

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK HATALARI

Ahmet İrfan YÜKLER¹, Mustafa Kemal BİLİCİ², Onur FİDANER³

¹iyukler@marmara.edu.tr Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi, İstanbul

²mkbilici@marmara.edu.tr Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi, İstanbul

³onurf@marmara.edu.tr Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi, İstanbul

ÖZET

Alüminyum alaşımlarının ergitmeli kaynak uygulamalarında kaynak hatalarından kurtulmak için geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağının kendine özgü hataları mevcuttur. Boşluk, oksit kalıntıları, yetersiz nüfuziyet ve metal taşması olarak sınıflandırılan bu hatalar kaynak parametrelerine ve takım geometrisine bağlı olarak oluşmaktadır. Hazırlanan bu makalede alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynak hataları, bulunma yerleri ve bunların oluşma sebepleri açıklanmıştır.

Anahtar Sözcükler: Sürtünme karıştırma kaynak parametreleri, Sürtünme karıştırma kaynak takımı, Sürtünme karıştırma kaynak hataları

ABSTRACT

The solid-state nature of friction stir welding of aluminium alloys leads to several advantages over fusion welding methods. The general weld defects of fusion welding methods such as porosity, solidification cracking and liquation cracking do not occur in friction stir welding. However this process has its own characteristic flaws which impair the structural integrity of the weld. Examples of these types of weld defects include voids, oxide inclusions, root flaws and flash formation. A number of different process variables affect the quality of a joint produced by friction stir welding; tool rotation speed, tool travel speed, tool tilt angle, tool axial load, shoulder diameter, pin profile, pin diameter and welding gap. The geometry, location and microstructural nature of aluminium friction stir welding defects lead to difficulties in identification when using the common non destructive testing methods. These weld defects deteriorate the mechanical properties of the friction stir welded joints.

Key words: Friction stir welding parameters, friction stir welding tool design, friction stir welding defects.

1. GİRİŞ

Alüminyum alaşımlarının ergitmeli kaynak birleştirmelerinde yüksek kalıntı gerilme, çarpılma, gözenek ve sıcak çatlama gibi problemler oluşmaktadır [1]. Bu hataların sebebi alüminyum alaşımlarının ısı genleşme katsayısının ve katılma sıcaklık aralığının yüksek olması ile yüksek ısı girdisi ile kaynak yapılmasıdır. Alüminyum alaşımlarının ergitmeli kaynak problemlerinden kurtulmak için sürtünme karıştırma kaynak (SKK) yöntemi geliştirilmiştir [2]. Bu kaynak yönteminde belli bir hızda dönen ve üzerine dış açılmış uç ile bunun üzerinde belli çapta omuz genişliği olan bir kaynak takımı kullanılmaktadır [3]. Belli bir hızda dönen kaynak takımına belirli bir basınç

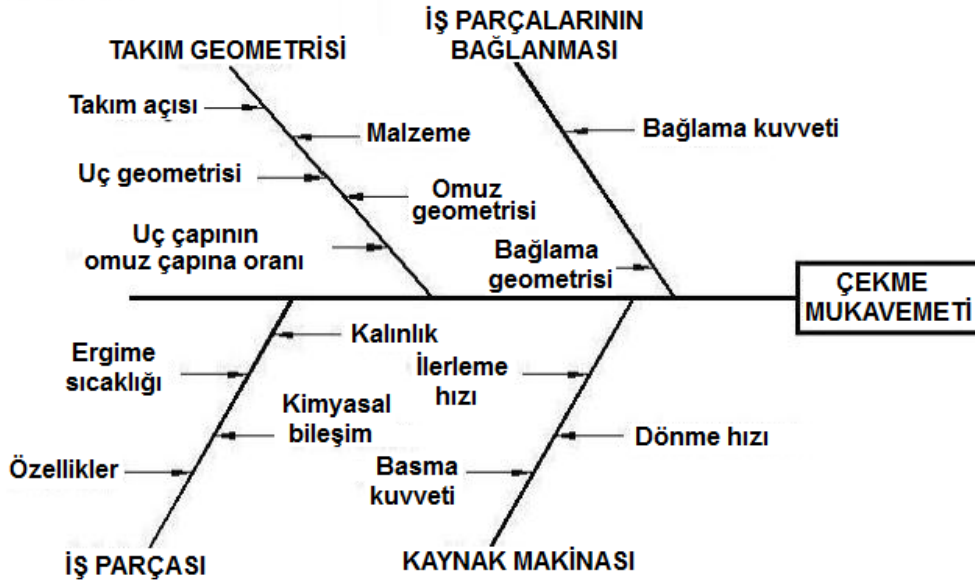
uygulanarak birleştirilecek iş parçaları içerisine daldırılır. Kaynak takımı genellikle yatay oluk kaynak pozisyonunda ilerleyerek alüminyum iş parçalarının alın, bindirme veya köşe birleştirilmeleri gerçekleştirilmektedir. Kaynak takımı birleştirilecek iş parçaları içerisinde ilerlerken takım geometrisine (omuz çapı, omuz açısı, uç çapı, uç profili, uç eğimi, vida diş geometrisi) ve kaynak parametrelerine (takım dalma derinliği, takım açısı, takım dönme hızı, takım ilerleme hızı, takım basma kuvveti) bağlı olarak takım omuzu ve takım ucu çevresindeki iş parça malzemesi dönmektedir. Bu dönen malzeme sürtünme dolayısıyla ısınmaktadır [4]. Isınan malzeme dönen takımın hareketi ile karışmaktadır. Kaynak takımının uyguladığı basma kuvveti ile bu ısınan malzemenin katı halde difüzyonu gerçekleşmektedir. Elde edilen kaynak dikişinin tipik görüntüsü Şekil 1’de görülmektedir [2]. C ve D bölgelerinde ısınan malzeme plastik şekil değişimine uğramıştır. Plastik şekil değiştiren sıcak malzemede katı hal difüzyonun gerçekleşmesi ile D harfi ile gösterilen kaynak dikişi oluşmuştur. SKK birleştirmesinde elde edilen kaynak dikişi, ergitmeli kaynak dikişlerinin tipik problemlerini içermemektedir [5]. Bu nedenle SKK yöntemi otomotiv, uzay ve havacılık, gemi inşa ve raylı taşıt endüstrisinde her gün artan uygulama alanı bulmuştur.



Şekil 1. Sürtünme karıştırma kaynak bölgeleri: (A) Ana malzeme, (B) Isı tesirinden etkilenen bölge, (C) Termomekanik olarak etkilenen bölge ve (D) Kaynak dikişi [2].

Alüminyum alaşımlarının SKK birleştirmelerinde kaynak takım geometrisi veya kaynak parametrelerinin uygun seçilmemesi kaynak süreksizlikleri oluşmaktadır [6,7]. Oluşan kaynak süreksizlikleri SKK yöntemine özgü süreksizliklerdir. Bunlar Şekil 1’de gösterilen kaynak dikiş ve termomekanik olarak etkilenen bölgelerde oluşmaktadır. Bu süreksizlikler kaynaklı birleştirmelerin statik [8,9] ve dinamik [10,11] mukavemetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır.

SKK birleştirmelerinde kaynak dayanımını ve kaynak kalitesini etkileyen bütün parametreler Şekil 2’de gösterilmiştir [8]. Bu parametreler kaynak dikişi oluşumunda ve kaynak hata teşekkülünde etkili olarak kaynaklı birleştirmenin çekme mukavemetini tayin etmektedir. Şekil 2’den anlaşılacağı gibi kaynak edilen her metalin kimyasal bileşimi ve özellikleri farklı olduğundan her metal için optimum takım geometrisi ve kaynak parametresi tespit edilmelidir. Hazırlanan makalede alüminyum alaşımlarının SKK yöntemi ile birleştirmesinde oluşan kaynak hata türleri ve bunlara sebep olan faktörler kısaca tanımlanmıştır.



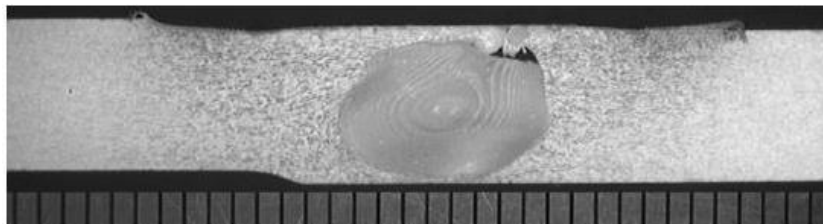
Şekil 2. Sürtünme karıştırma kaynak birleştirme çekme mukavemetine etki eden faktörler [8].

2. SKK YÖNTEMİNDE KAYNAK HATALARI

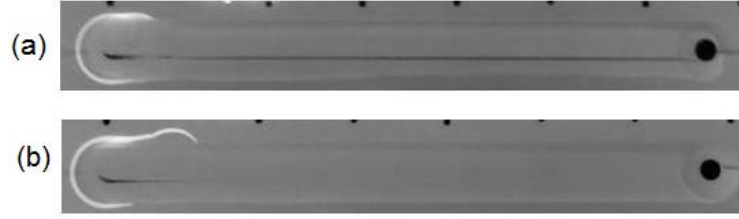
SKK yöntemi sadece 20 yıllık geçmişi olduğundan bu kaynak yönteminin kaynak hataları araştırmacılar tarafından çok farklı isimlerle adlandırılmıştır. Bu kaynak hatalarının standart terimler ile tanımlanması için ilk öneri 2007 yılında yapılmıştır [12]. Bu öneride SKK birleştirmesinin amaçlanan özelliklerinden sapmasına sebep olan ve tahribatsız muayene yöntemleri ile saptanabilen kaynak süreksizliklerine kaynak hataları adı verilmiştir. Kaynak hataları 4 ana gruba ayrılmıştır: (1) boşluklar, (2) yetersiz nüfuziyet, (3) oksit kalıntıları ve (4) aşırı taşma. Bu kaynak hataları aşağıda şekil yardımı ile tanımlanmıştır.

2.1. Boşluklar

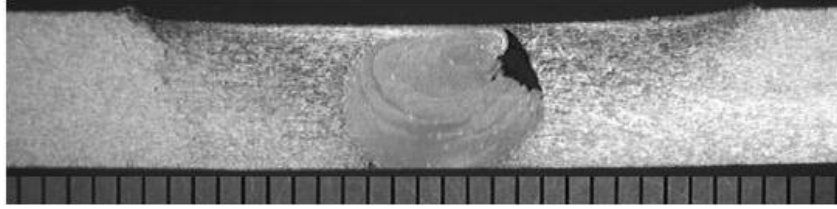
SKK uygulanırken iş malzemesi içerisinde ilerleyen takımın bıraktığı boşluk ısınmış malzeme tarafından tam olarak doldurulamaması halinde boşluk hataları oluşmaktadır. Boşluklar kaynak çekirdeği içerisinde meydana gelmektedir. Bu boşlukların konumu kaynak şartlarına bağlı olmaktadır. Şekil 3'de iş parçası yüzeyine çıkmayan bir boşluk hatası görülmektedir [13]. Boşluk hataları dikiş uzunluğu boyunca sürekli olarak yer alabildiği gibi dikiş içerisinde kesik kesik olarak da bulunabilmektedir (Bak Şekil 4). Bu hatalar literatürde boşluk (voids), tünel (tunnel), solucan boşluğu (wormhole) olarak adlandırılmıştır. Eğer bir boşluk hatası kaynak yüzeyine çıkarak (Şekil 5) çıplak gözle görülebilir (Şekil 6) hale gelirse bu boşluk hatasına oluk (groove) adı da verilmektedir. Bazı küçük boşluklar kaynak şartlarına bağlı olarak kaynak yüzeyinin hemen altında da teşekkül edebilmektedir (Şekil 7).



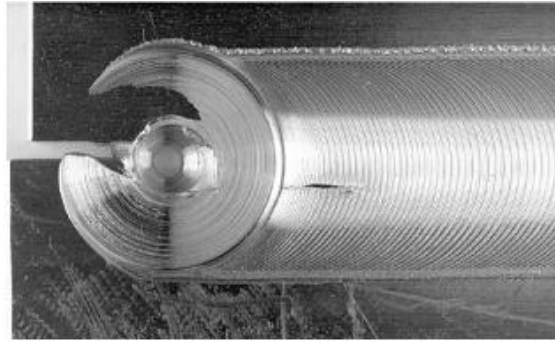
Şekil 3. Yüzeye çıkmayan bir boşluk hatası [13].



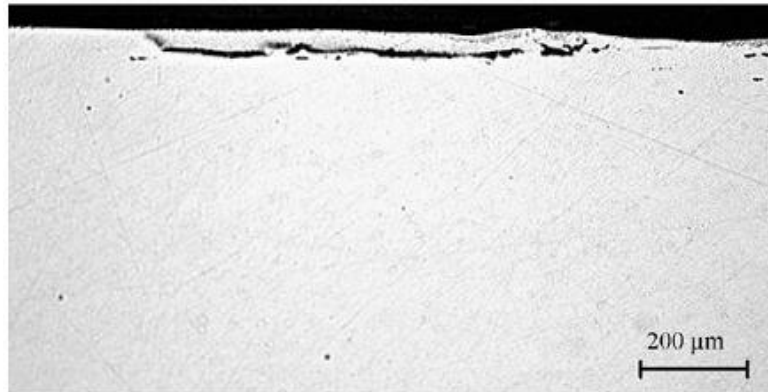
Şekil 4. (a) Sürekli, (b) Kısa boşluk hatası içeren SKK dikişinin radyografik görüntüsü [14].



Şekil 5. Yüzeğe çıkan boşluk hatası [13].



Şekil 6. Yüzeğe çıkan boşluk hatasının (oluk) üstten görüntüsü [13].

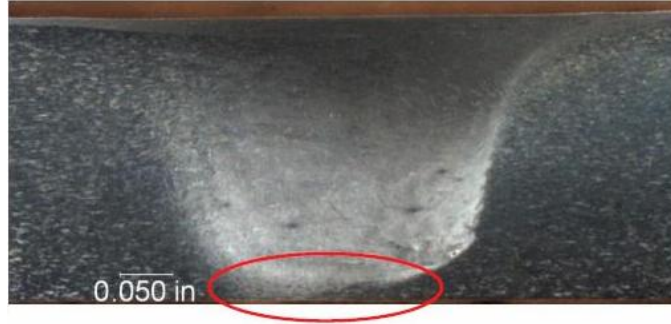


Şekil 7. Yüzeyin hemen altında oluşan boşluk hatası [13].

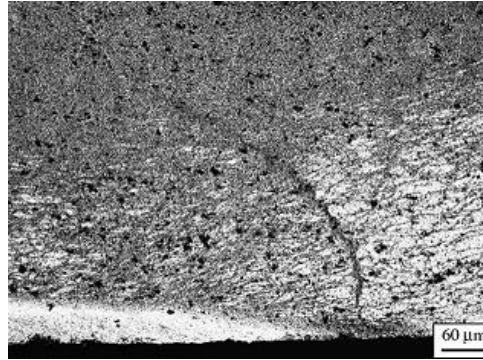
2.2. Yetersiz nüfuziyet

Yetersiz nüfuziyet hatası kaynak çekirdeğinin kök kısmında oluşmaktadır (Şekil 8) [15]. Çekirdeğin kök tarafında sıcak malzemenin yeteri kadar karıştırılmaması durumunda bu hata oluşmaktadır. Yetersiz karıştırma sonucunda sıcak malzemede difüzyon gerçekleşmediğinden hata oluşmaktadır.

Bu hata çok ince olduğu için (Şekil 9) tahribatsız muayene yöntemleri ile tespiti çok zor olmaktadır [16]. Bu kaynak hatalarına öpüşen bağ (kissing bond) adı da verilmektedir. Bu kaynak hataları birleştirmelerin yorulma dayanımını önemli ölçüde azaltmaktadır [11].



Şekil 8. Bir SKK birleştirmesinin makro görüntüsünde yetersiz nüfuziyet hatasının oluşabileceği yer kırmızı daire ile belirtilmiştir [15].



Şekil 9. Bir kaynak dikişinin altında oluşan yetersiz nüfuziyet (öpüşen bağ) hatası [16].

2.3. Oksit kalıntıları

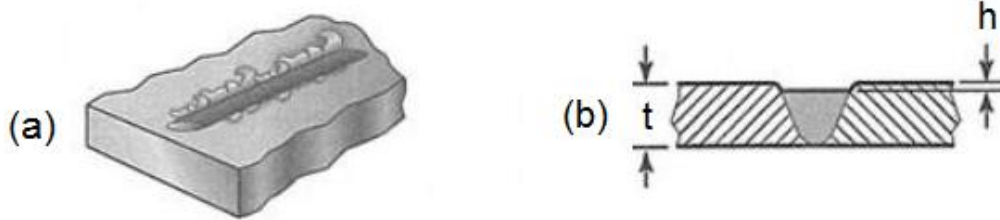
Alüminyum iş parçalarının yüzeyinde teşekkül eden oksit tabakası kaynak öncesi giderilmezse bu oksitler kaynak içerisinde yer almaktadırlar. Bu oksit tabakası kaynak sırasında kırılmakta, ekstrüze olmakta ve şekil değiştirmektedir [17]. Bu oksitler kaynak dikişi ve termomekanik olarak etkilenen bölge içerisinde değişik çizgisel form halinde bulunmaktadır [18]. Tipik oksit kalıntılarının metalografik görüntüsü Şekil 10'da görülmektedir [17]. Bu kaynak hatalarına oksit kalıntıları (oxide alignments), tembel S (lazy S) ve geometrik biçimine göre zigzag eğri hatası (zigzag curve defect) adı da verilmektedir.



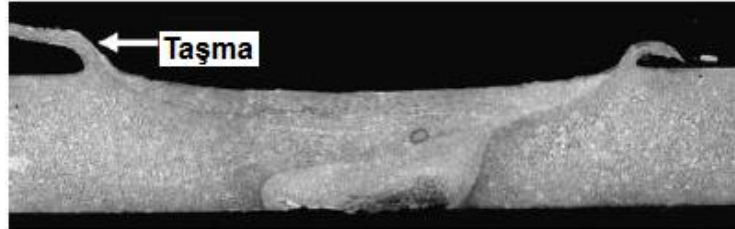
Şekil 10. Bir alüminyum SKK birleştirme kaynak dikişi mikroyapısında oluşan oksit hatalar (Tembel S) beyaz eğrilerle tanımlanan alan içerisinde görülmektedir [17].

2.4. Taşan metal

İş parçalarına SKK uygulanırken kaynak takımı iş paçalarına fazla daldırılırsa veya takımın uyguladığı basma kuvveti çok yüksek ise kaynak metali takım omzunun dışına çıkarak kaynak taşması meydana getirmektedir. Metalin taşması ile kaynak bölgesinin kalınlığında azalma görülür [19]. Bu olaylar Şekil 11'de şematik olarak gösterilmiştir. Aşırı metal taşmasının görüntüsü ise Şekil 12'de görülmektedir [20].



Şekil 11. Tipik (a) metal taşma ve (b) kaynak kalınlık incelleme hataları [19]. t: iş parçası kalınlığı, h: kaynak dikişinin çökme derinliği.



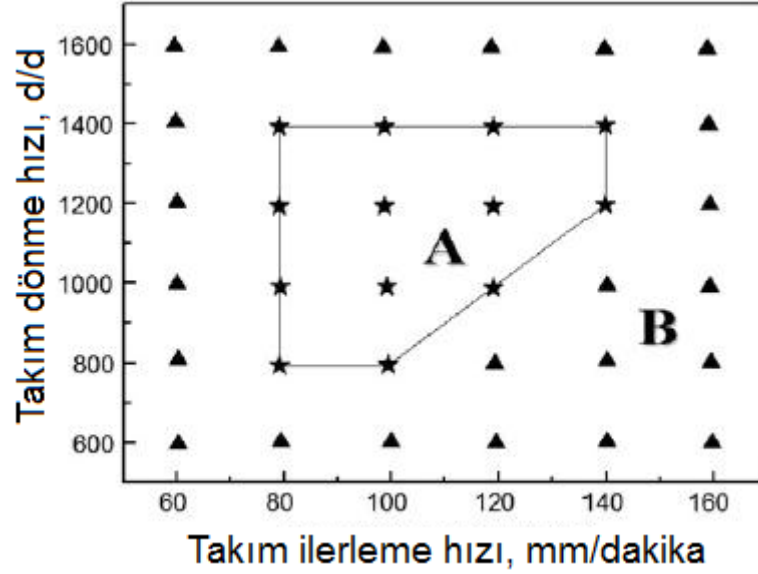
Şekil 12. Aşırı kaynak ısı ile yapılan SKK birleştirmesinde aşırı metal taşması [20].

3. KAYNAK PARAMETRELERİNİN HATA OLUŞUMUNA TESİRİ

Alüminyum alaşımların SKK birleştirmelerinde kaynak kalitesine tesir eden kaynak parametrelerinin etkileri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

3.1 Takım dönme hızı ve ilerleme hızının etkileri

SKK uygulamalarında takım dönme hızı ve ilerleme hızı kaynak bölgesinde ısı oluşumunda ve iş parçalarının ısınması üzerinde çok büyük etkisi olduğundan [2] kaynak kalitesini önemli oranda etkilemektedir [8]. Bu iki parametrenin kaynak kalitesi üzerindeki etkisini ortaya koyan SKK kaynak parametre diyagramları çizilmiştir. AA6063 alüminyum alaşımlarının alın kaynak birleştirmelerinde takım dönme hızı ve ilerleme hızının müştereken kaynak kalitesi üzerindeki etkisi Şekil 13'de görülmektedir [21]. Kaynak parametreleri Şekil 13'de gösterilen taralı alan içerisinde kalacak şekilde seçilmesi halinde hatasız SKK birleştirmeleri elde edilmektedir. Taralı alanın dışında kalan kaynak parametreleri ile kaynak yapılması ise kaynak bölgesinde ısı oluşumunu, malzemenin ısınmasını ve ısınan malzemenin karıştırma hareketini menfi etkileyerek [22] kaynak hatalarını oluşturmaktadır.






Şekil 13. AA6063 alüminyum levhaların optimum kaynak takımı ile SKK alın birleştirmesinde kaynak parametre diyagramı [21]. A: Kaynak hatasız bölge ve B: Hatalı kaynak bölgesi

Düşük takım dönme hızı [23] ve yüksek takım ilerleme hızı [24] ile kaynak yapılması halinde iş parçalarında düşük sürtünme ısısı oluşmakta ve kaynakta boşluk hatası meydana gelmektedir. Bu kaynak koşullarında iş parçaları az ısındığından, kaynak takımının ilerlerken arkasında bıraktığı boşluğa malzeme hareketi yetersiz kaldığından boşluklar oluşmaktadır. Eğer takım dönme hızı yüksek ve ilerleme hızı yavaş ise kaynak bölgesinde aşırı ısı oluşmaktadır. Kaynak bölgesinde ısınan metalin sıcaklığı aşırı olmakta ve bu metalin akışkanlığı artmaktadır. Aşırı sıcak metal türbülanslı karıştırma hareketi oluşturduğundan boşluk oluşumu meydana gelebilmektedir [25]. Bu koşullarda aşırı metal taşması da meydana gelmektedir. Optimal takım dönme ve ilerleme hızı ile kaynak yapılması halinde ısınan metalde laminer akış olmakta ve ısınan metal takımın bıraktığı boşluğu hatasız doldurabildiğinden kaynak hatası meydana gelmemektedir.

3.2 Parçalar arası açıklık

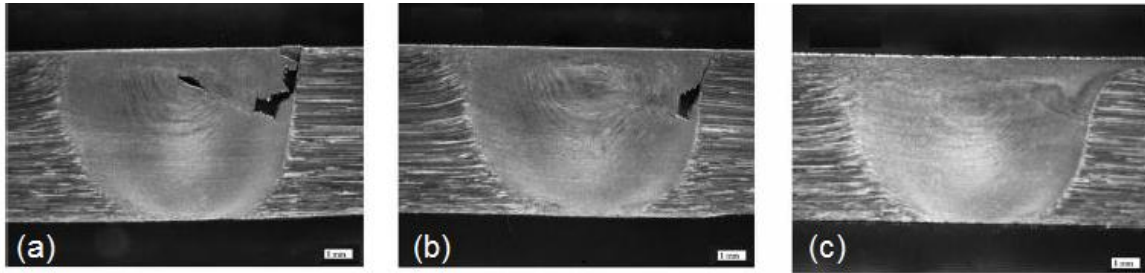
Alüminyum alaşımlarının SKK alın birleştirmelerinde iş parçaları arası açıklığın kaynak dikisi üzerindeki etkisi Şekil 14'de görülmektedir [26]. Şekil 14'deki deneyler 5 mm kalınlıklı A1050 saçlarda 1500 d/d takım dönme hızı ve 400 mm/dakika ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. 1 mm açıklık halinde kaynak hatası oluşmamıştır. Bu koşullarda kaynak yapılırken iş parçası yeteri kadar ısınmış ve sıcak malzeme takım boşluğunu tamamen doldurarak hatasız dikiş elde edilmiştir. İş parçaları arasındaki mesafe arttıkça takım omuzu ile iş parçasının teması azalmaktadır. Temas alanı azaldıkça omuzun ürettiği kaynak ısısı azalmaktadır. Bu koşullarda düşük sıcaklıklı malzeme elde edildiğinden malzeme akışı yetersiz kalmakta ve boşluk hatası oluşmaktadır.

Açıklık	Makroyapı
1mm	
2mm	
3mm	

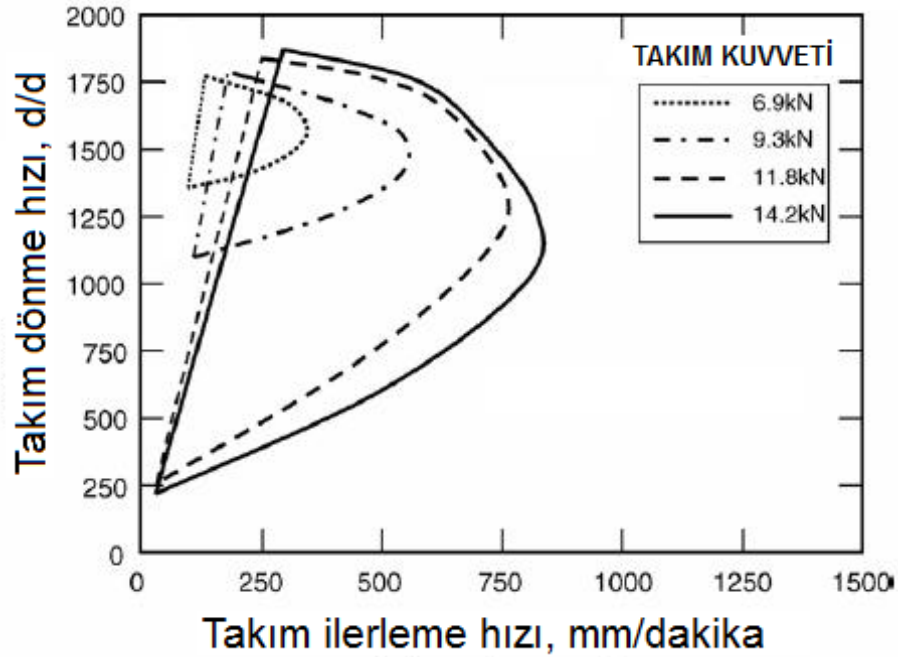
Şekil 14. A1050 alüminyum saçların alın SSK birleştirmelerinde iş parçaları arası mesafenin kaynak hata oluşumuna tesiri [26].

3.3 Kaynak kuvvetinin tesiri

Kaynak takımının yaptığı aksel basma kuvveti, takım omzunun altındaki malzemeye uyguladığı hidrostatik basıncı artırarak bu bölgede sürtünme ısı oluşumunu artırır [27]. Katı hal kaynaklarında uygulanan basınç malzemelerin difüzyon ile birleşmesini sağlar. SKK uygulamalarında takım kuvveti katı hal birleştirmesini gerçekleştirir. Kaynak sırasında uygulanan takım kuvveti küçük olması halinde malzeme ısınması az olur ve katı hal birleşmesi gerçekleşmez. Böylece kaynak hataları meydana gelir. AA7020-T6 alüminyum alaşımlarında takım kuvvetinin kaynak oluşumuna tesiri Şekil 15’de görülmektedir [27]. Takım kuvveti 4,0 kN iken boşluk (oluk) hatası, 6,7 kN iken boşluk hatası oluşmaktadır. Takım kuvveti 7,4 kN iken hatasız kaynak elde edilmektedir. Takım kuvveti kaynak parametre diyagramı üzerinde de etkili olmaktadır. Takım kuvvetinin hatasız kaynak üreten takım dönme ve ilerleme hızı üzerindeki etkisi Şekil 16’da görülmektedir [20]. Düşük takım kuvvetinde optimum parametre aralığı çok küçük olmaktadır. Hatasız kaynak üreten parametre aralığının takım kuvvetini artması ile büyüdüğü Şekil 16’da görülmektedir. Bir araştırmacı yaptığı çalışmada aşırı yüksek takım kuvvetinin de boşluk hatası oluşturduğunu tespit etmiştir [28].



Şekil 15. AA7020-T6 alüminyum alaşımlarında takım kuvvetinin kaynak hatası üzerindeki tesirleri [27]. (a) 4,0 kN, (b) 6,7 kN ve (c) 7,4 kN.



Şekil 16. ADC12 Alüminyum döküm alaşımının kaynağında takım kuvvetinin kaynak parametre diyagramı üzerindeki etkisi [20].

3.4 Takım açısının tesiri

Takım açısı bilhassa kaynak boşluk hatası üzerinde önemli rol oynadığı tespit edilmiştir [17]: Takım açısı 1° 'den küçük ise oluk boşlukları oluşmaktadır, takım açısı $1,5^\circ-3,5^\circ$ olması halinde boşluk hatası olmaktadır. Takım açısı $3,5^\circ-4,5^\circ$ arasında olması halinde hatasız kaynak edilmektedir. Takım açısı $4,5^\circ$ 'yi aştığında aşırı taşma görülmüştür [17].

4. TAKIM GEOMETRİSİNİN ETKİLERİ

Takım geometrisi kaynak bölgesinde ısı oluşumunu ve malzeme akışını direkt olarak tayin ettiğinden dikiş kalitesi üzerinde çok önemli etkileri vardır [29]. Takım geometrilerinin etkileri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

4.1 Takım uç çapının tesiri

Kaynak takım ucu çevresinde oluşan ısı, takım uç çapı ile doğru orantılıdır [2]. Uç çapının çok küçük olması halinde az miktarda sürtünme ısı oluşmakta ve buna bağlı olarak boşluklar teşekkül etmektedir [24]. Uç çapı büyüdükçe kaynağın ısı artmaktadır. Optimum çaplı uçlar ile kaynak yapıldığında hatasız kaynak elde edilmektedir. Uç çapı aşırı büyük olması halinde kaynak bölgesinde aşırı ısınma oluşmakta ve buna bağlı olarak yine boşluk hatası meydana gelmektedir [24].

4.2 Takım ucu profilinin tesiri

Takım ucunun profili ısınan metalin karıştırılmasında ve bu metalin uç arkasındaki boşluğa itilmesinde önemli rol oynamaktadır [30]. Üzerine dış açılmış ve eğim verilmiş uçlar ısı teşekkülünde ve yumuşamış malzemenin karıştırma hareketinde daha başarılı olduklarından [31] daha kaliteli kaynak oluşturmaktadırlar [32,33].

4.3 Vida adım uzunluğunun tesiri

Vida dişi açılan kaynak takımı uçlarının diiş adım uzunluğu metal karıştırma hareketi üzerinde çok etkili olduğu tespit edilmiştir [34]. Vida adım uzunluğu 1,1 mm'yi geçerse kaynak takımının ucu matkap görevi yapmaktadır. Bu uçlar sıcak ve yumuşak malzemeyi kaynak bölgesinden püskürterek kaynak dikiş oluşumunu engellemektedir [34].

4.4 Takım uç uzunluğunun tesiri

Takım uç uzunluğu bilhassa dikiş kökünde yetersiz nüfuziyet kaynak hatası oluşumunda çok önemli rol oynamaktadır. Takım uç uzunluğunun birleştirilecek iş parçası kalınlığında 0,2 mm kadar kısa olması istenmektedir [35]. Daha kısa uçlar ile kaynak yapılması halinde kaynak çekirdeğin altında yeterli miktarda malzeme karıştırması gerçekleşmediğinden Şekil 9'daki yetersiz nüfuziyet hatası meydana gelmektedir [36].

4.5 Takım omuz çapının tesiri

Takım omuzu ısı oluşumunda ve katı hal difüzyonun gerçekleşmesinde büyük rol oynar [30]. Omuz çapı ısı oluşumunda direkt olarak etkili olmaktadır [2]. Küçük omuz çapları az ısı oluşturduğundan ve çok büyük çaplar ise aşırı ısı oluşturmaya sebebi ile kaynak hatalarına sebep olmaktadır [30]. Yapılan araştırmalar optimum omuz çapının uç çapına olan oranının 3 olması gerektiğini göstermiştir [7].

5. SONUÇLAR

Alüminyum alaşımlarının SKK birleştirmelerinde oluşan önemli kaynak hataları, bunların kaynağa bulunduğu yerler ve bu hataları oluşturan sebepler Tablo 1'de özetlenmiştir [13,20,21,22,26,27,30,36].

Tablo 1. Alüminyum alaşımlarının SKK birleştirmelerinde oluşan önemli hatalar, yerleri ve oluşturan sebepler [13,20,21,22,26,27,30,36].

Hata Türü	Bulunma Yeri	Sebepler
Boşluk	Çekirdek	1. Yetersiz takım kuvveti 2. Yetersiz takım ilerleme hızı 3. Parçalar arası aşırı mesafe 4. Yetersiz ısı oluşumu 5. Düşük takım açısı 6. Yetersiz malzeme karıştırma hareketi 7. Küçük omuz çapı
Boşluk	Dikiş yüzeyi veya yüzeyin hemen altı	1. Aşırı takım ilerleme hızı
Oksit kalıntı	Çekirdek	1. Kaynak öncesi parça yüzeyinden yetersiz oksit temizleme 2. Yüksek takım ilerleme hızı 3. Aşırı omuz çapı
Yetersiz nüfuziyet	Çekirdek dibi	1. Kısa uç uzunluğu 2. Yetersiz takım dalma derinliği
Taşma	Dikiş yüzeyi	1. Aşırı difüzyon ısı oluşumu 2. Yüksek takım basıncı 3. Aşırı takım dalma derinliği

6. KAYNAKLAR

- [1] MATHER, G., The welding of aluminium and its alloys, **Woodhead Publishing**, Cambridge, (2002).
- [2] LOHWASSER, D., CHEN, Z., Friction stir welding, **Woodhead Publishing**, Cambridge, (2010).
- [3] RAI, R., DE, A., BHADSHIA, H.K.D.H., DDEBROY, T., Friction stir welding tools **Science and Technology of Welding and Joining**, 16, 325-342, (2011).
- [4] FRIGAARD, O., GRONG, O., MIDLING, O.T.A ., Process model for friction stir welding of age hardening aluminium alloys, **Metallurgical and Material Transactions A**, 32, 1189-1200, (2001).
- [5] HATTINGH, D.G., NIEKERK, T.I., BLIGNAULT, C., KRUGER, G., JAMES, M.N., Analysis of the fsu foot print and its relationship with process parameters to optimise weld performance and tool design, **Welding in the world**, 48, 50-58, (2004).
- [6] LAKSHMINARAYANAN, A.K., BALASUBRAMANIAN, V., Process parameters optimization for friction stir welding of RDE-40 aluminium alloy using Taguchi technique, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 18, 548-554 (2008).
- [7] ELONGOVAN, K., BALASUBRAMANIAN, V., Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, **Materials and Design**, 29, 362-373 (2008).
- [8] JAYARAMAN, M., SIVASUBRAMANIAN, R., BALASUBRAMANIAN, V., LAKSHMINARAYANAN, A.K., Optimization of process parameters for friction stir welding of cast aluminium alloy A319 by taguchi method, **Journal of Scientific Industrial Research**, 68, 36-43, (2009).
- [9] ZHOU, C., YANG, X., LUAN, G., Effect of root flaws on the fatigue property of friction stir welds in 2024-T3 aluminum alloys, **Materials Science and Engineering A**, 418, 155-160, (2006).
- [10] LERTORA, E., GAMBARO, C., AA 8090 Al-Li Alloy FSW parameters to minimize defects and increase fatigue life, **International Journal Material Forum**, 3, 1003-1006, (2010).
- [11] JATA, K.V., SANKARAN, K.K., RUSCHAU, J.J., Friction-stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7050-T7451, **Metallurgical and Materials Transactions A**, 31, 2181-2192, (2000).
- [12] THREADGILL, P.L., Terminology in friction stir welding, **Science and Technology of Welding & Joining**, 12(4), 357-360, (2007).
- [13] LEONARD, A.J., LOCKYER, S.A., Flaws in frictions stir welds, **4th International Symposium on Friction Stir Welding**, Park City, USA, (2003).
- [14] ADAMOWSKI, J., GAMBARO, C., LERTORA, E., PONTE, M., SZKODO, M., Analysis of FSW welds made of aluminium alloy AW6082-T6, **Archives of Materials Science and Engineering**, 28, 453-460, (2007).
- [15] BRITOS., P.J.G., Probability of detection in friction stir welding using non-destructive evaluation techniques, Master of Science, Wichita State University, (2010).

- [16] TRONCI, A., Statistical approach on the mechanical characterization of AA 2XXX Friction Stir Welded butt joints, Ph.D. Thesis, Cagliari University, (2010).
- [17] CHEN, H.B., YAN, K., LIN, T., CHEN, S.B., JIANG, J.Y., ZHAO, Y., The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds, **Materials Science and Engineering A**, 433, 64–69, (2006).
- [18] DI, S., YANG, X., FANG, d., LUAN, G., The influence of zigzag-curve defect on the fatigue properties of friction stir welds in 7075-T6 Al alloy, **Materials Chemistry and Physics**, 104, 244-248, (2007).
- [19] MASHINIMI, P.M., Process window for Friction Stir Welding of 3 mm Titanium (Ti-6Al-4V),
- [20] Ph.D. Thesis, Nelson Mandela Metropolitan University, South Africa, (2010).
- [21] KIM, Y.G., FUJII, H., TSUMURA, T., KOMAZAKI, T., NAKATA, K., Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy , **Materials Science and Engineering A**, 415, 250–254, (2006).
- [22] LI, B., SHEN, Y., A feasibility research on friction stir welding of a new-typed lap–butt joint
- [23] of dissimilar Al alloys, **Materials and Design**, 34, 725–731, (2012).
- [24] WILLIAM, J.A., A flow-partitioned deformation zone model for defect formation during friction stir welding, **Scripta Materialia**, 58, 372-376, (2008).
- [25] NANDAN, R., DEBROY, T., BHADSHIA, H.K.D.H., Recent advances in friction-stir welding Process, weldment structure and properties, **Progress in Materials Science**, 53, 980-1023, (2008).
- [26] RAJAKUMAR, S., MURALIDHARAN, C., BALASUBRAMANIAN, V., Establishing empirical relationships to predict grain size and tensile strength of friction stir welded AA 6061-T6 aluminium alloy joints, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 20, 1863–1872, (2010).
- [27] GAAFER, A.M., MAHMOUD, T.S., MANSOUR, E.H., Microstructural and mechanical characteristics of AA7020-O Al plates joined by friction stir welding, **Materials Science and Engineering A**, 527, 7424-7429, (2010).
- [28] [26] INADA, K., FUJII, H., JI, Y.S., SUN, Y.F., MORISADA, Y., Effect of gap on FSW joint formation and development of friction powder processing, **Science and Technology of Welding and Joining**, 15 (2), 131-136, (2010).
- [29] KUMAR, K., KAILAS, S.V., On the role of axial load and the effect of interface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminium alloy, **Materials and Design**, 29, 791-797, (2008).
- [30] RAJAKUMAR, S., MURALIDHARAN, C., BALASUBRAMANIAN, V.,, Statistical analysis to predict grain size and hardness of the weld nugget of friction-stir-welded AA6061-T₆ aluminium alloy joints, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 57, 151-165, (2011).
- [31] KUMAR, K., KAILAS, S.V., The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation, **Materials Science and Engineering A**, 485, 367–374, (2008)

- [32] ELANGOVA, K., BALASUBRAMANIAN, V., VALLIAPPAN, M., Influences of tool pin profile and axial force on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, **International Journal of Advance Manufacture Technology**, 38, 285-295, (2008).
- [33] HATTINGHA, D.G., BLIGNAULTA, C., VAN NIKERKA, T.I., JAMESA, M.N., Characterization of the influences of FSW tool geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool, *Journal of Materials Processing Technology*, 203, 46-57, (2008).
- [34] ZHAO, Y.H.T., LIN, S.B., WU, L., QU, F.X., The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy, **Materials Letters**, 59, 2948-2952 (2005).
- [35] URSO, G.D., GIARDINI, C., The influence of process parameters and tool geometry on mechanical properties of friction stir welded aluminium lap joints, **International Journal of Materials Forming**, 3, 1011-1014, (2010).
- [36] BOZ, M., KURT, A., The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process, **Materials and Design**, 25, 343-347, (2004).
- [37] UZUN, H., YILMAZ, R., FINDIK, F., Alüminyum alaşımları için süper birleştirme yöntemi: Sürtünme kaynak tekniği ve uygulamaları, **Metal Dünyası**, 118 75-81, (2003).
- [38] SANTOS, T., VILACA, P., QUINTINO, L., Developments in NDT focusing defects in fssw of aluminium alloys, **IIW Doc III**, 1426-077, (2007).