



Havacılıkta Kullanılan 6013-T6 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağıyla Birleştirilmesi

Haşim KAFALI*¹, Nuran AY

¹Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Dalaman Sivil Havacılık Yüksekokulu, 48470, Muğla

(Alınış Tarihi: 01.04.2014, Kabul Tarihi: 09.05.2014)

Anahtar Kelimeler

Sürtünme Karıştırma Kaynağı
Uçak Yapısı
Çekme Testi
Mikroyapısal İnceleme
Uçak Bakım Onarım.

Özet: Alüminyum alaşımları uçak yapılarında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır, özellikle kanat ve gövde kaplamalarında kullanılırlar. Bu yapıların birleştirilmelerinde geleneksel bir teknik olan perçinle birleştirme kullanılır. Fakat perçinleme uçağın yapısal ağırlığını arttırmaktadır ve perçin delikleri yorulma çatlakları için gerilme konsantrasyonu oluşturmaktadır. Geleneksel kaynak tekniklerinde metal ergime noktasına kadar ısıtılmaktadır, bu nedenle de malzemenin mekanik davranışı kötüleşmektedir. Son yıllarda Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW) alternatif bir birleştirme tekniği olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu çalışmada havacılık ve uzay sanayinde önemli bir yere sahip olan alüminyum alaşımlarından 6013-T6'nın FSW ile kaynaklanabilme kabiliyetleri, kaynak yapıldıktan sonraki malzemenin mekanik özellikleri ve içyapıdaki değişiklikler incelenmektedir. Çalışmada ana malzeme ve kaynaklı malzemelere sertlik testi ve çekme testi uygulanmıştır. Kaynaklı malzemelerin, süreksizlik ve hata kontrolleri tahribatsız muayene yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kaynak esnasında oluşan ısı değerleri ölçülerek sonuçlar yorumlanmıştır.

Joining of Aluminum 6013-T6 Alloy used in Aeronautics by Friction Stir Welding

Keywords

Friction Stir Welding
Aircraft Structure
Tensile Tests
Microstructural Evaluation
Aircraft Maintenance Repair

Abstract: Aluminum alloys are widely used in aircraft structures especially in the fuselage and wing fairings. For the joining of these structures, the traditional technique of riveting is used. However, riveting increases the structural weight of the aircraft and rivet holes cause stress concentration for the fatigue cracks. In traditional welding techniques, metal is heated up to the melting point for this reason the mechanical behavior of the material deteriorates. In recent years Friction Stir Welding (FSW) has been used as an alternative joining technique. In this study; the weldability by FSW of 6013-T6, an aluminum alloy having an important place in aviation and space industries; the mechanical properties of the material after welding; and the changes in the internal structure have been examined. Along the course of this study, the raw material and the welded material have been tested by microhardness test and tensile test. The discontinuity and defect controls of the welded materials have been achieved by nondestructive testing methods. And also the changes in the heat values have been observed and then results were interpreted.

1. Giriş

Tarih boyunca insanoğlu kendine gerekli araç ve gereçlerin üretiminde kaynakla birleştirme yöntemini kullanmış ve ihtiyaçları doğrultusunda da sürekli olarak yeni kaynak yöntemleri geliştirmiştir. Günümüzde de bu yöntem hala işlevini korumaktadır. Çağımızın geliştirilmiş malzemeleri ve alaşımları ele alındığında daha da modern birleştirme

yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Dolayısıyla, son yıllarda yeni ve daha etkili kaynak yöntemlerinin geliştirilmesi, üzerinde çokça yoğunlaşılacak bir alan haline gelmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde sadece birleştirimin değil aynı zamanda birleştirme yönteminin malzemenin yapısını ve özelliklerini etkilemeden uygulanmasının da önemli olduğu üzerinde durulduğu görülmektedir (Messler vd., 1993; Anık, 1993; Özarpa, 2005).

Son yıllarda geliştirilmiş olan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding, FSW) tekniği, birleştirme bölgesinde içyapıda önemli oranda bir değişikliğe yol açmadan uygulanabilmektedir. İşlem sırasında malzemede ergime söz konusu olmadığından özellikle kaynak yapılması zor olan alüminyum alaşımların birleştirilmesinde etkili bir yöntemdir (Thomas vd., 2003; Braun vd, 2000).

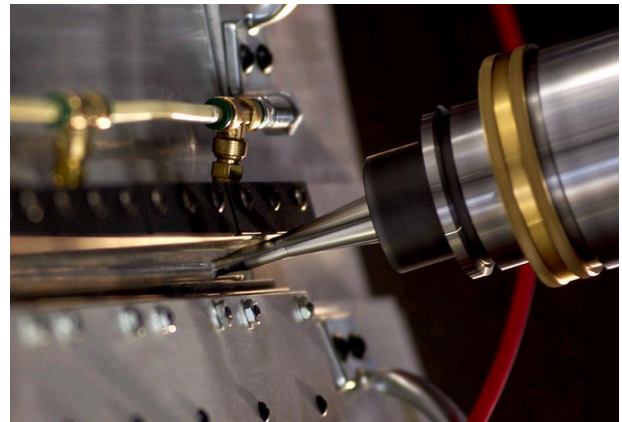
Havacılık sektöründe, emniyet faktörünü azaltmadan mukavemet değeri yüksek ve aynı zamanda da hafif malzemelerin ve birleştirme tekniklerinin kullanılması, üzerinde sürekli çalışılan bir konudur. Özellikle günümüzde uçak boyutlarının iyice büyümesi ve şirketlerin maliyetleri en aza indirerek rekabet şartlarını arttırmak istemeleri yeni teknolojik gelişmelerin hızlanmasını sağlamıştır. FSW tekniği imalat süresini kısaltması, yüksek mukavemet sağlaması, ağırlık oranını düşürmesi, bakımının ve kontrolünün kolay olması, işlem sırasında gürültü, duman, alev ya da kıvılcım oluşturmaması, düşük maliyetli olması ve diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi herhangi bir dolgu malzemesi ya da koruyucu gaz tabakasına ihtiyaç duymaması gibi nedenlerden dolayı uçak imalatçıları ve kullanıcıları tarafından tercih edilen gelişmiş bir kaynak yöntemidir (Prado vd., 2001; Derry vd., 2008). Ülkemizde son yıllarda uçak parçalarının üretimine başlanması kullanılan imalat yöntemlerine ek olarak FSW tekniğinin de eklenmesi üretim sürecini etkileyecektir.

Yeni bir kaynak tekniği olan FSW, Cambridge İngiltere’de bulunan The Welding Institute (TWI) tarafından 1991 yılında bulunmuş ve aynı yıl kendileri tarafından patentlenmiştir. Teknik, öncelikle kaynağı zor, yüksek dayanımlı alüminyum alaşımlarında kullanılmış, daha sonraları birçok malzeme ve alaşıma uygulanarak geniş bir ticari alana sahip olmuştur. FSW, geleneksel yöntemlerle kaynak yapılabilme kabiliyeti düşük olan alüminyum alaşımları gibi malzemelerin, düşük füzyon kaynaklanabilme özelliği ile kaynak yapılabilmelerine olanak sağlamıştır. Bu kaynak bağlantıları çok az kaynak bozulmalarına (porosite, yetersiz ergime, yetersiz nüfuz etme, ısıdan etkilenmiş bölge çatlağı, yüzeye açık büzülme çatlakları, kalıntılar, bindirme ve yanlış hizalama vb.), yüksek mekanik dayanıma ve iyi yorulma performansına sahiptirler. FSW alüminyum, kurşun, magnezyum, çelik, titanyum, çinko, bakır gibi metallerin ve metal matrisli kompozitlerin bozulma olmaksızın kaynak yapılmalarını sağlamaktadır (Carbonini vd., 1997; Prado vd., 2001; Burford vd., 2006).

FSW günümüzde uçak, tren, roket, otomobil, gemi ve helikopterler gibi araçların imalatında, köprü ve yol yapımında, bina inşasında, geniş yüzeyli uygun kalınlıktaki levhaların birleştirilmesinde kullanılmaktadır (Talvar, 2003; Rodrigues vd., 2008).

Havacılık alanında FSW en geniş anlamda ve yapısal parçalarda kullanılmak üzere, çift jet motorlu Eclipse-500 uçağında kullanım alanı bulmuştur. Eclipse Havacılık Anonim Şirketi, Eclipse-500 uçağını düşük maliyetli taşıyıcılar için tasarlamış ve topla-dağıt sistemindeki havayolu işletmelerine alternatif yaratmayı amaçlamıştır. Üretim ve işletim maliyetlerinin düşük olmasıyla, Eclipse-500 büyük havayolu taşıyıcılarıyla rekabet edebilecek noktadan-noktaya hava taksi şirketlerine temel oluşturmuştur. Eclipse-500’ü düşük maliyetli taşıyıcı yapan da FSW’dir. FSW ispatlanmış kaliteyle, otomatik perçinle birleştirme yöntemine nazaran 6 kat ya da elle perçin yöntemine göre 60 kat daha hızlı üretim sağlamaktadır. Bu uygulama ile FSW havacılık otoriteleri tarafından, yüksek dayanım ve iyi yorulma özellikleri ile uçak yapım zamanını, maliyetleri ve ağırlığı azaltan bir teknoloji olarak kabul edilmiştir. FSW’nin diğer bir avantajı da ince kesitlerin (<3 mm) kaynak yapılmasını sağlamasıdır (Dieter, 1998; Christner vd., 2003; Moreira vd., 2008). Şekil 1’de FSW uygulaması görülmektedir.

Büyük gövdeli ticari uçaklarda ise FSW ilk olarak Airbus UK firması tarafından kullanılmıştır. Airbus, FSW’den TWI’deki ortaklığı nedeniyle haberdar olmuştur ve TWI ortak bir grup kurarak sponsorluk yapmıştır. Buradaki amaç yöntemin güvenilirliğinin incelenmesi ve uygulanabilirliğinin test edilmesidir. Bu program 1996 yılında başlamıştır ve uçak parçaları üzerindeki uygunluk ve kalite testleri başarılı sonuçlar vermiştir. 1997 yılında Airbus şirketinde bir FSW cihazı oluşturulması için çalışmalara başlanmış, 1999 yılında da kurulmuş, 2000 yılında uçak kanat yapılarında kullanılmaya başlamıştır. Airbus şirketinin en büyük rakibi, Amerika Birleşik Devletleri Ordusu’nun birçok gereksinimi karşılayan Boeing şirketi, C-217 Globemaster askeri uçağının kargo bölümünde bulunan yükleme-boşaltma sağlayan uçak palet sisteminin oluşturulmasında FSW tekniğini ilk kez kullanmıştır (Lui vd., 1997; Shepherd vd., 2003).



Şekil 1. Eclipse-500’den bir FSW uygulaması (Eclipse, 2007)

Bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanmış 6013-T6 alüminyum alaşımının öncelikle

kaynak esnasında oluşan sıcaklık değerleri ölçülerek değerlendirilmeler yapılmıştır. Kaynaklı malzemelerin, süreksizlik ve hata kontrolleri hasarsız kontrol yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ana ve kaynaklı malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla sertlik ve çekme testleri uygulanmıştır. Numunelerin kırılma yüzeyleri optik ve taramalı elektron mikroskopları kullanılarak incelenmiş ve analizler yapılmıştır.

2. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmada, Çizelge 1’de kimyasal bileşimi verilen, 3,6 mm kalınlığındaki T6 ısıl işlemi görmüş 6013 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. AA6013-T6 levhasına German Aerospace Center (DLR) tarafından FSW yapılmıştır. Kaynak işlemi üç boyutlu CNC frezede özel bir uç ve omuz kullanılarak yapılmıştır. Kaynak 1000 mm/dak, 1200 Rpm’de gerçekleştirilmiştir. Uç ve omuzun çapları sırası ile 6mm ve 18mm’dir. Tekniğin en önemli parametreleri olan uç (pim) ve omuz geometrileri çalışmaya uygun olacak şekilde Pro-engineer çizim programı kullanılarak çizilmiştir. Yapılan çizim kullanılarak prototip uç ve omuz üretimi gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. 6013 ana malzemesinin kimyasal bileşimi (Mishra ve Mahoney, 2007; Buha, 2006, Tabanve Kalu, 2005)

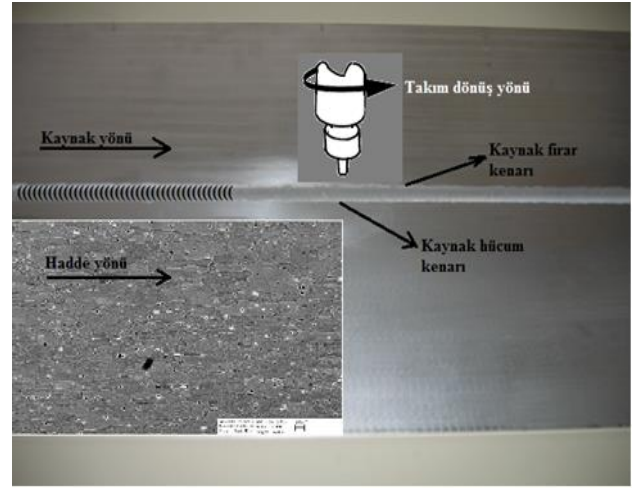
Kaynak yapılmış olan levha Şekil 2’de gösterilmiştir.

| Element | Mg | Si | Cu | Mn | Fe | Cr | Zn | Ti | Al |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|----------|----------|----------|-------|
| Ağr. (%) | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 0,3 | 0,3 | 0,0 3 | 0,0 7 | 0,0 2 | denge |

Kaynak hadde yönüne paralel olacak şekilde yapılmıştır. Şekil 3’de kaynak yönü, kaynak hücum ve firar kenarları gösterilmiştir.

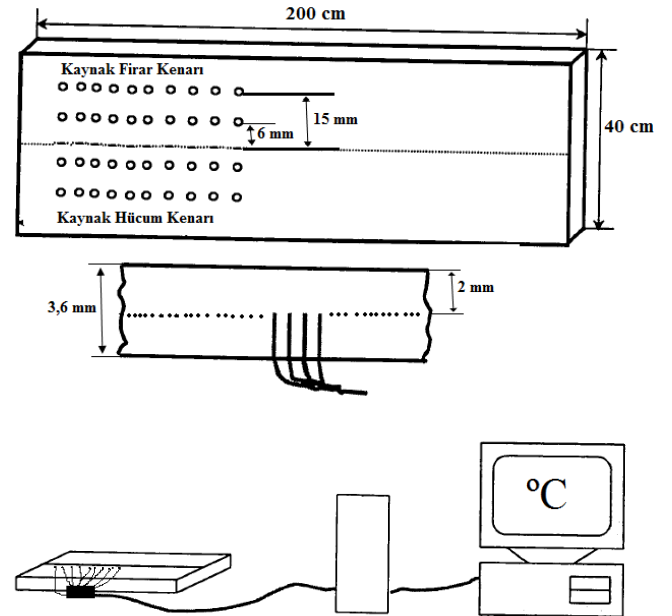


Şekil 2. Kaynaklı levha



Şekil 3. Kaynak yönü

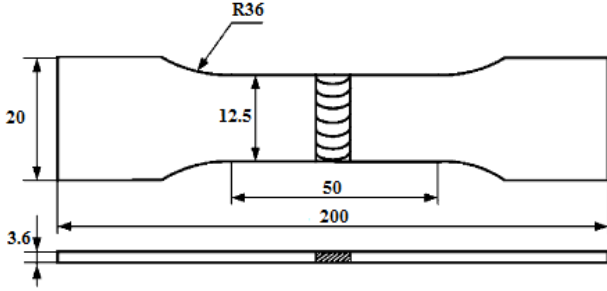
Kaynak Esnasında Malzemede Oluşan Sıcaklık Değerleri Ölçümü; German Aerospace Center (DLR) tarafından yapılan sürtünme karıştırma kaynak işlemi esnasında kaynak bölgesinde sıcaklık değişimlerini gözlemlemek amacıyla termokapıllar (thermocouple-ısı müşirleri) kullanılarak ısı değerleri ölçülmüştür. Termokapıllar Şekil 4’de gösterildiği gibi, malzeme yüzeyinden 2 mm derinliğe, kaynak hücum ve firar kenarında olacak şekilde kaynak merkezinden 6 mm ve 15 mm uzaklıklara yerleştirilmiştir. Kaynak merkezindeki sıcaklık değerlerini elde edebilmek için bir termokapıl da omuz üzerine yerleştirilmiştir.



Şekil 4. Sıcaklık ölçümü için termokapılların yerleştirilmesinin gösterimi (Guo, 1999)

3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

FSW'den sonra elde edilen kaynaklı levha, lazer kesim tekniğiyle kesildikten sonra, istenilen numune ölçüleri için freze tezgâhında işlenmiştir. Çekme ve yorulma testlerinde kullanılmak için hazırlanan numuneler ASTM E 8M ve ASTM E 466 standartlarına göre hazırlanmıştır. Şekil 5.a numune boyutları ve Şekil 5.b'de numunelerinin lazerle kesildikten sonra frezede işlenerek hazırlanmaları verilmiştir.



Şekil 5.a. Çekme ve yorulma numunesi (boyutlar mm olarak verilmiştir)



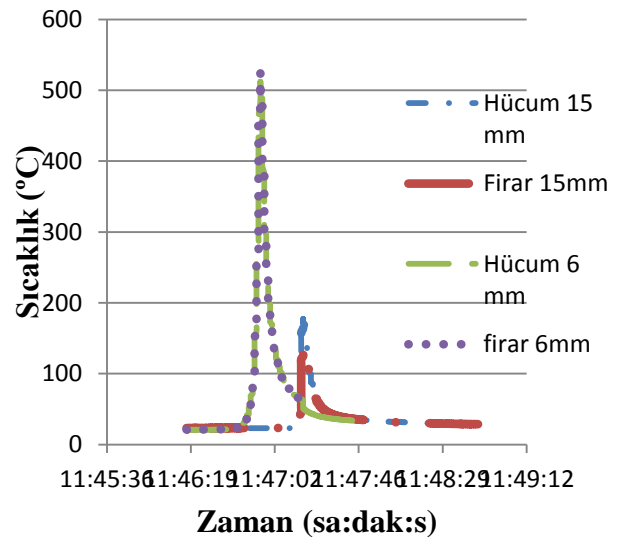
Şekil 5.b. Çekme numunelerinin lazerle kesilmesi ve frezede işlenerek hazırlanması

4. Deney Sonuçları ve Tartışmalar

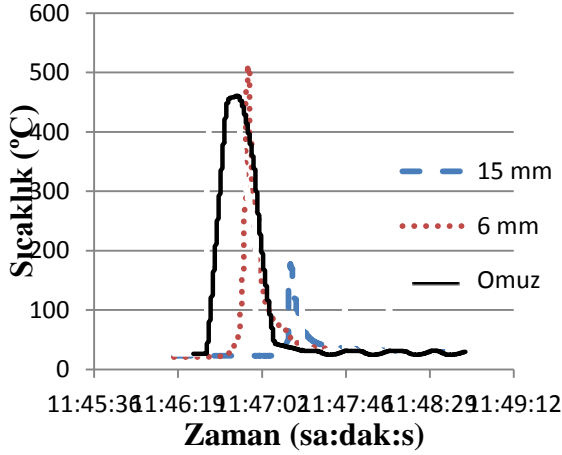
Çalışmada kaynak esnasında levhada sıcaklık dağılımı ölçümleri yapılmış, deney numunelerine, tahribatsız testler, mikro serlik ölçümleri ve çekme testleri uygulanmıştır. Ayrıca, mikroyapı incelemesi yapılmıştır.

4.1. Kaynak Esnasında Malzemede Oluşan Sıcaklık Dağılımları

Sürtünme karıştırma kaynağı esnasında kaynak merkezinden 6 mm ve 15 mm uzaklıklardan ayrıca omuz üzerinden sıcaklık değerleri alınmıştır. Kaynak işlemi yaklaşık 1,5 dakika sürmüştür ve bu süre zarfında sıcaklık değerleri termokapılardan alınan değerler doğrultusunda bilgisayar ortamında kaydedilmiştir. Kaynak merkezinden uzaklaşılınca ısı değerlerinde azalma gözlenmiştir. Kaynak hücum ve firar kenarı taraflarından eşit mesafede alınan sıcaklık değerleri arasında ihmal edilebilir bir fark görülmektedir (Şekil 6). Bu da kaynak işlemi esnasında sıcaklığın kaynak yapılan malzemelere eşit oranda yayıldığını göstermektedir. Ayrıca kaynak hücum ve firar kenarlarındaki sıcaklık farkının az oluşu kaynak ucunun dönüş yönünün, kaynak yapılan malzemede ortaya çıkan sıcaklığa etki etmediği saptanmıştır. Şekil 7 incelendiğinde kaynak merkezine 6 mm uzaklıktan ve omuz üzerinden alınan değerlerde sırasıyla en yüksek sıcaklık değerleri 500°C ve 480°C bulunmuştur. Bu değerler göz önüne alındığında alüminyumun ergime sıcaklığı olan 660°C sıcaklığı asla çıkmadığı görülmüştür. Kaynak işlemi esnasında ergime gerçekleşmemiştir.



Şekil 6. Kaynak hücum ve firar kenarlarından alınan sıcaklık değerleri



Şekil 7. Kaynak merkezine 6mm - 15mm uzaklıktan ve omuz üzerinden alınan sıcaklık değerleri

4.2. Tahribatsız Muayene Yöntemleri

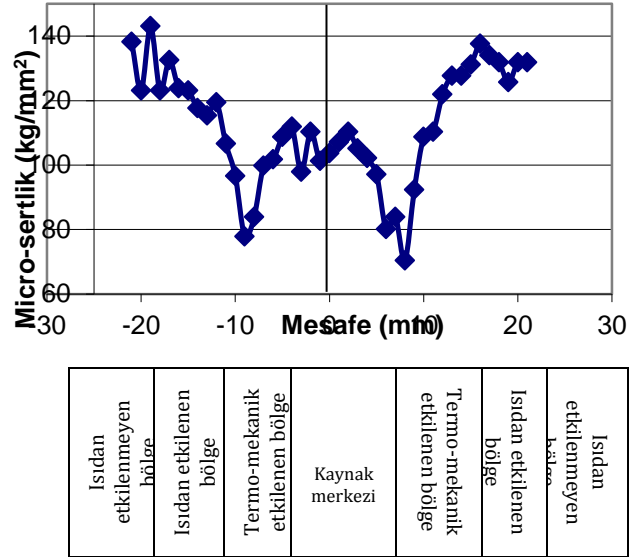
Girdap akımları kontrol yöntemi ve sıvı penetrant kontrol yöntemleriyle levha üzerinde herhangi bir hata ya da süreksizliğe rastlanmamıştır. Sıvı penetrant kontrol yöntemi ultrasonik yöntemde yüzeye açık süreksizliklerin gözden kaçabileceği durumları engellemek için uygulanmıştır. Girdap akımları kontrol yöntemi de ultrasonik kontrol yönteminde çıkan sonuçları desteklemesi için uygulanmıştır. Ultrasonik kontrol yöntemi ile kaynaklı levhanın kaynağın bittiği kenardan 100mm içeride bir süreksizlik tespit edilmiştir. Ancak bu alan testlerde kullanılmadığı için değerlendirmeye alınmamıştır. Levha üzerinde ve kaynak bölgesinde başka bir hata ya da süreksizliğe rastlanmamıştır.

4.3. Mikro Sertlik Ölçümleri

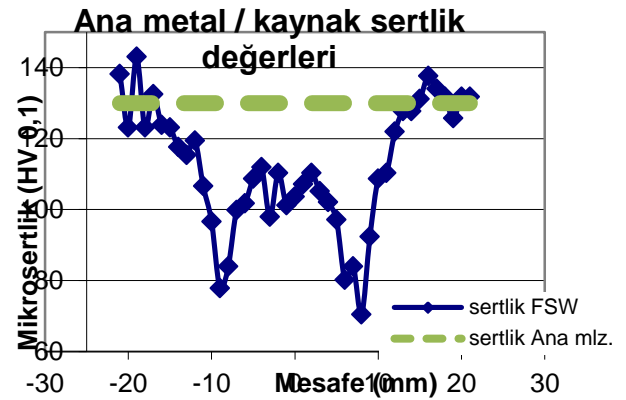
Deney numuneleri 150 den 1200 numaraya kadar su zımparasıyla parlatıldıktan sonra, 3 µm ile 1 µm elmas pasta ile parlatıldıktan ve %2 likhidroflorik asitte dağlandıktan sonra mikro sertlikleri, hem ana malzeme, hem de kaynaklı malzemelerde ölçümler yapılarak bulunmuştur. Kaynaklı malzemelerde kaynak bölgesi ve oluşan bölgelerdeki farklılıkları gözlemlemek amacıyla, sertlik değerleri kaynak merkezinin her iki tarafından yaklaşık 30mm uzaklığa kadar alınmıştır. Ölçümler yüzeyden 1mm derinlikte alınmıştır. Sertlik testleri ana malzeme ve kaynaklı malzemenin aralarındaki farklılıkları ortaya koymak ve kaynak esnasında oluşan farklı bölgelerdeki değişimleri anlayabilmek amacıyla uygulanmıştır. Elde edilen sertlik değerleri Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir. T6 konumundaki ana malzemenin ortalama sertlik değeri 130 HV iken, kaynaklı malzemenin kaynak bölgesindeki sertlik değeri 100 HV, ısıdan etkilenen bölgede 85 HV'dir. Sertlik değerlerindeki azalma kaynak merkezinin her iki tarafından yaklaşık 15 mm uzaklıkta görülmektedir. Literatürde incelenilen kaynaklarda

da sertlik değerlerinin termo-mekanik etkilenmiş bölgenin bitişiyile, ısıdan etkilenmiş bölgenin başlangıcı olan alanda azaldığı görülmüştür (Tesch vd., 2007).

Çözülmenin, kabalaşmanın ve kaynak prosesinden açığa çıkan ısının bir sonucu olarak sertlik değerleri kaynak dikişi (nugget) ve ısıdan etkilenmiş bölgede düşmüştür. Bunun nedeni Mg₂Si fazlarının bu ısıya bağlı olarak çözünmesi, kabalaşması ve dönüşmesinin sonucudur. Azalan bu sertlik profilinin sınırı aynı zamanda ısıdan etkilenen bölgenin de sınırını oluşturmaktadır. Kaynak dikişindeki sertlik değerlerinde hafif bir yükselme görülmektedir. Bu genellikle bu bölgede soğuma koşullarına bağlı doğal yaşlanmanın sonucudur. Minimum sertlik kaynak merkezinden yaklaşık 8-10mm uzakta ölçülmüştür. Bu sınır termo-mekanik olarak etkilenmiş bölgenin kenarı ve ısıdan etkilenmiş bölgenin başlangıcını oluşturmaktadır (Şekil 8).



Şekil 8. Kaynaklı malzemenin sertlik profili



Şekil 9. Ana metal ve kaynaklı malzemelerin sertlik profillerinin karşılaştırması

4.4. Çekme testi

Hem ana parçanın hem de kaynaklı parçaların çekme testleri yapılmıştır. Çekme testleri 1 mm/dakika hızda geçekleşmiştir. Yapılan çekme testleri sonucunda akma değerleri (σ_a) bulunmuştur ve malzemelerin farklı numunelerinden alınan ortalama kopma değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Kaynaklanmamış ana malzeme 300 MPa akma gerilmesi ve 375 MPa kopma gerilmesi göstermiştir. Buna karşın, kaynaklı malzeme ise 207 MPa akma gerilmesi ve 281 MPa kopma gerilmesi göstermiştir. Ana malzeme ile kıyaslandığında, kaynağa göre enlemesine test edilen numuneler daha düşük gerilme ve süneklik ortaya koymuştur. Bu durumda, testi yapılan 6013-T6 malzemenin FSW'li kaynaklarda gerilme değerlerinin % 25-30 düştüğü görülmüştür. T6 durumundaki çekme testleri, kırılmanın her zaman ısıdan etkilenen bölgede (HAZ) meydana geldiğini göstermektedir.

Kaynak verimliliği ($\sigma_{\max\text{FSW}}/\sigma_{\max\text{Ana}}$), kaynaklı malzemenin kopma gerilmesinin kaynaklanmamış ana malzemenin kopma gerilmesine oranı olarak tanımlanmaktadır (Elangovan vd., 2008). Kaynaklı malzemede yaklaşık % 75 kaynak verimine ulaşılmıştır.

Çizelge 2. Ana malzemenin ve kaynaklı AA6013-T6 malzemesinin çekme test sonuçları

| Malzeme | Young Modülü [MPa] | Akma Gerilmesi (% 0.2) [MPa] | Çekme Gerilmesi (σ_{\max}) [MPa] | Mukavemet Değişim [%] | Kaynak Verimi $\sigma_{\max\text{FSW}}/\sigma_{\max\text{Ana}}$ [%] |
|-------------|--------------------|------------------------------|---|-----------------------|---|
| 6013-T6 Ana | 31804 | 330 | 375 | | |
| 6013-T6 FSW | 32453 | 207 | 281 | 64 | 75 |

Kaynaklı numunelerde sertlik profilinden anlaşılacağı üzere (Şekil 8) kaynak bölgesinde ısıdan etkilenen bölgede sertlik dolayısıyla da mukavemet düşmektedir. Bu durum, mukavemet açısından ısıdan etkilenmiş bölgenin çekme testlerinde en zayıf bölge olmasına neden olmuştur.

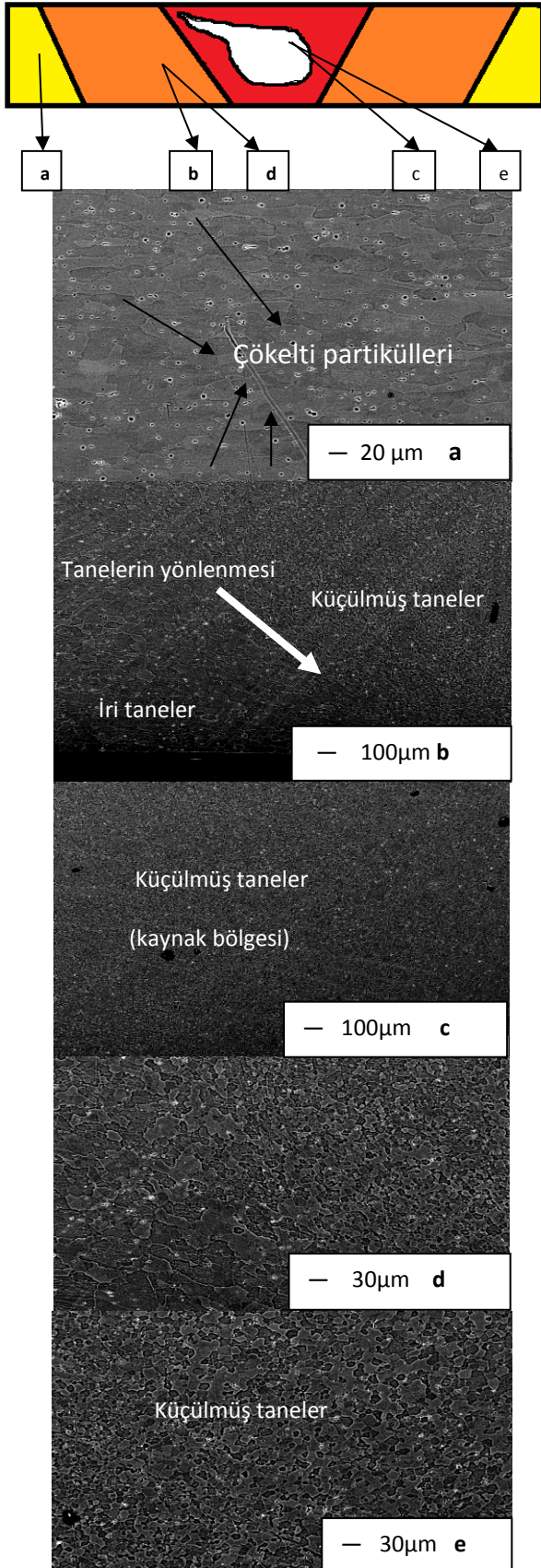
Isıdan etkilenmiş bölge (HAZ) sıcaklığa maruz kaldığı için, çökelti partiküllerinin büyümeye devam ettiği aşırı yaşlanma ya da kabalaşma gösterdiği gözlenmiştir. Bu büyüme partiküller arasındaki mesafenin artmasına bu nedenle de dislokasyonların

bir engele çarpmadan daha fazla ilerlemesine dolayısıyla da mukavemet azalmasına sebep olmuştur. Kaynaklı malzemenin en zayıf ve en az sertliğe sahip bölgesidir. Uygulanan çekme testlerinde kopma hep bu bölgede gerçekleşmiştir. İncelenilen daha önce yapılmış çalışmalarda da çekme test sonuçlarında aynı bölgede kopma olduğu görülmüştür (Liu vd., 2003; Talwar vd., 2003).

4.5. Mikroyapı İncelemeleri

Kaynaklı bölgenin mikroyapısı optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Kaynakla birleştirme işlemi malzeme mikroyapısını etkilemektedir. Bu nedenle etkilenen bölgeler incelenmiştir. Şekil 10'da kaynaklı malzemenin makroyapısı ve mikroyapısı görülmektedir. Şekil 10.c'de kaynak bölgesi dağlamadan sonra belirgin olarak görülmektedir. Kaynak bölgesinin şekli, kaynak parametrelerine ve ana malzemenin cinsine bağlıdır (Prado vd., 2001). Kaynak bölgesi V şeklindedir ve üst tarafa doğru genişlemektedir. Bu genişlemenin sebebi omuzun malzeme yüzeyi ile olan yakın temasıdır (Rhodes vd., 1997; Schmidt vd., 1998).

Şekil 10'da kaynaklı bölgenin yan kesit görüntüsü görülmektedir. Şekil üzerinde, (a) ana malzemenin, (b), (d) termo-mekanik etkilenen bölgeden, (c), (e) ısıdan etkilenen bölgeden alınmış görüntülerdir. Şekil 10.a'dan da görüleceği üzere ana malzeme eş eksenli tanelere sahip yeniden kristalleşmiş mikroyapı ile belirlenmektedir. Kaynaktan etkilenmemiş ana malzemenin mikro yapı görüntüsünde tanelerin ve görünür fazların hadde doğrultusunda paralel uzamış olduğu gözlenmiştir. Çökelti partikülleri çok net görülmektedir. Şekil 10.b ve Şekil 10.d'de yani termo-mekanik bölgede ise tanelerin küçülmeye başladığı ve yönlendirmelerin olduğu gözlenmiştir. Şekil 10.c ve Şekil 10.e'de ise kaynak bölgesini göstermektedir. Bu bölgede taneler iyice küçülmüş, dağınık halde bulunmaktadır. Bu bölgede yönlendirme söz konusu değildir. Taneler eş eksenli ve ana malzemeye nazaran daha küçük boyutta dağılım göstermişlerdir. Taneler boyutundaki değişimlerin ve yönlendirmelerin sebebi FSW esnasında ortaya çıkan ısı ve FSW aletinin uyguladığı basınçtır.



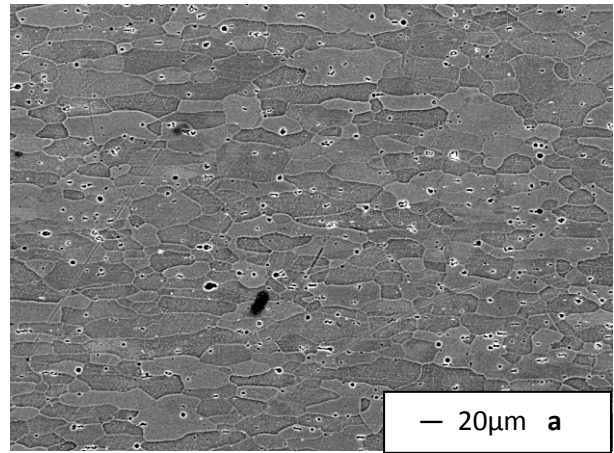
Şekil 10. AA6013-T6 FSW şematik gösterimi ve mikro görüntüleri; (a) ana malzeme, (b) termo-mekanik etkilenen bölge, (c) kaynak bölgesi, (d) termo-mekanik etkilenen bölge, (e) kaynak bölgesi

4.6. Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi

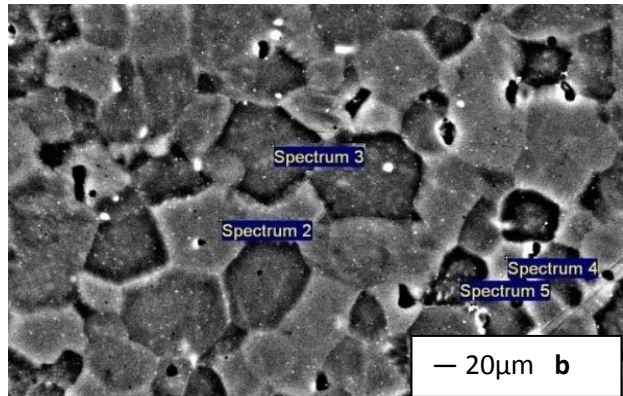
Numunelerin farklı bölgelerinin ve bu bölgelerde oluşan farklı fazların kompozisyonlarını belirlemek amacıyla kimyasal analizler, SEM'e bağlı olan EDX detektörü ile elde edilmiştir. Bu detektörler bileşimde bulunan tüm elementleri saptayabilir ve kimyasal bileşimler yaklaşık olarak belirlenebilir.

Numunelerin bir kısmı hiçbir işlem yapılmadan kırılma yüzeylerinden incelenmiş, diğer numuneler mekanik olarak yukarıda belirtilen yöntemle parlatılmış ve dağlanmış ve daha sonrada kırık yüzeyler incelenmiştir.

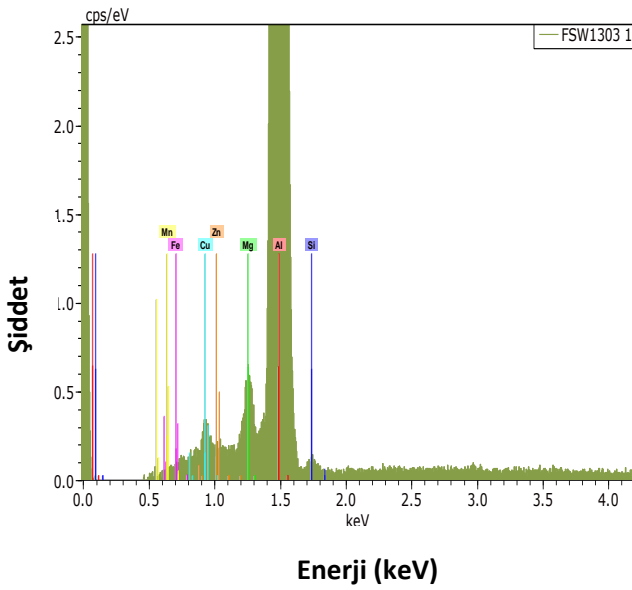
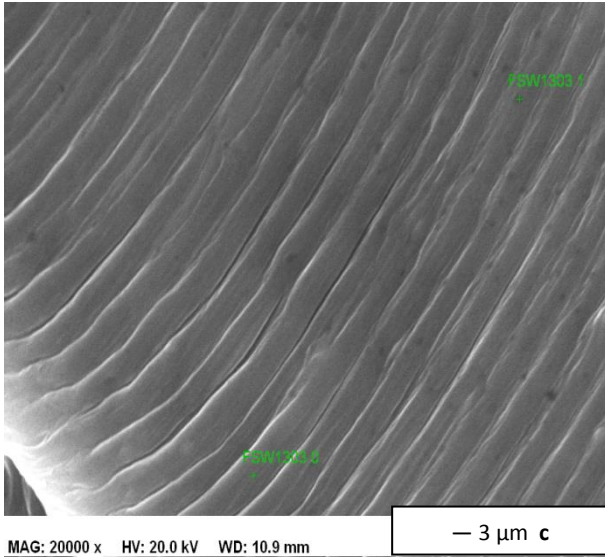
T6 ısı işlemi uygulanmış Al 6013 malzemesinin mikroyapısal değerlendirilmesi yapılmıştır. Şekil 11'de ana malzemenin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 11.a'dan da görüleceği üzere ana malzeme eş eksenli tanelere sahip yeniden kristalleşmiş mikroyapı ile belirlenmektedir. EDX ölçümleri, Şekil 11.b'nin değişik noktalarından alınmıştır. Bu EDX sonuçlarında kimyasal bileşimler yaklaşık olarak birbirleri ile aynıdır ve noktalardan örnek olarak Şekil 11.c'de gösterilmiştir. Elde edilen EDX sonuçları Mg_2Si 'nin baskın çökelti olduğunu göstermektedir.



Şekil 11. (a) Ana malzemenin SEM görüntüsü



Şekil 11. (b) Ana malzemenin SEM görüntüsü



Spectrum: FSW1303

| Element | Series | un. C norm. | C Atom. | C Oxide | Oxid. | C Error |
|-----------|----------|-------------|---------|---------|-------|-----------|
| [wt.-%] | [wt.-%] | [at.-%] | [wt.-%] | [%] | | |
| Silicon | K-series | 0.49 | 0.45 | 0.43 | SiO2 | 0.51 0.1 |
| Aluminium | K-series | 104.99 | 95.73 | 96.89 | Al2O3 | 96.59 5.0 |
| Zinc | K-series | 0.67 | 0.61 | 0.26 | ZnO | 0.41 0.1 |
| Copper | K-series | 1.19 | 1.09 | 0.47 | CuO | 0.73 0.1 |
| Iron | K-series | 0.32 | 0.29 | 0.14 | Fe2O3 | 0.22 0.1 |
| Manganese | K-series | 0.43 | 0.39 | 0.19 | MnO | 0.27 0.1 |
| Magnesium | K-series | 1.58 | 1.44 | 1.62 | MgO | 1.28 0.1 |

Şekil 11. (c) AA6013-T6 için farklı noktalardan EDX sonuçları

5. Sonuçlar

Yapılan bu çalışmada, aşağıdaki sonuçlar çıkartılabilir;

- Yeni tasarlanan karıştırma ucu ve omuz ile kaynak işlemi esnasında sıcak kaynak yapılan malzemelere eşit oranda yayılmıştır. Buda kaynak mukavemetini artırmıştır.
- Tahribatsız muayene yöntemlerine göre; hem levha üzerinde ve hem de kaynak bölgesinde başka bir hata ya da süreksizliğe rastlanmamıştır. Dolayısıyla, kaynak bölgesi ana malzemeye yaklaşık yakın özellikler göstermektedir.
- Ana malzemenin ortalama sertlik değeri 130HV iken, kaynaklı malzemenin kaynak bölgesindeki sertlik değeri 100HV, ısıdan etkilenen bölgede 85HV'dir. Bundan dolayı, ana metale göre kaynağın sertliğindeki azalma yaklaşık %30 dur.
- Kaynak verimliliği ($\sigma_{\max\text{FSW}}/\sigma_{\max\text{Ana}}$), kaynaklı malzemenin kopma gerilmesinin kaynaklanmamış ana malzemenin kopma gerilmesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Kaynaklı malzemede yaklaşık %75 kaynak verimine ulaşılmıştır.
- Kaynaktan etkilenmemiş ana malzemenin mikro yapı görüntüsünde tanelerin ve görünür fazların hadde doğrultusunda paralel uzamış olduğu gözlenmiştir. Çökelti partikülleri çok net görülmektedir.
- Şekil 11.a'dan da görüleceği üzere ana malzeme eş eksenli tanelere sahip yeniden kristalleşmiş mikroyapı ile belirlenmektedir. EDX ölçümleri, Şekil 11.b'nin değişik noktalarından alınmıştır. Bu EDX sonuçlarında kimyasal bileşimler yaklaşık olarak birbirleri ile aynıdır. Elde edilen EDX sonuçları Mg_2Si 'nin baskın çökelti olduğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlara göre kaynak işleminin hatasız ve verimli olması, sürtünme karıştırma kaynak tekniğinin 6013 serisi alüminyum alaşımlarında başarı ile uygulanabileceğini göstermiştir.

FSW ile birleştirilmiş malzemelerin, servis şartları altındaki hasar mekanizmaları tam olarak anlaşılırsa daha güvenilir ömür tahminleri yapılabilir. Bu sayede de FSW tekniğinin potansiyelinden daha fazla yararlanılabilir. Yeni nesil uçaklarda, FSW uçak tasarımının bir parçası olduğunda üreticiler güvenilir ömür belirlemeler sayesinde uçak malzeme ve performanslarını daha da geliştirebilirler. Daha ekonomik, daha hızlı ve daha hafif bir kaynak tekniği, oldukça çetin bir rekabetin yaşandığı havayolu taşımacılığı pazarındaki işletmelerin dikkatini çekecektir.

Teşekkür

Bu çalışmada, karşılıklı bilimsel işbirliği yapılan Alman Havacılık Merkezi (DLR) Köln Almanya'da kaynak işleminin yapılmasına yardımcı olan M.Sc. Ulises Alfaro Mercado'ya teşekkür edilmektedir. Ayrıca bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde bilgi ve deneyimleri ile büyük emeği ve desteği olan danışman Sayın Prof. Dr. Nuran AY'a sonsuz teşekkür edilmektedir.

Kaynaklar

Anık, S., Anık, E.S. ve Vural, M., 1993. *1000 soruda kaynak teknolojisi el kitabı cilt I*, Birsen Yayınevi, 630s, İstanbul.

Braun, R., Biallas, G. Donne, C.D. ve Staniek, G., 2000. Characterisation of mechanical properties and corrosion performance of friction stir welded AA6013 sheet, *Materials for Transportation Industry EUROMAT'99*, 1, (Ed: Winkler, P.) 150-155.

Buha, J., Lumley, R.N. ve Crosky, A.G., 2006. Microstructural development and mechanical properties of interrupted aged Al-Mg-Si-Cu alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37A, 3119-3130.

Burford, D.A., Tweedy, B.M. ve Widener, C.A., 2006. Influence of shoulder configuration and geometric features on FSW track properties, *6th International Symposium on Friction Stir Welding*, October 10-13, Saint-Sauveur, Nr Montréal, Canada.

Carbonini, P., Monetta, T., Mitton, D.B., Belluci, F., Mastronardi, P. ve Scatteia, B. 1997. Degradation behaviour of 6013-T6, 2024-T3 alloys and pure aluminium in different aqueous media, *Journal of Applied Electrochemistry*, 27, 1135-1142.

Christner, B., Hansen, M., Skinner, M. ve Sylva, G., 2003. Friction stir welding system development for thin-gauge aerospace structures, *4th International Symposium on Friction Stir Welding*, 14-16 May, Park City, Utah, USA.

Derry, C.G. ve Robson, J.D., 2008. Characterization and modelling of toughness in 6013-T6 aerospace aluminium alloy friction stir welds, *Materials Science and Engineering*, A490, 328-334.

Dieter, G. E., 1998. *Mechanical metallurgy*, McGraw-Hill Book Co., 632p, London.

Eclipse A., 2006. Eclipse Aviation main page, <http://www.eclipseaviation.com/eclipse500/gallery/images.html> (Erişim tarihi:12 .06. 2007)

Elangovan, K. ve V. Balasubramanian, 2008. Influences of post-weld heat treatment on tensile

properties of friction stir-welded AA6061 aluminium alloy joints, *Materials Characterization*, 59, No: 9: 1168-1177.

Guo, X., 1999. *A study of friction stir welding on 6061-T6 aluminum alloy*, Master of Science Thesis, The University of Texas, El Paso, USA

Liu, G., Murr, L.E., Niou, C.S., McClure, J.C. ve Vega, F.R., 1997. Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminium, *Scripta Materialia*, 37, No: 3, 355-361.

Liu, H.J., et al., 2003. Tensile properties and fracture locations of friction-stir welded joints of 2017-T351 aluminium alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 142, No: 3, 692-696.

Messler, R.W., 1993. *Joining of advanced materials*, Reed Publishing Inc., USA.

Mishra, R.S. ve Mahoney, M.W., 2007. *Friction Stir Welding and Processing*, ASM International.

Moreira, P.M.G.P, de Jesus, A.M.P., Riberio, A.S. ve de Castro, P.M.S.T., 2008. Fatigue crack growth in friction stir welds of 6082-T6 and 6061-T6 aluminium alloys: a comparison, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 50, 81-91.

Özarpa, C., 2005. *Al 5754-H22 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens, Doktora Tezi, Sakarya.

Prado, R.A, Murr, L.E., Shindo, D.J ve Soto, K.F, 2001. Tool wear in the friction-stir welding of aluminium alloy 6016%20 Al₂O₃:apreliminary study, *Scripta Materialia*, 45, 75-80.

Rhodes, C.G., Mahoney, M.W., Bingel, W.H., Spurling, R.A. ve Bampton, C.C., 1997. Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminium, *Scripta Materialia*, 36, No:1, 69-751.

Rodrigues, D.M., Loureiro, A., Leitao, C., Leal, R.M., Chaparro, B.M. ve Vilaça, P., 2008. Influence of friction stir welding parameters on the microstructural and mechanical properties of AA 6016-T4 thin welds, *Materials and Design*.

Schmidt, H.N.B., Dickerson, T.L. ve Hattel, J.H., 2006. Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3, *Acta Materialia*, 54, 1199-1209.

Shepherd, G.E., 2003. The evaluation of friction stir welded joints on Airbus aircraft wing structure, *4th International Symposium on Friction Stir Welding*, 14-16 May, Park City, Utah, USA.

Taban, E. ve Kaluç, E., 2005. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Standart Gösterimleri, *Makine Tek.* P.178, İstanbul.

Talwar, R., Lederich, R., Bolser, D. ve Garcia, A., 2003. An innovative, low cost, friction stir welded cargo handling solution for the C-217 globemaster III for reducing manufacturing cost and logistics support, *4th International Symposium on Friction Stir Welding*, 14-16 May, Park City, Utah, USA.

Tesch, A., Pippan, R., Trautmann, K.H. veDöker, H., 2007. Short cracks initiated in Al6013-T6 with the focused ion beam (FIB)-technology, *International Journal of Fatigue*, **29**, 1803-1811.

Thomas, W.M., Johnson, K.I. veWiesner, C.S., 2003. Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies, *Advanced Engineering Materials*, **5**, No: 7, 485-490.

Semboller ve Kısaltmalar

| | |
|----------|--|
| DLR | : GermanAerospace Center |
| EBW | : ElectronBeamWelding |
| EDX | : EnergyDispersive X-Ray (Enerji Saçılımlı X-Işınları) |
| FSW | : FrictionStirWelding (Sürtünme Karıştırma Kaynağı) |
| HAZ | : HeatAffectedZone (Isıdan Etkilenen Bölge) |
| SEM | : ScanningElectronMicroscope (Taramalı Elektron Mikroskobu) |
| TEM | : TransmissionElectronMicroscope(Geçirimsiz Elektron Mikroskobu) |
| TWI | : TheWeldingInstitute |
| Al | : Alüminyum |
| Cr | : Krom |
| Cu | : Bakır |
| Fe | : Demir |
| Li | : Lityum |
| Mg | : Magnezyum |
| Mn | : Manganez |
| Si | : Silisyum |
| SiC | : Silisyum Karbür |
| Zn | : Çinko |
| R | : Gerilme oranı |
| σ | : Çekme gerilmesi (MPa) |