

Sürtünme Karıştırma Kaynağının Özelliklerine Oksit Tabakasının Etkisi

Bekir Güney^{*,1}

¹Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Karaman, Türkiye

*guneyb@kmu.edu.tr

Özet – Son zamanlarda, sürtünme karıştırma kaynağı özellikle benzer olmayan malzemelerin kaynağında daha çok tercih edilir olmuştur. Kaynaklı yapılar yorulma davranışı yüklenme, mikroyapı değişimi ve kaynak kusurları gibi faktörlerden etkilenmektedir. Kaynak kusurları; düşük işlem sıcaklığı nedeniyle gözenekler, sıcak çatlaklar, cüruf kalıntıları, kırılma katılaşma veya katı hal kaynağı sırasında artık gerilimlerden kaynaklanan yüksek distorsiyon sebebiyle meydana gelmektedir. Bu kaynak kusurlarının mikroyapıda meydana gelmesinin önemli etkenlerinden birisi yapıda mevcut olan oksit tabakalarıdır. Oksitler, ana metal bileşenleri olarak Fe, Cu, Al, Mg ve Si gibi elementler ile O₂'den oluşur ve bu nedenle matris ile metalik olarak birleştirildiği kabul edilir. Oksit tabakaları genellikle kaynağın kaynak sonrası mekanik özelliklerine zararlıdır.

Bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağında oluşan oksit tabakasının kaynağın özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağında, iki parçanın arasındaki arayüzeyinde, aralıklı boşlukların ve sürekli arayüzey oksit bölümlerinin hala mevcut olduğu kısmi bir metalurjik bağ, ya da oksidin homojen dağıldığı ve hiçbir boşluğun kalmadığı tam metalurjik bağ yapısı elde edilir. Kaynak parametrelerinin doğru kombinasyonu ile oksitlerin dağılımı ve karıştırma mekanizması dönme aletinin dönme yönü ve geometrisine bağlı olarak vida veya halka benzeri bir modelde karıştırılabilir. Bu mekanizma ile tam bir metalurjik bağlanma oluşturulabilir. Bu sayede istenilen mekanik özellikleri sağlayan kaynaklı birleştirmeler elde edilebilir.

Anahtar Kelimeler – Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Oksit Tabakası, Mekanik Özellikler, Mikroyapı, Kaynak Parametreleri

I. GİRİŞ

Hızlı teknolojik ilerlemeler makine ve kaynak teknolojileri alanında da yeni ve yüksek performanslı üretimlerin talep edilmesini beraberinde getiriyor. Zorlu şartlarda istenilen görevi yerine getirebilecek enstrümanlar, farklı malzemelerden parçaların, çeşitli şekillerde birbiriyle birleştirilmesi ile yüksek dayanım gösterebilirler. Bu amaç için parçaların birleştirilmesinde kullanılan en yaygın yöntemlerin başında kaynak tekniği gelmektedir. Bu yöntemlerin başında hem çevreci ve ekonomik hem de pratik uygulanan sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) gelmektedir.

Sürtünme kaynak yönteminin daha bütüncül yaklaşımlarla geliştirilerek, farklı malzeme türlerinin birleştirilmesinde sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Bir birbirine benzer çeşitli malzemeler ısı ve basınç etkisiyle ergitilerek ve devamında alaşım oluşturarak katılaşması sayesinde geleneksel yöntemlerle birleştirilmektedir. Bu yöntemlerde ergitilen elemanlar, alaşım oluşturmak için karıştırılmasına izin verilerek termo-mekanik olarak faydalı şekiller haline getirilmektedir. Ancak, yüksek ısı maruziyeti ve enerji kullanımı hem maliyeti arttırmakta hem de malzemelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkiler yapmaktadır. Ayrıca, ergitme ve basınç

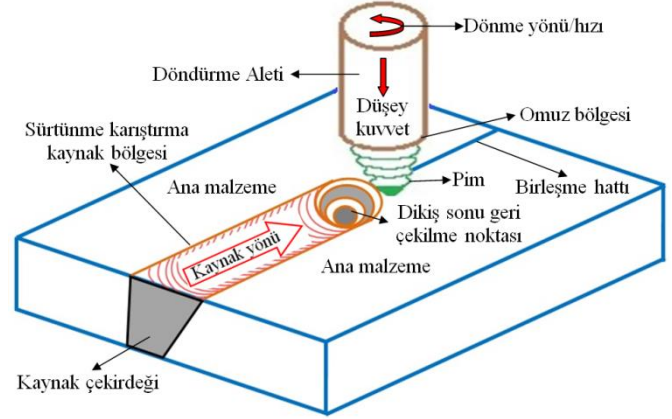
kaynaklarında ana malzeme kompozisyonuna yakın ilave malzeme kullanılması hem malzeme hem de proses maliyetlerine ilave yük getirmektedir. Ergitme prosesinin bir ürünü olarak zararlı partikül ve dumanlarında çevre ve insan sağlığı açısından dikkate alınması gereken başka bir önemli parametredir [2]. Geçtiğimiz 40 yılın içinde öne çıkan FSW, katı hal prosesi olarak uygulanmasına bağlı olarak çevreye zararlı malzemeler kullanılmayan, enerji tasarruflu ve çevre dostu çok geniş alana hitap eden bir teknolojidir [3, 4].

FSW, diğer kaynak işlemlerine göre en cazip yönü, bu yöntemle kaynaklanması zor veya imkânsız olan alaşımların kaynaklanabilmesidir. FSW işlemi katı fazda, kaynak yapılacak malzemenin erime noktasının altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirildiğinden, ikinci fazlar, gözenekler, gevrekleşme ve çatlama gibi katılaşıma mekanizmasına bağlı problemler meydana gelmez. İlave olarak, düşük işlem sıcaklığı, geleneksel kaynak yöntemlerine göre daha düşük distorsiyon ve daha düşük artık gerilmelere sahip birleşmelerin yapılmasına imkân sağlar. FSW, dolgu malzemesi ve genellikle koruyucu gaz-toz kullanılmadığı için enerji tasarruflu bir yöntemdir. Ayrıca FSW, yaygın kaynak yöntemlerinde ortaya çıkan toksik duman [5], ark parlaması, sıçrama veya atık malzeme (cüruf, erimiş çapak v.s.) üretmediği için çevrecidir [6-8].

Elektriksel enerji veya diğer enerji kaynaklarından yararlanmaksızın, çalışma parçalarının ara yüzeylerinde mekanik olarak oluşturulan sürtünme yoluyla üretilen mekanik enerjinin termal enerjiye dönüştürülmesiyle elde edilen ısıdan yararlanılarak yapılan bir, geleneksel ergitme kaynakları ile ilgili kusurları ortadan kaldıran bir katı hal kaynak tekniğidir [2, 9].

Sürtünme karıştırma kaynak teknolojisi; 1991 yılında Wayne Thomas ve onun çalışma ekibi tarafından icat edilmiştir. Patenti, İngiltere-Cambridge'deki The Welding Institute (TWI)'a aittir. İlk olarak alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde uygulanmıştır [10-12] İlerleyen süreçlerde FSW, diğer yöntemlerle kaynatılmasında zorluk olan yüksek mukavemetli Al-alaşımlarının birleştirilmesinde [6, 13, 14], Mg-

alaşımları, Cu-alaşımları, Pb, Ti-alaşımları, çelikler [15-17] ve termoplastiklerin birleştirilmesinde kullanılan bir katı hal kaynak işlemidir. Bu yeni teknikte, hatasız bağlantılar elde etmek için sürtünme ısı ve basınç kullanılmaktadır [6]. Ayrıca, polimer-polimer ve metal-polimer gibi kompozit parçaların birleştirilmesi ile ilgili çalışmalarda yapılmaktadır [18]. FSW 'nin temel prosesine ait şematik gösterim Şekil 1 'de gösterilmiştir.



Şekil 1. FSW' nin şematik görüntüsü [2]

Kaynaklı yapıların yorulma davranışını etkileyen başlıca faktörler; yükleme, mikroyapı değişimi ve kaynak kusurları gibi etkenlerdir [19]. Kaynak kusurları; düşük işlem sıcaklığı nedeniyle gözenekler, sıcak çatlaklar, cüruf kalıntıları, kırılma katılaşıma veya katı hal kaynağı sırasında artık gerilmelerden kaynaklanan yüksek distorsiyon sebebiyle meydana gelmektedir [20]. Bu kaynak kusurlarının mikroyapıda meydana gelmesinin önemli etkenlerinden birisi yapıda mevcut olan oksit tabakalarıdır. Kaynak parametreleri, takım geometrisi ve ekipman kurulumu, FSW sırasında oksitlerin dağılımı ve dolayısıyla mekanik özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu değişkenlerin doğru kombinasyonu kaynak hattının daha fazla gerilmesine neden olabilir, bu da oksitte daha fazla bozulmaya ve dolayısıyla difüzyonun meydana gelebileceği daha geniş bir yüzeye neden olabilir [21]. Katı hal kaynak prensiplerine göre, birbirine kaynak yapılacak iki metal parçanın kaynağı öncesinde oksitlerden ve yüzey kirliliklerinden temizlenmesi durumunda yapılacak

bir birleştirme ile daha üstün mikro yapı ve mekanik özellikler elde edilebilir [22, 23]. Oksit tabakası veya diğer yüzey kirleticilerin kötü etkilerini bertaraf etmek için katı hal birleştirme işlemi, bekleme süresi boyunca ergime derecesinin altındaki ısının ve basıncın birleşik etkisinden yararlanır [24]. FSW işlemi sırasında malzeme yüksek sıcaklıkta yoğun plastik deformasyona uğrar ve bunun sonucunda ince ve eş eksenli yeniden kristalize taneler oluşur [25, 26]. FSP çok çeşitli alaşımlarda iyileştirilmiş ince mikro yapı ve üstün mekanik özellikler üretmektedir [9]. Bu çalışmada FSW kaynağı mikroyapısında meydana gelen oksit tabalarının birleştirme bölgesinin özelliklerine etkisi araştırılacaktır. FSW işlemi sırasında malzeme yüksek sıcaklıkta yoğun plastik deformasyona uğrar ve bunun sonucunda ince ve eş eksenli yeniden kristalize taneler oluşur [21, 22]. FSP çok çeşitli alaşımlarda iyileştirilmiş ince mikro yapı ve üstün mekanik özellikler üretmektedir [9]. Bu çalışmada FSW kaynağı mikroyapısında meydana gelen oksit tabalarının birleştirme bölgesinin özelliklerine etkisi araştırılacaktır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada FSW yöntemi ile yapılan birleştirmelerde kaynak bölgesinde meydana gelen oksit tabakasının özellikleri ve kaynağın mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi literatüre göre açıklanmıştır.

III. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

Katı hal kaynağı sırasında yüzeylerde bulunan oksit tabakası önemli bir problemdir [29, 30]. Malzeme yüzeyi ile reaksiyona giren atmosferik oksijen, bariyer oluşturarak ısının karıştırma bölgesinde eşit şekilde yayılmasını engeller, bu da kaynak bağlantısının homojenliğini etkileyerek, özellikle arayüzde bileşenin mikro yapı, mekanik ve elektriksel özelliklerinin azalmasına neden olur. Katı hal kaynağı sırasındaki işlem sıcaklıkları malzemenin erime noktasının 0,4 ila 0,8'i katı arasında olmaktadır. Bunun aksine malzemenin oksit tabakasının erime noktası yaklaşık 2000 °C'nin üzerindedir. Bu bilgi ışığında metalik malzemenin katı hal kaynağı sırasındaki işlem sıcaklığı, oksit tabakasını eritecek veya yeterince

yumuşatacak kadar yüksek değildir [30-32]. Ancak, bu oksit tabakasının parçalanarak homojen şekilde dağılması sağlanması gerekir. Metal ve alaşımların katı hal difüzyonla bağlanması sırasında sürekli kırılabilir oksit filmi, önemli miktarda plastik deformasyon uygulanarak parçalanabilir. Oksit filmin sünekliği saf metale göre çok daha düşük olduğu göz önüne alındığında, yüksek plastik deformasyona maruz kaldığında kırılır. Karıştırma etkisiyle kırılabilir oksit filmin lokal olarak kırılması nedeniyle metal metale temas sağlanmış olur [25].

FSW birleştirme mekanizması geleneksel ergitme kaynağından tamamen farklıdır. Bu nedenle FSW 'nin birleştirme mekanizmasını ve bağlantı özelliklerini açıklığa kavuşturmak zorunludur. Örneğin, geleneksel ark kaynağında kaynak malzemesi yüzeyinde oluşan oksit filminin çoğu, ya cürufuyla karışarak kaynak yüzeyinde, ya da gaz kabarcıkları halinde ortam havasına karışan gaz şeklinde ayrışır ve kaynakların özelliklerini fazlaca etkilemediği kabul edilir. Ama FSW ile malzeme, plastik deformasyon ve dönen takım ile kaynaklanan malzeme arasındaki dönme sürtünmesinin ısısı ile erime noktasının altında birleştirildiğinden, iş malzemesi yüzeyindeki oksit tabakası kaynak dikiş bölgesinde kalmaktadır [33].

Oksit parçacıkları kaynağın mekanik ve korozyon özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. FSW tekniği ile birleştirilen malzemelerin alın yüzeylerinde bulunan oksit filmi, sürtünme karıştırma kaynaklarındaki oksit izlerini güçlü bir şekilde etkiler. FSW 'de kaynaklanan malzemenin alın yüzeylerinde bulunan oksit filmi, döndürme aletinin dönme hareketiyle tekrarlayan bir yıkım, bölünme ve karıştırma sürecinde plastikleşen bağlantı malzemesinin içinde dağılır. Bu işlem sırasında, önceden var olan oksit filmleri, yeni oksitlerin büyümesini sağlamak için ana metaldeki elementleri (Fe, Al, Si, Mg), çökeltileri ve ortam havasındaki oksijeni (O₂) sürüklerken birleşir ve reaksiyona girer. Oksitler, ana metal bileşenleri olarak Fe, Cu, Al, Mg ve Si gibi elementler ile O₂'den oluşur ve bu nedenle matris ile metalik olarak birleştirildiği kabul edilir [33].

FSW 'de birleştirme bölgesinde doğal olarak oluşan oksit parçacıklarının amorf yapıda olduğu bildirilmiştir. Bazı çalışmalar [34, 35] bu oksitlerin başlangıç alın yüzeyindeki oksitlerin kaynak takımının pim-omuz yüzeyi boyunca dönmesinden kaynaklanan kesme gerilimi ile meydana geldiğini öne sürmektedir. FSW sırasında kesme gerilimi başlangıç alın yüzeyi etrafında çalıştığında, oksiti parçalayabilir ve dönen pimin çevresinde yeni oksitsiz yüzeyler oluşturabilir. Yüzey oksidinin kırılmış ürünleri, karıştırma sırasında toplu olarak akabilir ve karıştırma bölgesinde dalgalı bir desen oluşturabilir. Oksit parçacıklarının yerel bir bölgedeki dağılımı, kaynağın kök bükülme özelliklerini etkilememektedir [36].

Hassas işlenmiş FSW'nin karıştırma bölgesinde, "tembel S", "zikzak çizgisi" veya "öpüşme bağlantısı" şeklinde tarif edilen oksit kalıntılarından oluşan yapılar görülmektedir. Bu oksit dizisi, yorulma yüklemesi altında çatlakların kolayca başlamasına sebep olur ve FS kaynaklarının yorulma özellikleri üzerinde zararlı bir etkiye sahiptir [23, 37]. Düşük ısı girdili FSW parametreleri, malzemede düşük ısı üretimi sebebiyle kesitsel karıştırma bölgesindeki oksit tabakasını parçalayamadığından karıştırma bölgesinde zikzak çizgisi şeklinde oksit kalmaktadır [33].

FSW 'de, iki parçanın arasındaki arayüzeyinde aralıklı boşlukların ve sürekli arayüzey oksit bölümlerinin hala mevcut olduğu kısmi bir metalurjik bağ, ya da oksidin homojen dağıldığı ve hiçbir boşluğun kalmadığı tam metalurjik bağ yapısı elde edilir [38, 39].

FSW 'de karıştırma aletinin etkisiyle ısıtılan ve yumuşatılan malzeme, plastik olarak çok yüksek gerilimlere maruz kalacak şekilde deforme olur, bağlantı arayüzündeki oksidi bozar, böylece üst ve alt tabakalar arasında katı hal bağı oluşabilir. Bu durum, omuz altında tam bir metalurjik bağ elde etmeyi zorlaştırarak kaynak hattı boyunca yarıma kırılması nedeniyle düşük mukavemetli hasarlara yol açar [38, 40, 41]. Ayrıca, alt tabaka ile üst tabaka arasındaki verimsiz akış, zayıf nüfuziyet nedeniyle bağlantı mukavemetini azaltmasına yol açabilir [41, 42].

Ara yüzeyde oksidin varlığı FS kaynaklarının kalitesini azaltır, çünkü kaynak harici yüklemeye maruz kaldığında çatlak yayılımı oksit katmanını takip eder. Aynı şekilde, arayüzeydeki oksit bölgeleri sıklıkla bir öpüşme bağı veya gözeneklilik ile ilişkilidir ve çatlakın yayılması sırasında kolaylıkla birleşebilir [42].

İki parça arasında birleşme oksit tabakaları ile ayrılabilir. Başlangıçta iki parça arasındaki orijinal yüzeyleri belirleyen oksit tabakası karıştırma neticesinde bağların açılması veya ayrılma ile başlayan karmaşık kırılmalara sebep olabilir. Bu kırılmalar, karıştırıcı takımın dönme yönüne göre genellikle kısmi bir bağın bulunduğu omuz temas alanının kenarında başlayarak pimin akış yönüne göre yer değiştiren malzeme içerisine doğru yayılır [43].

Takım geometrisine bağlı olarak gerek pimli gerekse pimsiz yapılan sürtünme karıştırma kaynaklarında ısı dağılımının termal yönetimi kaynağın kalitesi üzerinde etkilidir. Parça kalınlığının artması düzgün bir ısı dağılımı sağlayarak daha kaliteli bir kaynak yapılmasına imkân sağlar. Bu gibi termal özelliklerin öne çıktığı durumlarda karıştırıcı takım ara yüzeyde oluşan oksit katmanını parçalayarak daha iyi bir bağlantı üretebilir [39, 44].

Takımın devir adımı, yani devir başına takım adımı (birleştirme hızı/dönme hızı), bağlantılardaki sürtünmeli karıştırma derecesini güçlü bir şekilde etkiler. Karıştırma ve oksitlerin dağılım durumları da bu devir adımından etkilenir. Düşük devir aralığında karıştırılan oksitler soğan halkası şeklinde olur ve ince bir şekilde dağılmaktadır. Öte yandan, yüksek devir aralığında, birleşimin ön yüzünden arkasına doğru düşük devirden daha az karıştırmaya maruz kaldıklarından sürekli bir örgü çizgisi şeklinde bulunurlar. Düşük devirlerde yapılan FSW birleştirmelerinde eğilme yorulma dayanımı, birleşme bölgesinin ana metalden düşük meydana gelmektedir. Kopma konumu da oksit film içermeyen ısıdan etkilenen bölgede olmaktadır. Öte yandan nispeten yüksek devir adımı değerinde, eğilme yorulma dayanımı azalır

ve kopma konumu, oksit film oluşumundan etkilenen sürtünme karıştırılmalı bölgede meydana gelir. Daha yüksek devir aralıklarında sürtünmeyle karıştırılan bölgeden gerçekleşmektedir. Bunun nedeni, devir aralığının büyük olması nedeniyle eksik karıştırmanın meydana gelmesi ve bağlantılarda kolayca kusurların oluşmasıdır. Çekme mukavemeti kaybının bu kusurların ana nedeni olduğu varsayılır ve olumsuz bir oksit filmi etkisi bulunmaz. Sürtünme karıştırma kaynaklarının çekme mukavemetleri ana metalinkinden daha düşüktür. Kusursuz birleştirme şartlarında oksitlerin bağlantıların çekme mukavemeti üzerinde olumsuz bir etkisi bulunmadığı rapor edilmiştir [39, 45]

Diğer bir önemli faktörde, oksitlerin dağılımı ve karıştırma mekanizması dönme aletinin dönme yönü ve geometrisine bağlı olarak vida veya halka benzeri bir modelde karıştırılmasıdır. Yani, iş malzemesinin bitişik yüzeylerinde bulunan oksit filmi, birleşme yerlerinden dönme hareketi tarafından tekrarlayan bir yıkım ve bölünme sürecinden geçmektedir. Bu sayede malzeme akış yönüne doğru oksitlerde akmaktadır. Eğer karıştırma ve taşınım mekanizması oksitleri yeteri kadar parçalayamaz ve homojen karışım sağlanamazsa birleştirme bölgesinin mekanik özelliklerinde düşme meydana gelir [46].

IV. SONUÇLAR

Çalışmada, FSW işlemi sırasında oksitlerin morfolojisi, dağılımı ve büyüme mekanizması ile bunların bağlantıların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri açıklamaktadır. Bulunan sonuçlar;

1. Birleştirilen iki parça arasında birleşme oksit tabakaları ile ayrılmaktadır. Bu oksit tabakaları birleştirilme bölgesinde parçalanarak homojen şekilde dağılması gerekir.
2. FSW 'de iki parçanın arasındaki arayüzeyinde aralıklı boşlukların ve sürekli arayüzey oksit bölümlerinin hala mevcut olduğu kısmi bir metalurjik bağ, ya da oksidin homojen dağıldığı ve hiçbir

boşluğun kalmadığı tam metalurjik bağ yapısı elde edilir.

3. İyi optimize edilmiş kaynak parametreleriyle FSW 'de tam bir metalurjik bağ elde edilerek istenilen mekanik özellikler sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- [1]. Kurt, A., M. Boz, and M. Özdemir, *Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi*. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi; Cilt 19, Sayı 2 (2004), 2013.
- [2]. Güney, B., *Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniği*, in *Güncel Multidisipliner Teknik Araştırmalar*, A. Öz, Editor. 2022, SRA Academic Publishing: Lithuania. p. 1-20.
- [3]. Ambrosio, D., et al., *On the potential applications of acoustic emission in friction stir welding*. Journal of Manufacturing Processes, 2022. **75**: p. 461-475.
- [4]. Kurt, A., I. Uygur, and E. Cete, *Surface modification of aluminium by friction stir processing*. Journal of materials processing technology, 2011. **211**(3): p. 313-317.
- [5]. Güney, B., *Microstructure analysis of welding fume of low and medium carbon steels*. 2021.
- [6]. Çam, G., et al., *Applicability of friction stir welding to steels*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2017. **80**(2): p. 65-85.
- [7]. İpekoğlu, G., Ö. Akçam, and G. Çam, *Effect of plate thickness on weld speed in friction stir welding of AA6061-T6 Al-alloys plates*. in *Proc. of the 10th Welding Technology National Congress and Exhibition*. 2017.
- [8]. Gibson, B., et al., *Friction stir welding: process, automation, and control*. J Manuf Process 16: 56–73. 2014.
- [9]. Davoodi, F., et al., *Anticorrosion performance of TiN coating with electroless nickel-phosphorus interlayer on Al 6061 alloy*. Materials Chemistry and Physics, 2023. **296**: p. 127170.
- [10]. Thomas, W., et al., *Friction stir butt welding, international patent application no. PCT/GB92 Patent application, 1991(9125978.8)*.
- [11]. Thomas, W. and C. Dawes, *TWI bulletin 6 November*. 1995, December.
- [12]. Jadhav, G. and R. Dalu, *Friction Stir Welding–Process Parameters and its Variables: A Review*. International Journal Of Engineering And Computer Science, 2014. **3**(6): p. 6325-6328.
- [13]. Kashaev, N., V. Ventzke, and G. Çam, *Prospects of laser beam welding and friction stir welding processes for aluminum airframe structural applications*. Journal of Manufacturing Processes, 2018. **36**: p. 571-600.
- [14]. Jayabalakrishnan, D. and M. Balasubramanian, *Friction stir welding of dissimilar butt joints with*

- novel joint geometry. *Acta Physica Polonica A*, 2018. **133**(1): p. 94-100.
- [15]. Jayabalakrishnan, D. and M. Balasubramanian, *Eccentric-weave FSW between Cu and AA 6061-T6 with reinforced Graphene nanoparticles*. *Materials and Manufacturing Processes*, 2018. **33**(3): p. 333-342.
- [16]. Chowdhury, S., et al., *Tensile properties of a friction stir welded magnesium alloy: Effect of pin tool thread orientation and weld pitch*. *Materials Science and Engineering: A*, 2010. **527**(21-22): p. 6064-6075.
- [17]. Günen, A., et al., *Microstructural and mechanical properties of friction stir welded pure lead*. 2018.
- [18]. Vibin, R., et al., *Effect of nanosilica and weave geometry on weld properties of friction stir welded nylon 6-6 thick plates*. *Silicon*, 2022. **14**(2): p. 511-519.
- [19]. Zhou, C., X. Yang, and G. Luan, *Effect of oxide array on the fatigue property of friction stir welds*. *Scripta materialia*, 2006. **54**(8): p. 1515-1520.
- [20]. Chu, Q., et al., *Microstructure and mechanical behaviour of pinless friction stir spot welded AA2198 joints*. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2016. **21**(3): p. 164-170.
- [21]. Labus Zlatanovic, D., et al., *Effect of surface oxide layers in solid-state welding of aluminium alloys—review*. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2023. **28**(5): p. 331-351.
- [22]. Shirzadi, A., H. Assadi, and E. Wallach, *Interface evolution and bond strength when diffusion bonding materials with stable oxide films*. *Surface and Interface Analysis: An International Journal devoted to the development and application of techniques for the analysis of surfaces, interfaces and thin films*, 2001. **31**(7): p. 609-618.
- [23]. Wu, F., et al., *Effect of alloying elements gradient on solid-state diffusion bonding between aerospace aluminum alloys*. *Materials*, 2018. **11**(8): p. 1446.
- [24]. Hill, A. and E. Wallach, *Modelling solid-state diffusion bonding*. *Acta Metallurgica*, 1989. **37**(9): p. 2425-2437.
- [25]. Jata, K. and S.L. Semiatin, *Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys*. *Scripta materialia*, 2000. **43**(8): p. 743-749.
- [26]. Benavides, S., et al., *Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum*. *Scripta materialia*, 1999. **41**(8): p. 809-815.
- [27]. Zlatanovic, D.L., et al., *In-depth microscopic characterisation of the weld faying interface revealing stress-induced metallurgical transformations during friction stir spot welding*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021. **164**: p. 103716.
- [28]. Labus Zlatanovic, D., et al., *Influence of rotational speed on the electrical and mechanical properties of the friction stir spot welded aluminium alloy sheets*. *Welding in the World*, 2022. **66**(6): p. 1179-1190.
- [29]. Sato, Y.S., et al., *Characteristics of the kissing-bond in friction stir welded Al alloy 1050*. *Materials Science and Engineering: A*, 2005. **405**(1-2): p. 333-338.
- [30]. Kadlec, M., et al. *Influence of the kissing bond defect to the fatigue life in friction stir welds of AA7475-T7351 aluminium alloy*. in *Proceeding of the 10th International Symposium on Friction Stir Welding, At Beijing, China*. 2015.
- [31]. Okamura, H., et al., *Behaviour of oxides during friction stir welding of aluminium alloy and their effect on its mechanical properties*. *Welding international*, 2002. **16**(4): p. 266-275.
- [32]. Field, D.P., et al., *Heterogeneity of crystallographic texture in friction stir welds of aluminum*. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001. **32**: p. 2869-2877.
- [33]. Park, S.H.C., Y.S. Sato, and H. Kokawa, *Basal plane texture and flow pattern in friction stir weld of a magnesium alloy*. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003. **34**: p. 987-994.
- [34]. Sato, Y.S., et al., *FIB-assisted TEM study of an oxide array in the root of a friction stir welded aluminium alloy*. *Scripta materialia*, 2004. **50**(3): p. 365-369.
- [35]. Hisanori, O., et al., *Behavior of oxide during friction stir welding of aluminum alloy and its influence on mechanical properties*. *Welding Research Abroad*, 2001. **47**(12): p. 35-35.
- [36]. Mitlin, D., et al., *Structure-properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welded) 6111 aluminum*. *Materials Science and Engineering: A*, 2006. **441**(1-2): p. 79-96.
- [37]. Bakavos, D. and P. Prangnell, *Effect of reduced or zero pin length and anvil insulation on friction stir spot welding thin gauge 6111 automotive sheet*. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009. **14**(5): p. 443-456.
- [38]. Welding, F.S., *Processing (RS Mishra and MW Mahoney, eds.)*. ASM International, Materials Park, OH, 2007.
- [39]. Lin, P.-C., J. Pan, and T. Pan, *Failure modes and fatigue life estimations of spot friction welds in lap-shear specimens of aluminum 6111-T4 sheets. Part 2: Welds made by a flat tool*. *International journal of fatigue*, 2008. **30**(1): p. 90-105.
- [40]. Badarinarayan, H., Q. Yang, and S. Zhu, *Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot-welded aluminum alloy*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009. **49**(2): p. 142-148.
- [41]. Tozaki, Y., Y. Uematsu, and K. Tokaji, *Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007. **47**(15): p. 2230-2236.
- [42]. Schilling, C. and J. dos Santos, *Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding*. 2004, Google Patents.
- [43]. Gerlich, A., P. Su, and T. North, *Tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloys*. *Journal of Materials science*, 2005. **40**: p. 6473-6481.

- [44]. Tozaki, Y., Y. Uematsu, and K. Tokaji, *A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance*. Journal of Materials Processing Technology, 2010. **210**(6-7): p. 844-851.