



İhsan Kırık

Bingöl University, alihsankirik@gmail.com, Bingöl-Türkiye

Anıl İmak

Bingöl University, aimak@bingol.edu.tr, Bingöl-Türkiye

Musa Kılıç

Batman University, musa.kilic@batman.edu.t, Batman-Türkiye

DOI	http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2025.20.1.2A0201		
ORCID ID	alihsankirik@gmail.com	0000-0001-6091-1584	0000-0001-5808-6917
Corresponding Author	Anıl İmak		

METALİK MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ

ÖZ

Teknolojik, endüstriyel, savunma sanayi ve uçak endüstrisindeki hızlı gelişmeyle birlikte farklı türdeki malzemelerin birlikte kullanımı ve bu malzemelerin birleştirilmesi çok önemli hale gelmiştir. Geleneksel ark kaynak yöntemleriyle farklı türdeki malzemelerin birleştirilmesinde çeşitli sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Farklı malzemelerin birleştirilmesindeki olumsuzlukları azaltmak ve daha uygun kaynak yöntemini uygulamak için sürtünme kaynağı, sürtünme karıştırma kaynağı ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı teknikleri kullanılabilmektedir. Böylece ergitme kaynak yöntemlerindeki olumsuzluklar azaltılmış olmaktadır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı son zamanlarda yaygın olarak kullanılan direnç nokta kaynağına alternatif bir yöntem olarak ortaya çıkmış ve sanayi sektörü dışında diğer endüstri kollarında da uygulamada yerini almaya başlamıştır. Birleştirme mekanizmaları ne kadar benzerlik gösterse de aralarında uygulama farklılıkları vardır. Nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesi çok zor olan farklı türdeki malzemeler sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile daha kolay birleştirilebilir.

Anahtar Kelimeler: Metalik Malzemeler, Sürtünme Kaynağı, Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı, Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Kaynak

JOINING OF METALLIC MATERIALS BY FRICTION STIR SPOT WELDING ABSTRACT

With the rapid development in technology, industry, defense industry, and the aviation industry, the use of different types of materials together and the joining of these materials has become very important. Various problems may arise in joining different types of materials using traditional arc welding methods. To reduce the drawbacks in joining different materials and to apply a more suitable welding method, techniques such as friction welding, friction stir welding, and friction stir spot welding can be used. This way, the drawbacks of fusion welding methods are minimized. Friction stir spot welding has recently emerged as an alternative to the widely used resistance spot welding and has started to be applied in industries outside the industrial sector as well. Although the joining mechanisms are quite similar, there are differences in their applications. Materials that are very difficult to join with resistance spot welding can be more easily joined using friction stir spot welding.

Keywords: Metal Material, Friction Stir Spot Welding, Friction Welding, Friction Stir Welding, Welding

How to Cite:

Kırık, İ., İmak, A. ve Kılıç, M., (2025). Metalik malzemelerin sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesi. Technological Applied Sciences, 20(1):1-12, DOI: 10.12739/NWSA.2025.20.1.2A0201.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Malzemelerin sürtünmelerinden yararlanarak birleştirme fikri çok eski zamanlara dayanır. Ancak sürtünme kaynağı ile ilgili ilk patent 1891 yılında Amerikalı makinist Bevington tarafından alınmıştır. Daha sonra İngiltere, Rusya 1924 yılında ve Almanya 1929 yılında konuyla ilgili çalışmalar yaparak patent almışlar. Başlangıçta plastik ve boruların birleştirilmesinde kullanılan bu teknik 1956 yılında iki metal çubuğu birleştirmek için sürtünme kaynağı kullanan Rus bilim adamı Chdicov tarafından geliştirilmiştir. Sürtünme kaynağı konusuyla ilgili gerçek bilimsel çalışmalar 1956 yılından sonra başlamış olup yöntemin uygulama alanlarını geliştirmek için çalışmalar halen devam etmektedir. Özellikle yeni ve geliştirilmiş malzemelerin üretiminden ve bu malzemelerin mevcut kaynak yöntemleriyle kaynaklanmasından kaynaklanan sorunlar sürtünme kaynağı için geniş bir uygulama alanı bulmayı mümkün kılmıştır.

Sürtünme kaynağı (SK) ve sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) gibi kaynak teknikleri icat edildiklerinden beri önemli bir katı hal kaynak teknikleri olarak kabul edilmişler. Ayrıca SKK'nın bir çeşidi olan sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) direnç kaynağı için bir yedek veya alternatif birleştirme işlemi olarak da geliştirildiği söylenebilir. SKNK katı hal kaynak kategorisinde olmakla beraber benzer (Al-Al), farklı (Al-Cu, Al-Mg ve Al-Fe) alaşımları, polimerleri ve seramikleri birleştirmek için kullanılmaktadır. SKNK farklı metalleri birleştirmek için kullanılan en etkili bir katı hal birleştirme işlemidir. Bu teknik zamanla endüstriyel uygulamalarda çok aranan yöntem olmuştur. Bu zamanda birçok yapı farklı özellikleri bir arada bulundurmaya ihtiyaç duyar ve uygulamada hizmet gereksinimlerini sağlamak için uygun ve özellikler açısından kararlı olmalıdır. Sonuç olarak elektronik ve mekanik yapılarda farklı malzemeleri bir arada kullanmak için birleştirmek gerekir.

Kesharwani ve diğerleri, SKK'nı kullanarak AA5754-H22 ve AA5052-H32'nin farklı metalleri birleştirmek için dönme hızı, ilerleme hızı, uc geometrisi ve omuz çapının etki analizini incelediler. Deneyi iyileştirmek ve geliştirmek için DOE istatistiksel yaklaşımını kullandılar ve 50 mm/dak'lık bir hareket hızı, 1800 rpm'lik bir dönme hızı, kare geometrilili takım pimi ve 20 mm'lik takım omuz çapının 175 MPa'lık maksimum çekme mukavemeti sağlayacağını tespit ettiler [1].

Zhang ve arkadaşları, SKK ile 1060 Al alaşımı ve saf Cu'yu kaynaklamak için karşılaştırmalı bir çalışma yürüttüler, burada geri üst taraf Al ve alt tarafta Cu kullanıldı. Sonuçların incelenmesi, metalurjik bölgelerinin bağlanmasında interkalasyon yapı oluşumunun Al ve Cu'yu doğruladığını gösterdi. Yüksek dislokasyon yoğunluğu nedeniyle, birleşme bölgesinin sertlik değerleri temel metalden daha fazlaydı [2]. Shankar ve diğerleri, alüminyum alaşımlarının SKK sırasında çeşitli sıcaklık kaynaklı kusurları incelediler [3]. Saw ve diğerleri, sürtünmeli yüzeylerde farklı malzemelerin mikro yapısının gelişimini araştırdılar [4]. R Murugan ve diğerleri, bakır ve bronz plakalarda FSW işlemini araştırmak için ANSYS programını kullandılar; farklı sıcaklıkların birkaç ilerleme süresindeki dağılımlarını analiz ederek, birleşme doğrultusunda ilerleme süresi periyodunun arttığı, sıcaklık yükseldiğini dile getirmişler [5].

Nokta direnç kaynakları çok miktarda intermetalik bileşik (IMB) içerir. Bu IMB 'ler kırılmalıdır ve çatlakları, kancaları ve diğer kusur biçimlerini teşvik eden arayüz noktaları olarak hareket eder, böylece nokta kaynaklarının birleşim mukavemetini azaltırlar. Bu olgular dikkate alındığında SKNK büyük avantajlar sağlayarak bu olumsuzlukların minimize edilmesine olanak sağladığı açıktır.

Yaygın kullanım alanı bulan alüminyum, bakır ve magnezyum gibi malzemelerin ark yöntemleri ile birleştirilmelerinde de çeşitli

problemlerle karşılaşmaktadır. Birleştirilmeleri problemlili olan malzemelerin kaynak işlemleri için kısa kaynak süresi, dolgu malzemesi ve koruyucu gaz kullanımına ihtiyaç olmaması, mekanik özellikleri açısından da iyi sonuçlar vermesi gibi özellikler, SKK önemli kılmaktadır [6 ve 7].

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (Friction Stir Spot Welding: FSSW) metalik malzemelerin birleştirilmesinde yüksek kaliteli düşük ısı etki alanına sahip bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntem özellikle alüminyum ve çelik gibi malzemelerin birleştirilmesinde güçlü bir potansiyel taşıırken geleneksel kaynak yöntemlerine kıyasla daha az deformasyon ve daha iyi mekanik özellikler sağlar. Bu çalışma bu teknolojiye dair derinlemesine bir anlayış geliştirilmesini ve endüstriyel uygulamalarda daha geniş bir yelpazeye hitap etmesini mümkün kılacak yenilikçi çözümler üretilmesini amaçlamaktadır. Özellikle otomotiv, havacılık ve gemi inşaatı gibi sektörlerde kullanılan sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile ilgili genel bir literatür taraması içermektedir.

Önemli Noktalar (Highlights):

- Sürtünme kaynağı çeşitleri hakkında genel bilgiler.
- Sürtünme karıştırma nokta kaynağının çalışma prensibi.
- Sürtünme karıştırma nokta kaynağının işlem parametreleri.

3. KAYNAK İŞLEMİ TEMEL BİLGİLERİ

(BASIC INFORMATION ON WELDING PROCESS)

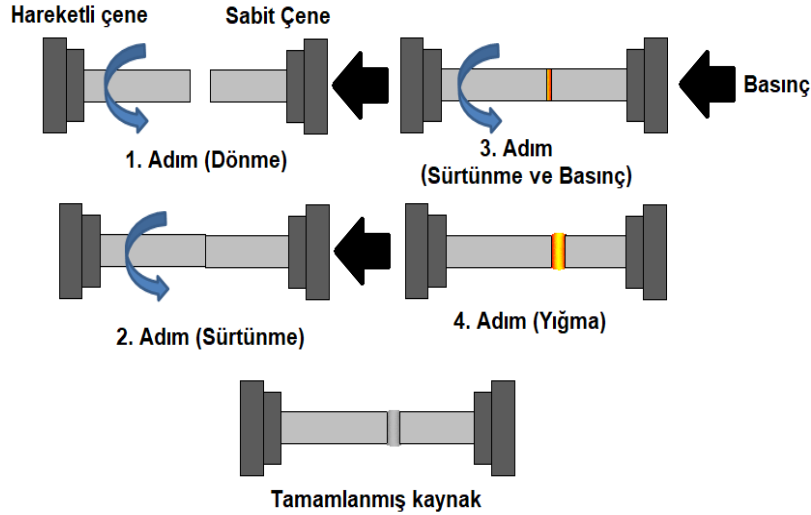
Metalik malzemelerde kaynak işlem türüne göre ergitme kaynak ve katı hal kaynak olmak üzere ikiye ayrılır. Ergitme kaynağı erime sıcaklıkları aynı veya birbirine yakın iki veya daha fazla metalik özelliklere sahip malzemelerin ilave metaller ekleyerek veya eklemeyerek ısı, basınç veya her ikisini kullanarak birleştirme işlemidir [8]. Öte yandan katı hal kaynak iki aynı veya farklı malzeme çiftinin erime sıcaklıklarının altındaki bir sıcaklıkta basınç etkisiyle plastik deformasyon ve ekstrüzyonun birleştirme işlemidir [9-16]. Katı hal kaynak tekniğinde iki malzemenin yüzeylerini aralarında bir bağlantı oluşana kadar birbirine yaklaştırmak gerekir. Bunu yapmak için birçok teknik uygulanmasına rağmen tüm yöntemlerdeki temel şey üzerlerinde bir tabaka bırakmadan iki yüzeyi deforme edecek bir basınç uygulamaktır [17]. Bu açıdan bakıldığında temel sürtünme kaynak yöntemlerini aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz:

- Sürtünme kaynağı,
- Sürtünme karıştırma kaynağı ve
- Sürtünme karıştırma nokta kaynağı.

3.1. Sürtünme Kaynağı (Friction Welding)

Sürtünme nesnelerin veya maddelerin birbirlerine göre hareketinden kaynaklanan kinetik enerji kayıpları olarak tanımlanır. Sürtünme temas halindeki iki cismin arayüzünde oluşan kuvvetlerden kaynaklanır. Bu kuvvetler temas halindeki malzemenin özellikleri ve temas alanı ile yük olarak belirlenir. Gerçek temas alanı nesnenin görünen alanından çok daha küçüktür. Gerçek yüzey teması atomik seviyede düz değildir. Tüm işlenmiş malzemelerin farklı bir yüzey topografisi vardır. Bu farklılıklar işleme aletinin geometrisi, iş parçasının mikro yapısı ve sistemdeki titreşimlerden kaynaklanan dalgalı sapmalardır. Sürtünme kuvveti bir katıyla temas halindeki bir nesnenin bir başkasının üzerinden kaymasına neden olan teğetsel yüzey kuvvetidir [18-23]. Sürtünme yüzeylerin düzleminde gerçekleşir ve yüzeye dik kuvvetle orantılıdır (Şekil 1).

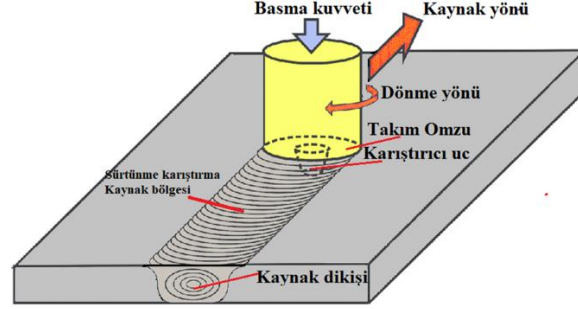
Sürtünme kaynağı genellikle aşağıdaki aşamalarda gerçekleştirilir [24-28]. İlk aşamada malzemelerden biri aynı eksene sabitlenir ve diğeri dairesel bir hareketle bağlanır. İkinci aşamada iki malzemenin yüzey teması eksenel basınç kuvveti altında gerçekleştirilir. Üçüncü aşamada sürtünme işlemiyle arayüzde plastik deformasyon ve şişme oluşturulur. Son aşamada dönme hareketi durdurulur ve yığma kuvveti uygulanır.



Şekil 1. Sürtünme kuvveti adımları [52]
(Figure 1. Friction force steps)

3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) (Friction Stir Welding)

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) demirli, demir dışı metallerin ve plastiklerin uç uca ve bindirme birleştirmesi için 1991 yılında icat edilen ve Kaynak Enstitüsü tarafından patenti alınan katı hal kaynak tekniklerinden biridir. İşlem iş parçalarının birbirine değen yüzeyleri arasına özel olarak şekillendirilmiş dönen bir ucun daldırılmasından oluşur. Dönen ucun ve iş parçalarının göreceli hareketi sürtünme ısıyı üretir ve böylelikle ucun daldırılan kısmının etrafında plastikleştirilmiş bir bölge oluşması sağlanmış olur [29]. Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağının ergitme kaynak işlemleriyle karşılaştırıldığında avantajlara sahip olduğu bilinmektedir. Katılaşma çatlağı, gözeneklilik ve sıvılaşma çatlağı gibi sorunlar katı hal yapısı nedeniyle SKK kullanıldığında ortadan kalkar [30]. Şekil 2 sürtünme karıştırma kaynak yönteminin şematik bir örneğini göstermektedir. Ayrıca, SKK bakır-bakır alaşımlarında, titanyum-titanyum alaşımlarında, kurşun-kurşun alaşımlarında, magnezyum-magnezyum alaşımlarında ve metal matrisli alüminyum karışımlarının birleştirilmelerinde kullanılmaktadır. Bilindiği gibi sürtünme karıştırma kaynağı özellikle düz kesitli malzemelerde kullanılan bir katı hal kaynak yöntemidir. Genellikle kaynaklanması zor olan alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde sürtünme karıştırma kaynak parametrelerinin değiştirilerek alüminyum alaşımlarına yönelik çalışmalar sanayinin dikkatini çekmiştir. Bu kaynak tekniğiyle araştırmacılar tarafından 1 mm'den küçük ve 35 mm'den kalın olan ve kaynaklanması beklenmeyen alüminyum alaşımlarında da çok düzgün mekanik özelliklerin açısında oldukça iyi birleştirmelerin yapıldığı kanıtlanmıştır [31].



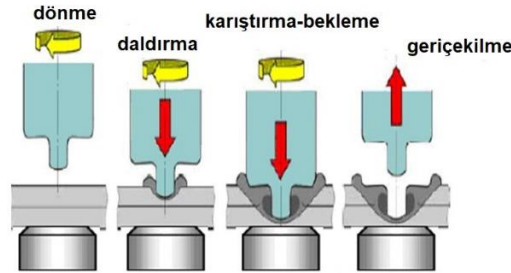
Şekil 2. Sürtünme karıştırma kaynağı şematik örneği [52]
(Figure 2. Schematic example of friction stir welding)

3.3. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) (Friction Stir Spot Welding)

Daha önceki çalışmalar dikkate alındığında SKNK işlemi ana malzemelerde kalıcı kaynak puntaları oluşturabilen bir tür sürtünme karıştırma kaynak işlemidir. Bu işlem herhangi bir harici ısı gerektirmez ve kaynak puntaları dışardan basınç yardımıyla oluşturulur. Isıdan etkilenen bölgenin minimum etkisine sahip bir SKK türü olarak görülmektedir [32-34]. Bu tekniğin çevresel metalurjik ve enerji yönleri göz önünde bulundurulduğunda aşağıdaki gibi çok sayıda avantajı vardır:

- **Bozulma miktarı:** Bu yöntemde yoğun bir ısıtmaya gerek olmadığından diğer kaynak yöntemlerine göre bozulma ve çarpılma seviyesi düşüktür.
- **İnce mikro yapı:** Katılaşma çatlağı daha az veya hiç gözenek olmadan ince bir yeniden kristalleştirilmiş mikro yapı oluşturabilir.
- **Boyutsal kararlılık:** Daha iyi boyutsal kararlılık ve tekrarlanabilirlik ile yüksek kaliteli kaynak puntaları oluşturulur.
- **Zararlı emisyon yok:** Bu işlem herhangi bir elektrik arkı veya gaz kullanımını içermediğinden, kaynak puntalarını üretmek için çevre dostu bir teknik olarak kabul edilir.
- Kaynak puntaları mükemmel mekanik davranışa sahiptir.
- Yağ çözücü solventlere olan ihtiyacı ortadan kaldırır.

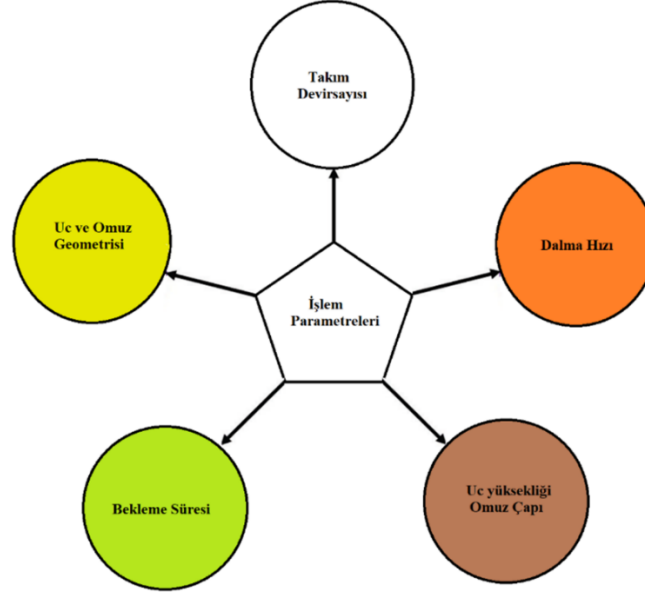
SKNK'nın oluşumunun çalışma prensibi Şekil 3' te şematik olarak gösterilmiştir. Kaynak işlemi dönme, daldırma, karıştırma-bekleme ve geri çekilme olmak üzere dört adımda oluşturulur.



Şekil 3. SKNK'nın çalışma prensibi [52]
(Figure 3. Working principle of SKNK)

3.4. SKNK İşlem Parametreleri (SKNK Process Parameters)

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı işlem parametreleri (Şekil 4) aşağıda belirtildiği gibi 5 başlık altında incelenebilir.



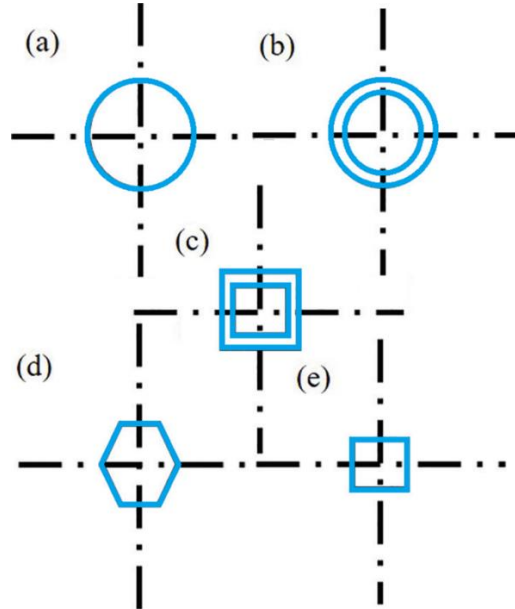
Şekil 4. SKNK'nın işlem parametreleri
(Figure 4. SKNK's operating parameters)

- **Takım Devir Sayısı:** SKNK işlemi Takımın (Uc) dönmesiyle başladığında takımın devir sayısı SKNK işleminde ısı akışı oluşumunu belirleyen önemli bir faktör olarak kabul edilir. Karıştırma işlemi sırasında üretilen ısı miktarı doğrudan üretilen plastikleştirilmiş malzeme miktarıyla ilişkilidir [35]. Daha düşük devirlerde temas yüzeylerinde yeterli ısı üretilmez ve oluşturulan kaynak boncuğu belirsiz tane dağılımına sahip olabileceği gibi bağlanma mukavemetinin de düşük olması naneden olur [38-40].
- **Bekleme Süresi:** Kaynak temas alanının birleşme mukavemetine karar vermede ikinci en önemli kriter bekleme süresidir. Bekleme süresi karıştırma işleminin tamamlanması için geçen süre olarak tanımlanabilir. Karıştırma sırasında sürtünme ısısı lokalize erimeyi teşvik eder bunu plastikleştirilmiş malzeme akışı izler. Genel olarak bekleme süresi doğrudan kaynak boncuğu oluşum miktarıyla orantılıdır [36]. Daha yüksek bekleme süresi daha fazla karıştırmaya (karıştırma) neden olur böylece ısı tesiri bölgesinde tane büyüme hızı artar. [41].
- **Daldırma Oranı:** Birleşme yüzeyine uygulanan kuvvet veya yük miktarı olarak tanımlanır. SKNK işleminde kaynak ucu test yüzeyine bastırılır (daldırılır). Bu nedenle operatörün daldırma işlemini gerçekleştirmek için uc için gerekli miktarda kuvvet veya yük iletilildiğinden emin olması gerekir. Daha düşük bir daldırma oranı düzensiz daldırmaya neden olur ve uygunsuz bir karıştırma bölgesine yol açabilir [37]. Öte yanda aletin aşınma oranı daha yüksek bir daldırma oranıyla artar. Bu nedenle malzeme türüne bağlı olarak daldırma oranı SKNK işleminde nokta kaynakları üretmek için optimize edilir [36].
- **Takımın Uc Yüksekliği ve Omuz Çapı:** SKNK takımını oluşturan iki ana bileşen omuz ve uc dur. Omuz pimi test numunelerinin içine daldırmak için gerekli yükü veya kuvveti sağlar. Dahası omuzun çapı pimsiz SKNK işlemi durumunda oluşan kaynak boncuğu miktarını belirlemede önemli bir rol oynar. Çap ne kadar yüksekse kaynak boncuğu oluşumu o kadar fazla olur ve bunu pimsiz SKNK işleminde daha iyi mekanik özellikler elde etmeye olanak sağlar [42 ve 43]. Öte yandan ucun yüksekliği SKNK işleminde önemli bir faktördür. Bu yükseklik daldırma derinliğini üretilen sürtünme ısısının

miktarını ve karıştırma bölgesinin alanını belirler. Karıştırma bölgesi alanı genişlerse yani büyürse karıştırma sırasında plastikleştirilmiş malzemelerin daha iyi karışması olasılığı vardır. Daha düşük bir uc yüksekliğinde kaynak boncuğu gerekli bağlanma mukavemetini sağlamazken daha yüksek bir pim yüksekliğinde üst plaka daldırma işlemi sırasında daha fazla hasar görür [44 ve 45]. Bu nedenle pimin yüksekliği test numunesinin malzeme türü (Al, Mg ve Cu alaşımları), dönen takımın devri, bekleme süresi, dalma hızı ve test numunesinin kalınlığı gibi diğer faktörlere bağlı olarak seçilmelidir.

- **Takım ve Omuz Geometrisi:** Çalışma koşullarına bağlı olarak omuz ve takım geometrisi değişebilir. Belirtildiği gibi omuz ve takımın iş parçasına doğru daldırmak için gereken kuvveti sağlar. Araştırmacılar SKNK işleminde nokta bağlantıları (kaynaklar) üretmek için uyarlanabilecek üç tip omuz geometrisi önerdiler [46, 47 ve 48].

Önerilen omuz geometrileri: i. İçbükey konik omuz ii. Dışbükey konik omuz iii. Düz silindirik omuz



Şekil 5. SKNK işleminde kullanılan Uc profillerinin görünümü: (a) silindirik uc, (b) konik uc, (c) trapez uc, (d) altıgen uc ve (e) kare uc [52]

(Figure 5. View of the Uc profiles used in the SKNK process: (a) cylindrical Uc, (b) conical Uc, (c) trapezoidal Uc, (d) hexagonal Uc, and (e) square Uc)

Bu üç tür içinde içbükey konik tip, araştırmacıların çoğu tarafından çoğunlukla tercih edilmektedir. Bu üç omuz geometrisine ek olarak, çalışma ortamına bağlı olarak özelleştirilmiş omuz geometrisi kullanılabilir. Herhangi bir omuz geometrisinden bağımsız olarak, uc şu işlevleri yerine getirmelidir. Daldırma işlemi sırasında gerekli kuvvetin veya yükün iletilmesini sağlamak. Karıştırma işlemi sırasında oluşan sürtünme ısını izlemek veya kontrol etmek. Yeniden doldurma SKNK işlemi durumunda, omuz anahtar deliğini aşırı plastikleştirilmiş malzemelerle yeniden doldurmalıdır. FSSW işleminde nokta kaynakları üretmek için farklı pim geometrileri (Şekil 5) önerilmiştir [49-51]. Pim geometrileri: a) Silindirik pim, b) Konik silindirik, pim c) Trapez pim, d) Altıgen pim, e) Kare pim ve bunların dışında kullanılan vida dişli uçlar vardır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

SKNK ile ilgili teknolojik açıdan bakıldığında aşağıda belirtilen sonuçlardan bahsetmek mümkündür.

- SKNK tekniğinde birleşme mekanizması ve malzeme akması, kep oluşumu, yerel erimeler, çatlaklar, kırılmalar ve birleşme bölgesinde meydana gelen intermetalik bileşikler mikro yapı içinde büyük önem arz eden olgulardandır.
- Dönme hızı, bekleme süresi, dalma derinliği, dalma hızı, takım geometrisi, takım profili ve takım eğim açısı dahil olmak üzere işlem parametrelerinin mekanik ve metalurjik özellikler üzerindeki etkileri dikkate alınmalıdır.
- SKNK çoğunlukla hem farklı hem de hafif malzemelerde nokta kaynakları üretmek için tercih edilen sürtünme karıştırma kaynak işleminin bir çeşidi olarak rapor edilir. SKNK farklı metalik alaşımlarda plastikleştirilmiş malzeme akışını karıştırarak yapılır.
- Nokta direnç kaynağında meydana gelen IMB 'ler kırılmalıdır ve çatlakları, kancaları ve diğer kusur biçimlerini teşvik eden arayüz noktaları olarak hareket eder. Böylece nokta kaynaklarının birleşim mukavemetini azaltırlar. Bu olgular dikkate alındığında SKNK büyük avantajlar sağlayarak bu olumsuzlukların minimize edilmesine olanak sağlar.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

FİNANSAL AÇIKLAMA (FINANCIAL DISCLOSURE)

Yazarlar bu çalışma için herhangi bir mali destek almadığını beyan etmiştir.

ETİK STANDARTLAR BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Makalenin yazarları bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Prasa, K.S. and Gupta, A., (2014). A constitutive description to predict high-temperature flow stress in austenitic stainless steel 316. *Procedia materials science*, 6:347-353.
- [2] Zhang, C. and Shirzadi, A.A., (2018). Measurement of residual stresses in dissimilar friction stir-welded aluminium and copper plates using the contour method. *Science and Technology of Welding and Joining*, 23(5):394-399.
- [3] Shankar, S., Saw, K., Chattopadhyaya, S., and Hloch, S., (2018). Investigation on different type of defects, temperature variation and mechanical properties of friction stir welded lap joint of aluminum alloy 6101-T6. *Materials Today: Proceedings*, 5(11):24378-24386.
- [4] Shankar, S. and Chattopadhyaya, S., (2020). Friction stir welding of commercially pure copper and 1050 aluminum alloys. *Materials Today: Proceedings*, 25:664- 667.
- [5] Murugan, R. and Thirumalaisamy, N., (2018). Experimental and numerical analysis of friction stir welded dissimilar copper and bronze plates. *Materials Today: Proceedings*, 5(1):803-809.
- [6] Badarinarayan, H., Hunt, F., and Okamoto, K. (2007). *Friction Stir Welding and Processing*. 235-250 Amerika.

- [7] Şık, A., (2011). Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen magnezyum levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi. SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 14(2):134-140.
- [8] Kilic, M., Kirik, I., Celik, F., and Orhan, N., (2012). The effect of plasma arc process parameters on the properties of dissimilar AISI 1040/ AISI 304 steel plate welds. Materials Testing, 54(10):674-678.
- [9] Ananthapadmanaban, D., Rao, V.S., Nikhil, A., and Rao, K.P., (2009). A study of mechanical properties of friction welded mild steel to stainless steel joints. Materials & Design, 30:2642-2646.
- [10] Kirik, I. and Abak, D., (2022). Friction welding of AISI 1020 with Ramor 500 steel: microstructure, tensile and fatigue strength. Technological Applied Science, 17(1):39-52.
- [11] Kirik, I., Ozdemir, N., Gulumser, M., and Balalan, Z., (2016). Weldability of duplex stainless steels with and without Cu/Ni interlayer using plasma arc welding. Materials Testing, 58(9):717-724.
- [12] Arivazhagan, N., Surendra, S., Satya, P., and Reddy, G.M., (2006). High temperature corrosion studies on friction-welded dissimilar metals. Materials Science and Engineering: B, 132:222-227.
- [13] Ates, A., Turker, M., and Kurt, A., (2007). Effect of friction pressure on the properties of friction welded MA956 iron-based superalloy. Materials & Design, 28:948-953.
- [14] Sarsilmaz, F., Kirik, I., and Ozdemir, N., (2018). Microstructure and mechanical properties of friction welded AISI 1040/AISI 304L steels before and after electrochemical corrosion. Materials Testing, 60(1):49-54.
- [15] Kirik, I., Ozdemir, N., and Sarsilmaz, F., (2012). Microstructure and mechanical behavior of friction welded AISI 2205/AISI 1040 steel joints. Materials Testing, 54(10):683-687.
- [16] Bolshakov, M.V., (1972). The vacuum friction welding of high-melting and high-temperature alloys. Automatic Welding, 25(6):60-62.
- [17] Bilici, M.K., Yükler, A.İ., and Kurtulmus M., (2011). The optimization of welding parameters for friction stir spot welding of high density polyethylene sheets. Materials & Design, 32(7):4074-4079.
- [18] Changbin, S., Zhang, J., and Ge, J., (2011). Microstructures and electrochemical behaviors of the friction stir welding dissimilar weld. Journal of Environmental Sciences, 23:32-35.
- [19] Karlsson, L., Berqvist, E.L., and Larsson, H., (2002). Application of friction stir welding to dissimilar welding. Welding World, 46:10-14.
- [20] Celikyurek, I., Torun, O., and Baksan, B., (2011). Microstructure and strength of friction welded Fe-28Al and 316L stainless steel Materials Science and Engineering: A, 528:8530-8536.
- [21] Kirik, I. and Ozdemir, N., (2012). The design of friction welding machine used in automotive industry and weldability of AISI1040/ AISI304L couples by using frictional energy. Technological Applied Science, 7:60-74.
- [22] Teker, T. and Karakurt, E.M., (2021). Friction welding of high Cr white cast iron to AISI 1030 steel with Ni interlayer. Materials Testing, 63(11):1012-1017.
- [23] Mitelea, I. and Craciunescu, C.M., (2011). Investigations on joining surface hardened steels by friction welding. Materials Testing, 53(1-2):19-25.

- [24] Ozdemir, N. and Orhan, N., (2005). Microstructure and mechanical properties of friction welded joints of a fine-grained hypereutectoid steel with 4% Al. *Journal of Materials Processing Technology*, 166:63-70.
- [25] Li, X., Li, J., and Jin, F., (2018). Effect of rotation speed on friction behavior of rotary friction welding of AA6061-T6 aluminum alloy. *Welding in the World*, 62:923-930.
- [26] Murugan, S., Haq, N., and Sathiya, P., (2020). Effect of welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the frictionwelded dissimilar joints of AA6063 alloy and faying surfacetapered AISI304L alloy. *Welding in the World*, 64:483-499.
- [27] Kirik, I., and Ozdemir, N., (2012). Design and manufacture of PLC controlled continuous drive friction welding machine. *International Conferance Welding Technology*, Ankara, Turkey, 23-25.
- [28] Ozdemir, N., (2005). Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function rotational speed. *Materials Letters*, 59:2504-2509.
- [29] Jeyaprakash, N., Yang, C.H., Susila, P., and Karuppasamy, S.S., (2023). Laser cladding of NiCrMoFeNbTa particles on Inconel 625 alloy: Microstructure and corrosion resistance. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 76(2):599-612.
- [30] Su, P., Gerlich, A., North, T.H., and Bendzsak, G.J., (2006). Energy utilisation and generation during friction stir spot welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(2):163-169.
- [31] İmak, A., Kirik, I., and Cetkin, E., (2020). Sürtünme karıştırma saplama kaynak metodu ile birleştirilen AISI 5140 çeliği ile AISI 316 paslanmaz çeliğin mikroyapısal özelliklerinin belirlenmesi. *Bingol University Journal of Technical Science*, 1(1):41-48.
- [32] Feng, Z., Diamond, S., Santella, M.L., Pan, T.Y., and Li, N., (2004). High strength weight reduction materials-friction stir welding and processing of advanced materials, *Oak Ridge National Laboratory Report DE-AC05-00OR22725*, 101-108.
- [33] Mitlin, D., Radmilovic, V., Pan, T., Chean, J., Feng, Z., and Santella, M.L., (2006). Structure properties relations in spot friction welded (also known as friction stir spot welding) 6111 aluminum, *Materials Science and Engineering*, 441:79-96.
- [34] Mert, S. and Mert, S., (2013). Sürtünme karıştırma nokta kaynak yönteminin incelenmesi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2(1):26-35.
- [35] Mubiayi, M.P., Akinlabi, E.T., Makhatha, M.E., *Current Trends in Friction Stir Welding (FSW) and Friction Stir Spot Welding (FSSW) 978-3-319-92750-3 (eBook)*.
- [36] Lienert, T.J., Stellwag Jr, W.L., Grimmer, B.B., and Warke, R.W., (2003). *Friction stir welding studies on mild steel*. Welding Research American Welding Society and The Welding Research Council.
- [37] Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C., Murch, M.G., Temple-Smith, P., and Dawe, C.J., (1991). Friction stir butt welding. *International Patent No. PCT/GB92/02203*, GB patent application No. 9125978.8
- [38] Mahmat, A., (2024). Investigation of the effect of electrophoresis-assisted milling on machinability. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 59:101875.
- [39] Tosun, N., Rasul, S.Y., Mahmat, A., and Tosun, G., (2024). Enhancing milling performance of 6061 aluminum alloy with

- nanocutting fluid and MQL. *Surface Review and Letters*, 31(07): 2450058.
- [40] Agar, S., Tosun, N., and Mahmat, A., (2024). Effects of Vibration Conditions on Machinability of Aisi 52100 Bearing Steel. *Surface Review and Letters*, 31(02): 2450012.
- [41] Bagheri, B., Alizadeh, M., Mirsalehi, S.E., Shamsipur, A., and Abdollahzadeh, A., (2022). The effect of rotational speed and dwell time on Al/SiC/Cu composite made by friction stir spot welding. *Welding in the World*, 66(11):2333-2350.
- [42] Arici, A. and Mert, Ş., (2008). Friction stir spot welding of polypropylene. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(18):2001-2004.
- [43] Murugesan, P., Satheeshkumar, V., Jeyaprakash, N., Yang, C.H., and Karuppasamy, S.S., (2023). Effect of α Al and Si precipitates on microstructural evaluation and corrosion behavior of laser powder bed fusion printed AlSi10Mg plates in seawater environment. *Metals and Materials International*, 1-8.
- [44] Freeney, T.A., Sharma, S.R., and Mishra, R.S., (2006). Effect of welding parameters on properties of 5052 Al friction stir spot welds. *SAE Technical Paper*, No. 2006-01-0969.
- [45] Bilici, M.K. and Yüklér, A.I., (2012). Influence of tool geometry and process parameters on macro structure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets. *Materials & Design*, 33:145-152.
- [46] Hirasawa, S., Badarinarayan, H., Okamoto, K., Tomimura, T., and Kawanami, T., (2010). Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(11):1455-63.
- [47] Badarinarayan, H., Shi, Y., Li, X., and Okamoto, K., (2009). Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754 O sheets. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(11):814-823.
- [48] Jeyaprakash, N., Yang, C.H., Karuppasamy, S.S., and Duraiselvam, M., (2023). Stellite 6 cladding on AISI Type 316L stainless steel: Microstructure, nanohardness and corrosion resistance. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 76(2):491-503.
- [49] Badarinarayan, H., Yang, Q., and Zhu, S., (2009). Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot welded aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(2):142-148.
- [50] Pathak, N., Bandyopadhyay, K., Sarangi, M., and Panda, S.K., (2013). Microstructure and mechanical performance of friction stir spot welded aluminum 5754 sheets. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 22:131-144.
- [51] Lambiase, F., Paoletti, A., and Di Ilio, A., (2017). Effect of tool geometry on mechanical behavior of friction stir spot welds of polycarbonate sheets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88:3005-3016.
- [52] Natarajan, J., Savio Lewise, K.A., (2024). *Friction stir spot welding, Metallurgical, Mechanical and Tribological Properties*, ISBN 9781032558004, Published July 11, 2024 by CRC Press.