

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK TEKNİĞİ VE YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

İsmail TOPCU

*Alaaddin Keykubat, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme mühendisliği Bölümü,
Alanya, Antalya, Türkiye
E-mail: ismail.topcu@alanya.edu.tr*

Received 14 October 2023; revised 19 December 2023; accepted 19 December 2023

Özet

Bu çalışmada son yıllarda çok kullanılmaya başlanan ve endüstriyel uygulamaları hızla yaygınlaşan sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile ticari Al malzemelerin kaynak kabiliyetleri incelenmiştir. 5×50×150 mm ebatlarında Al malzemeler freze mensesinden getirilerek değişik kaynak ilerleme hızlarında birleştirilmiştir. Birleştirme işlemi 6.25, 10, 16, ve 20 mm/dak kaynak ilerleme hızlarında ve 800 dev/dak dönme hızında yapılmıştır. Kaynaklı birleştirmelerde metalografik ve mekanik testler yapılarak kaynak ilerleme hızının birleşme bölgesinin metalurjik ve mekanik özelliklerinde meydana getirdiği değişiklikler değerlendirilmiştir. Alüminyum-alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile başarılı bir şekilde birleştirilebilirliği görülmüştür. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin çekme testlerinde numuneler kaynak dikişinin dışından kopmuştur. Kopmalar hep aynı bölgeden olmuştur. Bu bölge toparlanma bölgesi ile ITAB arasındaki bir noktaya karşılık gelmektedir. Kaynak ilerleme hızının artmasına bağlı olarak malzemelerin kopma mukavemetinde az da olsa bir artma görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: kaynak, sürtünme karıştırma kaynağı, Al alaşımları

1. Giriş

Metal birleştirme teknikleri endüstride yaygın olarak kullanılan işleme yöntemidir ve her geçen gün yeni tekniklerle ilgili birçok araştırma bulunmaktadır. Ancak birleştirme tekniklerinin popüleritesi 3 önemli buluşla başlamıştır; Sir Humphry Dovy (1808) tarafından elektrik arkının icadı; Joule (1856) tarafından temas dirençli ısıtmanın icadı; ve Le Chatelaine (1890) tarafından oksiasetilen alevinin icadı. Daha sonra birleştirme yöntemleri bu ısı kaynaklarına dayandırılmıştır. Birinci ve ikinci dünya savaşlarında uçak, gemi ve tankların kaynaklanması için insanlığa ihtiyaç vardı [1-4].

Üretim hızı arttıkça kaynak yöntemleri araştırılmış ve 1933 yılında korumalı metal ark kaynağı uygulanmıştır. Bu yöntem ABD ve Rusya'da oldukça popüler bir yöntem olmuştur. Daha sonra tüm Avrupa'ya yayılmıştır. Birleştirme yöntemleri sadece bu yöntemle sınırlı değildir. 1930'lu yıllarda hidrojenin kullanılmasıyla ark kaynağı yöntemi kullanılmaya başlamıştır. Bu nedenle, 1940'lı yıllarda "Norttop Aircraft Company Inc" tarafından uçak üreticilerinde düşük metal ve alaşımların (Magnezyum ve Alüminyum) birleştirilmesi amacıyla uygulanan MIG (inert gaz korumalı ark kaynağı,) popüler hale gelmiştir [5-7].

Ancak bu yöntemlerin kaynak sırasında oluşan ısı nedeniyle HAZ (Isıdan Etkilenen Bölge) nedeniyle birçok dezavantajı vardır. Bu durum; kusurlara, gözeneklere neden olur ve malzeme ısı işlem görmüşse mukavemetini kaybedebilir. Bu nedenle günümüz bilim adamları erimiş alan içermeyen katı hal birleştirme üzerinde çalışmaktadır. Karıştırma Sürtünme Kaynağı, yüksek hızda devir yapan özel alete sahip olan ve kenarlarını birleştiren önemli bir katı hal kaynak yöntemidir. Özetle geleneksel kaynak yöntemi Koruyucu gazaltı tungsten ark kaynağı (GTAW) ya da diğer adıyla tungsten asal gaz (TIG) ve yeni katı hal kaynak yöntemi Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) önemli birleştirme yöntemleridir [8-9].

Kaynak, malzemeleri, genellikle metalleri veya termoplastikleri, birleşmeye neden olarak birleştiren bir imalat veya üretim işlemidir [10]. Bu genellikle iş parçalarının eritilmesi ve güçlü bir bağlantı oluşturmak için soğuyan bir erimiş malzeme havuzuna (kaynak havuzu) bir dolgu malzemesi eklenmesiyle yapılır. Bu yöntemde basınç bazen ısıyla birlikte veya tek başına kullanılır. Bu, iş parçalarını eritmeden aralarında bir bağ oluşturmak için iş parçaları arasında daha düşük erime noktalı bir malzemenin eritilmesini içeren lehimleme ve lehimlemenin tersidir [11]. Kaynak çok eski bir bilimdir, o kadar eskidir ki kökleri antik çağlara kadar kaybolmuştur. Bununla birlikte, yüzyıllar boyunca aktarılmış gibi görünen metal işleme ilkelerinden biri, demirin ateşte ısıtılarak yumuşatılması ve plastik hale getirilmesidir [12-13].

Uygun koşullar altında birleştirin veya kaynaklanan demir veya çelikten çok az alet veya eşya korozyona süresiz olarak dayanabildiği gözlemlenmiştir. Kaynağın tam olarak ne zaman yapıldığına dair çok az doğrudan kanıt kalmıştır. Metal işlemede ulaşılması şüphesiz yüzyıllar süren ileri bir aşama olan çeliği işleme ve sertleştirme sanatı, 30 yüzyıl önce Yunanistan'da yaygın olarak uygulanıyordu ve Horner tarafından bahsediliyordu. Farklı kıtalardaki ilkel kabilelerin farklı kıtalarda olduğu kanıtlandığından, kaynaklama ilkelerinin dünya çapındaki eski halklar tarafından defalarca keşfedilmiş, kaybolmuş ve yeniden keşfedilmiş olması muhtemeldir. Bir birleriyle iletişim kurmanın görünürde hiçbir yolu yoktu, demiri eritmek, şekillendirmek ve işlemek için aynı temel yöntemleri geliştirdiler ve kullandılar [14].

Rönesans döneminde ateşle kaynak yapmak yerleşik bir uygulama haline gelmişti ve o dönemin ustaları sanatta oldukça yetenekliydi. Birleştirilecek parçalar uygun şekilde şekillendirildi ve dövülmeden, haddelenmeden veya preslenmeden önce bir demirci ocağında veya fırında doğru sıcaklığa yeniden ısıtıldı. Biringuccio'nun 1540'ta yayınlanan Pyrotechnia'sı bu tür operasyonlara çeşitli referanslar içerir. Bir durumda, top deliklerini döndürmek için bir demir çubuğun ucuna kare şeklinde bir çelik parçası kaynaklandı. Bir başkasında, kırık çanlar kaynak yöntemiyle yeniden bir bütün haline getirildi [15-16].

Kaynak yöntemleri çoğunlukla farklı uygulama yöntemlerine göre çeşitlerine ayrılmaktadır. Oksi-yakıt gaz kaynağı, ark kaynağı, gaz tungsten ark kaynağı, gaz metal kaynağı, plazma ark kaynağı, direnç kaynağı ve katı hal kaynak türü olan sürtünme karıştırma kaynağı [17].

1.1. Sürtünme karıştırma kaynağı

Sürtünme kaynak yönteminin geliştirilmiş bir başka yöntemidir. Bilindiği gibi sürtünme kaynağı genellikle silindirik kesitli malzemelere uygulanan ergitmesiz kaynak yöntemidir. Sürtünme-karıştırma kaynağı, son on yılda keşfedilmiş ve geliştirilmiş bir katı hal kaynak tekniğidir. Herhangi bir boşluk, çatlak veya deformasyon meydana gelmeksizin güvenli bir kaynak yapmanın çok zor olduğu bir çok malzemeyi kaynaklamayı basitleştirmiştir. Bir çok sanayi kuruluşu bu tekniği üretimlerinde kullanmak için pilot çalışmalar yürütmektedir [1-2].

Sürtünme-karıştırma kaynağı tekniği (İngiltere, Cambridge'de TWI tarafından keşfedilen, patenti alınan) klasik sürtünme kaynağının bir türevidir olup, kaynak sonrası çok az deformasyonlu, uzunluğuna birleştirilen veya bindirme parçalarının imalatına uygulanacak katı- hal kaynağının avantajlarına imkan vermektedir.

Özellikle kaynak yapılması çoğu zaman zor olan alüminyum alaşımların birleştirilmesinde, sürtünme-karıştırma kaynağı başarılı bir performans göstermiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı düz ve bindirmeli alüminyum alaşım kaynakları için yeni ve başarılı bir kaynak tekniğidir [3]. Bu işlemin temel ilkesi Şekil 1'de gösterilmiştir [4].

Kaynak elemanlarının hazırlanması ve kaynak parametrelerinin belirlenmesinden sonra EN ISO 9692-3'e göre punto hazırlığı yapılır (Tablo 3'te gösterilmiştir). Aslında bu standart, en sık karşılaşılan bağlantıların ortak hazırlığı ve montajının karakterizasyonunu tanımlar. Ancak uygulama alanının geniş olması, bir boyut aralığı verilmesini zorunlu kılmaktadır. Normalde bu standart her türlü alüminyum ve kaynaklanabilir alaşımları için tavsiye edilir. Aşağıdaki tabloda görüldüğü gibi çelik kaynağı için akımın AC akım olması ve elektrot çapının elektrottan daha kalın olması gerekir.

Tablo 3. GTAW için kaynak standartları

Geçiş	Kalınlık	Akım(A)	Gerilim(V)	Kaynak Hızı(cm/dak)
1	2	170	13	78
Ana Metal		Electrot Çapı(mm)	Argon(l/dk)	Ark Uzunluğu(mm)
Çap(mm)	Hız (cm/min)			
1.4	14	4.5	6	2

GTAW ile kaynak işlemine başlamadan önce Alüminyum kolayca oksitlenebilecek şekilde kaynak yapılır ve bu korozyona uğrayan tabaka çok yüksek sıcaklıklarda eriyerek kaynak yapılacak plakanın köşeleri oksit tabakasından (pah'a kadar) temizlenir.

Daha sonra tüm numunelerin pahları kesilerek kaynağa hazır hale getirilir. Numuneler yukarıda bahsedildiği gibi az kalınlığa sahip olup ayrıca alüminyum büzülme özelliğine sahip olduğundan numuneler kaynak işlemi sırasında şoka maruz kalabilir ve şekil değiştirebilir, bundan dolayı kelepçeler ile sabitlenirler. Bu kelepçede dolgu malzemesinin plakalara tam nüfuz etmesi için yedek gaz bulunur (17). Yukarıda belirtildiği gibi kullanılan iki dolgu malzemesi vardır; bunlar AMS 4190 ve AMS4246'dır. Tüm hazırlıklar tamamlandıktan sonra her örnek için GTAW işlemi başlatılır. Her numune için kritik nokta, kaynak plakasının belirli bir zamanda başlaması ve aynı anda bitmesi gerektir. Çünkü kusurlar çoğunlukla kaynaklı levhaların hem başlangıç hem de bitiş noktasında yer almaktadır. Daha sonra numuneler diğer test yöntemlerine hazır hale gelir [18-20].

2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Deneyi

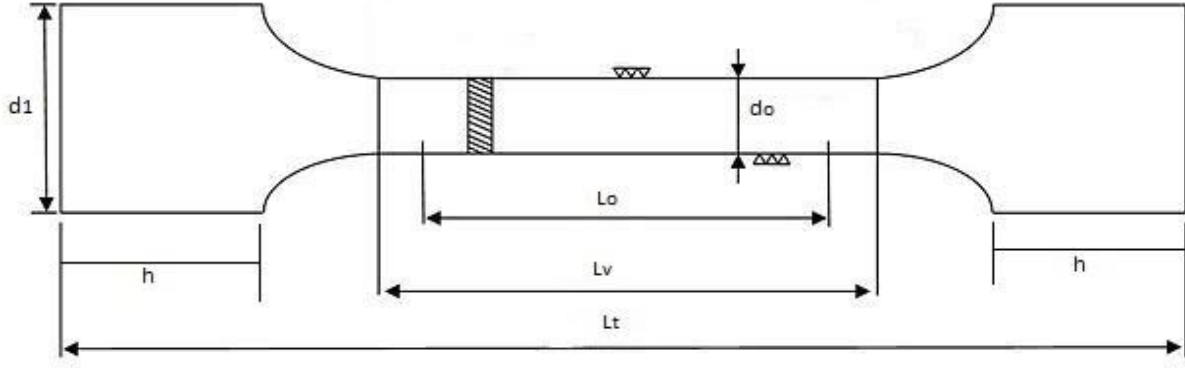
Sürtünme karıştırma kaynağı yukarıda bahsedildiği gibi katı hal kaynak türüdür. Şekil 1'de gösterildiği gibi karıştırma efekti aracına ihtiyaç duyar. Bu alet M8 vidalı ve 10° konik şekilli, ısıl işlem görmüş ve D2 takım çeliğinden (60HRC) yapılmıştır. Üst kısmı 2,6 mm kalınlığa sahip olup üst ile omuz arasındaki açıklık 20 mm olarak hazırlanmıştır. 6061 alaşımları için dakikada aynı devirde fakat adım olarak farklı olan 2 adet numune bulunmaktadır. Bunlardan biri 63 mm/dak, diğeri ise 100 mm/dak'dır. Bu numuneler TAKSAN FU-400x1600 V/2 işaretli universal dikey frezeleme tezgahı kullanılarak birleştirilir [21-24].

2.2. Numunenin Test Yöntemlerine Hazırlanması

Tüm numunelerin Çekme, Metalografi ve Mikro sertlik testleri için hazırlanması gerekmektedir.

2.2.1. Çekme Testi

Tüm hazırlıkları yapıldıktan sonra öncelikle standartlara göre stabil bir şekle sahip olan çekme testi için numuneler alınır (Şekil 2). Tüm numuneler şekil 2'de şekil ölçüleri verilen TS EN 485-1 standardına göre hazırlanmıştır.



Şek. 2. Standart çekme testi numunesi.

d_0 numune çapını, d_1 baş kısmının çapını ($1,2d_0$), L_V inceltmiş kısmın uzunluğunu (L_0+d_0), L_0 ölçü uzunluğunu ($5d_0$), h baş kısmının uzunluğunu ve L_t numunenin toplam uzunluğunu göstermektedir. Bu çalışmada kontrollü koşullar altında deney 23°C 'de uygulanabilir. Veriler tablo 4'de görülmektedir.

Tablo 4. Numunelerin Uzama Hızı

Elastisite Modülü	Gerilme Hızı	
	Yüksek	Düşük
<150000 MPa	2 MPa/dk	20 MPa/dk
> 150000 MPa	6 MPa/dk	60 MPa/dk

Sonuç olarak TS EN 485-1 test standardı kullanılarak kaynaklı numunelerin çekme testleri Dynacell test makinesi ile yapılmıştır. Bu nedenle akma mukavemeti, çekme mukavemeti, toplam uzama, çekme mukavemetinde % uzama belirlenerek sonuçlar kısmında verilmiştir.

2.2.2. Metalografi

Metalografi, malzemelerin niteliğinin ve davranışlarını anlamada yardımcı olmaktadır. Bununla birlikte, alüminyum sünek ve yumuşak bir malzemeye sahip olduğundan, şekil 3.'de gösterildiği gibi her numunenin kolayca işlenebilmesi için öncelikle soğuk kalıplama reçinesi hazırlandı. Daha sonra parlatma için 1200 mesh 3μ 0.25 SiC, ardından ince parlatmada 2400 mesh 3μ 0.25 SiC kağıtlar kullanılmıştır. Bunlar mikro yapıların gözlemlenmesi açısından çok önemlidir.

Malzemelerin mikroyapıları gözlemlmek için elektro-parlatmanın kullanıldı. Bu nedenle 40 kısım deiyonize su içerisinde 1 pa11 tetrafloroborik asit içeren Barker'ın parlatma yöntemiyle elektrolit hazırlandı. Bu aşındırıcıyı kullanmak için soğuk kalıplama sırasında elektrik iletkenliği elde edildi. Elektro-parlatma, çözeltinin numune yüzeyine nüfuz etmesi için 20 V altında 90 saniyede uygulandı. Sonuç olarak bu aşamada steuer markalı elektro polisaj makinesi kullanılarak elektro polisaj işlemi yapıldı.



Şek. 3. Soğuk kalıplama ile hazırlanmış numune

2.2.3. Mikro Sertlik

Mekanik davranışı ölçmek için bir diğer önemli test ise sertlik testidir. Sertlik makro ve mikro tip olarak ölçülebilir. Mikro sertlik, her fazın sertliğini ve sertliğin lokal plastik deformasyona karşı direncini ifade eden özel bir ölçüme sahiptir. Direnci değerlendirmek için bazı teknikler aşağıda Tablo 5'te verilmiştir. Araştırmada bağlantı mikro sertlik testi için kullanılan standart TS 9913 I TSE-EN I 043-1'dir. Bu standart, metalin yerleştirildiği taban ve ek yerinin en yüksek ve en düşük sertlik değerlerinin garanti edilmesi amacıyla uygulanır. Sonuç olarak, yerli sertlik ölçme cihazı kullanılarak sertliğin belirlenmesi için 23°C'de testler uygulanmıştır (Şekil 4).

Tablo 5. Sertlik Test Teknikleri (HAZ'da İşaretli Noktalar Arası Mesafe)

Sertlik Yöntemleri	İşaretli noktalar arasındaki mesafe "L" (mm)	
	Demir bazlı metaller	Al, Cu ve diğer alaşımlar
HV5	0,7	2,5-5
HV10	1	3-5
HB 1-1,25	Not applicable	2,5-5
HB2,5/15,625	Not applicable	3-5



Şek. 4. Sertlik ölçme cihazı.

2.2.4. Çekme Testi

Sürtünme karıştırma kaynaklı numuneler şekil 2 de gösterilen standart çubuğa göre çekme testlerine tabi tutulmuşlardır. Kaynaklanan bütün kaynak dikişinin dışından uzama göstererek kopmuşlardır.

Tablo 6. SKK'nin Yük ve Uzama Yüzdesi Değerleri

Parametreler	1800rpm 100mm/min	1800rpm 63mm/min
Yük (N)	2622,815	2361,801
% Uzama	5,64	3,84

Tablo 7. GTAW (TİG) işleminin Yük ve %Uzama değerleri

Parametreler	AMS 4190 tel	AMS 4246 tel
Yük (N)	2005,77	2071,81
% Uzama	1,505	1,615

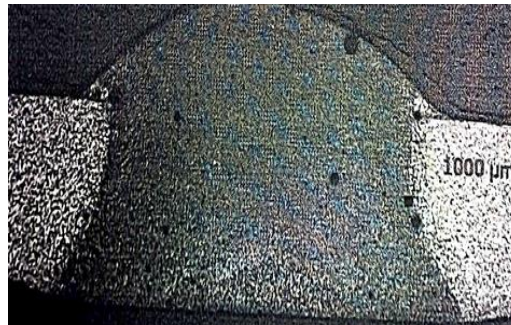
2.2.5. Metalografik Çalışmalar

Metalografi için numuneler öncelikle iyi bir işlem için soğuk sertleştirme kalıplama işlemine alınır. Bir tür reçinedir ve 16 saatte katılır. Daha sonra öğütülmeye hazır hale gelirler. İlk zımparalama 1200 püre ile kaba öğütme, ardından 2400 püre ile ince öğütme yapılır. Bu öğütme kağıtları 0,25 koloidal silika ve 3 mikron çuha içerir. Numune cilalanmaya hazırdır. Polarize görüntü için elektrokimyasal polisaj, Alüminyum alaşımlarında ise iyi bir polisaj uygulanır. Bu parametreler 90 saniyedeki frekans için 20,0V'dir. Metalografi testlerin mükemmel kısmıdır ve aşağıda gösterildiği gibi iyi mikro yapılar alınır.

4. Sonuçlar ve Değerlendirme

GTAW, çelik kelepçe ile tutularak işlenir (Şekil5'te gösterildiği gibi), bu nedenle Alüminyumun iletkenliği yüksektir, dolayısıyla ısıyı çeliğe iletir, bu nedenle daha fazla iyileştirme kaynağına ihtiyaç duyar. Kelepçe ayrıca yedek gaz işlemine de sahiptir, bu nedenle Şekillerde gösterildiği gibi Dendritlerin katılması ve ayrıca metalin gözenekliliği artan yapın çekme mukavemetini etkiler.

AMS4190 Filler kullanılarak ortak işlem



Şek. 5. Gazdan etkilenen ve kaynak sırasında gözenekli yapının nasıl var olabileceği karanlık alan bulunmaktadır.



Şek. 6. Ana malzeme (solda), Heat Af (HAZ), sol köşede, kaynak bölgesi ve dolgu etkisi (ortada) ve daha fazla gözenek ve çatlak içeren yedek gaz etkisi (sağ üst köşede).

Mikrosertlik testi Şekil '4de gösterilen cihazda yapılmıştır. Veriler her 3 mm'de bir alınmış ve her numune için 5 defa ölçüm yapılmıştır. Sertlik ölçüm sonuçları Tablo 8 de verilmiştir.

Tablo 8. Her numune için sertlik testi sonuçları

mm	Sürtünme Karıştırma Kaynağı		GTAW Process	
	1800rpm 63mm/dk	1800rpm 100mm/dk	AMS 4190	AMS 4246
-30	50,30	50,20	68,20	67,20
-27	50,40	50,40	67,20	67,40
-24	50,70	50,60	67,30	67,70
-21	50,20	50,70	67,20	66,80
-18	52,50	50,60	68,00	67,50
-15	51,20	50,70	75,70	67,00
-12	50,60	50,30	78,00	66,50
-9	51,40	50,10	78,90	75,80
-6	55,40	53,20	77,90	85,60
-3	57,40	57,10	83,20	73,10
0	59,60	64,80	54,60	70,50
3	60,60	67,60	77,90	72,10
6	55,20	55,20	79,00	82,10
9	50,70	50,70	77,10	78,00
12	50,20	50,60	75,90	67,00
15	50,60	50,30	77,90	67,20
18	50,20	50,40	77,80	67,10
21	50,40	50,30	70,50	67,50
24	50,30	50,50	72,50	68,00
27	50,50	50,40	67,50	67,50
30	50,30	50,70	67,80	67,20

Yapılan işlemler incelendiğinde GTAW (TİG) ve SKK arasındaki sertlik farkının uygulanan ısıl işleme bağlı olduğu görülmektedir. GTAW (TİG) yönteminde kullanılan plakalar T-4 Isıl işlem görmüş olup, daha önce bu ısıl işleminden bahsedilmiştir. Diğer plakalar T-0 olup, bu da ısıl işlem görmemiş alüminyum alaşımı anlamına gelir.

GTAW (TİG) yönteminde kullanılan dolgu metalleri arasındaki diğer bir sertlik farkı da kullanılan malzemelerin farklı bileşimlerinden kaynaklanmaktadır. Bir önceki bölümde bahsedilen test yöntemlerinden Çekme Testi, metalografi yöntemi ve mikro sertlik testi her numuneye uygulandı. Değerlendirme elde edilen sonuçların karşılaştırması ile yapılmıştır. Mikroyapı analizi üç deneysel deneme için incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda elde edilen şekiller incelendiğinde mikroyapıların birbirine çok benzer olduğu görülmüştür.

Alüminyum dünyada en çok bulunan metal olup, çoğunlukla uçaklarda, tanklarda, askeri sanayide, otomotiv parçalarında, teknolojik cihazlarda vb. kullanılmaktadır. Ayrıca kullanımına Korozyona dayanıklılık, yüksek mukavemet/yoğunluk oranı, iyi elektrik ve ısı iletkenliği özellikleri nedeniyle kullanım alanları her geçen gün daha da ileri gidiyor. Ancak bu özellikler kaynak gibi birleştirme işlemlerinde problem yaratabilir. Örneğin Yukarıda bahsedilen GTAW işlemi sırasında oksitlenebilmekte ve gaz yapıları kaynak bölgesine nüfuz edebilmektedir.

Dolayısıyla bu kusurlar alaşımın mekanik özelliklerini etkiler. Bir diğer sorun ise GTAW sürecinde HAZ bölgesinin oluşmasıdır. Çoğu Alüminyum alaşımı çökeltme sertleştirilmesi ile güçlendirilir, bu da alaşımın ısıl işlemde etkilendiği anlamına gelir. Bu nedenle kaynak işlemi sırasında ısı girdisi ana malzemenin yan tarafını etkileyerek kaynağın esaslı olan orada erir ve ITAB bölgelerinde güçlendirme mekanizması azalır. Öte yandan katı hal kaynak türleri, birleştirme işlemi sırasında ısıdan etkilenen bölge olmadığından geleneksel yöntemlere göre daha iyi bir işlemdir. Ancak bu tip için dakikadaki devir önemlidir.

Yukarıda da bahsedildiği gibi Sürtünme Karıştırma Kaynağı günümüzde en çok araştırılan yöntem olup popülaritesi her geçen gün artmaktadır. Sonuçlar, bu yöntemin GTAW (TİG) yönteminden daha iyi olduğunu gösterdiğinden, hem Çekme mukavemeti hem de metalografi sonuçları, daha az gözenek içerdiğini, ısıl işlem yapılmadığından tane yapısının malzemeyle aynı olduğunu ve ayrıca birleştirme için daha az cihaza ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.

Son olarak deneyler ve sonuçlar, Alüminyum alaşımı 6061'in mekanik özelliklerinin, ısı girişi ve dolgu malzemesi kullanımı sırasında kötü şekilde değiştiğini göstermektedir. Ancak Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında malzemenin mekanik özellikleri biraz değişir ve HAZ alanı fazla olduğu için daha az azalır. Ancak operatörün malzemenin adım hızına dikkat etmesi gerekir, eğer bu hız daha azsa malzeme gözenekli olabilir ve bu durum Alüminyum alaşımının tüm mekanik özelliklerini etkileyecektir.

Alüminyum-alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliği başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin çekme testlerinde numuneler kaynak dikişinin dışından kopmuştur. Kopmalar hep aynı bölgeden olmuştur. Bu bölge toparlanma bölgesi ile ITAB arasındaki bir noktaya karşılık gelmektedir. Kaynak ilerleme hızının artmasına bağlı olarak malzemelerin kopma mukavemetinde az da olsa bir artma görülmektedir.

References

- [1] İ. Topcu "TIG ve MIG kaynağı ile işlem gören 304 ve 1040 çeliklerin ITAB bölgesindeki mekanik özelliklerin incelenmesi" Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi 34 (3), 171-182.
- [2] Robert L.O'brien,"Jefferson's welding encyclopedia", Eighteenth Edition,American Welding Society,1997 [2].
- [3] A.Kurt, M. Boz, M. Özdemir. "Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi" Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Cilt 19, No 2, 191-197, 2004 Vol 19, No 2, 191-197, 2004
- [4] Davis, C.J., Thomas, W.M., "Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys" Welding Journal, sayfa 41-45 Cambridge, U.K. March 1996.
- [5] David, P., Field, Tracy W., et all, "Heterogeneity of Crystallographic Texture in Friction Stir Welds of Aluminum" Metallurgical and Material Transactions A, cilt.32A, sayfa 2869-2877. November 2001
- [6] Kurt A., Özdemir M., Boz M., Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, Sayfa 89-99, 34-25 Ekim, Kocaeli, 2003.
- [7] Prado, R.A., Murr, L.E., et all, "Tool wear in the friction-stir welding of aluminum alloy 6061+20% Al₂O₃: a preliminary study" Scripta Materialia, cilt 45 sayfa 75-80, 2019.
- [8] Jata, K.W., Semiatin, S.L., "Continuous Dynamic Recrystallization During Friction Stir Welding of High Strength Aluminum Alloys", Scripta Materialia, cilt 43, sayfa 743-749, 2000.
- [9] Ivan Hrivnak, "Thermal Cycle in Welding" Theory of Weldability of Metals and Alloys, sayfa 4-39, NY.USA, 1992.
- [10] Aluminum Association, <http://www.almmum.org>.
- [11] Ashley, Steven, "Spot Welding Alüminyum to Steel, Mechanical Engineering, January 1994, Vol. 116, Issue 6, p. 29.
- [12] Dickerson, Paul B., "Welding of Aluminum Alloys," Welding, Brazing, and Soldering, vol. 6, 1993, pp. 722-739.
- [13] Hinrichs, J.F., Noruk, J.S., McDonald, W.M., and R.J. Heideman, "Challenges of Welding Aluminum Alloys for Automotive Structures," Svetsaren, No. 3, 1995, pp. 7-9.
- [14] Irving, Bob, "Why Aren't Airplanes Welded," Welding Journal, January 1997, pp. 31

- [15] Kennedy, J.R., Christoffel, R.J., Marlin, D.H., *Introductory Welding Metallurgy*, (American Welding Society, 1979).
- [16] Kou, Sindo, *Welding Metallurgy*, First edition (New York, John Wiley & Sons, 1987), ch. 11 & 15.
- [17] İ Topcu, A. Devrim, B Ünal, B. Vanli. "Development and Design and Heat Treatment of Production, Storage and Mine Drilling Pipes in Petroleum and Geothermal Industries". *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8 (1), 410-417.
- [18] Pickering, Eric R., "Welding Aluminum," *Advanced Materials & Processes*, October 1997, Vol. 152, Issue 4.
- [19] Çam, G. ve Koçak, M., "Progress in joining of advanced materials", *Int. Mater. Rev.*, 1998, Vol. 43, No:1, pp.44-48.
- [20] Y. Bozkurt, H.Ö. Gülsoy, S. Salman, "Investigation of Precipitate Hardening Behaviour of AA2124/SiC/2Sp Composite Material Welded WITH Friction Stir Welding Process", *International Symposium On Materials*, Denizli, Turkey, May 2006.
- [21] Juhas, M. & Karogal, N. & Williams, J. & Fraser, H. September 27-28 2001. *Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding*. TMS, Warrendale, PA, Japan.
- [22] Konkol, P.J. & Mathers, J.A. & Johnson, R. & Pickers, J.R. September 27-28 2001. *Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding*. TMS, Warrendale, PA, Japan.
- [23] Johnson, R. & Kallee, S. 1999. *Stirring Stuff from Friction Welding*. *Materials World*, Vol.7, n12, pp.751-753.
- [24] Przydatck, J. June 1999. *A Ship Classification View on Friction Stir Welding*. I. *International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, Cal.