

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI VE HAVACILIK VE UZAY ENDÜSTRİSİNDEKİ UYGULAMA ALANLARI

Serdar DALKILIÇ

Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu
2 Eylül Kampüsü 26470 ESKİŞEHİR
sdalkilic@anadolu.edu.tr

Geliş Tarihi: 04 Mayıs 2012, **Kabul Tarihi:** 06 Temmuz 2012

ÖZET

Havacılık endüstrisinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılan 2xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımları ile yüksek mukavemetli, yorulma ve korozyona karşı dayanıklı kaynaklı birleştirmelerin üretimindeki güçlükler, havaaracı yapılarında kaynakla birleştirme yöntemini uzun bir süre engellemiştir. Bu alüminyum alaşımları, ergime bölgesinde sergiledikleri kötü katılaşma mikroyapısı ve poroziteden dolayı genelde “kaynak yapılamaz” olarak sınıflandırılmışlardır. Ayrıca kaynak yapılmamış ana malzemeye nazaran mekanik özelliklerindeki düşüş de yüksektir. Bu etkenler bu alaşımların birleştirilmesinde geleneksel kaynak yöntemlerinin kullanımını önlemiştir. Bu nedenle havacılık endüstrisindeki yapısal birleştirmelerin büyük kısmında perçin kullanılmaktadır. Bu da imalat zorluklarına, ağırlığa, yüksek maliyetlere, perçin deliklerinde korozyona ve gerilme konsantrasyonlarına neden olmaktadır. Bu olumsuz durum bir katı faz kaynağı olan Sürtünme Karıştırma Kaynağının (FSW) geliştirilmesi ile ortadan kaldırılmıştır.

Bu çalışmada ilk olarak Sürtünme Karıştırma Kaynağının nasıl çalıştığı tanımlanmış, ardından da bu kaynak yönteminin özellikleri, geleneksel kaynak yöntemlerine göre avantaj ve dezavantajları, kaynak yapılabilecek malzemeler ve özellikle havacılık ve uzay endüstrisindeki kullanım alanları güncel literatür derlenerek incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Kaynaklı Bağlantılar, Havaaracı Yapıları.

FRICION STIR WELDING AND AEROSPACE APPLICATIONS

ABSTRACT

The difficulty of producing welded joints having high strength and fatigue and corrosion resistance with 2xxx and 7xxx series aluminum alloys which are widely used in aerospace industry has inhibited the use of joining aerospace structures by welding method. These aluminum alloys have been classified as non-weldable because of exhibiting poor solidification microstructure and porosity in the fusion zone. Also, compared to the non-welded base material, there is a substantial loss in mechanical properties. These factors cause the refusal of joining of these high strength alloys by conventional fusion welding methods. Therefore riveting has been widely used in aerospace structural constructions. This means production problems, increased weight, higher costs, and corrosion and stress concentrations around rivet holes. Friction Stir Welding (FSW) as a solid-state welding method is successfully addressing these issues.

In this paper the Friction Stir Welding process is shortly introduced. The properties of this welding method, advantages and disadvantages compared to the traditional welding methods, the materials to be joined and the aerospace applications of FSW is investigated by reviewing up to date literature.

Key Words: Friction Stir Welding, Welded Joints, Aircraft Structures.

1. GİRİŞ

Bindirme birleştirmeler (lap joint), havacılık endüstrisinde parçaların birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Paneller; yatay kirişler (stringers) ve profillerle düzleştirilir ve dış kaplamaya T-birleşme konfigürasyonu ya da bindirme birleştirme konfigürasyonu ile kaynakla birleştirilirler. Fakat hafif alaşımlar, özellikle Al alaşımları klasik kaynak yöntemleriyle “birleştirilemez” ya da “zor birleştirilir” malzeme olarak sınıflandırılmaktadırlar. Çünkü bu malzemeler TIG ya da lazer kaynağıyla birleştirildiklerinde, kaynaklı birleştirmenin çekme mukavemeti, ana malzemeninkinin %60 ve bazen %50’inden bile düşük olabilmektedir. Birleştirmenin mukavemetindeki bu düşüşün temel sebebi malzemedeki metalürjik değişimlerdir. Ergimiş malzemedeki ortalama tanecik boyutu, ana malzemeninkinin 10 katına kadar yükselebilir, ısıdan etkilenmiş bölge büyük olur [1], ergime bölgesinde katılma sonrası mikroyapı kötüdür ve gözeneklidir. Bazı Al alaşımları direnç kaynağı ile birleştirilebilir ancak yüzey oksitlenmesini kaldırmak için gerekli yüzey işleme maliyetlidir [1].

Bu nedenle havacılık endüstrisindeki yapısal birleştirmelerin büyük kısmında perçin kullanılmaktadır. Bu da imalat zorluklarına, ağırlığa, yüksek maliyetlere, perçin deliklerinde korozyona ve gerilme konsantrasyonlarına neden olmaktadır [2,3]. Nitekim A.B.D.’nde toplam kaynak giderleri 30 milyar dolar civarında iken bunun sadece %1’i havacılık ve uzay sektörüne aittir. Havacılık ve uzay endüstrisinde imalat maliyetlerinin sadece %0,27’si kaynak işlemine aittir ve bu değer tüm diğer sektörler içindeki en düşük değerdir. Sektör ortalaması % 1,4’dür [4].

Bu tür malzemelerin kaynak teknolojisinde 1991 yılında İngiltere’deki The Welding Institute (TWI) tarafından geliştirilen bir katı hal birleştirme tekniği olan Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding-FSW) ile önemli gelişmeler yaşanmıştır.

Bu çalışmada ilk olarak Sürtünme Karıştırma Kaynağının nasıl çalıştığı tanımlanmış, ardından da bu kaynak yönteminin özellikleri, geleneksel kaynak yöntemlerine göre avantaj ve dezavantajları, kaynak yapılabilecek malzemeler ve özellikle havacılık ve uzay endüstrisindeki kullanım alanları güncel literatür derlenerek incelenmiştir.

2. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ ÖZELLİKLERİ

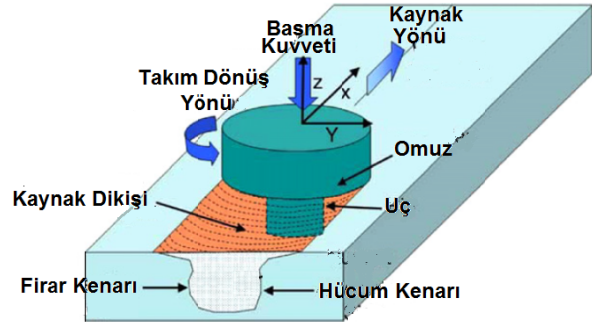
FSW’de özel olarak tasarlanmış bir omuz ve uçtan oluşan takım birleştirilecek plakaların birleşme kenarlarına daldırılır ve birleşme hattı boyunca ilerletilir. Takımın iki temel işlevi vardır: iş parçasını ısıtmak ve birleştirmeyi oluşturmak için malzemeyi

hareket ettirmek. Isıtma işlemi takım ile iş parçası arasındaki sürtünme ve iş parçasının deformasyonu ile oluşur. Bölgesel ısıtma uç etrafındaki malzemeyi yumuşatır ve takımın dönüşü ile ucun önündeki malzeme ucun arkasına doğru hareket eder. Bu işlemin sonunda katı halde bir birleşme oluşur. Şekil 1’de FSW yöntemi ile birleştirilmiş iki levha, Şekil 2’de de FSW yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. FSW yöntemi ile birleştirilmiş iki levha [5].

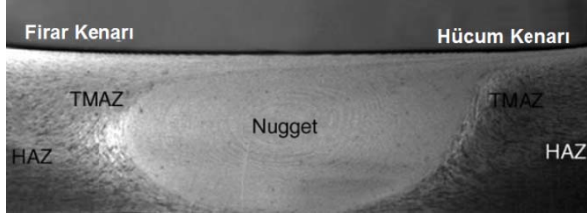
FSW işlemi esnasında malzeme yüksek sıcaklıkta şiddetli bir plastik deformasyona maruz kalır ve sonuçta küçük ve eş eksenli yeniden kristalleşmiş taneler oluşur. FSW’deki bu mikroyapı iyi mekanik özellikler kazandırır [2,6]. Örneğin FSW ile birleştirilmiş AA2024-T3 levhalarının çekme mukavemetinin ana malzemeninkinin %98’i olduğu saptanmıştır [7].



Şekil 2. Sürtünme Karıştırma Kaynağının şematik gösterimi [8].

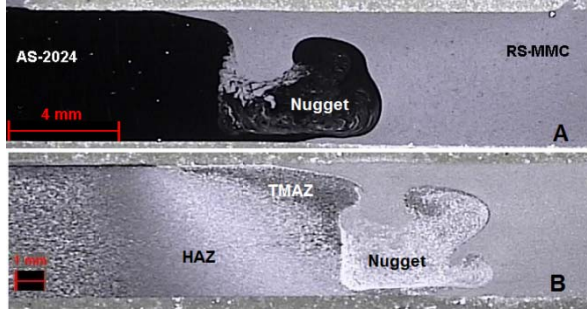
FSW işlemi esnasında karışma bölgesindeki yoğun plastik deformasyon ve maruz kalınan yüksek sıcaklık, karıştırma bölgesinde yeniden kristalleşmeye ve karıştırma bölgesinin etrafında da çökeltilerin çözülmesine ve kabalaşmasına neden olur. Tanelerin ve çökelti fazların karakterizasyonuna göre birbirinden farklı üç bölge oluşur: karıştırma bölgesi (nugget), termo-mekanik etkilenmiş bölge (TMAZ) ve ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ). Şekil 3’de 7075-T651 Al

alaşımında oluşan bu bölgeler görülmektedir. Bu bölgelerdeki mikroyapısal değişimlerin, kaynak sonrası mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır [2].



Şekil 3. FSW'de oluşan çeşitli mikroyapısal bölgeler.

Şekil 4'de ise FSW ile birleştirilmiş 2024 Al alaşımı ve metal matrisli kompozitteki (AA2124 matris, SiC parçacık takviye) bölgeler verilmiştir. Hücum kenarında monolitik alaşım, fırar kenarında da kompozit malzeme bulunmaktadır. Şekil 3b, 3a'daki numunenin kimyasal olarak dağılmış halidir.



Şekil 4. Monolitik alaşım ve metal matrisli kompozitin FSW ile birleştirilmesi sonucu oluşan bölgeler [5].

Karıştırma (Nugget) Bölgesi: FSW işlemi esnasındaki yoğun plastik deformasyon ve sürtünme ile oluşan ısı, karıştırma bölgesinde yeni kristalleşmiş küçük taneli bir mikroyapı oluşturur. Bazı durumlarda bu bölgede "soğan halkası" şeklinde bir mikroyapı oluşur. Yeniden kristalleşmiş tanelerin içinde genelde düşük bir dislokasyon yoğunluğu vardır. Bununla birlikte bazı araştırmacılar bu bölgedeki küçük yeniden kristalleşmiş tanelerin yüksek yoğunlukta alt sınırlar (sub-boundary), alt tanecikler ve dislokasyonlar içerdiğini saptamıştır. Yeniden kristalleşmiş nugget bölgesi ile ana malzeme arasındaki arayüzey, takımın fırar kenarında dağınık iken hücum kenarında oldukça keskindir [2].

Termo-mekanik Etkilenmiş Bölge (TMAZ): FSW işlemine özgün bir şekilde, karıştırma bölgesi ile ana malzeme arasında "termo-mekanik etkilenmiş bölge (TMAZ) adı verilen bir geçiş bölgesi oluşur. Bu bölge hem sıcaklıktan hem de deformasyondan etkilenmiştir. Bu bölgede plastik deformasyon görülmekle birlikte, yeterli deformasyon uzaması olmadığından yeniden kristalleşme gerçekleşmez. Bununla birlikte yüksek sıcaklıktan ötürü bazı çökelti fazlarının çözülmesi

gözlenmiştir. Çözülmenin miktarı bu bölgenin maruz kaldığı termal çevrime bağlıdır. TMAZ'daki taneler genelde yüksek yoğunlukta alt sınırlar içerir [2].

Isıdan Etkilenmiş Bölge (HAZ): TMAZ'ın hemen yanında ısıdan etkilenmiş bir bölge bulunmaktadır. Bu bölge termal çevrime maruz kalmaktadır ancak plastik deformasyon yoktur. Bu bölge, ana malzeme ile aynı tane yapısına sahiptir. Fakat 250°C'nin üzerindeki sıcaklıklar çökelti yapısını önemli ölçüde değiştirmektedir [2].

Havacılık endüstrisinde kullanılan Gaz Tungsten Ark Kaynağı (GTAW ya da TIG), MIG kaynağı ve Elektron Işın Kaynağı (EBW) ile karşılaştırıldığında FSW daha iyi mekanik özellikler (çekme mukavemeti, yorulma mukavemeti, çatlak ilerleme hızı, kalıntı gerilme v.b.) sağlamaktadır. Örneğin GTAW, EBW ve FSW yöntemleriyle birleştirilmiş AA2219 Al alaşımı numunelerde FSW diğer yöntemlere göre daha iyi çekme ve yorulma mukavemeti göstermiştir [9] ve yorulma çatlak ilerlemesine karşı daha dirençli olduğu saptanmıştır [10]. Benzer şekilde FSW ve MIG yöntemleriyle birleştirilmiş AA6xxx serisi numunelerde FSW'nin daha yüksek akma ve kopma gerilmeleri ile daha uzun yorulma ömrü sağladığı görülmüş [11] ve korozyona karşı da daha dirençli olduğu saptanmıştır [12]. Yine FSW ve TIG kaynak yöntemleriyle birleştirilmiş Al-Mg-Sc alaşımı numunelerde, FSW ile birleştirilmiş numunelerin çekme gerilmesinin %19, akma gerilmesinin de %31 daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca FSW ile birleştirilmiş numuneler, kaynak yapılmamış ana malzemenin çekme gerilmesinin %94'üne sahiptir [13].

FSW, geleneksel kaynak yöntemlerine göre daha iyi mekanik özellikler sağlamakla birlikte, kaynak kalitesi omuz ve uç şekli ve boyutları gibi takımın geometrik özellikleri ile takım dönüş hızı ve besleme hızı (kaynak ilerleme hızı) gibi proses parametrelerine bağlıdır [1]. Bu parametrelerin birleştirilecek malzemelerin metalürjik ve mekanik özelliklerine, birleştirme konfigürasyonuna ve birleştirmenin uygulama alanına göre hassas bir şekilde optimize edilmesi gerekir. Literatürde takım geometrisi ve proses parametrelerinin etkisi ile ilgili bir çok çalışma bulunabilir. Örnek olarak FSW ile birleştirilmiş AA7075-T6 Al alaşımı [14], 409L paslanmaz çelik [15], AA5083-H321 Al alaşımı [8,16], AZ31 Mg alaşımı [17,18] ve Mg-Zn-Y-Zr alaşımı [19], AA6061-T6 Al alaşımı [20] üzerinde bu parametrelerin etkisi incelenmiştir.

Takımının değişik geometrik özelliklerinden dolayı uç etrafındaki malzeme akışı oldukça karmaşıktır. 21 ve 22 numaralı referanslarda FSW ile birleştirilmiş 6xxx serseri Al alaşımları üzerine detaylı bir modelleme çalışması yapılmıştır.

FSW yöntemi geleneksel kaynak yöntemlerine göre daha az enerji tüketir. Koruyucu bir gaz kullanılmadığından çevreye zarar vermez. Herhangi bir dolgu malzemesi kullanılmadığından herhangi bir Al alaşımı kompozisyon uyum sorunu yaşanmaksızın birleştirilebilir. Alın kaynağı, bindirme kaynak, T kaynağı gibi değişik birleştirme konfigürasyonları kullanılabilir [2]. Al alaşımlarının yanı sıra Mg [23], Ni [24] ve Ti [25] alaşımları da FSW yöntemi ile birleştirilebilir.

İstenirse birbirinden farklı iki malzeme bu kaynak yöntemi ile birleştirilebilir. Örneğin bakır (T2) ile Al (5A06) [26], pirinç (CuZn30) ile Al (1050) [27], Al 2024 ile Al 7075 [28,29], MgZnZr alaşımı (ZK60) ile titanyum [30], AA2024-T3 ile TiAl6V alaşımı [31] başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Ayrıca FSW yöntemi ile metal matrisli kompozitlerin [5,32] ve polimer kompozitlerin [33] birleştirilmesi de mümkündür.

Metal matrisli kompozitlerle monolitik alaşımlar arasında yüksek kaliteli kaynakların üretimi ilgi çekicidir. Çünkü metal matrisli kompozitlerin yüksek mukavemet, daha yüksek Young Modülü, aşınmaya karşı iyi direnç ve yüksek sürünme dayanımı gibi yüksek performans sağlayan özellikleri konvansiyonel malzeme ile kombine edilebilir. Bununla birlikte metal matrisli kompozitlerin kaynakla birleştirilebilmesi içeriklerindeki metal olmayan takviye malzemesi yüzünden oldukça sınırlıdır. FSW yönteminde işlem sıcaklığı metalin ergime sıcaklığından daha düşük olduğundan, katılaşma kusurları ve metal matris ile takviye parçacıkları arasındaki istenmeyen kimyasal reaksiyonlar önenebilir ve kaynak işlemi gerçekleştirilebilir [5].

3. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

FSW'nin diğer geleneksel kaynak yöntemlerine göre avantajlarını metalürjik, çevresel ve enerji olmak üzere üç ana grupta incelemek mümkündür [2].

Metalürjik avantajları:

- ✓ Katı faz işlemidir,
- ✓ İş parçasında düşük bir burulmaya neden olur,
- ✓ İyi bir boyutsal kararlılığa ve tekrar edilebilme özelliğine sahiptir,
- ✓ Alaşım elementlerinde kayıp yoktur,
- ✓ Birleşme bölgesinde mükemmel metalürjik özelliklere sahiptir,
- ✓ Küçük taneli mikroyapıya sahiptir,
- ✓ Çatlama oluşmaz,
- ✓ Bağlayıcılar ile tutturulan çoklu parçaların yerini alır.

Çevresel avantajları:

- ✓ Koruyucu gaza gerek yoktur,
- ✓ Yüzeyin temizlenmesine gerek yoktur,
- ✓ Taşlama atıkları oluşmaz,

- ✓ Yağ çözücülere gerek yoktur,
- ✓ Maske, tel ya da gaz gibi sarf malzemelerden tasarruf edilir,

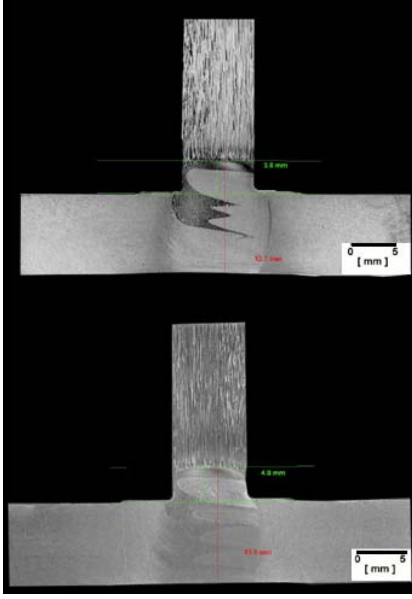
Enerji avantajları:

- ✓ Gelişmiş malzemelerin kullanımına olanak sağlar (farklı kalınlıkları birleştirme gibi) ve bu sayede ağırlığı azaltır,
- ✓ Bir lazer kaynağında kullanılan enerjinin sadece %2.5'ini tüketir,
- ✓ Hafif havaaracı, otomotiv ve gemi uygulamaları ile yakıt tüketimi sağlar.

FSW'nin dezavantajları ise:

- ✓ Malzemenin üst kısmından kök kısmına doğru homojen olmayan bir ısı dağılımı olduğundan 6 mm'den kalın malzemelerin birleştirilmesi zordur [34],
- ✓ İş parçasını tezgaha tutturmak için özel bir kelepçe sistemine ihtiyaç vardır [35,36],
- ✓ Karmaşık geometrilerin birleştirilmesi zordur [35],
- ✓ TWI'den lisans almak gerekir [35],

FSW yöntemi ile 6 mm'den kalın malzemelerin birleştirilmesindeki zorluğun temel sebebi; malzemenin üst kısmından kök kısmına doğru homojen olmayan bir ısı dağılımının oluşmasıdır. Bu zorluğun üstesinden EADS tarafından geliştirilmiş DeltaN isminde sabit bir omuza ve dönen bir pime (uca) sahip özel bir takım ile gelinmiştir. Bu takım sayesinde kaynaklı bölgeye iletilen ısı girişi önemli oranda azaltılmış ve kaynak yapılan kalınlık boyunca neredeyse tamamen simetrik bir ısı girişi sağlanmıştır. Ayrıca haddelenmiş tabakaninkine benzer pürüzsüzlükte bir kaynak dikişi oluşturulmuş ve bu sayede kaynak sonrası yüzey düzeltme işlemine gerek ortadan kalkmıştır. Ayrıca bu takım ile farklı malzemelerin birleştirilmesi de mümkündür. Hem alın kaynağında hem de T kaynakta 0.3-15 mm arasındaki kalınlığa sahip malzemeleri birleştirmek mümkündür. Şekil 5'de Al-Li ile 6xxx ve 6xxx ile 7xxx malzemelerin birleştirilmesine örnek verilmiştir [34].



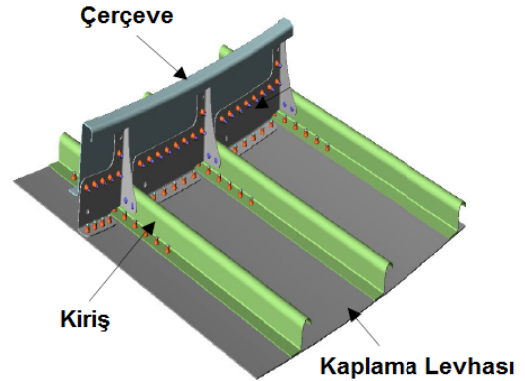
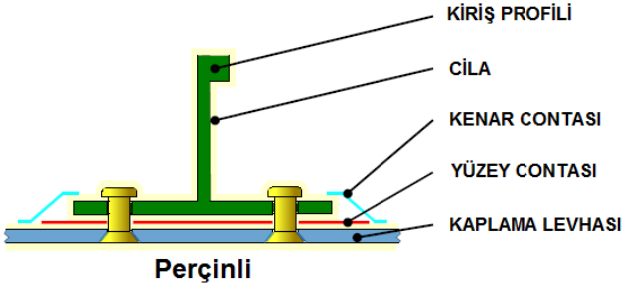
Şekil 5. Al-Li ile 6xxx ve 6xxx ile 7xxx malzemelerin FSW ile birleştirilmesi.

Oldukça yeni bir teknoloji olmasına rağmen FSW'in sağladığı avantajlar birçok uygulama alanı bulmasını sağlamıştır. Trenler, gemiler ve otomotiv endüstrisinin yanında uzay mekiklerinin yakıt tankları gibi emniyetin kritik olduğu yerlerde artık FSW kullanılmaktadır [37]. Ayrıca zırhlı bir araç olan Amerikan Gelişmiş Amfibi Saldırı Aracı'nda (US-AAAV) FSW'in iyi bir balistik özellik gösterdiği saptanmıştır [38].

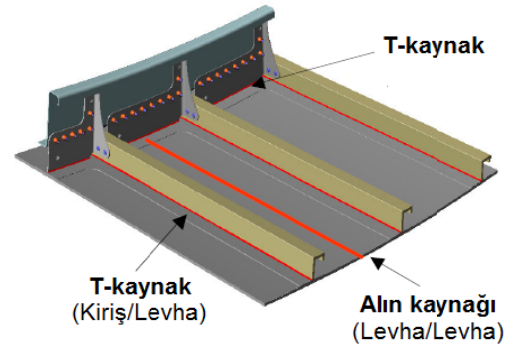
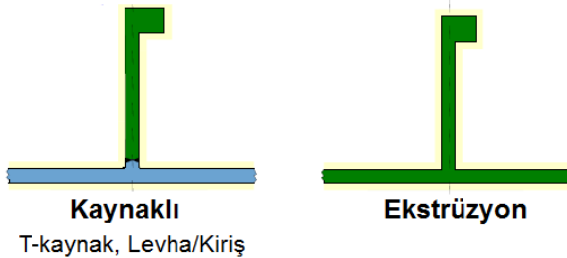
Bu çalışmada oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olan FSW'nin havacılık endüstrisindeki kullanım alanlarına örnek verilmiştir. 2xxx ve 7xxx serisi gibi yüksek mukavemetli Al alaşımları havacılık endüstrisinde gövde, kanat ve kuyruk gibi yapılarda geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yüksek mukavemetli Al alaşımları, kaynak işlemi esnasında ısıdan dolayı çatladıklarından, geleneksel kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri zordur. Şekil 6'da geleneksel diferansiyel uçak gövde yapısı ile yeni tümleşik gövde tasarımı görülmektedir [35].

4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ UYGULAMA ALANLARI

Diferansiyel Yapılar



Tümleşik Gövde Tasarımı



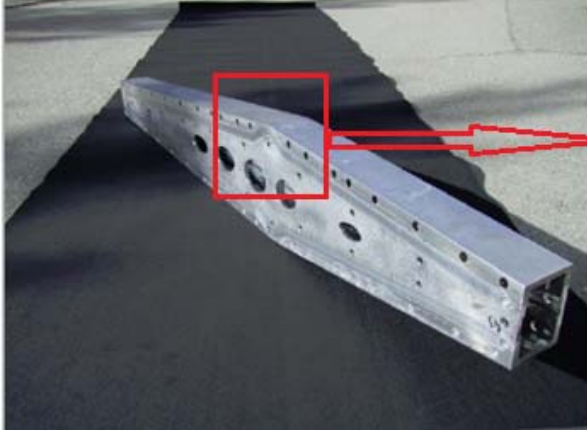
Şekil 6. Geleneksel diferansiyel uçak gövde yapısı ile yeni tümleşik gövde tasarımı.

Yapısal komponentlerin birleştirilmesinde FSW'in kullanıldığı ilk uçak Eclipse 500'dür. Riblerin ve stringerlerin kanat kaplamasına bağlantı noktalarında kullanılan FSW sayesinde, perçinle birleştirme %65

azalmıştır. Yani 30,000 üzerinde perçin kullanımı önlenmiştir. Bu sürekli kaynaklı birleştirme, tek sıra bir perçinin verebileceği statik mukavemetten 3 kat daha büyük bir mukavemet sağlamaktadır ve en az

perçinli birleştirme kadar iyi bir yorulma mukavemetine sahiptir. FSW yönteminin kullanılması uçağın ağırlığını en az 75 kg azaltmıştır. Ancak bu azalım, perçinlerin kullanılmamasından değil, FSW sayesinde sağlanan daha güçlü yapıdan kaynaklanmaktadır. FSW, 2xxx serisi Al alaşımlarından daha mukavemetli olan 7xxx serisi alaşımların kullanılmasını sağlamaktadır. Daha mukavemetli alaşım sayesinde daha ince ve daha hafif kesitler ve daha dar flanşlar kullanılmıştır. Buna ilaveten, FSW proses sürelerini düşürmüş ve maliyetleri azaltmıştır. İş zamanı geleneksel perçinle birleştirme yöntemine nazaran %40 azalmıştır. Elle yapılan perçin işleminin hızı 2 inç/dk'nın altındadır, otomatik perçinlemede bu değer 6 inç/dk'ya kadar çıkmaktadır. FSW'de ise bu değer 20 inç/dk'nın üzerindedir. Hızlı ve yüksek otomasyona sahip FSW sayesinde bir uçağın maliyeti 50.000-100.000 dolar arasında azalmaktadır, üretim hattında daha az yer işgal etmektedir ve temizliği daha kolaydır [4].

Benzer şekilde Airbus da bu teknolojinin ilk kullanıcılarından ve bu alanda önemli araştırmalar da yapmıştır. Örneğin A380 uçağında yatay kirişlerin panellere bağlantısında FSW kullanılmıştır [3,39]. Boeing ise Delta II uzay programında roket tanklarında ve C17 Globemaster uçaklarında yapısal



elemanların birleştirilmesinde FSW tekniğini kullanmıştır [2,39].

Şekil 7'de A-380 uçağının FSW uygulanmış bir flap profili (Al-Li) ve Şekil 8'de de flap track'i görülmektedir [34].



Şekil 7. A-380 uçağının FSW uygulanmış bir flap profili.



Şekil 8. A-380 uçağının FSW uygulanmış bir flap track'i.

Havacılık ve uzay sanayiinde kaynakla birleştirme yönteminin kullanılmasının temel sebebi ağırlığı azaltmaktır. Düşük ağırlık hareket eden her cisim için önemli olmakla birlikte, cismin hızı arttıkça tasarruf edilen ağırlığın değeri de artmaktadır. Örneğin bir hava aracında, gaz türbinli motorun bir diskindeki 1 birimlik ağırlık tasarrufu, gövdedeki aynı miktar ağırlık tasarrufundan 10 kat daha değerli olabilmektedir. Çünkü motordaki 1 birimlik tasarruf, kanat yapısında 5-10 birimlik tasarruf sağlayabilmektedir. Paleli disklerin yada "blisk"lerin imalatındaki temel motivasyon budur. Konvansiyonel bir türbin kademesinde paleler diske mekanik olarak bağlanmaktadır. Bu birleştirme yöntemi bir takım birleştirme elemanlarını gerektirdiğinden, dönen

parçanın toplam ağırlığını önemli ölçüde arttırmaktadır. Bir bliskte ise paleler ve disk tek bir parçadır, birleştirme parçalarına gerek duyulmaz. FSW ve difüzyon lehim, blisklerin imalatındaki anahtar teknolojilerdir [40]. Bliskler tümleşik şekilde döküm yoluyla imal edilebilir, katı blok halindeki bir malzemeden işlenerek imal edilebilir ya da palelerin tek tek rotor diskinde kaynakla birleştirilmesi yoluyla imal edilebilirler. Şekil 9'da bir blisk görülmektedir.



Şekil 9. Blisk örneği [40].

Özetle FSW askeri ve sivil uçaklarda kaplama levhalarının sparlara, rib'lere ve kirişlere kaynakla birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Uzay araçlarının Al alaşımı yakıt tanklarının uzunlamasına alın kaynağında başarı ile kullanılmıştır. Sürtünme Karıştırma Kaynağı; hava araçlarının kanat, gövde ve kuyruk gibi yapılarında, uzay araçlarının kriyojenik yakıt tanklarında, hava araçlarının yakıt tanklarında, askeri uçakların harici yakıt tanklarında, askeri ve bilimsel roketlerde, hasarlı MIG kaynaklarının tamirinde kullanım alanı bulmaktadır [37].

5. SONUÇLAR

Havacılık endüstrisinde oldukça yaygın bir şekilde kullanılan 2xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımları ile yüksek mukavemetli, yorulma ve korozyona karşı dayanıklı kaynaklı birleştirmelerin üretimindeki güçlükler, hava aracı yapılarında kaynakla birleştirme yöntemini uzun bir süre engellemiştir. Bu alüminyum alaşımları, ergime bölgesinde sergiledikleri kötü katılma mikroyapısı ve poroziteden dolayı genelde “kaynak yapılamaz” olarak sınıflandırılmışlardır. Ayrıca kaynak yapılmamış ana malzemeye nazaran mekanik özelliklerindeki düşüş de yüksektir. Bu etkenler bu alaşımların birleştirilmesinde geleneksel kaynak yöntemlerinin kullanımını önlemiştir [2].

Yukarıda bahsedilen bu olumsuz durum bir katı faz kaynağı olan Sürtünme Karıştırma Kaynağının (FSW) geliştirilmesi ile ortadan kaldırılmıştır. Havacılık endüstrisinde kullanılan Gaz Tungsten Ark Kaynağı (GTAW ya da TIG), MIG kaynağı ve Elektron Işın Kaynağı (EBW) ile karşılaştırıldığında FSW daha iyi mekanik özellikler (çekme mukavemeti, yorulma mukavemeti, çatlak ilerleme hızı, kalıntı gerilme v.b.) sağlamaktadır [2,6].

Bununla birlikte kaynak kalitesi, omuz ve uç şekli ve boyutları gibi takımın geometrik özellikleri ile takım dönüş hızı ve besleme hızı (kaynak ilerleme hızı) gibi proses parametrelerine bağlıdır [1]. Bu parametrelerin birleştirilecek malzemelerin metalürjik ve mekanik

özelliklerine, birleştirme konfigürasyonuna ve birleştirmenin uygulama alanına göre hassas bir şekilde optimize edilmesi gerekir.

Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile alüminyum alaşımlarının yanı sıra Mg, Ni ve Ti alaşımları, birbirinden farklı iki metalik malzeme (örneğin 2xxx serisi ile 7xxx serisi alüminyum alaşımı), metal matrisli kompozitler ve polimer kompozitler de birleştirilebilir [5,28,29,32,33].

FSW yöntemi geleneksel kaynak yöntemlerine göre daha az enerji tüketir. Koruyucu bir gaz kullanılmadığından çevreye zarar vermez. Herhangi bir dolgu malzemesi kullanılmadığından herhangi bir Al alaşımı kompozisyon uyum sorunu yaşanmaksızın birleştirilebilir. Katı faz işlemi olduğundan birleşme bölgesinde mükemmel metalürjik özelliklere (küçük taneli yapı gibi) sahiptir. İş parçasına olan ısı girişi düşük olduğundan burulma çok düşüktür, çatlak oluşmaz. Alın kaynağı, bindirme kaynak, T kaynağı gibi değişik birleştirme konfigürasyonları kullanılabilir [2].

Oldukça yeni bir teknoloji olmasına rağmen FSW'in sağladığı avantajlar birçok uygulama alanı bulmasını sağlamıştır. Trenler, gemiler ve otomotiv endüstrisinin yanında uzay mekiklerinin yakıt tankları gibi emniyetin kritik olduğu yerlerde artık FSW kullanılmaktadır. FSW askeri ve sivil uçaklarda (örneğin Eclipse 500, A380) kaplama levhalarının sparlara, rib'lere ve kirişlere kaynakla birleştirilmesinde kullanılmaktadır. Uzay araçlarının Al alaşımı yakıt tanklarının uzunlamasına alın kaynağında başarı ile kullanılmıştır. Sürtünme Karıştırma Kaynağı; hava araçlarının kanat, gövde ve kuyruk gibi yapılarında, uzay araçlarının kriyojenik yakıt tanklarında, hava araçlarının yakıt tanklarında, askeri uçakların harici yakıt tanklarında, askeri ve bilimsel roketlerde, hasarlı MIG kaynaklarının tamirinde kullanım alanı bulmaktadır [37].

FSW'nin en büyük avantajlarından birisi, verilmiş bir kaynak parametreleri seti ile büyük miktarlarda kusursuz kaynaklar üretebilmesidir. Kaynak parametrelerinin tolerans aralığından dışarı çıkması veya birleştirilecek parçaların yüzeylerinin yeterli bir şekilde hazırlanmaması sonucu kaynak kusurları oluşabilir. Tünel, boşluk, porozite, penetrasyon eksikliği, yüzey kanalı, kök çatlakları gibi oluşabilecek kaynak kusurları, geleneksel füzyon kaynağındakilerden çok farklıdır. Bu nedenle kaynak parametrelerinin optimizasyonunu konfirme etmek ve kusursuz kaynak üretimi kalitesini temin etmek için oluşabilecek kusurları saptayabilecek uygun tahribatsız test tekniklerinin bulunması gerekmektedir [41,42]. Ayrıca yeni nesil uçaklarda kullanılan ve FSW ile birleştirilemeyen fiber katmanlar (GLARE), karbon fiber takviyeli plastikler (CFRP) gibi malzemelerin kullanımının artması ihtimali, sürtünme

karıştırma kaynağının cazibesini olumsuz etkileyebilecektir.

6. KAYNAKLAR

[1] Buffa, G., Campanile, G., Fratini, L. ve Prisco, A., "Friction Stir Welding of Lap Joints: Influence of Process Parameters on The Metallurgical and Mechanical Properties", *Materials Science and Engineering A* Vol. 519, 19-26, 2009.

[2] Mishra, R.S. ve Ma, Z.U., "Friction Stir Welding and Processing", *Materials Science and Engineering R* Vol. 50, 1-78, 2005.

[3] www.fswelding.com

[4] Mendez, P.F. ve Eagar, T.W., "New Trends in The Welding in The Aeronautic", *2nd Conference of New Manufacturing Trends*, Biboa, Spain, November 19-22, 2002.

[5] Dalkılıç, S. ve Biallas, G., "FSW Joints of an Aluminium Base Metal Matrix Composite and Monolithic Aluminium Alloy", *6th International Symposium on Friction Stir Welding*, Saint-Sauveur, Canada, October 10-13, 2006.

[6] Singh, R., "Applied Welding Engineering: Processes, Codes and Standards", Elsevier Inc., 2012.

[7] Andreza, S.F., Fernano, F.F. ve Dilermando, N.T., "Microstructural Aspects and mechanical Properties of Friction Stir Welded AA2024-T3 Aluminium alloy Sheet", *Materials and Design*, Vol. 32, 1684-4688, 2011.

[8] Lombard, H., Hattingh, D.G., Steuwer, A. ve James, M.N., "Optimizing FSW Process Parameters to Minimise Defects and Maximise Fatigue Life in 5083-H321 Aluminium Alloy", *engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, 341-354, 2008.

[9] Malarvizhi, S. ve Balasubramanian, "Effect of Welding Processes on AA2219 Aluminium Alloy Joint Properties", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, 962-973, 2011.

[10] Malarvizhi, S. ve Balasubramanian "Fatigue Crack Growth Resistance of Gas Tungsten Arc, Electron Beam and Friction Stir Welded Joints of AA2219 Aluminium Alloy", *Materials & Design*, Vol. 32, 1205-1214, 2011.

[11] Moreira, P.M.G.P., De Figueiredo, M.A.V. ve De Castro, P.M.S.T., "Fatigue Behaviour of FSW and MIG Weldments for Two Aluminium Alloys", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 48, 169-177, 2007.

[12] Maggolino, S. ve Schmid, C., "Corrosion Resistance in FSW and in MIG Welding Techniques of AA6XXX", *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 197, 137-240, 2008.

[13] Jiang, J.Z., Wen, H.J. ve Chen, L.J., "Comparative Investigation of Tungsten Inert Gas and Friction Stir Welding Characteristics of Al-Mg-Sc Alloy Plates", *Materials & Design*, Vol. 31, 306-311, 2010.

[14] Rajakumar, S., Muralidharan, C. ve Balasubramanian, V., "Influence of Friction Stir Welding Process and Tool Parameters on Strength Properties of AA7075-T6 Alloy Joints", *Materials & Design*, Vol. 32, 535-549, 2011.

[15] Ahn, B.V., Choi, D.H., Kim, D.J. ve Jung, S.B., "Microstructures and Properties of Friction Stir Welded 409L Stainless Steel Using a Si₃N₄ Tool", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 532, 476-479, 2012.

[16] Hattingh, D.G., Blidnault, C., van Niekerk, T.I. ve James, M.N., "Characterisation of The Influences of FSW Tool Geometry on Welding Forces and Weld Tensile Strength Using an Instrumented Tool", *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 203, 46-57, 2008.

[17] Yang, Q., Li, X., Chen, K. ve Shi, Y.J., "Effect of Tool Geometry and Process Condition on Static Strength of a Magnesium Friction Stir Lap Linear Weld", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, 2463-2478, 2011.

[18] Padmanaban, G. ve Balasubramanian, V., "Selection of FSW Tool Pin Profile, Shoulder Diameter and Material for Joining AZ31B Magnesium Alloy-An Experimental Approach", *Materials & Design*, Vol. 30, 2647-2656, 2009.

[19] Xie, G.M., Ma, Z.Y., Luo, Z.A., Xue, P. ve Wang, G.D., "Effect of Rotation Rate on Microstructures and Mechanical Properties of FSW Mg-Zn-Y-Zr Alloy Joints", *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 27, 1157-1164, 2011.

[20] Rajakumar, S., Muralidharan, C. ve Balasubramanian, V., "Predicting Tensile Strength, Hardness and Corrosion Rate of Friction Stir welded AA6061-T6 Aluminium Alloy Joints", *Materials & Design*, Vol. 32, 2878-2890, 2011.

[21] Simar, A. ve diğerleri, "Integrated Modeling of Friction Stir Welding of 6XXX Series Al Alloys: Process, Microstructure and Properties", *Progress in Materials Science*, Vol. 57, 95-183, 2012.

[22] Ulysse, P., "Three-Dimensional Modelling of Friction Stir Welding Process", *Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, 1549-1557, 2002.

[23] Wang, K.S. ve diğerleri, "Evaluation of Microstructure and Mechanical Property of FSW Welded MB3 Magnesium Alloy", *Journal of Iron and Steel Research International*, Vol. 13, 75-78, 2006.

[24] Zhao, Y., Sato, Y.S., Kokawa, H. ve Wu, A., "Microstructure and Properties of Friction Stir Welded

High Strength Fe-36 wt%Ni Alloy”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, 7768-7773, 2011.

[25] Fratini, L., Micari, F., Buffa, G. ve Ruisi, V.F., “A New Fixture for FSW Processes of Titanium Alloys”, *CIRP Annls-Manufacturing Technology*, Vol. 59, 271-274, 2010.

[26] Liu, P., ve diğerleri, “Microstructure and XRD Analysis of FSW Joints for Copper T2/Aluminum 5A06 Dissimilar Materials”, *Materials Letters*, Vol. 62, 4106-4108, 2008.

[27] Esmaili, A., ve diğerleri, “A Metallurgical and Mechanical Study on dissimilar Friction Stir Welding of Aluminum 1050 to Brass (CuZn30)”, *Materials Science and Engineering A*, Vol.528, 7093-7102, 2011.

[28] Cavaliere, P. ve Panella, F., “Effect of Tool Position on the Fatigue Properties of Dissimilar 2024-7075 Sheets Joined by Friction Stir Welding ”, *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 206, 249-255, 2008.

[29] Da Silva, A.A.M. ve diğerleri, “Material Flow and Mechanical Behaviour of Dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 Aluminium Alloys Friction Stir Welds”, *Materials & Design*, Vol. 32, 2021-2027, 2011.

[30] Aonuma, M. ve Nakata, K., “Dissimilar Metal Joining of ZK60 Magnesium Alloy and Titanium by Friction Stir Welding”, *Materials Science and Engineering B*, Vol. xxx, 2012.

[31] Dressler, U., Biallas, G. ve Mecado, U.A., “Friction Stir Welding of Titanium Alloy TiAl6V4 to Aluminium Alloy AA2024-T3”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 526, 113-117, 2009.

[32] Minak, G., Ceschini, L., Boromei, I. ve Ponte, M., “Fatigue Properties of Friction Stir Welded Particulate Reinforced Aluminium Matrix Composites”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 32, 218-226, 2010.

[33] Amancio-Filho, S.T. ve diğerleri, “On The Feasibility of Friction Spot Joining in Magnesium/Fiber Reinforced Polymer Composite Hybrid Structures”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, 3841-3848, 2011.

[34] Höflich, W., EADS Technology Licensing Initiative Webinar”, Sept. 30, 2010. www.technologylicensing.eads.net

[35] Tempus, G., “New Aluminium Alloys and Fuselage Structures in Aircraft Design”, *Werkstoffe Für Transport und Verkehr*, May 18, 2001, Zurich, Switzerland.

[36] Richter-Trummer, V. ve diğerleri, “Influence of the FSW Clamping Force on the Final Distortion and Residual Stress Field”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. xxx, 2012.

[37] www.twi.co.uk

[38] Sullivan, A. ve diğerleri, “Microstructure Simulation and Ballistic Behaviour of Weld Zones in Friction Stir Welds in High Strength Aluminium 7xxx Plate”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, 3409-3422, 2011.

[39] Gross, D. ve diğerleri, “Method for Joining Aircraft Fuselage elements by Friction Stir Welding”, United States Patent Publication No. Us 2009/0294018 A1, 2009.

[40] www.wikipedia.org

[41] Li, B., Shen, Y. ve Hu, W., “The Study on Defects in Aluminium 2219-T6 Thick Butt Friction Stir Welds with the Application of Multiple Non-destructive Testing Methods”, *Materials & Design*, Vol. 32, 2073-2084, 2011.

[42] Vugrin, T., Staniek, G., Hillger, W. Ve Dalle Donne, C., “Non Destructive Detection of Flaws and Their Metallographic Characterization”, *5th International FSW Symposium*, Metz, France, September 14-16, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

Yard. Doç. Dr. Serdar DALKILIÇ

1973 yılında İzmir’de doğmuştur. 1998 yılında Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu’nda lisans eğitimini, 2001 yılında Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık A.B.D.’nda yüksek lisans ve 2007 yılında da doktora eğitimini tamamlamıştır. Alman Akademik Değişim Merkezi (DAAD) tarafından verilen bir doktora araştırma bursu ile Alman Havacılık ve Uzay Merkezi’nde “Damage Evaluation in Thermal Barrier Coating Systems Under Service Conditions“ konulu bir araştırma projesinde ve Alman Bilimsel Araştırma Kurumu (DFG) tarafından desteklenen “Friction Stir Welding of Metal Matrix Composites“ konulu bir araştırma projesinde çalışmıştır. Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu’nda Araştırma Görevlisi, Havaaracı Bakım Merkezinde Kalite Denetçisi ve Bakım Yöneticisi görevlerini yürütmüştür. Halen aynı kurumda Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü öğretim üyesi ve Yüksekokul Müdür Yardımcısı olarak görev yapmaktadır.