120 μs ve daha aşağı pulse lar arası sürede kısa bir aralık içinde küçük bir olumlu etkinin farkına varılmıştır. Pulse lar arası 26 μs bekleme süresi için anottaki maksimum erozyon

miktarı $M_a = 6.79$ mg ve gene $77 \mu s$ için de $M_a = 6.60$ mg; katotta maksimum kütle kazanımı $77 \mu s$ de $M_c = 4.40$ mg ile elde edilmiştir. Bu noktalarda referans olarak aldığımız $1800 \mu s$ ($t_{ps, max}$) bekleme süresine göre anottaki erozyon ve katottaki kütle kazanımı miktarı en çok % 20 şer arttırılmıştır. Ayrıca kütle transfer katsayısının değeri incelenirse en büyük değerin $77 \mu s$ de olduğu anlaşılır (Şekil 5.7.).

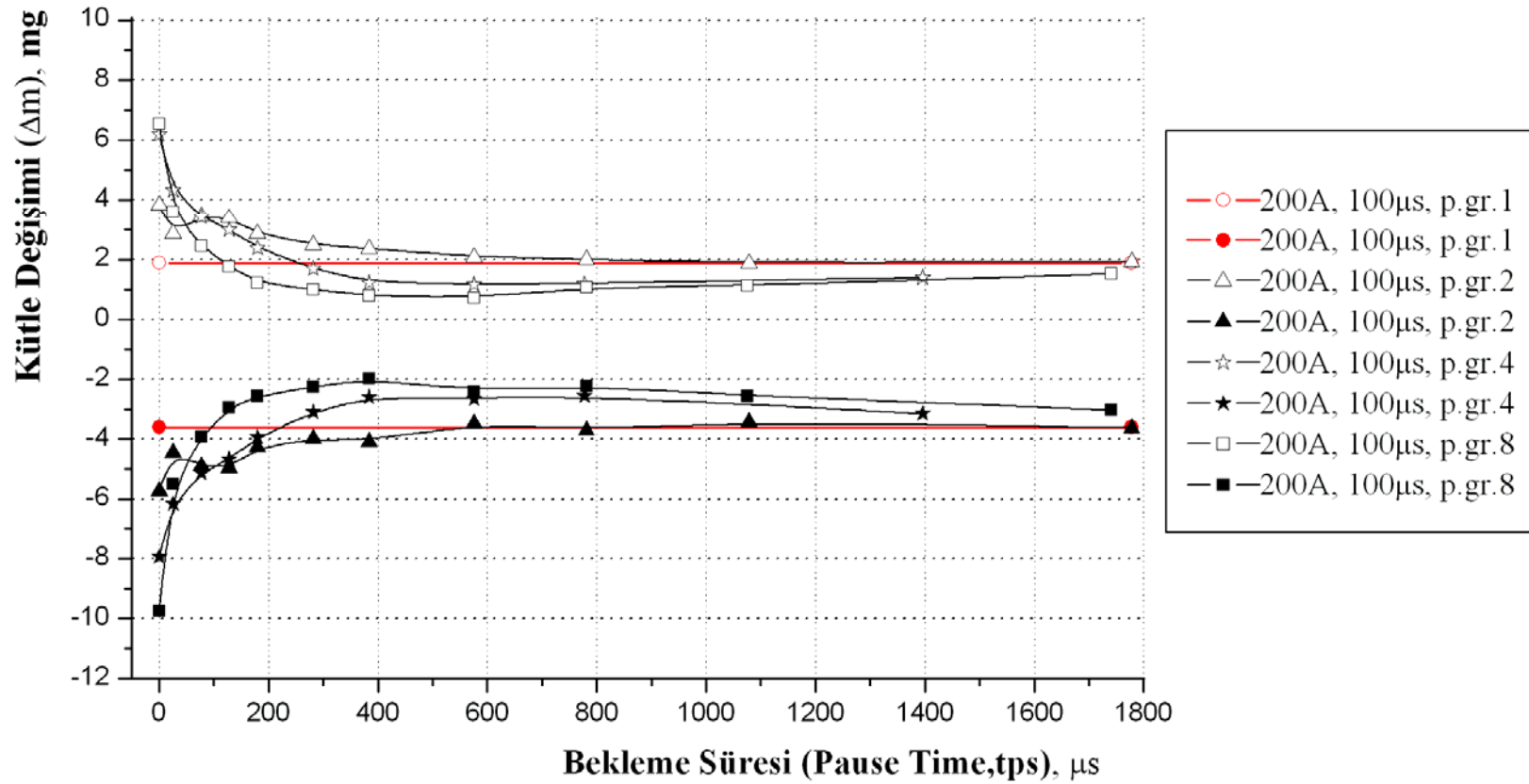
Pulse akım şiddetinin $400A$ 'e ($t_p = 100 \mu s$) yükseltilmesi ile artan pulse enerji bize en azından 2 pulse lı grup için inceleme yaptığımız bekleme sürelerinin bütün aralığında ESD proste anottaki erozyonun şiddetini arttırmak için bir fırsat temin etmiştir (Şekil 5.8.). Hatta grafikten anlaşılacağı üzere, anottaki kütle kaybının grafikteki stabile olmuş haline bakılırsa $1800 \mu s$ pulse bekleme süresinin ötesinde bile anodun kütle kaybının referans data dan hala daha yüksek olacağı üzerine bir tahmin yapılabilir. Pulse lar arası bekleme süresi, $t_{ps} = 77$ ve $128 \mu s$ arasındaki ESD proses için anodun kütle kaybı, bitişik pulse lı süreçteki ($t_{ps} = 0$) kütle kaybının miktarını bile aşmıştır. Prosesin bu parametreleri için, pulse lar arası $128 \mu s$ bekleme süresi için anottaki maksimum erozyon miktarı $M_a = 8.41$ mg ve $77 \mu s$ bekleme süresi için de katotta maksimum kütle kazanımı $M_c = 4.91$ mg elde edilmiştir. Bu noktalarda referans olarak aldığımız $1800 \mu s$ ($t_{ps, max}$) bekleme süresine göre anottaki erozyon miktarı en çok % 56 ve katottaki kütle kazanımı en çok % 327 daha fazla arttırılmıştır. Aynı proses parametreleri içinde anodun kütle kaybındaki artış sadece yaklaşık 1.5 katı kadarken katot tarafından kazanılan kütledeki artış yaklaşık 3 katı kadar olması, bu artışın sadece anottaki erozyon artışı ile açıklanamayacağı ve bu sonuca altlık malzemeden etrafa saçılan kütlenin miktarında keskin, ani bir düşmenin de kesin bir etkisinin var olduğu şeklinde açıklanabilir.

4 lü ve 8 li pulse ları içeren pulse grupları ile yapılan kaplamalarda anotta ki erozyon sadece pulse lar arasındaki bekleme süreleri kısa iken artmıştır (yaklaşık $300 \mu s$). Geriye kalan aralık ta $1800 \mu s$ ye kadar pulse bekleme süreleri için osiloskop analizleri ile gösterilmektedir ki üçüncü ve daha yüksek pulse lar için spark discharge ın gelişimi mevcut olmamıştır. Bunun nedeni, ilk 2 pulse esnasında kazanılan (alınan) kütleden dolayı elektrotların IEG deki kısa devredir. Şekil 5.9. daki kütle transfer katsayısı grafiği de bu söylenenler ile uyumludur. Bu şartlar

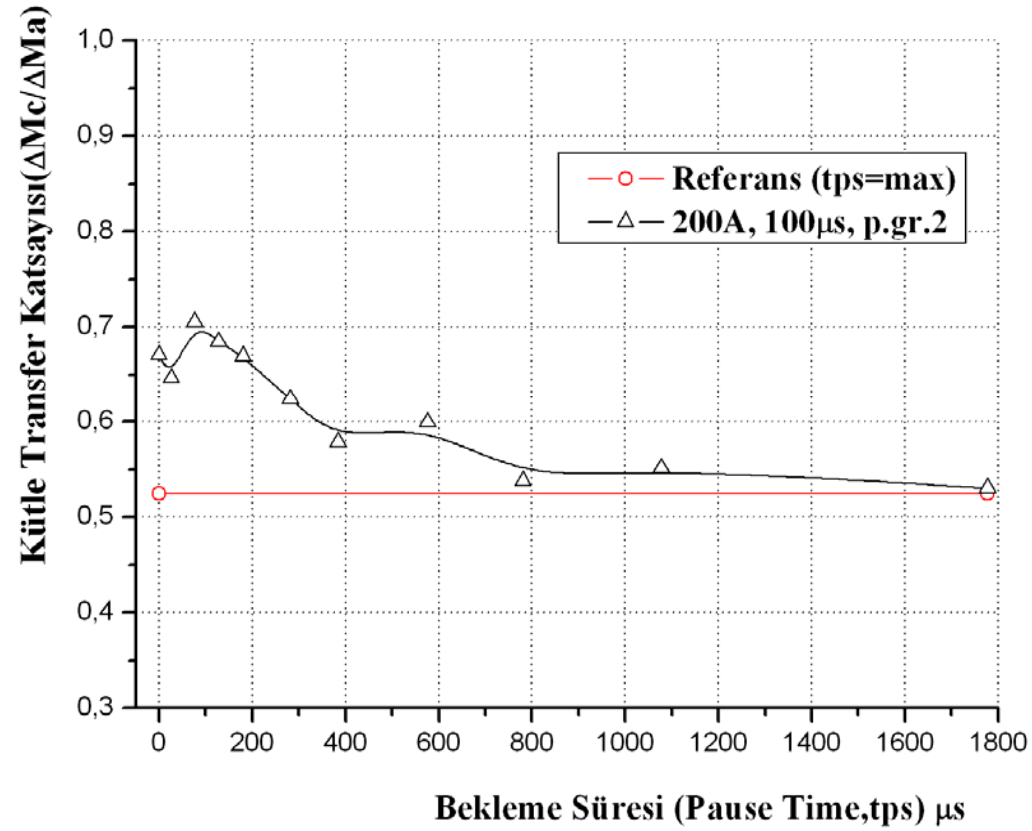
altındaki yapılan ESD kaplamanın yüzey pürüzlülüğü de Şekil 5.10. da verilmektedir.

Aynı 400 A akım şiddetindeki pulse ların pulse sürecinin 300 μ s artması ile pulse ların enerjileri arttırılmış ve bu pulse lar ile yapılan kaplama sonuçları incelemeye alınmıştır. Pulse enerjisinin daha da artması ile 800 μ s ve daha az bekleme süreli 2 li pulse grupları ile yapılan kaplamalar hariç anottaki kütle kaybı artışında kayda değer bir kazanç elde edilmemiştir (Şekil 5.11.). Bu durumda anottaki erozyon miktarının maksimum değeri $M_a = 11.77$ mg, katottaki kazanılan maksimum kütle miktarı $M_c = 7.15$ mg sadece pulse lar arası bekleme süresinin $t_{ps} = 26$ μ s olan 2 li pulse grup ile yapılan ESD kaplama için elde edilmektedir. Bu değerler referans datalar dan % 13 kütle kazanımı ve % 24 erozyon miktarı şeklinde daha yüksektir.

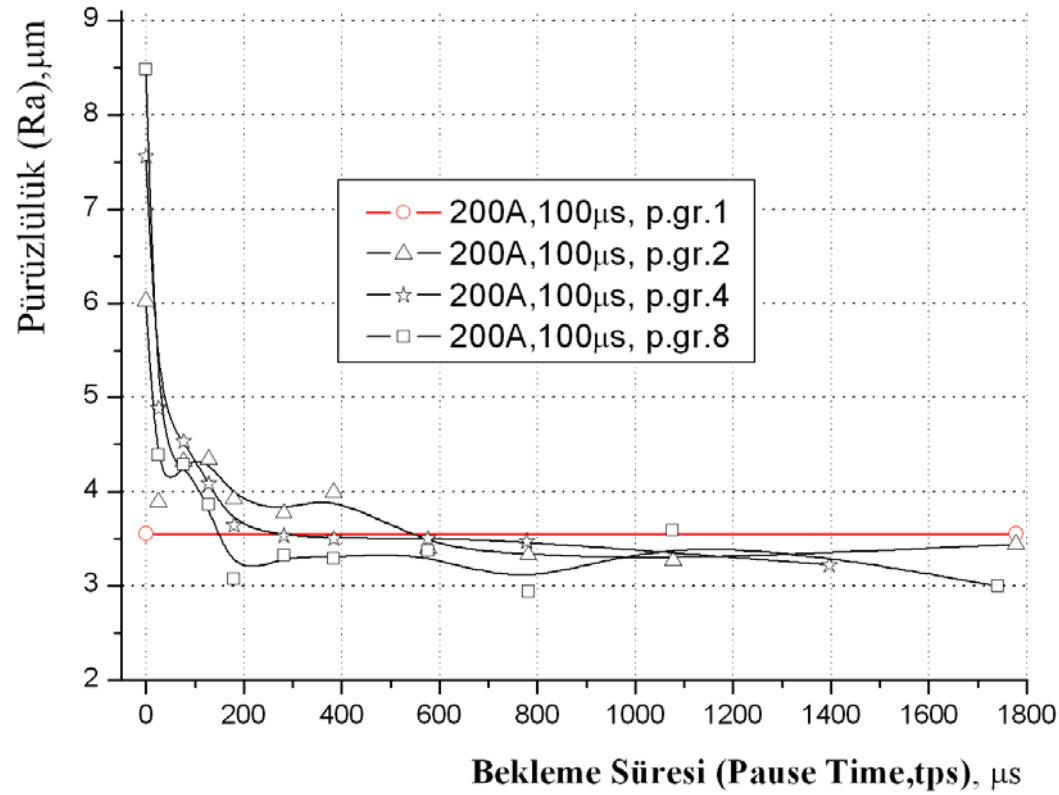
Yukarıdaki sonuçların analizi bize şöyle bir sonuç çıkarmamıza imkan vermektedir. Pulse grup içindeki kısmen ikinci ve sonraki pulse ların enerji miktarı, eroziv kütlenin patlamasıyla bir spark plazma kanalının oluşum şartlarını (gereklerini) yerine getirecek spark discharge lar için yetersiz kalmaktadır. Bu bağlamda, ESD proses için geleneksel uniform pulse lar kullanmak yerine şu ana kadar tercih edip uyguladığımız grup pulse ları kullanarak amacımızı gerçekleştirmemiz için (anodun kütle kaybını arttırmak) ancak aşağıda açıklanan kurala göre pulse ların enerjisini arttırmaya gerek vardır. Mevcut grup pulse ların enerjilerini, grup içindeki her pulse ın bir önceki pulse ın sahip olduğu enerjiden daha fazlasına sahip olacak şekilde arttırmamız gerekir. Böylece grup içinde bütün pulse lar için etkin bir spark discharge ve plazma kanalı oluşturabilme imkanı bulabiliriz.



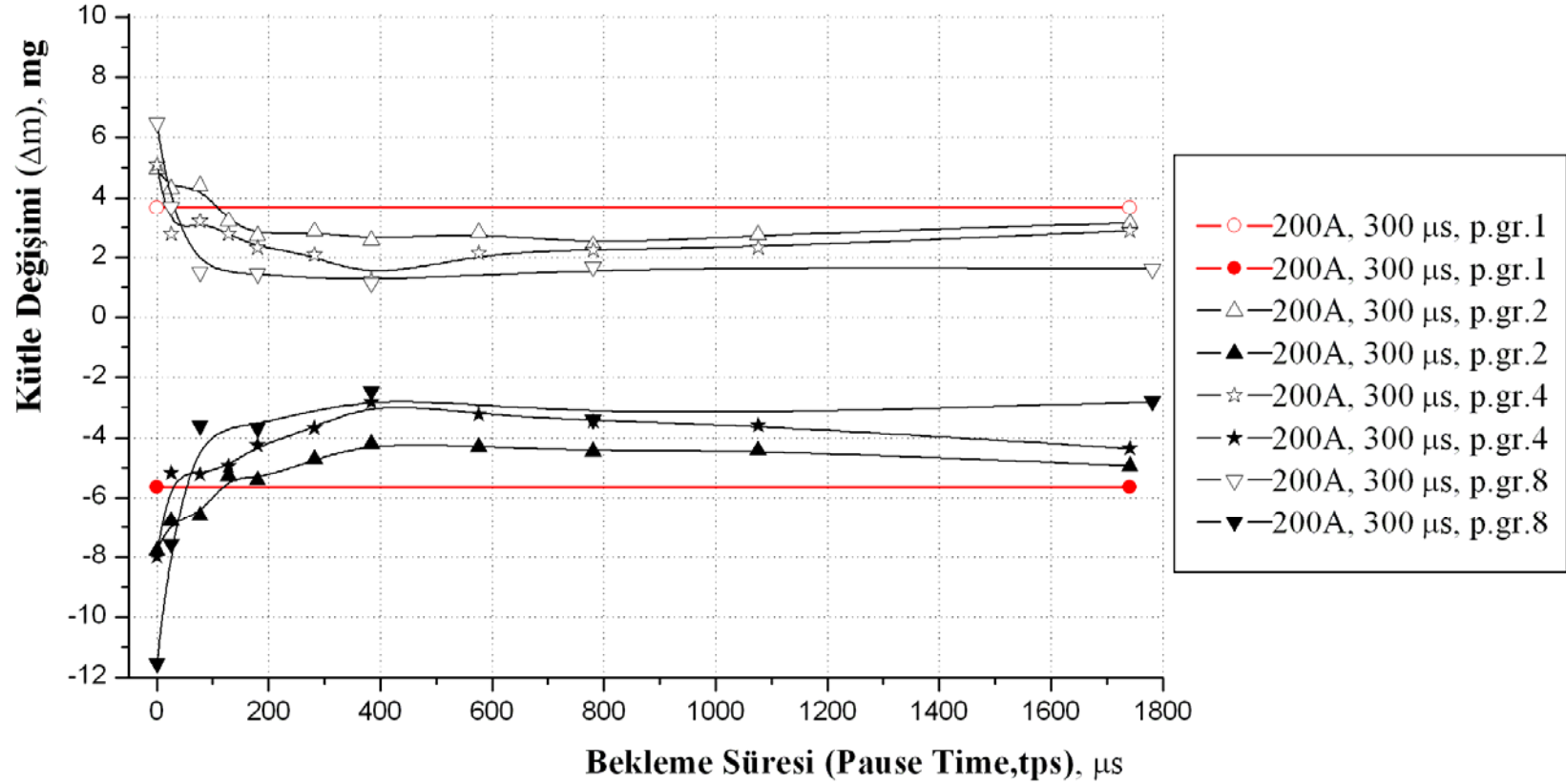
Şekil 5.3. Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 200A ve pulse süresi $t_p=100\mu s$ dir.



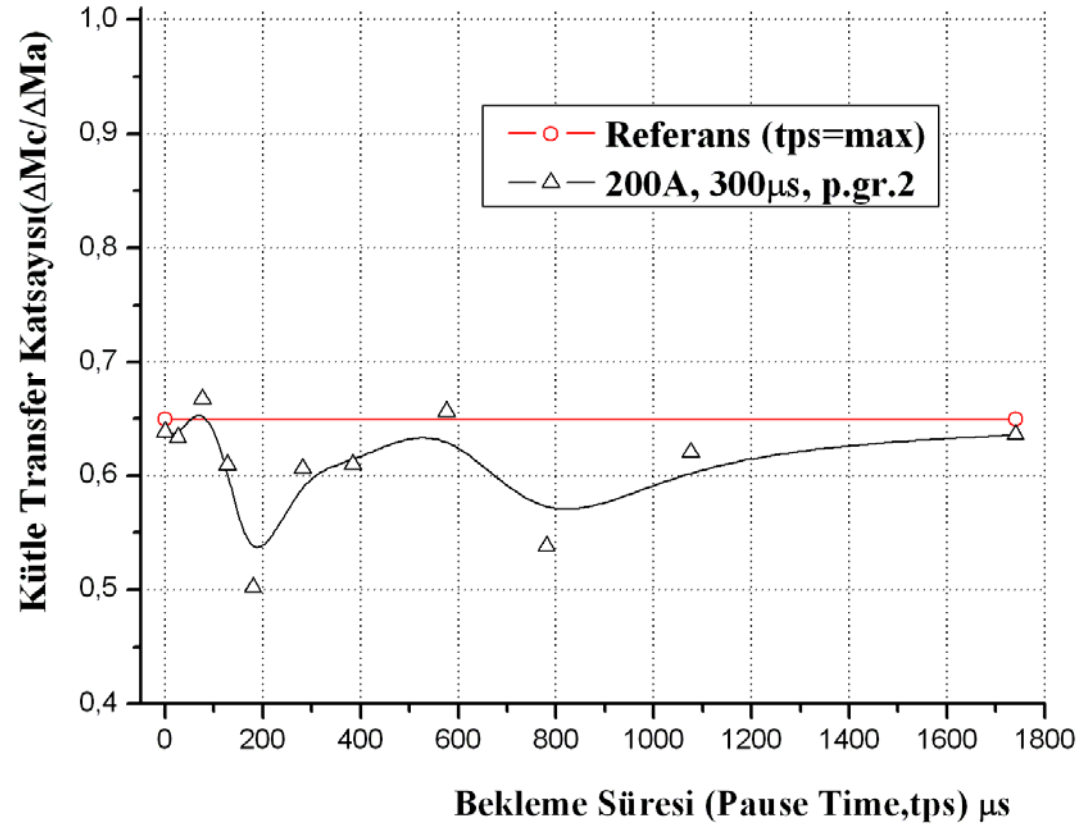
Şekil 5.4. Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafiği. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 200A ve pulse süresi $t_p=100\mu s$ dir.



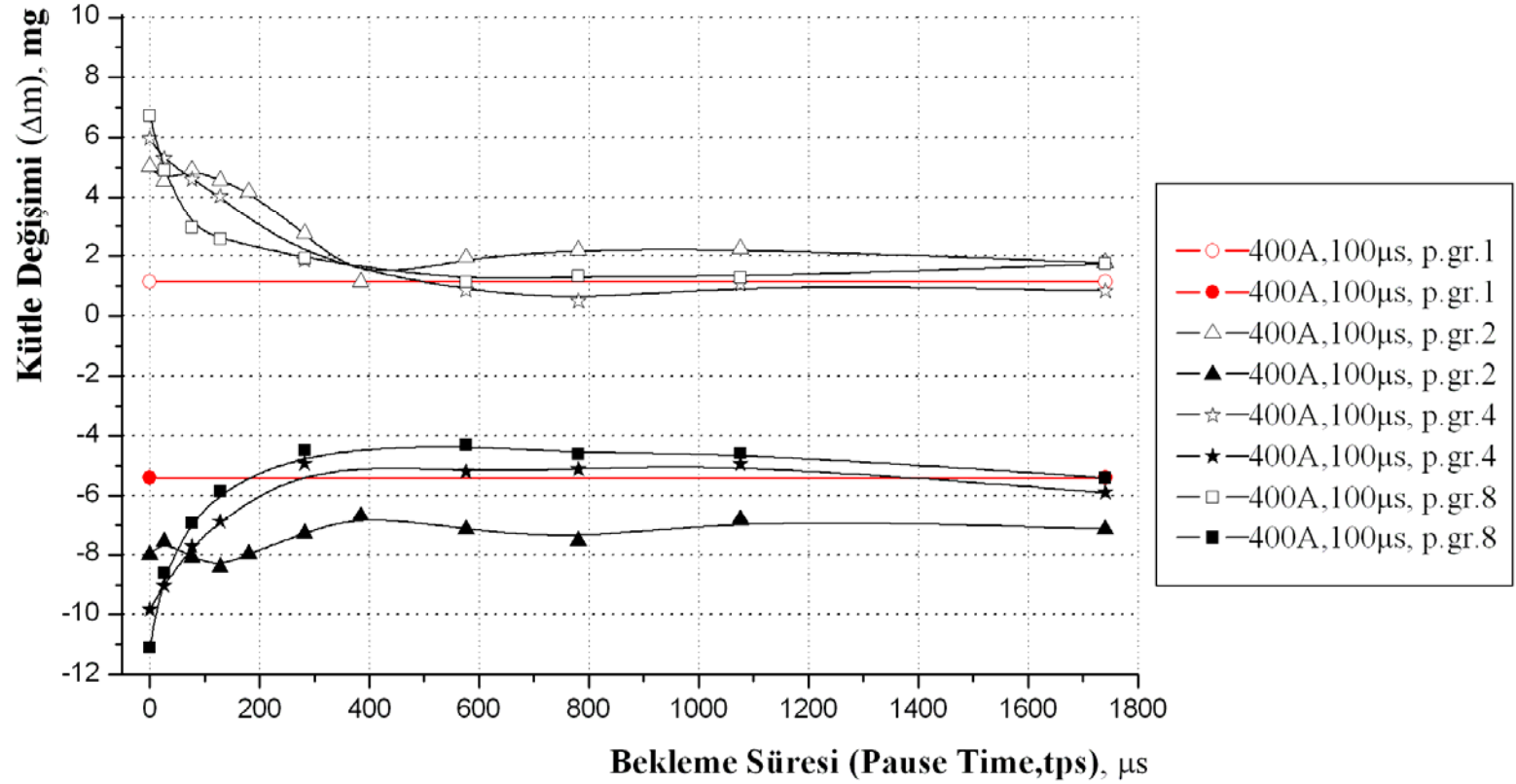
Şekil 5.5. Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kaplama yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafikleri. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 200A ve pulse süresi $t_p=100\mu s$ dir



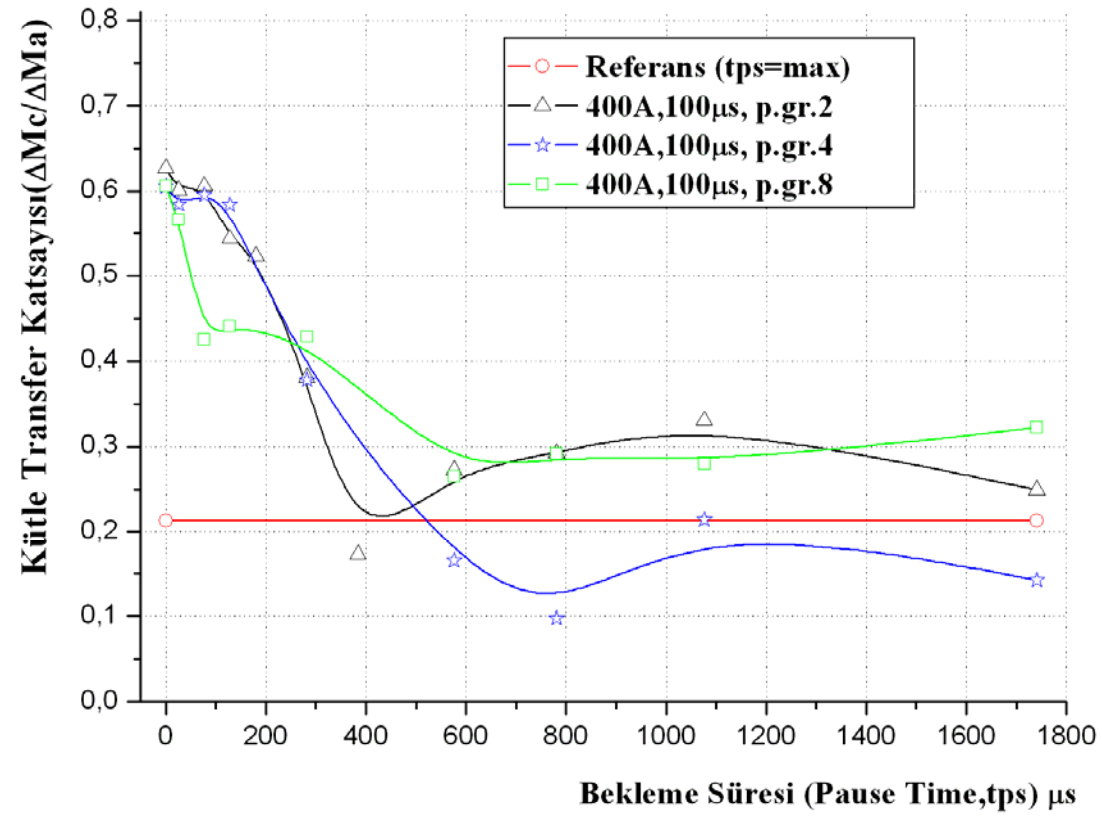
Şekil 5.6. Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 200A ve pulse süresi $t_p=300\mu s$ dir.



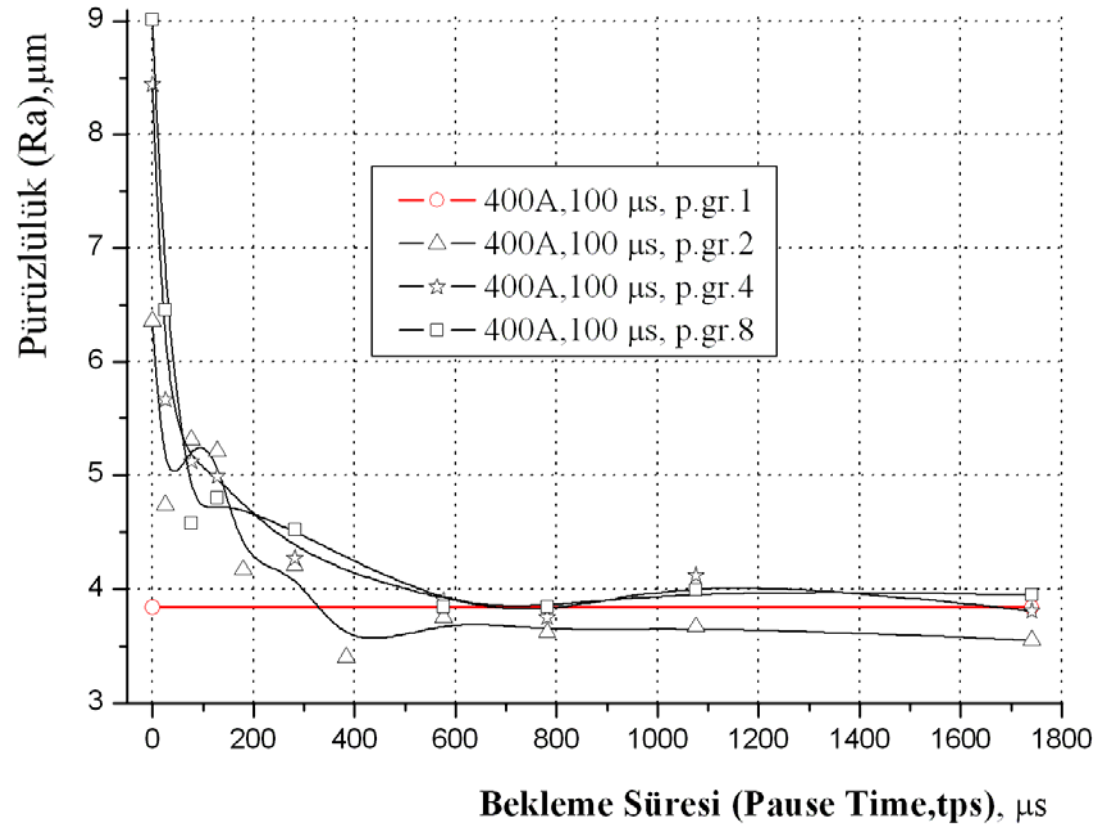
Şekil 5.7. Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafiği. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 200A ve pulse süresi $t_p=300\mu s$ dir.



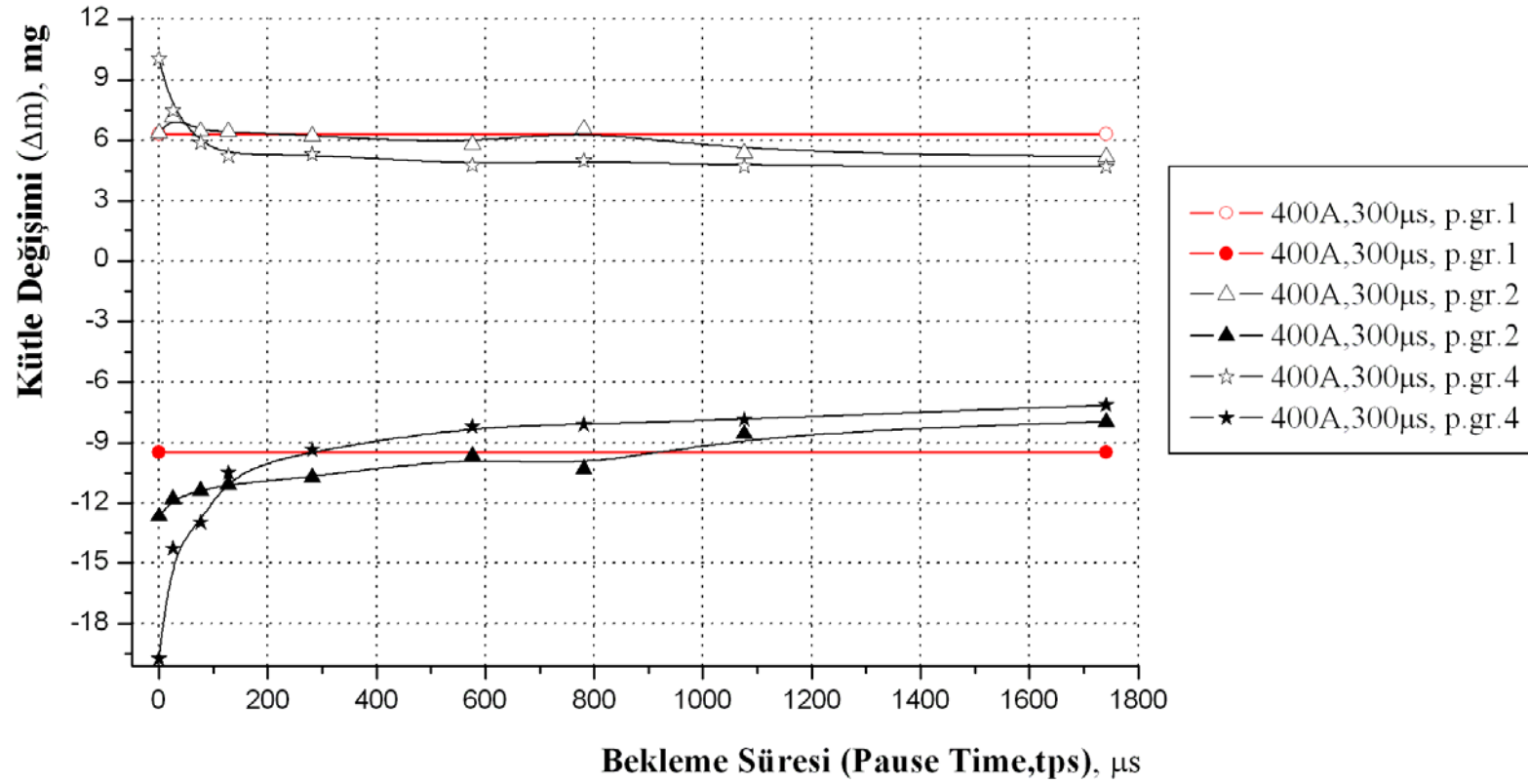
Şekil 5.8. Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 400A ve pulse süresi $t_p=100\mu s$ dir.



Şekil 5.9. Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafikleri. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 400A ve pulse süresi $t_p=100\mu s$ dir.



Şekil 5.10. Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kaplama yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafikleri. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 400A ve pulse süresi $t_p=100\mu s$ dir.



Şekil 5.11. Bir pulse grup içinde, pulse sayısı ve pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Her bir pulse ın parametreleri, akım şiddeti 400A ve pulse süresi $t_p=300\mu s$ dir.

5.3.2. Pulse Enerjileri Artan Bir Şekilde Farklı Enerjili İki Pulse İçeren Pulse Gruplarının Uygulanması;

Özdeş pulse lar ile yapılan üstteki deneysel çalışmada grup pulse lar içinde ikinci ve sonraki pulse ların enerji miktarının spark discharge ları oluşturmaya ve neticesinde erozyona uğrayacak kütlenin patlatılmasına yeterli olmayacağı şeklinde bir sonuca varmıştık. Bu nedenle ikinci pulse ın enerjisi daha fazla olacak şekilde yeni bir grup pulse ları ESD kaplama prosesi deneylerinde tatbik ettik. Tablo 5.1. de bu kapsamlı deneysel çalışmanın kilit rolündeki bazı önemli sonuçları sunulmaktadır. Bu tabloda gösterilen datalar; her bir pulse grup içindeki birinci ve ikinci pulse ait elektrik parametreleri (akım şiddeti ve pulse süresi, t_p , pulse ların enerjileri), pulse grupların frekansdır. Ayrıca tablo da, uygulanan bu grup pulse lar neticesinde elde edilen referans (base) datalar ($t_{ps}=1800 \mu s$ ve $t_{ps}=0$) için anodun kütle kaybı değerleri ve anottaki maksimum erozyon miktarına tekabül eden pulse lar arası bekleme süreleri de (t_{ps}) sunulmaktadır. Önceki özdeş pulse grupların uygulanmasında olduğu gibi gene $t_{ps}=0$ ve $t_{ps}=\max (1800 \mu s)$ referans olarak alınmış ve tek bir nokta yerine yatay çizgi ile temsil edilmişlerdir.

ESD proste anodik erozyonun ve doğal olarak asıl amacımız olan katot üzerine transfer edilecek kütlenin arttırılması için kullanılan pulse ların yoğunlaştırılması üzerine yaptığımız deneylerde elde edilen sonuçları incelemek ve bizim bakış açımıza göre, anottaki kütle kaybının arttırılması için ileri sürdüğümüz metodun verimliliğini tahmin etmek için Tablo 5.1. de sunulan datalar yeterlidir. Eğer katodun kazandığı kütle ile anodun erozyon sonucu kayıp ettiği kütle dinamiklerini (ΔM), kütle transfer katsayılarını ve kaplamanın pürüzlülüğünü (R_a) pulse lar arası bekleme sürelerinin (t_{ps}) bir fonksiyonu olarak değişimini görmek istersek Şekil 5.12.-5.23. de verilen grafiklere dikkat çekmek gerekir.

Tablo 5.1. ESD kaplama prosesinde uygulanan pulse ların elektrik parametreleri ve anottaki kütle kaybı (erozyon) miktarları.

Deney No	Grup içinde pulse	Enerji (Joule)	Akım Şiddeti (A)	Pulse'lar arası bekleme süresi, μ s	Grup pulse' ın frekansı, Hz	Anodun kütle kaybı (referans data), mg	Anodun maksimum kütle kaybı, mg/ bekleme süresi, μ s
1.	Birinci	0.268	200	100	56	6.68, $t_{ps}=\max$	10.52 / $t_{ps}=282$
	İkinci	0.634	200	200		8.58, $t_{ps}=0$	
	Bitişik						
2.	Birinci	0.268	200	100	41	9.06, $t_{ps}=\max$	11.46 / $t_{ps}=26$
	İkinci	0.982	200	300		10.88, $t_{ps}=0$	
	Bitişik						
3.	Birinci	0.268	200	100	109	6.12, $t_{ps}=\max$	7.86 / $t_{ps}=282$
	İkinci	0.443	400	100		6.18, $t_{ps}=0$	
	Bitişik						
4.	Birinci	0.268	200	100	48	7.69, $t_{ps}=\max$	11.8 / $t_{ps}=384$
	İkinci	1.05	400	200		8.4, $t_{ps}=0$	
	Bitişik						
5.	Birinci	0.982	200	300	19	9.74, $t_{ps}=\max$	14.72 / $t_{ps}=77$
	İkinci	1.82	400	300		14.86, $t_{ps}=0$	
	Bitişik						
6.	Birinci	0.982	200	300	15	10.16, $t_{ps}=\max$	14.84 / $t_{ps}=77$
	İkinci	2.5	400	400		12.02, $t_{ps}=0$	
	Bitişik						
7.	Birinci	0.982	200	300	13	9.56, $t_{ps}=\max$ 0	13.88 / $t_{ps}=180$
	İkinci	3.02	500	400		12.28, $t_{ps}=0$	
	Bitişik						
8.	Birinci	0.443	400	100	34	7.1, $t_{ps}=\max$	11.42 / $t_{ps}=375$
	İkinci	1.05	400	200		9.66, $t_{ps}=0$	
	Bitişik						
9.	Birinci	0.443	400	100	24	6.02, $t_{ps}=\max$	13.18 / $t_{ps}=180$
	İkinci	1.82	400	300		11.16, $t_{ps}=0$	
	Bitişik						
10.	Birinci	0.443	400	100	34	7.5, $t_{ps}=\max$	11.08 / $t_{ps}=375$
	İkinci	1.07	500	170		9.54, $t_{ps}=0$	
	Bitişik						
11.	Birinci	1.82	400	300	10	12.16, $t_{ps}=\max$	14.56 / $t_{ps}=180$
	İkinci	3.12	400	500		14.52, $t_{ps}=0$	
	Bitişik						

Deneyisel olarak gösterilmiş olduğu üzere, ESD kaplama prosesinde farklı enerjilere sahip iki farklı pulse ile oluşturulan grup pulse ların kullanımı anodun erozyon miktarında esaslı bir artış sağlamıştır. Bu yüzden de sonuç olarak erozyon miktarındaki bu artış, katoda transfer olan kütle de bir artış sağlamıştır. Hatta anot ve katot da ki bu kütle değişim miktarları bir iki istisna hariç çoğunlukla referans data olarak aldığımız bir diğer limit $t_{ps}=0$ de yani pulse ların bitişik olduğu durumdan bile fazla olmuştur. Bir önceki kısımda özdeş pulse lar kullanılarak 2 li grup pulse lar ile elde edilen Şekil 5.8. dekine benzer bir biçimde, anottaki kütle kaybı grafiğinin eğiminin gidişatı incelenirse bu kısım içinde yapılan deneylerde de anottaki kütle erozyonun belli bir pulse bekleme süresinden sonra artık stabile bir hal aldığı ve 1800 μs sonrası bile hala $t_{ps}=\max$ 'ın üstünde olacağı görülür. Yani anodun erozyon artışının sağlandığı ikinci pulse da pulse süresini arttırabilmek için geniş bir aralık olduğu gibi bir sonuca varılabilir (pulse lar arası bekleme süresi içinde).

Deneylerden elde edilen grafikler incelenirse (Şekil 5.12.-5.23.), bir iki istisna hariç, grafiklerdeki anodun kütle kaybı değerleri genellikle katodun kütle kazanımı değerleri kadar bir maksimuma sahiptirler ve pulse lar arası bekleme süresinin 30 ile 400 μs arasındadırlar. Buna rağmen pratik olarak bu maksimumum değerlere ulaşma zamanı ile pulse çiftleri ve pulse lar arası durma süreleri parametreleri arasında bir ilişki olduğu göze çarpsa da teorik olarak bir korelasyon (bağlantı) saptanmamıştır. Zaten araştırmamızda teorik bir bağlantı elde etmeyi amaç edinmedik.

Geliştirilen ESD kaplama metodunun, geleneksel ESD rejimi ile yapılan kaplama metoduna göre en büyük avantajı, katotta kazanılan kütle ile anotta erozyon olan kütle değerleri açısından aynı miktarı elde etmek için daha yüksek enerjili pulse ları kullanmaya gerek olmamasıdır. Diğer bir ifadeyle daha az miktarda enerji verilmesine rağmen uyguladığımız metotla yoğunlaştırılmış pulse grupları ile daha verimli hale gelen bir prosesle daha fazla anodik erozyon dolayısıyla katoda daha fazla kütle transferi mümkün olmaktadır. Örneğin geleneksel ESD rejiminde pulse akım şiddeti 200 A, pulse süresi 800 μs ve enerjisi 2.72 J olan bir pulse kullanılarak yaklaşık olarak katot da 4 mg bir kütle artışı ve anotta 6.5 mg kütle erozyonu gerçekleştirilirken [Rbalko,2006] ilk pulse ın süresi 100 μs , ikinci pulse sının süresi 200 μs ve akım genliği 200 A olan pulse ların toplam enerjisi 0.903 J eden bir grup

pulse ların uygulanması ile pulse lar arası bekleme süresi 282 μ s de katotta 8.32 mg kütle kazanımı ve anotta da 10.52 mg kütle erozyonu elde edilmektedir (Şekil 5.12.). Bunun yanı sıra yüksek pulse enerji kullanıldığı takdirde geleneksel ESD rejiminde sıklıkla görülen, prosesin verimliliğini düşüren ve kaplamanın kalitesine etki eden, elektrotların birbirine yapışması, şiddetli ultra-viyole radyasyonu gibi hususlar geliştirilen bu yeni metotta ortadan kalkmıştır.

Bu yeni metodun bir diğer avantajı da anot dan katot'a daha yüksek miktarda kütle transferine rağmen yüzey pürüzlülüğünün (R_a) düşük olması hatta pulse ların bitişik olduğu ($t_{ps}=0$, referans data) durumda yapılan ESD kaplamadan bile daha az olmasıdır. Üstelik belirli pulse lar arası bekleme süresi parametreleri için, örneğin $t_{ps} = 400 - 1800 \mu$ s arasında, pürüzlülük değerleri diğer bir referans olarak aldığımız maksimum, $t_{ps}=1800 \mu$ s da ki ESD kaplamada elde edilen değerden bile aşağıdadır (Şekil 5.14.).

Bununla beraber, kütle transferinin önemsiz derecede az olduğu bazı pulse bekleme süreleri aralıklarında bile bu sürelerin (t_{ps}) büyüklüğüne bağlı olarak kaplamanın yüzey pürüzlülüğünde belirgin artışlar görülmektedir (Şekil 5.14.-5.23.). Bunun nedeni tam olarak anlaşılamamakta birlikte kütle transferi prosesinde karşılaşılan yeni bir transferi mekanizması olabilir. Ya da prosesin bu pulse parametrelerinde ergimiş haldeki transfer olan kütlenin uzun pulse bekleme sürelerinde farklı bir katılma mekanizmaları neticesinde tam olarak yan yana (overlap) kaynaşmadıklarından dolayı olabilir.

ESD kaplama prosesi üzerinde yapılan bu son deneylerin incelemelerinden anlaşılmıştır ki büyük genliğe sahip olmayan (yani 200 A gibi küçük akım şiddetli, Şekil 5.12.) pulse lar dan teşkil edilen grup pulse ların tatbik edilmesiyle birim pulse başına yapılan etkinin bir sonucu olarak anot dan katoda transfer olan büyük kütle miktarının kaplama oluşumunun mimarisi (geometrik, yapısal olarak) üzerinde özel bir takım zorluklar oluşturduğu anlaşılmıştır. Çünkü bu koşul altında yapılan alaşımlama da ilk eroziv splash (damlacık) çapı küçüktür. Bu şekilde kütle transferi prosesi devam ederse katot üzerinde transfer olan ilk splash üstünde tepe şeklinde bir depozisyon meydana gelir. Neticede pek çok sayıda tepeciği içeren bir depozisyon

gerçekleşmiş olur. Meydana gelen bu tepelerin sonradan oluşacak bir sonraki discharge ların lokasyonuna (oluşum yerine) etkisi olacağından dolayı kütle transferi lokasyon sırası tercihli olacak şekilde (spark discharge lar birbirine en yakın noktalar arasında gerçekleşir) bir kütle depozisyonu ile karşılaşılacaktır. Doğal olarak bu tercihli depozisyon nedeniyle damlacık tepeleri arasındaki yerler (boşluklar) ESD proses esnasında tam anlamıyla doldurulamayacağından kaplamada süreksiz, üniform olmayan bir depozisyon görülür.

İkinci pulse ın akım şiddetini arttırdığımız zaman, örneğin 400A veya daha fazla, tamamıyla yukarıda bahsedilenden farklı bir depozisyon biçimi ile karşılaşmıştır (Şekil 5.15.). Bu durumda sürekli, üniform bir depozisyon oluşturmada herhangi problem mevcut olmamıştır.

Pulse çiftinin elektrik parametrelerine ve pulse lar arası bekleme sürenin büyüklüğüne bağlı olarak işlem elektrotunun, sanki yağlanmış yüzeyler üzerindeymiş gibi deposit olan tabakalar üzerinde çok kolayca hareket ettiği bir alaşımlama rejimi deneysel olarak gözlemlenmiştir. Böylece tam bir kolaylık ve rahatlık içinde ve yüksek bir hızla (referans datayla mukayese edilirse, iki kat daha fazla hızlı) ESD proses gerçekleştirilmiştir. Oluşan bu kaplama tabakası için de yüksek derecede bir sürekliliğe (üniformaluluğa) sahip olduğu söylenebilir. Örnek olarak 8 ve 9 numaralı deneylerdeki (Tablo 5.1.) verilen pulse parametreleri ile pulse lar arası bekleme süreleri sırasıyla 384 μ s ve 282 μ s olan grup pulse lar ile yapılan alaşımlamalar gösterilebilir.

Elde edilen bu üstteki sonuçlar, spark discharge lar neticesindeki aşırı ısınmadan dolayı, henüz kaplanmış tabakaların altında kısmen altlığın iç kısımlarında oluşan buharlaşmanın yol açtığı kusurlar (kaplamadaki boşluklar, çatlaklar v.s.) oluşmaksızın kaplamanın kalınlığını arttırmak için bize yeni perspektifler açar [Ribalko,2003; 2005]. Kısacası, kaplama kalınlığını arttırmak için tabaka üstüne tabakanın deposizyonunun yapıldığı geleneksel ESD teknolojisi yerine, mümkün olabilecek en büyük miktardaki kütle transferi imkânlarını sunan ve böylece tek bir kaplama tabaka deposizyonu yoluyla daha kalın bir kaplama elde etme yolunu açan yeni ESD teknolojisini (yoğunlaştırılmış grup pulse lar) kullanmak daha avantajlıdır.

Bu noktadan sonra problem hata yada herhangi bir kusur oluşturmaksızın tek bir kaplama tabakasının depozisyonu için ne kadar büyük miktarda kütlenin transfer edilebileceğidir. Bu maksatla tek bir tabakadan oluşan kaplama için yapılan ESD prosesi deneylerinde, elde edilen kütle transfer miktarlarındaki farklar ve onların enine kesitleri ile morfolojisinin mikroskopik incelemeleri yapıldı. Örnek olarak, 200A,100 μ s + 400A,200 μ s grup pulse da, $t_{ps}=384 \mu$ s için özgül kütle transfer miktarı (50sn için katodun kazandığı kütle miktarı 7.8mg, özgül kütle transferi miktarı 0.053mg/C idi, Şekil 5.15.) referans data $t_{ps}=\max$ da olduğu değerden (50sn için katodun kazandığı kütle miktarı 4.17mg, özgül kütle transferi miktarı 0.027mg/C idi) iki kat fazla olmasına rağmen yüzey morfolojileri görünümünün birbirlerinden oldukça farklı olmadıklarını göstermektedir. Üstelik ilk durumda, $t_{ps}=384 \mu$ s lokal buharlaşma kraterlerinin sayısı $t_{ps}=\max$ da olduğu durumdan bile daha azdır (Şekil 5.24.). Kütle transferi o kadar büyük ki altlık üzerine dökülen ergimiş büyük damlacıklar etrafa saçıldıktan sonra katılaşp işgal ettikleri alan, orijinal spotun ($t_{ps}=\max$ daki) olduğundan çok daha büyüktürler. Bu hadise, tabaka (kaplama) oluşum mekanizmasının başka bir çeşidi olup daha önce bahsedilen proses esnasındaki kayma etkisinin (kaplama esnasında hızlı hareket) nedeninin de bir açıklaması olabilir.

Bununla birlikte, katoda transfer olan kütlede esaslı bir artış, örneğin 200A,300 μ s + 400A,300 μ s grup pulse, $t_{ps} = 77 \mu$ s bekleme süresi ve $f = 19$ Hz (Tablo 5.1.) pulse parametrelerinde 50sn kaplama hızı için elde edilen 9.86mg kütle artışı (bu pulse grup için özgül kütle transferi yaklaşık 0.065mg/C dir), kaplama oluşumunda bozulma tehlikesi ile birlikte oluşmuştur (Şekil 5.25). Porozitelerin sayısında ve boyutlarında artış, çatlakların başlangıcı ve gelişimi v.s. gibi olumsuzlukların başlıca sebepleri; transfer edilen ergimiş haldeki kütleler tarafından biriktirilmiş toplam ısıнын yol açtığı, kaplama-altlık arasındaki ara yüzey bölgedeki malzemenin kaynar hale gelmesi ve ayrıca ikinci pulse ın oluşturduğu spark discharge tarafından temin edilen ısıнын henüz transfer olmuş yüzeydeki kütleyi buharlaştırmasıdır [Ribalko,2003; 2005].

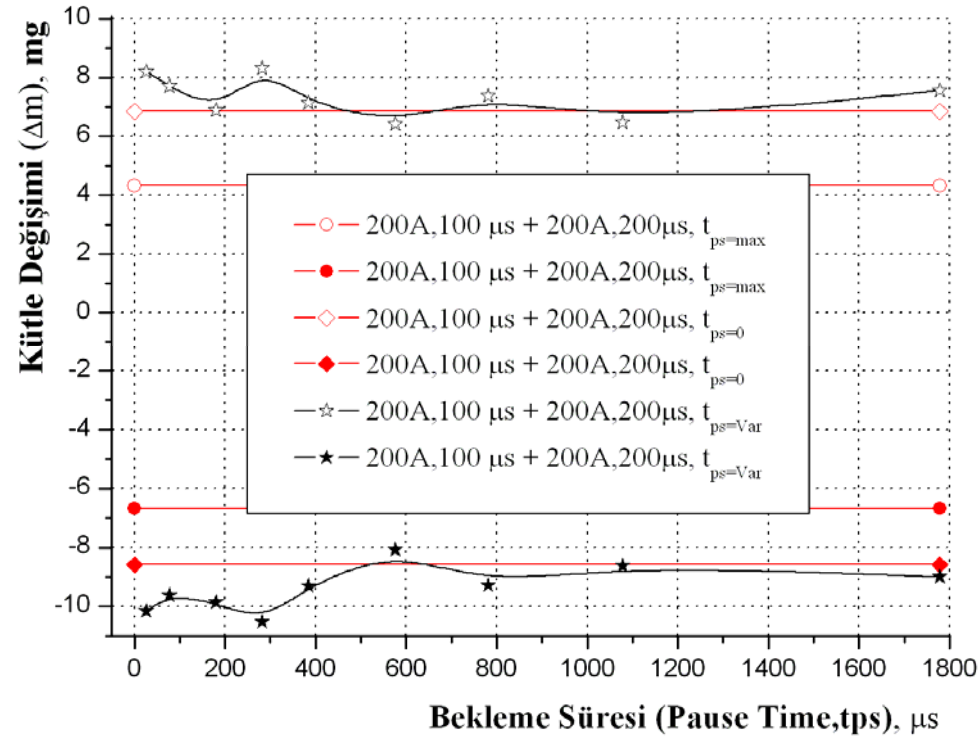
Şekil 5.21. de verilen parametrelere (pulse lar arası bekleme süresi 77 μ s, 50sn için katodun kazandığı kütle 9.86mg, grup özgül transferi 0.064mg/C) haiz grup

pulse larının kullanılması ile yapılan kaplama prosesinde yüzeydeki lokal buharlaşma kraterlerin yüzdesi $t_{ps}=\max$ lı baz parametrelili (grup pulse lar esnasında katot tarafından alınan özgül kütle transferi 0.034mg/C) proses ile elde edilen yüzeydekenden çok fazladır. Buharlaşma kraterlerin sayısı ile ilgili veri, açık havada özellikle oksitlenmeye maruz kalınca paslanan demirin numunelerin yüzeylerinde bıraktığı pas lekelerinin sayısal analizlerinden elde edilmiştir. Çünkü havadaki oksijen çoğunlukla altlık malzememizin içerdiği demiri oksitleyeceğinden, doğal olarak alaşım yüzeyinde yoğun buharlaşmadan dolayı altlıktan gelen demirin daha bol olduğu bölgelerde oksitlenme daha yoğun ve geniş olacaktır. Yukarıda verilen şartlar altında gerçekleşen alaşımlamanın (kaplamanın) enine kesitinin mikroskopik incelemeleri bize, buharlaşma ve bunun yanında kaynar bir halde transfer olan kütle (katılaşmadan önce) tarafından şartlarının belirlendiği yoğun porosite ve çatlak oluşumunun mevcut olduğunu göstermektedir (Şekil 5.25.).

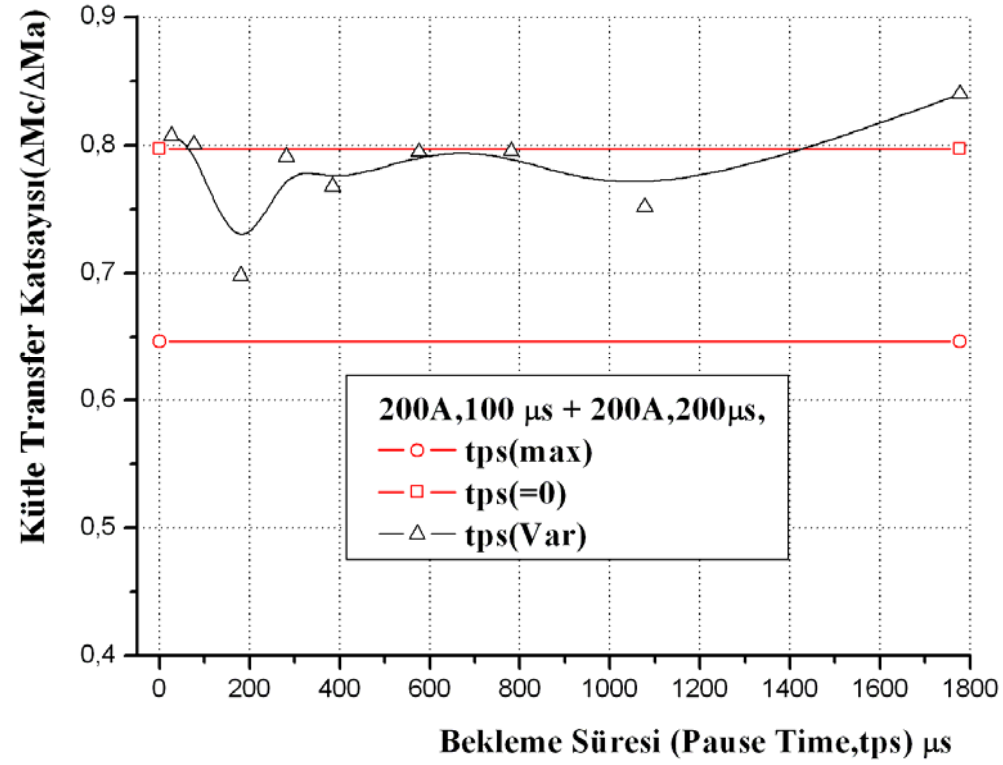
Ayrıntılı analizlere göre, hatasız (kusursuz) bir ESD kaplamanın şartlarının yerine getirilmesi için her pulse grubunun birim etkisinin bir sonucu olarak anottan katoda transfer olan kütlenin miktarının sınırlanması gereklidir. Deneyler St35 çelik, WC92-Co8 çifti için bu birim etkinin yani özgül kütle transferinin 0.065-0.07mg/C yi aşmaması gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

Tablo 5.2. Farklı pulse grupları ile ESD kaplama metodu sonucu elde edilen maksimum kütle değişimlerinin referans değerlerine göre artış miktarları.

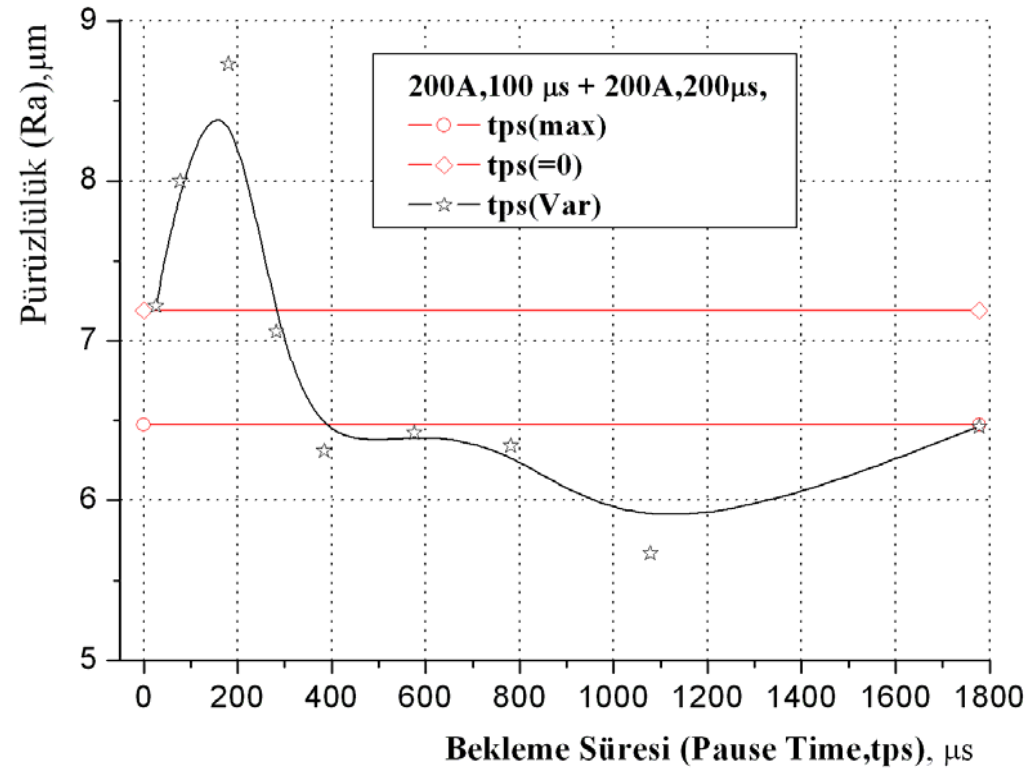
Pulse Grupları	Referans1 ($t_{ps}=\max$)'e göre		Referans2 ($t_{ps}=0$)'e göre	
	Maksimum Kütle Transferi (ΔMc)	Maksimum Kütle Erozyonu (ΔMa)	Maksimum Kütle Transferi (ΔMc)	Maksimum Kütle Erozyonu (ΔMa)
200A,100 μ s + 200A, 200 μ s	$t_{ps}= 282 \mu$ s % 92	$t_{ps}= 282 \mu$ s % 57	$t_{ps}= 282 \mu$ s % 21	$t_{ps}= 282 \mu$ s % 22
200A,100 μ s + 400A, 200 μ s	$t_{ps}= 384 \mu$ s % 87	$t_{ps}= 384 \mu$ s % 53	$t_{ps}= 384 \mu$ s % 47	$t_{ps}= 384 \mu$ s % 40
400A,100 μ s + 400A, 200 μ s	$t_{ps}= 180 \mu$ s % 87	$t_{ps}= 375 \mu$ s % 60	$t_{ps}= 180 \mu$ s % 28	$t_{ps}= 375 \mu$ s % 18
200A,300 μ s + 400A, 300 μ s	$t_{ps}= 77 \mu$ s % 87	$t_{ps}= 77 \mu$ s % 51	$t_{ps}= 77 \mu$ s % 6	$t_{ps}= 77 \mu$ s --



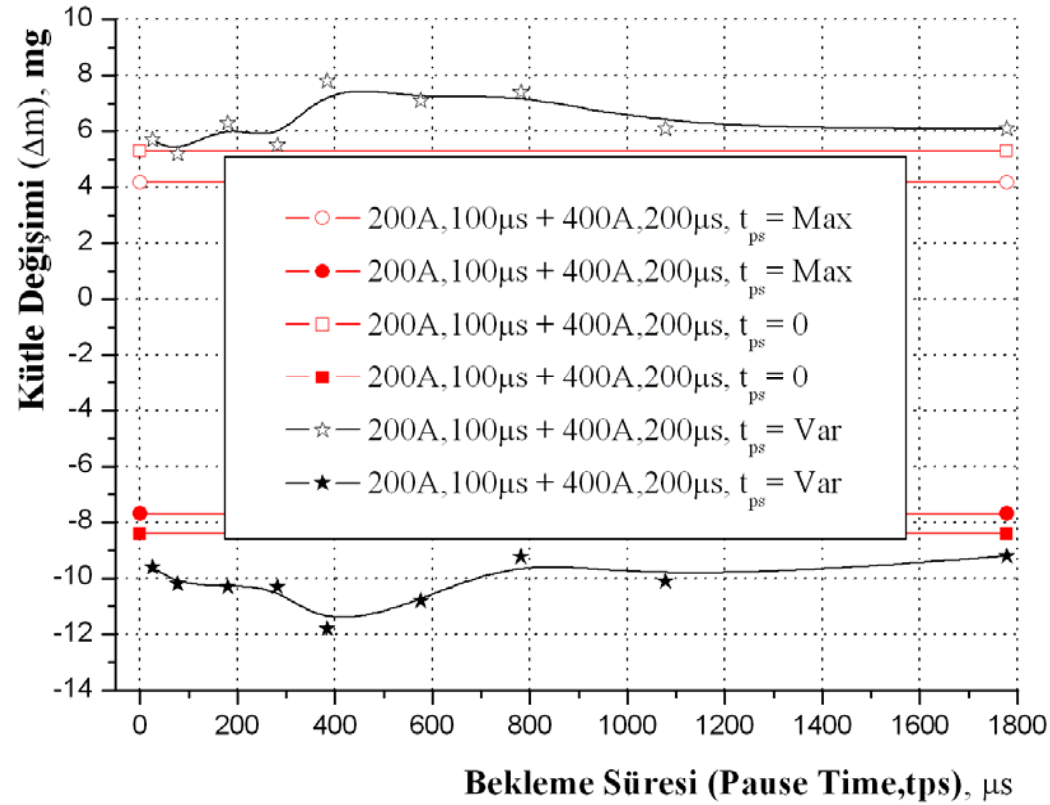
Şekil 5.12. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 100 μs ve ikinci pulse ın parametreleri 200A ve 200 μs dir.



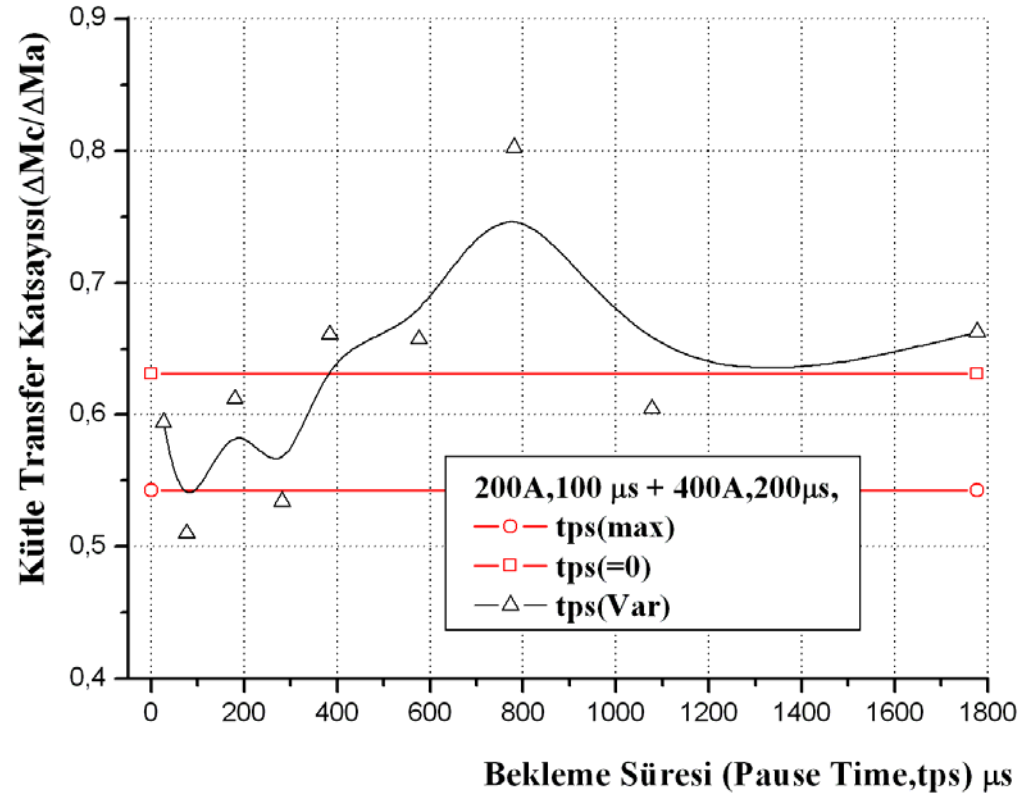
Şekil 5.13. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 100 μs ve ikinci pulse ın parametreleri 200A ve 200 μs dir.



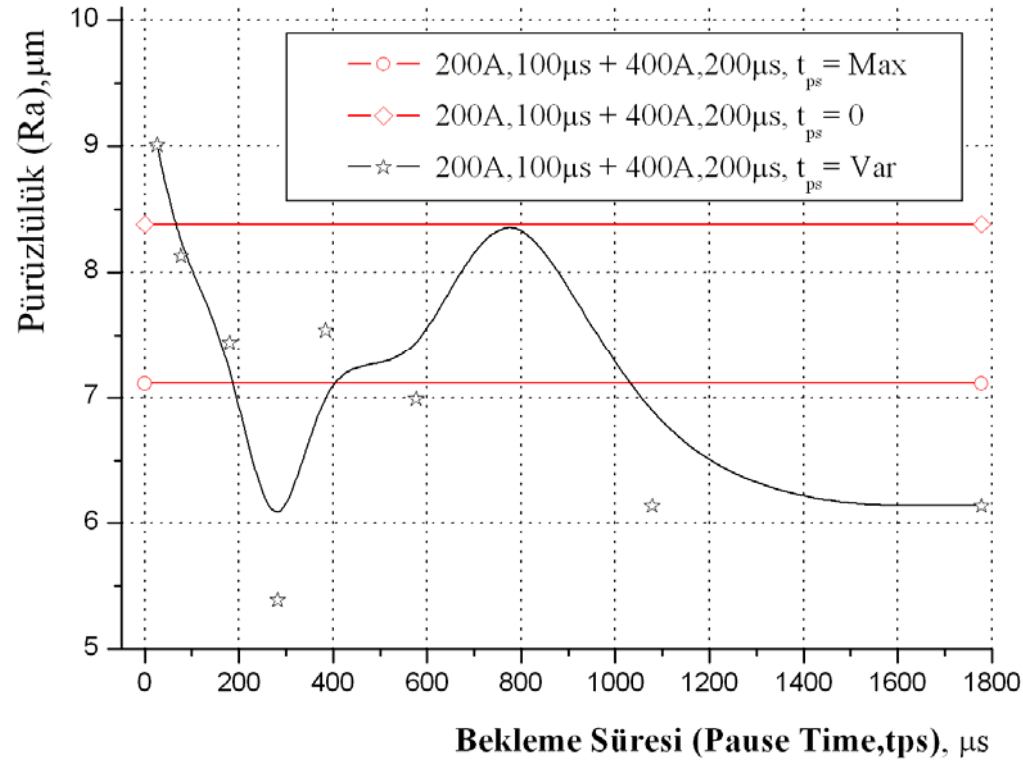
Şekil 5.14. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve $100 \mu s$ ve ikinci pulse ın parametreleri 200A ve $200 \mu s$ dir.



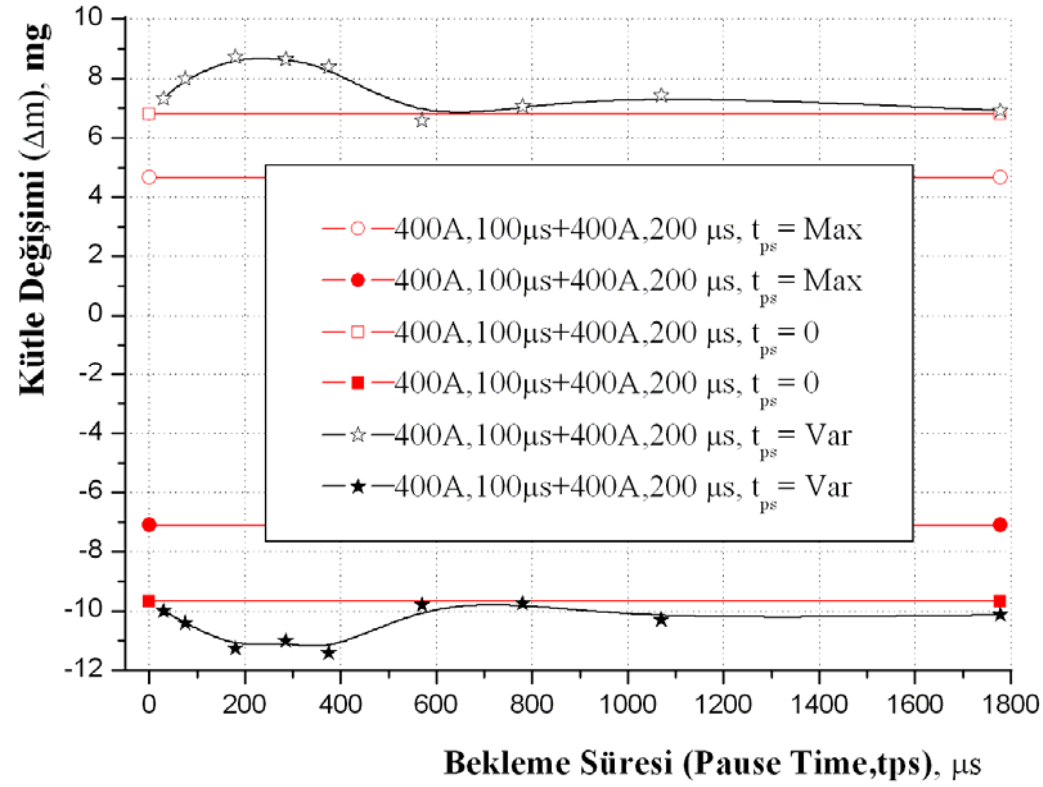
Şekil 5.15. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 100 μs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 200 μs dir.



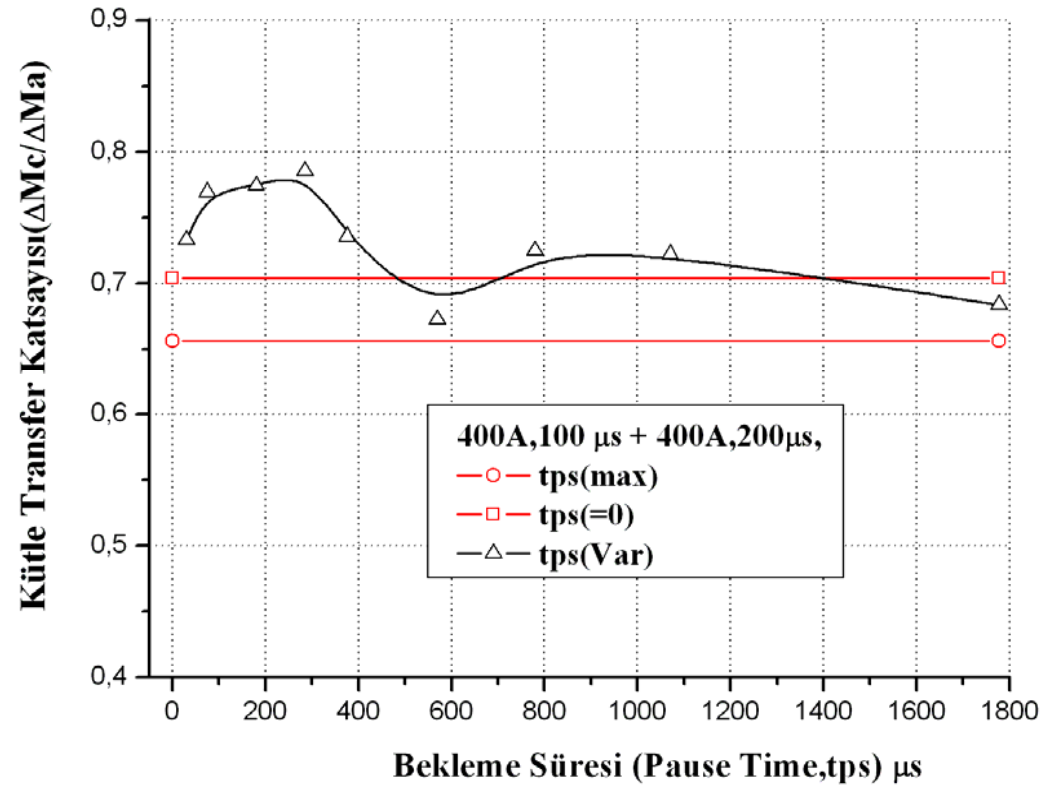
Şekil 5.16. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 100 μs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 200 μs dir.



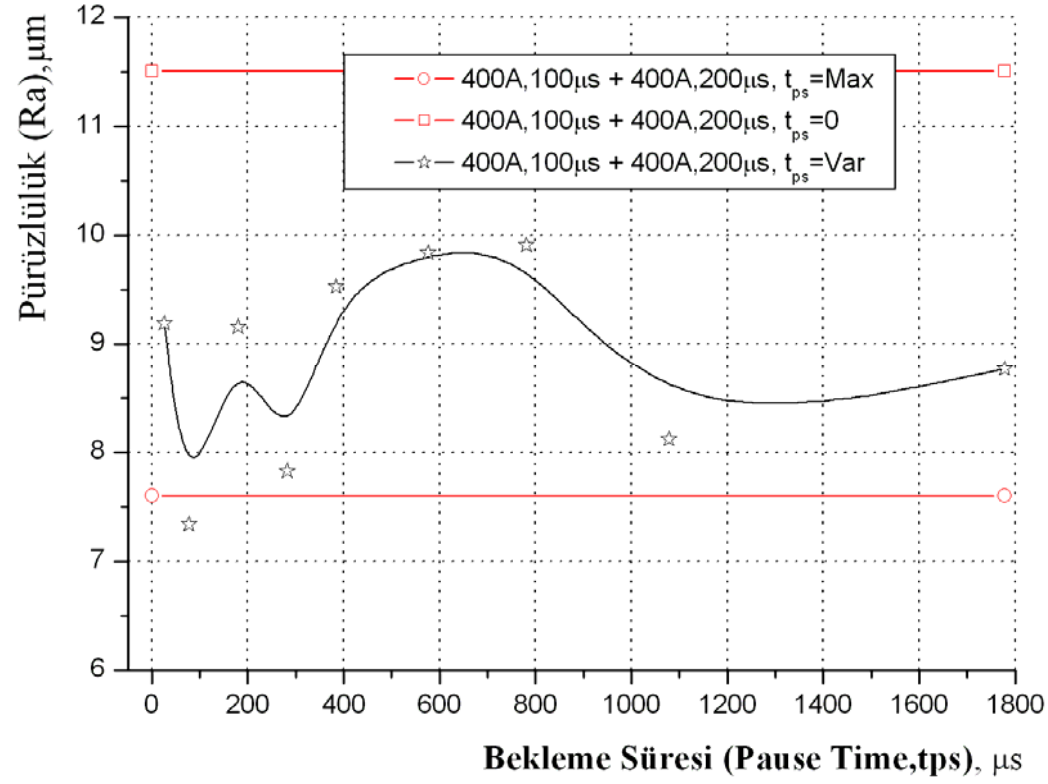
Şekil 5.17. Farklı enerjili iki farklı pulse in oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafiği. Birinci pulse in parametreleri 200A ve 100 μs ve ikinci pulse in parametreleri 400A ve 200 μs dir.



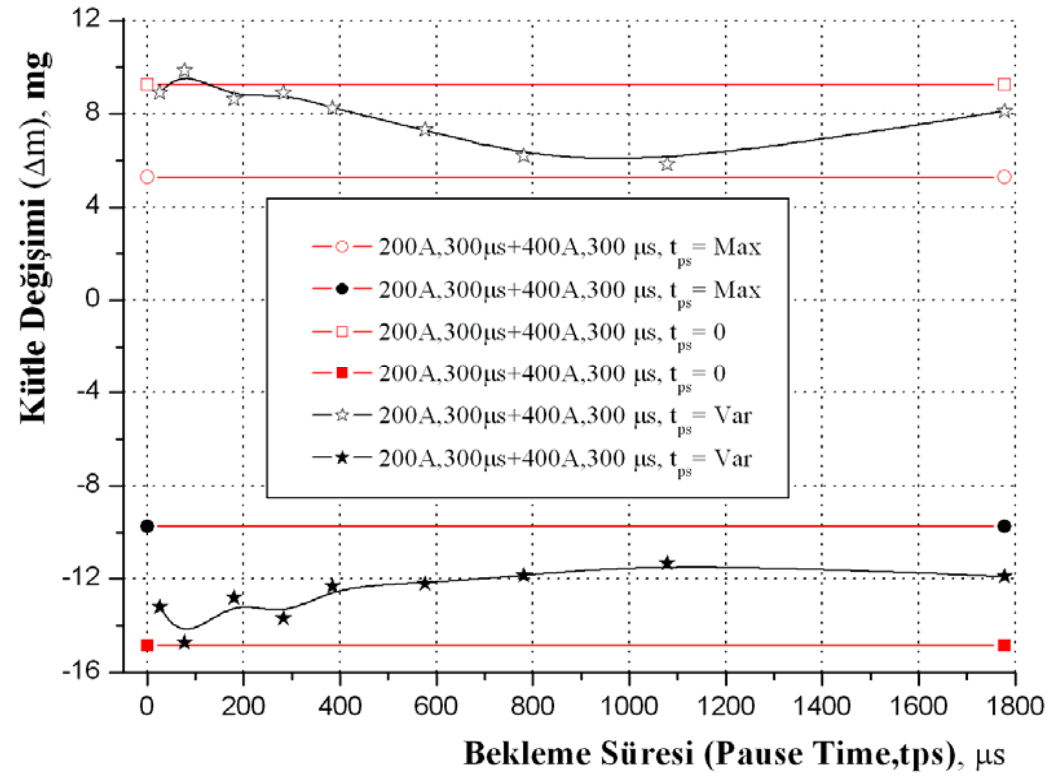
Şekil 5.18. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Birinci pulse ın parametreleri 400A ve 100 μs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 200 μs dir.



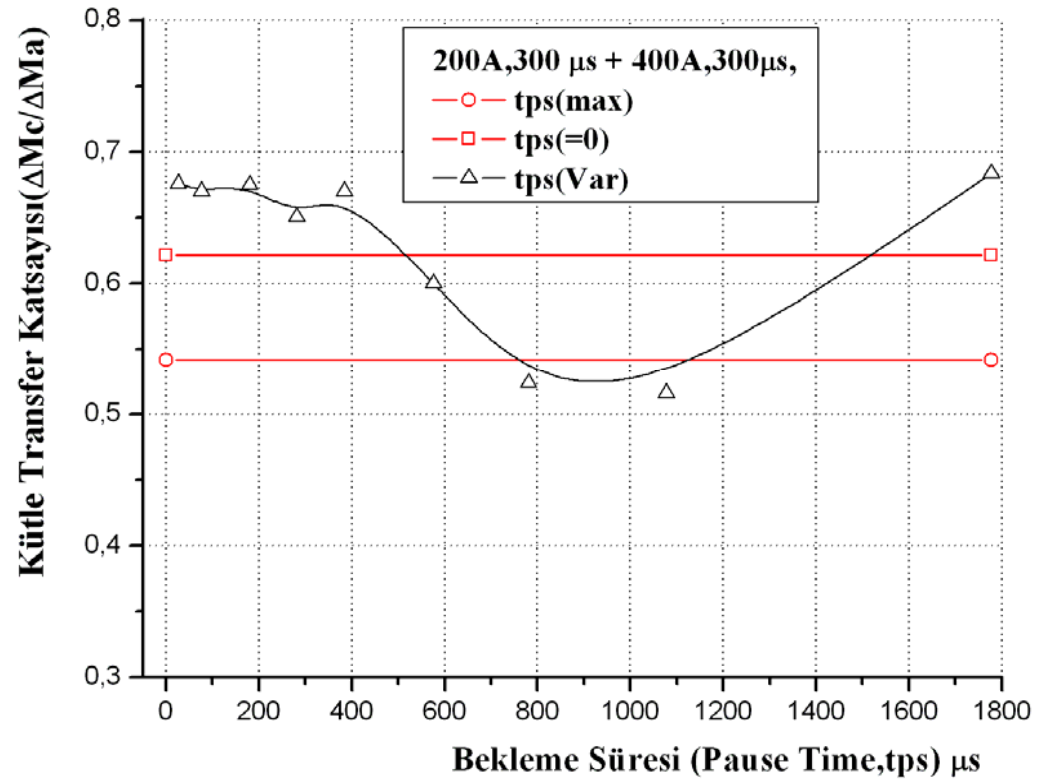
Şekil 5.19. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 400A ve 100 μs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 200 μs dir.



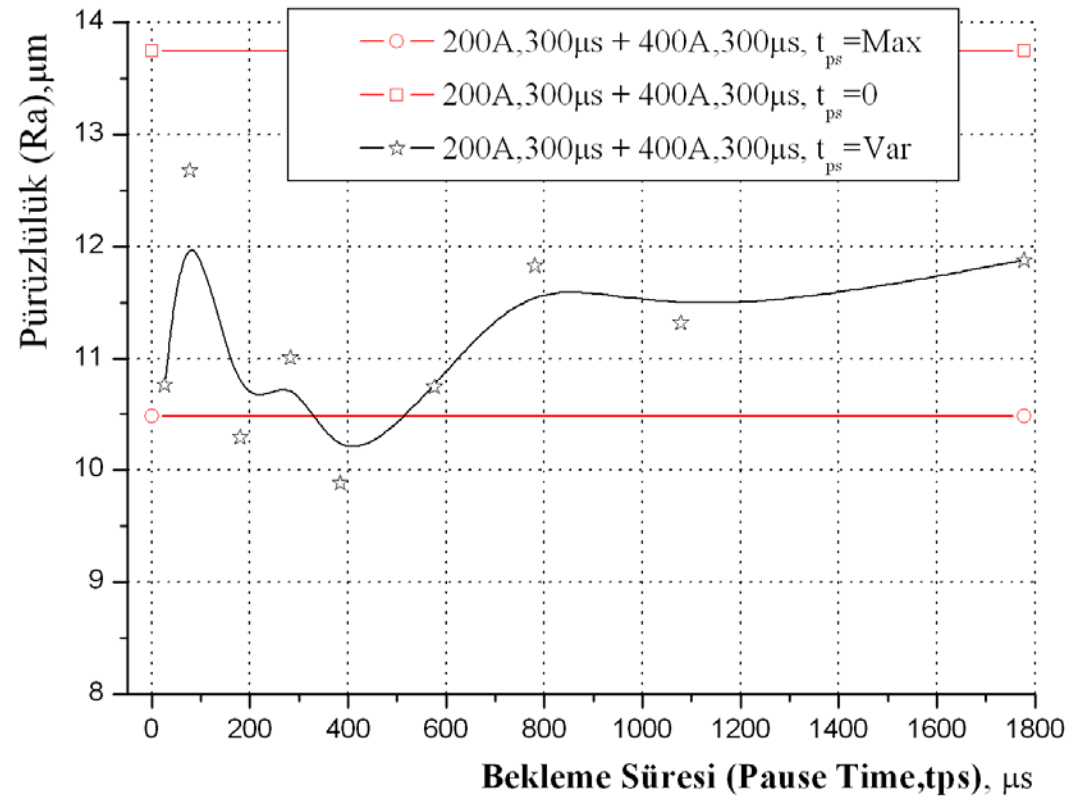
Şekil 5.20. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 400A ve 100 μs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 200 μs dir.



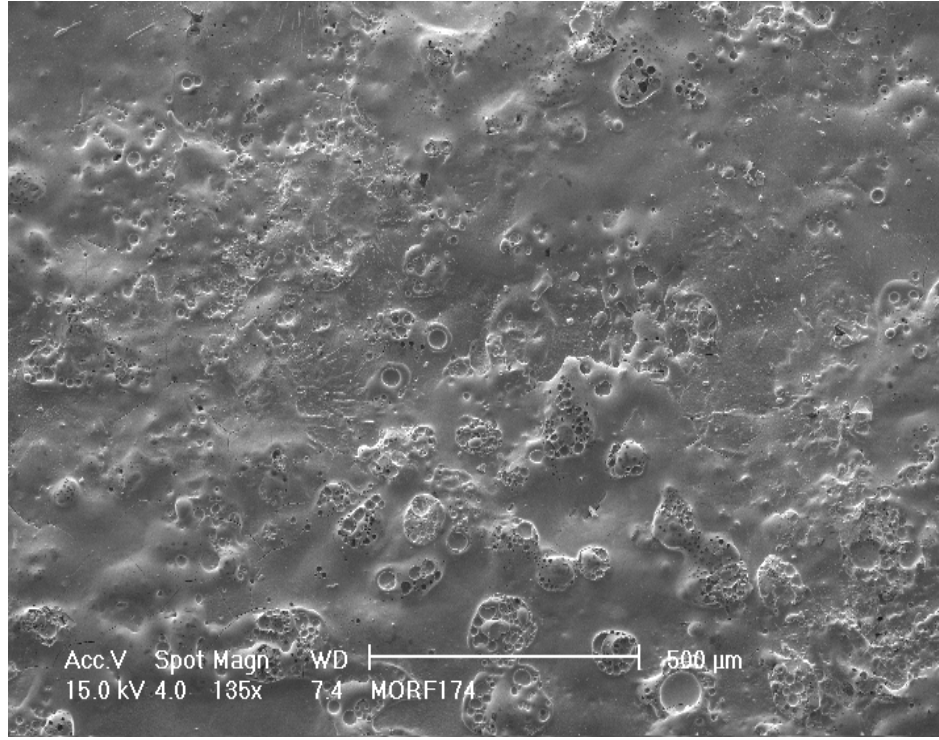
Şekil 5.21. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak anodun (içi dolu işaretler) ve katodun kütle değişimi grafikleri. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 300 μs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 300 μs dir.



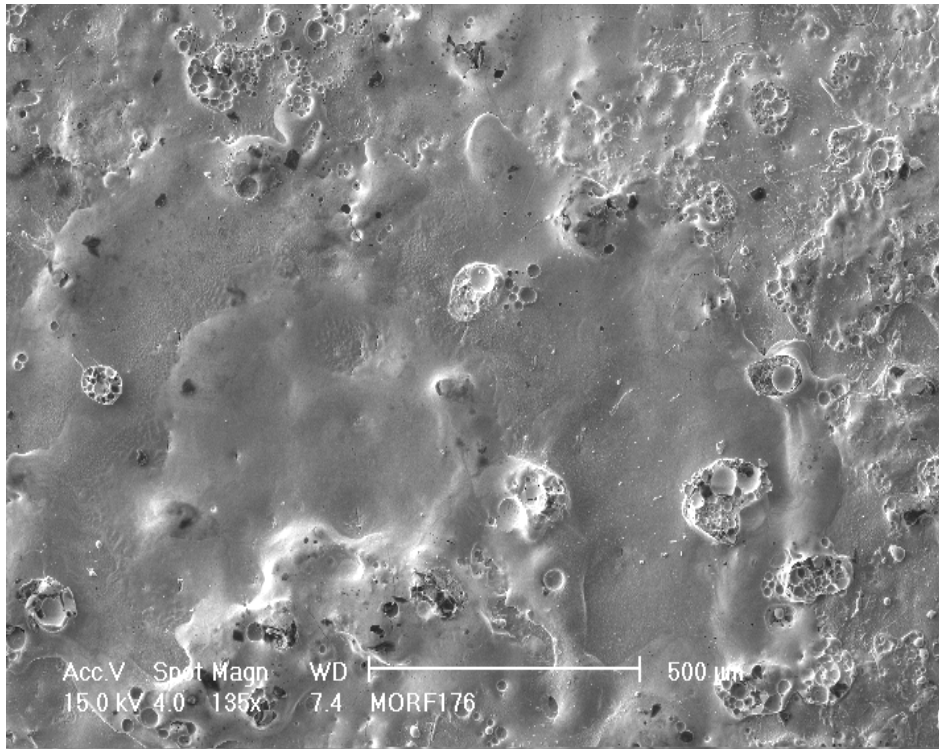
Şekil 5.22. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak kütle transfer katsayısının değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 300 μ s ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 300 μ s dir.



Şekil 5.23. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse içinde, pulse lar arası bekleme süresinin bir fonksiyonu olarak yüzey pürüzlülüğünün değişimi grafiği. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 300 μs ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 300 μs dir.

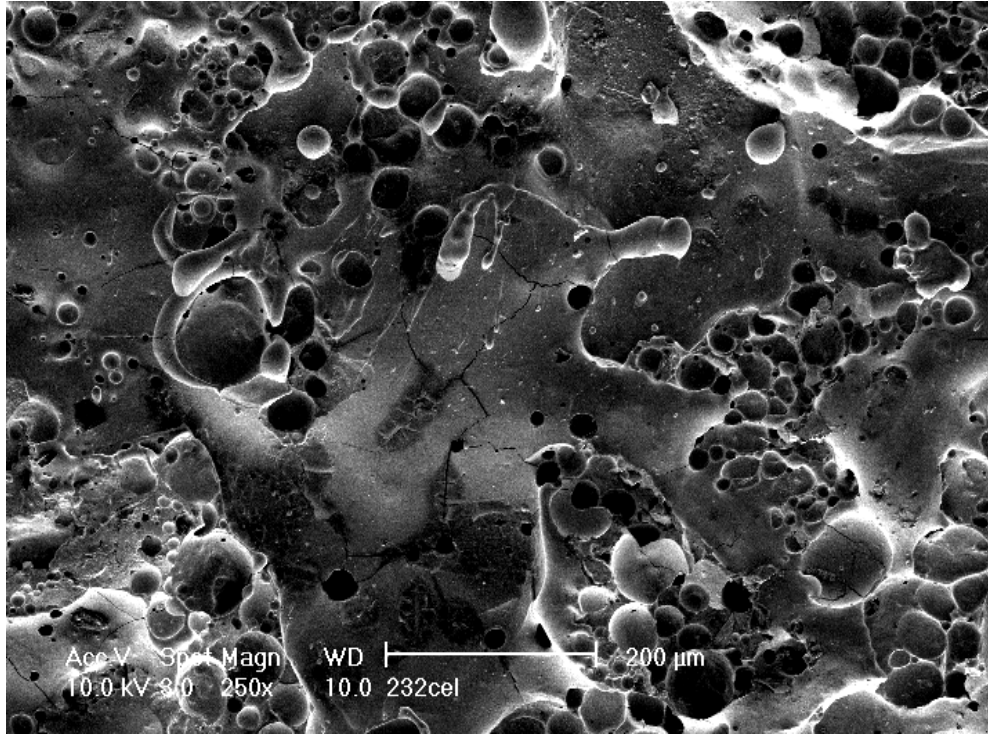


a)

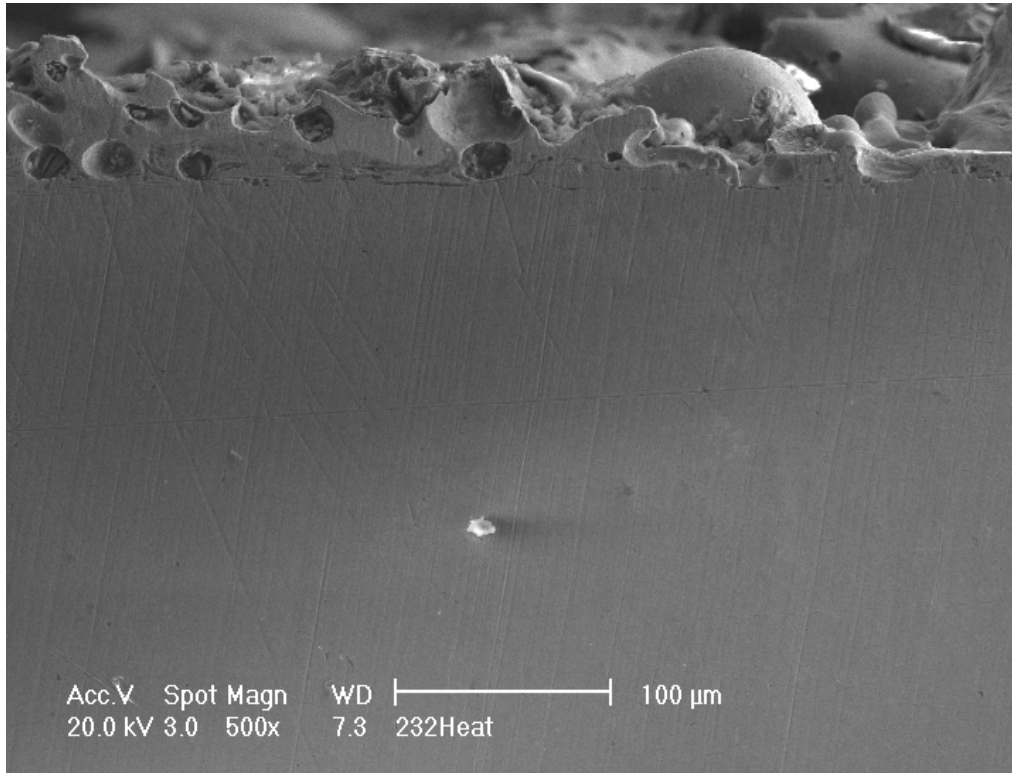


b)

Şekil 5.24. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse oluşturulan kaplamaların yüzey morfolojileri. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 100 μ s ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 200 μ s dir. Pulse lar arası bekleme süreleri a) tps=Max ve b) tps=384 μ s dir.



a)

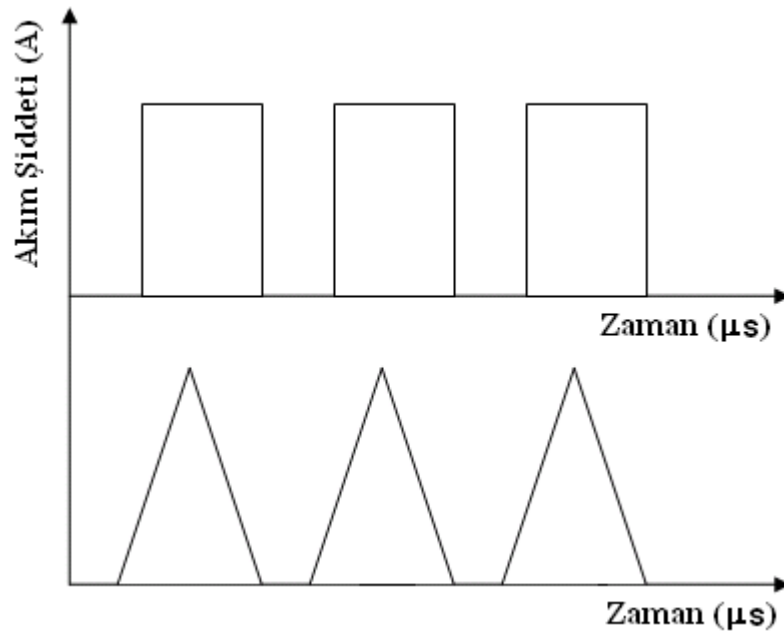


b)

Şekil 5.25. Farklı enerjili iki farklı pulse ın oluşturduğu bir grup pulse oluşturulan kaplamanın a) yüzey morfolojisi ve b) enine kesit görünümü. Birinci pulse ın parametreleri 200A ve 300 μ s ve ikinci pulse ın parametreleri 400A ve 300 μ s dir. Pulse lar arası bekleme süresi $t_{ps}=75\mu$ s dir.

5.3.3. Uygulanan Pulse Şeklinin Yüzey Pürüzlülüğüne ve Kütle Transferine Etkileri:

Bu kısımda anodik kütle erozyon, altlığa transfer olan kütle miktarı, yüzey pürüzlülüğü ve transfer damlacıklarının çapı gibi pulse formunun şekline bağlı ESD prosesinin bazı teknolojik parametreleri incelendi. Kaplama prosesinde, farklı pulse formu olarak hazırlanan üçgen ve dikdörtgen şeklindeki bir dizi pulse ları ayrı ayrı kullandık (Şekil 5.26.). Bu pulse lara ait parametreler; pulse süreleri 12-70 μs arası, pulse akım şiddetleri 50-250 A arasındaki bir aralık olup pulse ların tekrarlanma hızı da 100 Hz olarak uygulanmıştır (Tablo 5.3.). Her defasında 30 sn olmak üzere toplam 2.5 dakika kadar tüm numunelerin yüzeylerine ESD kaplama prosesi tatbik edilmiştir.



Şekil 5.26. ESD kaplama prosesinde uygulanan pulse formları.

ESD kaplama prosesin gelişimi esnasındaki kütle transfer mekanizması ergimiş damlacıklar halinde meydana gelmektedir. Ergimiş damlacıklar işlem elektrotu (katot) ucunda oluşur ve daha önce bahsettiğimiz (Bkz.Böl.3) kuvvetlerin etkisi ile hareket edip altlık yüzeyine (anot) düşer ve bunun sonucunda yüzey üzerinde splash görünümü oluşur. Transfer olan damlacıklar nedeniyle numunelerin yüzeyi tam olarak düzgün değildir. Kaplamanın bu topografyası, ESD ile kaplanan tüm

yüzeylerin bir karakteristiğidir [Johnson,1988]. Eşit pulse enerjilerine sahip olmak kaydı ile üçgen ve dikdörtgen pulse formlarında uygulanan iki farklı enerji değeri (0.018 ve 0.071 J) için elde edilen ESD kaplamanın yüzey morfolojilerinin SEM de çekilmiş resimleri Şekil 5.27-5.28. de görülmektedir.

Tablo 5.3. Üçgen (T) ve Dikdörtgen (R) pulse formları.

Akım Şiddeti (A)	Pulse Süresi (μ s)	Pulse Enerjisi (J)
50-T	12	0.005
100-T	21	0.018
150-T	16	0.040
200-T	42	0.071
250-T	50	0.105
100-R	20	0.018
100-R	25	0.071
100-R	70	0.110
150-R	44	0.069
150-R	58	0.112
200-R	52	0.110

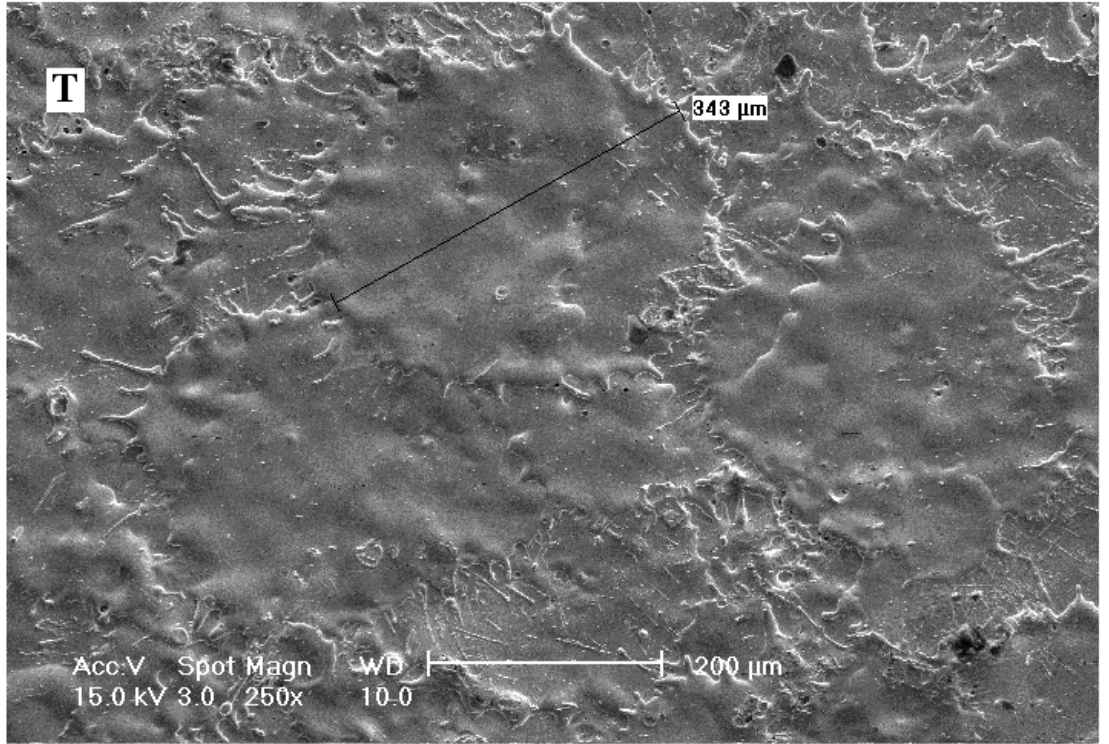
Splash çaplarının uygulanan pulse ın karakterine (enerji) bağlı olarak değişimi iki tip pulse formu için araştırılmış olup SEM de elde edilen resimlerden faydalanılarak 10 ölçümün ortalaması alınarak elde edilen sonuçlar Şekil 5.29. da sunulmaktadır. Bu sonuçlardan yola çıkarak altlık yüzeyi üzerinde splash görünümüne yol açan bu damlacık şeklindeki kütle transfer mekanizmasının splash ların yapısını ve boyutlarını belirlediği ve doğal olarak ortalama pürüzlülük (R_a) değeri ve transfer olan kütle miktarını da splash ların bu özelliklerine bağlı olduğu söylenebilir.

ESD kaplama prosesi ile altlık numunelerin yüzeyleri 30 sn kadar bir süre kaplandıktan sonra işlem elektrotunun kayıp ettiği kütle (ΔM_a), altlığın kazandığı kütle (ΔM_c), yüzeyin pürüzlülük (R_a) değerleri ölçüldü. Bu değerlerin mukayese edilmesi sonucunda görüldü ki farklı şekildeki iki pulse formu için elde edilen

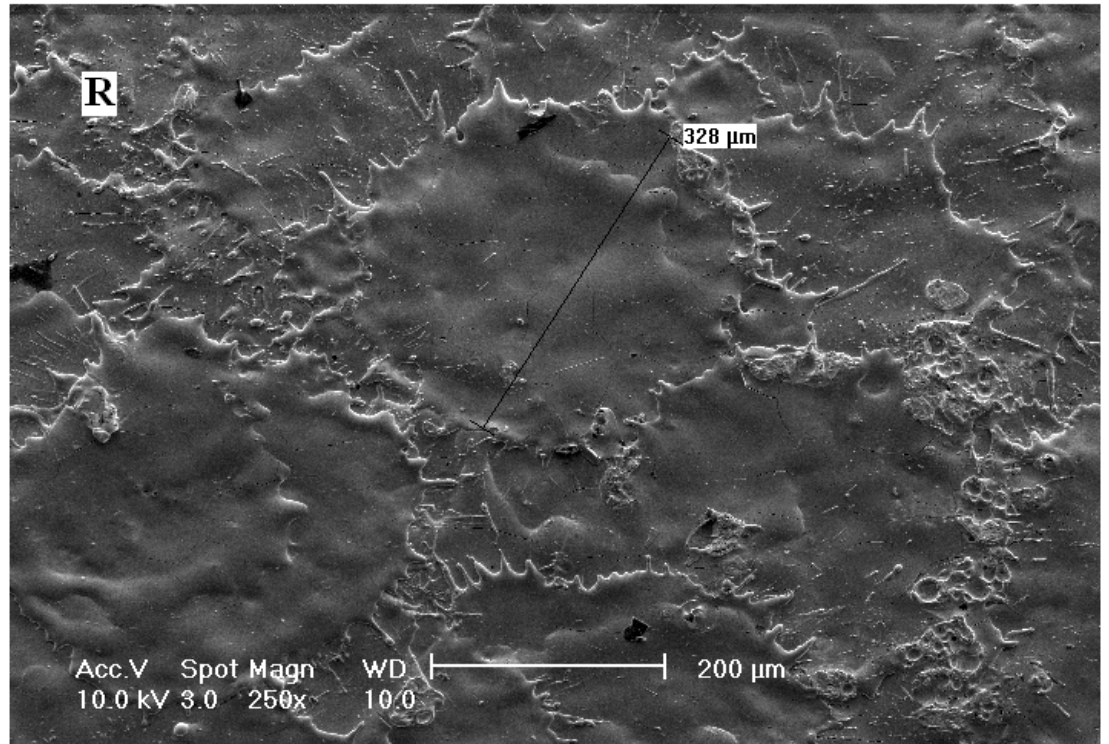
deneysel sonuçların pulse enerjilerin aynı olmasına rağmen birbirinden farklı olmalarıydı (Şekil 5.30. ve 5.31.).

Uygulanan pulse enerjinin aynı olmasına rağmen kütle değişim ve pürüzlülük değerlerinin farklı elde edilmesinin sebebi proses esnasında oluşan transfer kütle damlacıklarının ve onların kaplama yüzeyi üzerinde meydana getirdikleri splash çaplarının sadece pulse enerjinin miktarına değil aynı zamanda bu enerjinin veriliş biçimine bağlı olması ile açıklanabilir. Daha öncede bahsettiğimiz (Bkz.Böl.2) şekilde pulse akımın artış hızı (spark aralığına veriliş biçimi) prosesin sonuçlarına etki etmektedir.

Değişen pulse enerjiyle ilgili grafikleri incelenirse (Şekil 5.29.,5.30. ve 5.31.), elde edilen splash çaplarının, kütle değişim ve pürüzlülük değerlerinin birbirleriyle uyumlu ve üçgen pulse formu ile elde edilen pürüzlülük değerlerinin dikdörtgen pulse formlara göre daha fazla oldukları görülür. Buna karşın, pürüzlülük konusunda dikdörtgen pulse lar daha iyi sonuç verdiği görülse de kütle transferi için üçgen pulse lar daha iyi sonuçlar vermektedir.

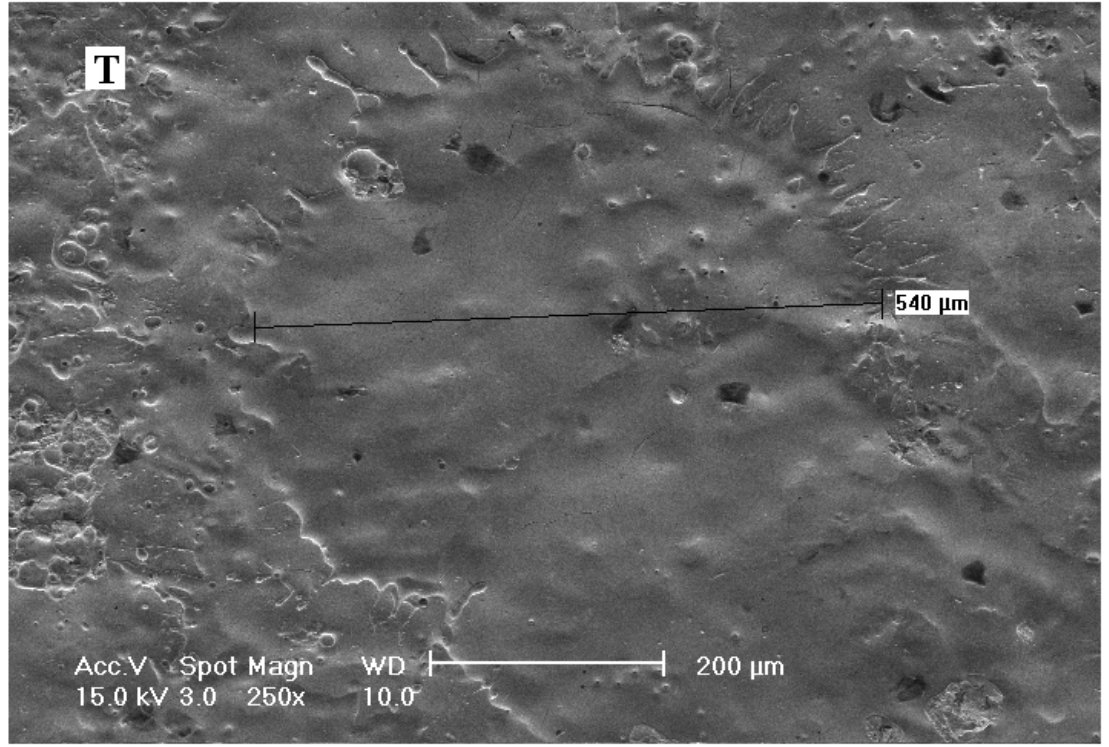


a)

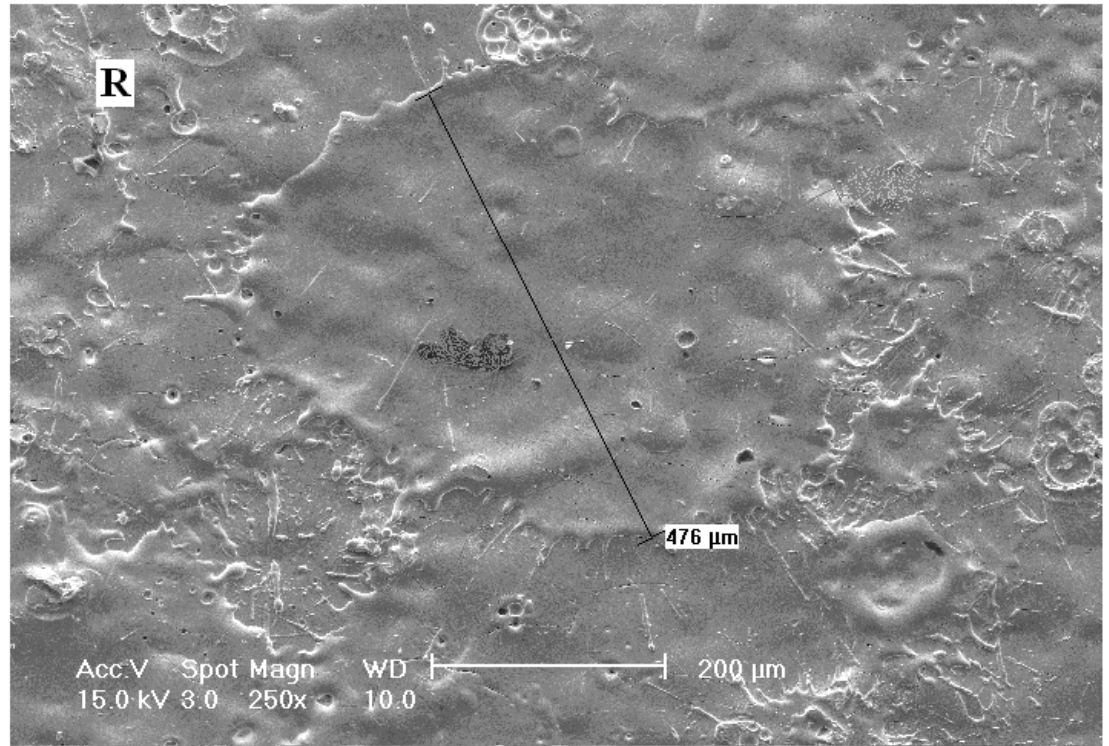


b)

Şekil 5.27. Aynı pulse enerjisine sahip (0,018J), a) üçgen ve b) dikdörtgen pulse formlarında yapılan ESD kaplamanın yüzey morfolojisini gösteren SEM resimleri.

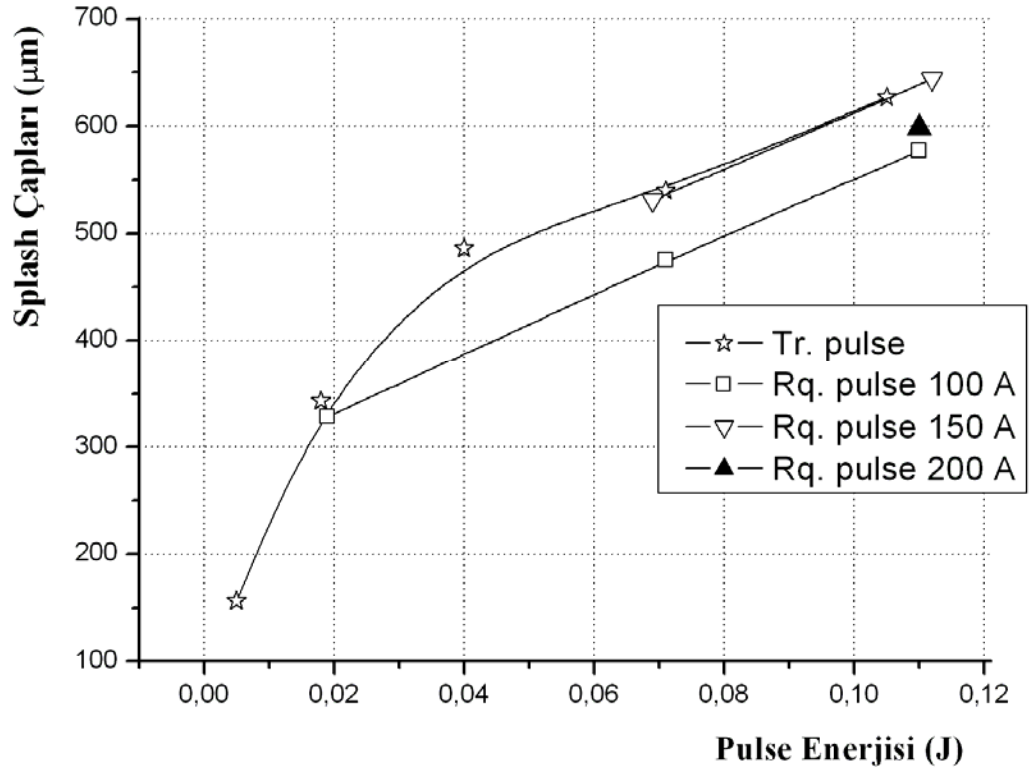


a)

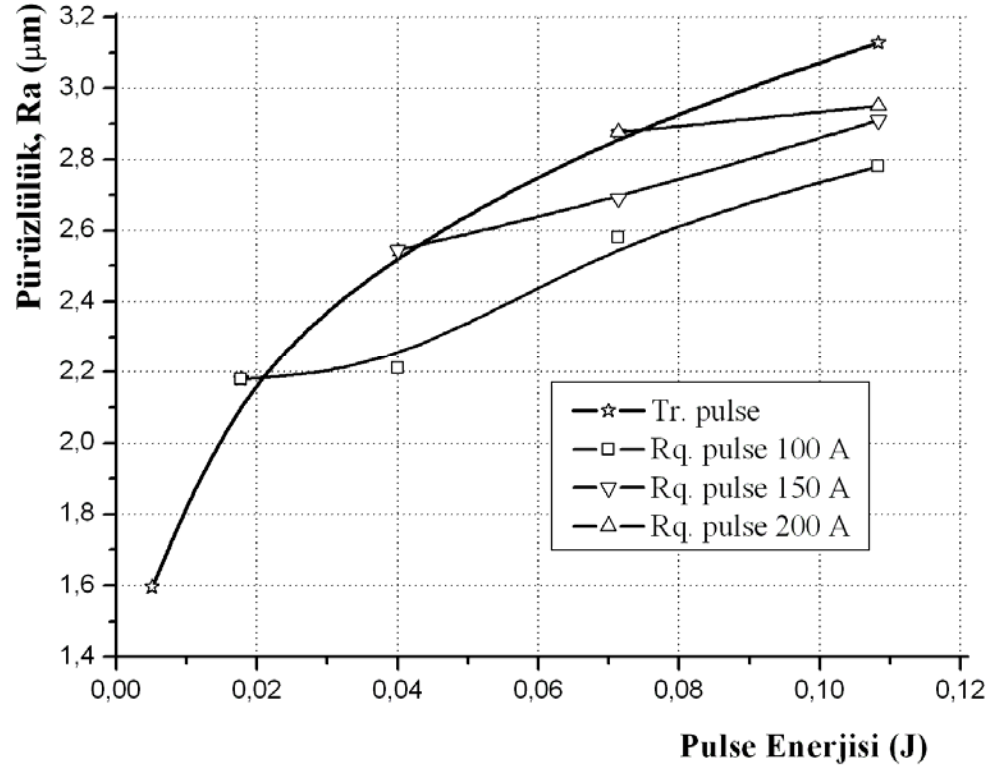


b)

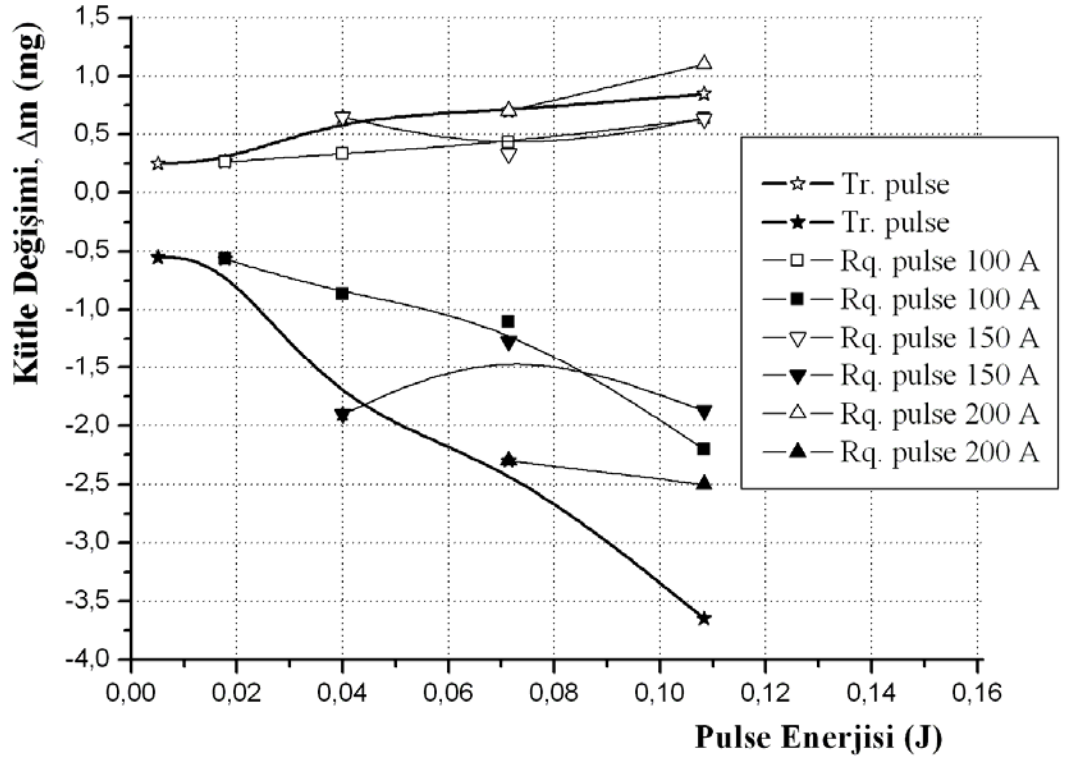
Şekil 5.28. Aynı pulse enerjisine sahip (0,071J), a) üçgen ve b) dikdörtgen pulse formlarında yapılan ESD kaplamanın yüzey morfolojisini gösteren SEM resimleri.



Şekil 5.29. Pulse parametreleri Tablo 5.3. de verilen üçgen (Tr) ve dikdörtgen (Rq) pulse formlarında yapılan ESD kaplama prosesi sonucu yüzeyde oluşan splash çaplarının pulse enerjisine göre değişimi.



Şekil 5.30. Üçgen ve Dikdörtgen pulse formlarında ESD yöntemi ile 30 sn kaplama prosesine tabi tutulan yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin (Ra) pulse enerjisine göre değişimi.



Şekil 5.31. Üçgen ve Dikdörtgen pulse formlarında ESD yöntemi ile 30 sn kaplama yapıldıktan sonra pulse enerjisine göre anot (içi dolu işaretler) ve katottaki kütle değişim (ΔM) miktarlarının grafiği.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, diğer kaplama yöntemlerine göre kendine has bir takım özelliklere sahip olan Elektrosark Deposizyon (ESD) yöntemiyle mikro alaşım çeliklerin yüzeyi üzerinde tungsten karbür ile kaplama deneyleri yapıldı. Kaplamanın karakteristik özelliklerine doğrudan etki edebilecek şekilde prosesin sürecine ve sonuçlarına müdahale etmeye imkan kılan yeni geliştirilen bir metodun uygulamaları araştırıldı. Bu amaçla prosesin elektrik parametrelerinin kontrolü ve uygulanan pulse ların etkin bir şekilde yoğunlaştırılması denemeleri yapılmış olup elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sıralanmıştır.

1. ESD kaplama proses için yeni bir metot geliştirildi ve yeni bir ESD donanımı dizayn edildi. Bu yeni metot, prosesin discharge devresinde bir grup spark discharge ın oluşturduğu ısı geçiş ve elektromanyetik geçiş safhalarının süperpozisyonuna dayanmaktadır. Kullanılan bu grup pulselerin üst üste gelme (overlap) derecesi ve böylece işlem elektrotundaki (anot) erozyon ile altlık (katod) daki kütle kazanımının (transferin) derecesi gruptaki her pulse ın elektrik parametreleri ve gruptaki pulse ların sayısı, sırası ve onların aralarındaki süre (duration time) ile düzenlenebilmektedir. Buradan yola çıkarak, teknolojik amaca göre çeşitli doğrultularda ESD kaplama prosesi uygulanabilir. Örneğin, bu çalışmada pulse ların elektrik parametrelerinde değiştirme olmaksızın sadece pulse ların yoğunlaştırılması ile anodun kütle kaybı (erozyonu) ve katodun kütle kazanımı artırılmıştır.

2. İşlem elektrotundan altlığa kütle transferinde en büyük miktar ikili pulse gruplarında elde edilmiştir. Grupları oluşturan pulse ların enerjileri yüksek olmadığından prosesin verimini düşüren şiddetli ultra-viyole radyasyon ve elektrotların birbirine yapışması gibi olumsuzluklar olmaksızın bu ESD kaplama prosesi deneyleri gerçekleştirilebilmiştir.

3. Özgül kütle transferi 0.065 mg/C ve daha fazla olduğu zaman anot dan transfer olan kütlenin kaynaması ve aynı esnada altlığın da buharlaşması gibi deposizyonun kalitesini bozan hadiseler gözlemlenmiştir, Şekil 5.25. Bu durumda

karşımıza çıkan problem, aşırı ısınmış haldeki kütle transferi, daha kalın ESD kaplama tabakası elde etme şansını sınırlamaktadır.

4. Bizim görüşümüze göre, transfer olan sıvı haldeki kütlenin ve ara yüzey bölgenin içerdiği ısı (aldığı ısı) grubun ikinci pulse ın spark discharge oluşturulmasından hemen önce kısmen azaltılmış olmalı. Bu ancak, eğer ikinci pulse ilk pulse ın bitiminden sonra 1ms veya daha fazla süre sonra aktif hale getirilirse (uygulanırsa) elde edilebilir. Bu zaman aralığı esnasında transfer olan kütlenin ısısı ilk pulse dan sonra zaten altlık içinde absorbe olunur. Şekil 5.12. -5.18. arasındaki kütle transfer eğrilerine bakarak görülebilir ki aynı zaman aralığı için iki pulse çiftinin uygulanmasından sonra toplam kütle transferinin yavaş yavaş azaldığıdır. Eğer aşırı ısınmış kütlenin transferinden dolayı meydana gelen kaynama (buharlaşma) problemi halledilebilirse, ikinci pulse ın enerjisini arttırmak veya bu pulse grubuna üçüncü bir pulse ilave edilerek erozyon kütlede ve dolayısıyla transfer edilen kütlenin artışında kayda değer sonuçlar alınabilir. Bu iddianın (teorinin) gerçekleştirilmesi gelecekte yeni araştırmalara konu olması muhtemeldir.

5. Kütle transferi mekanizmasının damlacık şeklinde gerçekleştiği ve bununda kaplama yüzeyi üzerinde splash görünümlere yol açtığı gözlemlenmiş olup farklı pulse formlarının farklı splash lar üreteceği aşikardır. Bu da oluşan ESD kaplamanın morfolojisinin bir karakteristiğidir. Uygulanan farklı pulse formlarının (pulse şekli, akım şiddet değeri ve pulse süresi) kaplama yüzeyi üzerinde oluşan splash boyutlarına, anot ve katottaki kütle değişimlerine (ΔM), kaplama yüzeyinin pürüzlülüğüne (R_a) belirgin bir şekilde etki ettiği anlaşılmıştır.

6. Özellikle pulse enerjisi artarken splash ların çapı dolayısıyla, anot ve katottaki kütle değişimleri (ΔM), kaplama yüzeyinin pürüzlülüğü (R_a) de artmaktadır. ESD yöntemi ile yapılan kaplamalarda, üçgen pulse formu kullanımı dikdörtgen pulse lara göre kaplama yüzeyi üzerinde daha büyük çaplı splash lara yol açtığı ve bunun neticesinde daha fazla kütlenin transfer olduğu tespit edilmiştir. Diğer yandan aynı enerjili dikdörtgen pulse formu kullanımı ile kaplama yüzeyi üzerinde daha az pürüzlülük değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Her iki pulse formunun bir optimizasyon ile grup pulse paketlerinde birlikte kullanılmasının daha iyi sonuçların elde edilmesi açısından faydalı olacağı aşikardır.

KAYNAKLAR

1. **J. Priestley**, The History and Present State of Electricity, 3rd ed. London, U.K., (1775).
2. **H.S. Rawdon**, Discussion, American Institute of Mining and Metallurgical Engineers Transactions, 70, (1924), 37-38.
3. **N.C. Welsh**, Frictional Heating and Its Influence on the Wear of Steel, Journal of Applied Physics, Vol:28, Number:9, (1957), 960-968.
4. **N.C. Welsh**, Surface Hardening of Non-ferrous Metals by Spark Discharge, Nature, No:4614, (1958), 1005-1006.
5. **N.C. Welsh**, Surface-Hardening Metals, Journal of Institute of Metals, Vol:88, (1959-60), 103-111.
6. **N.C. Welsh, P.E. Watts**, The Wear Resistance of Spark-Hardened Surfaces, Wear, 5, (1962), 289-307.
7. **B.R. Lazarenko and N.I. Lazarenko**, Electric Erosion of Metals, Gasenergoizdat, Moscow / Leningrad, No:1, (1944).
8. **B.R. Lazarenko and N.I. Lazarenko**, Electro-Spark Machining of Metals, Translated by Consultants Bureau, New York, (1964).
9. **K.Natesan**, Applications of coatings in coal-fired energy systems, Surface and Coatings Technology, 56 (1993) 185-197.
10. **R.N.Johnson**, Coatings for Fast Breeder Reactor Components, Thin Solid Films, 118 (1984) 31-47.
11. **R.N.Johnson, S.L.Schrock and G.A.Whitlow**, Wear resistant coatings for reactor components in liquid sodium environments, Journal of Vacuum Science Technology, Vol:11, No:4, (1974) 759-764.
12. **K.Natesan and R.N.Johnson**, Development of coatings with improved corrosion resistance in sulfur-containing environments, Surface and Coatings Technology, 43/44 (1990) 821-835.
13. **K.Natesan and R.N.Johnson**, Corrosion resistance of chromium carbide coatings in oxygen-sulfur environments, Surface and Coatings Technology, 33 (1987) 341-351.
14. **K.Natesan**, Corrosion performance of iron aluminides in mixed-oxidant environments, Materials Science and Engineering A258 (1998) 126-134.

15. **K.Natesan**, Corrosion Performance of Alumina Scales in Coal Gasification Environments, The Second International Workshop on Corrosion in Advanced Power Plants, Tampa, FL, March 3-6, (1997).
16. **K.Natesan and R.N.Johnson**, Corrosion Performance of Fe-Cr-Al and Fe Aluminide Alloys in Complex Gas Environments, The Second International Conference on Heat Resistant Materials, Gatlinburg, TN, September 11-14, (1995).
17. **G.L.Sheldon**, Galling Resistant Surfaces on Stainless Steel Through Electrospark Alloying, Journal of Tribology, April (1995), Vol.117, 343-349.
18. **A.Agarwal and N.B.Dahotre**, Pulse electrode deposition of superhard boride coatings on ferrous alloy, Surface and Coatings Technology 106 (1998) 242–250.
19. **A.Agarwal and N.B.Dahotre**, Synthesis of Boride Coating on Steel using High Energy Density Processes: Comparative Study of Evolution of Microstructure, Materials Characterization, 42, 31–44 (1999).
20. **E.A.Brown, G.L.Sheldon and A.E.Bayoumi**, A Parametric Study of Improving Tool Life by Electrospark Deposition, Wear, 138 (1990) 137-151.
21. **S.Frangini, A.Masci and A.Di Bartolomeo**, Cr₇C₃based cermet coating deposited on stainless steel by electrospark process: structural characteristics and corrosion behavior, Surface and Coatings Technology 149 (2002) 279–286.
22. **D.Liu, W.Gao, Z.Li, H.Zhang and Z.Hu**, Electro-spark deposition of Fe-based amorphous alloy coatings, Materials Letters 61 (2007) 165–167.
23. **N.Parkansky, R.L.Boxman and S.Goldsmith**, Development and application of pulsed-air-arc deposition, Surface and Coatings Technology 61 (1993) 268–273.
24. **N.Parkansky, I.I.Beilis, L.Rapoport, R.L.Boxman, S.Goldsmith and Y.Rosenberg**, Electrode erosion and coating properties in pulsed air arc deposition of WC-based hard alloys, Surface and Coatings Technology 105 (1998) 130–134.
25. **G.L.Sheldon, R.Wang and R.A.Clark**, Characteristics of Ni-Ti surface alloys formed by electrospark deposition, Surface and Coatings Technology, 36 (1988) 445-454.

26. **Y.He, H.Pang, H.Qi, D.Wang, Z.Li and W.Gao**, Micro-crystalline Fe–Cr–Ni–Al–Y₂O₃ ODS alloy coatings produced by high frequency electric-spark deposition, *Materials Science and Engineering A334* (2002) 179–186.
27. **P.Z.Wang, G.S.Pan, Y.Zhou, J.X.Qu and H.S.Shao**, Accelerated Electrospark Deposition and the Wear Behavior of Coatings, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol:6, No:6, December (1997) 780-784.
28. **M.H. Staia, A.Fragiel, M.Cruz, E.Carrasquero, B.Campillo, R.Perez, M.Constantino and T.S.Sudarshan**, Characterization and wear behavior of pulsed electrode surfacing coatings, *Wear* 251 (2001) 1051–1060.
29. **R.N.Johnson and G.L.Sheldon**, Advances in the electrospark deposition coating process, *Journal of Vacuum Science and Technology*. Vol A4 (6) Nov/Dec. (1986) 2740-2746.
30. **R.N.Johnson**, Electro-Spark Deposited Coatings for Fossil Energy Environments, in *Proceedings of the Seventh Annual Conference on Fossil Energy Materials*, ORNL/FMP-93/1, July (1993), 289-295.
31. **R.N.Johnson**, Electro-Spark Deposited Coatings for Protection of Materials, in *Proceedings of the Ninth Annual Conference on Fossil Energy Materials*, ORNL/FMP-95/1, August (1995), 407-413.
32. **R.N.Johnson**, Electro-Spark Deposition Technology, in *Proceedings of the Tenth Annual Conference on Fossil Energy Materials*, ORNL/FMP-96/1, August (1996), 429-437.
33. **R.N.Johnson**, Electro-Spark Deposition: Principals and Applications, *Society of Vacuum Coaters, 45th Annual Technical Conf. Proceedings*, Lake Buena Vista, FL, , April 13-18, (2002), 87-92.
34. **J.L.Reynolds Jr.**, Electro-Spark Deposition, *Advanced Materials and Processes*, March (2003) 35-37.
35. **V.K.Maksimov and L.F.Marchenko**, Electrospark alloying and wear resistance in microsurgery instruments, *Biomedical Engineering*, 22(2) March (1988) 44-46.
36. **Lazarenko B.R.**, The method of metal surfaces hardfacing. Certificate of author, USSR №89933. Publ. in *Bulletin of Invention USSR*, №2, (1951).
37. **Lazarenko N.I.**, Electrospark alloying of metal surfaces. Moscow, Vanity pres, *Machine construction industry*, (1976), -45.

38. **Lazarenko B.R. and Lazarenko N.I.**, Electrospark machining of current-conducting materials, Vanity press of USSR Academy of Science, M., (1958), - 27.
39. **Namitokov K.K.**, The electroerosive phenomena, Moscow, Vanity press "Energy", (1978). -456.
40. **Nekrashevich I.Gi, Bakuto I.A., Mitskevich M.K.**, Dependence of some erosive performances of pulsing electric discharge on its duration, Engineer - Physical journal, (1960), № I, 62-67.
41. **Rehbein W., Schulze H.P., Mecke K., Wollenberg G., Storr M.**, Influence of selected groups of additives on breakdown in EDM sinking, Journal of Materials Processing Technology 149 (2004) 58–64
42. **Rovenski R.E.**, Calculation of the performances of a quasistationary stage of an impulsing discharge, The journal Thermal physics of high temperatures, (1977), 15, №2, 233-238.
43. **Hrenov K.K.**, An electrical welding arc, Moscow, Vanity press "Machine building", (1949). -204.
44. **Goloveiko A.G., Martihina V.I.**, Excitation of a temperature wave in metal under activity of a Π -figurative surface thermal impulse. Engineer - Physical journal. (1981), 15, №3, 489-494.
45. **Zolotykh B.N.**, About a Physical Nature of Electrospark Processing of Metals. In the Coll. "Electrospark Processing of Metals", Academy of Sciences Publishing House, Moscow, USSR (1957), 38-69.
46. **Zolotykh B.N.**, The Mechanism of Electrical Erosion of Metals in Liquid Dielectric Media, Technical Physics, (1959), 4, 12, 1370-1373.
47. **Butkevich G.V etc.**, Electrical erosion of high-current contacts and electrodes, Moscow, Vanity press "Energy", (1978), -253.
48. **Krijanskii S.M., Lerman M.I.**, Streams of heat on electrodes from a pole of an electric arc it is high-pressure with the account of non symmetry of development of heat, In book: High-current electrical contacts and electrodes. Kiev, Vanity press of Ukr.SR Academy of Science, Kiev, (1972), 18-23.
49. **A.Erden, B.Kaftanoglu.**, Thermo-matematikal modelling and optimization of energi pulse from in electric discharge machining (EDM), International Journal of Machine Tool Design and Research, (1981), 21, 11-22.

50. **Kulagin I.D., Nikolaev A.V.**, About a current density in an anode spot, Physics and chemistry of materials treatment, (1969), № 6, 3-8.
51. **Zingerman A.S.**, The thermal theories of electrical erosion of metals, News of high schools. An electromechanics, (1960), № 5, 87-95.
52. **Popilov L.Y.**, The manual on electrical and ultrasonic methods of treating of materials, Machine construction industry, Leningrad, USSR, (1971), -544.
53. **Livshits A.L and Otto M. Sh.**, A pulsing electrical technology, Moscow, Energoatomizdat, (1983), -351.
54. **Saushkin B.P.**, Physicochemical methods of treating in production of gas-turbine drives, Moscow, (2002), -655.
55. **Ribalko A.V., Grichuk D.M. and Sahin O.**, Electrosark alloying of metal surfaces by oscillating on a surface of workpiece treating electrode, Electronnaia obrabotka of materials, №2, (2001), 16-21.
56. **Ribalko A.V., Hamurari V.I., Grichuk D.M.**, Perspectives of the productivity increase in electro-spark coating, Surface Engineering and Applied Electrochemistry, (1999), №1 (195), 10-13.
57. **Ribalko A. V., Siminel A.V., Sahin O.**, Electrosark alloying with pulses of small energies, development of a device and experimental study, Metal working, (2002), №3(9), 14-19.
58. **Ribalko A. V., Siminel A.V., Sahin O.**, Some technological parameters of an Electro Spark Alloying by pulses of a various shapes, Metal working, (2003), №1 (13), 18-22.
59. **Ribalko A. V., Siminel A.V., Sahin O.**, Formation and destruction of a tungsten carbide Electrosark deposition, Metal working, (2003), №4, (16), 7-10..
60. **Ribalko A. V., Siminel A.V., Sahin O.**, Hard alloy deposition by Electrosark processing under the condition of unconventional pulse parameters. 1. Range of pulse duration (25-4000) μ s, amplitude of pulse current 100A, Metal working, (2003), №5, (17), 10-15.
61. **Ribalko A. V., Siminel A.V., Sahin O.**, Hard alloy deposition by Electrosark processing under the condition of unconventional pulse parameters. 2. Range of pulse duration (50-4000) μ s, amplitude of current 200 and 400 A, Metal working, (2004), №2, (20), 6-11.

62. **Ribalko A. V., Siminel A.V., Sahin O.**, Hard alloy deposition by Electrospark processing under the condition of unconventional pulse parameters. 2. Range of pulse duration (200-1000) μ s, amplitude of current 600, 800 and 1000 A, Metal working, (2003), №1 (13), 18-22.
63. **Ribalko A. V., Siminel A.V., Sahin O.**, Hard alloy deposition by Electro spark processing under the condition of unconventional pulse parameters. 4. Generalization of results, Metal working, 2005, №3 (27), 21-28.
64. **Ribalko A. V., Siminel A.V., Sahin O.**, An updated installation for electrospark alloying, Metal working, (2003), №6(18), 38-40.
65. **Ribalko Alexandru., Grichuk Dumitru, Ermilov Vladimir, Mindru Dumitru**, Procedeu de aliere prin electrorodare (A method of electrospark alloying), The patent of Moldova № 997./ № 7, (1998).
66. **Ribalko Alexandru., Grichuk Dumitru, Ermilov Vladimir**, Procedeu de aliere prin electrorodare (A method of electrospark alloying), The patent of Moldova №1053. / №2, (2000).
67. **Ribalko A.V. and Khamurar V.I.**, Electrical Parameters of the Electroerosion Alloying Process, Soviet Surface Engineering and Applied Electrochemistry, No:6, June (1988), 26-29.
68. **A.V. Ribalko, O.Sahin**, A modern representation of the behaviour of electrospark alloying of steel by hard alloys, Surface and Coating Technology. 201 (2006) 1724.
69. **Ribalko A.V., Siminel A.V., Sahin O.**, A high-tension coating by a hard-alloy electrode in requirements of application of nonconventional electrical parameters. 4 Generalizations of effects(results), Metal working, (2005), №4 (28), 15-22.
70. **R. N. Johnson**, Principles and applications of electro-spark deposition, In Surface Modification Technologies, The Metallurgical Society, Warrendale, (1988), 189-213.

ÖZGEÇMİŞ

Kemal Korkmaz, 1967 yılında Ankarada doğdu. İlk ve orta öğrenimlerini İstanbulda tamamladı. 1991 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği bölümünü bitirdikten sonra 1992 yılında askerlik hizmetini MSB. Savunma Sanayi Müsteşarlığında tamamladı. Özel sektörde üç yıl çalıştıktan sonra 1995 yılında araştırma görevlisi olarak göreve atandığı Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünde aynı zamanda yüksek lisans eğitime başlamıştır. 1998 yılında, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümünden “Kübik kristalli metalik malzemelerde doku oluşumu ve dokunun temsil edilmesi” master tezi çalışması ile Bilim Uzmanı ünvanıyla mezun oldu. Aynı yıl başladığı Fizik Doktora programını 2003 yılında yarıda bırakıp, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümünde tekrar doktora eğitime başlamıştır ve aynı bölümde halen araştırma görevlisi olarak çalışmaya devam etmektedir.



Intensification of the anodic erosion in electrospray alloying by the employment of pulse group

Alexander V. Ribalko, Kemal Korkmaz, Orhan Sahin *

Department of Material Science and Engineering Gebze Institute of Technology, Gebze 41400, Kocaeli, Turkey

Received 8 April 2007; accepted in revised form 26 December 2007

Abstract

A modified electrospray alloying (ESA) method and installation were designed. The method based on periodically employed identical pulse groups in which the order of individual pulses, their numbers, electrical parameters of each and pause between them were adjustable. This ESA could be set for various directions according to technological aim. In the present study, the technological aim was to increase the mass loss of the treating electrode (anode) and the mass gain of the substrate (cathode).

Experiments were conducted using sequence of identical pulse groups. Mass loss of the treating electrode and mass gain of the substrate were measured. During the experiments the following pulse parameters in a group were used: pulse current amplitude, pulse duration and pause between the pulses of a pulse group with ranges of 200–500 A, 100–400 μ s, and 0–1800 μ s respectively.

Using the modified processing method, in some cases it was possible to increase the mass loss of the treating electrode by 50% or more compared to the conventional method.

© 2008 Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Alloying; Coating; Electrospray; Pulse groups; WC

1. Introduction

The studies on the ESA of steel 35 with tungsten carbide (WC92-Co8) revealed coating failure taking place at a particular stage of the process. The failure occurs due to local evaporation of interior volume of the deposit, and/or the interface zone between the deposit and the substrate due to heat supplied by spark discharges [1,2].

To prevent the destruction of the deposited layer, it is necessary to limit the processing time. Limited processing time would impose limitation on the thickness of coating, which depends on the amount of mass transferred from treating electrode to substrate till the time of coating failure.

The employment of high pulse energies would allow only a single layer of deposition the thickness of which, as mentioned above, depends on the amount of mass transferred from the treating electrode to the substrate [1,2]. Further increase in pulse

energy is not convenient to increase the thickness of this single scan deposition, because ESA under this condition is associated with the occurrence of some undesirable phenomena: strong ultra-violet radiation during discharge, sticking of the electrodes, washing away of molten substrate spots by spark discharges, and formation of a foamy coating structure. Therefore, in order to increase the thickness of single scan deposition, it is necessary to find a new processing method which would significantly increase the erosion of the treating electrode.

It is known that depending on the electrical parameters of pulses and chemical properties of electrodes, the amount of mass transferred to the substrate in evaporated form is approximately equal to 10–15 volume percent of the crater which forms on the treating electrode after a spark discharge [3]. Apparently, the rest of the crater transfers to the substrate in liquid form. The amount of molten material staying intact within the treating electrode is 8–10 times larger than the volume of this crater. The relation between ejected mass and total molten mass of treating electrode is usually expressed by the coefficient of ejection. The aim of the present investigation

* Corresponding author. Tel.: +90 262 605 1751; fax: +90 262 653 490.

E-mail address: osahin@gyte.edu.tr (O. Sahin).

is to find out the conditions to increase the molten volume of the treating electrode as much as possible and subsequent partial transfer of it to the substrate with a coefficient of ejection as large as possible. According to Zolotih [4], during the course of a current pulse and after its termination, a series of forces operate on the molten part of the treating electrode: on the one hand, active forces (electromagnetic, electrostatic, shock wave, gravity, etc.) try to eject molten mass; on the other hand, surface tension tries to prevent the ejection of molten mass. As a result of combined effect of these forces, part of the molten mass is ejected out, and the rest remains as it is. When high pulse energies were employed, the ejection of molten mass from the treating electrode after termination of a spark discharge is much more than the molten mass transfer during the same discharge [5]. The author also noticed that material on the surface of electrodes could remain either in liquid state or extremely softened for duration of approximately 10^{-3} s after ejection of the molten mass. This duration could be more or less than 10^{-3} s depending on both the parameters of spark discharge and the thermophysical properties of the electrodes [6].

It could be deduced from previous studies [3–6] that the major part of the molten material was ejected after termination of the current pulse, that is, in the absence of some of the active forces, such as electromagnetic force. Therefore, it could be anticipated that if the time of molten material ejection from the treating electrode after the first spark discharge and the time of the next pulse (i.e. active forces of next pulse) overlap, there could be a significant increase in the erosion of the treating electrode in comparison to the erosion due to same pulse pair under the condition of no overlapping. Thus, more mass could be transferred to the substrate without increasing pulse energy. Similar superposition of transient processes, thermal in electrodes (after the first pulse), electromagnetic in electrical discharge contour of the pulse generator and transient processes in plasma channel of spark discharge (in time of subsequent pulse), will probably create a condition not only to increase erosion of treating electrode, but also to increase both molten volume at the tip of the treating electrode and molten spot size on the surface of substrate.

The brief and qualitative information given above on the physical erosion of electrodes and also the experimental studies carried out previously [7], were used as a base to develop a new processing method [8] and a device [9] for ESA with increased erosion of treating electrode without changing the number and parameters of pulses (i.e., the amount of electricity of the ESA process).

2. Experimental procedure

2.1. Device design

An electrosark installation was specially developed for the present research. Technical specifications of the installation were based on the following reasons.

Expanding the abilities of ESA is directly related to the capability of an ESA installation. Pulse parameters determine the amount and rate of energy input in plasma channel between

electrodes, which, in turn, affect the heat transient process in electrodes, and consequently, erosion of electrodes.

For a set of chosen pulse parameters, by increasing the number of pulses (i.e., the frequency increase and at the same time the average current increases) one could reach a point where a new heat transient process (cumulative) in electrodes would be obtained by overlapping of heat transient processes of consecutive pulses. However, in this case, a basic advantage of ESA processing could be lost: the absence of cumulative warming up of the substrate and keeping its initial shape and microstructure.

Aiming to overlap the heat transient processes and at the same time to prevent overheating of substrate, pulses formed by the new installation, could be grouped instead of increasing their numbers. For comparative study, the total number of processing pulses in all pulse groups must be the same as conventional ESA. It should also allow varying of pauses between pulses in a pulse group (Note that there are two kinds of pauses: one is the pause between the pulses of a pulse group and the other is the frequency between pulse groups). Beside this, the installation could offer additional technological capabilities simultaneously with the process of coating, for example, electrosark coating with electrosark smoothing of surface roughness.

The relative positioning of electrodes should have the ability to form a plasma channel between electrodes at any moment and last long enough to complete each spark discharge. This could be succeeded if the treating electrode is able to slide on the surface of the substrate backwards and forwards. In this case the plasma channel would form through the explosion of the contacting micro protrusions of the surfaces (micro roughness). In order to have same explosion condition of micro protrusions when the ESA is switched from one mode to another, the initial

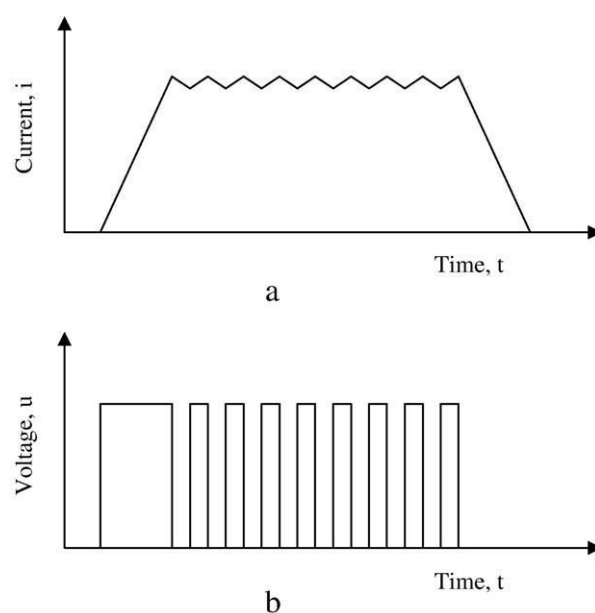


Fig. 1. The basic schemes of a current pulse formation in discharge contour of ESA installation by switching on–off of the power transistor (a) operated by voltage pulses regulated by the pulse oscillator (b).

stage of plasma channel formation must be stabilized (the first slope of pulses must be same). This could be achieved, if parameters of discharge contour of ESA installation, the charge voltage of capacitor, amount of its capacity, its resistance and inductance (U , C , R , L) stay constant as processing modes (pulse parameters) of ESA are changed.

Aiming to accomplish ESA technology with new properties above, the new ESA installation was run by employing a transistor as switchboard. Formation of current pulses is carried out by a method of Pulse Duration Modulation (PDM), (that is, the transistor was on–off periodically in order to form an integrated current pulse by means of overlapping individual electromagnetic transient processes in the discharge contour, which is preprogrammed by the master oscillator of the installation). A representative integrated square pulse current and corresponding pulse of master oscillator were given in Fig. 1a and b respectively. Pulses having other shapes could be formed if needed. The master oscillator was executed on the basis of a high-speed microprocessor providing the minimal step of individual voltage pulse duration of 200 ns. For this time interval, the amplitude of an individual current pulse in discharge contour of ESA installation reaches 3 A. A special computer program to form both amplitude-duration characteristics for current pulses and their sequence in a pulse group was developed.

Power consumption of ESA installation was 180 watts. The output of stabilized voltage was constant at 40 V. The ranges of pulse energy and pulse duration were from $0.25 \cdot 10^{-3}$ J to 15 J

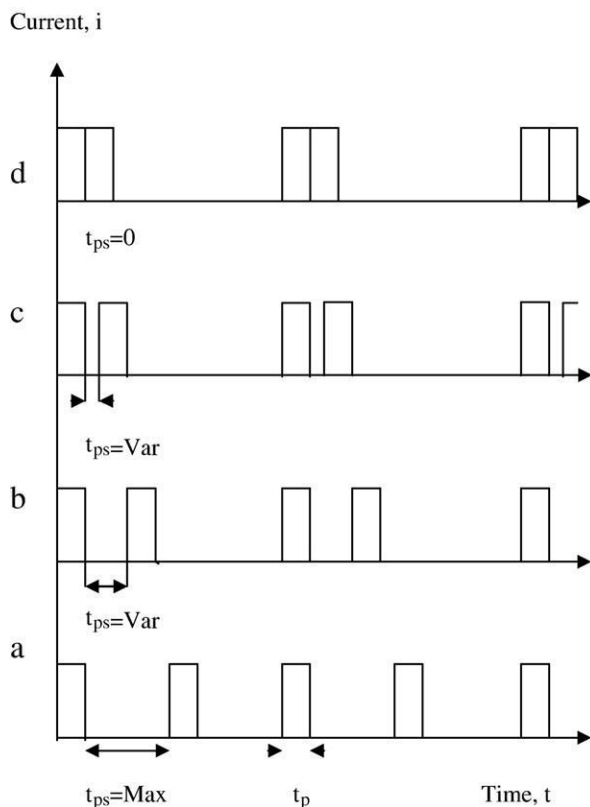


Fig. 2. The schematic drawing representing the pulse arrangement of pulse groups of two pulses with varying pause between them, (a) when $t_{ps} = \text{Max}$, (b) and (c) when $t_{ps} = \text{Var}$, (d) when $t_{ps} = 0$. t_p is pulse duration.

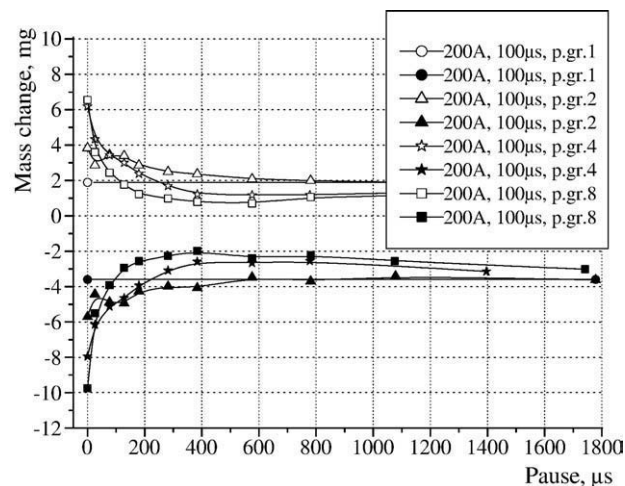


Fig. 3. Mass change of the substrate and treating electrode (solid dots) as a function of pause between pulses. Parameters of individual pulse were 200 A and 100 μs .

and from 2 μs to 4000 μs respectively. The pulse frequency ranged between 2 Hz and 120,000 Hz (the upper limit of frequencies which was used with lowest amplitudes of pulse current was 15 A). For a given voltage of discharge capacitor and full resistance of discharge contour, the first slope of current pulses were 14.4 A/ μs , up to pulse amplitude of 1000 A. Further information is available elsewhere [9].

2.2. Experimental condition

ESA were performed by the employment of periodically ordered individual square pulses (conventional ESA mode [10], chosen as base data to compare with the rest of the experimental results) and by the employment of periodical pulse groups consisting of two and more pulses with the possibility of superposition of transient processes named above. Degree of superposition of transient processes could be achieved by adjusting the pause between pulses. The pause between pulses was varied from 1800 μs down to zero (experimental data for zero pause, $t_{ps} = 0$, was also considered as a base for comparative study of experimental results). The base data for the mass loss of treating electrode and the mass gain of the substrate were obtained by averaging measurements of 15 specimens. The pulse duration of square pulses was in between 100 μs and 400 μs and the current pulse amplitude employed was from 200 A to 500 A. The amount of electricity of ESA processing through interelectrode gap was kept constant at 3 Coulomb which was necessary to compare experimental results with each other. Note also that the amount of 3 C was chosen to prevent overheating of the treating electrode, which has a small cross section. The frequency of pulse groups was chosen by considering the requirement of maintaining the electricity of ESA as constant. A total processing time of 50 s was used for one layer of deposition with 3 C electricity. The mass loss of the treating electrodes, WC92-Co8 with a cross section of 8 mm², mass gain of the substrates, steel 35 cubes with a volume of 1 cm³ (dimensions of cubes were 1 × 1 × 1 cm),

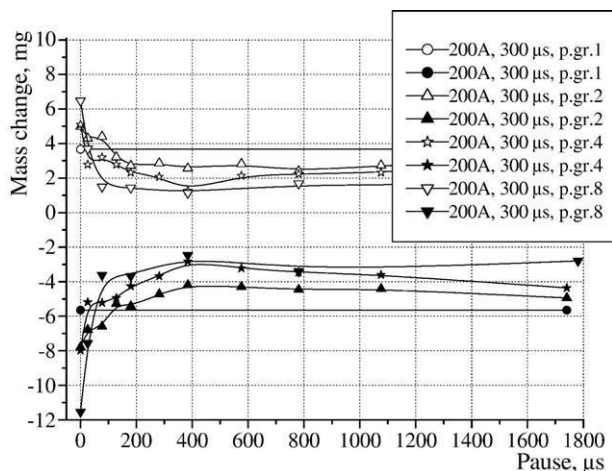


Fig. 4. Mass change of the substrate and treating electrode (solid dots) as a function of pause between pulses. Parameters of individual pulse were 200 A and 300 μ s.

and some properties of coating were investigated. Surface area of the deposits was all 1 cm². The basic principles of experiments are illustrated in Fig. 2.

Changes in the mass of the treating electrodes and substrates were measured by using a balance with a precision of 0.1 mg (200 Mettler Toledo). Surface roughness was measured with a precision of 0.01 microns (SJ-400 Mitutoyo). A scanning electron microscope was employed for morphological and cross sectional examination of coatings (Philips XL 30 SFEG).

3. Experimental results and discussion

3.1. Coating by groups of identical pulses

The first series of ESA experiments were carried out by using square pulses with current amplitude of 200 A and durations of 100 μ s (pulse energy is 0.268 J) when the pause between pulses was maximum, $t_{ps} = \max$ (i.e., there is one pulse in each group, the same as conventional ESA mode, named as pulse group 1, (p.gr.1)

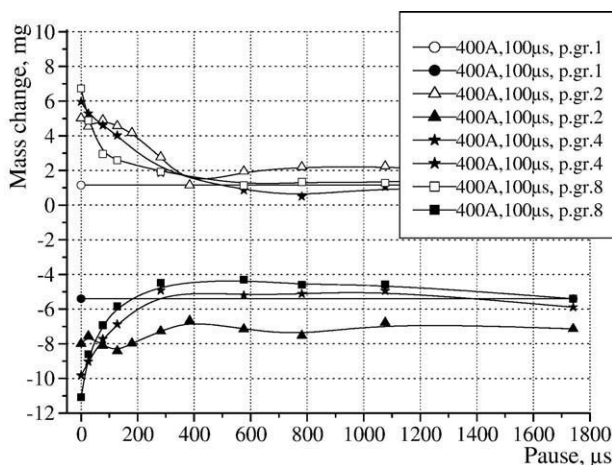


Fig. 5. Mass change of the substrate and treating electrode (solid dots) as a function of pause between pulses. Parameters of individual pulse were 400 A and 100 μ s.

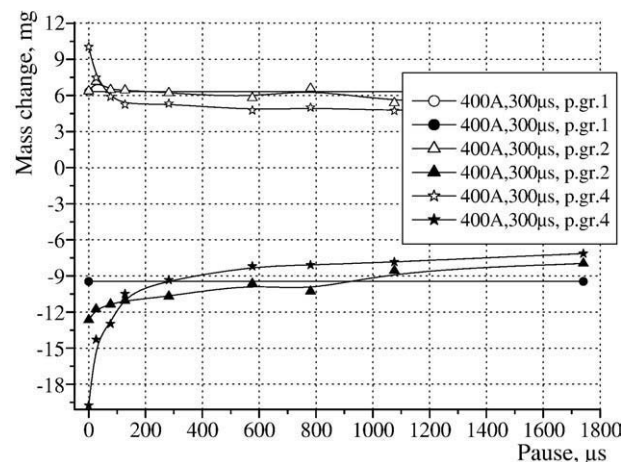


Fig. 6. Mass change of the substrate and treating electrode (solid dots) as a function of pause between pulses. Parameters of individual pulse were 400 A and 300 μ s.

and when the pause between pulses in a group of 2 pulses (p.gr.2), a group of 4 pulses (p.gr.4) and a group of 8 pulses (p.gr.8) vary from 0 to 1800 μ s. The base data, (p.gr.1), were marked not as points but as horizontal lines in Figs. 3–6 (a matter of convenience to compare the experimental results of pulse groups with them). The value of $t_{ps} = \max$ depends on electrical parameters of pulses (amplitude and duration) and total amount of electricity of ESA (as mentioned above it is 3 C for present study). Many different pulse setting, each for a set of experiments (for example, anyone of Figs. 3–10), were employed. Each pulse setting has its own $t_{ps} = \max$.

In Fig. 3, the changes in the mass of the treating electrode and substrate were given as function of pause between the pulses. When experimental results were compared with the base data, it could be deduced that the expected increase in the mass change of the electrodes due to possible superposition of transient processes was not observed for the pause range of 1800 μ s–600 μ s. Especially for p.gr.4 and p.gr.8, the mass changes of electrodes were even less than that of base data. The

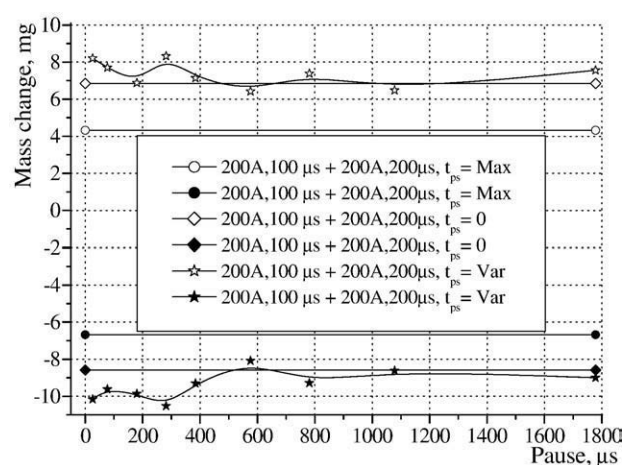


Fig. 7. Mass change of the treating electrode (solid dots) and substrate as a function of pause between pulses. Energy of the first pulse was 0.268 J and that of second one was 0.634 J.

expected effect was observed when the pause between pulses was 600 μs and less for the case of p.gr.2, and 250 μs and less for p.gr.4, and 100 μs and less for p.gr.8.

As an example, for coating by using group of two pulses, the maximum change in mass of the electrodes (mass loss of the treating electrode, M_a , and mass gain of the substrate, M_c) was obtained with the pause of 128 μs . M_a and M_c were 4.95 mg and 3.39 mg respectively, which were 1.37 and 1.79 times higher than the base data of $t_{ps} = \text{max}$. Moreover, it was noticed that the value of mass transfer coefficient, which is the ratio between mass gain of the substrate and mass loss of the treating electrode increased (the value of this coefficient describes the efficiency of mass transfer). This was apparently due to the decrease in washed away molten material of substrate. The mass change of electrodes for the pauses ranging from 0 to 1750 μs for p.gr.2, p.gr.4 and p.gr.8 was lower than that of the case of $t_{ps} = 0$.

When, a spark discharge take place a plasma channel forms between a spot on the treating electrode and a corresponding spot on the substrate. At both ends of plasma channel, i.e. just on the spots, the electrodes melt due to heat flow and form a

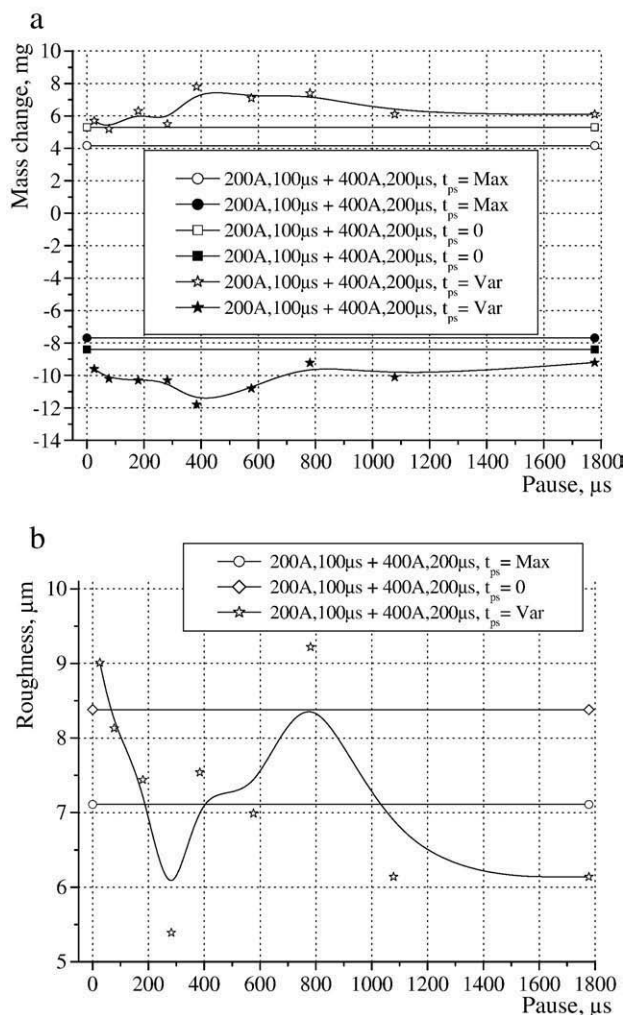


Fig. 8. Mass change of the treating electrode (solid dots) and substrate (a) and corresponding surface roughness (b) as a function of pause between pulses. Energy of the first pulse was 0.268 J and that of second one was 1.05 J.

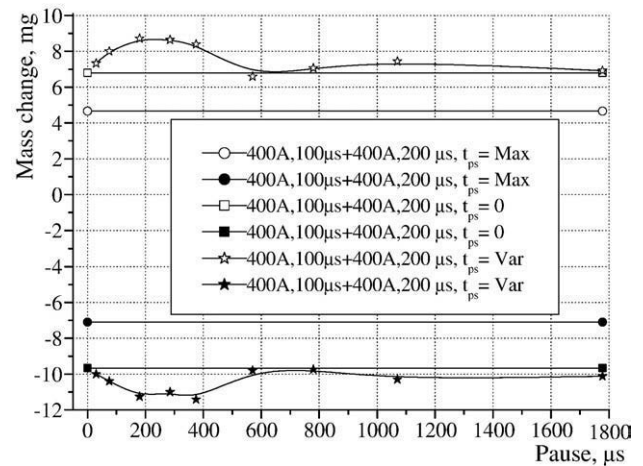


Fig. 9. Mass change of the treating electrode (solid dots) and substrate as a function of pause between pulses. Energy of the first pulse was 0.443 J and that of second one was 1.05 J.

molten volume at the tip of treating electrode and a melting pool on substrate. Part of the molten volume erodes away, impinges on melting pool and mixes with the molten substrate material to form a liquid splash. Since, high gas pressure of plasma channel squeezes this liquid splash against to the substrate ahead of solidification, it is forced towards its edges and part of it is ejected away. The liquid material ejected far away could not join its own splash and therefore it is a lost. This phenomenon was named as washing away and it repeats itself for each spark discharge. In short, during the first layer of deposition, substrate concurrently gains mass from treating electrode and losses mass due to washing away. Under the condition of constant pulse duration, the higher the amplitude of pulse current the more the mass lost.

So far, the experiments had not revealed the expected significant increase in the mass loss of treating electrode and the duration of its erosion (after a spark discharge, the molten material on electrodes maintains its existence for a time of 1 ms

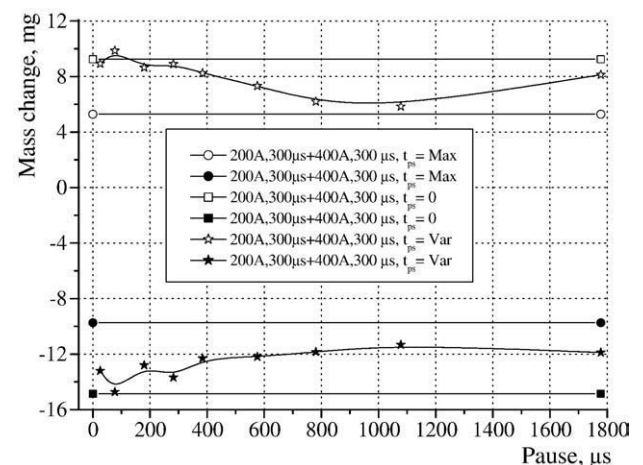


Fig. 10. Mass change of the treating electrode (solid dots) and substrate as a function of pause between pulses. Energy of the first pulse was 0.982 J and that of second one was 1.82 J.

or longer [5]). This result could only be explained by decreased number of spark discharges compared with constant number of current pulses supplied by the generator.

To check this point, oscillographical examinations were carried out on the condition of initiation and development of spark discharges at interelectrode gap [11]. Examinations showed that in case of coating by a group of two pulses, depending on the value of the pause between them, partial or complete short circuit (no spark discharge) of electrodes was observed during the course of second pulse that naturally decreases the erosion of the treating electrode.

Same kind of examinations carried out in case of coating by pulse groups consisting of 4 and 8 pulses showed that spark discharges were partially present during the second pulse but practically not present after it in each of these groups. Therefore, the erosion of the treating electrode sharply decreased. Apparently under this condition, the total amount of erosion decreases if the number of pulses in a group increases. The absence of spark discharge could be due to the liquid erosion material filling the interelectrode gap (electrodes contact each other) after the first spark discharge. Consequently, either a second discharge occurs in full strength or partially, or it does not take place at all. This is also valid for the pulse groups having more than two pulses. Apparently, the electrical energy of the next pulse was not enough for providing explosion of the mass which was transferred after the first pulse.

The experimental analysis of coatings using groups of pulses with increased energy (pulse energy was increased by enlarging pulse duration, for example, 200 A, $t_p = 300 \mu\text{s}$, energy of pulse is 0.982 J) did not reveal any evidence of intensified erosion of the treating electrode (Fig. 4). The small effect was noticed only in case of coating by p.gr.2, and that was for short range of pauses: 120 μs and less. The maximum changes in mass of electrodes (M_a and M_c) were obtained with a pause of 77 μs and they were 1.17 and 1.20 times more than the base data (p.gr.1) respectively.

Increasing pulse energy by raising current pulse amplitude up to 400 A (pulse duration, $t_p = 100 \mu\text{s}$, the energy of pulse is 0.443 J) ensured an opportunity to intensify both the amount and rate of erosion of the treating electrode for p.gr.2 (Fig. 5). Regarding the tendency of the mass loss curve of the treating electrode, it could be assumed that beyond a pause of 1800 μs , the mass loss of the treating electrode would still be higher than that of the base data until reach the base data when the t_{ps} approaching the $t_{ps} = \text{max}$.

Let us mark that the mass loss of treating electrode for ESA with a pause of $t_{ps} = 118 \mu\text{s}$ even exceeded the mass loss of double duration pulse ($t_{ps} = 0$). For this processing parameter, the mass gain of the substrate was 4 times more than the mass gain for the base case ($t_{ps} = \text{max}$). However, for the same processing parameters, the increase in the mass loss of the treating electrode was only 1.5 times more than that of the base data, which is not adequate to cause a 4 times increase in mass gained by the substrate. This means that, there was a sharp decrease in the amount of molten substrate materials washed away.

Coating by pulse groups consisting of 4 and 8 pulses intensified the erosion of the treating electrode only at ranges of short pauses. For the rest of the pauses, it was shown by oscillographic analysis

that the condition to develop a spark discharge for third and higher pulse was not present. The reason was the short circuit of electrodes due to the mass gained during the first 2 pulses.

For the current amplitude of 400 A, further increase in energy of pulses by increasing pulse duration ($t_p = 300 \mu\text{s}$, energy of pulse is 1.82 J) did not reveal considerable increase in mass loss of the treating electrode except for coating by group of 2 pulses with pause of 800 μs and less (Fig. 6). In this case, the maximum erosion of the treating electrode was 1.24 times higher than that of the base data. This was obtained only in case of group of 2 pulses with 26 μs pause between them.

Regarding the analysis of the above results, it is possible to deduce that energy of the second and subsequent pulses in a pulse group was not enough to satisfy the requirements of forming a plasma channel between electrodes by explosion of erosive mass. Therefore, in order to achieve the objective of the present investigation (increasing mass loss of the treating electrode by the employment of pulse groups) any given pulse in a pulse group should have energy higher than that of the previous one. Thereby, it would be possible to form plasma channel for all pulses in a group.

3.2. Coating by pulse groups consisting of two pulses with pulse energy increasing from one to the next

Since experimental results were massive, only main points of the overall experimental results for only group of two pulses were shortly presented in Table 1. It shows the parameters of each pulse (first and second), the frequency of pulse groups and mass loss of the treating electrode for base data, $t_{ps} = \text{max}$ and $t_{ps} = 0$, and maximum erosion of treating electrode and corresponding pause between pulses. The data in Table 1 are enough to estimate the efficiency of the proposed new processing method, which is increasing the mass loss of the treating electrode. The mass loss of treating electrodes and mass gain of the substrates as a function of pause were given in Figs. 7–10. As in the previous case, in these figures, the base data (points) corresponding to $t_{ps} = \text{max}$ and $t_{ps} = 0$ were represented as horizontal lines.

Experiments revealed that the employment of a group of two pulses, the second of which had higher energy, provided an essential increase in the erosion of treating electrode and partial transfer of this mass to the substrate subsequently. Frequently, the amount of this mass was even more than that of the joined pulse ($t_{ps} = 0$). It could be seen that the moment to apply the second pulse, at which the intensified erosion of treating electrode is ensured, could be even more than the longest pause time of 1750 μs which was chosen as upper limit for the experiments in the present work. This fact allows one to guess that after the application of the first pulse, the liquid material in the treating electrode maintains its existence for a time much more than 1 ms (compared to the corresponding time given by Zolotih [5]). With rare exception, the mass loss curves of treating electrode usually had a maximum, so did the mass gain curves of the substrate. The time to reach at the maximum by changing the pause between pulses ranged from 30 to 400 μs . Any correlation was not detected between the occurrence time of a maximum and parameters of pulse pair.

Table 1
Pulse parameters and amount of mass loss of treating electrode

No. of exp	No. of pulses in a pulse group	Pulse energy, J	Amplitude of pulse, A	Duration of pulse, μ s	Frequency of pulse group, Hz	Mass loss, mg (base data)	Max mass loss, mg/time of pause
1.	First	0.268	200	100	41	9.06, $t_{ps} = \max$	11.46/ $t_{ps} = 30$
	Second	0.982	200	300		10.88, $t_{ps} = 0$	–
	Joined					6.12, $t_{ps} = \max$	7.86/ $t_{ps} = 285$
2.	First	0.268	200	100	109	6.18, $t_{ps} = 0$	–
	Second	0.443	400	100		10.16, $t_{ps} = \max$	14.84/ $t_{ps} = 75$
	Joined					12.02, $t_{ps} = 0$	–
3.	First	0.982	200	300	15	9.56, $t_{ps} = \max$	13.88/ $t_{ps} = 180$
	Second	2.5	400	400		12.28, $t_{ps} = 0$	–
	Joined					6.02, $t_{ps} = \max$	13.18/ $t_{ps} = 180$
4.	First	0.982	200	300	13	11.16, $t_{ps} = 0$	–
	Second	3.02	500	400		7.5, $t_{ps} = \max$	11.08/ $t_{ps} = 375$
	Joined					9.54, $t_{ps} = 0$	–
5.	First	0.443	400	100	24	12.16, $t_{ps} = \max$	14.56/ $t_{ps} = 180$
	Second	1.82	400	300		14.52, $t_{ps} = 0$	–
	Joined						
6.	First	0.443	400	100	34		
	Second	1.07	500	170			
	Joined						
7.	First	1.82	400	300	10		
	Second	3.12	400	500			
	Joined						

It is interesting to note that to obtain the same erosion of treating electrode and mass transferred to the substrate by the conventional processing mode of ESA, it is necessary to employ pulses of very high energies. For example, if one would like to gain an 8.2 mg increase in the mass of the substrate (condition in Fig. 7: pulse current amplitude was 200 A, energies of the first and the second pulses were 0.268 J and 0.634 J respectively) by conventional processing mode of ESA, it was necessary to employ pulses with a duration of more than 800 μ s for the same pulse current amplitude of 200 A (pulse energy is 2.72 J or more) [2]. Besides, ESA with this pulse could not produce a proper coating since alloying was carried out under strong ultra-violet radiation associated with sticking of electrodes.

It was also an advantage that despite the higher mass transfer from treating electrode to substrate, surface roughness of deposition (parameter Ra) was generally below the surface roughness of ESA with joined pulse ($t_{ps} = 0$). Moreover, for the part of pause range of 0 to 1750 μ s it was even below that of ESA with $t_{ps} = \max$. Despite the slight variation in mass transfer versus pause curves, the surface roughness significantly fluctuated depending on the value of pause between pulses (for example, see Fig. 8b). This could be related to a new mechanism of roughness formation which was not understood at this stage of investigation.

By examining the deposition, it was understood that major amount of mass was transferred to the substrate by employing pulse groups consisting of pulses with low current amplitudes. This creates certain difficulty in forming a proper coating. The diameter of erosion spots on the substrate surface was not large. Therefore, the large mass deposited on little spots form hills with high peaks. Eventually a deposition consisting of so many hills was formed. Since these hills affect the location of the following discharges, in turn, the location of subsequent mass

transfer, a preferential mass deposition was present. The spaces among the hills could not be filled with further ESA, ending up with a discontinuous deposition (for example, see Fig. 7, the amplitude of pulses was 200 A).

A pattern of deposition different from the one described above was observed when the amplitude of the second pulse was increased, for example to 400 A or more. This time, it was easy to form a continuous deposit.

It was experimentally observed that depending on the electrical parameters of a pulse pair and the amount of pause between them, there was a mode of alloying at which the treating electrode moved unusually easily on the deposition layer similar to the movement on a lubricated surface. Therefore, the ESA was carried

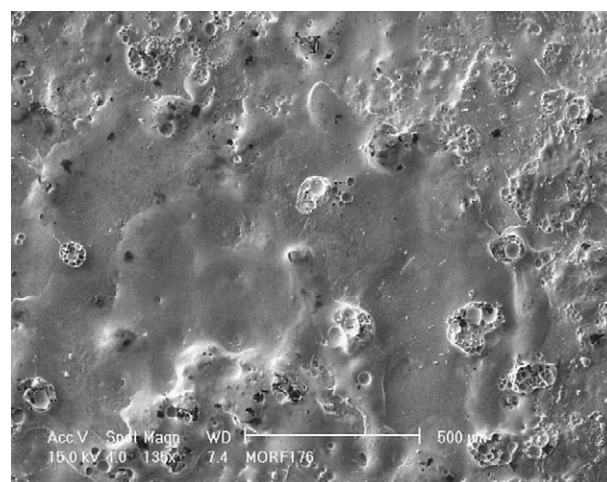


Fig. 11. Morphology of coating formed by pulse group of two pulses. Parameters of the first pulse were 200 A and 100 μ s, and that of second one were 400 A and 200 μ s. Pause between pulses was 375 μ s.

out easily. The characteristic of the deposition was its high degree of continuity. The same ESA behavior was observed with the application of different electrical pulse parameters in a pulse group, for example, alloying by pulse parameters given in Fig. 9 with pause of 375 μ s and in experiment number 5 (Table 1) with pause of 285 μ s. In Fig. 11, the surface morphology of a coating produced by ESA with lubricated behavior was shown. The same behavior was obtained by using other sets of ESA parameters. For example, the parameters of the first pulse were 200 A and 100 μ s, that of the second one were 400 A and 200 μ s and $t_{ps}=375$ μ s; specific mass was 0.053 mg/C. Specific mass was calculated as mass gain of the substrate per pulse pair divided by the amount of electricity (Coulomb) consumed by these pulses. In this case, after spreading, transferred mass solidified by occupying an area which was much larger than the original spot size ($t_{ps}=\max$ and the specific mass transfer was 0.027 mg/C). Thus, this might be another kind of mechanism of layer formation. This could also be the reason for sliding of the treating electrode on the substrate during processing as mentioned previously.

The information given above indicates the possibility for increasing coating thickness of single layer deposition. It is possible to replace the conventional ESA technology of multi layer deposition by the new ESA technology (pulse group) that produces thicker coatings by single layer deposition. However, an essential increase in the mass transferred to the substrate (see Fig. 10, mass transfer to substrate is 9.86 mg for 50 s, specific mass is about 0.065 mg/C), was associated with formation of an improper coating (increasing the number and size of porosities, initiation and propagation of cracks, etc.). In Fig. 12a and b, images of surface morphology and cross section of coating with above parameters were given. Those defects formed due to boiling of already transferred mass caused by heat accumulated in it and supplied by discharge of second pulse [1,2].

The effect of pulse parameters (energy of pulse group) on mass transfer was experimentally measured under the condition of same substrate volume, deposition area and process environment. As it was mentioned previously, each experimental data was the average of 15 measurements. Metallographic examinations showed that, the thickness of deposits was less than 100 μ s which is not comparable to the thickness of substrate (10,000 μ s). Moreover, volume of the liquid splash on substrate (it forms due to a spark discharge right on the location of the spot) is incomparable with the volume of substrate. Due to tremendous difference between volume of liquid splash and substrate, during deposition the initial temperature of the substrates (room temperature) practically did not change. Liquid mass was transferred to the substrate locally. At the same location substrate was heated up. In the case of low pulse energy, heat was locally removed from liquid splash by substrate (it was steel and thermally highly conductive). When the energy of pulses was gradually increased, the temperature of the liquid splash gradually increased up either. Eventually, heat content of the liquid splash reached a point that although the substrate locally removed heat away as fast as it could, the liquid mass boiled.

Therefore, it is necessary to restrict the amount of mass transfer from the treating electrode to the substrate as a result

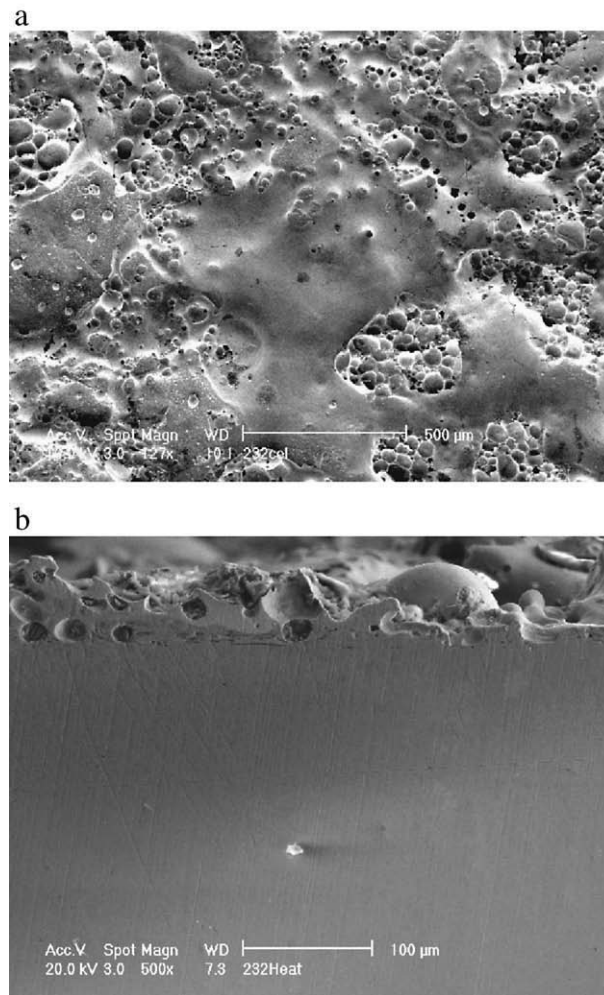


Fig. 12. Morphology of coating (a) and its cross sectional view (b) formed by pulse group of two pulses. Parameters of the first pulse were 200 A and 300 μ s, and the second one 400 A and 300 μ s. Pause between pulses was 75 μ s.

of unit action of each pulse groups in order to satisfy the requirement of a defect-free ESA coating. Experiments revealed that the specific mass should not exceed 0.065 mg/C for the electrode couple of steel 35 and WC92-Co8.

4. Conclusions

1. A modified ESA processing method to increase mass loss of the treating electrode and thereby mass gain of the substrate was developed. The method is based on the superposition of heat transient processes in electrodes and electromagnetic transient process in discharge contour of installation which form due to the group of spark discharges. The degree of pulse overlapping and therefore mass loss of the treating electrode and mass gain of the substrate was regulated by electrical parameters of each pulse in a group, number of pulses in a group and value of pause between them.
2. Large amount of mass transfer from treating electrode to substrate was succeeded by using groups of two pulses. Energies of the pulses forming the groups were not high. The

ESA was operated without strong ultra violet radiation and sticking of electrodes.

3. When the specific mass transfer was 0.065 mg/C or above, boiling of the material transferred from the treating electrode deteriorated the quality of deposition; this limits the possibility of increasing mass transfer further.
4. If the heat content of the deposited mass could be lowered before delivering the second pulse of the group, it would be possible to increase the coating thickness. This could be achieved if the second pulse is activated after a long time, for example 1 ms or more from the termination of the first pulse. In the meantime, heat of transferred mass due to first pulse already begins to partially dissipate into the substrate. Referring to the mass transfer versus pause curves (Figs. 7–10), it could be seen that the mass transfer from the treating electrode to the substrate after the employment of pulse pair with a pause of 1 ms and more in between slowly decreases. If one succeeds to overcome the boiling problem due to overheating of transferred mass, it is possible to significantly increase the mass transfer either by increasing the energy of second pulse or by including

a third pulse to the group. This idea should be subjected to experimentation.

References

- [1] A.V. Ribalko, A.V. Siminel, O. Sahin, *Met. Work.* 4 (16) (2003) 7 (in Russian).
- [2] A.V. Ribalko, O. Sahin, *Surf. Coat. Technol.* 201 (2006) 1724.
- [3] A. Erden, B. Kaftanoglu, *Int. J. Tool Des. Res.* 21 (1981) 11.
- [4] B.N. Zolotih, Governmental press the tekniko theoretical literature, Moscow, 108P, 1953, (in Russian).
- [5] B.N. Zolotih, *Electrospark machining of metals*, Moscow, 1, 1957, p. 38, (in Russian).
- [6] K.K. Namitokov, *Electroerosion phenomena*, Energy, Moscow, 1978, p. 419, (in Russian).
- [7] A.V. Ribalko, D.M. Grichuk, N.A. Postolaky, *Technical Electrodynamics*, Ukraine, 2, 1996, p. 13, (in Russian).
- [8] A.V. Ribalko, G. Dumitru, E. Vladimir, M. Dumitru, *The Patent of Moldova* 997 (1998) (in Moldovan).
- [9] A.V. Ribalko, A.V. Siminel, O. Sahin, *Met. Work.* 6 (18) (2003) 38 (in Russian).
- [10] R.N. Johnson, *Society of Vacuum Coaters, 45th Annual Technical Conference Proceedings*, 2002, p. 87.
- [11] A.V. Ribalko, V.I. Khamurari, *Elektr. Obrab. Mater. (Sov. Surf. Eng. Appl. Electrochem.)* 5 (1988) 128 (in Russian).