



Vaporizing foil actuator welding prototype manufacturing

Ganime Tuğba Önder^{1*}, Mustafa Kemal Külekcı²

¹Department of Electricity and Energy, Air Conditioning and Refrigeration Technology Program, Çukurova University, Adana Vocational School, 01160, Adana, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Tarsus University, 33400, Mersin, Türkiye

Highlights:

- Vaporizing foil actuator welding prototype design
- Vaporizing foil actuator source input parameters control
- Vaporizing foil actuator welding with DC capacitors

Keywords:

- Solid State Welding
- Vaporizing Foil Actuator Welding
- Prototype Design
- DC Capacitor

Article Info:

Research Article
Received: 06.07.2023
Accepted: 28.01.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1323654

Acknowledgement:

This study was supported within the scope of TÜBİTAK "1002-A Rapid Support Module" within the scope of the project numbered 222M455 and the project numbered INSTITU.21.001 of the Tarsus University Scientific Research Projects (BAP) Coordination Unit.

Correspondence:

Author: Ganime Tuğba Önder
e-mail: gercoskun@cu.edu.tr
phone: +90 553 618 3496

Graphical/Tabular Abstract

In order to increase the applicability of vaporizing foil actuator welding (VFAW), which has joined the field of welded manufacturing as a new welding technique, a welding prototype was created and tested. This work made it possible to perform VFAW with DC capacitors. The capacitors are charged to the desired voltage value via the power unit and discharged on the aluminum foil in the fixture on the terminal line with a remote-controlled blasting system. Weld metals are placed between the fixtures, just above the foil. The remote detonation system and grounding line enable safe work on the system. Figure A presents a schematic representation of the applied welding system.

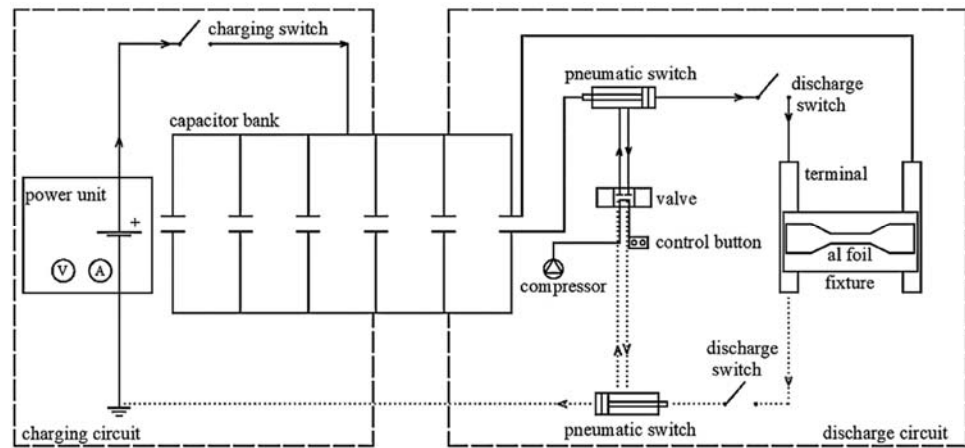


Figure A. Schematic Illustration of Vaporizing Foil Actuator Welding System

Purpose: In this study, it is aimed to produce a prototype for the realization of VFAW using DC capacitors and to use a remote detonation system in order to carry out safe trials of this explosion welding technique.

Theory and Methods: This work, which aims to realize the VFAW, is based on a series of experiments on a prototype produced by us. An aluminum foil actuator with a wall thickness of 0.1mm was used for 32 weld samples with a thickness of 0.1mm. In experimental studies, optimum input parameters for this welding technique were determined for 0.1mm weld metals. By keeping the 6kJ input energy constant, the effect of the distance between the weld metals and the change in voltage value was wanted to be observed. By means of the module created with DC capacitors, the AC, in the main current was converted into DC and stored, and safe operations were ensured by discharging using the remote-controlled detonation system.

Results: When the SEM analysis results of the welded samples were examined, it was observed that when the input energy and the thickness values of the weld metals were kept constant, the voltage change and separation distance had an effect on the weld seam form. It has been determined that regular interfacial waves occur at 6kJ input energy and 410V voltage for 0.1mm AA welding samples. This value emerges with the vaporizing of the aluminum foil actuator designed as Model22 and a separation distance of 0.1mm.

Conclusion: The novelty of this study is that it shows that VFAW can be obtained with DC capacitors. Successful welding was carried out with the prototype manufactured and input parameters were set on thin aluminum materials.



Buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağı prototip imalatı

Ganime Tuğba Önder^{1*} , Mustafa Kemal Külekcı² 

¹Çukurova Üniversitesi, Adana Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, İklimlendirme ve Soğutma Teknolojisi Programı, 01060, Adana, Türkiye

²Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 33400, Mersin, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağı prototip tasarımı
- Buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağı giriş parametreleri denetimi
- Doğru akım kapasitörleri ile buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağı

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 06.07.2023

Kabul: 28.01.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1323654

Anahtar Kelimeler:

Katı hal kaynağı,
buharlaştırılmış folyo
aktüatör kaynağı,
prototip tasarımı,
DC kapasitör

ÖZ

Üstün özellikli yeni malzemelerin temin edilmesi ve bu malzemeler için kullanılabilir endüstriyel tekniklerin keşfi, imalat teknolojileri için her zaman kayda değer bir konu olmuştur. Ayrıca mevcut malzemelerin tasarım ve imalat koşullarının sürekli olarak iyileştirilmesi gerekmektedir. Buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağı (BFAK) özellikle endüstriyel ve akademik alanlarda önemli bir konu olan farklı metallerin birleştirilmesi için geliştirilmiş bir kaynak yöntemidir. Bu çalışmada, imalat alanına yeni bir kaynak tekniği olarak katılmış BFAK'nın laboratuvar şartlarında uygulanabilirliğini geliştirmek amacıyla bir kaynak prototipi oluşturulmuş ve denemeleri yapılmıştır. Doğru akım (DC) kapasitörleri kullanılarak BFAK yapma süreci açıklanmıştır. Yapılan çalışma, DC kapasitörler kullanılarak BFAK yapmanın mümkün olduğunu göstermiştir.

Vaporizing foil actuator welding prototype manufacturing

H I G H L I G H T S

- Vaporizing foil actuator welding prototype design
- Vaporizing foil actuator source input parameters control
- Vaporizing foil actuator welding with DC capacitors

Article Info

Research Article

Received: 06.07.2023

Accepted: 28.01.2024

DOI:

10.17341/gazimmfd.1323654

Keywords:

Solid state welding,
vaporizing foil actuator
welding,
prototype design,
DC capacitor

ABSTRACT

Providing new materials with superior properties and discovering usable industrial techniques for these materials has always been a noteworthy issue for manufacturing technologies. In addition, design and manufacturing conditions of existing materials need to be constantly improved. Vaporizing foil actuator welding (VFAW) is a welding method developed for joining dissimilar metals, which is an important issue, especially in industrial and academic fields. In this study, a welding prototype was created and tested in order to improve the applicability of VFAW, which has been introduced to the manufacturing field as a new welding technique, under laboratory conditions. The process of making VFAW using direct current (DC) capacitors has been explained. The study has shown that making VFAW using DC capacitors is possible.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *gercoskun@cu.edu.tr, mkkulekci@tarsus.edu.tr / Tel: +90 553 618 3496

1. Giriş (Introduction)

Endüstrinin ihtiyaç ve isteklerini karşılamada teknolojinin rolü çok önemlidir. İmalat teknolojileri için yeni geliştirilen malzemeler ve avantajları, kütlece hafif malzemeler, enerji tasarrufu sağlayan yöntemler en çok dikkat çekici olanlardır. Kaynak ile birleştirme teknolojilerinde geleneksel birleştirme yöntemleri, ihtiyaç olan bu yönelimleri karşılamak için yetersiz kalmaktadır [1-4]. Katı hal kaynağı ile birleştirme yöntemlerinin, geleneksel yöntemlerle birleştirilemeyen malzemeleri birleştirebilmesi, yüksek hızda gerçekleşmesi, ısı problemlere sebep olmaması ve mukavemet kaybı yaşamaması gibi üstün yönleri bulunmaktadır. Son yıllarda geliştirilen, BFAK, özellikle alüminyum ve titanyum, bakır ve çelik gibi farklı ergime noktası ve farklı ısı iletim katsayısına sahip metal malzemelerin birleştirilmesi konusunda kullanılan bir katı hal birleştirme yöntemidir ve gelecek vaat eden bir kaynak metodu olarak kabul edilmektedir [5].

Geleneksel kaynak metodları, birleştirme bölgesinde ve ısı tesiri altındaki bölgede, malzemelerin metalürjik olarak değişmesine, sonuç olarak da çalışma şartlarında kaynaklı numunelerin performansının düşmesine neden olmaktadır. Bu durum birleştirmenin beklenen mekanik mukavemeti karşılamamasına neden olur. Katı hal kaynağı ile yapılan birleştirmelerde metal malzemelerde erime meydana gelmediği için ısıdan etkilenen bölge oluşmaz. Böylece birleşim yerinde metal, başlangıç özelliklerini yani kaynak yapılmadan önceki özelliklerini korur. Kaynaklı bağlantılarda kullanılan dolgu malzemeleri ise birleştirilmiş malzemelerin, ana malzemelerden daha ağır olmasına neden olmaktadır. Daha az malzeme girdisi ile birleştirme yapılıyor olması ve yekpare bir yapı sağlaması, kaynak yöntemlerini sökülebilir bağlantılardan ayıran temel avantajlardan birisi iken, birçok kaynak yönteminin içerisinde ilave dolgu metali barınması hususu bu avantajı tartışılır kılmaktadır. Katı hal kaynağı ile, dolgu malzemesi olmadan birleştirme yapılabilmesi bu kütle artışı probleminin de önüne geçmektedir. Katı hal kaynağı ayrıca birbirine benzemeyen yani erime noktaları birbirinden uzakta olan metallerin de birleştirilebilmesi gibi üstün bir teknik sunmaktadır.

Mekanik özellikleri birbirinden farklı malzemeler ile kaynak yapmak endüstriyel ve akademik olarak sorundur [6, 7] Normal kaynak işleminde, birbirine benzemeyen metallerin birleştirilmesi, erime sırasında kırılğan intermetalik bileşikler oluştuğu için sorun yaratır [8]. Hatta birçok farklı ısı transfer katsayısına sahip metalin geleneksel metodlarla birleştirilmesi mümkün değildir. Katı hal kaynak yöntemleri ile yapılan çalışmalar göstermiştir ki; erime minimize edilebilir veya önleyebilir ve böylece kırılğan intermetalik bileşiklerin oluşumu en aza indirebilir [9, 10]. Sonuç olarak farklı malzemelerin üstün kalitede birleştirilmesi sağlanabilir.

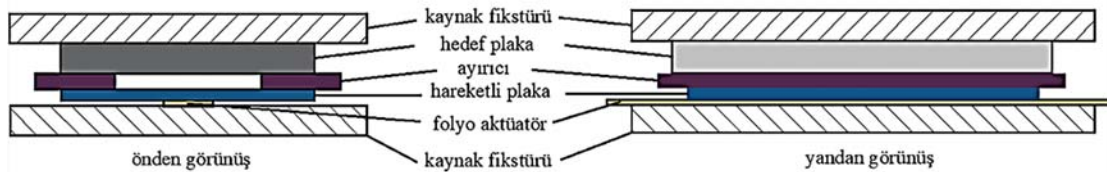
Literatürdeki adı ile “Vaporizing Foil Actuator Welding” (VFAW) olan, buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağı, yüksek oranlı darbeli kaynak teknolojileri arasında yer alır. Temel uygulamaları; kesme, şekillendirme, aksel simetrik birleştirme, çarpışma kaynağı olan bir katı hal birleştirme tekniğidir [11, 19]. Çalışma prensibine göre belirlenen kaynak çiftleri arasında, erime, termal bozulma, kütle

değişimi gibi problemler olmaksızın, bir katı hal birleştirme ara yüzü oluşturulur. Patlama etkisi ile ara yüzeyde oluşan jet ve onun oluşturduğu ısıya rağmen difüzyon meydana gelmez. Bu durum patlama esnasında oluşan sıcaklığın çok yüksek hızda hareket etmesi (1200-7000 m/s) ve atomların difüzyon için yeterli zaman bulamamasından kaynaklanmaktadır [12-16]. Bu teknikte, şarj edilen bir kapasitör bankası, folyo aktüatör olarak adlandırılan ince bir alüminyum folyo aracılığıyla boşaltılır. Ortaya çıkan yüksek akım darbesi (100-150 kA düzeyinde) folyoya süblimleşirmek için gerekenden daha fazla enerji biriktirir ve hızla buharlaşmasına ve patlama kaynağındaki patlayıcıların yarattığı etkiye benzeyen, güçlü bir basınç darbesi oluşturmasına neden olur [17]. Bu basınç, alüminyum folyo üzerinde yerleştirilmiş ve hareketli levha olarak isimlendirilen 1. kaynak metali ile arada mesafe bırakılarak, hareketli levha üzerine konumlandırılan 2. kaynak metali olan hedef levhanın birleştirilmesini sağlar. Bu kaynak metodu orta ila küçük uzunluk ölçeklerinde çarpışma kaynağı uygulamak için geliştirilmiştir [12] ve klasik patlama kaynağından laboratuvar şartlarında yapılabilmesi yönüyle ayrılmaktadır. Laboratuvar ölçeğinde çalışmak ve patlayıcılar yerine elektrik enerjisi deşarjı kullanmak, daha kolay ulaşılabılır bir kaynak metodu olmasına ayrıca endüstriyel uygulama imkânını da artırmaya fırsat vermektedir.

Başlangıç, yani şarj edilen enerji, akım ve gerilim önemli ve kontrol altında olması gereken konulardır. Kullanılan enerji depolama aracının sahip olduğu özellikler giriş şartlarını ve sonucu şekillendirmektedir. Kaynaklanacak metallere, hareketli levha olarak kullanılan metal, buharlaşma basıncı ile hareket etmekte ve üst tarafta konumlandırılan hedef levhaya doğru yol almaktadır. BFAK için genel uygulama düzeneği Şekil 1’de verilmiştir. Burada itici etkiyi yaratan durumlardan bir tanesi alüminyum folyoyu buharlaştıran enerji giriş şartlarıdır. Diğer parametreler arasında kaynak metallerinin malzemesi ve kalınlıkları, konumlandırılma şekilleri, aktüatör malzemesi ve geometrik dizaynı gibi parametreler bulunmaktadır. Parametrelerdeki ufak değişkenlikler dahi sonuç üzerinde etkilidir. Giriş parametreleri ne kadar kontrol altına alınırsa yöntemin belirsizlikleri de aynı oranda çözülebilecektir. Bu çalışmada, BFAK’nın laboratuvar şartlarında yapılabilirliğini geliştirmek amacıyla bir kaynak prototipi oluşturulmuş ve denemeleri yapılmıştır. Doğru akım (DC) kapasitörleri kullanılarak BFAK gerçekleştirilmiştir.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

Kaynak cihazı tasarım sürecinin ilk aşaması, giriş parametrelerinin doğru tanımlanabilmesidir. Kaynağın oluşması için önemli giriş parametreleri; kaynak metalleri, aktüatör, ayrılma mesafesi, yanal mesafe, verilen gerilim ve giriş enerjisidir. Darbe hızının ve hareketli plakanın çarpma hızının, giriş enerjisinin kontrol edilmesiyle değiştirilebilir olduğu ve bu değişimin kapasitörde depolanan elektrik enerjisi ile sağlanabileceği [4,20-23], kaynak malzemelerinin, aktüatör ve mesafelerin optimum değerde olması gerektiği [12, 21, 24] literatür taramaları neticesinde belirlenmiştir. Belirlenen parametreler, 10,000 μ F kapasiteli, 20 nH indüktans, 1,01 kJ maksimum şarj, 450 V maksimum şarj voltajı enerjisine ve 6,55 μ



Şekil 1. BFAK genel uygulama şekli ve sistem bileşenleri (VFAW general application method and system components)

kısadevre akım yükselme süresi sahip olan 2 adet doğru akım (DC) kapasitör kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar ile bir ön deneme safhası geçirmiştir. Yapılan deneyler, parametrelerin doğru seçmede ve kaynak yöntemini uygulama adımlarında yol gösterici olmuştur. Bu çalışmada, BFAK tekniği ile Tablo 1’de kimyasal bileşimi ve Tablo 2’de mekanik özellikleri verilen alüminyum malzemelerin kaynaklama işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Kaynak işlemi için 80 mm x 40 mm ölçülerinde 32 adet kaynak numunesi hazırlanmıştır. 0,1 mm kalınlığında alüminyum hareketli bir levhanın, 0,1 mm kalınlığındaki hedef bir levhaya doğru hızlandırılması amacıyla Şekil 1’de gösterilen düzende yerleştirilen 0,1 mm et kalınlığında alüminyum folyo aktüatör kullanılmıştır. Her deney 4 kere tekrar edilmiştir. Folyo aktüatör, deneye ismini veren, üzerinden akım geçirilerek buharlaştırılan temel malzemedir. Kontrol sistemlerinin önemli parçalarından biri olan aktüatör, mekanizmayı hareket ettiren ve kontrol etmekten sorumlu elemandır [18]. Çalışmamızda folyo aktüatör, dar bir alan olarak tasarlanmıştır ve aktif bölge olarak isimlendirilmektedir. BFAK tekniğinde aktüatör, buharlaştırılan eleman olduğu için kaynak sisteminin de kalbi konumundadır. Buharlaştırmanın gerçekleşmesi istenen aktif bölge, buharlaşma esnasında ekipmana zarar vermeden elektrotlara bağlanması ve akım yoğunluğundaki ani değişikliğin olumsuz etsinden kaçınmak için daralan, kademeli bir geçiş bölgesi olarak kullanılmıştır (Şekil 2). Kesit aktif bölge boyunca sabittir, böylece akım yoğunluğu ve dolayısıyla Joule ısıtma hızı bu bölge boyunca sabit olur ve enerji istenilen bölgeye doğru yönlendirilmiş olur. Folyo aktüatörlerin tasarımını araştırılan bir çalışmada, aktif bölgenin hafif daralmasının bile buharlaştırmanın en dar noktaya odaklanmasına neden olacağı gösterilmiştir [19].

Aktüatörler tipik olarak 1xxx serisi alüminyum alaşımından kesilir. Elektrik ve ısı iletkenlik yetenekleri nedeniyle kullanılan bu yüksek saflıkta alüminyum serisi ayrıca kaplama işlemleri için görünümünün iyi olması açısından da tercih edilir. Buharlaştırılmış alüminyum ve bakır telleri karşılaştıran bir çalışmada, alüminyumun aynı girdi enerjisinde baskı oluşturmada bakırdan daha verimli olduğunu

gösterilmiştir [21]. Tasarımı yapılan folyo aktüatör (Şekil 2), fikstür ve metallerden yalıtılmak amacıyla belirli bir bölgeye kadar izolasyon bandı ile kaplanmıştır. Aktüatör, üzerinde oluşabilecek oksit tabakası ve kirleticilerden arındırılması için aseton ile temizlendikten sonra izole edilmiştir. Her deney öncesi metal numuneler için de kaynak yüzeyleri zımparalama ve asetonla temizleme işleminden geçirilmiştir. Hazır hale getirilen numuneler Şekil 1’de gösterildiği gibi yerleştirilerek, fikstürler arasında sabitlenmiştir. Deneyler esnasında seperatör olarak kullanılan malzeme tüm deneylerde aynı uzaklık olarak 15 mm yanal mesafede yerleştirilmiştir.

Kaynak fikstürü, kaynak bileşenlerini bir arada tutan bir koruyucudur. Fikstür, deşarj devresinde yer alır. Kaynak metalleri ve folyo, iletken olduğu için ark problemlerine karşı izole edilmiştir. Patlatma kaynağı genel yerleşim planında olduğu gibi kaynak metalleri üst üste istiflenmiş ve metaller arasında boşluk yaratmak amacıyla folyo tasarımı ile uyumlu bir seperatör yerleştirilmiştir (Şekil 2). Seperatör, burada patlatma esnasında oluşan jetin hareketi için alan sağlamak amacıyla bulunmakta, aynı zamanda kaynağın oluşması için de önemli bir görev üstlenmektedir. Yapılan deneyler esnasında optimum seperatör yüksekliğinin de her malzeme için ayrı olarak çalışılması gerekliliği gözlemlenmiştir.

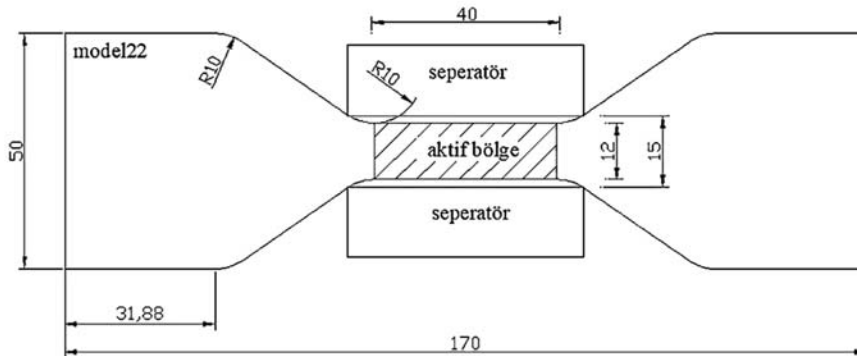
Kaynak yapabilmek için gerekli olan jet oluşumunu sağlayan başlangıç enerjisi, çarpışan metallerin hızları, çarpışma basıncı, çarpışma açısı ve hızı, tasarım açısından çok önemlidir ve bu özelliklerin her malzeme çifti için sürekli araştırılması ve geliştirilmesi gerekmektedir. Bu noktada, pratikte karşımıza mikro saniyede ölçüm yapan bir cihaz gereksinimi çıkmaktadır. Basınç, sıcaklık ve hız ölçümleri için yaygın kullanılan ölçü aletlerinin algılayıcı uçlarının tepki süreleri, ortalama 2-3 sn’dir. Ölçü aletinin algılama yapmak için geçirdiği sürede BFAK çoktan gerçekleşmiş durumdadır. Burada gerçekleşen kaynak süresi, mikro saniye mertebesinde olduğundan (ortalama 10 µs [25-28]), ölçüm yapabilmek için optik yöntemleri kullanan gelişmiş ölçü aletlerine ihtiyaç duyulmaktadır [29]. Kapasitörler için kısa devre akım yükselme süresi, devredeki akımın sıfırdan ilk zirveye yükselmesi için

Tablo1. AA Kimyasal Bileşimi (AA Chemical composition)

Elementler	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	B	Ba
İçerik (%)	0,238	1,082	0,0015	0,0066	0,0013	0,0018	0,0026	0,021	0,012	0,0016	0,00010
Elementler	Be	Bi	Ca	Cd	Ga	Na	V	Zr	As	La	Al
İçerik (%)	0,00004	0,0026	0,0002	0,0007	0,010	0,0005	0,0088	0,0023	0,0087	0,0011	98,59

Tablo 2. Mekanik Özellikler (Mechanical properties)

Malzeme adı	Kalınlık mm	Uzama %	Akma mukavemeti MPa	Çekme mukavemeti MPa	Yoğunluk g/cm ³
Alüminyum	0,1	4,4	365	233	2800



Şekil 2. Folyo aktüatör (Foil actuator)

geçen süreyi ifade eder. Daha kısa bir akım yükselme süresi, daha eken bir aşamada daha yüksek bir akıma ulaşılması anlamına gelir. Bu, kaynaklama hızını etkiler ve kaynak teknolojileri için önemli bir avantajdır. Bir kondansatör için kısa devre akım yükselme süresi (t), aşağıdaki Eş. 1 ile tahmin edilebilir [30]. Burada R , devrenin iç direncini; L , iç indüktansını ve C , kapasitansı temsil etmektedir.

$$t = \pi \left(2 \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \right)^{-1} \quad (1)$$

Kapasitörlerde depolanan enerji, yani maksimum enerji miktarı Eş. 2 ile hesaplanabilir. Burada E , deşarj enerjisini; C , kapasitansı, V , giriş voltajını temsil etmektedir [31].

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

Bu çalışmada, 10,000 μ F kapasiteli, 20 nH indüktans, 1,01 kJ maksimum şarj, 450 V maksimum şarj voltajı enerjisi ve 6,55 μ kısa devre akım yükselme süresine sahip olan 6 adet doğru akım kapasitörü kullanılmıştır (Tablo 3). Doğru akım ile düşük voltaj ve yüksek akım elde edilebilir. Doğru akım, alternatif akımın sahip olduğu gerilim dalgalanmalarından etkilenmez ayrıca alternatif akımda depolama şansı mümkün değilken doğru akım kullanıldığında, akü, batarya, pil gibi elemanların yardımı ile depolama imkânı sunar [32]. Geleneksel metotlarla kaynak yapılırken doğru akım, ince levhaların kaynağında daha iyi sonuçlar verir. Doğru akım, her türlü elektrot ile daha stabil bir kaynak arkı oluşturur ve kaynak metalinin transferi alternatif akımdan daha yumuşak bir biçimde gerçekleşir. Ayrıca metal sıçrama kayıpları daha azdır [33]. DC sistemlerin enerji verimliliği AC sistemlere göre daha yüksektir [34]. Doğru akımın bu avantajları nedeniyle DC kapasitörler enerji depolama kaynağı olarak belirlenmiştir. DC kapasitörler ile oluşturulan modül aracılığı ile şebekede var olan alternatif akım doğru akıma dönüştürülerek depolanmakta ve kaynak için ihtiyaç duyulan zamanda uygulama sağlanabilmektedir. Bu durum patlatma kaynağının güvenlik

problemini de ortadan kaldırmak için önemli bir avantaj sunmaktadır. Çalışmamızda uzaktan kumandalı patlatma sistemi kullanılarak deşarj gerçekleştirilmekte ve güvenli çalışmalar sağlanabilmektedir. Şekil 3'te uygulaması yapılan kaynak sisteminin şematik bir gösterimi yer almaktadır.

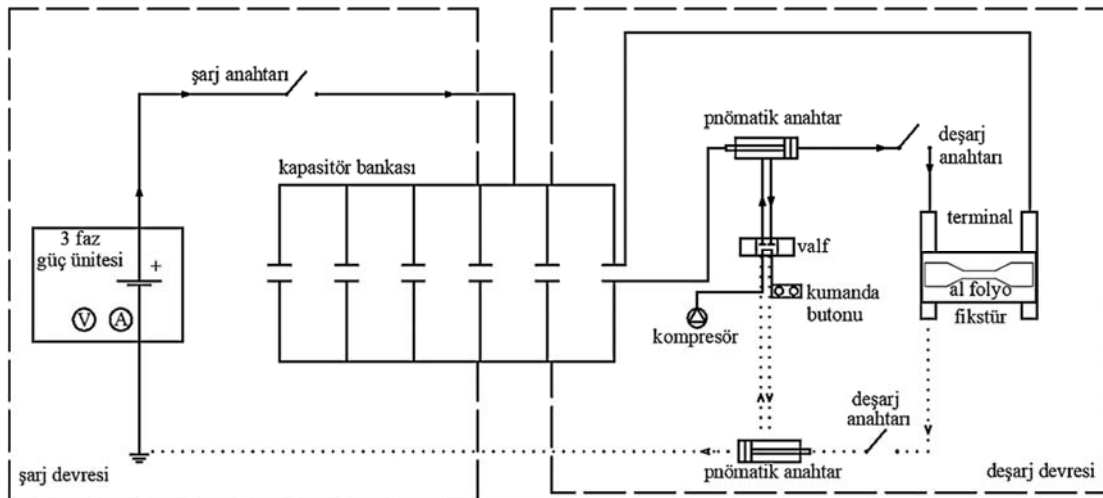
İmalatı yapılan prototipte, DC kapasitörler aracılığı ile enerji, paralel bağlanarak depo edilmiş, planlanan zamanda uzaktan kumanda edilmek sureti ile deşarj gerçekleştirilmiştir. Prototip ile kaynak parametrelerini ayarlamak adına bir dizi ön deneme gerçekleştirilmiş ve belirlenen alüminyum alaşımı (AA) malzemeler için yeterli ve ideal şarj gerilim seviyesi 6 kJ giriş enerjisi için 0,2 mm ayrılma mesafesinde 410 V olarak bulunmuştur. Tasarımı yapılan fikstür aracılığı ile (Şekil 4) kaynak metallerinin konumu, belirlenen paralel pozisyonlarda sabit tutulmuştur. Fikstür, alt destek parçası üzerine monte edilmiş olup yan destek parçaları, farklı boyutlardaki kaynak numuneleri üzerinde çalışmayı mümkün kılar. Çalışma için seçilen giriş parametreleri Tablo 4'de listelenmiştir. Burada, aktüatör olarak kullanılan folyo, yanal mesafe, giriş enerjisi ve kaynak metallerinin sayısal değerleri sabit tutulmuş, kaynak oluşumu üzerindeki etkisini incelemek amacıyla iki farklı ayrılma mesafesi ve dört farklı gerilim değeri kullanılmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

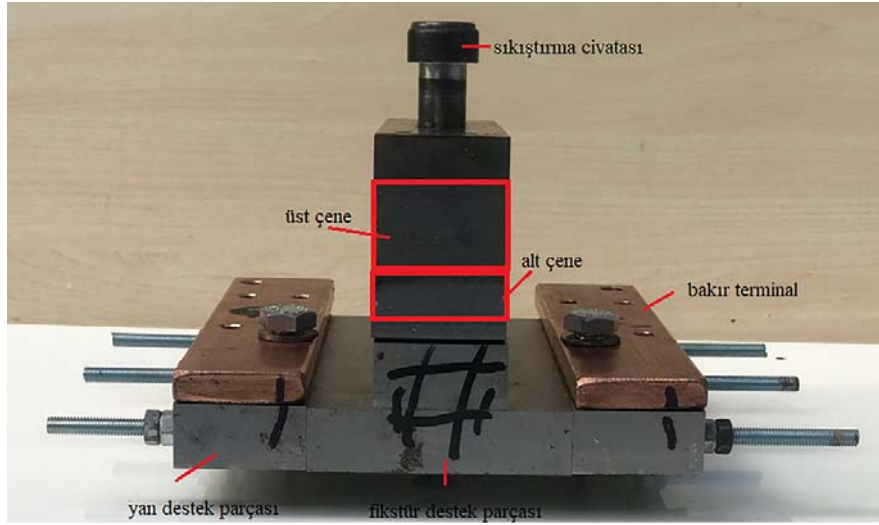
Vivek vd. tarafından geliştirilen [12] BFAK tekniğinde kullanılan kapasitörler, 426 μ F-8,66 kV maksimum şarj voltajında ve alternatif akım (AC) ile çalışmaktadır. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak 10,000 μ F - 450 V maksimum şarj enerjisine sahip doğru akım (DC) kapasitörleri kullanılmıştır. DC kapasitörler, şebekeden gelen akımı depolamayı sağladığı için istenen zamanda deşarj edilerek kaynak yapabileceği şansı tanımaktadır. Ayrıca bu kapasitörler enerjiyi daha etkin kullanabilmeyi sağlamaktadır. Kapasitör-şebeke arasında elektrik bağlantısı kurma gereksinimi olmaması da prototip uygulamasını sadeleştirmektedir [35].

Tablo 3. Kapasitör Özellikleri (Capacitor characteristics)

Kapasitör	R İç direnç (Ω)	L İç endüktans (H)	C Kapasitans (F)	Nominal kısa devre akım yükselme zamanı (μ s)	Max şarj voltajı (kV)	Max şarj enerjisi (kJ)
Kapasitör	0,01	0,00000002	0,010	6,55	0,045	1,0125



Şekil 3. Buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynak sisteminin şematik gösterimi (Schematic representation of vaporizing foil actuator welding system)



Şekil 4. Kaynak fişstürü (Welding fixture)

Tablo 4. Deney Giriş Parametreleri (Experiment input parameters)

Deney	Aktüatör	Ayrılma mesafesi (mm)	Yanal mesafe (mm)	Hareketli levha (mm)	Hedef levha	Verilen Gerilim (Volt)	Giriş enerjisi (kJ)
1.1						265	
1.2	Model 22					325	
1.3	0,1 mm	0,1		0,1 AA	0,1mmAA	410	
1.4	AA					450	
2.1			15			265	6
2.2	Model 22					325	
2.3	0,1 mm	0,2		0,1 AA	0,1mm AA	410	
2.4	AA					450	

Yapılan deneylerde, hareketli plaka olarak isimlendirilen kaynak numunesi, farklı giriş seviyeleri ile hedef plakaya doğru fırlatılmıştır. Burada farklı giriş seviyeleri, fırlatılma hızlarında değişiklik meydana getirdiği gibi ortaya çıkan basınç için de doğru orantılı bir artışa sebep olmuştur. Bu durum literatür ile uyumlu fiziksel bir olgudur [36]. Kaynak numuneleri üzerinde belirlenen giriş parametreleri Tablo 4’de ve bu girdilerden elde edilen deney sonuçları ise Tablo 5’de sunulmuştur. Kaynak tekniği üzerinde etkili olan giriş değişkenlerinin miktarını azaltmak amacıyla 6 kJ giriş enerjisi sabit tutularak, kaynak metalleri arasındaki mesafenin ve voltaj değerindeki değişimin etkisi gözlemlenmek istenmiştir.

Kaynak için buharlaşmanın gerçekleşebilmesi amacıyla, tasarımı yapılan aktüatör folyoda aktif bölge 480 mm^2 ’dir. Bu folyo “Model 22” olarak isimlendirilmiş ve geometrik formu Şekil 2’de verilmiştir. Deneyler esnasında bu aktif bölgeden ortalama buharlaşan madde miktarı 1 gr’dır. Bu değer, alüminyum folyo aktüatörün aktif bölgesi tamamen buharlaştığı zaman kaydedilmiştir. 100 V ve 225 V aralığında nispeten buharlaşma meydana gelmesine rağmen 225 V ve altındaki gerilim değerlerinde buharlaşması gereken aktif bölgede beklediği gibi yeterli buharlaşma miktarları oluşmamıştır (Şekil 5). Bu, kaynağın meydana gelmesi için gereken basıncın da ortaya çıkmadığı anlamını taşır. Aktif bölgeyi buharlaştırmak için yapılmış önceki çalışmalarda $\sim 645 \text{ mm}^2$ alan için 5,5 kV [12,19,37], 150 mm^2 alan için 5 kV [38] enerji gereksinimi ortaya konulmuştur. Sabit hacimli ancak çeşitli aktif bölge boyutlarına sahip folyo aktüatörlerin basınç üzerinde etkisini inceleyen bir çalışmada, buharlaştırma alanı 600 mm^2 ’den 1200 mm^2 ’ye kadar farklı boyutlarda incelenmiş, kullanılan şarj enerjisi 2-8 kJ arasında değişmiş ve maksimum 8,66 kV gerilim uygulanmıştır [30]. Bu yüksek gerilim değerleri ile kıyaslandığında çalışmamızda benzer boyuttaki aktif bölgeyi buharlaştırmak için çok daha az enerji kullanıldığı açıkça görülmektedir. Folyo kalınlığı ise 0,0762 mm olarak verimli

bulunduktan sonra literatürdeki tüm buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynak çalışmaları sabit tutulmuştur. Mevcut çalışmada, alüminyum folyo kalınlığı kolay temin edilebilirliği nedeniyle 0,1 mm olarak kullanılmış ve başarı ile buharlaştırılmıştır.



Şekil 5. Gerilim ve buharlaşma değişimi (Voltage and vaporization change)

Tablo 5'te 1.1-1.4 ile numaralandırılan deney grubunda, kaynak metalleri arasında yer alan 0,1 mm ayrılma mesafesi, kaynak için gereken jet için uygun bir aralık oluşturamamıştır. Jet, kaynak esnasında ortaya çıkan ve kaynak noktasından dışarıya doğru yol alması gereken bir enerjidir [39]. Bu enerjinin buharlaşma bölgesi olan aktif bölgeden atmosfere doğru serbest transferine izin verilmediğinde, folyo üzerinde kamburlaşma, istenmeyen bölgelerde deformasyon, seperatör olarak kullanılan iki kaynak metali ayırmaya yarayan ve kaynak için gerekli faydalı aralığı oluşturan malzemede tahribat gözlemlenmiştir (Şekil 6a, Şekil 6b). Jetin ortamdan sağlıklı bir şekilde transfer edilmesi için doğru bir şekilde izole edilmesi ve bu jet enerjisinin kaynak noktasında hapsedilmemesi gerekir (Şekil 6c).



Şekil 6. Folyo üzerinde meydana gelen şekil değişikliği (Shape change occurring on the foil)

Tablo 5'te 1.1 ve 1.2 no'lu deneyde kaynak, yetersiz gerilim değeri (265 – 325 V) ve yetersiz ayrılma mesafesinin (0,1 mm) ortak etkisi nedeniyle oluşamazken 1.3 ve 1.4 no'lu deneylerde fazla gerilim değeri (410 – 450 V) nedeni ile fazla ergime meydana gelmiştir. Tabloda kaydedilen değerlerin ara değerlerinde yapılan denemelerde de sağlıklı kaynağa rastlanmamıştır. İki kaynak metali arasında bırakılan 0,1 mm ayrılma mesafesi, düzgün enerji dağılımına izin vermediği için 1.1-1.4 deney grubu başarı ile sonuçlanmamıştır.

Tablo 5'te 2.1-2.4 ile numaralandırılan deney grubunda 0,2 mm ayrılma mesafesi, kaynak için gereken boşluğun oluşmasına olanak tanımış ve jet bu aralıktan rahatça uzaklaşabilmiştir. 2.1 ve 2.2 no'lu deneyde kaynak, yetersiz gerilim değeri nedeniyle meydana gelmezken, 2.3 no'lu deneyde 0,2 mm ayrılma mesafesi ve gerilimin de ortak etkisi ile iyi bir kaynak elde edilmiştir. 2.4 no'lu deneyde, 450 V gerilim değeri ise seçilen kaynak metalleri için aşırı erimeye neden olmuştur. Ayrılma mesafesi birçok çalışmada, farklı kaynak metalleri için 0,5-3 mm aralığında denenmiş ve kaynak için bir parametre olarak kullanılmıştır [12, 23, 30, 36, 40, 41]. Yapılan deneyler neticesinde, ayrılma mesafesinin buharlaştırılmış folyo aktüatör kaynağı için gerekli bir parametre olduğu görülmüştür.

Arayüz yapıları

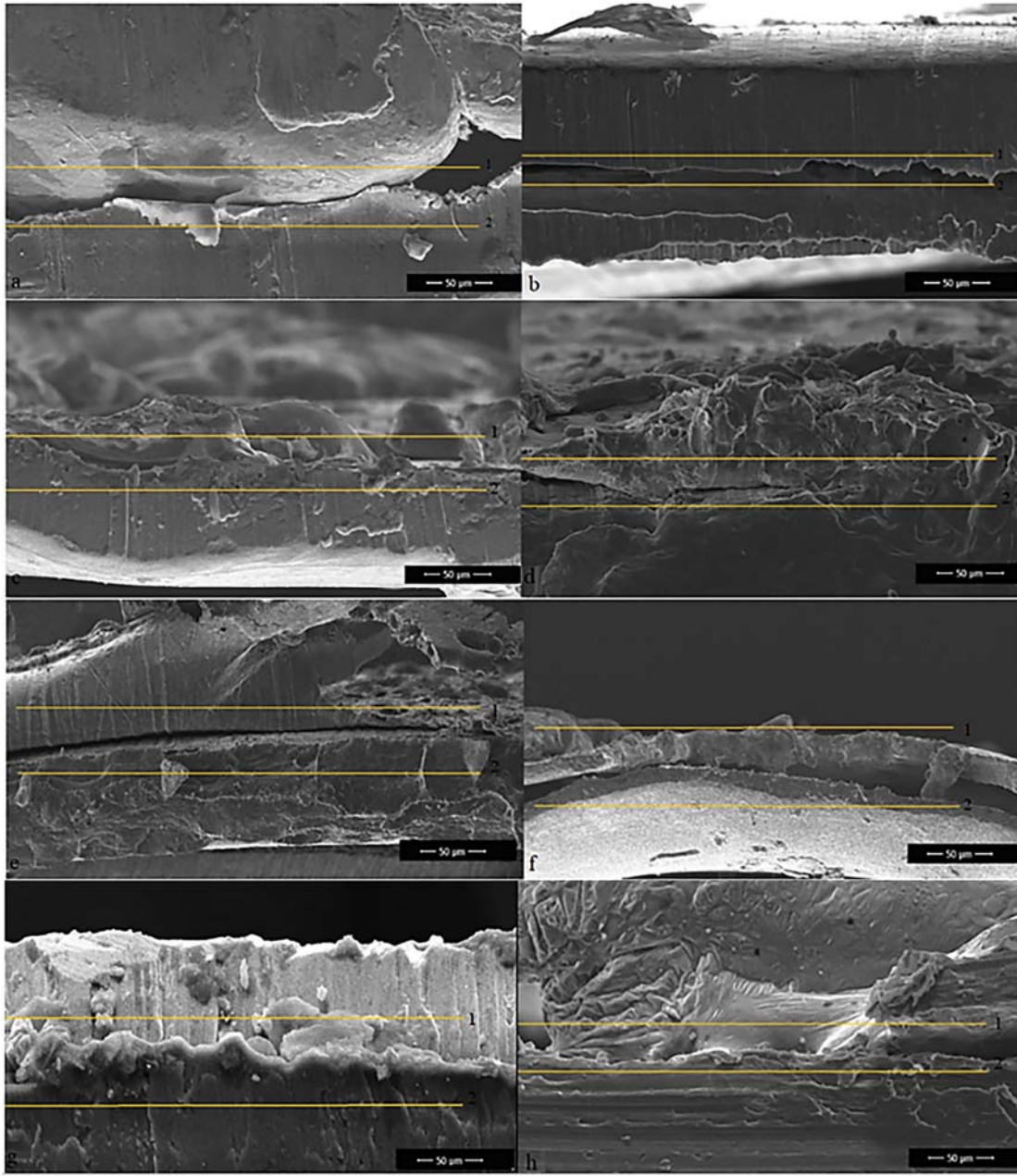
Birleştirme bölgesinin arayüzündeki yapılar taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Şekil 7, Buharlaştırıcı folyo aktüatör kaynağı (VFAW) yöntemiyle 0,1 mm AA- 0,1 mm AA kaynak numunesinin SEM analizi fotoğraf sonuçlarını göstermektedir. Fotoğraflardaki 1 ve 2 no'lu iki çizgi arasındaki bölge, kaynak arayüz bölgesini göstermektedir.

265 ve 325 V gerilim değeri ile yapılan deneylerin (Deney 1.1, 1.2, 2.1, 2.2) numuneleri incelendiğinde, 0,1 mm ve 0,2 mm ayrılma mesafesi için yeterli birleşme meydana gelmediği görülmüştür. Bu durum, sırasıyla Şekil 7a, Şekil 7b, Şekil 7e ve Şekil 7f'te verilen SEM görüntülerinde gözlenmektedir. 410 V gerilim değeri kullanılarak elde edilen numuneler (Deney 1.3, 2.3) ve arayüz yapıları ise Şekil 7c ve g'de gösterilmiştir. Benzer şekilde, 450 V gerilim değeriyle elde edilen numuneler (Deney 1.4, 2.4) ve arayüz yapıları ise Şekil 7d-Şekil 7h'de sunulmuştur.

Dalgali arayüz, darbeli kaynağın temel bir özelliğidir ve intermetalik bileşikler, bu tür arayüz dalgaları meydana geldiğinde oluşur [23]. Tüm çalışmalar, darbeli kaynakların hangi koşullarda bu dalgali arayüzü oluşturduğunu belirlemek için gerçekleştirilir. Ayrıca dalgali arayüz, başarılı kaynakların optimum kaynak mukavemeti ve metalürjik bağ göstergesi olarak kabul edilir [42]. Şekil 7g'de gözlemlenebildiği gibi iki metal arasında arayüz dalgaları oluşmuştur. Bu, iyi bir darbeli kaynağın tipik bir özelliğidir. Düzenli dalgali arayüz bölgeleri, sürekli dalgalara dönüşür ve sonunda uç kısımlara doğru genliğini kaybeder [43]. Şekil 8'de 1 ve 2 no'lu iki çizgi arasındaki bölgede, kaynak dalga boyundaki değişim gösterilmiştir. Burada kenarlara doğru azalan dikiş yüksekliği gözlemlenebilir. Bu durum, kaynak bölgesindeki çarpma açısının kenarlarda azaldığı gerçeğiyle ilgilidir. Şekil 7c, Şekil 7d, Şekil 7h'de ise düzensiz arayüz dalgaları oluşumu görülmektedir. Bu, kaynak metalleri arasında yer yer mekanik bağ meydana geldiğini ancak bu deneylerde kullanılan gerilim değerlerinin metalleri düzgün kaynağa uygun hale getirmediğini ve düzenli dalga oluşumunu sağlamak için uygun olmadığını ortaya koymaktadır.

Tablo 5. Deney Çıktıları (Experimental outputs)

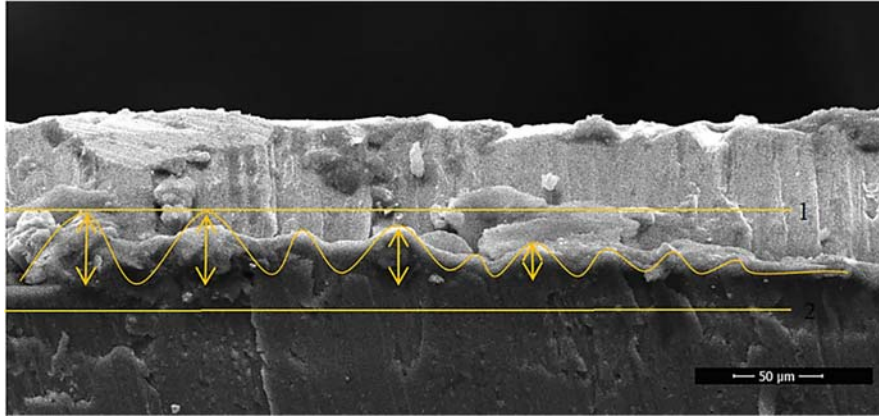
Deney	Verilen Gerilim (Volt)	Arta Kalan Gerilim (Volt)	Kullanılan Gerilim (Volt)	Durum
1.1	265	140	125	Kaynak yok
1.2	325	150	175	Kaynak yok
1.3	410	150	260	Fazla ergime
1.4	450	200	250	Fazla ergime
2.1	265	100	165	Kaynak yok
2.2	325	170	155	Kaynak yok
2.3	410	175	235	İdeal
2.4	450	119	331	Fazla ergime



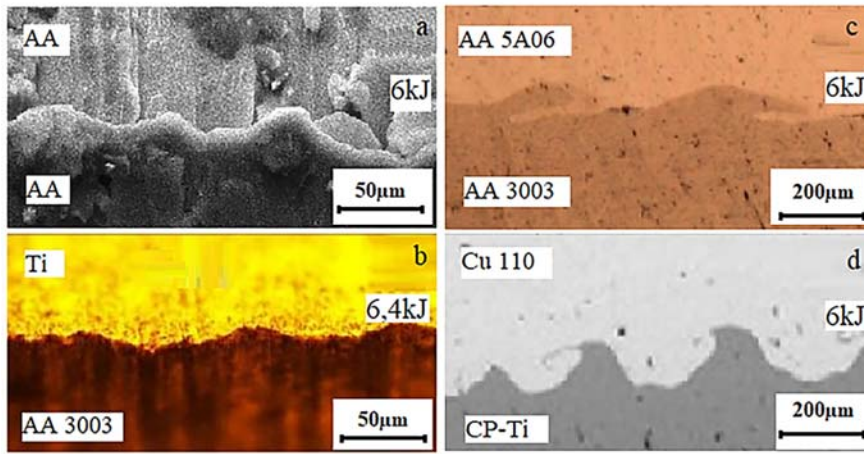
Şekil 7. Buharlaştırıcı folyo aktüatör kaynağı yöntemiyle 0,1mm AA-0,1mm AA kaynak numunesinin darbeli kaynağını gösteren SEM mikrografı. a- Deneş 1.1, b- Deneş 1.2, c- Deneş 1.3, d-Deneş 1.4; e- Deneş 2.1 f- Deneş 2.2, g- Deneş 2.3, h-Deneş 2.4
(SEM micrograph showing pulsed welding of 0.1mm AA-0.1mm AA weld sample by vaporizing foil actuator welding method. a- Experiment 1.1, b- Experiment 1.2, c- Experiment 1.3, d- Experiment 1.4; e- Experiment 2.1 f- Experiment 2.2, g-Experiment 2.3, h- Experiment 2.4)

Tüm deneş numunelerinin SEM analizi sonuçları incelendiğinde, diğere parametreler sabit tutulduğunda, voltaj değışimi ve ayrılma mesafesinin kaynak dikiş formu üzerinde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Bu olgu, literatürdeki sonuçlarla uyumlu görünmektedir. Enerji girişinin arayüzey üzerindeki etkisini inceleyen benzer çalışmalarda, dalgalı arayüzün, farklı kaynak metalleri için aynı giriş enerjisi seviyesinde "iyi kaynak" olarak nitelendirildiğı görülmüştür (Şekil 9). Şekil 9a'da maksimum 450 V şarj voltajı 6,55 µs akım yükselme süresine sahip DC kapasitörlerle elde edilen kaynak arayüz görüntüsü yer alırken, Şekil 9b, Şekil 9c, Şekil 9d'de, literatürdeki BFA kaynaklarında kullanılan 8,66 kV maksimum şarj voltajı ve 12 µs akım yükselme süresine sahip AC kapasitörlerle elde edilen kaynak arayüz görüntüleri yer almaktadır. DC kapasitörlerle

kaynak elde edilebilmek için en az 200 V gerilim kullanması gerektiğı deneşler sonucunda belirlenmiştir. Sağlıklı kaynak gerçekleştirilebilmek ve düzenli dalgalılık elde edilebilmek amacıyla DC kapasitörlerin 325 V üzerinde şarj edilmeleri gerekmektedir. Elde edilen veriler, DC kapasitörler kullanılarak, literatürde kullanılan AC kapasitörlerden çok daha düşük bir gerilimle kaynak yapmanın mümkün olduğunu ve 6,55 µs akım yükselme süresi ile kaynak için gereken akım değerine daha kısa sürede ulaşılabilirdiğini göstermektedir. Deşarj gerilimi ve kaynak levhaları arasındaki boşlukları inceleyen çalışmalar, gerilim ile kaynak metalleri arasında oluşturulan mesafenin, bağlantı kalitesini etkileyen temel parametrelerden biri olduğu vurgulanmıştır [16, 24, 26, 44, 45]. Deşarj gerilimi, çarpışma basıncını ve hızını etkilemektedir [37]. Şekil 7d ve



Şekil 8. Kaynak dalga boyu değişimi (Welding wavelength change)



Şekil 9. Farklı BFAK arayüzey görünümleri. (a)AA/AA, (b)Ti/AA3003 [23], (c)AA5A06/AA3003 [47], (d)Cu110/CP-Ti [48].
(Different VFAW interface views. (a)AA/AA, (b)Ti/AA3003 [23], (c)AA5A06/AA3003 [47], (d)Cu110/CP-Ti [48].)

Şekil 7h incelendiğinde, kaynak için gerçekleştirilen optimum şartların artan gerilim değeri ile bozulduğu, düzensiz bağlantının meydana geldiği açıkça gözlemlenebilmektedir. Uygun olmayan şarj gerilimi, bağlantı kalitesinde düşüşe neden olmuştur. Başka bir ifade ile şarj gerilimi, deşarj enerjisini, darbe hızını, bağlantı noktasının oluşup oluşmayacağını, bağlantı kalitesini ve darbe hızını da etkilemiştir [24, 44-46].

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada geliştirilen prototip başarıyla kullanılmış ve BFAK gerçekleştirilmiştir. Bu yeni kaynağın başarı ile yapılabilmesi için önemli giriş parametreleri belirlenmiştir. DC kapasitörler ile oluşturulan modül aracılığıyla doğru akım etkisi kullanılarak BFAK'ya farklı bir yaklaşım getirilmiştir. Şebekede mevcut olan alternatif akımın, doğru akıma dönüştürülüp depolanması ile depolanmanın yapıldığı anda değil, kaynak için planlanan zamanda uygulama yapılabilmektedir. Farklı bir zamanda deşarj yapabilmeye özelliği, zaman yönetimi yanı sıra, deşarj esnasında özellikle kaynak yapan kişi için oluşabilecek güvenlik problemini de ortadan kaldırmaya imkân tanımaktadır.

Aynı giriş enerjisi değeri kullanılarak, 32 adet kaynak numunesi üzerinde 2 farklı ayrılma mesafesi (0,1 mm ve 0,2 mm) ve 4 farklı giriş voltajı değeri (265 V, 325 V, 410 V ve 450 V) için 4 farklı deneme gerçekleştirilmiştir. Alüminyumun, 0,1 mm kalınlığındaki hareketli bir levhanın, 0,1 mm kalınlığındaki bir hedefe doğru

hızlandırıldığı deneylerde, ortalama olarak 350 V ile 420 V arasındaki gerilim değerlerinde düzgün mekanik kilitlemeler gözlemlenmiş, ortalama 410 V'nin üzerindeki değerlerde ise fazla erime ve deformasyon bölgeleri oluşmuştur. BFAK için imal edilen prototip aracılığı ile saf alüminyum olarak tabir edilen (%98.59 Al) 0.1 mm kalınlığındaki malzemelerin kaynağının optimum parametreler sağlandığı takdirde başarılı birleştirme sonuçları verdiği tespit edilmiştir. 0,1 mm AA malzemelerin BFAK ile kaynaklanabilmesi için minimum gereken ayrılma mesafesinin 0,2 mm olduğu, optimum şarj voltaj değerinin 6 kJ giriş enerjisi için 410 V olduğu belirlenmiş, ara yüzeyde intermetalik bileşiklerin var olduğu ortaya konulmuştur. Deney metalleri ince olduğu için kaynağın meydana geldiği intermetalik bileşik tabakaları da çok ince meydana gelmiştir. Yeni geliştirilen imalat teknikleri, güvenilir bir seviyeye ulaştığında endüstriyel seri imalat uygulamalarında kullanılabilir hale gelirler. BFAK gibi yeni ve gelişmekte olan bir kaynak teknolojisinde malzemelerin birleştirilmesi için giriş parametrelerinin, her malzeme çifti için ayrı ayrı belirlenmesi gerekmektedir. Bu konuda farklı malzeme ve parametreler ile yapılan çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmanın devamı veya benzer çalışmaların literatüre katkı sağlayabileceği ve BFAK tekniğinin bu sayede seri imalat için uygulanabilir hale gelebileceği düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, TÜBİTAK "1002-A Hızlı Destek Modülü" kapsamında 222M455 numaralı proje olarak ve Tarsus Üniversitesi Bilimsel

Araştırma Projeleri (BAP) Koordinasyon Birimi kapsamında ENSTİTÜ.21.001 numaralı proje olarak desteklenmiştir.

Kaynaklar (References)

- Beals R., Conklin J., Skszek T., Zaluzec M., Wagner D., Aluminum high pressure vacuum die casting applications for the multi material lightweight vehicle program (MMLV) body structure, Light Metals 2015, Springer, Cham., 2015.
- Conklin, J., Beals, R., Brown, Z., BIW design and CAE (No. 2015-01-0408), SAE Technical Paper, 14-27, 2015.
- Yan, W., Zhang, H., Jiang, Z. G., Hon, K. K. B., Multi-objective optimization of arc welding parameters: the trade-offs between energy and thermal efficiency, Journal of Cleaner Production, 140, 1842-1849, 2017.
- Meng, Z., Gong, M., Guo, W., Liu, W., Huang, S., Hua, L., Numerical simulation of the joining interface of dissimilar metals in vaporizing foil actuator welding: Forming mechanism and factors, Journal of Manufacturing Processes, 60, 654-665, 2020.
- Liu, B., Vivek, A., Daehn, G. S., Use of vaporizing foil actuator for impact welding of aluminum alloy sheets with steel and magnesium alloys, In Light Metals 2015, Springer, Cham. Edited by: Margaret Hyland, TMS (The Minerals, Metals & Material Society), 463-468, 2015.
- Kapil, A., Mao, Y., Vivek, A., Cooper, R., Hetrick, E., Daehn, G. A., New approach for dissimilar aluminum-steel impact spot welding using vaporizing foil actuators, Journal of Manufacturing Processes, 58, 279-288, 2020.
- Mercan S., Özkavak H.V., Joining of AISI 1040 and AA6013 material pairs by mechanical locking method (MLM) using different connection angle, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 37 (4), 2309-2322, 2022.
- Güleç, S., Çakmakkaya, M., Joining of Fe based intermetallics to stainless steel, steel, aluminum stud by using capacitor discharge stud welding, Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering, 13 (2), 1-9:1, 2013.
- Li, J., Panton, B., Liang, S., Vivek, A., Daehn, G., High strength welding of NiTi and stainless steel by impact: process, structure and properties, Materials Today Communications, 25, 101306, 2020.
- Gulenc, B., Investigation of interface properties and weldability of aluminum and copper plates by explosive welding method, Materials & Design, 29 (1), 275-278, 2008.
- Vivek, A., DeFouw, J. D., Daehn, G. S., Dynamic compaction of titanium powder by vaporizing foil actuator assisted shearing, Powder Technology, 254, 181-186, 2014.
- Vivek, A., Hansen, S. R., Liu, B. C., Daehn, G. S., Vaporizing foil actuator: a tool for collision welding, Journal of Materials Processing Technology, 213 (12), 2304-2311, 2013.
- Okagawa, K., Aizawa, T., Impact seam welding with magnetic pressure for aluminum sheets, Materials Science Forum, 465-466, 231-236, 2004.
- Ufferman, B., Process development of the vaporizing foil actuator welding technique, Graduate Program Dissertation, Materials Science and Engineering, The Ohio State University, ABD, 2020.
- Kakizaki, S., Watanabe, M., Kumai, S., Simulation and experimental analysis of metal jet emission and weld interface morphology in impact welding, Materials Transactions, 52 (5), 1003-1008, 2011.
- Wang H, Wang Y., High-velocity impact welding process: a review, Metals, 9 (2),144, 2019.
- Hansen, S. R., Vivek, A., Daehn, G. S., Impact welding of aluminum alloys 6061 and 5052 by vaporizing foil actuators: heat-affected zone size and peel strength, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 137 (5).1- 6, 2015.
- Akın, M., Uçuş kontrol sisteminde elektrik tahrik etkilerinin performans analizi, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık Anabilim Dalı, Ocak, Kayseri, 2019.
- Vivek A., Brune, R.C., Hansen, S.R., Daehn, G.S., Vaporizing foil actuator used for impulse forming and embossing of titanium and aluminum alloys, Journal of Materials Processing Technology, 214 (4), 865-875, 2014.
- Liu, B., Vivek, A., Lin, W., Prothe, C., Daehn, G. S., Solid-state dissimilar joining of Ti-Fe with Nb and Cu interlayers, Weld. J, 94 (7), 219-224, 2015.
- Vivek, A., Taber, G.A., Johnson, J.R., Woodward, S.T., Daehn, G.S., Electrically driven plasma via vaporization of metallic conductors: a tool for impulse metal working, Journal of Materials Processing Technology, 213 (8), 1311-1326, 2013.
- Jeong, Y., Shin, G., Woong, C., Kim, J. H., Yoon, J., Dissimilar materials welding with a standoff-free vaporizing foil actuator between trip 1180 steel sheets and AA5052 alloy, Materials, 14 (17), 4969, 2021.
- Chen, S., Huo, X., Guo, C., Wei, X., Huang, J., Yang, J., Lin, S., Interfacial characteristics of Ti/Al joint by vaporizing foil actuator welding, Journal of Materials Processing Technology, 263, 73-81, 2019.
- Kore, S. D., Date, P. P., Kulkarni, S. V., Electromagnetic impact welding of aluminum to stainless steel sheets, Journal of materials processing technology, 208 (1-3), 486-493, 2008.
- Mao, Y., Kapil, A., Thurston, B., Taber, G., Vivek, A., Daehn, G. S., Impact spot welding of aluminum alloy 5052-H32 to dual phase 590 steel by vaporizing foil actuator, International Automotive Body Congress 2016, Dearborn, Michigan, 2016.
- Hahn, M., Weddeling, C., Taber, G., Vivek, A., Daehn, G. S., Tekkaya, A. E., Vaporizing foil actuator welding as a competing technology to magnetic pulse welding, Journal of Materials Processing Technology, 230, 8-20, 2016.
- Gong, M., Lai, Z., Zhang, C., Xu, W., Li, C., Geng, H., Li, X., Cao, Q., Han, X., Liang, L., Water-augmented vaporizing foil actuator welding: process performance and mechanisms clarifications, Journal of Materials Processing Technology, 318, 118040, 2023.
- Kawano, R., Tanaka, S., Inao, D., Hokamoto, K., Acceleration of metal plates by hybridization of electrical and chemical energy for potential application in high-velocity impact welding, Journal of Materials Processing Technology, 318, 118014, 2023.
- Vivek A., Hansen, S.R., Daehn, G.S., High strain rate metalworking with vaporizing foil actuator: control of flyer velocity by varying input energy and foil thickness, Review of Scientific Instruments, 85, 075101, 2014.
- Hansen, S.T., Vaporizing foil actuator process parameters: input characteristics, energy deposition, and pressure output, Graduate Program Dissertation, Materials Science And Engineering, The Ohio State University, ABD, 2018.
- Zhou, Y., Li, C., Wang, X., Liao, Z., Shi, X., Yao, C., Investigation of flyer plate dynamic behavior in electromagnetic pulse welding, Journal of Manufacturing Processes, 68, 189-197, 2021.
- Özada Ç., Ünal M., Yazıcı M., Supercapacitor: fundamentals and materials, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39 (2), 1315-1332, 2024.
- Aslanlar, S., Elektrik ark kaynağı ve gaz eritme kaynak teknolojisi ders notları, T.C. Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Kaynak Teknolojisi ve Uygulamaları, Şubat 2009, <http://www.kocaelimakine.com/wp-content/uploads/2013/04/kaynak-teknolojisi-salim-aslanlar.pdf>, Son erişim tarihi 07.06. 2023.
- Jiang, K., Li, H., Ye, X., Lei, Y., Lao, K. W., Zhang, S., Hu, X., Energy efficiency evaluation and revenue distribution of dc power distribution systems in nearly zero energy buildings, Energies, 15 (15), 5726, 2022.
- Önder, G. T., Külekçi, M. K., Aluminum forming by vaporizing foil actuator welding, Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering, 38 (4), 993-1003, 2023.
- Vivek, A., Liu, B. C., Hansen, S. R., Daehn, G. S., Accessing collision welding process window for titanium/copper welds with vaporizing foil actuators and grooved targets, Journal of Materials Processing Technology, 214 (8), 1583-1589, 2014.
- Lee, T., Zhang, S., Vivek, A., Kinsey, B., Daehn, G., Flyer thickness effect in the impact welding of aluminum to steel, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 140 (12), 2018.
- Du, F., Deng, L., Wang, X., Zhang, M., Jin, J., Zhang, J., Study on interfacial characteristics and properties of NiTi/Al-Mg joint by vaporizing foil actuator welding, Journal of Materials Research and Technology, 20, 3429-3440, 2022.
- Zhang, Y., Babu, S. S., Prothe, C., Blakely, M., Kwasegroch, J., LaHa, M., Daehn, G. S., Application of high velocity impact welding at varied different length scales, Journal of Materials Processing Technology, 211 (5), 944-952, 2011.
- Vivek, A., Presley, M., Flores, K.M., Hutchinson N.H., Daehn, G.S., Solid state impact welding of BMG and copper by vaporizing foil

- actuator welding, *Materials Science and Engineering: A*, 634, 14 May., 14-19, 2015.
41. Cheng, J., Hu, X., Sun, X., Vivek, A., Daehn, G., Cullen, D., Multi-scale characterization and simulation of impact welding between immiscible Mg/steel alloys, *Journal of Materials Science & Technology*, 59, 149-163, 2020.
 42. Zhang, S., Lueg-Althoff, J., Hahn, M., Tekkaya, A. E., Kinsey, B., Effect of process parameters on wavy interfacial morphology during magnetic pulse welding, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 143 (1), 011010, 2021.
 43. Nirudhoddi, B. S., Prasad, K. S., Vivek, A., Daehn, G. S., High strength welds in titanium & nickel based alloys by impact welding—a practical method, *Journal of Advanced Joining Processes*, 3, 100056, 2021.
 44. Yu, H., Dang, H., Qiu, Y., Zhang, W., Effects of key parameters on magnetic pulse welding of 5A02 tube and SS304 tube, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 110, 2529-2540, 2020.
 45. Yu, H., Tong, Y., Magnetic pulse welding of aluminum to steel using uniform pressure electromagnetic actuator, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 91, 2257-2265, 2017.
 46. Lee, K. J., Kumai, S., Arai, T., Aizawa, T., Interfacial microstructure and strength of steel/aluminum alloy lap joint fabricated by magnetic pressure seam welding, *Materials Science and Engineering: A*, 471 (1-2), 95-101, 2007.
 47. Su, S., Chen, S., Mao, Y., Xiao, J., Vivek, A., Daehn, G., Joining aluminium alloy 5A06 to stainless steel 321 by vaporizing foil actuators welding with an interlayer, *Metals*, 9 (1), 43, 2019.
 48. Lee, T., Zhang, S., Vivek, A., Daehn, G., Kinsey, B., Wave formation in impact welding: study of the Cu-Ti system, *CIRP Annals*, 68 (1), 261-264, 2019.

