

# SÜRTÜNEN ELEMAN İLE BİRLEŞTİRME KAYNAĞININ ESASLARI

*Müge ÖZSOY<sup>\*</sup>, Erdinç KALUÇ<sup>\*\*</sup>*

*<sup>\*</sup> Mak. Müh., KO. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*

*<sup>\*\*</sup> Prof. Dr., KO. Ü. Mühendislik Fakültesi Makina Müh. Böl.*

*Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi teknolojiyle beraber gelişimi sürekli devam eden ve kaynak dünyası içinde son 10 yıldır icat bir katı faz kaynak yöntemidir. Birçok yönden sağladığı üstünlükler ile özellikle günümüzde alüminyum ve alüminyum alaşımları için yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu makalede, sürtünen eleman ile kaynak yöntemi tanıtılmış ve uygulama esasları üzerinde durulmuştur.*

**Anahtar sözcükler :** *Sürtünen eleman ile kaynak yöntemi, alüminyum ve alüminyum alaşımları*

*Friction stir welding is a solid state welding process which has been invented in the last 10 years and its improvement is still going on together developed technology. Nowadays, it has found large application areas in welding of aluminium and aluminium alloys because it provides a lot of advantages for sound and fast welding of these alloys. In this paper, friction stir welding has been introduced and dwelt on essentials of applications.*

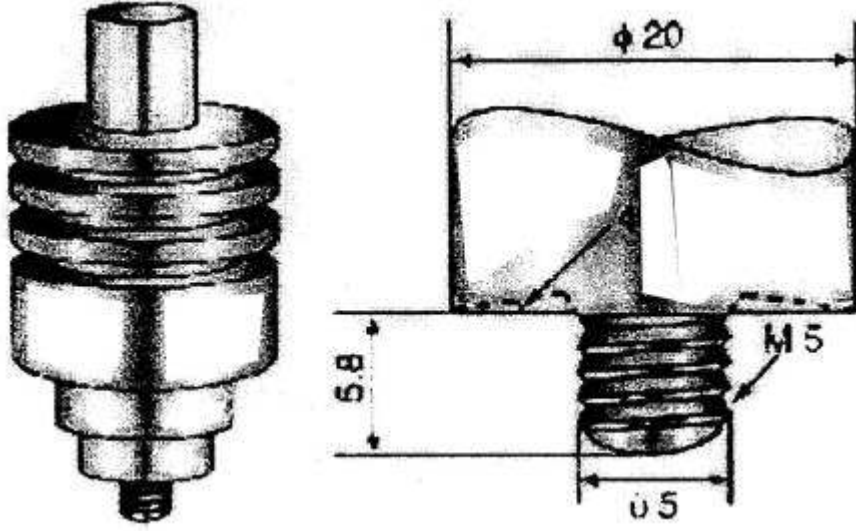
**Keywords :** *Friction stir welding, aluminium and aluminium alloys*

## GİRİŞ

Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi, geniş uygulama alanına yayılmış ve farklı geometrilerde kaynak olanağı sağlayan, 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde (TWI), W. Thomas tarafından icat edilen ve geliştirilmeye devam edilen bir katı faz kaynak yöntemidir [1,2]. Günümüze kadar İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde alüminyum ve alüminyum alaşımları için bu kaynak yöntemi ile oluşturulacak birleştirmeler üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışma sonuçları göstermektedir ki, bu yöntem gerek yaşlandırma sertleşmesi yapılmış gerekse yaşlandırma sertleşmesi yapılamayan (1xxx ve 5xxx serileri gibi) alüminyum ve alaşımlarında başarılı ve güvenli bağlantıların ortaya çıktığını göstermiştir [3,4]. Ayrıca bakır–bakır alaşımları, kurşun, titanyum–titanyum alaşımları, magnezyum–magnezyum alaşımları, metal matrisli alüminyum kompozitlerde de bu yöntemin uygulanmasına başlanmıştır [4].

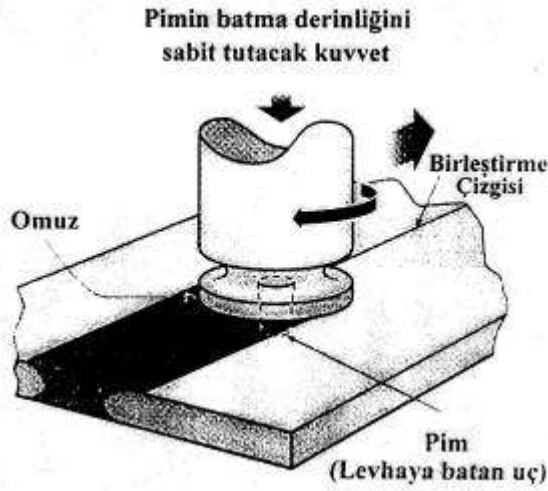
## YÖNTEMİN UYGULANMASI

Sürtünen eleman ile kaynak yöntemi, sürtünme kaynağından türetilmiştir. Kaynak edilen parçalar ergimezler bu yüzden yöntem katı faz kaynağı olarak adlandırılır [2]. Bu kaynak yöntemi alın altına sabitlenmiş iki levhaya yüksek devirde dönen omuzlu bir pimin (probe) daldırılarak kaynak yapılmak istenen uzunluk boyunca belirli bir hızda ilerletilmesinden ibarettir. Şekil 1'de yöntem için kullanılan ve özel olarak tasarlanmış pim görülmektedir [1,3].



Şekil 1. Sürtünen Eleman ile Kaynak Yönteminde Özel Olarak Tasarlanmış pim [1]

Kaynak edilecek parçalar öncelikle sabit bir yüzey üzerine yerleştirilir. Yöntemin uygulama aşaması iki farklı şekilde olabilir (Şekil 2). Parçaların hareketi söz konusu olabileceği gibi, takımın dönme ve ilerleme hareketi de mümkün olmaktadır. Pim, malzemelere temas ettiğinde sürtünme kaynağındaki duruma benzer bir durum oluşarak temas noktasında ısı, sürtünmenin de etkisiyle hızla artar ve malzemelerin plastik değişimine neden olur. Bu değişim malzemelerin akışını sağlar ve birleşme olayı gerçekleşir [2].

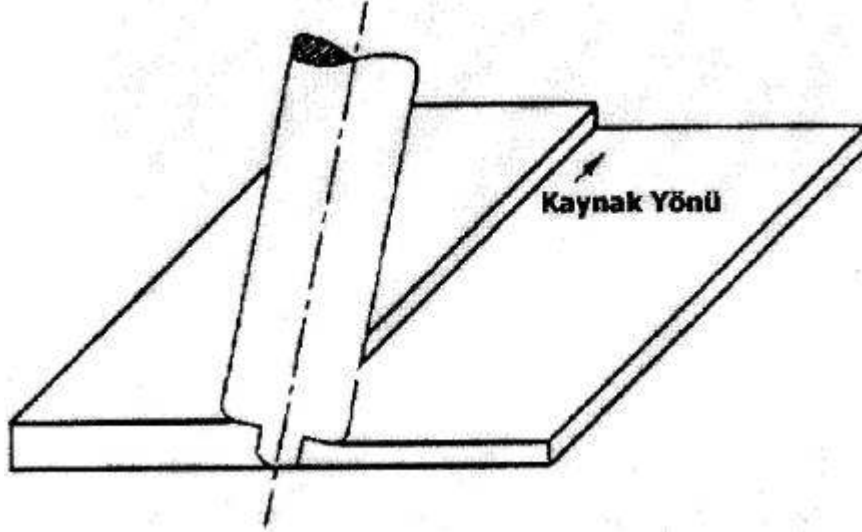


Şekil 2. Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynak Yönteminin Prensipleri [3].

Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde pahalı ekipmana, ilave tel kullanımına, koruyucu gaza ihtiyaç duyulmaması, temiz ve çevreci bir kaynak yöntemi olması yöntemin uygulama alanını genişletmektedir. İşlem radyasyon, toksik gazlar gibi olumsuz sonuçlar yaratmamaktadır [3].

## MALZEME KALINLIKLARI ve KAYNAK HIZI

Yapılan çalışmalar özellikle 2219, 2014, 6083, 6082, 7075 gibi alüminyum alaşımlarında sürtünen eleman ile kaynak yönteminin başarıyla uygulandığını ortaya koymaktadır [1]. Kaynak için kullanılan profillerin kalınlıkları 1,2 mm den 50 mm 'ye kadar çıkabilmekte ve tek paso ile sürekli kaynak bağlantısı elde etmek mümkün olmaktadır. Farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirme işlemi pimin eğik konumda levhalara daldırılması ile yapılmaktadır (Şekil 3) [3].



Şekil 3. Sürtünen Eleman ile Kaynak Yönteminde Batıcı Pimin Eğik Konumda Daldırılması ile Farklı Kalınlıklardaki Levhaların Birleştirilmesi [1].

Kaynak hızı, parça boyutuna ve alaşım cinsine göre farklılık göstermektedir. Örneğin 5 mm kalınlığındaki 6082-T6 alüminyum alaşımının kaynağında, kaynak hızı 610 mm/dakika, 30 mm kalınlığında bir levhanın tam nüfuziyetli kaynağında ise kaynak hızı yaklaşık olarak 180 mm/dakika olmaktadır [2].

## BİRLEŞTİRME TÜRLERİ

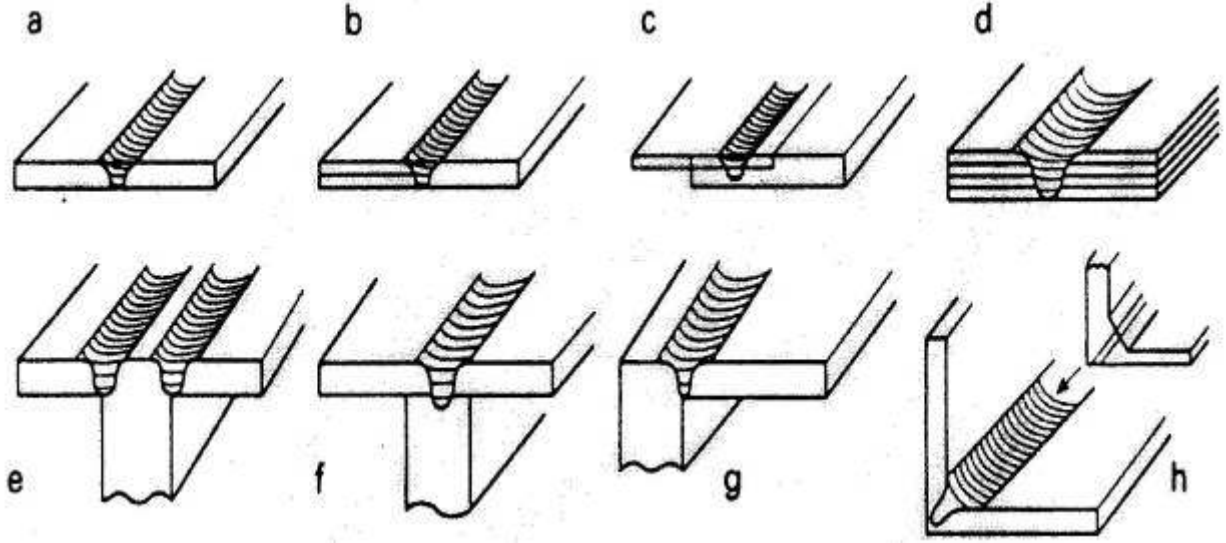
Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağında uygulanabilir birleştirme türleri ; küt alın, bindirme, T-köşe, dış ve iç köşe, boyuna ve çevresel birleştirmelerdir. Ayrıca bu yöntem yerçekiminin etkisi olmadığından tüm pozisyonlarda rahatlıkla uygulanabilir [2].

Birleştirme karakteristiklerini belirleyen üç faktör vardır. Bunlar sırasıyla pimin devir hızı, pimin ilerleme hızı ve pimin batma derinliğidir. Bunlardan ilk ikisi rahatlıkla kontrol edilebilir. Fakat pimin batma derinliği kritik bir faktör olup kontrol edilmesi güçtür. Batma derinliğinin kaynak işlemi süresince sabit kalması gerekmektedir. Fakat özellikle uzun levhaların birleştirme işlemlerinde yüzeylerin çok düzgün olmaması durumunda bunu sağlamak mümkün olmayabilir. Bu yüzden kaynak öncesi yüzey hazırlama oldukça kritik olup, bu hususta özen gösterilmesi gerekmektedir [3].

## KAYNAK GÜVENİRLİLİĞİ

Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde en önemli konu, yüksek kaynak kalitesi ve güvenilirliğidir. Kaynak operasyonu hassastır ve oluşacak hatalar mekanik olarak saptanabildiği için daha duyarlıdır. Bu bağlamda, kaynak parametrelerinin seçimi çok önemli olmaktadır. Kaynak parametreleri; kaynak dikiş kalitesine, metal alaşımın türüne, parça

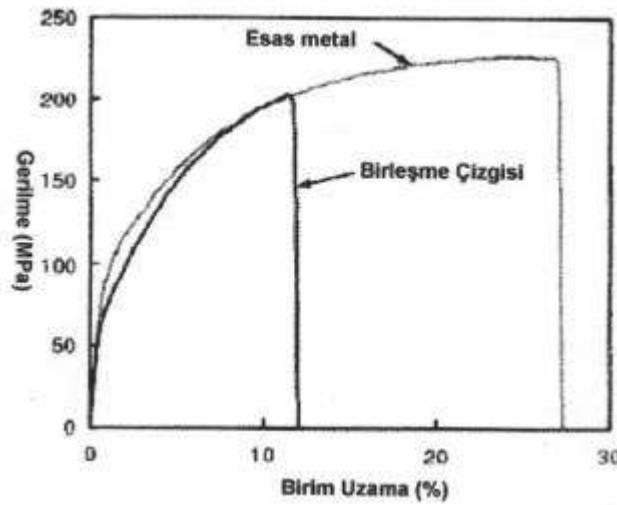
boyutlarına, çevresel mil hızına bağlıdır. Bunun yanında ortam şartları da kaynağa etki eden bir faktördür [2,5].



Şekil 4. Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynağı Uygulanarak Gerçekleştirilen Birleştirmeler. a) Küt alın Birleştirme b) Birleştirilmiş Ek ve Bindirme Birleştirme c) Bindirme d) Çoklu bindirme e) İki pasolu T- köşe birleştirme f) Tek pasolu T- köşe birleştirme g) Dış köşe birleştirme h) İç köşe birleştirme [2]

## KAYNAK BAĞLANTILARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİ ve METALLOGRAFİK YAPILARI

6 mm kalınlığında % 3 Al, % 0.9 Zn, % 0.3 Mn, % 0.003 Fe, % 0.002 Ni, % 0.002 Cu, % 0.2 Si içeren magnezyum alaşımı AZ31' in sürtünen eleman ile birleştirme kaynağı üzerine yapılmış olan bir çalışmada [1] oluşturulan bağlantının mekanik özellikleri incelenmiş ve gerilim – uzama değişimi Şekil 5’de verilmiştir. Diyagramda başlangıçta her iki gerilim hemen hemen aynı değerlerde olmaktadır. Kaynaklı bağlantının % 12’lik uzamasına karşın esas metalin daha fazla uzama gösterdiği ortaya çıkmaktadır [1].

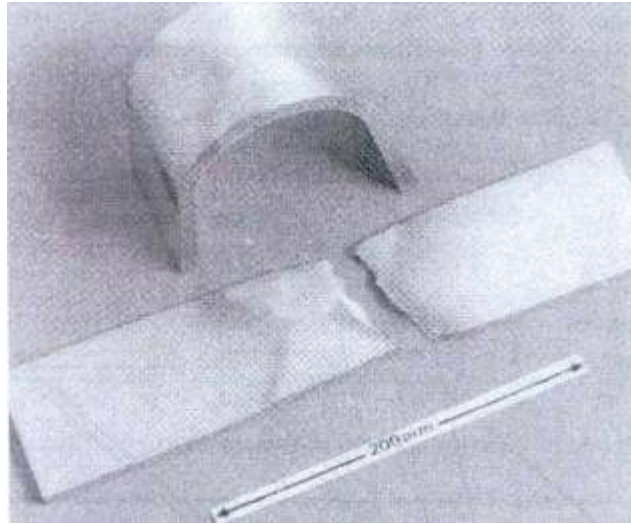


Şekil 5. Sürtünen Eleman ile Kaynak Yöntemi için Gerilim - % Uzama Diyagramı [1]

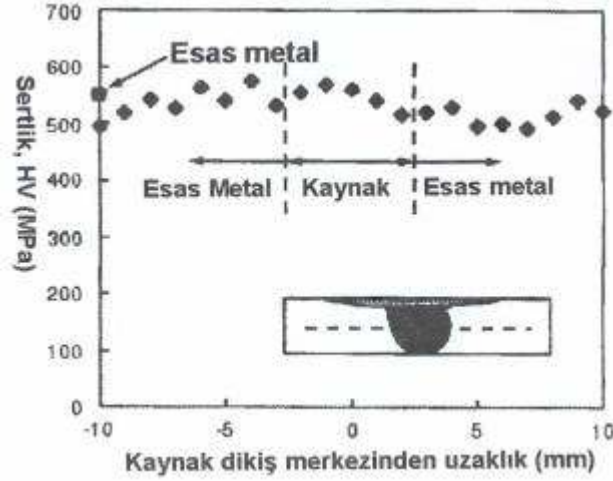
Uygun kaynak koşullarında gerçekleştirilen kaynak metali, tümüyle boşluk ve çatlaklardan arındırılmış haldedir. Sürtünen elemanla birleştirme kaynağı ergitme kaynağı ile karşılaştırıldığında birtakım üstünlükleri olduğu ortaya çıkmaktadır. Kaynak edilen malzemelerin ısıdan etkilenmesi dolayısıyla mekanik özelliklerdeki kayıp minimumdur, yöntem katı hal kaynağı olduğu için çatlak ve gözenek oluşumu gibi ergitme kaynaklarında karşılaşılan problemler söz konusu değildir, alaşım elementi yanması olmadığından kaynak metalinde alaşım elementi kaybı yoktur ve dolayısı ile alaşım bileşimi korunmuş olur. Takımın ezme, karıştırma ve dövme hareketleri sayesinde, ince taneli bir kaynak metali ve IEB (Isıdan Etkilenmiş Bölge) elde etmek olanağı vardır. Ayrıca çift taraftan kaynak yaparak kalın parçaların da birleştirilmeleri mümkündür. Bu şekilde 75 mm kalınlığındaki 6082 Al-alaşımı levhalar başarı ile çift taraftan kaynak edilmişlerdir (Şekil 6). Çekme deneyinde bu yöntem ile elde edilen kaynak numunesi ergitme kaynağından daha iyi performans göstermiştir, ayrıca 180° bükme deneyinde herhangi bir çatlama tespit edilmemiştir (Şekil 7) [2,3].



*Şekil 6. Çift Taraftan Sürtünme Kaynağı Yapılarak Birleştirilmiş 75 mm Kalınlığındaki 6082 Al – Alaşımı Levhaları [3]*



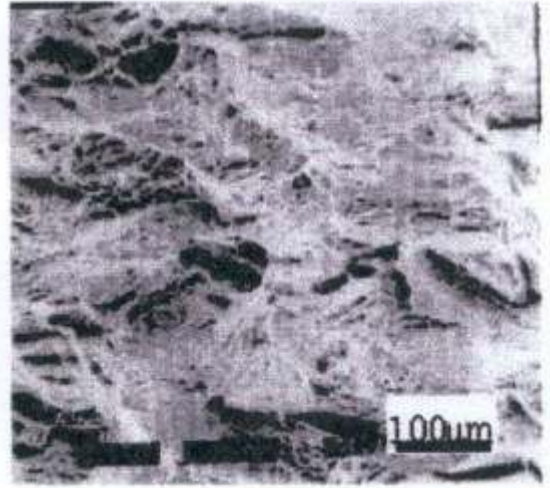
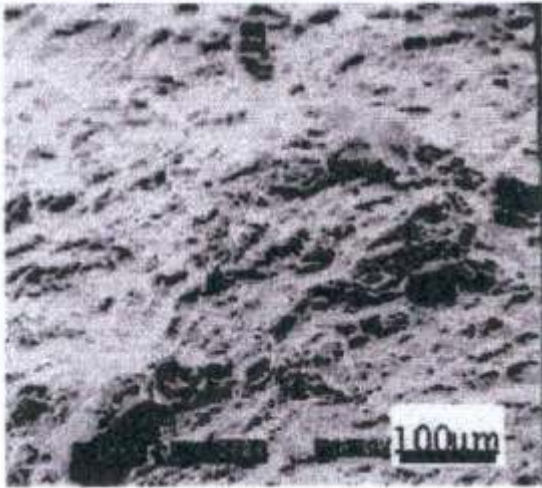
*Şekil 7. Çift Taraftan Sürtünme Kaynağı Yapılarak Birleştirilmiş 75 mm Kalınlığındaki 6082 Al – Alaşımı Levhalardan Çıkarılmış Numunelerin Çekme ve 180° Bükme Deneyi Sonuçları [3]*

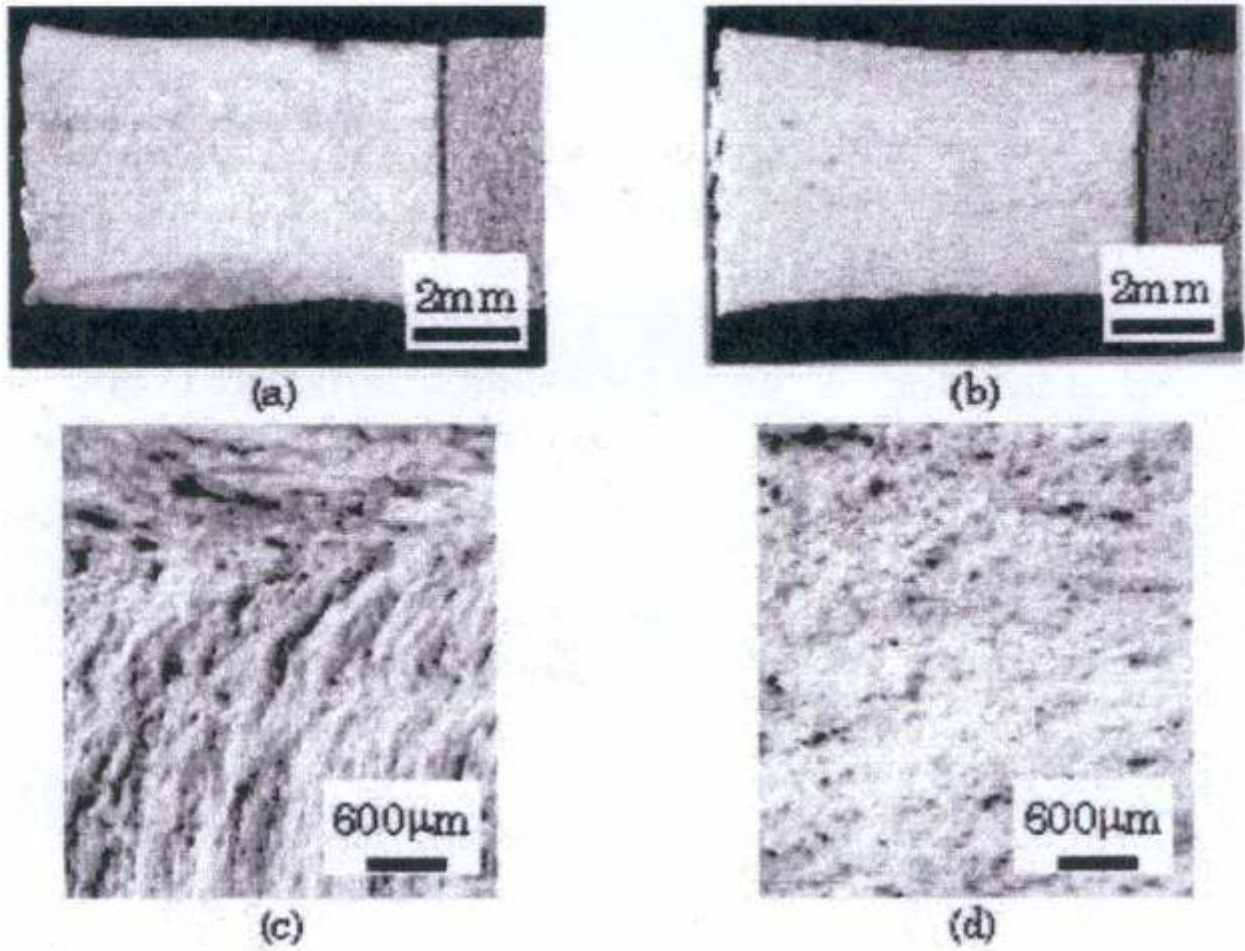


Şekil 8. Sürtünen Eleman ile Kaynakta Sertlik Dağılımı [1]

Katlama deneylerinde ise kaynak edilmiş 2014A, 5083 ve 6082 alaşımları 180<sup>0</sup> derece eğilmeye hasarsız olarak dayanabilmektedir. Dolayısıyla bu yöntem ile kaynak edilmiş parçalarda yorulma, katlama ve çekme deneylerinde çok iyi sonuçlar elde edilmiş ve diğer yöntemlerin uygulanması sonucu ortaya çıkan özelliklerden daha iyi değerlere ulaşılmıştır. Çökeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış alüminyum alaşımları sürtünen elemanla birleştirme kaynağı yapıldığında kaynak metali ve IEB'de ısıl işlem görmüş esas metale yakın sertlik değerine ulaşabilmektedir [2].

Magnezyum alaşımlarının (AZ31) sürtünen eleman ile kaynak yönteminde kaynak bölgesinde çeşitli mikroyapılar oluşmaktadır (Şekil 9).





Şekil 9. Esas Metal ve Kaynak Bölgesinde Çentik Darbe Deneyi Sonrası Yüzey Yapıları [1]

Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak bağlantılarında oluşan kaynak bölgesinde tipik bir soğan halkaları biçimine rastlanmaktadır ve kaynak metalinin biçimi çok değişken olarak oluşmaktadır ve bu biçim kaynak edilen alaşım türüne, kaynak işlem parametrelerine bağlıdır. Karmaşık biçimli kaynak metalinin uzantısı, kaynağın üst yüzeyine doğru olup çok sık ortaya çıkar ve omuzlu takımın kenarlarına doğru uzar. Kaynak metalinin çapı, takım ucunda bulunan pim çapından çok az büyük olmasına karşın omuz çapından bir hayli dar olarak oluşur. Oluşan kaynak nüfuziyetlidir ancak bu parça kalınlığına ve pim derinliğine bağlı olarak değişir [2].

Bu kaynak yönteminde kaynak bölgesi dört farklı bölgeden oluşmaktadır [2,6].

**A BÖLGESİ :** Kaynak işlemlerinden etkilenmeyen bölgedir. Esas metal olup hadde yapısındadır.

**B BÖLGESİ :** Artık kaynak gerilmeleri ve, ısı değişimleri gibi etkilerle özelliklerin değişebileceği bir bölgedir. Yaşlanmış veya mekanik yaşlandırılmış alaşımlarda bu bölge sert değildir.

**C BÖLGESİ :** Plastik deformasyon gözlenir. Termomekanik olarak etkilenme söz konusudur. Bu etkileşimde yeniden kristalizasyona neden olmaktadır.

**D BÖLGESİ :** Kaynak metalidir. Kaynak metalinin mikroyapısında da alaşım türü, ısı işlem, tane boyutu ile beraber bir değişim olabilmektedir. Kaynak metalinin boyutları nüfuziyete etki eder.

## YÖNTEMİN ÜSTÜNLÜKLERİ

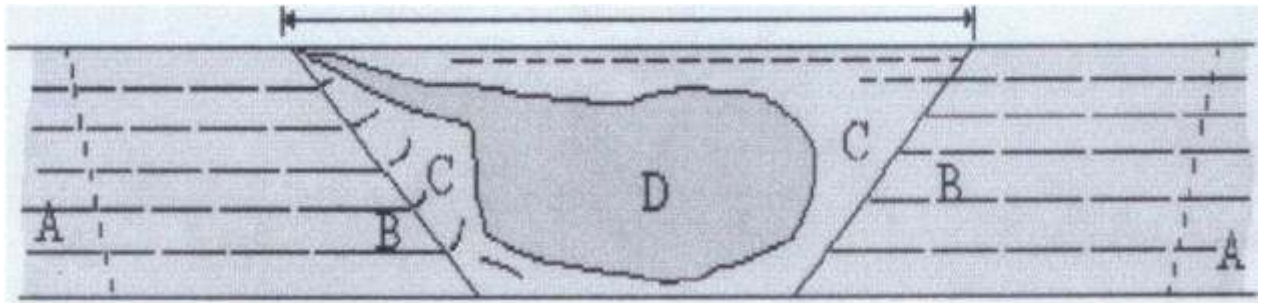
- Uygun maliyet: Kaynak operasyonu, enerji tasarrufu sağlayan basit bir işlemdir.
- Yüksek kaynak enerjisine sahiptir. 3 KW'lık toplam güçle 6XXX alaşımında 12,5 mm derinliğinde kaynak yapılabilir.
- Kaynak işlemi; dolgu telleri ve gazdan korunan kaynak banyosu gerektirmez.
- Özel profilden bağlantı kenarları önemsizdir.
- İdeal olarak teknik otomasyona uygundur.
- Bütün pozisyonlara uygundur.
- Al alaşımları durumunda, çatlatmaya duyarlılıklarından dolayı ergitme kaynağı yapılamayan alaşımlar kaynak yapılabilir.
- Gözenek oluşmaz.
- Farklı yapıdaki malzemelerin kaynağını mümkün kılar.
- Normalde pratikte mümkün olmayan veya çıkarma veya dökümde maliyeti arttıran uzun, geniş, haç şeklinde, kutu şeklinde ve üretimden geldiği şekildeki gibi birçok bileşimin kaynağı mümkündür.
- Hassas kaynak ağızı hazırlığına gerek yoktur.
- Ağızlarda ergime oluşmaz dolayısı ile IEB hemen hemen yoktur.
- Koruyucu gaz ve ek metale gerek yoktur.
- Sıçrama olmaksızın düz yüzey elde edilebilir.
- Kaynak, ark olmaksızın yapıldığı için manyetik üfleme yoktur.
- Verimi yüksektir.
- Çok az bakım ister.
- Kaynaktan hemen sonra oksit tabakasının kaldırılmasına gerek yoktur.
- Ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirmede çatlama hassasiyeti yüksek olan alaşımlara rahatlıkla uygulanabilir.



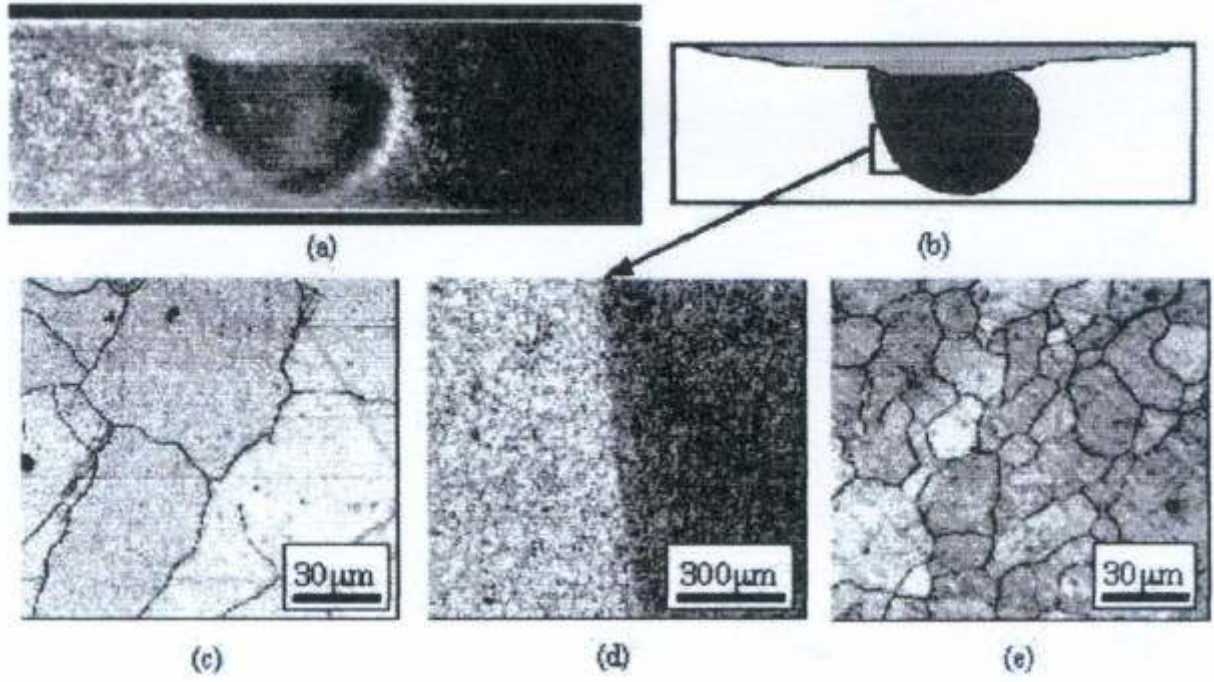
- Yüksek bağlantı mukavemetleri ısıl işlem yapılarak elde edilir.
- Katı-faz kaynağı oluşumu alaşımın metalurjik özelliklerini saklamasına olanak tanır.
- Farklı koşullarda metaller birleştirilebilir.
- Ekstrüzyon ürünü veya döküm olan çoğu parçalar bu yöntemle kaynatılabilir [2].

### YÖNTEMİN SINIRLAMALARI

- Bazı alaşımlı saclarda tek pasolu kaynak hızı, diğer mekanikleşmiş ark kaynağı tekniğinden daha yavaştır.
- Her kaynak sonunda takımın piminin girdiği delik kapatılmalıdır. Bunun için alternatif kaynak tekniklerinden olan konik tapa sürtünme kaynağı kullanılmalıdır.
- Levhanın bir ucundan diğerine kaynak isteniyorsa, ileri geri hareket eden tablalara gereksinim vardır.
- İş parçaları tablaya bağlandığından dolayı ekipmanların taşınması zordur.
- %100 nüfuziyet isteniyorsa parçalar ters çevrilip arka tarafından da kaynak yapılmalıdır.
- Kaynak öncesi yüzey hazırlama kritik olup, bu hususta özen gösterilmesi gerekmektedir [1,2,3].



Şekil 10. Kaynak Bölgesinin Mikroyapısının Şematik Olarak Gösterilmesi [6]



Şekil 11. AZ31 Alaşımının FSW Kaynağında Kaynak Bölgesinin Mikroyapı Görüntüleri[1]

## YÖNTEMİN UYGULAMA ALANLARI

### Gemi İnşasında ve Deniz Endüstrisinde Uygulamalar

Ticari uygulamalar için yöntemle adapte olan ilk endüstriyel sektörlerden ikisi gemi inşaatı ve deniz endüstrisidir. Bu yöntem aşağıdaki uygulamalar için uygundur [7]. Güverte, kenar, bölme ve döşeme panelleri

- Alüminyum ekstrüzyonları
- Tekne elemanları
- Helikopter platformu
- İç kısımdaki yetecek yatacak yerler
- Deniz üssü yapılar
- Gemi direkleri
- Soğuk hava tesisleri

### Havacılık Endüstrisi

- Kanatlar, uçaklar gövdeleri, kuyruk takımı

- Taşıtlar için yakıt tanklarını soğutma ünitesi
- Uçuş yakıt tankları
- Askeri uçaklar için dıştaki atım tankları
- Askeri ve araştırma roketleri
- Hatalı MIG kaynaklarının tamiri

### Demiryolu Endüstrisi

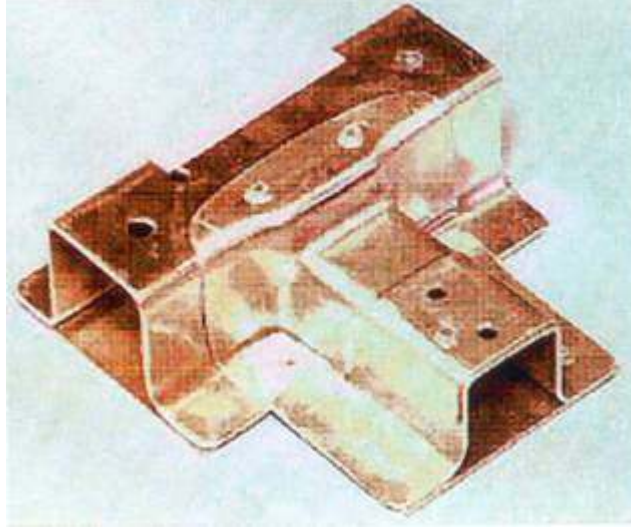
- Yüksek hızlı trenler
- Tren yolunun mevcut yokuşlu yerleri, pis altyapı, tramvaylar
- Demiryolu tankerleri ve vagonlar
- Konteyner grupları



Şekil 12. Sürtünen Eleman ile Kaynak Yöntemi Kullanılarak Üretilmiş Tekerlek Jant Örneği.[8]

### Otomotiv Endüstrisinde

Otomotiv sektöründe alüminyum kullanımının hızla artması yakıt ve ağırlık tasarrufunda daha etkili araçların üretilmesine yol açmıştır. Süspansiyon kolları gibi küçük çaptaki parçalar bu yöntem ile Japonya 'da üretilmektedir. Bunun yanı sıra Norveç' te tekerlek jantlarının bu yöntem kullanılarak yapımı da gerçekleşmektedir. Şekil 13 'te bunun bir uygulaması görülmektedir [8].



*Şekil 13. Sürtünen Eleman ile Kaynak Yöntemi ile Üretilmiş Bağlantı Parçası Örneği [8]*

Yöntem, ayrıca alüminyum esaslı arabalarda iç kapı panellerinin yapımında da uygulanmıştır. Amerika'da Smith Corporation sürtünen eleman ile kaynak yöntemini kullanarak ilk prototip motor tezgahlarını geliştirmiştir. Yine aynı yıllarda Amerika'da Tower Automotive, Simulform olarak adlandırılan şasi parçalarının bağlantısı için bağlantı elemanları ve özel gövde yapıları üretmiştir [8].

#### **Diğer uygulama türleri ise şunlardır :**

- Motor ve şasi kızakları
- Hidroform olan tüplerin bağlanan parçaları
- Kamyon gövdesi
- Mobil vinçler
- Zırhlı taşıtlar
- Yakıt tankları
- Karavanlar
- Otobüs ve hava taşımacılığı taşıtları
- Motosiklet ve bisiklet yapıları
- Asansörler
- Alüminyum arabaların tamiri
- Magnezyum ve magnezyum/alüminyum eklemleri

## İnşaat Endüstrisi

- Alüminyum köprüler
- Alüminyum, kurşun veya titanyumdan yapılmış ön cephe panelleri
- Cam çerçeveleri
- Alüminyum nakil boruları
- Güç fabrikaları kimya endüstrisi için alüminyum reaktörler
- Sıcaklık değişimleri ve hava şartlandırıcıları
- Boru üretimi

## Elektrik Endüstrisi

- Elektrik motorları
- Motor dağıtma çubukları
- Elektrik kondüktörleri

## Diğer Endüstri Sektörleri

- Buz dolabı panelleri
- Pişirme ekipmanları ve mutfaklar
- Beyaz eşyalar
- Gaz tankları ve gaz merdivenleri

## SONUÇ

Endüstrinin birçok dalında uygulama alanı bulan sürtünen eleman ile kaynak yöntemi getirdiği birçok üstünlük ile diğer ergitme kaynak yöntemlerine göre daha uygun bir yöntem konumuna gelmiştir. Özellikle Al ve Al alaşımları için mekanik özelliklerdeki iyileştirmeler, kaynak sonrası oluşabilecek hatalardaki azalmalar ile de gelecekte otomotiv endüstrisi, gemi inşaatı, uçak ve uzay endüstrisi ve diğer imalat sektörlerinde kullanımının her geçen gün artacağı beklenmektedir.

## KAYNAKÇA

1. Nagasawa, T., Otsuka, M., “Structure and mechanical properties of Friction Stir Weld Joints of Magnesium Alloy AZ31”, [http : // www.mc.mat.shibaura-it.ac.jp /master/ abstract /298110. htm](http://www.mc.mat.shibaura-it.ac.jp/master/abstract/298110.htm)

2. **Kaluç, E., Bozduman, B.**, “Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynak Yöntemi”, Makina Magazin, Sayı:27, Temmuz 1998, s.54-61.
3. **Çam, G.**, “Al- Alaşımaları İçin Geliştirilen Yeni Kaynak Yöntemleri”, Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 19-20 Ekim 2001, Yıldız Teknik Üniversitesi Oditoryumu, İstanbul, s.268-277.
4. **Kalle, S., Nicholas, D.**, “Friction Stir Welding – Materials and Thicknesses”, TWI, 2000.
5. **Dawes, C.J., Thomas, W.M.**, “Friction Stir Joining Of Aluminium Alloys”, Bulletin 6, TWI, November / December 1995.
6. **Smith, S., Nikiforakis, N.**, “Computational Modelling of Friction Stir Welding”, University of Cambridge, Engineering and Physical Sciences Research Council, July, 2001.
7. **Kalle, S., Nicholas, D.**, “Causing A Stir In The Future”, Welding&Joining, February 1998, p.18-21.
8. **Jonhson, R., Kallee S.**, “Friction Stir Welding”, Materials World Volume 7, No.12, December 1999, p.751-753.