

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ HAVACILIK ve UZAY YAPILARINDA KULLANILAN AL 6013-T6 ALAŞIMININ MİKROYAPI ve MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Haşim KAFALI*

Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi,
Dalaman Sivil Havacılık Yüksekokulu.
hasimkafali@mu.edu.tr

Nuran AY

Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Malzememe Bilimi ve Mühendisliği Bölümü.
nay@anadolu.edu.tr

Geliş Tarihi: 30 Mayıs 2014, Kabul Tarihi: 30 Haziran 2014

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. Ayrıca yüksek dayanımlı malzemelerin kaynaklanabilirlikleri düşüktür. 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, çekme testi ve yorulma testi uygulanmış, optik ve elektron mikroskobu kullanılarak mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Kaynaklı malzemede metaller arası partiküller ve tane yapısı optik ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW), Uçak Yapısı, Çekme ve Yorulma Testi, Mikroyapısal İnceleme, Uçak Bakım Onarım

AN INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FRICTION STIR WELDED AL 6013-T6 ALLOY USED ON AERONAUTICS AND AEROSPACE STRUCTURES

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 addition to that the weldability of high strength materials is low. 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, tensile test, and fatigue test. The microstructure has been examined by the optical microscope and the electron microscope. The particles within metals and the grain structure in the welded material have been analyzed by optical microscope and scanning electron microscope.

Keywords: Friction Stir Welding, Aircraft Structure, Tensile and Fatigue Tests, Microstructural Evaluation, Aircraft Maintenance and Repair.

* Sorumlu Yazar

1. GİRİŞ

Tarih boyunca insanın 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 birleştirmenin değil aynı zamanda birleştirme yönteminin malzemenin yapısını ve özelliklerini etkilemeden uygulanmasının da önemli olduğu üzerinde durulduğu görülmektedir [1-6].

Literatürde çok çeşitli kaynak sınıflandırmaları yapılmakla beraber genel olarak kaynak; uygulanacağı malzemenin cinsine göre, gayesine göre, uygulanış şekline göre ve işlemin cinsine göre olmak üzere sınıflandırılabilir. 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 [6-15].

Alüminyum dünyada en bol bulunan elementlerden biridir ve 19. yüzyılın sonlarına doğru mühendislik uygulamalarında ekonomik bir malzeme olarak kabul görmeye başlamıştır. Alüminyum ve alaşımları benzersiz özelliklerine bağlı olarak birçok işe uygun, ekonomik ve talep edilen malzemeler olmuşlar ve başta otomobil ve havacılık endüstrileri olmak üzere birçok alanda kendilerine yaygın kullanım alanları bulmuşlardır. Bu metalin ve alaşımlarının çok farklı kullanım alanlarına sahip olmalarının nedenleri olarak görünümleri, hafif olmaları, kolay üretilirlikleri, mukavemet özellikleri ve korozyon dirençleri gösterilebilir. Günümüzde 300'den fazla alüminyum alaşım oluşumu olduğu bilinmektedir [8-10].

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 [14-21].

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. Ülkemizde son yıllarda uçak parçalarının üretimine başlanması kullanılan imalat yöntemlerine ek olarak FSW tekniğinin de eklenmesi üretim sürecini etkileyecektir.

Bu çalışmada havacılık ve uzay sanayinde önemli bir yere sahip olan alüminyum alaşımlarından 6013'ün FSW ile kaynaklanabilme kabiliyetleri, kaynak yapıldıktan sonraki malzemenin mekanik özellikleri ve içyapıdaki değişiklikler incelenmektedir. Çalışmada ana malzeme ve kaynaklı malzemelere sertlik testi, çekme testi ve yorulma testi uygulanmış, optik ve elektron mikroskobu kullanılarak mikroyapı incelemesi yapılmıştır.

1.1. Alüminyum Alaşımlarının Uçaklarda Kullanım Alanları

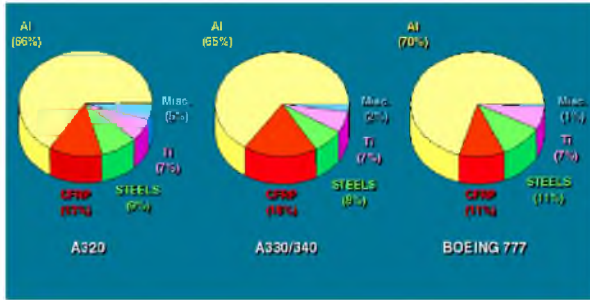
Yer kabuğunda en çok bulunan ikinci metalik element olan ve günümüz endüstrisinde çelikten sonra en fazla kullanılan alüminyum ve alüminyum alaşımları; hafif olmaları, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, arttırılabilen mukavemet özellikleri ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için günümüzde önemli bir malzeme konumundadır. Özellikle son yıllarda, enerji tasarrufuna dönük çalışmalar, daha az yakıt harcayan hafif ve ekonomik taşıtların üretimini gündeme getirmiş ve alüminyum alaşımlarının kara, hava ve deniz taşıtlarının imalatında kullanımını arttırmıştır. Arttırılmış mukavemet ve darbe özellikleri sayesinde savunma sanayinde de kullanıma girmişlerdir [7-9].

Havacılık alanında taşıma kuvveti, sürüklenme kuvveti, ani hızlanma veya yavaşlamalar, aerodinamik yükler, iniş sırasında maruz kalınan yükler ve aracın kendi ağırlığı gibi kuvvetler altında çalışan hava araçlarında emniyet ve güvenilirlik çok önemli unsurlardır. Üretilen parçalar önceden belirlenen her türlü çalışma koşulunda kendilerinden bekleneni verebilmelidir. Dolayısıyla hava aracı üzerinde kullanılacak bir malzemenin kullanım şartlarının çok iyi bilinmesi ve bu şartlar altında özelliklerini koniyebilmesi gerekir. Günümüzde kullanılan hava araçlarının gövde yapılarının büyük bir kısmı alüminyum alaşımları

Sürtünme Karıştırma Kaynağıyla Birleştirilmiş Havacılık ve Uzay Yapılarında Kullanılan AL 6013T6 Alaşımın Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

kullanılarak imal edilmektedir. Alüminyum alaşımlarını pek çok uygulama için uygun ve ekonomik kulan özelliklerin başında; görünümü, hafifliği, işlenebilirliği, fiziksel ve mekanik özellikleri ve yüksek korozyon dayanımı gelir. Genel olarak yüksek sıcaklıklar için çok uygun olmayan bazı alüminyum alaşımları 300°C'ye varan sıcaklıklara kadar rahatlıkla kullanılabilir [10].

Şekil 1'de farklı uçak tiplerinde kullanılan malzemeler ve oranları görülmektedir. Kullanılan malzemeler arasında en yüksek oran alüminyum alaşımlarınca oluşturulmaktadır. Alüminyum alaşımlarının pek çok çeşidi kullanılmaktadır. Örneğin Airbus 380 yolcu uçağında 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımları kullanılmaktadır (Şekil 2). Yapılan yeni çalışmalar sonucu bazı alüminyum alaşımları yerini yenilerine bırakmaktadır. Airbus 380'in gövde yapısında 2024 alüminyum alaşımı yerini Pechiney tarafından geliştirilen 6056 alüminyum alaşımına bırakmıştır. Bu alaşımın tane sınır aşınmasına karşı hassasiyeti azaltmakta, daha iyi kaynaklanabilirlik sağlamaktadır [10,11].



Şekil 1. Alüminyum ve alaşımlarının uçaklar üzerinde kullanım oranları. [11]

Günümüzde uçak gövdeleri perçinlenmiş, yapıştırılmış olarak oluşturulurken gelecekte tek parça olarak üretilmiş ve sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmiş halde üretilmesi planlanmaktadır. Bütünleşmiş gövde yapılarının kullanımı ile aşağıdaki üstünlükler hedeflenmektedir:

- maliyette azalma – max. % 15,
- yüksek seviyede otomasyon,
- malzeme ağırlığında azalma (birleştirme elemanları, perçin, civata bulunmaması),
- imalat adımlarından tasarruf,
- ağırlıkta azalma – max. % 10,
- conta ağırlıklarında azalma,
- tasarımda daha fazla serbestlik,
- düşük yoğunluklu alüminyum alaşımları,
- korozyon dayanıklılığında gelişme,
- boşluk ve çatlaklardan bağımsız olma,
- perçin deliğinin olmaması.

Üst Burun Gövdesi	Üst Ana Gövde
Kiriş : Al 7XXX	Kiriş : Al 7349 T76
Kaplama : Al 2524	Kaplama : Al 2524 T3
Gövde : Al 2024	Gövde : Al 2024

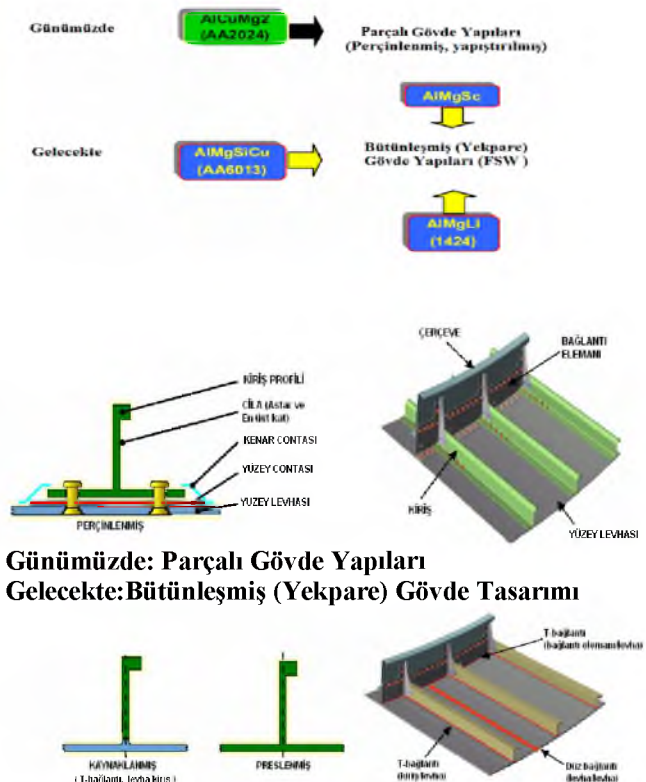


Alt Burun Gövdesi	Alt Ana Gövde (kaynaklanmış paneller)	Basınclandırılmamış Arka Gövde
Kiriş : Al 7XXX	Kiriş : Al 6XXX	Kiriş : Kompozit
Kaplama : Al 2524	Kaplama : Al 6XXX	Kaplama : Kompozit
Gövde : Al 2024	Gövde : Al 2024	Gövde : Kompozit
	Al 7075 (ağır yük binen)	Al 7075



Şekil 2. Airbus 380 yolcu uçağı yapısında alüminyum alaşımların kullanım yerleri. [11]

Şekil 3'de perçinlenmiş veya yapıştırılmış (parçalı) ve tek parça olarak üretilmiş ve/veya FSW yapılmış gövde yapıları gösterilmektedir.



Günümüzde: Parçalı Gövde Yapıları
Gelecekte: Bütünleşmiş (Yekpare) Gövde Tasarımı

Şekil 3. Parçalı gövde yapıları ve bütünleşmiş gövde tasarımının uçak parçalarında gösterimi. [11].

2. MATERYAL ve METOT

Çalışma esnasında kullanılan birleştirme tekniği olan sürtünme karıştırma kaynağı ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

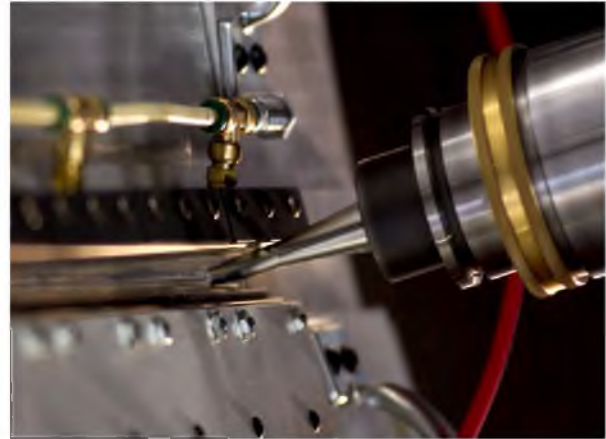
2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding - FSW)

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 [14-21].

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.

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 toplu-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 [16,17]. FSW’nin diğer bir avantajı da ince kesitlerin (<3 mm) kaynak yapılmasını sağlamasıdır [17,19-23]. Şekil 4’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 [18,19]. 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 [20].



Şekil 4. Eclipse-500’den bir FSW uygulaması. [21].

2.1.1. Sürtünme karıştırma kaynağının yapılışı

FSW kaynak tekniğinde, birleştirilecek olan iki parça birbirine temas ettirilerek takviye plakasının üzerine yerleştirilir ve mengene ile sıkıştırılır. Bir uç (pim) ve uç omzu (destek) içeren alet döndürülür ve yavaşça ek çizgisinin içine daldırılır. İki parçanın, eklenen yüzlere farklı kuvvet uygulanmayacak şekilde sıkıştırılması gerekmektedir [14-19].

FSW aletinin, malzemeyi mekanik özelliklerini kaybettirmeden yumuşatması gerekir. Bu sebeple, alet yüksek sıcaklıklarda yüksek mekanik uygunluğa sahip, yıpranmaya dayanıklı malzemeden imal edilmelidir. Sonuç olarak FSW aleti uç ve uç omzu olmak üzere iki parçadan oluşur.

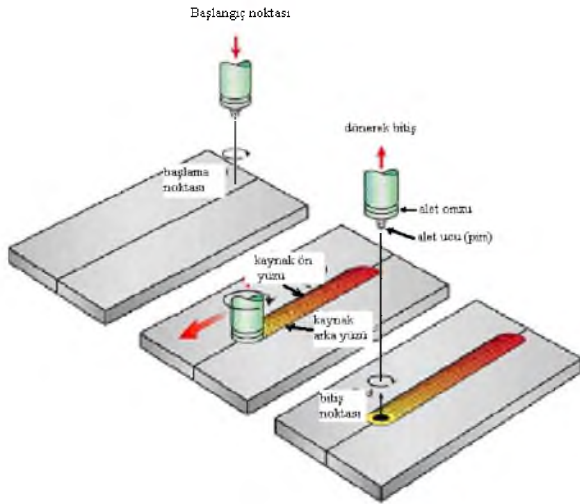
Ucun geometrisi kaynağın derinliğine bağlıdır. Silindirik ya da konik olabilir. Ayrıca, sarmal yapıda yivlere (vida adımlarına) sahiptir. Bu yivler, yumuşayan kaynak metalinin aşağı yönde ilerlemesini sağlar ve akış yolunu büyütür. Ucun uzunluğu, ek yerinin derinliğinden bir parça daha kısa olmalıdır (0,1-0,2 mm kadar) öyle ki, takviye plakası ile iki parçanın kaynaklanmasını önlemelidir. Ucun çapı, ek yerinin kalınlığı ile orantılıdır. Sonuçta daha iyi bir yapı elde etmek için yivlerin var olması önemlidir [22-34].

Uç omzu, aletin üst kısmıdır. Döndürülmesi ile işlem için gerekli olan ısının büyük çoğunluğu üretilir. İlk FSW aletleri, düz omuzlara sahiptiler ki bu durum kaynak yüzeyinde, kaynak fazlalıklarının oluşmasına sebep oluyordu. Bu durumdan kaçınmak için, şimdilerde hafif içbükey olan uç omuzlarının kullanımı yaygınlaşmıştır [26-34].

Aletin tasarımı ve optimizasyonu, malzemeye ve ucun geometrisine ait parametrelere göre yapılır. Bu parametreler şu şekilde sıralanabilirler:

- Yüksek sıcaklıklardaki mekanik özellikler
- Yüksek sıcaklıklarda oksidasyona dayanma gücü
- Isıl iletkenlik
- Uç omzunun çapı ve ucun uzunluğu.

FSW sürecinde alet, ek çizgisinin içine daldırıldığı zaman sürtünme sonucu bir ısı oluşturur. Bu ısı, malzemenin ergime noktasına ulaşmayacak şekilde malzemeyi yumuşak hale getirir. Aynı anda, uç omzu, çalışılan parçanın üst yüzeyi ile yakın temasta bulunarak yumuşayan malzemenin dağılmasını önler. Böylece yumuşamış malzeme ucun hücum kenarı arkasında karıştırılmış ve sıkıştırılmış olur. Bu durumda yumuşamış malzeme, katı durumdaki kaynağı oluşturacak şekilde birleşir ve soğur. Bundan sonra kaynağın kendisi ve yanında oluşan bölge, yüksek mekanik dayanımlı ana malzemeden daha iyi tanecikli yapıya sahip olur. FSW tekniğinin uygulanması Şekil 5’de gösterilmektedir [14-22].



Şekil 5. FSW tekniğinin uygulanmasının şematik gösterimi. [14]

Sürtünme karıştırma kaynağı termo-mekanik bir süreçtir ve bu sebeple geleneksel metotlardan farklı parametrelere bağlıdır. Süreç kurulurken, doğru gruptaki değişkenlerin seçilmesi gerekir. Seçilebilecek süreç parametreleri şu şekildedir [13-15,17-26]:

- Aletin boyutları
- Aletin eğim açısı
- Aletin dönüş hızı

- Aletin içeri girebilme derinliği
- Kaynak hızı
- Dikey yük
- Yatay yük.

Bu parametrelere dayanarak, bükülme momenti, kaynak sırasında malzemenin sıcaklığı ve ısı girişi ölçülebilir.

FSW süreci, üzerinde çalışılan parçanın malzemesinin ergime noktasının altında, katı fazda gerçekleştiği için bazı avantajlara sahiptir. FSW sürecinin, eritme kaynağına göre avantajları şunlardır [14-34]:

- Düşük deformasyon, bozulma, porozite ve büzülme
- Mükemmel mekanik özellikler
- Dumanın, gürültünün, kıvılcımın ve kıvılcım sıçramasının olmaması
- Tekrarlanabilirlik
- Düşük maliyetler
- Dolgu malzemesinin ve gaz koruyucusunun olmaması
- Kaynak esnasında tüketilecek herhangi bir ek malzemeye ihtiyaç olmaması
- Deneyimli uygulayıcı personele ihtiyaç olmaması

FSW'nin bazı dezavantajları da vardır. Bunlar da şu şekilde sıralanabilir [26-44]:

- Kaynak işleminin sonunda kaynak deliğinin var olması
- Üzerinde çalışılan malzemenin hareketinin önlenmesi için çok sıkı sabitleme gerekliliği
- Üzerinde çalışılan malzemenin desteklenmesi için takviye çubuğunun var olması
- Kaynak hızının, ergime kaynağına göre kısmen daha yavaş olması

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılan deneysel çalışmalarda, sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanmış 6013-T6 alüminyum alaşımın sabit genlikli yük altındaki yorulma davranışları ve yorulma sonucu oluşan kırık yüzeylerin gösterdiği farklılıklar incelenmiştir. Testler ve incelemeler sırasıyla ana malzeme ve kaynaklı malzemelere uygulanmıştır. Öncelikle kaynaklı malzemelerin, süreksizlik ve hata kontrolleri hasarsız kontrol yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ana ve kaynaklı malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla sertlik ve çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testlerinden elde edilen sonuçlara göre sabit genlikli yorulma testleri yapılmıştır. Numunelerin kırılma yüzeyleri optik ve

taramalı elektron mikroskopları kullanılarak incelenmiş ve analizler yapılmıştır.

Bu bölümde, çalışma esnasında kullanılan malzeme ve özellikleri hakkında bilgi verilmiş, çalışma boyunca kullanılan alet, cihaz ve takımlar tanıtılmış, uygulanan deneyler görsel dokümanlarla desteklenerek uygulama adımları belirtilmiştir.

3.1. Kullanılan Malzeme (6013 Serisi Alüminyum Alaşımları)

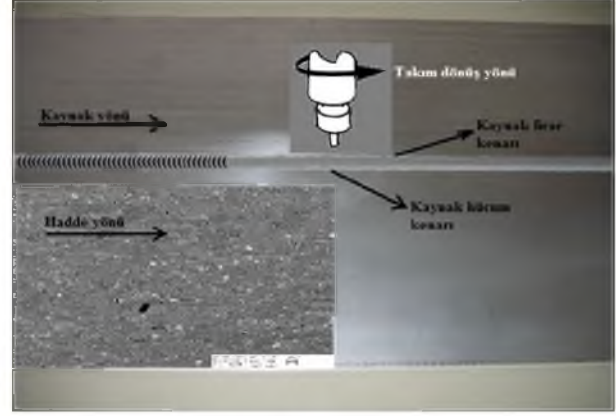
6xxx serisi alüminyum alaşımlar ana katkı maddesi olarak Magnezyum (Mg) ve Silisyum (Si) içerirler. Bu iki elementin yanı sıra Bakır (Cu), Manganez (Mn) ve diğer elementlerden de az miktarda içerebilmektedir. 6xxx serisi alüminyum alaşımların birçoğuna Manganez (Mn) ve Krom (Cr) eklenmesi ile elastik sınırlarda ve tane boyutunun kontrolünde artış sağlanabilir [45-48].

AA6013 alüminyum alaşımı (Al-Mg-Si alaşımı) yüksek mukavemet-ağırlık oranına ve iyi korozyon direncine sahip düşük ağırlıklı yapıların üretilmesinde geniş bir kabul görmektedir. Kaynak yapılan 6013 alüminyum alaşımı, T6 ısıl işlemi görmüş olarak plaka halinde temin edilmiştir. Tablo 1'de kimyasal bileşimi verilen 3,6 mm kalınlığındaki 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 kaynak hızında, 1200 Rpm dönüş hızında gerçekleştirilmiştir. Uç ve omuzun çapları sırası ile 6 mm ve 18 mm'dir.

Tablo 1. 6013 ana malzemesinin kimyasal bileşimi. [48]

Element	Mg	Si	Cu	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Al
Ağr. (%)	0,9	0,7	0,9 5	0,36	0,2 7	0,0 3	0,0 7	0,0 2	den ge

Kaynak yapılmış olan levha Şekil 6'da gösterilmiştir. Kaynak hadde yönüne paralel olacak şekilde yapılmıştır. Şekil 6'da kaynak yönü, kaynak hücum ve firar kenarları gösterilmiştir.



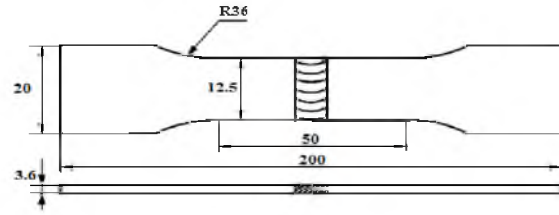
Şekil 6. Kaynak yönü.

3.2. Kaynak Esnasında Malzemede Oluşan Sıcaklık Değerleri Ölçümü

German Aerospace Center (DLR) tarafından yapılan sürtünme karıştırma kaynak işlemi esnasında kaynak bölgesinde sıcaklık değişimlerini gözlemlemek amacıyla termokapılar (thermocouple-ısı müşirleri) kullanılarak ısı değerleri ölçülmüştür. Termokapılar 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.

3.3. Numune 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 7.a'da numune boyutları ve Şekil 7.b'de numunelerinin lazerle kesildikten sonra frezede işlenerek hazırlanmaları verilmiştir.



Şekil 7.a. Çekme ve yorulma numunesi (boyutlar mm olarak verilmiştir).



Şekil 7.b. Çekme ve yorulma numunelerinin lazerle kesilmesi ve frezede işlenerek hazırlanması.

3.4. Yapılan Deneyler

Çalışma boyunca yapılan test ve incelemeler uygulama sırası, izlenen yöntem ve adımlar doğrultusunda verilmiştir. Uygulanan testler adım adım açıklanmalı olarak anlatılmıştır.

3.4.1. Hasarsız kontrol yöntemleri

Kaynaklı levha üzerinde herhangi bir hasar olup olmadığı hasarsız kontrol yöntemleri ile test edilmiştir. Kullanılan teknikler gözle kontrol, sıvı penetrant kontrol, ultrasonik kontrol, girdap akımları ile kontrol ve iletkenlik testleridir. Sıvı penetrant kontrol yöntemi için Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Hasarsız Kontrol Laboratuvarı kapsamında bulunan sıvı penetrant hattında kontroller yapılmıştır. Ultrasonik kontrol yöntemi için aynı laboratuvarında bulunan Sofranel 104 test cihazından faydalanılmıştır. Girdap akımları ve iletkenlik ölçümü içinse Olympus Nortec 500 D cihazı kullanılmıştır.

Sıvı penetrant yöntemi öncelikli olarak yüzey temizleme işlemiyle başlamıştır. Kaynaklı levha penetrant tankına daldırılıp çıkartıldıktan sonra 20 dakika bekletilerek penetrant sıvının malzemeye nüfuz etmesi sağlanmıştır. Daha sonra levha üzerindeki fazla penetrant temizlenmiş ve levha kuruma için 50°C de 15 dakika bekletilmiştir. Levha karanlık odaya alınıp

developer uygulanmıştır. Tüm işlemlerin ardından levha mor ışık altında incelenmiştir.

Ultrasonik kontrol yöntemi yüzey temizliği işlemiyle başlamıştır. 45° açılı prob seçilmiş ve gerekli kalibrasyonlar yapılmıştır. Prob ile levha yüzeyi arasına sızdırmazlık sağlaması için sıvı sürülmüştür.

Girdap akımları kontrol yöntemi için yüzey önce temizlenmiş ardından da şeffaf folyo ile kaplanmıştır. Uygun prob seçilmiş, gerekli kalibrasyonlar yapılmıştır. Prob el kontrolünde uygun hızda levha üzerinde gezdirilmiştir. Uygun prob değişikliği yapılarak iletkenlik testi uygulaması da yapılmıştır.

3.4.2. Sertlik testi

Microsertlik değerleri Vickers ucu kullanılarak, Buehler Digital Microhardness Tester MMT-3 cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Sertlik testleri ana malzeme, ve kaynaklı malzemelere uygulanmıştır. Kaynaklı malzemelerde kaynak bölgesi ve oluşan bölgelerdeki farklılıkları gözlemlemek amacıyla, sertlik değerleri kaynak merkezinin her iki tarafından yaklaşık 30 mm uzaklığa kadar alınmıştır. Ölçümler yüzeyden 1mm derinlikte alınmıştır. Numuneler mekanik olarak parlatılmıştır.

3.4.3. Çekme deneyleri

Çekme ve yorulma deneyleri 200 kN statik, 100 kN dinamik yük kapasiteli bilgisayar kontrollü, Instron 8500 Servo Hydraulic Universal Test Machine test cihazında yapılmıştır. Numune, cihaz çenelerine yük dağılımı düzgün olacak şekilde hidrolik basınçla sıkıştırılan kavrama teçhizatı ile bağlanmıştır. Çekme deneylerinin yapımında Series IX paket programı kullanılmıştır. Bu programa çekme hızı, numune boyutları, tutucu çeneler arasındaki mesafe, ortam sıcaklığı ve nem oranı verileri girilerek, deney sonunda akma dayanımı, çekme dayanımı gibi değerler program tarafından hesaplanmaktadır. Yorulma deneylerinin bilgisayar kontrolünde MAX paket programı kullanılmıştır. Bu programda deneyler, ortalama yük değeri, genlik, frekans ve çevrim sayısı bilgileri girilerek yapılmaktadır.

Çekme testleri iki ana grupta gerçekleştirilmiştir. Öncelikle malzemenin özelliklerinin belirlenmesi için ana malzemenin testleri yapılmıştır. Daha sonra kaynak yapılmış malzemenin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri 1 mm/dak çekme hızında yapılmıştır. Ana malzeme için 7, kaynaklı malzeme için 8 numune kullanılmıştır.

3.4.4. Yorulma deneyleri

Yapılan yorulma deneylerinde, sabit genlikli yüklenme sırasında uygulanmış yükün 6013-T6 alüminyum alaşımının yorulma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Uygulanan yük değerleri malzemenin mekanik özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Yorulma deneyleri oda şartlarında, frekans değeri 10 Hz ve gerilme oranı $R=0,1$ alınarak yapılmıştır. Yapılan yorulma deneylerinde yük değerleri elastik sınır içinde kalacak şekilde seçilmiştir. Ana malzeme için maksimum yük 15,3 kN, yük genliği 6,9 kN, kaynaklı malzeme için maksimum yük 9,3 kN, yük genliği 4,2 kN, alınmıştır. Yapılan deneylerde, her değişik yük oranı için en az 4 tane numune kullanılmıştır. Ana malzeme için toplam 24, kaynaklı malzeme için 32 tane numune test edilmiştir.

Sabit genlikli yorulma deneylerinde uygulanan yük sinüs eğrisi şeklindedir ve deneylerin çoğu numuneler kopuncaya kadar devam etmiştir. Sünek malzemelerde belirli bir noktadan sonra plato (düzleşme) oluşur. Bu düzleşmenin olduğu noktaya yorulma sınırı (limiti) denilmektedir. Yorulma limitinden sonra malzeme sonsuza kadar kopmaz. Alüminyum alaşımlarında bu limit söz konusu değildir. Fakat yapılan çalışmalar incelendiğinde çevrim sayısı 10^6 - 10^7 mertebelerinden sonra deneylerin çok uzun sürdüğü ve bu değerlerde testlerin sonlandırıldığı görülmektedir. [24-36,40-53]. Bu çalışmada da uygulanan yorulma değerlerinde çevrim sayısı 10^7 değerine ulaştığında testler durdurulmuştur.

3.4.5. Kırılma yüzeylerinin incelenmesi

Mekanik karakterizasyona ek olarak, Nikon Optiphot-100 optik mikroskop ve üzerinde Oxford Instrument EDX (Energy Dispersive X-ray, enerji saçılımlı X-ışınları) - 7430T ilavesi bulunan Zeiss Supra 50 VP FEG taramalı elektron mikroskobu kullanılarak kapsamlı bir mikro yapısal inceleme yapılmıştır. Alüminyum alaşımında hadde yönünü, tanelerin dağılımını, tanelerin yaklaşık büyüklüklerini ve kaynaktan etkilenen bölgeleri net olarak göstermek amacıyla optik mikroskop görüntüleri alınmıştır.

Yorulma deneyleri sonucunda kırılan numuneler hem kırılma yüzeylerinden hem de yan yüzeylerden detaylı olarak incelenmişlerdir. Kırılma yüzeylerinin düz olamaması nedeniyle mikro yapı incelemeleri derinliğine görme yeteneği optik mikroskoba nazaran çok daha iyi olan taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin bir kısmı hiçbir işlem görmeden ve alüminyum iletken olduğu için yüzeyleri kaplanmadan incelenmiştir. İnceleme öncesi herhangi bir toz ya da yabancı madde bulunmasını engellemek amacıyla alkol içine daldırılıp temizlenmiş, iyice kurutulduktan sonra, hareket etmeyecek şekilde stablara (elektron mikroskobu için numune yatakları) yerleştirilerek incelemeler gerçekleştirilmiştir. 10 kV ila 20 kV hızlandırma voltajında ikincil elektron (secondary

electron, SE) görüntü tekniği kullanılarak kırılma yüzeylerinin görüntüleri elde edilmiştir.

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 parlatılmıştır. Parlatma önce zımpara daha sonra elmas kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kısa zımparalama, düşük kuvvet ve düşük devir uygulanmıştır. Devir sayısı 150 Rpm olacak şekilde 220 grip zımpara ile işlem başlatılmış, 1200 gripte bitirilmiştir. Zımpara işlemi üzerine düşük devirde 3 mikron ve ardından 1 mikron elmas kullanılarak işlem sonlandırılmıştır. Parlatmadan sonra hidroklorik asit kullanılarak dağlama yapılmıştır.

Kesme işlemi hassas kesme cihazı Strevers Secoton 10 cihazı kullanılarak yapılmıştır. Silisyum Karbür (SiC) kesme diski kullanılarak, 1500 Rpm dönü hızı ve 0,1 mm/sn ilerleme hızı uygulanmıştır. Kalıplama Buehler marka epoxy reçine kullanılarak soğuk kalıplama yapılmıştır. Parlatma, önce zımpara daha sonra elmas kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zımparalama işlemi Buehler Phoenix 4000 otomatik zımparalama parlatma cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kısa zımparalama, düşük kuvvet ve düşük devir uygulanmıştır. Devir sayısı 150 Rpm olacak şekilde 220 grip zımpara ile işlem başlatılmış, 1200 gripte bitirilmiştir. Zımpara işlemi üzerine parlatma işlemi düşük devirde 3 mikron ve ardından 1 mikron elmas kullanılarak işlem sonlandırılmıştır. Parlatma işleminde 150 Rpm dönü hızı ve 10 N yük kullanılmıştır. Dağlama işlemi ise Keller dağlayıcısı kullanılarak yapılmıştır. Karışımın içinde % 2 hidroklorik asit (HF), % 98 su bulunmaktadır. Daldırma 15 saniye sürede yapılmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde, yapılan deneyler ve testler doğrultusunda elde edilen sonuçlar, literatür çalışması esnasında elde edilen verilerle de karşılaştırmaları yapıлып, ortaya konularak yorumlanmıştır.

4.1. Hasarsız Kontrol Yöntemleri

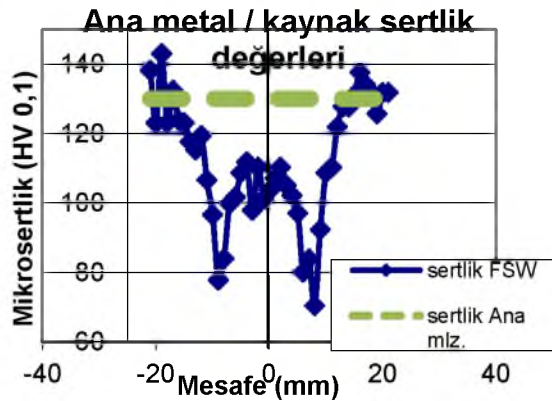
Girdap akımları kontrol yöntemi ve sıvı penetrant kontrol yöntemleriyle levha üzerinde herhangi bir hata ya da süreksizliğe rastlanmamıştır. Sıvı penetrant kontrol yöntemi ultrasonik yöntemde yüzeye açık süreksizliklerin gözden kaçabileceği durumları engellemek için uygulanmıştır. Girdap akımları kontrol yöntemi de ultrasonik kontrol yönteminde çıkan sonuçları desteklemesi için uygulanmıştır.

Ultrasonik kontrol yöntemi ile kaynaklı levhannın kaynağın bittiği kenardan 100 mm 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.

4.2. Sertlik Testi

Sertlik testleri ana malzeme ve kaynaklı malzemenin aralarındaki farklılıkları ortaya koymak ve kaynak esnasında oluşan farklı bölgelerdeki değişimleri anlayabilmek amacıyla uygulanmıştır.

Mikrosertlik değerleri Vickers ucu kullanılarak, Buehler Digital Microhardness Tester MMT-3 cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Elde edilen sertlik değerleri Şekil 8'de verilmiştir. T6 konumundaki ana malzemenin ortalama sertlik değeri 130 HV iken, kaynaklı malzemenin kaynak bölgesindeki sertlik değeri 100 HV'dir. Kaynak bölgesi ana malzemeye göre daha az mukavemetlidir. Isıdan etkilenmiş bölge en az mukavemet değerine sahip bölgedir. Bu sertlik değerlerindeki azalma kaynak merkezinin her iki tarafından yaklaşık 15 mm uzaklıkta görülmektedir. Literatürde incelenilen kaynaklarda da sertlik değerlerinin termo-mekanik etkilenmiş bölgenin bitişiyle, ısıdan etkilenmiş bölgenin başlangıcı olan alanda azaldığı görülmüştür [54-66].



Isıdan etkilenmeyen bölge	Isıdan etkilenen bölge	Termo-mekanik etkilenen bölge	Kaynak merkezi	Termo-mekanik etkilenen bölge	Isıdan etkilenen bölge	Isıdan etkilenmeyen bölge
---------------------------	------------------------	-------------------------------	----------------	-------------------------------	------------------------	---------------------------

Şekil 8. Ana metal ve kaynaklı malzemelerin sertlik profillerinin karşılaştırması.

Çözülmenin, kabalaşmanın ve kaynak prosesinden açığa çıkan ısının bir sonucu olarak sertlik değerleri kaynak dikişi (nugget) ve ısıdan etkilenmiş bölgede düşmüştür. Bunun nedeni Mg_2Si fazlarının bu ısıya bağlı olarak çözülmesi, 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 8-10 mm uzakta ölçülmüştür. Bu sınır termo-mekanik olarak etkilenmiş bölgenin kenarı ve ısıdan etkilenmiş bölgenin başlangıcını oluşturmaktadır (Şekil 8).

4.3. Çekme Testi

Çekme testleri sırasıyla ana malzeme ve sürtünme karıştırma kaynağı uygulanmış malzeme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çekme testleri sonucunda akma değerleri (σ_a) bulunmuştur ve malzemelerin farklı numunelerinden alınan ortalama kopma değerleri Tablo 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 konumundaki çekme testleri, kırılmanın her zaman ısıdan etkilenen bölgede (HAZ) meydana geldiğini göstermektedir. Kaynak verimliliği ($\sigma_{maxFSW} / \sigma_{maxAna}$), kaynaklı malzemenin kopma gerilmesinin kaynaklanmamış ana malzemenin kopma gerilmesine oranı olarak tanımlanmaktadır. Kaynaklı malzemede % 75 kaynak verimine ulaşılmıştır.

Tablo 2. Ana malzemenin ve kaynaklı malzemenin çekme test sonuçları.

Malzeme	Young Modülü [MPa]	Akma Gerilmesi (% 0.2) [MPa]	Çekme Gerilmesi (σ_{max}) [MPa]	Mukavemetteki Değişim [%]	Kaynak Verimi $\sigma_{maxFSW} / \sigma_{maxAna}$ [%]
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. Uygulanılan çekme testlerinde kopma hep bu bölgede gerçekleşmiştir. İncelenilen daha önce yapılmış çalışmalarda da çekme test sonuçlarında aynı bölgede kopma oluştuğu görülmüştür [24,47,59,60].

4.4. Yorulma Testi

Yapılan deneysel çalışmalarda, sabit genlikli yüklemeler sırasında uygulanmış yükün 6013-T6 alüminyum alaşımının yorulma davranışı incelenmiştir. Uygulanılan yük değerleri malzemenin mekanik özellikleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Yorulma deneyleri normal şartlar altında, frekans değeri 10 Hz ve R=0,1 alınarak yapılmıştır.

Ekte gerilme-deformasyon eğrileri verilmiştir. Regresyon denklemleri MINITAB istatistik paket programında Stat menüsünden Regression seçilmiş, oradan Fitted Line Plot kullanılarak kurulmuştur.

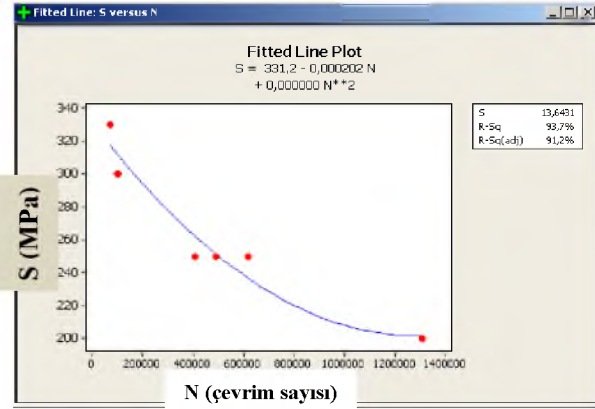
Uygulanılan yorulma deneyleri sonucunda numunelerin ısıdan etkilenen bölgeden koptuğu gözlenmiştir (Şekil 9). Bu bölgenin diğer bölgelere nazaran daha düşük mukavemet değerlerine sahip oluşu ve kaynak esnasında oluşan soğan halkası izlerinin (onion ring) bu bölgede de oluşu yorulma çatlak başlangıcı ve ilerlemesi için geçerli sebepler oluşturmaktadır.



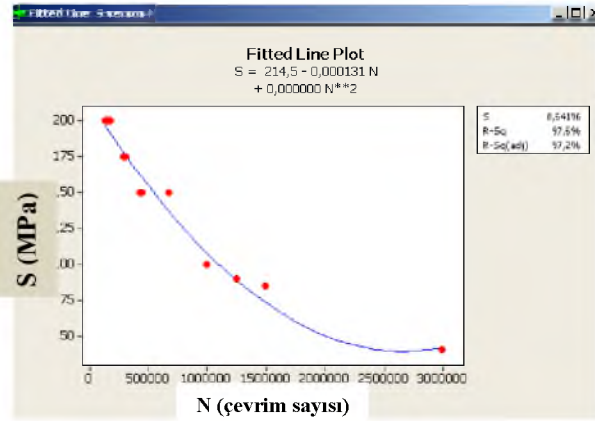
Şekil 9. Yorulma testleri sonucunda kopmuş numuneler ve kopmanın oluştuğu bölgelerin gösterimi

Ana malzeme için hazırlanan numunelere uygulanan gerilme değerleri 180 MPa ile 330 MPa değerleri aralığında seçilmiştir. Ana malzemeyle yapılan deneyler sonucunda kopmaya kadar çevrim sayıları ortalaması sırasıyla 10^5 ve $1,7 \times 10^6$ bulunmuştur (Şekil 10). Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış malzeme için hazırlanan numunelere uygulanan gerilme değerleri 70 MPa ile 200 MPa değerleri

aralığında seçilmiştir. FSW uygulanan malzemeyle yapılan deneyler sonucunda kopmaya kadar çevrim sayıları ortalaması sırasıyla 10^5 ve $1,5 \times 10^6$ bulunmuştur (Şekil 11).

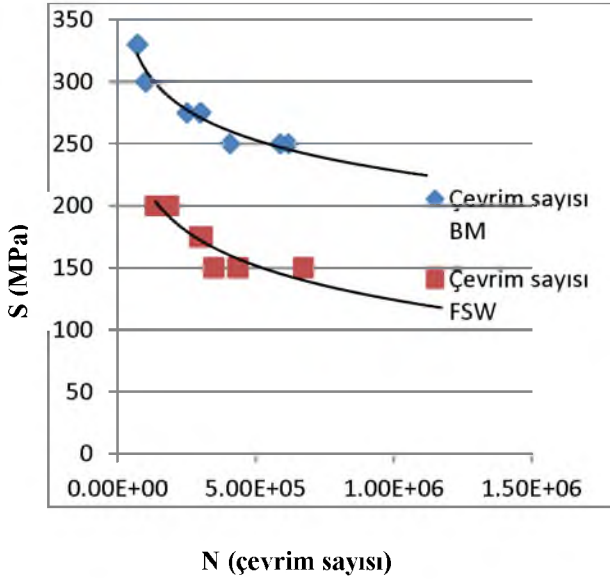


Şekil 10. Ana malzemenin S-N diyagramı.



Şekil 11. FSW kaynaklı malzemenin S-N diyagramı.

Yapılan yorulma deneyleri sonucunda elde edilen değerler kullanılarak oluşturulan gerilme ömür grafiklerinden ana malzemenin yorulma ömrünün kaynaklı malzemelere nazaran yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 12). Kaynaklı malzemelerde özellikle ısıdan etkilenen bölgede sertlik ve dolayısıyla da mukavemet değerlerindeki düşüş malzemenin yorulma ömrünü de azaltmaktadır. Her ne kadar kaynaklı numunelere yüzey işleme uygulanarak yüzey pürüzlülüğü azaltılsa da kaynak esnasında oluşan soğan halkası izleri tam anlamıyla yok edilememiştir ve bu izler yorulma çatlak başlangıcı için hızlandırıcı etki yapmışlardır.



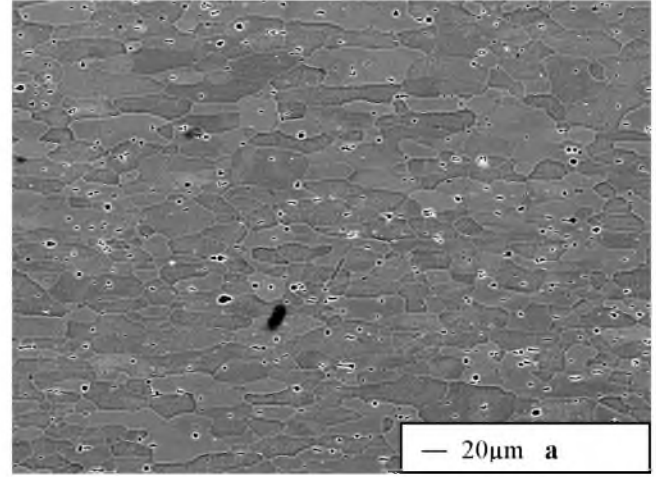
Şekil 12. Ana malzeme (BM) ve FSW uygulanmış malzemenin S-N diyagramları.

Ortalama 10^5 çevrim sonucu kaynaklı malzemeler ile ana malzeme arasındaki yorulma mukavemeti farkı %25 mertebelerinde iken 10^6 çevrimde bu fark yaklaşık aynı oranda kalmıştır.

Daha önce yapılmış çalışmalar incelendiğinde, yorulma deneyi sonuçları, sürtünme karıştırma kaynaklı numunelerin yorulma özelliklerinin ana malzeme kadar iyi olmadığı gözlenmiştir [48,54]. Fakat FSW'nin yorulma performansı uçaklarda şu anda kullanılan perçinle birleştirmeye karşılaştırıldığında yorulma ömrünün yüksek olduğu görülmüştür [48,59,63,64]. Buna ilaveten, yüksek dönme ve ilerleme hızları ile FSW'li birleştirmelerin yorulma mukavemeti artmaktadır [48].

Genel olarak birleştirmelerin üst yüzeyinde uç ve omuzun etkisi ile oluşan profil çentik etkisi yaparak yorulma ömrünü azaltmaktadır. Dolayısıyla, kaynağın yorulma performansını geliştirmek için kaynak sonrası yüzey işlenmelidir. Yüzey pürüzlülüğün giderilmesi ile FSW kaynaklı alüminyum alaşımların yorulma ömürleri ana malzeme düzeyine yakın değerlere çekilmiştir [48,53,56,68-71].

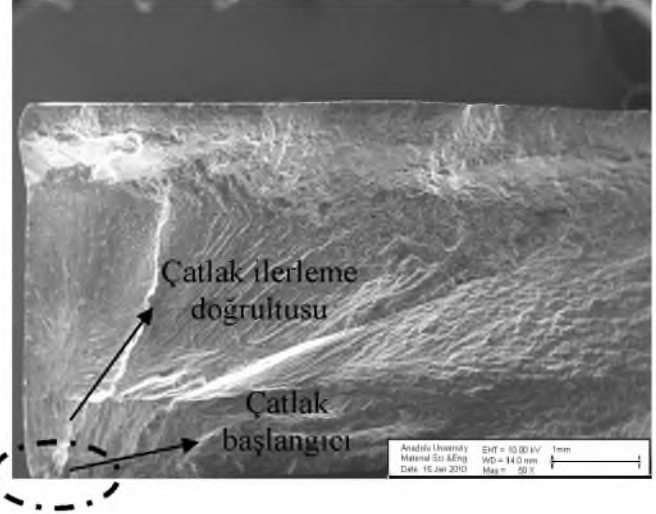
4.5. Mikroyapı ve Kırılma Yüzeylerinin İncelenmesi
FSW uygulanmış Al 6013 malzemesinin mikroyapısal değerlendirilmesi yapılmıştır. Şekil 13'de ana malzemenin SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 13'den de görüleceği üzere ana malzeme eş eksenli tanelere sahip yeniden kristalleşmiş mikroyapı ile belirlenmektedir.



Şekil 13. Ana malzemenin SEM görüntüsü.

İncelenilen SEM görüntülerinden çatlak yorulma çatlakıyla başladığı, kalan kesitin daraldığı ve üzerine gelen yükü taşıyamadığı ve ardından da malzemenin sünek kırıldığı gözlenmiştir.

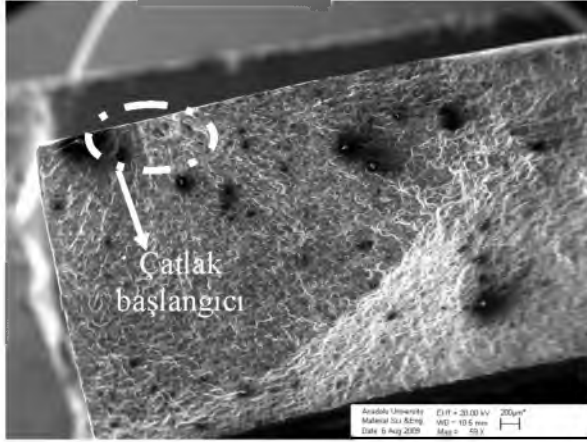
Ön çentik açılmayan numunelerde çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin gerilmenin yüksek olduğu köşelerde meydana geldiği düşük büyütme genel resimlerde görülmektedir. Şekil 14'da çatlak köşeden başlayıp yapı içerisinde ilerlemesi gösterilmektedir.



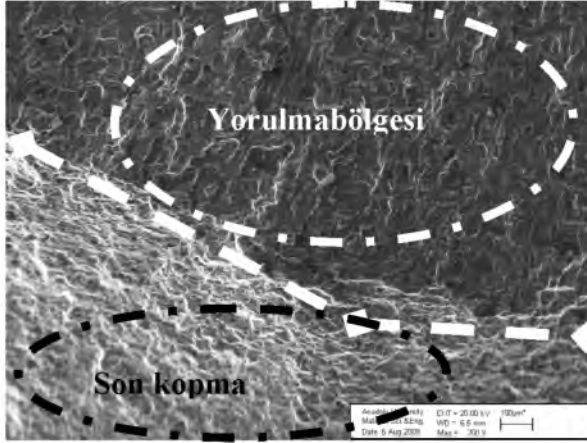
Şekil 14. Köşelerde meydana gelen çatlak başlangıcı ve çatlak ilerleme doğrultusu.

Şekil 15 incelendiğinde yorulmanın ilerlediği düzlemin gerilme eksenine dik ve sünek son kopma bölgesinin de aynı eksene yaklaşık 45° lik açıyla konumlandığı görülmektedir. Çekme gerilmesi altındaki sünek metallerde beklenen kırılma düzlemi de gerilme eksenine 45° dir. Şekil 15'de oluşan çatlak cephesinin dairesel formda ilerlediği görülmektedir.

Şekil 16'da yorulma ve son kopma bölgeleri arasındaki sınır daha ayrıntılı bir şekilde görülmektedir.

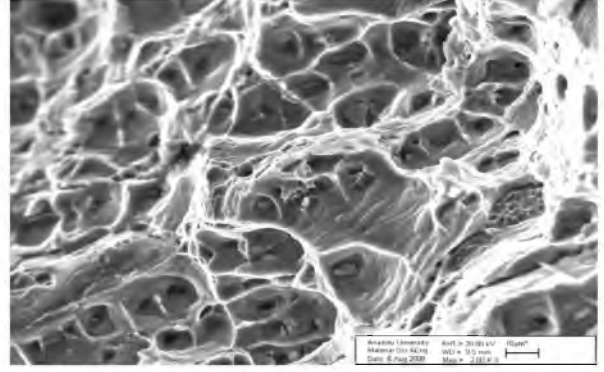


Şekil 15. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin köşelerde meydana gelmesi.



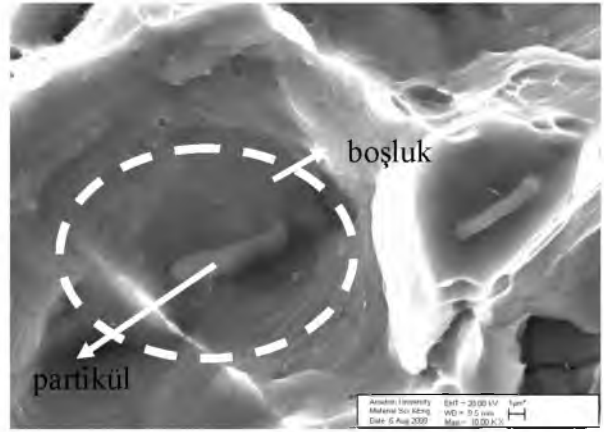
Şekil 16. Son kopma ve yorulma bölgelerinin gösterimi.

Yorulmanın yaklaşık eşit aralıklarla ilerlemesi malzemenin homojen mukavemete sahip bir mikro yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda yorulma adımlarının belirgin şekilde görülebilir olması alüminyum malzemenin sünek davranış göstermesinin bir sonucudur. Son kopma bölgeleri incelendiğinde kırılmaların ağırlıklı olarak eş eksenli derin çukurcuklar (equiaxed dimples) içermesi malzemenin yukarıda değinilen sünek davranışını destekler niteliktedir. Yine aynı bölgede bazı çukurcukların merkezlerinde görülen parçacıklar alaşımın içinde yer alan ve malzemeye mukavemet kazandıran sert fazlardır. Sünek kırılma esnasında bu fazlar boşluk merkezleri olarak görev almıştır (Şekil 17).

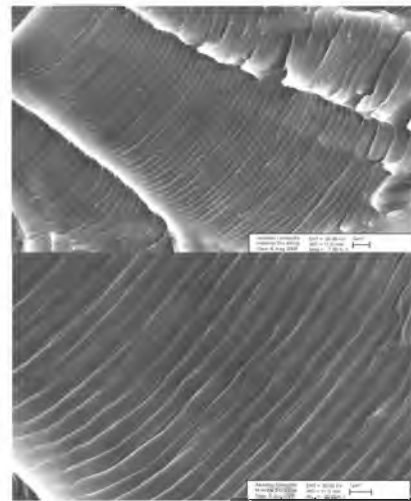


Şekil 17. Sünek kırılma gösteren numunenin gösterimi.

Yapı içinde oluşan boşluklar ve partiküller Şekil 18'de gösterilmektedir. Şekil 19'da ise aynı noktadan farklı büyütme oranları alınarak, yorulma adımları belirgin şekilde gösterilmektedir.



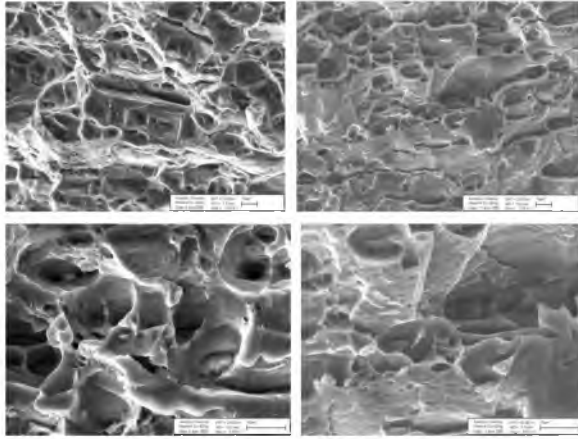
Şekil 18. Yapı içinde oluşan boşluklar ve partiküllerin gösterimi.



Şekil 19. Yorulma adımlarının belirgin şekilde görülmesi.

Tüm kırılma görüntüleri çukurlu kırılma yüzeylerini göstermektedir ve bu da FSW süreciyle ilişkili olan mikroyapısal değişikliklere rağmen, tüm bölgelerde sünek tane içi kırılmanın hakim olduğunu göstermektedir. Sünek tane içi kırılma esnasında, boşlukların birleştiği anda kırılmanın oluşumuyla birlikte, boşluklar iri (kaba) taneli metallere partiküllerde oluşurlar. Sünek tane içi kırılmayla ilgili önemli parametreler: metallere partiküllerin büyüklüğü, uzaklığı ve hacimsel oranlarıdır.

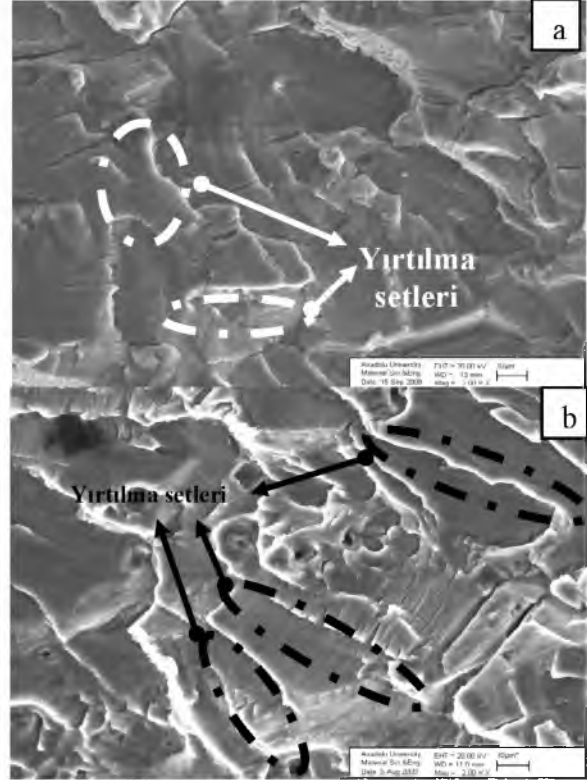
Sünek malzemelerin çekme yüklemesi altında kırılması esnasında gözenekler genelde boyun vermeden önce oluşur. Bununla birlikte eğer boyun verme göreceli daha erken safhalarda oluşursa, gözenek oluşumu daha belirgin olup bunun sonucunda daha iri ve uzamış çukurcuklar görülecektir. Boyun vermenin bu şekilde erken safhalarda oluşması malzemede sünekliğin bir ölçüsü olduğundan daha iri belirgin çukurcuklar içeren kırılma yüzeyleri malzemenin daha sünek olduğunu göstermektedir (Şekil 20).



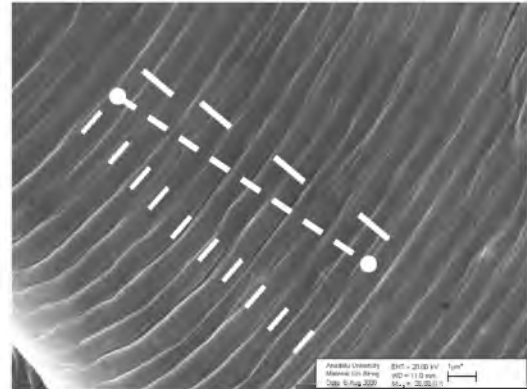
Şekil 20. İri belirgin çukurcukların gösterimi.

Şekil 21.a ve Şekil 21.b görüntülerinde ana çatlak ilerleme yönü aynı olmakla birlikte küçük açısız farklılıklarla ilerleyen çok sayıda yorulma çatlaklarının birleşmesiyle oluşan yırtılma setleri (tear ridge pattern) görülmektedir.

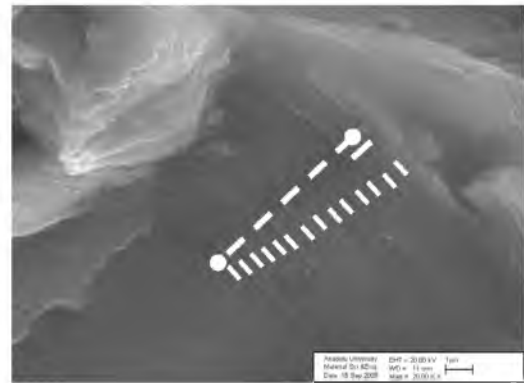
Yorulma adımları yorulma çatlak ilerlemesi hakkında fikir verir. Yorulma adımları kullanılarak çatlak ilerleme yönü ve çatlak ilerleme hızı hakkında bilgi edinilir. Aynı büyütmelerde ve kırılma yüzeylerinin yaklaşık aynı noktalarından kaynaklı malzeme (Şekil 22) ve ana malzeme (Şekil 23) için yorulma adımı sayımı (striation count) yapılmıştır. Ayrıca FSW de yorulma adımları eşit aralıklı ve düzenli olduğu gözlenmiştir. FSW'li malzeme için yorulma adımı aralığı $1\mu\text{m}$ ve ana malzeme için $0,7\mu\text{m}$ 'dur. Elde edilen sonuçlara göre yorulma çatlak hızı kaynaklı numunede daha hızlı bir şekilde ilerlemiştir.



Şekil 21. (a)(b) Yırtılma setleri gösterimi.



Şekil 22. Kaynaklı malzemede yorulma adımları.



Şekil 23. Ana malzemedeki yorulma adımları.

5. GENEL SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynaklanmış 3,6 mm kalınlığındaki 6013-T6 alüminyum alaşımın mekanik özellikleri, sabit genlikli yük altındaki yorulma davranışları ve yorulma sonucu oluşan kırık yüzeylerin gösterdiği farklılıklar incelenmiştir. Testler ve incelemeler sırasıyla ana malzeme ve kaynaklı malzemelere uygulanmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre kaynak işleminin hatasız ve verimli olması, sürtünme karıştırma kaynak tekniğinin 6013 serisi alüminyum alaşımlarında başarı ile uygulanabileceğini göstermiştir. Kaynak işlemi esnasında uygun kaynak parametrelerinin seçilmesi, uygun uç-omuz aparatlarının kullanılması ve kaynak yapılacak levhaların frezeyle uygun şekilde bağlanması kaynak işleminin hatasız ve verimli olmasını sağlamıştır.

Kaynak işlemi sonrası numuneler freze ile çıkarıldıktan sonra, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması için zımpara ile yüzey işlemi uygulanması malzemelerin yorulma ömrünü artırmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağı esnasında oluşan soğan halkası izlerinin özellikle yorulma hasarı başlangıcı için çentik etkisi yaratmaları, uygun bir yüzey işleme tekniği kullanılarak azaltılabilmektedir [54-56].

Mekanik testlere geçmeden yapılan hasarsız kontrol yöntemleri kaynaklı yapının herhangi bir süreksizlik ya da hata içermediğini ortaya koymuştur. Fakat uygulanan testler tek başlarına yeterli güvenilirlik sağlamadıkları için farklı teknikler kullanılarak sonuçlar desteklenmiştir. Sırasıyla levhaya gözle kontrol, sıvı penetrant kontrol yöntemi, ultrasonik kontrol yöntemi, girdap akımları kontrol yöntemi ve iletkenlik testleri uygulanmıştır. Literatürde incelenilen çalışmalarda [34-37] FSW ile birleştirilen yapılarda özellikle ultrasonik kontrol yönteminin kullanıldığı gözlenmiştir.

Kaynaklı numunelerde 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 ve kopmalar bu bölgede oluşmuştur.

Yorulma deneyleri sonunda kaynaklı malzemelerin ana malzeme kadar yorulma dayanımına sahip olmadıkları ortaya konmuştur.

Mikroyapı görüntülerinde sürtünme karıştırma kaynağında oluşan bölgeler; ana malzeme, ısıdan etkilenen bölge, termo-mekanik ısıdan etkilenen bölge ve kaynak merkezi olarak görülmektedir. Bölgelerde tane yönelmeleri, tane boyutları arasındaki farklar ortaya konulmuştur.

Taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen görüntülerde ana ve kaynaklı malzemelerde sünek kırılmanın meydana geldiği görülmüştür. Ön çentik açılmayan numunelerde çatlak başlangıcı ve ilerlemesinin gerilmenin yüksek olduğu köşelerde meydana geldiği gösterilmiştir. Kırılma yüzeylerinde yorulma ve son kopma bölgeleri net olarak belirtilmiştir. Görüntülerde ayrıca yorulmanın ilerlediği düzlemin gerilme eksenine dik ve sünek son kopma bölgesinin de aynı eksene 45°'lik açıyla konumlandığı gösterilmiştir.

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. Uygulanılan çekme testlerinde kopma hep bu bölgede gerçekleşmiştir. İncelenilen daha önce yapılmış çalışmalarda da çekme test sonuçlarında aynı bölgede kopma oluştuğu görülmüştür [24,47,59,60].

FSW ile birleştirilmiş malzemelerin, servis şartları altındaki hasar mekanizmaları tam olarak anlaşılrsa 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.

Uçak yapılarının, bileşenlerinin emniyetli ve mukavemetli olarak hizmet verebilmeleri, uygun birleştirme yöntemlerinin uygulanabilmesi ile mümkün olmaktadır. Gelişen uçak tasarım ve üretim teknolojileri, birleştirme prosedürlerinin de bu gelişime uyumlu olarak değişmesini gerektirmektedir. Uçak parçalarında FSW tekniğinin yaygın kullanım alanına sahip olabilmesi, kaynak teknolojilerindeki gelişmelerin izlenmesi ve uygulanması, bu nedenle büyük bir önem taşımaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı bu alanda uygulanması ile maliyet verimliliği de sağlanmaktadır. Ayrıca FSW tekniğinin uygulama sürelerini kısaltılması özelliği de üretici ve işletici firmalar tarafından vazgeçilemez bir gereksinimdir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Messler, R.W., (1993) "Joining of advanced materials", Reed Publishing Inc., USA.
- [2] Lancaster, J.F., (1987) "Metallurgy of welding", 4th Ed., Allen and Unwin, UK.
- [3] Brandon, D. ve Kaplan W.D., (1997) "Joining processes: an introduction", John Willey and Sons, UK.
- [4] Hayes C., (1997) "The ABC's of nondestructive weld examination", Welding Journal May 1997, The American Welding Society, USA.
- [5] Anık, S., Anık, E.S. ve Vural, M., (1993) "1000 soruda kaynak teknolojisi el kitabı cilt I", Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [6] Kafalı, H., (2011) "Sürtünme Karıştırma Kaynağıyla Birleştirilmiş Al 6013 Alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [7] Kınıkoğlu, N.G., (2001) "Malzeme Bilimi ve Mühendisliği", Ekim 2001, İstanbul.
- [8] Taban, E. ve Kaluç, E., (2005) "Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Standart Gösterimleri", MakineTek. P.178, İstanbul.
- [9] Özarpa, C., (2005) "Al 5754-H22 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [10] Yurdakul, M., Özbay, O. ve İç, Y.T., (2002) "Havacılık alanında kullanılan alüminyum alaşımlarının seçimi," Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 17, No: 2, 1-23.
- [11] http://www.mat.ethz.ch/news_events/archive/materialsday/matday01/pdf/TempusMD.pdf, Ocak 2008.
- [12] Lloyd, D.J., (1998) "Aluminium alloys used in automotive skin sheet", Advances in Industrial Materials, The Metallurgical Soc. of CIM.
- [13] Thomas W.M., Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Templesmith P. ve Dawes C.J. (TWI), (1992) "Improvements relating to friction stir welding", European Patent Specification EP0615480B1.
- [14] Threadgill P., (1997) "Friction stir welds in Aluminium alloy – preliminary microstructure assessment", TWI Bulletin, TWI, Abington, UK.
- [15] Dr.Ing. Staniek G., Dr.Ing. Hillger W. ve Dr.Ing. Dalle Donne C., (2003) "Ultrasonic testing on friction stir welded aluminium alloys, Testing on friction stir welds".
- [16] Christner, B., McCoury, J. ve Higgins, SÇ, (2003) "Development and testing of friction stir welding (FSW) as a joining method for primary aircraft structure," 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, USA, 14-16 May 2003.
- [17] 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, Park City, Utah, USA, 14-16 May 2003.
- [18] Shepherd, G.E., (2003) "The evaluation of friction stir welded joints on Airbus aircraft wing structure," 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, USA, 14-16 May 2003.
- [19] Lohwasser, D., (2003) "Friction stir welding of aerospace alloys," 4th International Symposium on Friction Stir Welding, Park City, Utah, USA, 14-16 May 2003.
- [20] 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, Park City, Utah, USA, 14-16 May 2003.
- [21] Eclipse Aviation main page., (2007) http://www.eclipseaviation.com/eclipse_500/gallery/images.html, Temmuz 2007.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Dubourg, L. ve Dacheux, P., (2006) "Design and properties of FSW tools: a literature review," Saint-Sauveur, Nr Montreal, Canada, 10-13 October 2006.
- [26] Thomas, W.M., Johnson, K.I. ve Wiesner, C.S., (2003) "Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies," Advanced Engineering Materials, 5, No: 7, 485-490.
- [27] 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.
- [28] Schneider, J.A. ve Nunes, Jr. A.C., (2004) "Characterization of plastic flow and resulting microtextures in a friction stir weld," Metallurgical and Materials Transactions B, 35B, 777-783.

- [29] Heurtier, P., Desrayaud, C. ve Montheillet, F., (2002) "*Materials Science Forum*", **396-402**, 1537-1542.
- [30] Heurtier, P., Jones, M.J., Desrayaud, C., Driver, J.H., Montheillet, F. ve Allehaux, D., (2006) "*Journal of Materials Processing Technology*", **171**, 348-357.
- [31] Elangovan, K. ve Balasubramanian, V., (2007) "Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy," *Materials and Design*, In Press, Corrected Proof.
- [32] 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*, Saint-Sauveur, Nr Montréal, Canada, October 10-13.
- [33] Hatsukade, Y., Takahashi, T., Yasui, T., Tsubaki, M., Fukumono, M. ve Tanaka, S., (2007) "Study on non-destructive inspection using HTS-SQUID for friction stir welding between dissimilar metals," *Physica C: Superconductivity*.
- [34] Leal, R.M. ve Loureiro, A., (2007) "Effect of overlapping friction stir welding passes in the quality of welds of aluminium alloys," *Materials & Design*.
- [35] Zhou, C., Xinqi Y. ve Luan G., (2006) "Effect of root flaws on the fatigue property of friction stir welds in 2024-T3 aluminium alloys," *Materials Science and Engineering A*, **418**, 155-160.
- [36] Dickerson, T.L. ve Przydatek, J., (2003) "Fatigue of friction stir welds in aluminium alloys that contain root flaws," *International Journal of Fatigue*.
- [37] Rosado, L.S., Santos, T.G., Piedade, M., Ramos, P.M. ve Vilaça, P., (2010) "Advanced technique for non-destructive testing of friction stir welding of metals," *Measurement*, **43**, 1021-1030.
- [38] Suresh, S., (1991) "*Fatigue of materials*", Cambridge University Press, New York, USA.
- [39] Kinikoğlu, N.G., (2001) *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, İstanbul, Literatür Yayınları, 290-294, Ekim 2001.
- [40] Tetik, D., (1999) "2024-T3 Alüminyum alaşımının simüle edilmiş uçuş yükleri altında yorulma davranışı", Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- [41] Schijve, J., (1998) "*Fatigue crack growth under variable amplitude loading*", Metals Handbook Volume 19, Fatigue and Fracture, (Ed: ASM Handbook Committee), American Society for Metals, USA, 110-131.
- [42] Antolovich, S. D. ve Saxena, A., (1986) *Fatigue failures*, Metals Handbook; 9th edition Volume 11: Failure analysis and prevention, (Ed: ASM Handbook Committee), American Society for Metals, Ohio, USA, 102-135.
- [43] Pascoe, K. J., (1978) "*An introduction to the properties of engineering materials*", ELBS, UK.
- [44] Ellyin, F., (1997) "*Fatigue damage, crack growth and life prediction*", Chapman & Hall, London.
- [45] Dieter, G. E., (1998) "*Mechanical metallurgy*", McGraw-Hill Book Co., London.
- [46] Banantine, J. A. ve Comer, J. J., (1990) "*Fundamentals of metal fatigue analysis*", Prentice-Hall Inc., USA.
- [47] 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.
- [48] Mishra, R.S. ve Mahoney, M.W., (2007) "*A Friction Stir Welding and Processing*", SM International.
- [49] Jata, K., Mahoney, M.W., Mishra, R.S. ve Lienert, T.J., (2005) "*Friction stir welding and processing III*", TMS publication.
- [50] Prater, T., (2009) "*Friction stir welding of metal matrix composites: the joining of AL 6061/SiC/17.5p using diamond coated tools*", VDM.
- [51] Fersini, D. ve A. Pirondi, (2008) "Analysis and modelling of fatigue failure of friction stir welded aluminium alloy single-lap joint," *Engineering Fracture Mechanics*, **75**, No: 3-4, 790-803.
- [52] Ali, A., An, X., Rodopoulos, C.A., Brown, M.W., O'Hara, P., Levers, A. ve Gardiner, S, (2007) "The effect of controlled shot peening on the fatigue behaviour of 2024-T3 aluminium friction stir welds," *International Journal of Fatigue*, **29**, 1531-1545.
- [53] Nielsen, K.L., (2008) "Ductile damage development in friction stir welded aluminium (AA2024) joints," *Engineering Fracture Mechanics*, **75**, 2795-2811.
- [54] 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.
- [55] 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.
- [56] Hatamleh, O., (2009) "A comprehensive investigation on the effects of laser and shot peening on fatigue crack growth in friction stir welded

AA2195 joints,” *International Journal of Fatigue*, **31**, 974-988.

[57] 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*.

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

[59] 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.

[60] Heinz, B. ve Skrotzki, B., (2002) “Characterization of a friction-stir-welded aluminium alloy 6013,” *Metallurgical and Materials Transactions B*, **33B**, 489-498.

[61] Troeger, L.P. ve Starke, Jr. E.A., (2000) “Microstructural and mechanical characterization of a superplastic 6xxx aluminium alloy,” *Materials Science and Engineering*, **A277**, 102-113.

[62] Uzun, H., Donne, C.D., Argagnotto, A., Ghidini T. ve Gambaro, C., (2005) “Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel,” *Materials and Design*, **26**, 41-46.

[63] Heinz, A., Haszler, A., Keidel, C., Moldenhauer, Benedictus, R. ve Miller, W.S., (2000) “Recent development in an aluminium alloys for aerospace applications,” *Materials Science and Engineering*, **A280**, 102-107.

[64] John, R., Jata, K.V. ve Sadananda, K., (2003) “Residual stress effect on near-threshold fatigue crack growth in friction stir welds in aerospace alloys,” *International Journal of Fatigue*, **25**, 939-948.

[65] Hassan, Kh.,A.A., Norman, A.F., Price, D.A. ve Prangnell, P.B., (2003) “Stability of nugget zone grain structures in high strength Al-alloy friction stir welds during solution treatment,” *Acta Materials*, **51**, 1923-1936.

[66] Braun, R., (2006) “Investigations on the long-term stability of 6013-T6 sheet,” *Materials Characterization*, **56**, 85-95.

[67] 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.

[68] Carbonini, P., Monetta, T., Mitton, D.B., Bellucci, 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.

[69] Braun, R., Donne, C.D. ve Staniek, G., (2000) “Laser beam welding and friction stir welding of 6013-T6 aluminium alloy sheet,” *Mat.-wiss u. Werkstofftech*, **31**, 1017-1026.

[70] Kafalı, H., (2009) “AA 2024 Al alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında (SKK) kaynak parametrelerinin birleşmeye etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[71] Hatamleh, O., (2006) *Effects of laser and shot peening on friction stir welding*, PhD. Thesis, University of South Carolina.

ÖZGEÇMİŞLER

Yrd. Doç.Dr. Haşım KAFALI

1979 yılında Muğla’da doğmuştur. 2001 yılında Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu’nda lisans eğitimini, 2004 yılında Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık A.B.D’nda yüksek lisans ve 2011 yılında da doktora eğitimini tamamlamıştır. Mezun olduktan sonra 2001 yılında Anadolu Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak göreve başlamıştır. 2011 yılından bu yana Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesinde çalışmaktadır.

Prof. Dr. Nuran AY

1978 yılında lisan eğitimini, 1979 yılında yüksek lisans eğitimini ve 1989 yılında doktora eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. 1990 yılında Anadolu Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Yardımcı Doçent, 1995 yılında Anadolu Üniversitesi Seramik Mühendisliği Bölümünde Doçent ve 2000 yılında Anadolu Üniversitesi Seramik Mühendisliği bölümünde Profesör akademik ünvanlarını almıştır. Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Seramik Mühendisliği Bölüm Başkanı Yardımcılığı, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Senatörü olarak idari görevlerde bulunmuştur.