

EN AW-5083- H321 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MIG, TIG VE SÜRTÜMEN ELEMAN İLE BİRLEŞTİRME (FSW) KAYNAKLI BAĞLANTILARININ MEKANİK VE MİKROYAPISAL ÖZELİKLERİ

Emel TABAN *, Erdinç KALUÇ **

Bu çalışmada, deney malzemesi olarak dünyada ve ülkemizde, gemi inşa ve savunma endüstrilerinde taşıt yapımında kullanılan EN AW-5083- H321 (EN AW- AlMg4.5Mn0.7) dövme alüminyum alaşımı levhalar kullanılarak, kaynaklı bağlantıların mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemek amacıyla ergitme esaslı kaynak yöntemleri olan MIG, TIG kaynak yöntemleri ve Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynak (FSW) yöntemiyle kaynak edilmişlerdir. Kaynaktan sonra tüm bağlantılar, görsel incelemeye tabi tutulmuş, bağlantıların mekanik özelliklerini saptamak amacıyla standartlara uygun olarak çıkarılan ve hazırlanan numunelere çekme ve eğme deneyleri uygulanmıştır. Kaynaklı parçaların kırılma yüzeyleri optik ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiş, kaynak bölgesinden alınan metalografik numunelerde mikrosertlik taraması yapılmıştır. Ayrıca, kaynak bağlantılarının kaynak bölgesinin mikroyapısal özellikleri Clemex görüntü analiz sistemi ile detaylı biçimde incelenmiş ve FSW kaynaklı bağlantıların da iyi mekanik ve mikroyapısal özelliklere sahip oldukları saptanmıştır.

Anahtar sözcükler : Alüminyum, alüminyum alaşımları, EN AW-5083- H321, Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynağı, MIG Kaynağı, TIG Kaynağı, mekanik özellikler, mikroyapısal özellikler, Vickers sertlik taraması.

In this study, strain- hardened EN AW-5083- H321 aluminium alloy plates were welded using MIG, TIG and Friction Stir Welding (FSW) Process in order to investigate mechanical and microstructural properties respectively. Tensile and bend tests were applied to specimens taken from welded plate according to international standards (EN 895 and EN 910). Fracture surfaces were also examined using optic and scanning electron microscopes (SEM). As a metallurgical investigation, optic microscopy and Clemex Image Analysis System were used for MIG, TIG and friction stir welded specimens weld zones. Measurements of hardness were carried out using the Vickers method with 50 g test load on metallographic specimens taken from each welded plate. As a result, it has been observed that friction stir welded joints have good mechanical properties and metallurgical properties as MIG and TIG welded joints.

Keywords : Aluminium, aluminium alloys, EN AW-5083- H321, friction stir welding process, mechanical properties, microstructural properties, Vickers hardness measurement.

* Arş. Gör., Mak. Y. Müh., KOÜ Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü

** Prof. Dr., Müh., KOÜ Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü

GİRİŞ

Günümüzde alüminyum ve alüminyum alaşımları; artırılmış mukavemet özellikleri, hafiflikleri, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, korozyona karşı dirençleri nedeniyle gıda, kimya, otomotiv ve gemi inşa endüstrileri, taşıt, makina ve cihaz yapımı ile mimari alanda, inşaat, havacılık ve uzay endüstrilerinde geniş kullanım alanına sahiptirler ve birçok özellikleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için tercih edilen endüstriyel malzemeler konumuna gelmişlerdir (1, 2, 3).

Çeşitli endüstri kollarında hızla kullanıma giren ve çeşitli kaynak yöntemleri ile birleştirilen alüminyum ve alüminyum alaşımlarına, ergitme esaslı kaynak yöntemlerinin yanı sıra basınç esaslı kaynak yöntemleri de (katı faz kaynak yöntemleri) uygulanabilmektedir. Ergitme esaslı kaynak yöntemleri ile alüminyum ve alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde, ergime ve yeniden katılaşma sonucu oluşan ve genellikle gözenek içeren döküm yapısında bir kaynak metali, malzeme iç yapısına bağlı olarak kaynak metalinin iki yanında geniş biçimde oluşan ısıdan etkilenmiş bölgedeki (IEB) metalurjik dönüşümler, büyük miktarlarda çarpılmalar ve kaynak ısı girdisine bağlı kalıntı gerilmeler, kaynaklı bağlantıların kullanımı sırasında bazı problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır (2,4). Yeni geliştirilen bir katı faz kaynak yöntemi olan ve literatürde Sürtünme Karıştırma Kaynağı olarak da adlandırılan Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynak Yöntemi (FSW) ile alüminyum alaşımı levhalar alın altına, bindirme ve köşe birleştirme türlerinde; özellikle yatay oluk pozisyonunda kaynak edilebilmekte ve ergitme esaslı yöntemlere göre önemli üstünlükler göstermektedir. Bu yeni kaynak tekniğinde dönen ve ucunda vidalı pim bulunan bir takım kullanılmakta, esas metalde ergime ve levhalarda açısız çarpılma oluşmaksızın uzun kaynak dikişleri gerçekleştirilebilmektedir. Yöntemin başarılı uygulamaları sayesinde, havacılık, uzay, gemi inşa, raylı taşıt, zırhlı taşıt ve otomotiv endüstrilerindeki uygulama alanları genişlemiştir (2,5- 14).

Bu konuda yapılan literatür araştırmalarında, özellikle gemi inşa ve

savunma endüstrilerinde kullanılan mekanik olarak mukavemetlendirilmiş EN AW 5083- H321 alüminyum alaşımının eş alaşım çifti olarak sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi (FSW) kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak bağlantılarının mekanik ve metalurjik özellikleri üzerine detaylı yapılmış çalışmaların varlığının oldukça az sayıda olduğu saptanmıştır (14-18). Dolayısı ile, literatürdeki bu boşluğu doldurmak amacıyla yapılan bu çalışmada, deney malzemesi olarak dünyada ve ülkemizde, özellikle gemi inşa ve savunma endüstrilerinde taşıt yapımında kullanılan EN AW 5083- H321 (EN AW- AlMg4.5Mn0.7) dövme alüminyum alaşımı levhalar kullanılmıştır. AW 5083-AW 5083; alüminyum alaşımı, birbirlerine eş alaşım çifti olarak MIG, TIG kaynak yöntemleriyle ve Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynak (FSW) yöntemiyle uygun parametreler kullanılarak kaynak edilmişlerdir. Kaynaktan sonra tüm bağlantılar, görsel incelemeye tabi tutulmuş ve bağlantıların mekanik özelliklerini saptamak amacıyla standartlara uygun

çıkarılan numunelere çekme ve eğme deneyleri uygulanmıştır. Kırılma yüzeyleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiş, metalografik numunelerde kaynak kesitinde Vickers sertlik taraması yapılmıştır. Ayrıca, kaynak bağlantılarının kaynak bölgesinin mikroyapısal özellikleri de detaylı biçimde incelenmiştir.

Sonuç olarak, EN AW 5083- H321 alüminyum alaşımının MIG, TIG ve FSW yöntemleri ile birleştirilmesi, oluşturulan kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin ve kaynak bölgelerinin metalurjik dönüşümlerinin incelenmesi ve orijinal bulguların ülke ve dünya endüstrilerine aktarılması esas alınmıştır.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deney Malzemesi ve Boyutları

Bu çalışmada, 6.45 mm kalınlığında, kimyasal bileşimi Tablo 1'de, mekanik özellikleri Tablo 2'de verilen alüminyum alaşımı deney malzemesi olarak kullanılmıştır.

Tablo 1. Deney Malzemesinin Kimyasal Bileşimi.

Alaşım		Kimyasal Bileşim (%)											
Numerik	Kimyasal Sembol	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ga	V	Ti	Alüminyum
EN AW- 5083 ⁽¹⁾	EN AW- AlMg4.5Mn0.7	0.117	0.245	0.071	0.488	4.7	0.108	0.001	0.083	-	0.016	0.041	Kalan
EN 573-3 (1994)'e göre kimyasal bileşim (%)													
EN AW- 5083	EN AW- AlMg4.5Mn0.7	0.40	0.40	0.15	0.2-0.5	4-4.9	0.05-0.25	-	0.25	-	-	0.15	Kalan
ASTM B 209' a göre kimyasal bileşim (%)													
5083	4.4Mg-0.7Mn-0.15Cr	0.4-0.7	0.40	0.10	0.4-0.1	4-4.9	0.05-0.25	-	0.25	-	-	0.15	Kalan
(1) Kimyasal analizler ARL- X-Ray spektrometresi ile yapılmıştır (Federal Mogul- İzmit Fabrikası).													

Tablo 2. Deney Malzemesinin Mekanik Özellikleri.

Alaşım		Akma Mukavemeti (R _{p0.2}) MPa	Çekme Mukavemeti (R _m) MPa	Uzama (minimum) (%)
Numerik	Kimyasal Sembol			
EN AW- 5083 H321 ⁽¹⁾	EN AW- AlMg4.5Mn0.7	259	355	13.2
EN 573-3 (1994) ve preEN 14286' ya göre mekanik özellikler				
EN AW- 5083 H321	EN AW- AlMg4.5Mn0.7	220	305- 370	12
ASTM B 209' a göre mekanik özellikler				
5083 H321 ⁽²⁾	4.4Mg-0.7Mn-0.15Cr	215- 295	305- 385	12
⁽¹⁾ Deneysel olarak saptanan değerlerdir (60 ton kapasiteli DARTEC çekme cihazı- KOÜ Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü Malzeme Teknolojisi Laboratuvarı).				
⁽²⁾ Isıl işlem ve kalınlığa bağlı olarak mekanik özellikler aralığı.				

Kaynak edilecek parçaların boyutları EN 288- 4 standardına göre saptanmıştır. 6.45x150x350 boyutlarındaki levhalar, yatay oluk pozisyonunda I- Alın (Küt Alın) kaynak ağız biçiminde kaynak edilecek şekilde hazırlanmışlardır.

Kaynak öncesinde, alüminyum alaşımlarının yüzeyinde bulunan ve kaynakta birleşme zorluğuna yol açan oksit tabakası ve kirlilikler; yağ ve oksit alma gibi kimyasal işlemlerin yanı sıra, kaynak işlemine başlamadan önce paslanmaz çelik tel fırça ile fırçalama gibi mekanik bir temizleme yöntemi kullanılarak temizlenmiştir.

Kaynak Yöntemlerinin Uygulanması

MIG ve TIG Kaynak Yöntemlerinin Uygulanması

Standartta belirtilen esaslara göre hazırlanan levhalara, MIG ve TIG kaynak yöntemleri uygulanmıştır. Bu aşamada, AW 5083--AW 5083 eş alaşım çifti biçiminde MIG ve TIG kaynaklı bağlantılar çift taraflı olarak birer pasoda kaynak edilerek oluşturulmuştur.

Deney parçalarının MIG ve TIG kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde 1.6 mm çapında ER5356 (EN AW- AlMg5Cr(A)) alüminyum alaşımı tel elektrod kullanılmıştır. Koruyucu gaz % 99.999 Ar gazı, gaz debisi 12 lt/dak olarak alınmıştır. Kaynak akım şiddeti 180-200 A, kaynak gerilimi 24- 26 V olup deney parçaları endüstriyel koşullarda yarı otomatik olarak kaynak edilmiştir.

Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynak (FSW) Yönteminin Uygulanması

Standart boyutlarda hazırlanan EN AW-5083- H321 alüminyum alaşımı levhalara, universal freze tezgahında daha önceden yapılan ön deneyler sonucunda saptanan ve literatüre uyumlu kaynak parametreleri kullanılarak, sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yöntemi (FSW), AW 5083--AW 5083 eş alaşım çifti biçiminde çift taraflı olarak birer pasoda uygulanmıştır.



Şekil 1. Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynağında Parçaların Rijit Olarak Bağlanması ve Kaynak İşleminin Yapılışı (19).

Kaynak işlemi sırasında parçalar alın altına getirilerek arada boşluk kalmayacak şekilde ağızlanmış ve çelik lama pabuçlar ile rijit bir şekilde (Şekil 1) sabitlenmiştir.

Sürtünen Eleman İle Birleştirme Kaynak (FSW) yöntemi ile deney parçalarının birleştirilmesinde, literatür taraması ve yapılmış olan ön deneylere göre; AISI 4340 (%0.40 C, %0.70 Mn, %0.30 Si, % 0.80 Cr, %1.80 Ni, %0.25 Mo) çeliğinden yapılmış 20 mm çapında, ucunda 3.6 mm boyunda M5 sol vida açılmış pim bulunan ve Şekil 2'de fotoğrafı görülen omuzlu özel takım kullanılmıştır. Yöntemin uygulanması sırasında takım, ilerleme yönüne doğru, dik eksenle 2° açı yapacak biçimde ayarlanmıştır.



Şekil 2. FSW Yöntemi Uygulanarak Yapılan Deneylerde Kullanılan Takımın Görünümü (19).

Yöntem, literatür taramaları ve ön denemeler sonucunda saptanan ilerleme hızı ve takım dönme devri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlerleme hızı, 12.5 cm/dak ve devir 1600 d/dak olarak uygulanmıştır.

DENEY SONUÇLARI

Kaynaklı Levhaların Görsel İncelenmesi

Deney numunelerinin çıkarılacağı alın birleştirme bağlantılarında, uygulanan kaynak işlemi sonrası oluşabilecek yüzey hatalarını saptamak amacı ile, görsel inceleme tüm kaynak dikişi boyunca yapılmıştır. Bu incelemede, ANSI/AWS B1.11-88 (Guide for the Visual Inspection of Welds) esas alınmıştır.

Öncelikle, çift taraftan birer pasoda kaynak edilmiş olan MIG kaynaklı levha incelenmiş ve kaynak dikişinde yalnız çok az bölgede yanma oluşu hatası görülmüştür. TIG kaynaklı levhanın kaynak dikişi boyunca da az bir bölgede, bağlantının mukavemet değerlerini etkilemeyecek ölçüde kesintili yanma oluşu saptanmıştır. Sıçramalar, yönergenin öngördüğü sınırlar dahilinde olup kaynaktan sonra taşlanarak mekanik olarak temizlenmiştir. Kaynak dikişlerinde herhangi bir süreksizlik izlenmemiştir, kaynak dikiş tırtıllarının oldukça

düzgün olduğu ve kaliteli bir kaynak dikişi gösterdiği gözlenmiştir.

En büyük çarpılma miktarları MIG kaynaklı levhada görülmüştür.

FSW bağlantısının görsel incelemelerinde, dikiş görünümü takımın açılı ilerlemesine bağlı olarak yarı dairesel halkalar biçiminde olmakla birlikte, bazı yerlerde oldukça sık ve parlaktır. Takım omuz çapına bağlı olarak dikiş genişlikleri 20 mm ve homojendir. Yalnızca başlangıçta, yaklaşık 20- 30 mm'lik kısım, başlangıç plakası kullanılmadığından düşük boyutludur ve ileride omuz çapı ölçüsüne doğru normal bir genişleme göstermiştir. Üst ve alt kaynak dikişlerinin çökme miktarı en çok 0.5 mm olmakla beraber normal ve literatürle uyumludur. FSW yöntemi ile birleştirilmiş levhada çarpılmaya rastlanmamıştır.

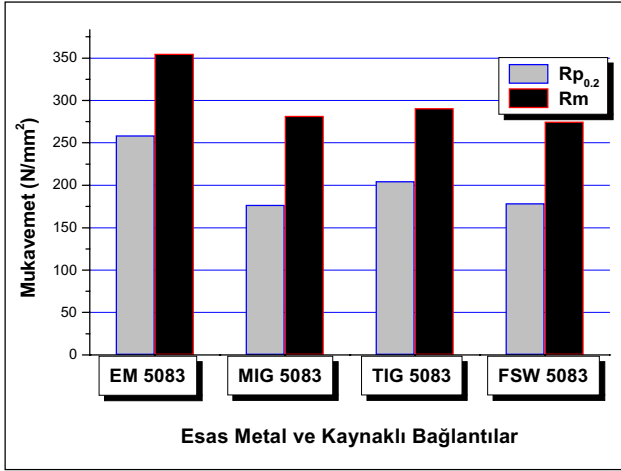
Çekme Deney Sonuçlarının İncelenmesi

MIG, TIG ve FSW kaynaklı bağlantılardan EN 895'e göre çıkarılan çekme numunelerine uygulanan çekme deneyi sonucu elde edilen akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama miktarı ve kopma yerini belirten sonuçlar Tablo 3' de özetlenmiştir.

Tablo 3. MIG, TIG ve FSW Kaynaklı Bağlantıların Çekme Deneyi Sonuçları.

Parça No.	R _{p 0.2} (N/mm ²)	R _m (N/mm ²)	Uzama (%)	Kopma Yeri
MIG 5083 C1	178	281	6.8	Kaynak Metali
MIG 5083 C2	177	286	7.4	Kaynak Metali
MIG 5083 C3	178	278	6.6	Kaynak Metali
MIG 5083 ORT.	177	282	6.93	-
TIG 5083 C1	205	288	8	Kaynak Metali
TIG 5083 C2	210	296	8.81	Kaynak Metali
TIG 5083 C3	201	290	8	Kaynak Metali
TIG 5083 ORT.	205	291	8.03	-
FSW 5083 C1	114 (sapma)	154 (sapma)	6.4	Kaynak Metali
FSW 5083 C2	194	300	5.2	Termomekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB)
FSW 5083 C3	164	250	2.8	Termomekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB)
FSW 5083 ORT.	179	275	4.8	-

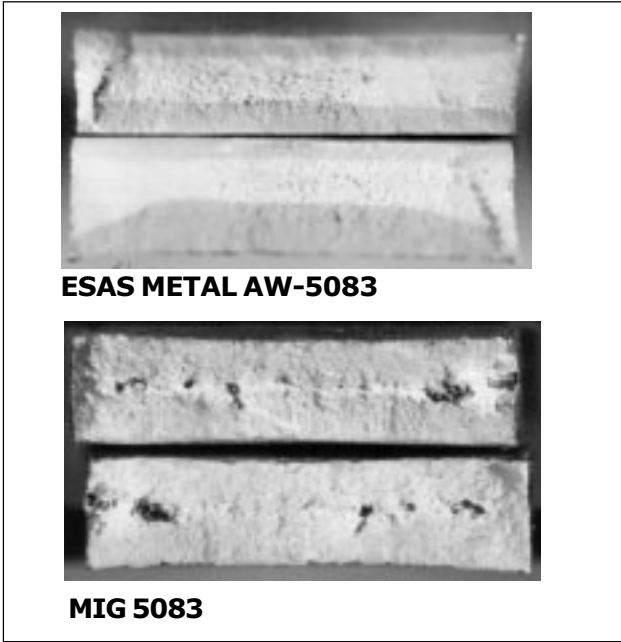
MIG, TIG ve FSW bağlantılarından çıkarılan çekme deney numunelerine uygulanan çekme deneyi sonucunda elde edilen akma mukavemeti ve çekme mukavemet değerleri, esas metal akma ve çekme mukavemet değerleri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 3'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 3. MIG, TIG ve FSW Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Esas Metal ile Karşılaştırılması.

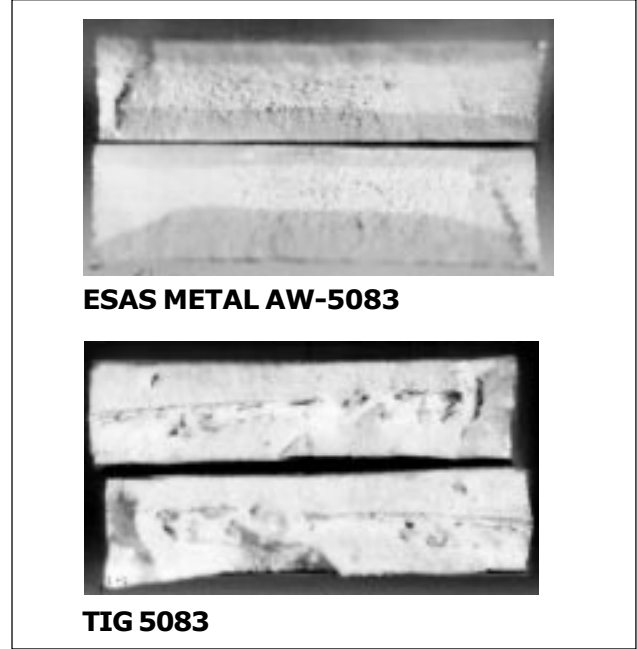
Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi

Esas metal ile MIG, TIG ve FSW yöntemleri kullanılarak kaynak edilmiş levhalardan çıkarılan çekme

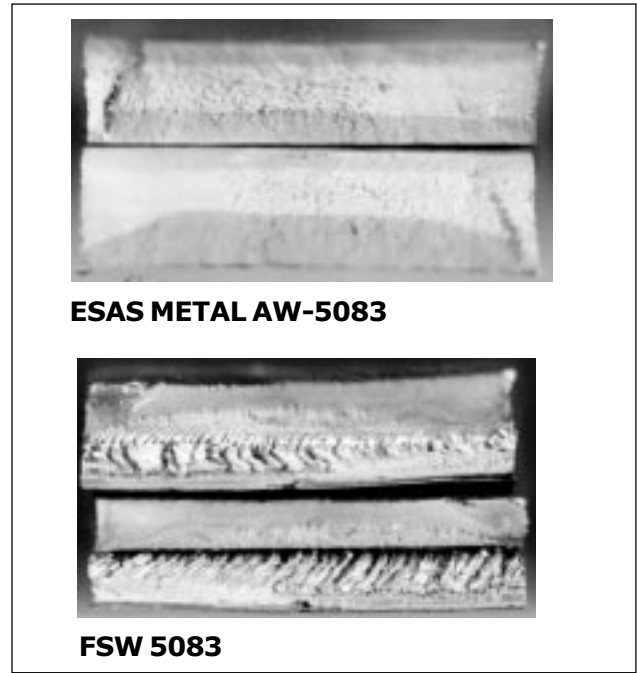


Şekil 4. Esas Metal Kırılma Yüzeyi ve MIG Yöntemi ile Kaynak Edilmiş Bağlantıya Ait Kırılma Yüzeyinin Karşılaştırması (19).

deney numunelerine uygulanan çekme işlemi sonucunda elde edilen kırılma yüzeylerine ait görüntüler Şekil 4, 5 ve 6'da görülmektedir.



Şekil 5. Esas Metal Kırılma Yüzeyi ve TIG Yöntemi ile Kaynak Edilmiş Bağlantıya Ait Kırılma Yüzeyinin Karşılaştırması (19).



Şekil 6. Esas Metal Kırılma Yüzeyi ve FSW Yöntemi ile Kaynak Edilmiş Bağlantıya Ait Kırılma Yüzeyinin Karşılaştırması (19).

Eğme Deneyi Sonuçları

MIG, TIG ve FSW yöntemleri ile kaynak edilmiş levhalardan EN 910'a göre çıkarılan eğme numunelerine uygulanan kök eğme ve yüz eğme deneylerinde elde edilen sonuçlar Tablo 4' de görülmektedir.

Tablo 4. MIG, TIG ve FSW Kaynaklı Bağlantıların Eğme Deney Sonuçları

Numune Kodu	Sonuç
MIG 5083 EY1	Çatlama görülmedi
MIG 5083 EK1	Çatlama görülmedi
MIG 5083 EY2	Yanma oluşu gözlemlendi
MIG 5083 EK2	Çatlama görülmedi
TIG 5083 EY1	Çatlama görülmedi
TIG 5083 EK1	Çatlama görülmedi
TIG 5083 EY2	Yanma oluşu gözlemlendi
TIG 5083 EK2	Çatlama gözlemlendi
FSW 5083 EY1	Çatlama görülmedi
FSW 5083 EK1	Çatlama görülmedi
FSW 5083 EY2	Çatlama görülmedi
FSW 5083 EK2	Çatlama görülmedi

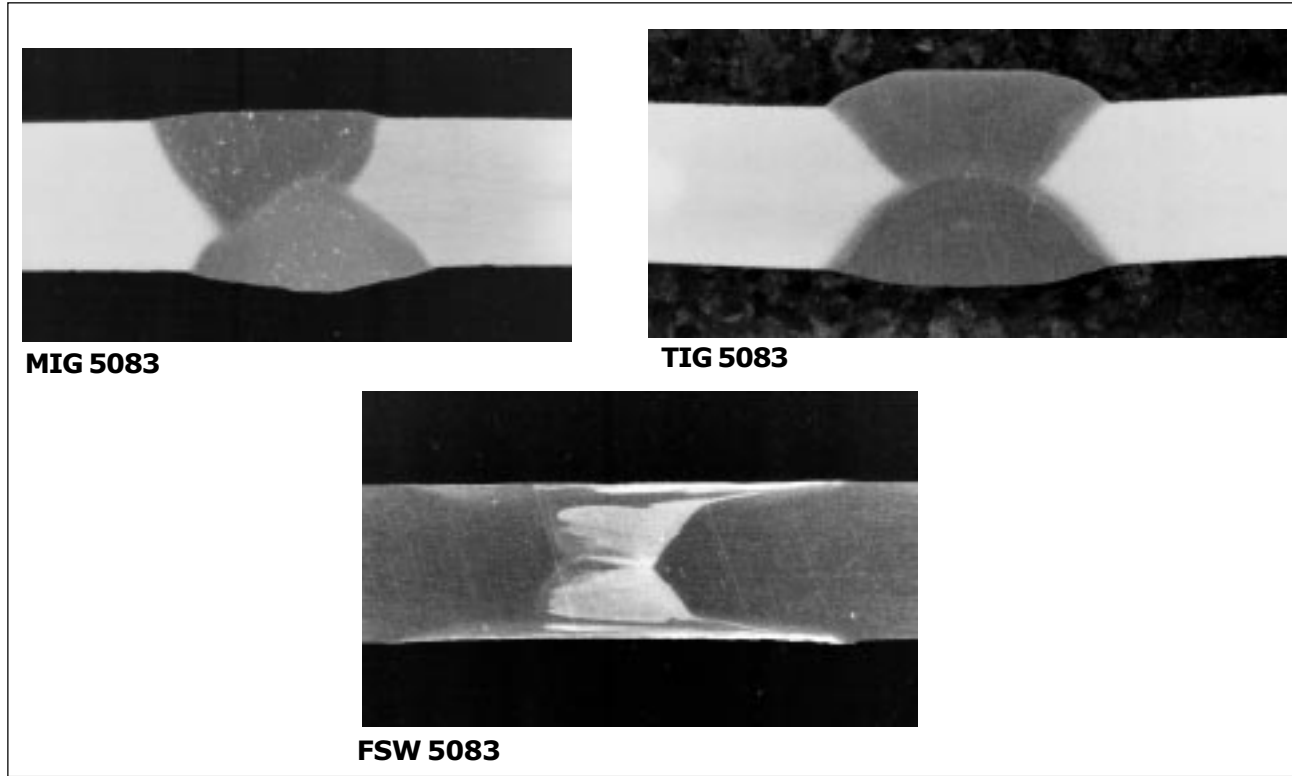
Metalografik İnceleme Sonuçları

Her üç kaynak yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bağlantılardan alınan numuneler üzerinde kaynak bölgeleri metalografik olarak detaylı bir biçimde incelenmiştir. Makroyapı ve mikroyapı incelemeleri ayrı ayrı yapılmış olup MIG, TIG ve FSW kaynaklı bağlantılara ait makroyapı görüntüleri Şekil 7'de toplu olarak verilmektedir.

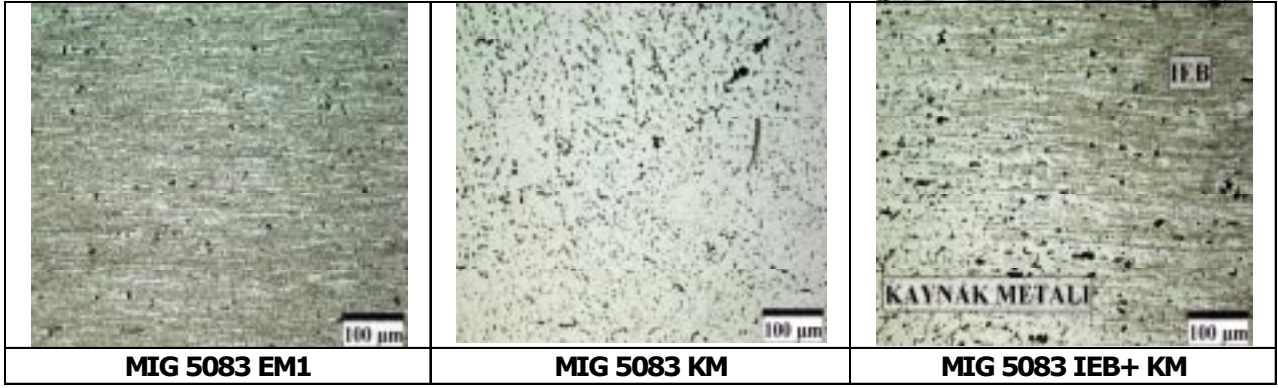
MIG, TIG ve FSW kaynaklı bağlantılar için kaynak bölgesinin (EM-IEB-KM-IEB-EM) metal mikroskobu ile 200x büyütme oranı ile Clemex görüntü analiz sistemi kullanılarak yapılmış olan mikroyapı incelemeleri Şekil 8, 9 ve 10'da verilmiştir.

Mikrosertlik İnceleme Sonuçları

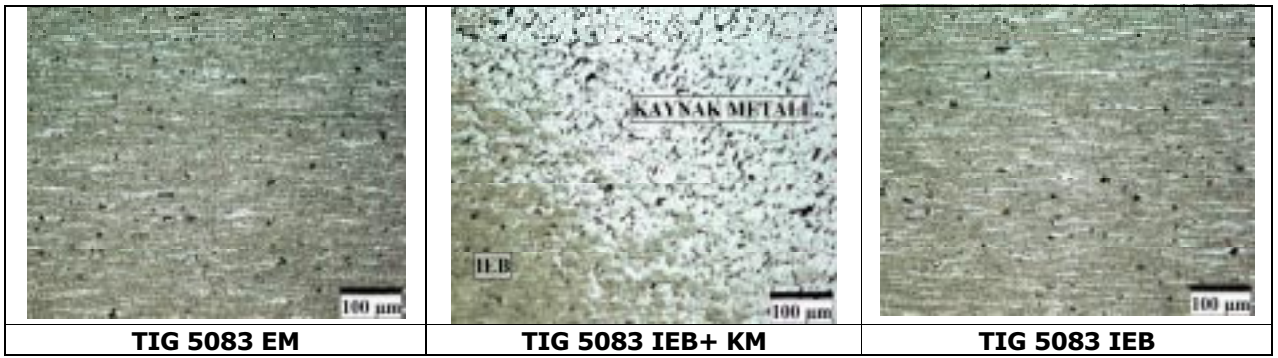
MIG, TIG ve FSW yöntemleri uygulanmış levhalardan alınan metalografik inceleme numuneleri üzerinde kaynak bölgesinden EM-IEB(TMEB)-KM-



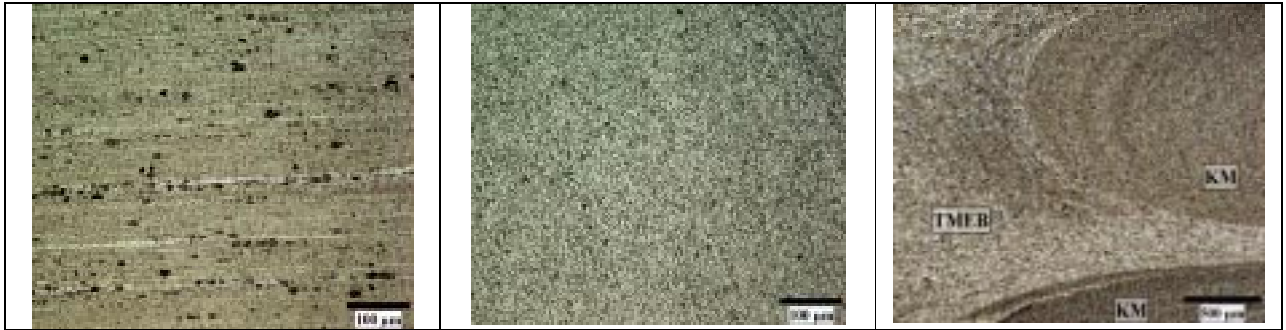
Şekil 7. MIG 5083, TIG 5083 ve FSW 5083 Bağlantılarına Ait Makroyapı Görüntüleri (19).



Şekil 8. MIG 5083 Kodlu Numunenin Mikroyapı Görüntüleri (19).



Şekil 9. TIG 5083 Kodlu Numunenin Mikroyapı Görüntüleri (19).



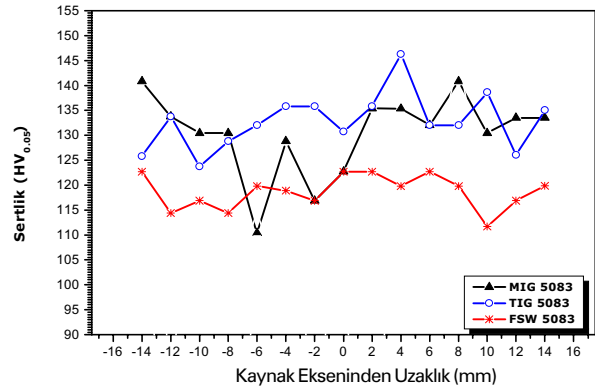
Şekil 10. FSW 5083 Kodlu Numunenin Mikroyapı Görüntüleri (19).

IEB(TMEB)-EM numune üst yüzeyinden 2 mm derinlikte, 2 mm aralıklarla kaynak ekseninde sağında ve solunda 50 g deney yükü ile ($HV_{0,05}$) yapılan Vickers sertlik tarama sonuçları Şekil 11 'de verilmiştir.

DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Görsel İnceleme Sonuçlarının İrdelenmesi

Çift taraftan birer pasoda kaynak edilmiş olan MIG kaynaklı ve TIG kaynaklı levhalarda, kaynak dikişlerinin ilgili standart ve yönergelerine göre normal olduğu,



Şekil 11. MIG, TIG ve FSW Kaynaklı Bağlantıların Vickers Sertlik Taraması Sonuçları.

sıçramaların ergitme esaslı bu kaynak yöntemlerinde rastlanan boyut ve dağılımda oldukları ve dikişlerde mekanik özellikleri fazla etkilemeyecek derecede yanma olukları olduğu saptanmıştır. Dikiş boyutları normal ölçülerdedir, dikiş tırtılı kaliteli kaynak bağlantısında görülen ile aynıdır. Ergitme esaslı bir kaynak yöntemi kullanıldığı için, ısı girdisi nedeniyle oluşan çarpılma miktarları da normaldir. Çarpılmayı, alüminyumun yüksek ısı iletkenliğine ve yüksek genleşme katsayısına sahip olması teşvik etmiştir. Bulgular, literatür ile uyumludur (20, 21).

Çift taraftan birer pasoda kaynak edilmiş olan FSW kaynaklı levhada, kaynak dikişleri görünümü normal olup takım omzunun basınç etkisi ile oluşan çökme derinliği maksimum 0,5 mm'dir ve literatür ile uyum sağlamaktadır (5,14, 20, 21). Dikiş boyutlarının levhaya birleştirme çizgisi boyunca takımın girdiği bölgede nispeten dar başlaması ve 30 mm ileride takım omuz çapına uyumlu olması da normaldir; çünkü yöntemin uygulanmasında bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için başlangıç levhası kullanılmamıştır. Levha sonunda, takım çıkarken bıraktığı aksel boşluk da bu yöntemde oldukça normaldir ve bu kısımlar deney numunelerinin çıkarılması sırasında ıskartaya ayrılmışlardır. Yüz ve kök dikişlerinde takım omzunun bıraktığı yarı dairesel izler, bağlantı mukavemetini etkilemeyecek biçimde oluşmuştur ve yine bu yöntem ile oluşturulmuş kaynak dikişlerinin normal görünümündedir. Yöntem, bir katı faz kaynak yöntemi olduğu için malzeme sıcaklığı, kaynak metalinde 400-450°C'ye ulaşmakta ve alüminyum alaşımının ergime sıcaklığının altında kalmaktadır, ısı girdisi yerel olarak olduğundan ve dolayısı ile ergitme kaynak yöntemlerinde olduğunun aksine, bağlantılarda çarpılma oluşmamaktadır. Bulgular, literatür ile uyumludur (5, 7, 14, 20- 22).

Çekme Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi

MIG ve TIG kaynaklı bağlantıların çekme deneyi

sonuçları incelendiğinde, MIG kaynaklı bağlantıların ortalama mukavemet değerlerinin esas metal mukavemet değerinin ortalama %79'u olduğu ve tüm kopmaların kaynak metalinden oluştuğu görülmektedir. Bu da kaynak metalinin yumuşak olduğunun bir göstergesidir ve bu bulgular metalografik inceleme ve sertlik sonuçları ile karşılaştırıldığında da açıkça görülmektedir. Zira, MIG kaynağında kullanılan tel bileşiminin de mukavemet üzerine etkisi vardır ve kaynak metali döküm yapısında olup mekanik mukavemetlendirme işleminin mukavemeti artırıcı etkisi yüksek kaynak ısı girdisi nedeni ile ortadan kalkmıştır ve daha yumuşaktır. Bunların yanı sıra, makro yapıda kaynak metalinde kabul edilebilir sınırlarda olsa bile gözeneklilik görülmektedir. Bu gözeneklerin de kırılmanın kaynak metalinden olmasını teşvik ettikleri anlaşılmaktadır.

TIG kaynaklı AW 5083- H321 levhanın akma mukavemeti ortalama 205, çekme mukavemeti 291 MPa olarak bulunmuştur ve esas metal mukavemet değerinin ortalama %81' dir. Bu sonuç da ilginçtir; halbuki bu bağlantıda da kopmalar kaynak metalinden oluşmuştur; ancak, sertlik eğrileri incelendiğinde bu numunelerin sertlik değerlerinin MIG kaynaklılara göre yüksek oldukları görülmektedir. Bu açıdan, olayın açıklanabilmesi için kaynak bölgesinin metalografik olarak incelenmesi ve kırılma yüzeylerinin elektron mikroskobu ile yüksek büyütme oranlarında analiz edilmesi gerekmektedir. Bu bulgular da incelendiğinde TIG kaynaklı bağlantıda, kırılmanın özellikle TIG 5083 kodlu numunelerde daha sünek olduğu, kaynak metalinde daha az gözenekliliğe rastlandığı anlaşılmıştır; ancak, kaynak pasolarının orta kısmında eksik ergime hatası bulunduğu kaynak bölgesinin makroyapı görüntüsü ve kırılma yüzeyi görüntüsünden de anlaşılmaktadır. Bu yöntemin uygulanmasında da, aynı kaynak teli kullanılmış olması, buna karşın mukavemet değerinin MIG

kaynaklı bağlantılara göre biraz daha yüksek mukavemet değerine sahip olmasının nedeni TIG kaynağı ısı girdisinin MIG kaynağı ısı girdisine göre yerel olmasıdır ve yerel ısı girdisinin mekanik mukavemetlendirme işleminin etkisini daha az ortadan kaldırdığı şeklinde görülmektedir.

FSW kaynaklı bağlantının çekme deneyi sonuçları incelendiğinde, kopmaların bir numunede kaynak metalinden, diğer numunelerde ise termomekanik olarak etkilenmiş bölgeden (TMEB) olduğu görülmüştür ve bağlantıların kopma mukavemet değerlerinde esas metal mukavemet değerinin ortalama %77'ine ulaşılmıştır. FSW kaynaklı bağlantıların akma ve çekme mukavemet değerlerinin MIG ve TIG kaynaklı bağlantılar ile çok fazla farklılık göstermediği de görülmektedir ve kaynak bağlantısından istenen yeterli mukavemete erişilmiştir. Aynı metal alaşımının FSW kaynağı üzerine yapılan çalışmalarda ise (18), bulunan bağlantı mukavemet değerinin esas metal mukavemetinin %73 'ü şeklinde olduğu belirtilmiştir, buna karşın bu çalışmada elde edilen değer daha yüksek olarak bulunmuştur. Kırılma yüzeylerinin optik ve taramalı elektron mikroskobu incelemeleri de kırılmanın, taneler dışı kırılma olarak sünek ve gevrek biçimde karışık olarak oluştuğu ve literatür taramalarından görüldüğü gibi, kırılmanın soğan halkalarından kat kat meydana geldiği, kaynak dikişinin TMEB' den olduğu, bu şekilde kırılma sayesinde FSW kaynaklı bağlantı mukavemet değerlerinin ergitme esaslı kaynak bağlantıları ile karşılaştırıldığında, başarılı sonuçlar ortaya çıktığı görülmüştür. Mekanik mukavemetlendirme işleminin mekanik özellikleri artırıcı etkisi, FSW 5083 kodlu numunelerde, bir kez daha ortaya çıkmıştır.

Eğme Deneyi Sonuçlarının İrdelenmesi

MIG, TIG ve FSW yöntemleri ile kaynak edilmiş

levhalardan çıkarılan standart eğme numunelerinin yüz ve kök eğme sonuçları, gazaltı kaynak yöntemlerinde çeşitli nedenlerle oluşan gözeneklerin teşvik ettiği tekil çatlamlar dışında, oldukça normaldir ve bu tür bağlantılarda karşılaşılan eğme sonuçları ile uyumludur. Özellikle, bir katı faz kaynak yöntemi olan FSW kaynak yöntemi ile oluşturulmuş kaynaklı bağlantının eğme deneyi sonuçları ve gösterdikleri performans literatürde de belirtildiği gibi yöntemin ergitme esaslı kaynak yöntemlerine göre üstün bir yönünü daha ortaya çıkarmaktadır.

Metalografik İnceleme Sonuçlarının İrdelenmesi

Her üç kaynak yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bağlantılardan alınan numuneler üzerinde kaynak bölgelerinin detaylı olarak metalografik incelemesi yapıldığında, MIG ve TIG kaynaklı bağlantıların ışık mikroskobu ile yapılan makro incelemelerinde kaynak bölgelerinin normal EM, IEB ve KM makro ve mikro yapıları görüntüsü verdiği görülmüştür. Esas metal mikroyapısının haddeleme hatlarını içeren ve ince taneli homojen çökelti dağılımlı olduğu görülmüştür. IEB'de çökeltilerin daha sıklaşarak oluştuğu ve bölgenin kaynak metaline göre daha koyu renkte, daha sık çökeltili olduğu saptanmaktadır. IEB' den kaynak metaline geçişte keskin ergime çizgisi görüntüsü makroyapılarda da ortaya çıkmış olup bu bölgedeki mikroyapı geçişi de koyu renkten daha açık bir dokuya geçiş biçimindedir. Kaynak metali olarak kullanılan alaşımın ve hızlı soğumanın etkisiyle kaynak metal yapısında oluşmuş olan çökeltiler daha geniş aralıklarda KM yapısına serpilmiş durumdadır.

MIG 5083 kodlu numunelerde ise esas metal yapısının daha ince tanelerden oluştuğu, IEB- KM geçişinin ve kaynak metali mikroyapısının normal olduğu anlaşılmaktadır. Ancak, MIG 5083 kodlu

numunelerde, kaynak metalinde gözenekler olduğu saptanmış buna karşın, eğme deneyi sonuçlarında bu numunelerde çatlama görülmemiş ve çekme deneyi sonuçlarında da bu gözenekliliğin mukavemet üzerine etkisi ortaya çıkmıştır. Makro yapılarda, kaynak dikisinde izlenen gözeneklilik, kullanılan kaynak telinin ve koruyucu gazın, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında neden olabileceği normal bir durumdur ve gözenek boyut ve miktarları kabul edilebilir sınırlardadır (2).

FSW kaynaklı bağlantının ışık mikroskobu ile yapılan makro incelemelerinde, kaynak bölgelerinin normal EM, IEB(TMEB) ve KM makro ve mikro yapıları görüntüsü verdiği görülmüştür. Esas metal mikroyapısının haddeleme hatları içeren ve ince taneli homojen çökelti dağılımlı olduğu, TMEB' de ise çökeltilerin daha sıklaşarak oluştukları ve bölgenin kaynak metaline göre daha açık renkte olduğu saptanmıştır. Bu kaynak yönteminde, kaynak metali içiçe geçmiş soğan halkaları görünümünde olup koyu renkli ve açık renkli eliptik halkalardan oluşmuştur ve literatürde görülenler ile aynıdır (5, 14, 15, 23). Takımın yarattığı plastikleşme etkisiyle karışan metal, simetrik eliptik halkalar dışında simetrik olmayan halkalar da içermektedir. Kaynak metali boyutları, takım omuz çapından daha küçük boyutlarda, yaklaşık 1/4 kadar küçük olup FSW 5083 kodlu numunede simetrikdir. Çift taraftan birer pasoda oluşturulan kaynak metalinin içiçe geçmiş faylanma yapısı, düşük büyütmelemlerde açıkça görülmekte ve halkalar takımın karıştırma etkisi ile birbiri içine dalmakta, ilginç ve incelenen literatürde daha önce görülmeyen bir karışım bölgesi yapısı oluşturmaktadır (Şekil 7). Çekme deneyi sonucunda, kırılma yüzeylerinin SEM incelemeleri de sünek, gevrek bir kırılmayı göstermekte ve kırılmanın kaynak metalinde içiçe geçmiş koyu renkli ve açık renkli bölgelerdeki farklı yapı karakterlerinin sert- yumuşak yapı oluşumu etkisiyle

taneler dışından kırılma biçiminde ortaya çıktığının bir göstergesi olmaktadır.

Kaynak Kesitlerinde Mikrosertlik Taraması Sonuçlarının İrdelenmesi

MIG, TIG ve FSW yöntemleri uygulanmış levhaların kaynak kesitlerinden çıkarılan metalografi numuneleri üzerinde 50 g deney yükü kullanılarak yapılan Vickers sertlik taramalarının sonuçları incelendiğinde; MIG kaynaklı bağlantıda esas metal sertliğinin ortalama 140, kaynak metali sertliğinin ortalama 115 HV civarında olduğu görülmüştür. Sertlik esas metalden, IEB 'ye ve kaynak metaline doğru düşmektedir. Yani bağlantıların kaynak metalleri daha yumuşak görülmektedir. TIG kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik taraması sonuçlarında EM sertliklerinin düşmesi gibi bir durum ile karşılaşmıştır. Bu değer, ortalama 135 HV değerindedir. MIG kaynaklı bağlantılarda rastlananın tersine IEB ve KM'de EM sertlik değerine göre ani düşüşler görülmemiştir. Özellikle, TIG 5083 kodlu numunede tüm bölgelerde sertlik değerleri diğerlerine göre yüksek seyretmektedir. Bu ilginç durum, bu bağlantıların mekanik değerlerinin de yüksek olduğunun bir kanıtı olmaktadır.

FSW kaynaklı bağlantıların Vickers sertlik tarama sonuçlarında kaynak bölgesinde sertliğin ortalama 120 HV olduğu ve 112 HV ile 125 HV arasında değiştiği görülmüştür (Şekil 11). Literatürde (14-16), FSW yöntemi uygulanmış bağlantıların sertlik değerlerinin EM'den TMEB'ye ve KM'ye doğru düşüş göstermesi ile karşılaşılırken burada tersine bir durum ortaya çıkmaktadır. Çift taraflı kaynağın ve takım omzunun ısıtma etkisinin çift taraflı olmasının kaynak bölgesinin sertliğini etkilediği görülmekte olup, sertlik dağılımının tüm bölgelerde homojene yakın değişmesi ilginçtir. Ancak, literatürde başka alüminyum alaşımı üzerinde

yapılan çalışmada da (20,21) bu şekilde sertlik değişimine benzer durumlar olduğu görülmektedir. Kaynakta ergime olmaması ve kaynak metalinin dar olan ısıdan etkilenmiş bölgesinde sertliği artıracak çökeltilerin bulunmaması sertlikte çok fazla değişim oluşmamasına yol açmıştır.

SONUÇLAR

Alüminyum ve alüminyum alaşımları içinde yüksek mukavemetleri ve korozyona dirençleri nedeni ile gemi inşa ve savunma endüstrilerinde taşıt yapımında çok kullanılan alaşımlar olan 6.45 mm kalınlığındaki EN AW-5083- H321 (EN AW- AlMg4.5Mn0.7) alaşımı levhaların MIG, TIG ve Sürtünen Eleman ile Kaynak (FSW) yöntemleri kullanılarak birer pasoda çift taraflı kaynak edilmeleri ve bağlantıların mekanik özellikleri ve kaynak bölgelerinde, kaynak ısı girdisi nedeni ile oluşan metalurjik dönüşümleri detaylı bir biçimde incelemek amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmanın sonucunda aşağıda sıralanan genel sonuçlara ulaşılmıştır.

(1) FSW kaynaklı levhada çarpılma görülmezken kaynak ısı girdisi nedeniyle MIG ve TIG kaynağı uygulanmış levhaların çarpılmaları oldukça fazladır.

(2) FSW kaynaklı bağlantıda kaynak dikişinde bir taşlama işlemi gerekmezken MIG ve TIG kaynaklı levhalarda kaynak sırasında tel elektrod ve gaz sarfiyatının yanı sıra dikiş taşkınlıklarının giderilmesi gibi maliyeti artırıcı etkenler çok fazladır.

(3) Sürtünen eleman ile kaynak edilmiş levhanın mekanik özelliklerinin MIG ve TIG kaynağı uygulanmış levhaların mekanik özelliklerine yakın ve bir kaynaklı bağlantıdan istenen düzeyde olduğu ortaya çıkmıştır.

(4) Bir katı faz kaynak yöntemi olan FSW yöntemiyle oluşturulan bağlantının kaynak metali boyutları MIG ve TIG kaynaklılarda oluşanlara göre küçüktür ve malzeme ergime sıcaklığına ulaşmadığından kaynak bölgesinde

bağlantı performansını olumsuz yönde etkileyecek metalurjik dönüşümler ve çökeltiler bulunmamaktadır.

Başta alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanan yeni bir katı faz kaynak yöntemi olan Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynak (FSW) Yöntemi, ülkemizde daha yeni yeni tanınmakta ve endüstriyel uygulamaya her yeni yöntem gibi çok zor girmektedir. Ancak, bu çalışma göstermiştir ki yöntem alüminyum ve alaşımlarını kullanan birçok endüstri kolunda güvenle ve rahatlıkla uygulanabilir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde kullanılan alüminyum alaşımı malzemelerin temini ile MIG ve TIG kaynaklarının yapılmasını sağlayan FNSS Savunma Sistemleri A.Ş. yetkililerine, FSW bağlantıların oluşturulmasında bilgi birikimi ve tecrübelerini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. M. Kemal Külekçi'ye, deneylerin yapılmasında Talaşlı Şekillendirme ve Malzeme Teknolojisi laboratuvarlarının olanaklarını sunan KOÜ Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Y. Müh. İbrahim Uzman'a, metalografik numune incelemelerinde kullanılan sarf malzemelerin sağlanmasında yardımcı olan ALS (Applied Laboratory Systems) firmasına, SEM incelemelerinin yapılmasında bölüm olanaklarını sunan KOÜ Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr.-Müh. Şadi Karagöz'e sonsuz teşekkürlerini sunarlar.

KAYNAKÇA

1. **Anderson, T.**, 2000, "The Advancement of Al within the Welding Fabrication Industry and Its Many Product Design Applications", Svetsaren, No. 2, pp. 3-5.
2. **Mathers, G.**, 2002, "The Welding of Aluminium and Its Alloys", Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.

3. **Welding Handbook**, 2004, Volume 2, "Welding Processes", Part I, Ninth Edition, AWS, USA.
4. **Mahoney, M. W.**, 1997, "Science Friction", *Welding&Joining*, No.2, pp. 18-20.
5. **Thomas, W. M., Treadgill, P. L., Nicholas, E. D.**, 1999, "Feasibility of Friction Stir Welding Steel", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 4, No. 6, pp. 365- 372.
6. **Dawes, C.J., Thomas, W.**, 1995, "Friction Stir Joining of Aluminium Alloys", *TWI Bulletin* 6, Reprint 493/6/95, pp. 124-127.
7. **Kaluç, E., Bozduvan, B.**, 1998, "Sürtünen Eleman ile Birleştirme Yöntemi", *Makina Magazin*, Sayı: 27, s. 54- 61.
8. **Kaluç, E.**, 2004, "Kaynak Teknolojisi El Kitabı- Cilt 1- Ergitme Esaslı Kaynak Yöntemleri", MMO Yayını, Yayın No: 356, Ankara.
9. **Johnsen, M. R.**, 1999, "Friction Stir Welding Takes Off at Boeing", *Welding Journal*, Volume 78, No. 2, pp. 35- 39.
10. **Kallee, S.W., Da Venport, J., Nicholas, E.D.**, 2002, "Railway Manufacturers Implement Friction Stir Welding", *Welding Journal*, Vol. 81(11), pp.47- 50.
11. **Swint, W.**, 2000, "ESAB's Partnership with Canada's West Coasts Shipbuilding Industry- Pacificat 1000 Series High Speed Ferry", *Svetsaren*, No. 2, pp. 28- 30.
12. **Lahti, K.**, 2003, "FSW- Possibilities in Shipbuilding", *Svetsaren*, No.1, pp. 6-8.
13. **Colligan, K. J., Konkol, P. J., Fisher, J. J., Pickens, J. R.**, 2003, "Friction Stir Welding Demonstrated for Combat Vehicle Construction", *Welding Journal*, Vol. 82, No. 3, pp. 33- 40.
14. **Threadgill, P.**, 1997, "Friction Stir Welds in Aluminium Alloys- Preliminary Microstructural Assessment", *TWI Bulletin* Reprint 513/2/97, UK.
15. **Peel, M, Steuwer, A., Freuss, M, Withers, P.J.**, 2003, "Microstructure, Mechanical Properties and Residual Stresses as a Function of Welding Speed in Aluminium AA5083 Friction Stir Welds", *Acta Materialia*, Vol. 51, pp. 4791- 4801.
16. **James, M.N., Hattingh, D.G., Bradley, G.R.**, 2003, "Weld Travel Speed Effects on Fatigue Life of Friction Stir Welds in 5083 Aluminium", *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, pp. 1389- 1398.
17. **Larsson, H., Karlsson, L.**, 2000, "Friction Stir Welding of AA 5083 and AA 6082", *Svetsaren*, No. 2, pp. 6- 10.
18. **Liu, H. J, Fujii, H., Maeda, M., Nogi, K.**, 2003, "Friction Stir Welding of AA 5083 Aluminium Alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 13; 14- 17Sp., Iss. 1.
19. **Taban, E.**, 2004, "5xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının TIG, MIG ve Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynaklı Bağlantılarının Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, KOÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
20. **Küleççi, M.K.**, 2003, "Mechanical Properties of Friction Stir- Welded of AlCu4SiMg Aluminium Alloy", *Kovove Materiály*, Vol. 41 (2), pp.97- 105.
21. **Küleççi, M.K.**, 2004, "Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilen Alüminyum Alaşımı Levhaların Mekanik Özellikleri", *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, Cilt. 6, Sayı.1, Mayıs 2004, s. 23- 28.
22. **Thomas, W. M.**, 1998, "Friction Stir Welding and Related Friction Process Characteristics", *INOLCO'98*, 7th International Conference on Joints in Aluminium, 15- 17 April 1998, pp. 1- 14, Abington, Cambridge, UK.
23. **Krishnan, K. N.**, 2002, "On the Formation of Onion Rings in Friction Stir Welds", *Materials Science and Engineering*, A327, pp. 246- 251.