



## **Recent Advanced Welding Techniques for Magnesium Alloys**

Fatmagül TOLUN<sup>1</sup>

### **Keywords**

Mg alloys, Welding,  
Manufacturing.

### **Abstract**

In recent years, the industrial production of magnesium alloys has increased by about 20% per year. Magnesium alloys are low density and excellent specific strength and high recycling ability. It may be the most preferred green material in the manufacturing industry. Research and development of the welding process for joining magnesium alloy sheets is of great importance for wide industrial application. Due to the wide application of magnesium alloys in metal fabrication, it is very important to use a reliable method to combine these reactive metals together and into other alloys. Increased interest in the use of magnesium alloys in the manufacturing industry, which requires more attention to alternative welding methods. This presentation aims and review recent developments and advances in welding techniques for Magnesium alloys.

### **Article History**

Received  
28 Nov, 2020  
Accepted  
30 Dec, 2020

## **Magnezyum Alaşımları için Geliştirilmiş Kaynak Teknikleri**

### **Anahtar Kelimeler**

Mg alaşımları,  
Kaynak, İmalat.

### **Özet**

Son yıllarda, magnezyum alaşımlarının endüstriyel üretimi yılda yaklaşık % 20 artmıştır. Magnezyum alaşımları düşük yoğunluklu ve mükemmel özgül mukavemet ve yüksek geri dönüşüm kabiliyetine sahiptir. Bu nedenle imalat sanayinde en çok tercih edilen yeşil malzeme olabilir. Magnezyum alaşımlı levhaların birleştirilmesi için kaynak işleminin araştırılması ve geliştirilmesi, geniş endüstriyel uygulamalar için büyük önem taşımaktadır. Metal imalatında magnezyum alaşımlarının geniş uygulama alanı nedeniyle, bu reaktif metalleri bir arada ve diğer alaşımlar halinde birleştirmek için güvenilir bir yöntem kullanmak çok önemlidir. İmalat endüstrisinde magnezyum alaşımlarının kullanımına olan ilginin artması, alternatif kaynak yöntemlerine daha fazla dikkat edilmesini gerektirir. Bu tebliğ, magnezyum alaşımları için kaynak tekniklerindeki son gelişmeleri ve ilerlemeleri gözden geçirmeyi amaçlamaktadır.

### **Makale Geçmişi**

Alınan Tarih  
28 Kasım 2020  
Kabul Tarihi  
30 Aralık 2020

### **1. Giriş**

Magnezyum, yeryüzünde en bol bulunan altıncı element olup dünyanın bileşiminin yaklaşık % 2,5'ini oluşturur (Cao vd., 2006). Magnezyum alaşımları düşük yoğunluğa, yüksek özgül mukavemete ve mükemmel geri dönüştürülebilirliğe sahip olduklarından, son yıllarda çeşitli endüstriyel uygulamalarda artan bir ilgi kazanmıştır (Sun vd., 2009). Son zamanlarda, "ECO Mg" adı verilen alaşımlar, geleneksel Mg alaşımlarına CaO eklenerek üretilmektedir (Kang vd., 2016).

<sup>1</sup> Corresponding Author. ORCID: 0000-0001-7784-9115. Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi, ftolun@balikesir.edu.tr

Magnezyum ve alaşımları, son yıllarda otomotiv, uçak ve havacılık endüstrilerinde giderek daha önemli bir rol oynamaktadır (Prasanna vd., 2016; Kramar vd., 2016).

Magnezyum ve alüminyum, yapısal özelliklerinden dolayı hem daha hafif hale getirmek hem de yakıt ekonomisi için otomobil ağırlığını azaltmak ve emisyon düzenlemelerini azaltmak için çelik yerine kullanılabilen alternatif malzemelerdir. Alüminyum ve magnezyumun yoğunlukları sırasıyla 2,7 g/cm<sup>3</sup> ve 1,74 g/cm<sup>3</sup> olup ve 7,86 g/cm<sup>3</sup> yoğunlukta olan çelikten daha hafiftir.

Ancak alüminyum kaynakları ve üretimi genellikle yüksek hacimli üretim için sınırlıdır (Kayode ve Akinlabi, 2019; Serindağ ve Kiral, 2017). Magnezyumun çeliğe ve çinkoya göre %75, alüminyuma göre %33 daha hafif olması birçok endüstride yapı malzemesi olarak kullanılmasını sağlamaktadır (Çay vd., 2017; Chen ve Nakata, 2009). Alternatif malzemelerin kullanımına kıyasla, magnezyum alaşımlarının kullanımı ağırlıkta %22 ila %70 azalma sağlar (Prasanna vd., 2016).

Magnezyum alaşımları, düşük yoğunlukları ve yüksek özgül mukavemetleri nedeniyle ilginç mühendislik malzemeleridir (Liao vd., 2014). Magnezyumun yapısal özellikleri onu çeşitli endüstriyel uygulamalar için mükemmel bir seçenek haline getirmektedir (Ma vd., 2018). Magnezyum alaşımlarının kullanımının yaygınlaştırılması için diğer malzemelerle kaynak yapılması büyük önem taşımaktadır (Torun ve Çelikyürek, 2019). Uygulanacak kaynak yöntemi ve elde edilen malzemenin performansı, bu malzemenin yapısal özelliklerinin korunması ve iyileştirilmesi açısından önemlidir (Alzahougi, 2017).

Magnezyum alaşımları, döküm ve dövme alaşımlar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Ancak günümüzde magnezyum alaşımları tipik olarak döküm alaşımları olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, dövme alaşımlarla ilgili araştırmalar son on yılda artış göstermektedir. Magnezyum alaşımları az miktarda alüminyum, manganez, çinko, zirkonyum vb. içeren hafif çeliklerinkine eşit bir mukavemete sahiptir (Sharma vd., 2019). İstatistiksel olarak, magnezyum alaşımlarının %90'ından fazlası, özellikle çeşitli kalıp döküm işlemleriyle döküm yoluyla üretilir (Prasanna vd., 2016).

Füzyon kaynağı, benzer metalleri birleştirmek için kullanılan geleneksel bir işlemdir (Cooke vd., 2020). Magnezyum alaşımları lazer kaynağı, metal inert gaz (MIG) kaynağı ve tungsten inert gaz (TIG) kaynağı gibi geleneksel eriyik kaynağı yöntemleriyle kaynaklanabilir. Ayrıca bu alaşımlar difüzyon kaynağı, punta kaynağı, sürtünme karıştırma kaynağı gibi katı hal kaynak yöntemleri ile kaynak yapılabilmektedir (Çelikyürek ve Önal, 2016).

Sıcak çatlama, magnezyum alaşımlarının kaynağında en büyük sorunlardan biri olarak bilinir. Füzyon esaslı kaynak yöntemleri, bu malzemelerin yüksek ısı genleşmesi sonucu kaynak dikişinde çatlamalara neden olabilmektedir (Özdemir vd., 2007). Magnezyum alaşımlarının uygulama alanlarını daha da genişletmek için yüksek performanslı kaynak teknolojileri gereklidir (Liu vd., 2018). Magnezyum alaşımlarının kaynaklanabilirliği, yani endüstrinin talep ve gereksinimlerini karşılamak için kaynakla eklemler oluşturması, alaşım üreticileri tarafından ele alınmalıdır (Kierzek ve Adamiec, 2011). Bu tebliğin amacı, magnezyum alaşımları için kullanılan kaynak teknolojilerindeki son gelişmeleri gözden geçirmek ve daha fazla araştırma için bir temel sağlamaktır.

## 2. Magnezyum Alaşımaları için Kaynak Teknikleri

Magnezyum alaşımlarının kaynaklanabilirliği, düşük erime sıcaklıkları, yüksek ısı genleşme katsayısı ve yüksek ısıl iletkenlik gibi malzeme özelliklerinden dolayı zayıf ve doğal olarak zordur (Hongfeng vd., 2019). Magnezyum alaşımları yaklaşık 420-620 °C gibi nispeten geniş bir donma aralığına sahip olduğundan, herhangi bir eritme kaynağı işlemi sırasında önemli bir sıcak çatlama riski vardır. Magnezyum alaşımlarının ve çeliğin katı hal birleşmesi hem ultrasonik hem de sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılabilir (Casalino vd., 2017). Magnezyum alaşımlarının temel kaynaklanabilirlik sorunlarını anlamak ve üstesinden gelmek için bilimsel araştırmalara ihtiyaç vardır (Asadi vd., 2012). Böyle bir işlemin zorluklarından dolayı, tüm magnezyum kaynak işlemleri, inert gaz korumalı tungsten inert gaz veya metal inert gaz prosesleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Son gelişmeler, katı hal kaynak tekniği için sürtünme karıştırma kaynağı, difüzyon kaynağı, sürtünme karıştırma nokta kaynağı ve direnç punta kaynağı üzerine odaklanmıştır (Çelikyürek ve Önal, 2016).

### 2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK)

Katı hal kaynak yöntemi olarak SKK, magnezyum alaşımlarının birleştirilmesinde önemli avantajlara sahiptir (Ma vd., 2018). FSW, ilk olarak 1991'de The Welding Institute (TWI) tarafından icat edilen yenilikçi bir katı hal kaynak tekniğidir (Prasanna vd., 2016).

Proses optimizasyonu, maliyet etkinliği ve ekolojik etkiye olan ihtiyaçtan kaynaklanan endüstriyel kaynak prosesleri hızla gelişmektedir. Bu nedenlerden dolayı SKK, otomobil, havacılık ve mekanik endüstrilerinde hızla kullanılabilir hale gelmiştir. SKK prensibi, mekanik enerjinin, genellikle kaynak yapılacak malzeme üzerine vidalanan aletin ürettiği sürtünme ile termal enerjiye dönüştürülmesine dayanır. Bu, yüksek hızda döndürülen profilli ve dişli bir uca sahip metal bir silindirden oluşur. Takım pimi, kaynaklanacak iki tabaka arasındaki arayüzde eklem düzlemine nüfuz eder. Bu süreçte malzemenin erime noktasına ulaşılmamaktadır (Kouadri-Henni vd., 2016). Bir SKK bağlantısının kalitesi her zaman diğer ergitme kaynağı işlemlerinden daha iyidir (Prasanna vd., 2016). SKK yöntemi hiçbir zararlı madde, gaz vb. içermez. Serbest ve yeşil bir kaynak teknolojisidir (Hongfeng vd., 2019). Magnezyum alaşımlarında SKK kullanımı, büyük endüstrilerde birçok potansiyel uygulamaya sahiptir (Singh vd., 2018).

SKK işleminin mikroyapısal özellikler üzerindeki etkisini belirlemek ve kaynakların mekanik özelliklerini değerlendirmek için AZ91D magnezyum alaşımı üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada 4 mm kalınlığında AZ91D plakalar kullanılmış ve kaynak bölgesinin mikroyapısal gelişimi optik ve taramalı elektron mikroskopları kullanılarak incelenmiştir. 115 ila 131 rad/s takım dönüş hızları aralığında 187 mm/dak. ilerleme hızı altında iyi kalitede kare alın kaynaklı bağlantı elde edilmiştir. Kaynakların yakınındaki mikroyapı, orijinal dendrit tanecik yapısına sahip olmayan ince eş eksenli tanelere sahip SZ (Stir Zone), TMAZ (Thermo-Mechanically Affected Zone), HAZ (Heat Affected Zone) ve baz metalden oluşmaktadır. Her bölgenin mikroyapısı, termal ve mekanik koşullara bağlı olarak çok farklı özellikler göstermiştir. Sertlik testleri, karıştırma bölgesinde muntazam dağılmış ve hafifçe artmış sertlik göstermiştir (Lee vd., 2003). AZ91 magnezyum

alaşımı, sürekli tahrik edilen bir sürtünmeli kaynak makinesi uygulanarak birleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kaynak arayüzlerinin matrizen daha yüksek sertliğe sahip olduğu ve artan basınç ve hız ile kaynak arayüzlerinin kesme dayanımlarının arttığı, zamanın farklı etkisinin olduğu belirlenmiştir. Bu sürtünme kaynağı koşulları için, 1000 rpm sürtünme hızı, 50 MPa sürtünme basıncı ve 15 sn sürtünme süresi veya 1000 rpm sürtünme hızı, 75 MPa sürtünme basıncı ve 10 sn sürtünme süresi en uygun kaynak koşullarıdır. Çünkü bu koşullar için kaynakların ölçülen mukavemetleri en yüksek ve baz alaşıma çok yakın bulunmuştur (Çelikyürek ve Önal, 2016).

SKK magnezyum alaşımlarının (AZ31) artık streslerini değerlendirmek için bir çalışma yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, SKK işlemlerinin malzemede farklı mekanik özelliklere sahip birkaç farklı bölgenin oluşumuna yol açtığını göstermektedir. SKK işlemi kimyasal değişikliklere ve önemli faz değişikliklerine neden olmamıştır. Ek olarak kaynaklı bölge, analiz edilen bölgeye bağlı olarak artık çekme gerilmeleri ve heterojenlik ile karakterize edilmiştir. Eklem ilerleyen ve geri çekilen tarafları arasındaki gerilmelerin asimetrisi, kaynağın bir tarafındaki daha yüksek plastik kuvvete bağlanabilir ve bu SKK işleminin doğasında bulunmaktadır (Kouadri-Henni vd., 2016).

Haddelenmiş AZ31B magnezyum levhaların kaynaklanabilirliği SKK kullanılarak araştırılmıştır. Örnekler, 1500, 2300 rpm dönme hızları ve 100,160 ve 190 mm/dakika çevirme hızları gibi farklı kaynak parametrelerinde kaynaklanmıştır. Bu çalışmada, 5 mm kalınlığındaki AZ31B magnezyum alaşımlı levhalar, SKK yöntemi kullanılarak farklı devir değerleri ve ilerleme hızlarında başarıyla birleştirilmiştir. SKK ile birleştirilen numunelerin kaynak dikişi görüntüsünün diğer kaynak yöntemlerine göre çok daha düzgün olduğu ve herhangi bir talaşlı işleme gerekmediği görülmüştür. SKK'da AZ31B magnezyum alaşımının tüm örneklerinde kaynak hatası (boşluk) oluşmuştur. Çekme testi sonuçları incelendiğinde, kırıkların genellikle TMAZ ile ısıdan HAZ arasındaki bölgelerde meydana geldiği görülmüştür (Çay vd., 2017).

Başka bir çalışmada da Fe3Al ve AZ91 magnezyum alaşımları SKK yöntemi ile kaynaklanmıştır. Numuneler, 8 mm ve 40 mm uzunluğa sahip silindirik bir forma işlenmiştir. SKK işlemleri, 12 sn sürtünme süresi, 100 MPa sürtünme basıncı, 10 sn sürtünme süresi ve 1000 rpm dönüş hızı altında 20, 40 ve 60 MPa sürtünme basınçları için gerçekleştirilmiştir. Sürtünme kaynağı işlemi için sürekli tahrikli sürtünme kaynağı kullanılmıştır. AZ91 magnezyum ve Fe3Al alaşımlarının sürtünme kaynaklı kaynak arayüzleri, herhangi bir çatlak veya gözenek olmaksızın pürüzsüz bir morfolojiye sahiptir. Kaynak yapılan numunelerin arayüzlerinde difüzyon bölgesi oluşmuştur. Kaynak arayüzlerinin mikro sertlik ölçümleri, sertlik değerlerinin kaynak arayüzünde farklı olduğunu göstermiştir (Torun ve Çelikyürek, 2019).

Araştırmada, saf magnezyum ve polipropilenin tatmin edici bir karışımına sahip bir hibrit eklem, SKK aracılığıyla bir bindirmeli eklem konfigürasyonunda elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan takım dönme ve ilerleme hızları sırasıyla 500-700 dev/dak ve 50-100 mm/dak olarak ayarlanmıştır. Sonuçlar, mekanik kilitlemenin optimum yüzde fraksiyonu (% 48) ve magnezyum oksit varlığı

nedeniyle eklemin maksimum gerilme kesme dayanımına (22,5 MPa) 700 r/dak ve 75 mm / dak'da ulaşıldığını göstermektedir. (Moghanian vd., 2019).

## 2.2. Ark Kaynağı

Ark kaynağı, otomotiv endüstrisinde düşük karbonlu ve yüksek karbonlu çeliklerle ilişkili kaynak için önemli bir kaynak tekniği olarak kabul edilir (Sharma vd., 2019). Ark kaynağı işlemlerinin, magnezyum alaşımlarını kaynaklamak için yaygın olarak kullanma nedeni, gerekli ekipmanın yaygın olarak bulunması, nispeten ucuz olması ve köklü bir bilgi tabanına sahip olmasıdır (Czerwinski, 2010). TIG ve MIG, magnezyum kaynağı için en yaygın kullanılan ark tabanlı kaynak yöntemleridir (Kapustka, 2015).

MIG ark kaynağı yöntemi genellikle mühendislik uygulamalarında kullanılsa da bu kaynak işlemi ile magnezyum alaşımlarının kaynaklanması sırasında kaynak gerilimi ve çatlama hassasiyeti daha yüksektir (Sun vd., 2009). Son yıllarda, magnezyum alaşımlarının MIG ark kaynağı için kaynak güç kaynakları ve dolgu malzemeleri alanlarında büyük ilerleme kaydedilmiştir. Bu ilerleme, daha iyi bir kaynak işlemiyle ve dolayısıyla oldukça iyileştirilmiş kaynak sonuçlarıyla ortaya çıkmaktadır. Magnezyumun fiziksel özelliklerinden, örneğin erime noktası (600 °C) ile buharlaşma noktası (1100 °C) arasındaki dar aralık gibi birçok sorun ortaya çıkar. Dolgu malzemesine enerji girişi, tel eriyecek ancak buharlaşmayacak şekilde düzenlenmelidir (Rethmeier vd., 2004). Bir MIG sırasında, sarf malzemesi elektrotu ile kaynak yapılacak parça arasında bir ark oluşur. Hem kaynaklı alan hem de ark bölgesi bir gaz kalkanı ile korunmaktadır (Czerwinski, 2010).

2,5 mm kalınlığında ekstrüde AZ31 ve AZ61 profilleri ile yapılan deneyler ana metal üzerindeki oksit tabakasının kaynak sırasında tahrip olabileceğini göstermiştir. Wöhler yorgunluk dayanımı üzerinde hiçbir olumsuz etki oluşmamıştır (Rethmeier vd., 2004). Düşük kaynak hızı kullanıldığında (300 mm/dak) HAZ'da füzyon hattının hemen bitişiğinde sıvılaşma çatlama görülmüştür. Magnezyum alaşımlarının MIG kaynağı sırasında sıcak çatlama duyarlılığını iyileştirmek için ısı girdisinin azaltılması uygundur (Sun vd., 2009).

Bir çalışmada, ECO Mg alaşımı MIG için dolgu metali olarak kullanılmış ve kaynaklanabilirliği incelenmiştir. Dolgu metaline CaO eklenerek kaynakların gerilme mukavemeti biraz artırılmış ve bu da kaynak metalindeki azalan tane boyutundan kaynaklanmıştır. Yeni ECO Mg dolgudan oluşan bir tel ile duman azaltımı başarılı bir şekilde sağlanmıştır. Ek olarak, kararlı damlacık transferi gözlemlenmiş ve CaO katkılı Mg dolgu teli kullanılarak sıçrama bastırması beklenebilir (Kang vd., 2016).

AZ31B ve A7075-T651 alaşımları arasındaki bağlantının gaz metal ark tapası kaynağı (gas metal arc plug welding ) yöntemi adı verilen yeni bir teknikle kaynaklanarak mekanik ve metalurjik özelliklerini belirlemek için bir araştırma tasarlanmıştır. Dolgu maddesi olarak ER5356 alüminyum tel kullanılmıştır. Eklemlerin maksimum nihai gerilme mukavemeti ve darbe tokluğu, AZ31B ana alaşımınıninkinin sırasıyla %89 ve % 84'ü olmuştur. Genel olarak, eklemler ER5356 külçesinde başarısız olurken, bazıları AZ31B alaşımında başarısız olmuştur. A7075-T65 alaşımında kırılma gözlenmemiştir. Sonuç olarak, önerilen kaynak

tekniki, alüminyum ve magnezyum alaşımlarının farklı kaynaklanması için ek yerlerinin daha iyi mekanik özelliklerine olanak verebilir (Subbaiah, 2018).

TIG işlemi, birleşme alanındaki metali kaynaştırmak ve erimiş bir kaynak havuzu oluşturmak için sarf malzemesi olmayan bir tungsten elektrot ile iş parçası arasındaki bir elektrik arkının ürettiği ısıyı kullanır. Elektrot ve kaynaklı metal, genellikle argon olan bir inert gazla korunur. Ark alanı, kaynak havuzunu ve tüketmeyen (non-consumable) elektrodu korumak için inert veya indirgeyici bir gaz kalkanı ile kaplıdır. İşlem otojen olarak (dolgu olmadan) çalıştırılabilir veya oluşturulan kaynak havuzuna bir sarf malzemesi tel veya çubuk beslenerek dolgu eklenebilir (Asadi vd., 2012).

Ticari AZ31 magnezyum alaşımlı plakaların alın kaynağı, alternatif ve darbeli akım ile TIG kaynak işlemi kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, gözenekliliklerin ve homojen mikro boyutlu oksitlerin nadiren bulunduğunu göstermiştir. Hiçbir numunede çatlama görülmemiş; mekanik testlerin sonuçları, darbeli akımın, magnezyum alaşımları için alternatif akıma göre daha uygun olan daha yüksek mekanik özellikler ürettiğini göstermiştir (Demir ve Durgutlu, 2014).

Yapılan bir çalışmada, çeşitli tane boyutlarına ve oksijen içeriklerine sahip AZ31B magnezyum alaşımları, sıcak ekstrüzyon ile kombine edilmiş toz metalurjisi (P/M) ile hazırlanmış ve P/M magnezyum alaşımları TIG ark kaynağına tabi tutulmuştur. Yüksek oksijen içerikli P/M AZ31B alaşımlarının kaynak bağlantılarında gözenekler gözlenmiş; gözenekliliğin gaz bileşimi analizi, gözenekliliğin esas olarak magnezyum alaşımlarının imalatı sırasında oluşan magnezyum hidroksitinin ayrışmasından kaynaklandığını göstermiştir. Bir dolgu çubuğunun ve/veya nadir toprak elementi La içeren bir ek tabakanın kullanılması, kaynak bağlantılarında gözenekliliği azaltmaktadır. Mekanik test, P/M AZ31B alaşımlarının sağlam kaynak bağlantılarının gerilme mukavemetinin, yaygın olarak sıcak haddelenmiş AZ31B alaşımının kaynak bağlantısı ile aynı seviyede olduğunu göstermektedir (Liao ve diğerleri, 2014).

Hem AA5083-H321 hem de %0,30 civarında Scandium alaşımları içeren Dökme Al-Mg-Sc üzerinde 5 mm kalınlığındaki TIG boncuk plaka kaynaklarının mekanik özellikleri üzerinde bir çalışma gerçekleştirilmiştir. İşlenmiş alaşımda skandiyum içermeyen gevrek dendritler, akma gerilimini çok düşük bir seviyeye düşürmüştür. Dökme Al-Mg-Sc alaşımı TIG kaynaklı bağlantıda oluşan çok ince taneler ve oluşan dendritik olmayan tanelerin doğası, akma geriliminin artmasından sorumludur. Dökme skandiyum katkılı alüminyum-magnezyum alaşımlı plakaların kaynak gerilme özelliklerinin dövme alaşım plakadan daha iyi olduğu bulunmuştur (Subbaiah, 2018).

### **2.3. Lazer Kaynağı**

Magnezyumun lazer kaynağı, diğer metallerde olduğu gibi aynı potansiyel avantajlara sahiptir. Aslında magnezyum, lazer ışını ile iyi bir bağlantı ve ilk bağlantı için düşük bir eşik enerji yoğunluğu ile özellikle lazer kaynağı için uygun görünmektedir; Hassas alaşımlarda çatlama önlemeye yardımcı olmak için daha düşük hızlar gerekli olabilir (Fransa ve Freeman, 2001). Lazer kaynağın ana avantajlarından biri, diğer ergitme kaynak işlemlerine kıyasla nispeten yüksek kaynak hızıdır. Lazerin yoğunluğu yüksek olduğundan (odakta güç/ışın alanı),

diğer kaynak yöntemlerine kıyasla daha düşük bir ısı girdisi kullanılarak daha yüksek bir derinlik elde edilebilir (Liu vd., 2014).

Magnezyum alaşımlarının kaynaklanabilirliğini araştırmak için 10.6 ve 1.06 µm dalga boylarına sahip iki ana lazer türü olan CO2 ve Nd:YAG kullanılmıştır. CO2 lazer, yüksek güç çıkışına, yüksek verime, kanıtlanmış güvenilirliğe ve güvenliğe sahiptir. Magnezyum alaşımlarının kaynaklanabilirliğinin kısa dalga boyu nedeniyle Nd:YAG lazer ile önemli ölçüde daha iyi olduğu belirlenmiştir (Asadi vd., 2012; Cao vd., 2006).

Yapılan bir çalışmada, bir AZ31B magnezyum alaşımı, altı eksenli bir kaynak robotuna bağlı düşük güçlü darbeli bir Nd:YAG lazer kullanılarak kaynaklanmıştır. AZ31B alaşımlı bağlantının enine kesit mikro yapısı, füzyon bölgesinin merkezindeki baz metal, sütunlu-tanecikli bölge ve eş eksenli-taneli bölgeden oluşmuştur. Füzyon bölgesinde bazı gözenekler gözlenmiş ve baz metalde önceden var olan gözeneklerle ilgili olduğuna inanılıyordu. Özellikle, FZ'nin enine kesitinde gözlemlenen birçok sütunlu tanenin katı-füzyon sınırına neredeyse dik olduğu kaydedilmiştir. Bununla birlikte, Füzyon bölgesinin üst yüzeyinde çok sayıda ince eş eksenli tanecik oluşmuş ve bariz rastgele yönelimler sergilemiştir (Liu vd., 2018).

Lazer Işını Kaynağı (Laser Beam Welding), ısı kaynağı olarak lazer adı verilen hareketli yüksek yoğunluklu (105 ila 107 W/cm<sup>2</sup>) tutarlı bir optik enerji kaynağı kullanan bir kaynak yöntemidir. Lazer kaynağı odaklı lazer ışığı, yüksek enerji yoğunluğu sağlar ve oda atmosferinde kullanılabilir. Magnezyum alaşımları, lazer ışınlarının düşük emiciliği, güçlü oksidasyon eğilimi, yüksek ısıl iletkenlik, yüksek termal genleşme katsayısı, düşük erime ve kaynama sıcaklıkları, geniş katılma sıcaklık aralığı, yüksek katılma büzülmesi, düşük erime noktalı bileşenler, düşük viskozite, düşük yüzey gerilimleri, sıvı hidrojen için yüksek çözünürlük ve erime noktası sıcaklığında renk bozulması olmaması gibi özellikleriyle dikkat çekmektedir. Yukarıda belirtilen sorunlara rağmen lazer kaynağı, yüksek kaynak hızına sahip çok dar bağlantılar, daha küçük ısıdan etkilenen bölge (HAZ) nedeniyle kaynak teknolojileri arasında cazip ve tercih edilen bir eritme işlemi olarak kabul edilmiştir (Asadi vd., 2012).

Hibrit Lazer Işını Kaynağı (Hybrid Laser Beam Welding), bir lazer ışını kaynağı ile ek bir ikincil ışın kaynağı veya başka bir birleştirme tekniği kombinasyonu olarak tanımlanır. Kaynak için hibrit ısı kaynaklarının kullanımı nispeten yeni ve büyük ilgi gören bir yöntemdir. AZ31 alaşımından bir hibrit lazer-TIG kaynağı (LATIG), lazer veya TIG kaynağına göre daha yüksek kaynak hızı sağlar (Liu vd., 2004). Penetrasyon derinliği, TIG için olanın iki katı ve lazer kaynağı için olanın dört katıdır. Lazerli kaynak ve yapışkan bağlamaya bir alternatif olarak, lazer sürekli kaynak bağlama adı verilen yeni bir hibrit birleştirme yöntemi geliştirilmiştir (Liu ve Xie, 2007).

#### **2.4. Magnezyum Alaşımları İçin Diğer Kaynak Teknikleri**

Direnç Punta Kaynağı (Resistans Spot Welding), otomotiv endüstrisinde metalleri birleştirmek için kullanılan ana işlemlerden biri olmakla beraber magnezyum alaşımları için yapılmamaktadır. Görünüşe göre bu yöntem alüminyum için iyi geliştirilmiş ancak magnezyum alaşımları hakkında daha fazla araştırma

gerektirmektedir (Liu vd., 2014). Direnç punta kaynağı, iki veya daha fazla metal parçanın, elektrotlar tarafından güç altında bir arada tutulan iş parçalarından elektrik akımının akışına direnç kullanılarak üretilen ısı ile yerel olarak birleştirilmesidir. Akım konsantrasyonu bölgesindeki temas yüzeyleri, kısa süreli düşük voltajlı ve yüksek amperli akım darbesiyle ısıtılır. Sonuç olarak, kaynak levhalarının arayüzünde erimiş bir havuz (kaynak külçesi) oluşur (Asadi vd., 2012; Czerwinski, 2010). Magnezyumdan alüminyuma alaşımlar için punta kaynaklar için saf nikel, altın kaplı nikel folyo ve çinko kaplı çelik gibi ara katmanların kullanımının kırılma metaller arası bileşiklerin oluşumunu bastırıldığı ve dolayısıyla eklem mukavemetini önemli ölçüde artırdığı bulunmuştur (Manladan v., 2016).

Elektron Işını Kaynağı (Electron Beam Welding), metalleri eriten ve birleştiren, birleştirilen malzemeleri bombardıman etmek, ısıtmak ve eritmek için yoğun bir yüksek hızlı elektron akışı kullanan bir işlemdir. Elektron ışını, bir tungsten katot ve yüksek vakuma yerleştirilmiş bir anottan oluşan elektron tabancası tarafından üretilir. Tipik Elektron Işını Kaynağı için kullanılan ışın akımları ve hızlanma gerilimleri sırasıyla 50–1000 mA ve 30–175 kV aralığında değişir. Yüksek yoğunluklu bir elektron ışını metali buharlaştırabilir ve kaynak sırasında anahtar deliği olan bir buhar deliği oluşturabilir. Elektron Işını Kaynağı işlemi zor kaynak için uygundur (Asadi vd., 2012).

Bir çalışmada, AZ serisi magnezyum alaşımlarının kaynak kalitesi üzerindeki önemini değerlendirmek için elektron ışını kaynağının bir dizi kaynak parametresi analiz edilmiştir. En iyi seçenekler, salınım yapmayan bir giriş, altta odaklanma ve gerilim azaltma olmaması olarak belirlenmiştir. Test edilen bir dizi alaşım arasında, kusurlar ve çökeltme dağılımı ile belirlenen kaynaklanabilirlik, AZ61, AZ91 ve AZ31 sırasını takip etmiş ve AZ61 en iyi olmuştur (Chi vd., 2006). 4000 W ila 5000 W güçte 11 mm kalınlığındaki AZ31B levhaların elektron ışını kaynağı sırasında çeşitli proses parametrelerinin etkisi incelenmiş ve genel olarak, kaynak mukavemetinin temel alaşım için olanın %90'ından fazlasına ulaştığı belirlenmiştir (Chi ve Chao, 2007).

Patlayıcı Kaynak (Explosive Welding), ısınma problemini çözen bir yöntemdir. Kaynak bağlantısının kalitesi, yapıştırma sıcaklığı ve bekletme süresinden etkilenir. Al/Mg, ısıtma ile yapıştırma arayüzünde metaller arası bileşikler oluşturma eğilimindedir. Bu bağlamda, Patlayıcı Kaynak tekniği ısınmadan kaynaklanan bu tür sorunları çözmek için kullanılabilir. Bir çalışmada, AZ31 ve Mg96Zn2Y2 Mg alaşımları üzerine ince bir Al plakasını kaynaklamak için basınç iletme ortamı olarak bir jelatin tabakası kullanan modifiye bir patlayıcı kaynak yöntemi kullanılmıştır. Mikroyapı sonuçları, arayüzde önemli bir reaksiyon olmadığını göstermiştir (Inao vd., 2020).

Ultrasonik Kaynak İşlemi; bir magnezyum alaşımının kaynaklanması ve genel olarak magnezyum alaşımlarının birleştirilmesi örneğini kullanan bir katı hal birleştirme yöntemidir. Yapılan çalışmada AZ31B magnezyum alaşımlarının ultrasonik nokta kaynağı sırasında arayüzey nispi hareketi ve ısı oluşumunu incelemek için yerinde yüksek hızlı görüntüleme ve kızılötesi termografi kullanılmıştır. Kaynak işleminin farklı aşamalarında faylanma arayüzünde yerel bağ oluşumunun evrimini incelemek için kaynak sonrası ultrasonik tahribatsız



değerlendirme yapılmış ve kaynak işlemi ilerledikçe iki ayrı aşama gözlemlenmiştir (Jian vd., 2019).

### 3. Sonuç

Son yıllarda, magnezyum alaşımlarının kaynaklanması ve birleştirilmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Magnezyum alaşımları için farklı kaynak işlemleri arasında, lazer kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı muhtemelen etkili birleştirme teknikleri olacaktır. Bazı magnezyum alaşımları ve özellikle işlenmiş malzemeler için düşük gözenekliliğe ve iyi yüzey kalitesine sahip çatlaksız lazer kaynaklı birleştirmeler elde edilebilir. Sürtünme karıştırma kaynağı, eritme şişmesinde ortaya çıkan problemlerin çoğunun üstesinden gelmiştir. Bununla birlikte, magnezyumun sınırlı şekillendirilebilirliği nedeniyle yapıştırma teknikleri tam olarak başarılı yöntemler olarak görülmesi de, magnezyum alaşımlarının başlıca kaynaklanabilirlik sorunlarını anlamak ve üstesinden gelmek için bilimsel araştırmalara hala ihtiyaç vardır.

### Kaynakça

- Alzahougi, A., Demir, B., Durgutlu, A. (2017), An investigation of the weld current characteristics on twinning and tensile strength of the AZ31 alloy sheet joint welded by GTAW, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol.4, pp 1267-1273.
- Asadi, P., Kazemi-Choobi, K., Elhami, A. (2012), Welding of Magnesium Alloys (Chapter 6), In book *New Features on Magnesium Alloys*, IntechOpen, pp.121-158.
- Cao, X., Jahazi, M., Immarigeon, J.P., Wallace, W. (2006), A review of laser welding techniques for magnesium alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, vol 171, pp. 188-204.
- Casalino, G., Guglielmi, P., Lorusso, V.D., Mortello, M., Peyre, P., Sorgente, D., (2017), Laser offset welding of AZ31B magnesium alloy to 316 stainless steel', *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 242, pp.49-59.
- Chen, Y. C. Nakata, K. (2009), Friction Stir Lap Welding of Magnesium Alloy and Zinc-Coated Steel, *Materials Transactions*, vol. 50, pp. 2598-2603.
- Chi, S. M., Chao, C.G., Liu, T.F., Wang, C.C. (2006), A study of weldability and fracture modes in electron beam weldments of AZ series magnesium alloys, *Materials Science and Engineering A*, vol. 435-436, pp. 672-680.
- Chi, C.T. and Chao, C.G. (2007), Characterization on electron beam welds and parameters for AZ31B-F extrusive plates, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 182, pp. 369-373.
- Cooke, K.O., Alhazaa, A., Atieh, A.M. (2020), Current Trends in Dissimilar Diffusion Bonding of Titanium Alloys to Stainless Steels, Aluminium and Magnesium, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 4, pp. 1-22.

- Czerwinski, F. (2010), Welding and joining of magnesium alloys, In: Magnesium Alloys - Design, Processing and Properties, chapter 21, pp. 469-490.
- Çay, V. V. Kati, N., Ozan, S., Yapıcı, V.(2017), Investigation of effects of different parameters on mechanical properties in friction stir welding of AZ31B magnesium alloy, European Journal of Technic, vol.7, pp-49-59.
- Çelikyürek, I., Önal, E. (2016), Effects of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction welded AZ91 Mg alloy. Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering, vol. 17 pp. 563 – 571.
- Demir, B. Durgutlu, A. (2014), An Investigation of TIG Welding of AZ31 Magnesium Alloy Sheets, Materials Testing, vol.56, pp 847-851.
- France, L. K. and Freeman, R. (2001), Magnesium Joining - Process Developments and Future Requirements, International Magnesium Association World Magnesium Conference 2001, Brussels, Belgium 20-22 May 2001.
- Hongfeng, W., Dunwen, Z., Shengrong, L., Weiwei, S. (2019), Analysis of metallographic structure and hardness of magnesium alloy area using friction stir welding, Advanced Composites Letters, vol.28, pp. 1-7.
- Inao, D., Mori, A., Tanaka, S., Hokamoto, K. (2020), Explosive Welding of Thin Aluminum Plate onto Magnesium Alloy Plate Using a Gelatin Layer as a Pressure-Transmitting Medium, Metals, vol. 10, pp.1-14.
- Jian, C., Yong-Chae, L., Hui, H., Zhili, F., Xin, S. (2019), Ultrasonic welding of AZ31B magnesium alloy, MRS Bulletin, United States, vol.44, p. 182.
- Kang, M., Ahn, Y., Kim, C. (2016), Gas Metal Arc Welding Using Novel CaO-Added Mg Alloy Filler Wire, Metals, vol.6, pp.1-8.
- Kapustka, N. (2015), Arc Welding of Aluminum and Magnesium', EWI , pp-1-2.
- Kayode, O., Akinlabi, E. T. (2019), An overview on joining of aluminium and magnesium alloys using friction stir welding (FSW) for automotive lightweight applications, Materials Research Express, vol.6.
- Kierzek, A., Adamiec, J. (2011), Evaluation of susceptibility to hot cracking of magnesium alloy joints in variable stiffness condition, Archive Metallurgy and Materials, vol 56,pp. 759-767.
- Kouadri-Henni, A.,Barrallier, L., Badji, R. (2016), Residual stresses of a magnesium alloy (AZ31) welded by the friction stir welding processes, MATEC Web of Conferences, 80, pp.1-7.
- Kramar, T., Vondrous, V., Kolarikova, M., Kovanda, K., Kolarik, L., Ondruska, M. (2016),Resistance spot welding of magnesium alloy AZ61, Science Journal, Vol. March, 596-599.

- Lee, W.B., Kim, J.W., Yeon, Y.M., Jung, S.B. (2003). The Joint Characteristics of Friction Stir Welded AZ91D Magnesium Alloy, *Materials Transactions*, Vol. 44, pp. 917- 923.
- Liao, L., Yamamoto, N., Nakata, N. (2014), Gas tungsten arc welding of fine-grained AZ31B magnesium alloys made by powder metallurgy, *Materials and Design*, vol 56, pp 460-467.
- Liu, L., Wang, J., Song, G. (2004), Hybrid laser-TIG welding, laser beam welding and gas tungsten arc welding of AZ31B magnesium alloy, *Materials Science and Engineering A*, vol. 381, pp. 129-133.
- Liu, L. and Xie, L. (2007), Adhesive bonding between Mg alloys and polypropylene', *Materials Technology: Advanced Performance Materials*, vol. 22, pp. 76-80.
- Liu, L., Ren, D., Liu, F. (2014). A Review of Dissimilar Welding Techniques for Magnesium Alloys to Aluminum Alloys, *Materials*, vol. 7, pp. 3735-3757.
- Liu, H., Zhou, J., Chen, Y., Li, T., Jiao, X., Yang, Y., Lin, T., Cheng, K. (2018), Characterization of AZ31B magnesium alloy joints welded with a Nd:YAG laser, *Materials and Technology*, vol. 52, pp.487-492.
- Ma, Z., Shang, Q., Ni, D., Xiao, B. (2018), Friction Stir Welding of Magnesium Alloys: A Review, *Acta Metall Sin.*, vol. 54, pp. 1597-1617.
- Manladan, S. M., Yusof, F., Ramesh, S., Fadzil, M. (2016), A review on resistance spot welding of magnesium alloys, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, pp.1805–1825.
- Moghanian, A., Paidar, M., Seyedafghahi, S.S., Ojo, O.O. (2019), Friction stir welding of pure magnesium and polypropylene in a lap-joint configuration: Microstructure and mechanical properties', *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, vol. 26, pp.766–774.
- Özdemir, N., Büyükarıslan, S., Sarsılmaz, F. (2007), Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş AA1030 Alüminyum Alaşımında Karıştırıcı Uç Profili ve İlerleme Hızının Arayüzey Mikroyapı Değişimi Üzerine Etkisi, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 19 (2007) 3 407-415.
- Prasanna, V., Kumar, A.S., Babu, P.R. (2016), Friction Stir Welding Of Magnesium Alloys – A Review, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, vol.3, pp. 111-114.
- Rethmeier, M., Kleinpeter, B., Wohlfahrt, H. (2004), MIG Welding of Magnesium Alloys Metallographic Aspects', *Welding in the World*, vol. 48, pp.28-33.
- Serindag, H.T., Kiral, B.G. (2017), Friction Stir Welding of AZ31 Magnesium Alloys – A Numerical and Experimental Study, *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol.14, pp. 113-130.

- Sharma,P., Chattopadhyaya, S., Singh, N.K. (2019), A review on magnetically supported gas metal arc welding process for magnesium alloys, *Materials Research Express*, vol. 6.
- Singh, K., Singh, G., Singh, H. (2018), Review on friction stir welding of magnesium alloys', *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 6, pp. 399-416.
- Subbaiah, K. (2018), Tungsten Inert Gas Welding of Al-Mg Alloys With and Without Scandium Addition', *Journal of Informatics and Mathematical Sciences*, vol. 10, pp. 505-513.
- Sun, D.X., Sun, D.Q., Gu, X.Y., Xuan, ZZ. (2009), Hot Cracking of Metal Inert Gas Arc Welded Magnesium Alloy AZ91D', *ISIJ International*, vol. 49 270-274.
- Torun, O., Çelikyürek, I. (2019), The Effect of the Friction Pressure on the Friction Welding of AZ91 and Fe3Al Alloys, *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, vol. 7, pp. 175-180.



Strategic Research Academy ©

---

© Copyright of Journal of Current Research on Engineering, Science and Technology (JoCREST) is the property of Strategic Research Academy and its content may not be copied or emailed to multiple sites or posted to a listserv without the copyright holder's express written permission. However, users may print, download, or email articles for individual use.