



**Makale
(Article)**

Elektro Erozyon ile İşlemede Tezgah, İşparçası ve Elektrot Üzerinde Uygulanmış Modifikasyonlar

Ali ÖZGEDİK*

*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye
ozgedik@gazi.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, Elektro-Erozyon ile İşleme (EEİ) tekniğinin alışılmamış imalat yöntemlerinden biri olarak kullanılmaya başlamasından günümüze kadar geçen sürede bu teknik ile ilgili yapılmış olan deneysel çalışmalar incelenmiştir. EEİ ile işlemenin performans çıktılarını iyileştirmek amacı ile tezgah, işparçası ve elektrot üzerinde uygulanmış modifikasyonlar ve bunlara ait deneysel sonuçlar özet olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektro erozyon ile işleme, tezgah, işparçası, elektrot, modifikasyon

Modifications Applied on Electrical Discharge Machine, Workpiece and Electrode in Electric Discharge Machining

Abstract

In this study, experimental studies related to electric discharge machining (EDM) over the period since the beginning of using this process as a nontraditional manufacturing process were investigated. Modifications applied on the electrical discharge machine, workpiece and electrode to improve performance outputs in EDM and the experimental results of which were presented as a summary.

Keywords: Electric discharge machining, machine, workpiece, electrode, modification

1. GİRİŞ

Endüstride ihtiyaç duyulan yüksek kalitede kalıp ve takım imalatındaki isteklerin sürekli artması, değişik teknolojilerin bu alanda uygulanması zorunluluğunu da beraberinde getirmiştir. Günümüz teknolojisinde Elektro-Erozyon ile İşleme (EEİ) bu alanda yaygın olarak kullanılan alışılmamış imal usullerinden birisidir. EEİ, dielektrik sıvı içerisinde elektrot ile işparçası arasında oluşan elektriksel boşalımın işparçası yüzeyinden çok küçük bir hacmi aşındırması esasına dayanır. İletken elektrot (erkek kalıp), işparçasında (dişi kalıp) oluşturulacak boşluğa göre hazırlanır. EEİ sıklıkla, çok sert, kırılgan, yüksek mukavemetli, yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelere uygulanmaktadır. Elektrot ile işparçası arasında doğrudan fiziksel temas olmadan ve işparçasına mekanik gerilme uygulanmadan işlemenin yüksek doğruluk ve hassasiyetle gerçekleştirilebilmesi bu yöntemi günümüz kalıp üretiminin ana metotlardan biri yapmıştır. Elektriksel kıvılcımın aşındırma etkisi ilk olarak 1768 yılında İngiliz bilim adamı Priestly tarafından keşfedilmiştir. Elektrik kontağındaki aşındırıcı etkiyi azaltmak için yapılan çalışmalar

Bu makaleye atıf yapmak için

Özgedik A.*, "Elektro Erozyon ile İşlemede Tezgah, İşparçası ve Elektrot Üzerinde Uygulanmış Modifikasyonlar" Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 2014, (11), 19-38

How to cite this article

Özgedik A.*, "Modifications Applied on Electrical Discharge Machine, Workpiece and Electrode in Electrical Discharge Machining" Electronic Journal of Machine Technologies, 2014, (11) 19-38

sırasında Rus bilim adamları B.R. ve N.I. Lazarenko 1943 yılında elektriksel kıvılcımın aşındırıcı etkisini olumlu yönde kullanmaya karar vermişler ve metal işlemesi için bir metot geliştirmişlerdir. Bu amaçla Lazarenko devresi olarak bilinen kıvılcım jeneratör devresi ile ilk EEİ tezgahını oluşturmuşlardır. Bu jeneratör devresinin geliştirilmiş şekli mevcut birçok erozyon tezgahında kullanılmaktadır [1].

Mevcut yöntemlerle işlenmesi çok zor olan metallerin bu yöntemle işlenmesi zaman ve maliyet açısından büyük kazançlar sağlamaktadır [2]. Günümüzde EEİ yöntemi ile üretilen pres kalıpları, enjeksiyon kalıpları, dövme kalıpları, ekstrüzyon kalıpları, civata başı dövme kalıpları, toz sıkıştırma kalıpları bu yöntemin kullanıldığı genel örneklerdendir [3]. Bunların yanı sıra 30-50 µm çapındaki döner elektrotla deliklerin işlenmesi [4], dielektrik sıvı içerisine karıştırılmış metal tozları ile yüzey bitirme işlemi [5], kompozit elektrotla yüzey modifikasyonu [6], çevresel işleme [7] gibi EEİ yönteminin kullanım alanını genişletmek için yapılmış çalışmalar mevcuttur.

EEİ işleminde karşılaşılan temel problemler ise şunlardır:

- 1) EEİ'de talaş kaldırma, işparçası malzemesinin ergimesi ve buharlaşması ile gerçekleşmektedir [8]. İşleme esnasında işparçasından talaş kaldırılırken aynı zamanda elektrodun da aşındığı gözlenmektedir [9, 10].
- 2) İşparçasının ve elektrodun işleme yüzeylerinde hızlı soğuyarak katılaşmış bir bölge (tabaka) oluşur. Bunun sonucu olarak elektrot ve işparçası çiftinin bu bölgede sertlik ve kimyasal bileşiminde değişiklik oluşur [8]. Bunun yanı sıra bu tabakanın altında ısıl etkilenmiş çok katmanlı bir bölge oluşur. Bu bölgelerden işparçası yüzeyine yakın olan kısım beyaz tabaka olarak anılır. Bu tabaka çok yüksek sertliğe ve çok kırılgan bir yapıya sahiptir. Beyaz tabaka yüzeyinde mikro çatlaklar ve gözenekler oluşur [11-13].
- 3) Dielektrik sıvı uygulama şeklinin ve hızının yeterli olmaması halinde işleme aralığında işleme atıklarının meydana getirdiği aşırı bölgesel kirlenme nedeniyle işparçası ile elektrot arasında kısa devre ve ark tipi vurumların oluşumunun arttığı belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak işparçası işleme hızında (İİH) düşüş, elektrot aşınma hızında (EAH) ve bağlı aşınmada (BA) artış, kötü yüzey kalitesi ve tolerans dışı boyutlar elde edilir [10, 14, 15]. Dielektrik sıvı uygulamasının başarısı dielektrik sıvı uygulama şekline, hızına ve iki boşalım arasındaki bekleme süresine bağlıdır. Süre ne kadar kısa seçilirse kısa devre oluşumu da aynı oranda artar [13].
- 4) İşlem esnasında elektrodun ısıl genleşmesi ve kaba işleme ile bitirme işlemleri arasında elektrot değişimi esnasındaki aksenel sapmalar, istenen işleme ölçülerinin dışında sonuçların elde edilmesine neden olur [13].

EEİ tekniği ile ilgili olarak bu güne kadar geçen süreç içerisinde EEİ ile işleme tekniğini geliştirmeye yönelik farklı araştırmalar yapılmıştır. Çalışmada bu araştırmalar özet olarak sunulmuştur.

2. EEİ TEKNIĞINI GELİŞTİRMEK AMACI İLE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Bu başlık altında EEİ ile işlemenin prensipleri çerçevesinde işleme performans çıktılarını iyileştirmek amacı ile tezgah, işparçası ve elektrot üzerinde yapılmış modifikasyonlar ile ilgili literatür araştırması sunulmuştur.

Dönen silindirik bakır ve çinko elektrotların kullanıldığı Al-SiC metal anayapı kompozit malzemenin işlenmesi deneylerinde elektrodun dönme hareketinin durağan elektroda göre her koşulda yüksek İİH, düşük EAH ve düşük R_a değerleri sergilediği tespit edilmiştir [16].

İçinden oksijen püskürtmesi yapılan boru tipi döner bakır elektrot kullanılarak sementit karbür işparçası malzemesinin üç boyutlu EEİ frezelenmesi ile klasik EEİ frezeleme ve klasik dalma

EEİ ile aynı geometrinin işlenmesinin kıyaslandığı deneylerde oksijen püskürtmeli yeni yöntem daha düşük elektrot aşınması göstermiştir [17]. Klasik dalma EEİ yöntemi işleme süresi olarak daha kısa sürmüş olsa da elektrot üretim süresinin göz önünde bulundurulduğunda oksijen püskürtmeli EEİ frezeleme tekniğinin daha uygun olduğu belirtilmiştir.

Silindirik takım çeliği işparçasının kendi eksenine etrafındaki dönme hareketine karşılık bu eksene dik doğrultuda hareket eden bakır elektrottan oluşan EEİ deney düzeneği ile yapılmış olan deneyler neticesinde işparçasının dönme hareketinin daha yüksek işleme hızı ve daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri sağladığı belirtilmiştir [18]. Artan dönme hızı ile işleme hızının arttığı ve yüzey pürüzlülüğünün (R_a) azaldığı görülmüştür.

Dönme hareketi ve et kalınlığının onda biri yarıçapında salınım hareketi yapan boru tipi bakır elektrodun içinden püskürtülen yüksek hızdaki gaz jetinin kullanıldığı deneylerde, ergimiş ve buharlaşmış malzemenin daha kısa sürede soğuduğu, oluşan talaşların işleme aralığından daha hızlı uzaklaştırıldığı tespit edilmiştir [19]. Oksijen miktarının artırılması ile işleme hızının arttığı, elektrot aşınma hızının gaz yağı ile işlemeden daha düşük olduğu, elektrot aşınma hızının vurum süresinden bağımsız olduğu ve işleme yönünün yerçekiminden bağımsız olduğu tespit edilmiştir.

6061 Al alaşımı ve Al_2O_3 ile takviyelendirilmiş metal ana yapı kompozit malzemenin yüzük şeklindeki döner bakır elektrot ile işlenmesinde Al_2O_3 hacimsel oranının (%0, %10, %20) artışı ile İİH değerinin azaldığı gözlenmiştir [20].

Bakır elektrot ve çelik işparçası seti ile dielektrik (gazyağı) içerisine karıştırılmış grafit ve borik asit tozlarının farklı konsantrasyon ve vurum süreleri için işleme deneyleri yapılmış, vurum süresinin artışı ile hem grafit hem de borik asit toz karışımları için yüzey pürüzlülüğü artmış, grafit tozunun kullanılması yüzey kalitesini arttırmıştır. Grafit konsantrasyonunun ve vurum süresinin artışı borik asit ve katkısız gazyağına göre daha yüksek işleme hızı vermiştir. Elektrot aşınma hızı her iki tozun kullanımı ile artış göstermiştir [21].

Hızlı prototip tekniği ile üretilmiş modellerin elektroliz ile bakır kaplanması ile elde edilen ince kabuk şeklindeki elektrotların performans incelemeleri neticesinde kabuk kalınlığının artışına bağlı olarak işleme derinliğinin arttığı, ancak mevcut şartlar dahilinde bu teknik ile üretilen elektrotların henüz ağır işleme koşulları için yetersiz olduğu belirtilmiştir [22, 23].

Hızlı prototip tekniklerinden stereolitografi ile üretilip elektroliz ile bakır kaplanan, içerisinde soğutma kanalı olan ve olmayan iki farklı tip elektrodun dolu bakır malzemeden imal edilmiş elektrotlar ile işleme performanslarının karşılaştırıldığı çalışmada soğutma kanallı elektrotların kanalsız tiplere göre daha iyi performans gösterdiği, kaplama kalınlığının artırılmasının işleme performans değerlerini iyileştirdiği tespit edilmiştir [23].

Boru tipi döner elektrodun kullanıldığı EEİ frezeleme tekniğinde elektriksel boşalımın elektrodun hareket rotası boyunca hızla hareket ederek malzeme kaldırdığı tespit edilmiştir. Silindirik dolu elektrot kullanılan dalma EEİ ile kıyaslandığında yeni tekniğin yaklaşık olarak dört kat yüksek işleme hızına, düşük elektrot aşınma hızına ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu, ısı etkilenmiş bölge kalınlığının da düşük olduğu görülmüştür [24].

İçi dolu ve içi boş silindirik elektrotların döner veya sabit ilerlemeleri ile farklı dielektrik sıvı uygulama tiplerinin bir arada kullanıldığı bir çalışmada [25], İİH ve EAH değerlerinin içi boş döner elektrodada yüksek, R_a değerlerinin içi dolu sabit elektrodada en az olduğu tespit edilmiştir. Dönme hızının artışı ile İİH değerinin arttığı, R_a değerinin azaldığı da gözlenmiştir. İİH, EAH ve

R_a değerlerinin püskürtme tipinde yüksek olduğu gözlenmiştir. Dielektrik sıvı basıncı artışı ile İİH, EAH ve işleme derinliğinin arttığı, R_a değerinin ise önce arttığı daha sonra azaldığı belirtilmiştir.

Elektriksel iletken olmayan seramik malzemelerin EEİ yöntemi ile delinebilmesi için işparçası yüzeyleri yardımcı elektrot ile kaplanmış ve boru tipi elektrot içerisinden uygulanan grafit tozu-dielektrik sıvı karışımı kullanılmıştır. Bu sistem yardımıyla on iki değişik iş parçası delinmiş ve her seramik iş parçası için en uygun işleme parametreleri belirlenmiştir [26].

Toz metalurjisi tekniği (TM) ile üretilen elektrodun gözenekli yapısından dolayı işparçası yüzeyinde daha fazla pürüzlülüğe neden olduğu, bu pürüzlülüğünde boşalımları engellediği anlaşılmıştır. TM elektrotlar ile yapılan işlemlerde işleme parametrelerinin uygun seçilmesi durumunda elektrotların işparçası üzerine elektrot malzemesinin biriktirilmesinde kullanılabileceği ve klasik katı elektrotlara göre TM elektrotların vurum zamanı ve boşalım akımından daha fazla hassasiyet gösterdiği yapılan işlemler neticesinde tespit edilmiştir [27].

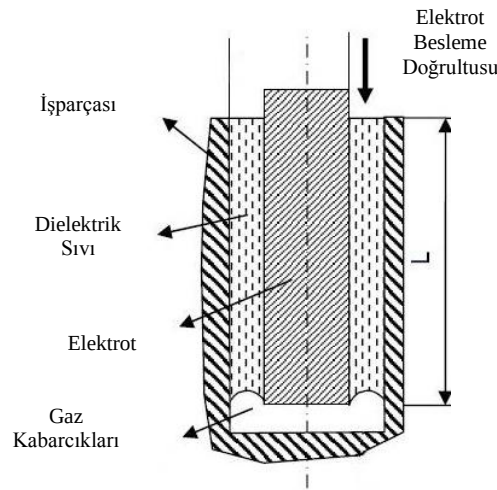
Gaz yağına karıştırılan Al, Cr, Cu ve SiC tozları arasında işleme aralığının değişiminde en çok Al tozlarının etkili olduğu, Cu tozlarının ise işleme aralığını değiştirmedeği anlaşılmıştır. Kullanılan tozların tanecik boyutunun büyümesi İİH ve EAH değerlerini azaltmıştır. Tanecik konsantrasyonu artışının EAH değerini azalttığı belirlenmiştir [28].

Yarı püskürtme metodu olarak adlandırılan elektrodun iki ekseninde gerçekleştirdiği doğrusal hareketlerle uygulanan dielektrik sıvı püskürtme yönteminde işleme hızının arttığı ve kısa devre oluşumunun azaldığı, ayrıca yarı püskürtme metodunda elektrot aşınmasının da arttığı gözlenmiştir [10].

İşlenmesi çok zor malzemelerdeki mikro deliklerin işlenmesi ile ilgili endüstrideki yoğun talep ve minyatür parça üretimi için sarf edilen büyük çabalar nedeni ile mikro üretim teknikleri büyüyen bir ilgi uyandırmıştır. Bununla birlikte mikro deliklere özellikle optik cihazlarda, medikal elemanlarda ve otomobil motor parçalarında ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun neticesinde Mikro Ultrasonik İşleme (MUSM), Mikro Mekanik Delme (MMD), Lazer ile İşleme (LBM), Mikro Punching (MP) ve Mikro EEİ (MEEİ) gibi değişik teknikler bu ihtiyaçlara cevap vermek için geliştirilmiştir [4, 29, 30]. Bu tekniklerden MEEİ, fiziksel temas olmaksızın işleme yapabilmesi, yüksek işleme hassasiyeti ve işparçası sertlik değerinden bağımsız olarak elektrik iletken tüm malzemeler için uygulanabilir olması gibi birçok avantaja sahiptir. İşleme prensibi olarak temelde klasik EEİ ile aynı olmasına rağmen uygulamada bazı özel karakteristiklere sahiptir [30]. MEEİ'de dielektrik sirkülasyonu ve işleme atıklarının uzaklaştırılması çok zordur. İşleme atıklarının uzaklaştırılması yetersiz hale geldiğinde işleme aralığındaki işleme atıkları konsantrasyonu artmakta ve işleme boşluğunun elektriksel direncini değiştirmektedir. Artan konsantrasyon nedeni ile işlemenin kararlılığını olumsuz yönde etkileyen anormal ark oluşumları gerçekleşmektedir. Sürekli ark oluşumu ise işparçası yüzeyinde derin kraterlerin oluşumuna neden olmaktadır. Bunun sonucunda işparçası yüzey kalitesi kötüleşmekte ve yüksek elektrot aşınması ortaya çıkmaktadır. Özellikle işleme derinliğinin ve işlenecek delik boyunun çapına oranının (L/D) artması ile bu durum kendini daha da çok göstermektedir. Yukarıda bahsedilen durum neticesinde işlemenin dengesiz hale gelmesiyle işleme verimi düştüğü gibi L/D oranı da küçülmektedir. [31-33]

EEİ ile işlenmiş silindirik delikler farklı giriş ve çıkış çaplarına sahiptir. Deliklerdeki bu çap farkı (delikte koniklik) elektrot aşınmasından ve işleme sırasında ortaya çıkan aşınmış partiküllerin yol açtığı ikincil boşalımlardan kaynaklanır. Bu konikleşme çoğu kalıp imalatında istenilen bir durum olmakla birlikte mikro boyuttaki deliklerin işlenmesinde olumsuz etki yaratmaktadır [30]. MEEİ işleminde oluşan işleme atıklarının neredeyse toz boyutunda olduğu ve dielektrik sıvı

içinde asılı durduğu ve uzun bir süre sonunda tankın dibine çökeldiği bilinmektedir. MEEİ ile delme işleminde başlangıçta oluşan gaz kabarcıkları elektrodun merkezine göre radyal olarak yüksek hızda hareket ederler. Belirli bir mesafeden sonra kaldırma kuvveti ile yüzmeye başlarlar. Boşalımın sürekli olarak oluştukça işleme atıkları bu kabarcık hareketleri ile uzaklaştırılır. Daha derin deliklerin delinmesi sırasında işleme atıkları etkili bir biçimde uzaklaştırılmadığında anormal boşalım ve kısa devreler daha sık oluşur. Bunun yanı sıra derin deliklerin delinmesi sırasında işleme boşluğundaki sıvının akış (viskoz) direnci artar ve işleme sırasında oluşan gaz kabarcıklarının basıncı sıvı akışını sürdürecektir kadar yüksek olamaz. Zamanla akış hızı düşer ve gaz kabarcıkları deliğin tabanında sıkışarak sıvının işleme ortamına girişini engeller (Şekil 1). Elektrot ilerlemesi sürdürülür ise kısa devre oluşur. Bu durumda işlemin devamı için elektrot kısa bir süre yukarı kaldırılır. Neticede işleme süresinin artışı ve kararsız boşalım gibi istenmeyen durumlarla karşılaşılır. MEEİ işleminde dielektrik sirkülasyonu boşalım ile oluşan dielektrik akışına bağlıdır [33].

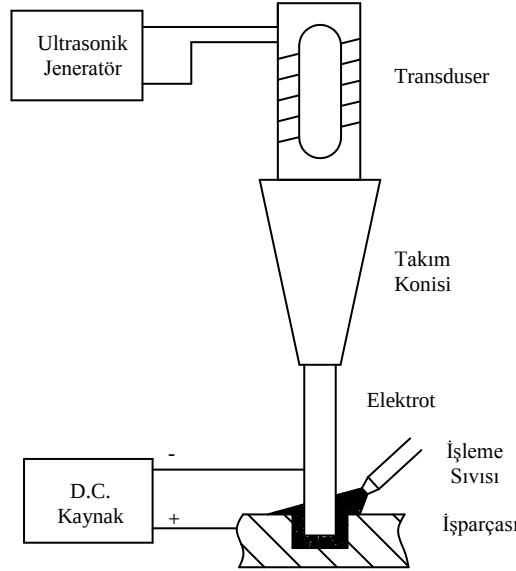


Şekil 1. MEEİ ile delmede gaz kabarcıklarının sıkışması [33]

Klasik EEİ tekniğinde kullanılan standart dielektrik püskürtme teknikleri mikro boyutlarda elektrot kullanımı nedeniyle MEEİ tekniğinde kullanılamamaktadır. MEEİ’de dış püskürtme (external flushing) ince elektrodun titreşimine ve eğilmesine neden olduğu için kullanılamamaktadır. Elektrot içinden yapılabilecek bir iç püskürtme ise (internal flushing) elektrot boyutlarından dolayı imkansızdır [33].

Klasik EEİ ve MEEİ işleme tekniklerinin ortak sorunu olan dielektrik sıvı sirkülasyonu ve buna bağlı diğer problemlerin aşılabilmesi için çok sayıda araştırmalar yapılmış ve olumlu gelişmeler elde edilmiştir.

Ultrasonik işleme tekniğindeki takım titreşimlerinin EEİ işlemindeki elektroda uygulandığı çalışmalarda (Şekil 2) iletken seramik malzemelere delik delinmesi için deneyler yapılmıştır. Ultrasonik titreşimli elektrodun (UTE) işparçası yüzeyinde oluşturduğu kavitasyon neticesinde ergimiş metal havuzunun kolaylıkla boşaldığı, elektrodun pompalama etkisi ile işleme boşluğunda daha iyi dielektrik sirkülasyonu olduğu, bunların neticesinde daha iyi işleme hızı ve daha az tekrar katılmış işparçası malzemesi tespit edildiği belirtilmiştir [34-36].

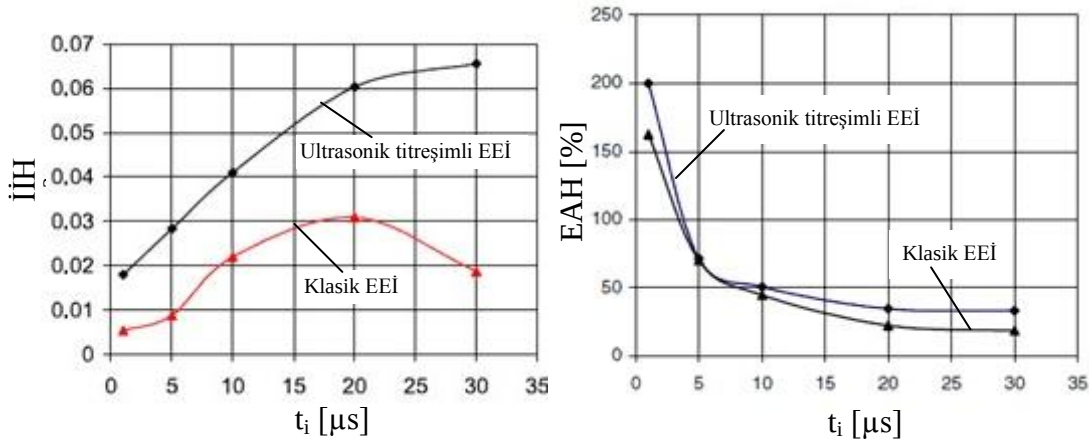


Şekil 2. UTE ile yapılan EEİ (UTE-EEİ) [34-36]

Havacılık ve uzay sanayinde yaygın olarak kullanılan seramik kaplamalı nikel alaşımı malzemelerde özellikle soğutma amaçlı kullanılan deliklerin daha düzgün olarak delinebilmesi amacı ile ultrasonik işleme (USM) ile EEİ tekniğinin bir araya getirildiği çalışmada elektroda ultrasonik titreşimler uygulanarak işleme deneyleri yapılmıştır [37]. Parafin dielektrik sıvı içerisine ilave edilen bor karbür aşındırıcı tanelerin ve yumuşak çelik elektrodun kullanıldığı deneylerde titreşimin uygulanması işleme hızında ve kararlı boşalım sayısında artış sağlamıştır. Titreşim genliğinin artışı da işleme hızını olumlu yönde etkilemiştir.

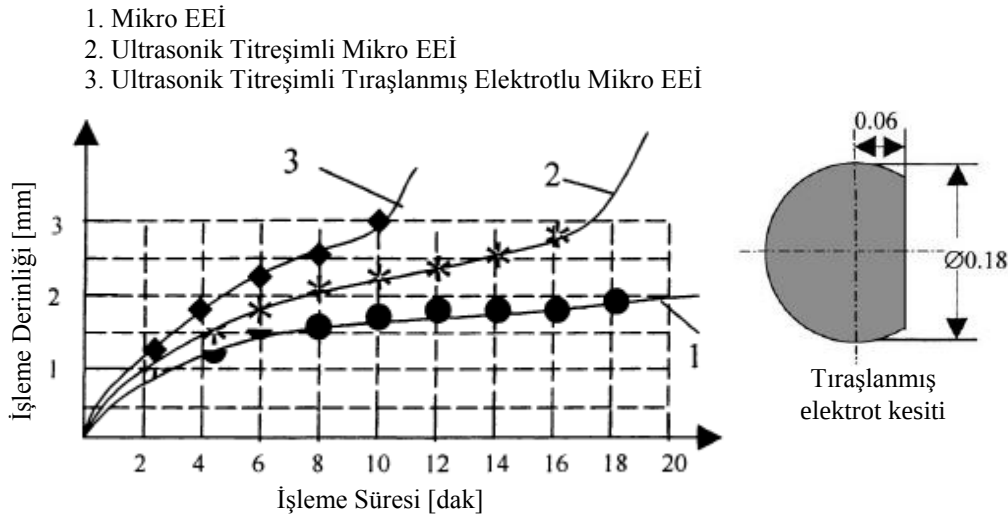
MEEİ ile delme işleminde elektrot aşınmasının hesaplanabilmesi amacı ile basit bir metodun ortaya koyulduğu bir çalışmada üç farklı işparçası malzemesi için mikro boyutlardaki dolu ve tüp elektrotlar ile işleme deneyleri yapılmıştır [38]. Farklı işparçası malzemeleri için delik delmede dikkat edilmesi gereken parametreler ayrı ayrı belirtilmiştir.

Bakır elektrodun ultrasonik titreştirildiği sementit wolfram karbür (WC-Co) malzemenin işlenmesi deneylerinde uygulanan titreşimler (25 kHz frekans, maksimum 5 μ m) düşük akım ve düşük vurum süresi değerlerinde İİH değerlerini belirgin arttırmıştır (Şekil 3). Vurum süresi ve akımın artışına karşılık UTE ile yapılan işlemelerde de genel olarak daha yüksek İİH, EAH ve R_a değerleri elde edilmiştir. Ultrasonik elektrot titreşimlerinin boşalım boşluğu boyunca basınç değişimi oluşturduğu, yoğun mikro jetlerin ve şok dalgalarının oluşumunu sağladığı, kavitasyon gaz kabarcıkları ürettiği ve sonucunda daha iyi dielektrik uygulaması sağladığı ve daha iyi dielektrik iyonizasyonu oluşturduğu belirtilmiştir. Ultrasonik titreşimlerin işleme hızına olumlu etkisi ise daha iyi dielektrik uygulanabilmesi, iyonizasyon kolaylığı, boşalım sonrası hızlı basınç azalması ve oluşan kavitasyon sonucu işparçası malzemesi aşınması ile açıklanabilir. UTE-EEİ belirgin olarak ark, kısa devre ve açık devre vurum oluşumunu, ateşleme gecikme zamanını azaltmış ve bunlara bağlı olarak normal vurum sayısını ve ortalama boşalım enerjisini arttırmıştır. Ultrasonik titreşimler bitirme koşullarında İİH açısından daha etkili olmuştur [39].



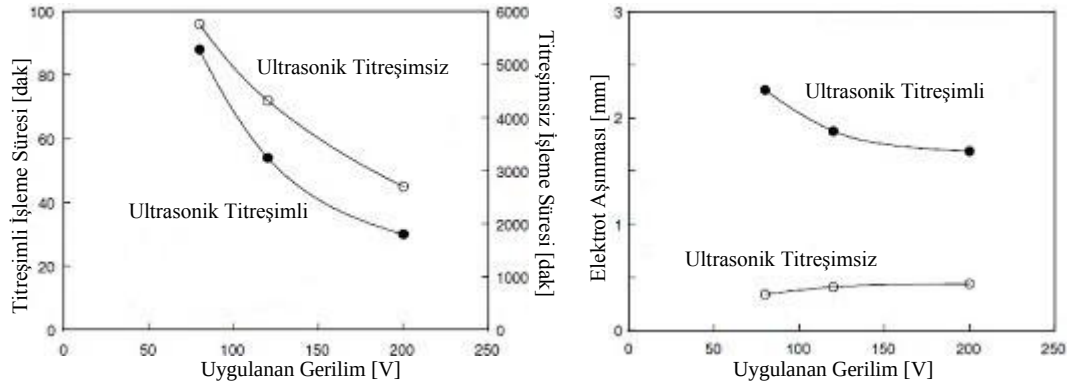
Şekil 3. UTE-EEİ'nin İİH ve EAH üzerindeki etkisi [39]

Bir tarafı boydan tıraşlanmış silindirik elektrot ve tam silindirik elektrotlar kullanılarak UTE-MEEİ tekniği ile titanyum alaşımı işparçasına delikler delinmiştir [40]. Titreşimin (20 kHz frekans, 2 mikrometre genlik) uygulandığı her iki elektrot tipi, MEEİ işlemine göre daha iyi işleme hızı vermiştir (Şekil 4). MEEİ işleminde elektrot yan yüzeyi ile işparçasının iç yan duvarı arasında kalan işleme boşluğunun çok küçük olması (4-10 µm) işleme atıklarının uzaklaştırılmasını olumsuz etkilemektedir. Tıraşlanmış titreşimli elektrodta tıraşlanmış tarafta işleme atıklarının daha kolay çıkmasını sağlayacak bir kanal oluşturulmuş ve bunun neticesinde iyi işleme hızı ve geometrik tamlık elde edilmiştir.



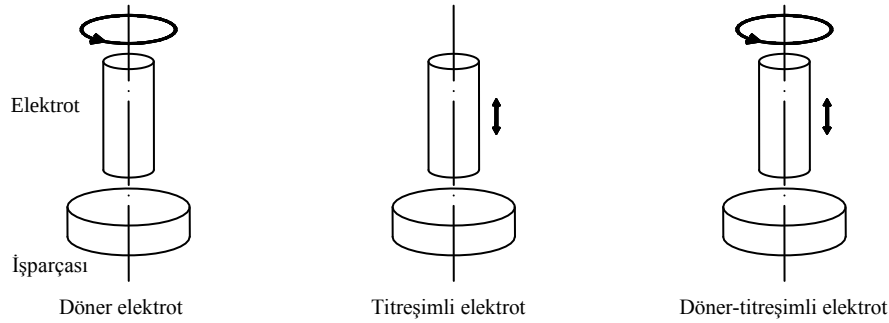
Şekil 4. UTE-MEEİ'nin İİH üzerindeki etkisi [40]

MEEİ işleminde wolfram elektroda uygulanan 40 kHz frekanstaki ultrasonik titreşimlerin delme işlemindeki etkisinin araştırıldığı bir başka çalışmada ultrasonik titreşimlerin işleme hızını 60 kat, elektrot aşınmasını ise birkaç kat artırdığı tespit edilmiştir (Şekil 5). Titreşim genliğinin belirli bir değere kadar olan artışı işleme hızını artırırken elektrot aşınmasını da azaltmıştır. Sonuçlar, uygulanan titreşim ile boşalım atıklarının kinetik enerjisinin arttığı, bunun da atıkların daha kolay uzaklaştırılmasını sağladığı yönünde yorumlanmıştır. Sonuç olarak elektroda uygulanan titreşimler ile kısa devre oluşumunun, karbon birikmesinin, işleme zamanının ve elektrot aşınmasının azaldığı tespit edilmiştir. Ultrasonik titreşimlerin devreye alınması ile yıkama etkisinin tekrar kazanılabildiği veya etkisinin artırılabilirdiği ifade edilmiştir [41].



Şekil 5. UTE-MEEİ'nin işleme süresi ve elektrot aşınmasına etkisi [41]

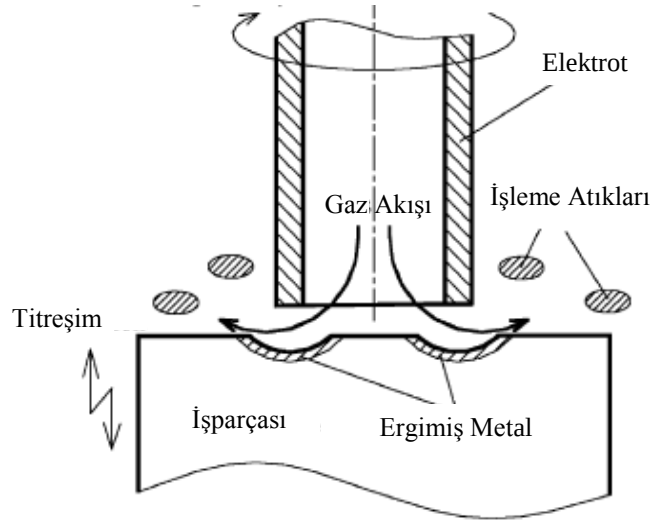
Ultrasonik titreşimli, döner ve iki durumun birlikte kullanıldığı elektrotlar ile yapılan işleme koşullarında (Şekil 6) yüksek frekanstaki ultrasonik titreşimlerin (19900 Hz frekans, 4-12 μ m genlik), bitirme işleminde (2A, 4 μ s vurum süresi) İİH üzerinde olumlu bir etki oluşturduğu gözlenmiştir. Düşük frekanstaki titreşimlerin (50 Hz) ve dönme hareketinin bir arada kullanılmasının işlemede tatmin edici bir etki yaratmadığı anlaşılmıştır. Yüksek frekans ve yüksek genlik değerine sahip titreşimlerin uygulandığı deneylerde en iyi İİH değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte ultrasonik titreşimin, dönmenin ve her iki durumun bir arada kullanılmasının İİH, EAH ve R_a değerlerinde artışa sebep olduğu tespit edilmiştir [42].



Şekil 6. Döner elektrot, titreşimli elektrot, döner-titreşimli elektrot [42]

Ultrasonik frekansta titreştirilen elektrodun ön yüzeyinde oluşturulan pompalama hareketi etkisi ile işleme atıklarının işleme ortamından daha iyi uzaklaştırıldığı ve işleme ortamındaki dielektriğin sirkülasyonunun daha kolay sağlandığı bunun da İİH üzerinde olumlu etki yarattığı, bu olumlu etkinin özellikle bitirme işlemindeki gibi dar işleme boşluğu olan koşullarda daha etkili olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, işleme boşluğundaki büyük basınç değişimlerinin daha etkili boşalımlara neden olduğu ve böylece ergimiş metalin her bir kraterden daha fazla atılmasını sağladığı, ısı etkilenmiş tabaka kalınlığının azaldığı, daha küçük ve az sayıda mikro çatlakın gözlemlendiği belirtilmiştir [42-44].

Hidrokarbon esaslı dielektrik sıvı ortamın oluşturduğu kirliliği azaltmak amacı ile dielektrik sıvı yerine boru tipi elektrot içinden üflenen yüksek hızdaki gaz ortam kullanılmıştır [19]. Bu yeni yöntem, düşük işleme hızı ve işleme kararsızlığı gibi dezavantajlara sahip olsa da işleme prensibi açısından dikkat çekmiştir. Bu yöntemin dezavantajlarını giderebilmek amacı ile içerisinden yüksek hızda gaz üflenen ince cidarlı boru tipi bakır elektrot ile çelik işparçasına uygulanan ultrasonik titreşimlerin kombinasyonunun oluşturduğu ultrasonik işparçası titreşimli EEİ (UİT-EEİ) işleme mekanizması (Şekil 7) ile bazı deneyler yapılmıştır [45].



Şekil 7. Gaz ortamda UİT-EEİ [45]

Gaz ortam ile işlemede işleme aralığının 0,01 mm gibi çok küçük bir değere sahip olmasının kısa devre oluşumlarını da beraberinde getirdiğini düşünen bazı araştırmacılar elektrot dönme hareketini de çalışmalarında uygulamışlardır. Yüksek hızdaki gazın ergimiş ve buharlaşmış malzemeyi ortamdaki uzaklaştırdığı ve bu malzemelerin soğuyarak katılaşmalarını hızlandırmak sureti ile elektrot yüzeyine yapışmaları önlediği, yüksek hızdaki gazın bir önceki boşalım neticesinde elektrot ve işparçası yüzeyindeki boşalım noktalarında ısı transferi ile oluşan sıcaklığı azaltarak işleme boşluğunun deiyonizasyonunu sağladığı belirtilmiştir. Uygulanan titreşim genliğindeki artışın ergimiş işparçası malzemesinin yüzeye yapışmaksızın uzaklaştırılabilmesini kolaylaştırdığı ve buna bağlı olarak $\bar{I}H$ değerini arttırdığı bildirilmiştir. Genlik değerinin değişimi ile yüzey pürüzlülüğünde belirgin bir değişim elde edilmemiştir [45]. Bu çalışmanın devamı niteliğindeki diğer bir çalışmada ise işleme parametrelerinin birkaç değerindeki değişiklik ile yapılan deneylerin yanı sıra aşağıdaki kabuller ile işparçası işleme hızını işleme öncesinde belirlemek amacı ile teorik bir model geliştirilmiş ve elde edilen deneysel sonuçlar ile bu model karşılaştırılmıştır [63]. Teorik modelde;

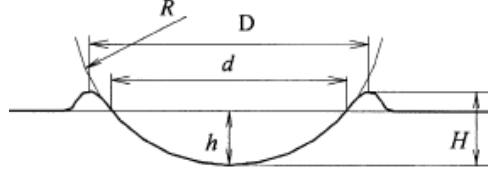
- i) her bir vurdumda bir kıvılcımın oluştuğu,
 - ii) ultrasonik işparçası titreşimi ile yapılan EEİ işleminde oluşan kraterlerin R yarıçapında bir kürenin tac kısmı şeklinde olduğu,
 - iii) boşalım gecikme süresinin (t_i) boşalım süresi (t_d) ile kıyaslandığında çok kısa ve sabit bir değere sahip olduğu,
 - iv) etkin boşalım gerilim dalga formlarının hepsinin aynı olduğu,
- şeklinde kabuller yapılarak Eşitlik 1 elde edilmiştir.

$$\bar{I}H = \frac{\eta_1 \cdot V_d \cdot i_d \cdot t_s}{t_s + t_p} \quad (1)$$

Burada η_1 orantısal sabit, V_d boşalım gerilimi, i_d boşalım akımı, t_s vurdum süresi ve t_p bekleme süresi olarak belirtilmiştir. Deneyler neticesinde gaz ortamda UİT-EEİ'nin titreşimsiz duruma ve klasik EEİ işlemine göre daha yüksek $\bar{I}H$ değerleri verdiği ve açık devre voltajı, vurdum süresi, titreşim genliği, boşalım akımı değerlerindeki artış ile elektrot et kalınlığındaki azalma ile $\bar{I}H$ değerinin arttığı tespit edilmiştir [46]. Yine gaz ortamda UİT-EEİ ile ilgili çalışmaların [45, 46] devamı olan diğer bir çalışmada ise [64], deneysel çalışmalara ek olarak Eşitlik 1 ile verilmiş olan ifade, Şekil 8'deki geometrik model için yapılan kabuller sonucunda düzenlenerek bir kıvılcım ile oluşan kraterin yüksekliğini veren teorik bir model elde edilmiştir (Eşitlik 2). Deneyler

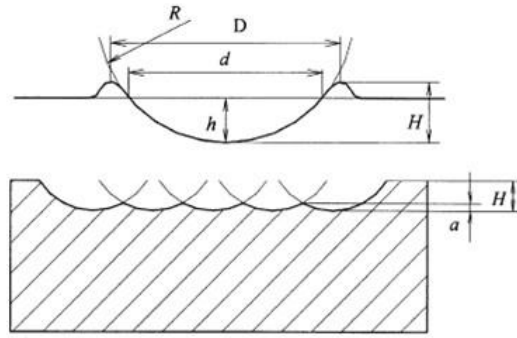
neticesinde elde edilen sonuçlara göre açık devre voltajı, vurum süresi ve boşalım akımı artışı teorik modelde de ifade edildiği gibi yüzey pürüzlülüğü değerlerini arttırmıştır [47].

$$H = \left[\frac{\eta_1 \cdot V_d \cdot i_d \cdot t_s}{6,24 \pi} \right]^{1/3} \quad (2)$$



Şekil 8. Bir boşalım ile oluşan krater kesit görünüşü [47]

Bahsedilen çalışmalar [45-47] ile elde edilen teorik modelin bir sonraki aşamasında [48], çakışık kraterlerle oluşan yüzey profilinin Şekil 9'da gösterildiği gibi temsil edilebileceği, önceki teorik modelin (Şekil 8) ifade ettiği kraterin gerçek yüksekliğinin a ile tanımlanabileceği ve yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmekte kullanılabileceği belirtilmiştir (Eşitlik 3).

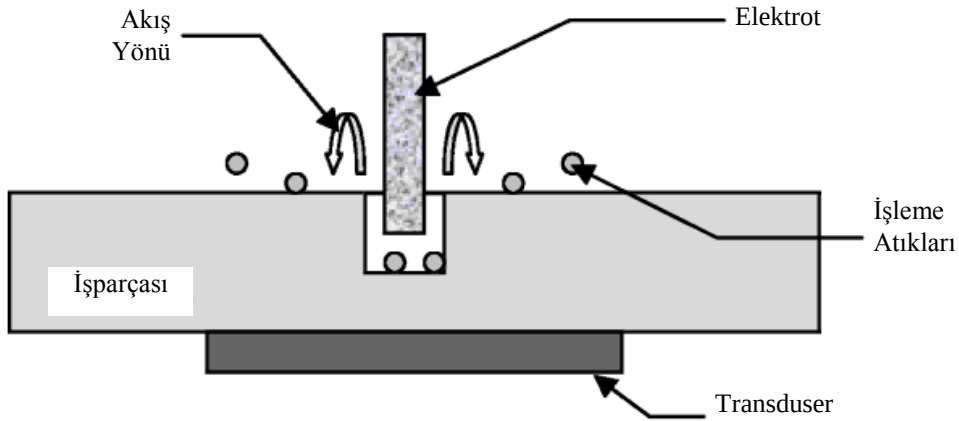


Şekil 9. Gaz ortamda UİT-EEİ'de yüzey pürüzlülüğü oluşumu [48]

$$R_a = \xi_1 (V_d \cdot i_d \cdot t_s)^{1/3} \quad (3)$$

Deneyler neticesinde artan genlik değerinin işleme hızını arttırdığı ve bu artışın titreşimsiz gaz ortamdaki EEİ ile kıyaslandığında neredeyse iki kat olduğu tespit edilmiştir [48].

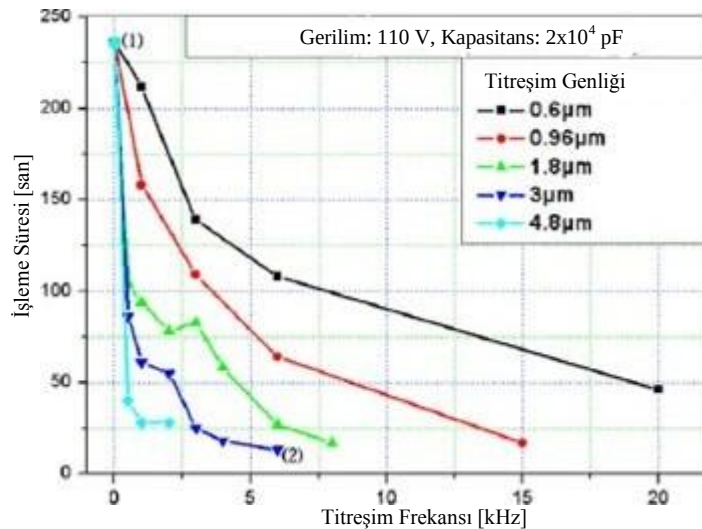
İşparçasına uygulanan ultrasonik titreşimler ile yüksek yoğunluktaki dalgaların dielektrik sıvı içindeki yayılımını konu alan bir çalışmada, ultrasonik dalgaların hareketi ile kavitasyon ve akustik akıntı gibi önemli etkilerin MEEİ işleminde uygulanabilirliği incelenmiştir. Buradaki amaç ultrasonik titreşimlerin uygulanması ile birlikte ultrasonik akış akıntısı doğrultusunda işleme atıklarının hareket etmesidir (Şekil 10). Bu durum akustik akıntının tank içinde oluşması veya uygulanması ile gerçekleştirilebilir [31].



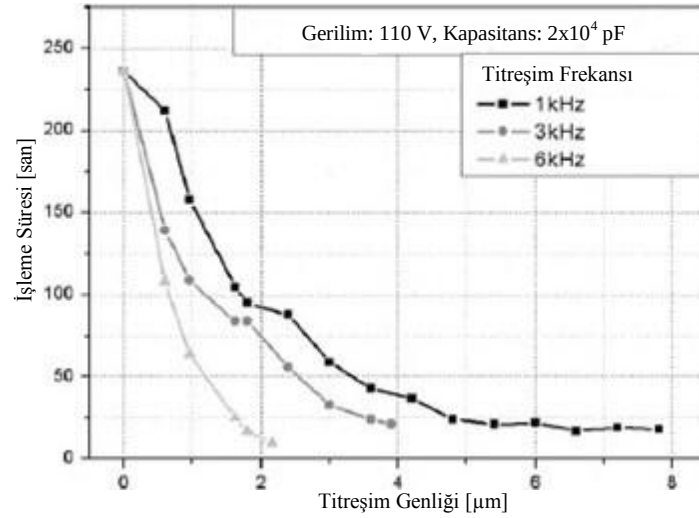
Şekil 10. UİT-MEEİ'de işleme atıklarının uzaklaştırılması [31]

Deneylerde 100 μm çapındaki tungsten elektrot ile 2 mm kalınlığındaki paslanmaz çelik malzemeye 500 μm derinlikte delik delinmiştir. Yapılan deneyler MEEİ işleminin ultrasonik titreşimler ile daha kararlı hale geldiğini, işleme atıklarının uzaklaştırılma hızının artışı ile yüzey pürüzlülüğünün önemli derecede iyileştiğini, ark oluşum sıklığının azaldığını ve daha az çukurlaşmanın olduğunu göstermiştir. 50,5 ile 53,2 kHz aralığında uygulanan ultrasonik titreşimler ile aynı işleme koşullarındaki titreşimsiz deneyde elde edilen 394,22 nm değerindeki ortalama yüzey pürüzlülüğü değerine göre %9 daha iyi değerler elde edilmiştir [31].

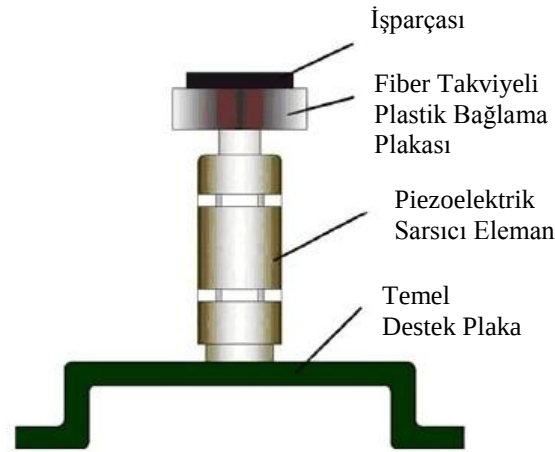
20 kHz frekans ve 8 μm genlik değerine sahip titreşimlerin iş parçasına uygulanması (UİT-MEEİ) ile ilgili deneylerde titreşim frekansındaki artışa karşılık gelen tüm genlik değerlerinde işleme süresinin azaldığı gözlenmiştir (Şekil 11). Yüksek frekanstaki titreşimler etkili boşalım sayısını arttırmıştır. Titreşimler sayesinde artan etkili boşalımın sayısı da kıvılcım patlama kuvvetini arttırmış, dolayısı ile EEİ sırasında bu kuvvetin etki ettiği dielektrik sıvı sirkülasyonunu ve işleme atıklarının uzaklaştırılmasını hızlandırmıştır. Titreşim genliğinin ortalama işleme aralığı mesafesine kadar olan artışı işleme süresini azaltmıştır (Şekil 12). Ancak, bu değerden sonraki artışlar işleme süresinde önemsiz değişimlere neden olmuştur. Bu durum ise işleme boşluğu değerinden fazla olan titreşim genliği uygulamalarında servo kontrolün açık devre oluşumunu engelleyememesi ile açıklanmıştır [49].



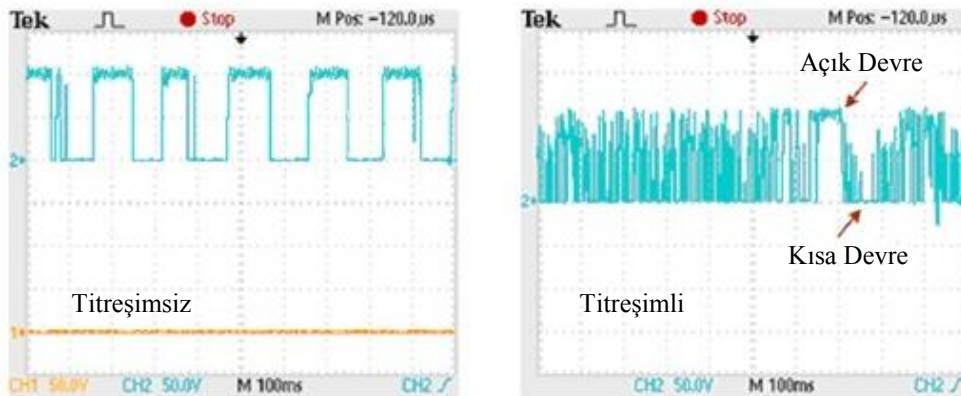
Şekil 11. UİT-MEEİ'de titreşim frekansının işleme süresine etkisi [49]



Şekil 12. UİT-MEEİ'de titreşim genliğinin işleme süresine etkisi [49]

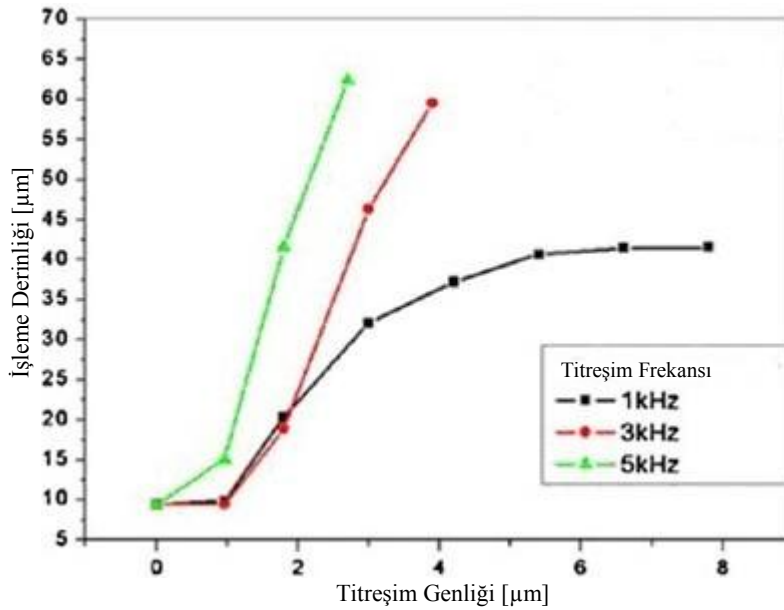


Şekil 13. UİT-MEEİ'de uygulanan bir deney sistemi [49]



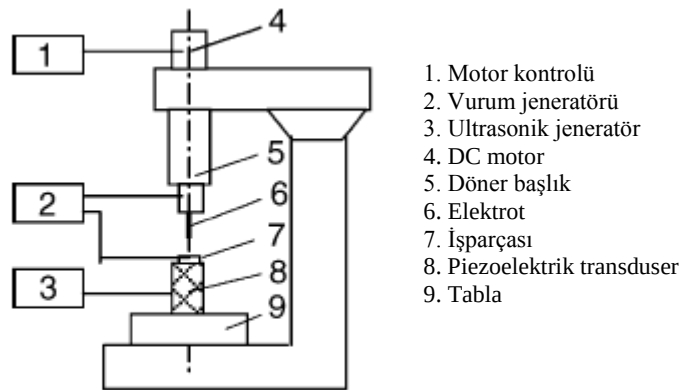
Şekil 14. MEEİ ve UİT-MEEİ'de oluşan vurum zincirleri [49]

Üç boyutlu mikro deliklerin işleme performansını arttırmak için işparçasına uygulanan farklı frekanstaki titreşimler ile farklı geometride wolfram elektrot ve bakır işparçası çiftleri işleme deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler neticesinde artan titreşim genliği ve frekansı ile işleme derinliğinin arttığı (Şekil 15) ve frekansın işlemede en önemli parametre olduğu belirtilmiştir [50].



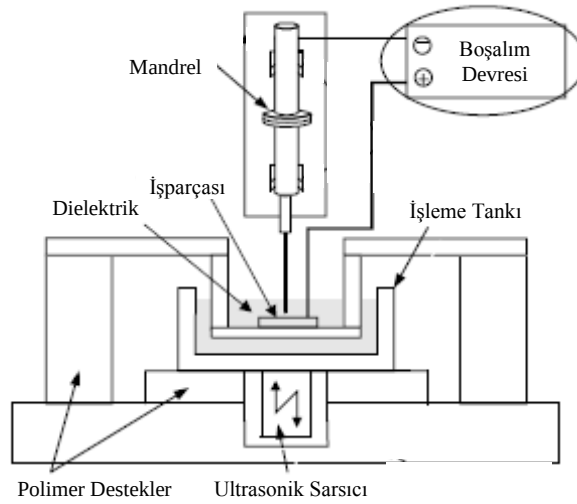
Şekil 15. UİT-MEEİ'de titreşim genliğinin işleme derinliğine etkisi [50]

Diğer bir çalışmada, 20 kHz frekans ve 1 µm'den küçük genliğe sahip ultrasonik titreşimlerin 0,2-1 mm kalınlıktaki paslanmaz çelik ve bakır işparçasına uygulanmasında 43 µm çapında tungsten elektrot kullanılmıştır (Şekil 16). İİH'nin belirlenmesinde işleme derinliğinin işleme süresine oranı kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, işleme parametrelerine bağlı olarak UİT-MEEİ ile elde edilen İİH değerlerinin MEEİ ile elde edilen değerlerin 4 ile 8 katı olduğunu göstermiştir. Her iki işleme tekniğinde de artan işparçası kalınlığı işleme hızını azaltmıştır [32].

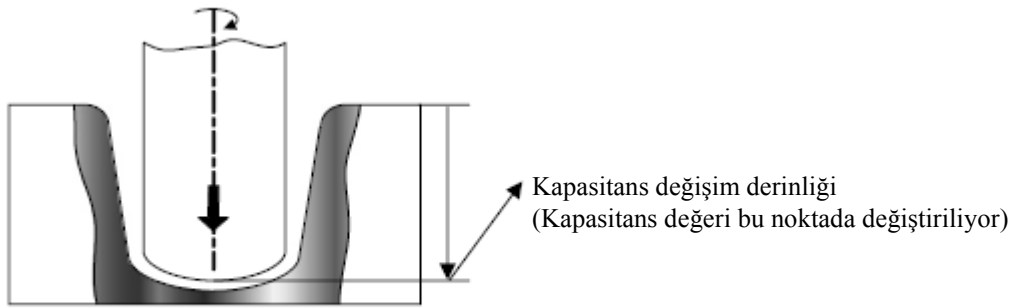


Şekil 16. UİT-MEEİ deney düzeneği [32]

EEİ ile işlenmiş silindirik deliklerde oluşan konikliğe elektrot dalma derinliğinin, kullanılan boşalım kapasitansın ve işleme zamanının etkileri ön deneyler ile incelenmiştir. Elde edilen veriler esas alınarak konikliği ve ikincil boşalımları azaltmak amacı ile sadece işleme tankına uygulanan ultrasonik titreşimlerin (Şekil 17) yanı sıra işleme sırasında deliğin çıkış noktasına yakın derinliklerde (Şekil 18) kapasitans değeri değiştirilerek deneyler yapılmıştır [30].

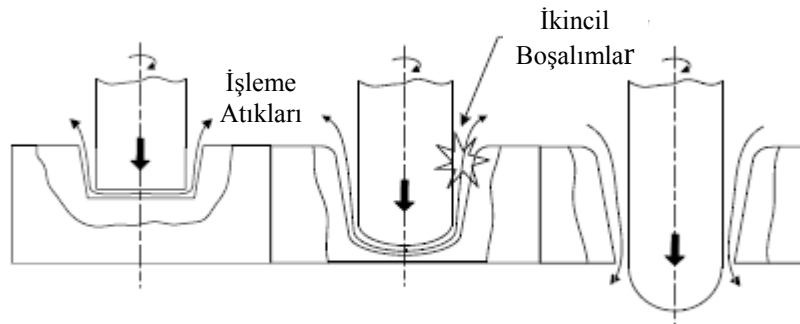


Şekil 17. Dielektrik sıvının ultrasonik titreşimi ile MEEİ [30]



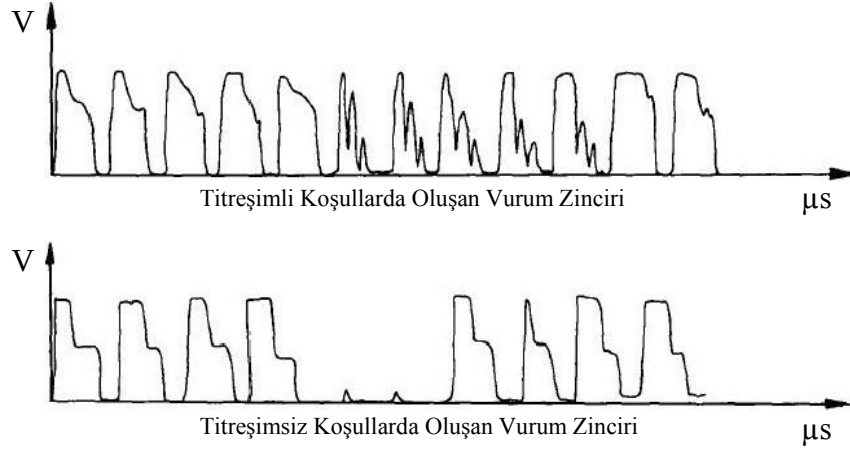
Şekil 18. Kapasitans değişim derinliği [30]

İşparçası ve elektrot besleme mekanizması üzerindeki titreşim etkisini en aza indirmek amacı ile işleme tankı polimer takozlar ile desteklenmiştir. 500 μm kalınlıktaki AISI 304 paslanmaz çelik işparçasına 95 μm çapında mikro elektrot kullanılarak giriş ve çıkış delik çapları arasındaki farkın 16 μm olduğu delikler delinmiştir. Aşınmış partiküllerin neden olduğu ikincil boşalım işleme süresi ilerledikçe delik giriş çapını genişletmiştir (Şekil 19). Kapasitans değerinin farklı işleme derinliklerindeki değişimi delik giriş ve çıkış çap farklarını azaltmış olmasına rağmen fark değeri 8 μm altına düşmemiştir. Delikteki konikliği büyük ölçüde arttırdığı bilinen ikincil boşalımların oluşumunu azaltmak için işleme süresi kısa tutulmuştur. Ultrasonik frekanstaki titreşimlerin uygulanması ile delik giriş çapı azaldığı için her koşulda çap farkı azalmış fakat bu fark 8 μm altına düşmemiştir. Kapasitans değişimi ve ultrasonik titreşimlerin birlikte kullanılması ile oluşan çap farkı 1 μm 'ye kadar düşürülmüştür [30].



Şekil 19. EEİ'de oluşan ikincil boşalımlar ve elektrot aşınması [30]

İşparçasına (yüksek karbonlu çelik) 22 kHz frekans ve 3 μm genlikte ultrasonik titreşim uygulandığı bakır elektrot ile gazyağı dielektrik kullanılan deneysel çalışmada işleme sırasında oluşan vurum zincir profilleri kısa süreli zaman dilimleri halinde gelişigüzel kaydedilmiştir (Şekil 20). Ultrasonik titreşimin aktif vurumların boşalım gecikmesinde ve ortalama vurum enerjilerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, kıvılcım oluşumu verimini ve ortalama vurum enerjisini iyileştirmek yoluyla aktif olmayan vurumları önemli derecede azalttığı gözlemlenmiştir [51].



Şekil 20. MEEİ ve UİT-MEEİ'de oluşan vurum zincirleri [51]

Gazyağı dielektrik, bakır elektrot, 22 kHz frekans ve 3 μm genlik değerinde ultrasonik titreşimler kullanılarak yapılan deneysel çalışmada işleme esnasında oluşan işleme atıkları boyutsal ve geometrik olarak optik ve elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Bütün partiküllerin yumru ile küresel şekiller arasında bariz olarak eliptik bir geometriye sahip oldukları, ultrasonik titreşimlerin küreselleşmeyi arttırdığı, partiküllerin çoğunluğunun içi dolu katı partiküller olduğu tespit edilmiştir. İşleme akımı ve vurum sürelerindeki artışın partikül boyutunu arttırdığı bunun nedeninin artan enerji ve uygulama süresinin artışı ile daha büyük krater oluşumu ile açıklanabileceği belirtilmiştir. Ultrasonik titreşimlerin partikül boyutunda belirgin bir etkisi gözlemlenmemiştir [52].

200 μm çaptaki tungsten elektrot ile takım çeliği işparçasının işlendiği deneylerde işparçasına uygulanan ultrasonik titreşimlerin (40 kHz frekans, maksimum 10 μm genlik) etkisi ve işleme parametrelerinin İİH ve EAH değerleri açısından optimizasyonu araştırılmıştır [53]. Ultrasonik titreşimler neticesinde oluşan kavitasyonun malzemeyi işlemede önemli bir etki olduğu, işleme ortamının titreşim etkisi ile pompalanması sonucu daha iyi sirküle edilmesinin ark oluşumlarını azalttığı ve MEEİ performansını arttırmasının ise uygulanan titreşimlerin işleme koşullarını iyileştirmesi sureti ile sağladığı belirtilmiştir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Literatür araştırması bütün çalışmaların işleme performans çıktılarının (işparçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, bağıl aşınma ve işparçası yüzey pürüzlülüğü) iyileştirilmesini hedeflediğini göstermektedir.

EEİ'de, işlemin kararlılığının ve performans çıktılarının işleme boşluğundaki işleme atıklarının ortamdaki uzaklaştırılması ile doğrudan ilişkili olduğu literatür araştırmasından çıkan diğer bir sonuçtur.

Özellikle işleme derinliğinin ve işparçasında oluşturulacak geometrinin karmaşıklığının artması işleme boşluğundaki dielektrik sıvının sirkülasyonunu ve bu sıvı içerisindeki aşınmış partiküllerin işleme boşluğundan uzaklaştırılmasını zorlaştırmaktadır.

Uygulanan dielektrik sıvı, işparçası malzemesinin elektriksel boşalımlar nedeni ile ergitilmesini takiben işleme atıklarını işleme ortamından uzaklaştırması yanında krater içindeki ergimiş işparçası malzemesinin bir kısmının da işparçası yüzeyinde tekrar katılaşmasına neden olmaktadır. Ergimiş işparçası malzemesinin tekrar katılaşması işleme hızı açısından EEİ tekniğinin doğasında bulunan bir olumsuzluktur.

EEİ tekniğindeki bu problemleri en aza indirmek ve işleme performansını arttırabilmek amacı ile işleme parametreleri ile ilgili yapılmış çalışmaların yanı sıra elektrot, işparçası ve dielektrik ortam elemanlarına kazandırılan dinamik hareketler ile yapılan deneysel çalışmalar da incelenmiştir. Elektrodun döndürülmesi, elektrodun, işparçasının ve dielektrik ortamın ultrasonik frekanslarda titreştirilmesi gibi hareket uygulamaları işleme performans ıktıları üzerinde olumlu etkiler sağlamıştır.

Ancak, bu olumlu gelişmelerin hemen hepsinin ya mikro EEİ (MEEİ) tekniğinde ya da silindirik deliklerin klasik EEİ tekniği ile işlemesinde uygulanan sınırlı çalışmalar olduğu anlaşılmıştır. Kalıp retiminde yaygın olarak tercih edilen dalma EEİ tekniği göz önüne alındığında kullanılan karmaşık şekilli elektrotlar ile yapılan işlemelerde bu uygulamaların ve sonuçların ne ölçüde geçerli olabileceği bilinmemektedir.

MEEİ’de özellikle elektrodun çok ince olduğu durumlarda dönen elektroda uygulanan büyük genlikli titreşimlerin işleme hassasiyetini yok ettiği ve derin mikro deliklerin elde edilmesinin çok zor olduğu bilinmektedir. Bunun yanı sıra elektrot titreşiminin uygulanabilirliğinin elektrot tasarımınnın transduser ve takım konisine bağlı olarak yapılması gibi bir zorunluluğu da beraberinde getirmesi nedeniyle bu sistemlerin pratik uygulanabilirliği sınırlıdır.

Elektroda uygulanan titreşimler yerine işparçasına titreşim uygulamanın en büyük avantajı ise; transduser, transduser konisi ve takım konisi içermeyen sistemin daha serbest takım tasarımına müsaade etmesidir.

İşparçasına uygulanacak titreşimler ile ilgili yapılacak çalışmaların işleme performansının arttırılması yönünde faydalı olacağı yapılan ön araştırmalardan anlaşılmaktadır. İşparçası titreşiminin EEİ performans ıktıları üzerindeki etkilerinin araştırıldığı çok az sayıda ve sınırlı parametreler ile yapılmış olan deneysel çalışmalar bütünlük taşımaktan oldukça uzaktadır.

4. KAYNAKLAR

1. Pandey, P.C., Shan, H.S., 1980, “Modern Machining Processes”, Tata McGraw Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 84-114.
2. McGeough, J.A., 1988, “Advanced Methods of Machining”, Chapman and Hall, London New York, 128-147.
3. Springborn, R.K., 1967, “Non-Traditional Machining Processes”, American Society of Tool and Manufacturing Engineers, Dearborn Michigan, 105-133

4. Her, M.-G., Weng, F.-T., 2001, "Micro-hole machining of copper using the electro-discharge machining process with a tungsten carbide electrode compared with a copper electrode", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 17 (10): 715-719.
5. Mohri, N., Saito, N., Suzuki, M., Takawashi, T., 1988, "Surface modification by EDM-an innovation in EDM with semi-conductive electrodes", The American Society of Mechanical Engineers, Research and Technological Developments in Nontraditional Machining, 34: 21-30.
6. Mohri, N., Saito, N., Tsunekawa, Y., 1993, "Metal surface modification by electrical discharge machining with composite electrode", Annals of the CIRP, 42 (1): 219-222.
7. Saito, K., Kishinami, T., Konno, H., Sato, M., 1986, "Development of numerical contouring control electric discharge machining (NCC-EDM)", Annals of the CIRP, 35 (1): 117-120.
8. Chen, S.L., Yan, B.H., Huang, F.Y., 1999, "Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V", Journal of Materials Processing Technology, 87 (1-3): 107-111.
9. Bayramoğlu, M., 1995, "Dalma elektro erozyon tezgahları ve nümerik kontrol", Makina ve Metal Teknolojisi, 45: 157-160.
10. Masuzawa, T., Heuvelman, C.J., 1983, "A self flushing method with spark erosion machining", Annals of the CIRP, 32 (1): 109-111.
11. Bayramoğlu, M., 1995, "Elektro erozyon tezgahlarında işlenen parçaların yüzey kalitesi", 6. Denizli Malzeme Sempozyumu 320-326, Denizli.
12. Kruth, J.-P., Stevens, L., Froyen, L., Lauwers, B., 1995, "Study of the white layer of a surface machined by die-sinking electro-discharge machining", Annals of the CIRP, 44 (1): 169-172.
13. Çoğun, C., 1990, "Keeping electric discharge machining under control", Machine Design, 62 (8): 105-108.
14. Schumacher, B. M., 1990, "About the role of debris in the gap during electrical discharge machining", Annals of the CIRP, 39 (1): 197-199.
15. Özgedik, A., Çoğun, C., 2006, An experimental investigation of tool wear in electric discharge machining, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 27 (5-6): 488-500.
16. Mohan, B., Rajadurai, A., Satyanarayana, K.G., 2002, "Effect of SiC and rotation of electrode on electric discharge machining of Al-SiC composite", Journal of Materials Processing Technology, 124 (3): 297-304.
17. Yu, Z., Jun, T., Masanori, K., 2004, "Dry electrical discharge machining of cemented carbide", Journal of Materials Processing Technology, 149 (1-3): 353-357.
18. Guu, Y.H., Hocheng, H., 2001, "Effects of workpiece rotation on machinability during electrical-discharge machining", Materials and Manufacturing Processes, 16 (1): 91-101.

19. Kunieda, M., Yoshida, M., Taniguchi, N., 1997, "Electrical discharge machining in gas", *Annals of the CIRP*, 46 (1): 143-146.
20. Yan, B.H., Wang, C.C., Chow, H.M., Lin, Y.C., 2000, "Feasibility study of rotary electrical discharge machining with ball burnishing for $Al_2O_3/6061Al$ composite", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40 (10): 1403-1421.
21. Çoğun, C., Özerkan, B., Karaçay, T., 2006, "An experimental investigation on the effect of powder mixed dielectric on machining performance in electric discharge machining", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220 (7): 1035-1050.
22. Gillot, F., Mognol, P., Furet, B., 2005, "Dimensional accuracy studies of copper shells used for electro-discharge machining electrodes made with rapid prototyping and the electroforming process", *Journal of Materials Processing Technology*, 159 (1): 33-39.
23. Monzon, M., Benitez, A.N., Marrero, M.D., Hernandez, N., Hernandez, P., Aisa, J., 2008, "Validation of electrical discharge machining electrodes made with rapid tooling technologies", *Journal of Materials Processing Technology*, 196 (1-3): 109-114.
24. Han, F., Wang, Y., Zhou, M., 2009, "High-speed EDM milling with moving electric arcs", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49 (1): 20-24.
25. Yan, B.H., Wang, C.C., 1999, "The machining characteristics of $Al_2O_3/6061Al$ composite using rotary electro-discharge machining with a tube electrode", *Journal of Materials Processing Technology*, 95 (1-3): 222-231.
26. Küçüktürk, G., 2008, "Elektro erozyon ile iletken olmayan seramiklerin işlenmesi için yöntem geliştirilmesi", *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
27. Samuel, M.P., Philip, P.K., 1997, "Power metallurgy tool electrodes for electrical discharge machining", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37 (11): 1625-1633.
28. Tzeng, Y.-F., Lee, C.-Y., 2001, "Effects of powder characteristics on electro discharge machining efficiency", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17 (8): 586-592.
29. Ishida, T., Takeuchi, Y., 2002, "L-Shaped curved hole creation by means of electrical discharge machining and an electrode curved motion generator", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19 (4): 260-265.
30. Kim, D.J., Yi, S.M., Lee, Y.S., Chu, C.N., 2006, "Straight hole micro EDM with a cylindrical tool using a variable capacitance method accompanied by ultrasonic vibration", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16 (5): 1092-1097.
31. Yeo, S.H., Goh, K.M., 2001, "The effect of ultrasound in micro electro discharge machining on surface roughness", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 215 (2): 271-276.
32. Changshui Gao, C., Liu, Z., 2003, "A study of ultrasonically aided micro-electrical-discharge machining by the application of workpiece vibration", *Journal of Materials Processing Technology*, 139 (1-3): 226-228.

33. Yu, Z., Rajurkar, K.P., 2005, "Study of dielectric flow in micro hole drilling by EDM", Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME, 33: 81-88.
34. Zhixin, J., Jianhua, Z., Xing, A., 1997, "Study on a new kind of combined machining technology of ultrasonic machining and electrical discharge machining", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 37 (2): 193-199.
35. Zhixin, J., Jianhua, Z., Xing, A., 1995, "Ultrasonic vibration pulse electro-discharge machining of holes in engineering ceramics", Journal of Materials Processing Technology, 53 (3-4): 811-816.
36. Zhixin, J., Xing, A., Jianhua, Z., Zhaoliang, A., 1995, "Combined machining of USM and EDM for advanced ceramics", Journal of Advanced Materials, 26 (3): 16-20.
37. Thoe, T.B., Aspinwall, D.K., Killey, N., 1999, "Combined ultrasonic and electrical discharge machining of ceramic coated nickel alloy", Journal of Materials Processing Technology, 92-93: 323-328.
38. Pham, D.T., Ivanov, A., Bigot, S., Popov, K., Dimov, S., 2007, "An investigation of tube and rod electrode wear in micro EDM drilling", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33 (1-2): 103-109.
39. Abdullah, A., Shabgard, M.R., 2008, "Effect of ultrasonic vibration of tool on electrical discharge machining of cemented tungsten carbide (WC-Co)", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 38 (11-12): 1137-1147.
40. Wansheng, Z., Zhenlong, W., Shichun, D., Guanxin, C., Hongyu, W., 2002, "Ultrasonic and electric discharge machining to deep and small hole on titanium alloy", Journal of Materials Processing Technology, 120 (1-3): 101-106.
41. Huang, H., Zhang, H., Zhou, L., Zheng, H.Y., 2003, "Ultrasonic vibration assisted electro-discharge machining of microholes in Nitinol", Journal of Micromechanics and Microengineering, 13 (5): 693-700.
42. Ghoreishi, M., Atkinson, J., 2002, "A comparative experimental study of machining characteristics in vibratory, rotary and vibro-rotary electro-discharge machining", Journal of Materials Processing Technology, 120 (1-3): 374-384.
43. Kremer, D., Lhiaubet, C., Moisan, A., 1991, "A study of the effect of synchronizing ultrasonic vibrations with pulses in EDM", Annals of the CIRP, 40 (1): 211-214.
44. Kremer, D., Lebrun, J.L., Hosari, B., Moisan, A., 1989, "Effects of ultrasonic vibrations on the performances in EDM", Annals of the CIRP, 38 (1): 199-202.
45. Zhang, Q. H., Zhang, J. H., Deng, J. X., Qin, Y., Niu, Z. W., 2002, "Ultrasonic vibration electrical discharge machining in gas", Journal of Materials Processing Technology, 129 (1-3): 135-138.
46. Zhang, Q.H., Zhang, J.H., Ren, S.F., Deng, J.X., Ai, X., 2004, "Study on technology of ultrasonic vibration aided electrical discharge machining in gas", Journal of Materials Processing Technology, 149 (1-3): 640-644.

47. Zhang, Q.H., Zhang, J.H., Ren, S.F., Niu, Z.W., Ai, X., 2005, "A theoretical model of surface roughness in ultrasonic vibration assisted electrical discharge machining in gas", *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 7 (2/3/4): 381-390.
48. Zhang, Q.H., Du, R., Zhang, J.H., Zhang, Q.B., 2006, "An investigation of ultrasonic-assisted electrical discharge machining in gas", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46 (12-13): 1582-1588.
49. Tong, H., Li, Y., Wang, Y., 2008, "Experimental research on vibration assisted EDM of micro-structures with non-circular cross-section", *Journal of Materials Processing Technology*, 208 (1-3): 289-298.
50. Hao, T., Yang, W., Yong, L., 2008, "Vibration-assisted servo scanning 3D micro EDM", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 18 (2): 1-8.
51. Murthy, V.S.R., Philip, P.K., 1987, "Pulse train analysis in ultrasonic assisted EDM", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 27 (4): 469-477.
52. Murti, V.S.R., Philip, P.K., 1987, "An analysis of the debris in ultrasonic-assisted electrical discharge machining", *Wear*, 117 (2): 241-250.
53. Sundaram, M.M., Pavalarajan, G.B., Rajurkar, K.P., 2008, "A study on process parameters of ultrasonic assisted micro EDM based on taguchi method", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17 (2): 210-215.