

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAK YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ

Şenol MERT^{1*} Sevda MERT²

¹ Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Müh. Bölümü, 81620, Konuralp, DÜZCE

² Düzce Üniversitesi, Gölyaka MYO, 81800, Gölyaka, DÜZCE

Özet-Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) yöntemi, Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) yönteminden türetilmiş ve son zamanlarda sadece otomobil sektöründe değil aynı zamanda diğer endüstri kollarında da oldukça dikkat çeken yeni bir kaynak yöntemidir. Her iki yöntemde de birleştirme mekanizması aynıdır. Ancak aralarında uygulama farklılıkları vardır. SKNK yönteminin SKK yönteminden en belirgin farkı kaynak takımının düşey doğrultudaki hareketi dışında herhangi bir doğrultuda hareketi olmamasıdır. Yöntemin, SKK yönteminde kullanılan kaynak takımına benzer bir takım, dalma, karıştırma ve geri çekilme olarak belirtilen üç kademeli son derece basit bir uygulaması vardır. SKNK yönteminde meydana gelen kaynağın görünüşü, otomobil gövdelerinin montajı için yaygın olarak kullanılan direnç nokta kaynağına (DNK) benzemektedir. Ancak, otomobil gövde montajı için ilk kaynak yöntemi olan DNK, birçok hafif ağırlıktaki yapı malzemeleri, örneğin alüminyum alaşımları ve ileri yüksek dayanımlı çelikler için problemler oluşturabilmektedir. Dolayısıyla, SKNK yöntemi özellikle otomotiv sanayisinde oldukça sık kullanılan DNK yönteminin yerini alabilecek yeni bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Çeşitli araştırmacıların çalışmaları, bu yöntem için takım geometrisinin dışında takım devir sayısı, takım dalma derinliği ve bekleme süresinin bağlantının çekme kuvveti üzerine oldukça etkisi olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler-Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı, Takım, Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Direnç Nokta Kaynağı

INVESTIGATION OF FRICTION STIR SPOT WELDING METHOD

Abstract-The Friction Stir Spot Welding (FSSW) method is a derivative of the Friction Stir Welding (FSW) process, which is a new process that recently has received considerable attention from the automotive and other industries. In both methods, the joining mechanism is the same. However, there are several important differences between the applications. The most obvious difference FSSW than FSW that there is no translation of the tool in the vertical direction during the welding. The FSSW process consists of three phases of plunging, stirring and retraction with the FSSW tool similar to the FSW tool. The process is extremely simple. The appearance of the resulting weld resembles that of Resistance Spot Welding (RSW) commonly used for auto body

* senolmert@duzce.edu.tr

assembly. Today's primary welding process for auto body structure assembly the RSW process can be problematic for many new high performance light weight structural materials such as Al alloys and advanced high strength steels (AHSS). Therefore, FSSW process will replace RSW that is especially often used at automotive industry attracts attention as a new method. Studies by various researchers have shown quite the effect of tool geometry, tool rotation speed, tool penetration and dwell time on tensile failure load of the joint for this method.

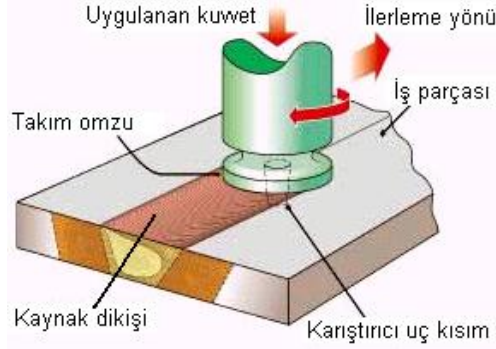
Keywords- Friction Stir Spot Welding, Tool, Friction Stir Welding, Resistance Spot Welding

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv sanayi, gelişen teknolojiyi yakından takip eden ve her türlü gelişmeyi bünyesine adapte edebilme kolaylığına sahip bir endüstridir. Bir otomobilin üretilmesinde binlerce parça kullanılmakta ve yüzlerce farklı tipte işlem gerçekleştirilmektedir. Bu işlemlerden belki de en önemlisi, araç kalitesini %40 oranında etkileyen, aracın gövdesinin ortaya çıkarıldığı kaynak işlemleridir. Bir otomobil fabrikasının kaynak atölyesinde gövdenin imali için kullanılan belli başlı kaynak yöntemleri, direnç nokta kaynağı, direnç dikiş kaynağı, metal aktif gaz (MAG) kaynağı, saplama kaynağı ve yumuşak lehimlemedir [1]. Otomotiv sektörü, uzay ve uçak teknolojileri, çelik yapılar, çelik eşya imalatı, hassas cihazların imalatı, elektroteknik, boru üretimi, makine sektörü gibi pek çok alanda kullanılan ince kesitli metal malzemelerin kaynağında yaşanan sorunlar, farklı kaynak türlerinin gelişimini sağlamıştır. İnce kesitli malzemeler yüksek ısı altında kaldıklarında kalıcı şekil bozukluklarına neden olur. Bu nedenle kaynaklama işleminin asgari ısıda ve en kısa sürede gerçekleştirme zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Kaynaklı bağlantıların hızlı bir şekilde en az deformasyonla gerçekleştirilmesi, ekonomik ve kaynak mukavemetinin yüksek olması istenilen yerlerde, elektrik direnç kaynağı ilk seçim olarak karşımıza çıkmaktadır [2]. Ancak son yıllarda geliştirilen kaynak yöntemleri, direnç nokta kaynağı gibi özellikle otomotiv sanayisinde halen kullanılmakta olan kaynak yöntemlerinin yerini almaya adaydır. Bu anlamda, direnç nokta kaynağının alternatif kaynak yöntemi Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (SKNK) olarak ifade edilmektedir.

SKNK yöntemi, Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) yönteminden türetilmiş ve son zamanlarda sadece otomobil sektöründe değil aynı zamanda diğer endüstri kollarında da oldukça dikkat çeken yeni bir kaynak yöntemidir [3, 4]. Yöntemin birleştirme mekanizması her iki yöntemde de aynıdır. Ancak aralarında uygulama farklılıkları vardır.

SKK yöntemi 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde (TWI: The Welding Institute) geliştirilen ve halen üzerinde oldukça fazla araştırma yapılan bir katı faz kaynak yöntemidir [3, 5-8]. Şekil 1'de verilen bu yöntemde, dönen silindirik omuzlu bir takım alın altına getirilmiş levhaların arasına ilerletilir. Kaynakta kullanılan uç, kaynaklanacak plakaların kalınlığından biraz daha kısadır ve çapı da yaklaşık olarak kaynaklanacak plakaların kalınlığına eşittir. Omuz kısmının çapı kaynak ucunun üç katı kadar olabilir. Kaynak takımı (omuz kısmı ve kaynak ucunu içerir) ve kaynaklanan malzeme arasındaki sürtünmeden ortaya çıkan ısı, kaynaklanan malzemenin erime sıcaklığından daha düşük bir sıcaklıkta yumuşamasına neden olur. Omuz kısmının altındaki yumuşamış malzeme sonrasında dönen takımın kaynaklanan plakalar arasındaki birleştirme çizgisi boyunca ilerletilmesi sonucunda ekstrüzyona maruz kalır [9-11].



Şekil 1. SKK yönteminin prensibi (FSW method principle) [9]

SKNK yönteminde ise uygulamada en belirgin fark kaynak takımının düşey doğrultudaki hareketi dışında herhangi bir doğrultuda hareketi olmamasıdır [8, 12, 13].

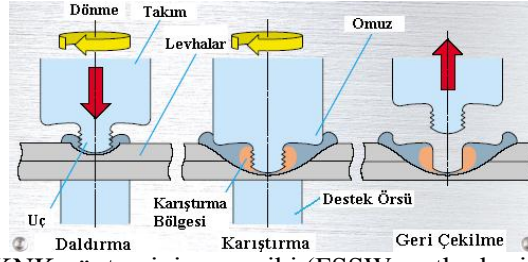
2. YÖNTEM (METHOD)

SKNK yöntemi, 1993'de Mazda tarafından geliştirilmiş [3, 4] ve ilk olarak yine Mazda tarafından 2003 RX-8'in üretiminde kullanılmıştır. Yekpare alüminyum arka kapı SKNK ile yapılmıştır. Diğer bazı otomobil şirketleri de Al gövde kısımlarının kaynağını SKNK ile yaptıklarını duyurmuşlardır [4, 13-15]. Yöntem ayrıca, alüminyum, magnezyum ve diğer hafif metallerin bindirme bağlantıları için, Kawasaki ağır endüstrisi tarafından geliştirilmiştir [4, 12, 16]. Kaynak sırasında malzemede ergime olmayışı, çarpılmaları minimuma çeker ve daha iyi özellikte bağlantılar sağlar [15]. Yöntemin basit ve çevre dostu olması, uygulanması sırasında duman ve ışın oluşmaması, koruyucu gaz, toz, tel veya elektroda gereksinim duyulmaması, yatırım maliyetinin düşük ve önemli derecede enerji tasarrufu sağlaması, ayrıca otomasyona da yatkınlığından dolayı [3, 16, 17] Amerikan otomotiv endüstrisi için büyük bir ilgi konusu olmuştur. Bu teknolojiyi daha da geliştirmek amacıyla Ford yoğun çalışmalar yapmaktadır [3].

SKNK yönteminde meydana gelen kaynağın görünüşü, otomobil gövdelerinin montajı için yaygın olarak kullanılan direnç nokta kaynağına benzemektedir. SKNK yöntemi bir katı faz kaynak yöntemi oluşu ve diğer özelliklerinden dolayı gövde montajı ve diğer benzer uygulamalar için doğal olarak çekici hale gelmiştir. Oysa otomobil gövde montajı için ilk kaynak yöntemi olan elektrik direnç nokta kaynağı, birçok hafif ağırlıkta yapı malzemeleri, örneğin alüminyum alaşımları ve ileri yüksek dayanımlı çelikler (AHSS) için problemler oluşturabilir. Şimdiye kadar, SKNK yöntemi üzerine araştırma ve geliştirme çabalarının çoğunluğu alüminyum alaşımları üzerine olmuştur. Bununla beraber SKNK yöntemi, AHSS'in kaynağında, hem çelik gereksinimini sağlayan firmalara hem de otomobil kullanıcılarına bazı eşsiz teknik mükemmellikler sunmuştur [13]. DNK ile Al'un birleştirilmesi için, yüksek akım gereksinimi ve bitmiş kaynak bağlantısının kalitesindeki tutarsızlıktan dolayı bu yöntem pek uygun değildir. Günümüzde ise otomotiv endüstrisinde, geleneksel çelik elemanlar yerine hafif alaşımların kullanımı önemli bir şekilde artmıştır. Otomobil gövde ve kapıları için kullanılan Al alaşımları, aracın ağırlığını azaltmayı sağlar. Böylece daha az yakıt kullanımı daha az eksoz gazı çıkışı sağlayacak ve performans artarken, çevrede daha az kirletilecektir [4].

2.1. Yöntemin Uygulanışı (Application of the Method)

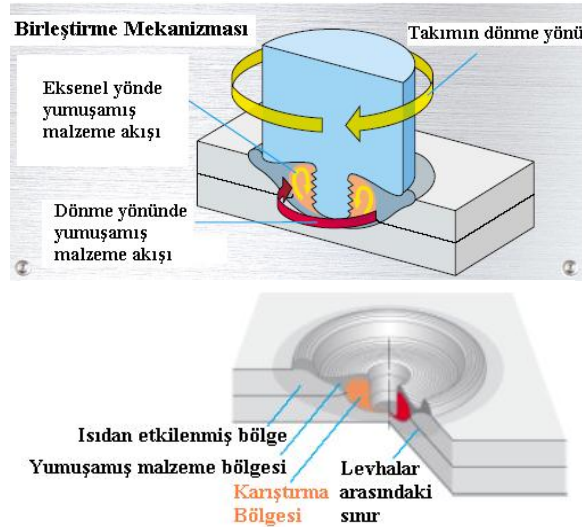
SKNK yönteminin, SKK yönteminde kullanılan kaynak takımına benzer bir takımla, dalma, karıştırma ve geri çekilme olarak belirtilen üç kademeli son derece basit bir uygulaması vardır (Şekil 2) [3, 7, 8, 12, 13, 16, 18-20]. Bu üç aşama sırasıyla aşağıdaki gibidir.



Şekil 2. SKNK yönteminin prensibi (FSSW method principle) [16].

1) Daldırma: Belirli bir devirle döndürülen kaynak takımının uç kısmı bindirme kaynağı pozisyonundaki parçalara temas ettiği anda bu aşama başlamış olur. Takımın uyguladığı kuvvet, birleştirilecek parçalar ile takım ucundaki pim arasında sürtünme ısısının ortaya çıkmasını sağlar [3, 16]. Bu sürtünme ısı ile bu bölgede yumuşayan malzeme, takım ucunun iş parçasına dalmasına izin verir. Bu aşama takım omzunun üst parça yüzeyine temas etmesiyle sona erer [3, 16, 19, 20].

2) Karıştırma (Birleştirme): Kaynak takımının omuz kısmı üst parça yüzeyine temas ettiğinden dolayı bu bölgede de sürtünme ısı ortaya çıkmakta ve kaynak bölgesine daha fazla miktarda ısı girişi sayesinde daha geniş bir bölgede malzeme yumuşaması sağlanmaktadır. Yumuşayan malzeme karıştırılarak metalurjik bir bağ takım ucu etrafında oluşmaktadır. Ayrıca, takım omuzu parçalara kuvvet uygulamaya devam ederek iki parça arasındaki birleşme ara yüzeyinin tam temasta olmasını sağlar. Karıştırma safhasında yumuşayan malzemenin iki türlü hareketi mevcuttur (Şekil 3) [16].



Şekil 3. Birleştirme mekanizması (Joining mechanism) [16].

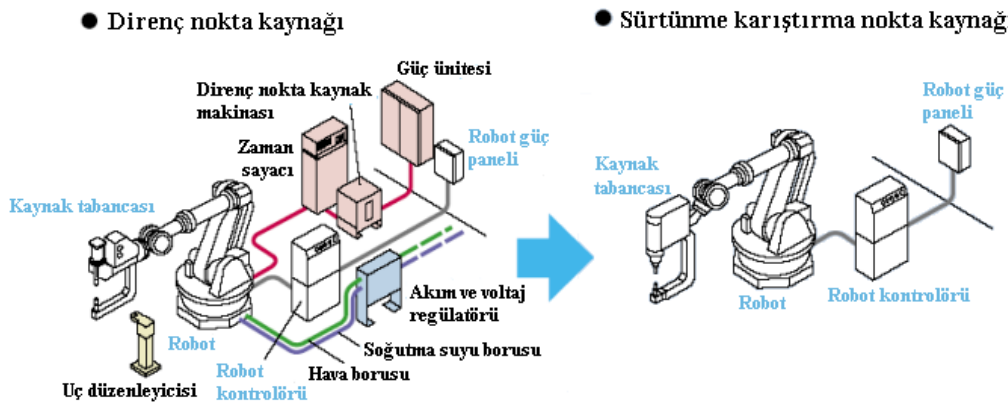
a) Eksenel doğrultuda yumuşamış malzeme hareketi: Takım ucunun çevresindeki yumuşamış malzeme, takım ucundaki vida dişlerinin dönmesiyle eksenel doğrultuda (kalınlık doğrultusunda) hareket eder [16, 19].

b) Dönme yönünde yumuşamış malzeme hareketi: Kaynak takımının dönüşüyle malzeme sürükleniyormuş gibi hareket eder [16, 19].

3) Geri çekilme: Kaynak takımı, birleştirme tamamladıktan sonrada, dönmeye devam ederek geri çekilir [7, 16]. Kaynak takımı parçalardan tamamen uzaklaştığında, kaynak bölgesinin ortasında karakteristik bir boşluk oluştuğu görülür [3, 7, 8, 13, 16, 19-21].

2.2. Yöntemin Direnç Nokta Kaynağı ile Karşılaştırılması (The Process Comparison with Resistance Spot Welding)

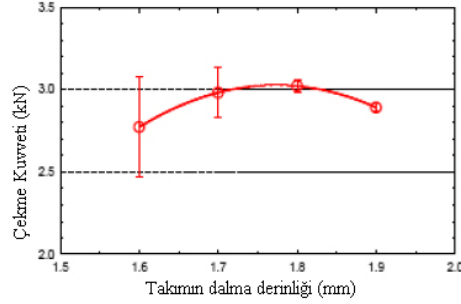
- SKNK yönteminde, malzemelerin ergimiş olması gerekmez. Böylece metalurjik açıdan bir değişim olmaz.
- Direnç nokta kaynağına göre bu yöntemde ortaya çıkan ısı daha az olduğundan dolayı bu ısının getirmiş olduğu deformasyon riskleri azalır.
- SKNK yöntemi ile tüketilen enerji, kaynak takımı için kullanılan servo motorlara gereken elektrik gücü kadardır. Yüksek elektrik akımlarına ihtiyaç duyulmaz. SKNK yönteminde, direnç nokta kaynağındaki teçhizatın tükettiği gücün 1/20'sinden daha az enerji kullanır. Böylece işletme maliyetlerini azaltır ve güç maliyetinde yaklaşık %95 oranında azalma olur.
- SKNK yönteminde kullanılan birleştirici takım, alüminyum alaşımları için kullanıldığı zaman aşınmaya duyarlı değildir. Kullanıcılar, birkaç yüz bin nokta kaynağından sonra bile karıştırıcı uç kısmında aşınma rapor etmemişlerdir. Bu nedenle de takım uzun ömre sahiptir.
- Tozsuz ve dumansız bir kaynak yöntemi olduğu için çevre dostudur. Ayrıca yüksek elektrik akımlarına gerek duyulmaması, elektromanyetik gürültü oluşumunu engeller.
- Kaynak süresini kısaltır.
- Mükemmel renk uyumu vardır.
- SKNK yöntemi daha yakın kaynak noktaları elde etmeye imkan tanır.
- Kaynak ortamının veya kaynak edilecek parçaların çok temiz olması gerekmez.
- Otomobil endüstrisinde kullanılan ileri yüksek dayanımlı çelikler (AHSS), çinko kaplama ve bakır elektrot arasındaki yüksek kaynak kuvveti ve kimyasal reaksiyon yüzünden DNK için kısa elektrot ömrü diğer önemli bir sorundur.
- DNK'da ki aşırı derecede yüksek soğutma oranı yüzünden, ileri yüksek dayanımlı çeliklerin kaynak özelliği önemli oranda düşmekte ve kaynak bölgesinde katılaşma sırasında yüksek oranda hassas mikroyapılar gelişerek, çatlak ve kusurlar oluşabilmektedir.
- SKNK ve DNK yöntemleri, kullanılan donanım açısından karşılaştırıldığında, SKNK yönteminin oldukça basit bir donanıma sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4). Ne soğutma suyuna ne de sıkıştırılmış havaya gerek vardır. Donanım ve çalışma maliyetlerindeki büyük ölçüde azaltılmasını sağlar. Bu nedenle basit ve ekonomik bir yöntemdir.
- SKNK yönteminin metal malzemelere ilaveten plastik malzemelere de uygulanabilmesi, yöntemle önemli bir avantaj kazandırmıştır [4, 13, 16-18, 22-25].



Şekil 4. SKNK ve DNK yöntemlerinin donanım açısından karşılaştırılması (Comparison of FSSW and RSW equipment) [16].

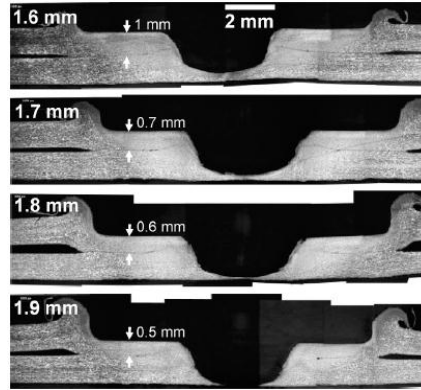
3. SKNK YÖNTEMİ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR (STUDIES ON THE FSSW METHOD)

ORNL’de (Oak Ridge National Laboratory) yapılan çalışmada, 6111-T4 alüminyum alaşımı levhaların SKNK ile bindirme kaynağında kaynak takımı dalma derinliğinin birleştirme kuvvetine olan etkisi incelenmiştir. Şekil 5’te verilen grafik dalma derinliğinin çekme kuvvetini bir değere kadar arttırdığı sonrasında ise düşürdüğünü göstermektedir [3, 4].



Şekil 5. SKNK ile birleştirilmiş 6111-T4 numuneler için dalma derinliği ile çekme kuvveti arasındaki değişim (Variation in tool penetration with tensile failure load for 6111-T4 samples joints with FSSW) [3].

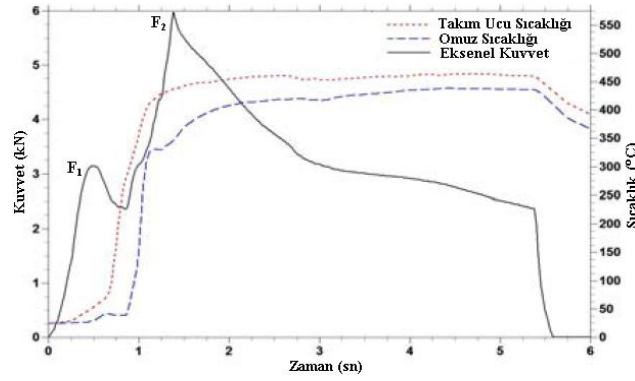
Şekil 6’da kaynaklı bölgenin kesit fotoğrafları verilmiştir. Dalma derinliğinin artışıyla üst Al levhaların kalınlığında omuzun sıkıştırılmasıyla belirgin bir azalma olduğu görülmektedir. Omuzun uyguladığı bu baskı sonucunda kaynak bölgesindeki tane boyutunun esas malzemenin tane boyutuna göre yaklaşık 3-5 kat daha küçük olduğu belirlenmiştir [3, 4].



Şekil 6. Bağlantının enine kesitinin düşük büyütme görüntüleri (Low magnification images of the joint cross-sections) [4].

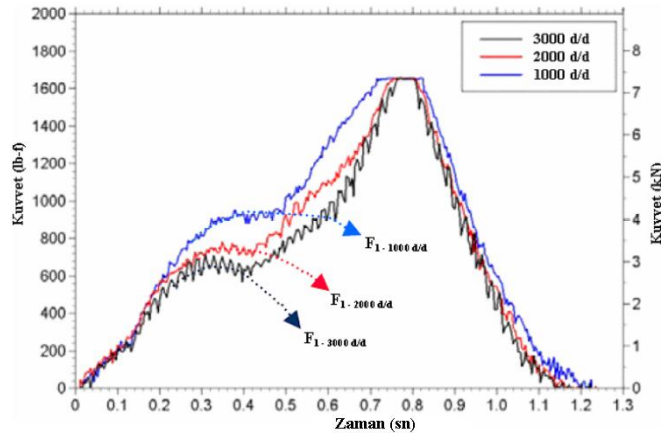
Gerlich ve diğerlerinin yaptığı çalışmada, kaynak işlemi sırasında sıcaklık ve kuvvet değerlerinin tespiti sağlanarak yöntem açıklanmaya çalışılmakla beraber dalma hızının etkisi de incelenmiştir [7].

Elde edilen grafiklerde kuvvetin dalma sırasında iki tepeciği belirlenmiştir (Şekil 7). Takım ucunun malzemeye temasıyla kuvvet artmaya başlamış ancak yumuşayan malzeme F_1 tepeciği sonrası kuvvette düşme oluşturmuştur. Bu düşmeyi takiben tekrar artan kuvvet, takım omzunun malzeme yüzeyine temas ettiğinde en yüksek değerine ulaşmıştır. Sonrasındaki karıştırma evresi boyunca kuvvet azalma eğiliminde olmuştur. Takım ucu ve takım omuz sıcaklıklarının da F_2 değerine kadar arttığı sonrasındaki safhada bu sıcaklıklarını koruduğu görülmüştür [7].



Şekil 7. Mg alaşımı AZ91D malzemenin SKNK sırasında ortaya çıkan maksimum sıcaklıklar (Peak temperatures attained during FSSW of AZ91D Mg alloy) [7].

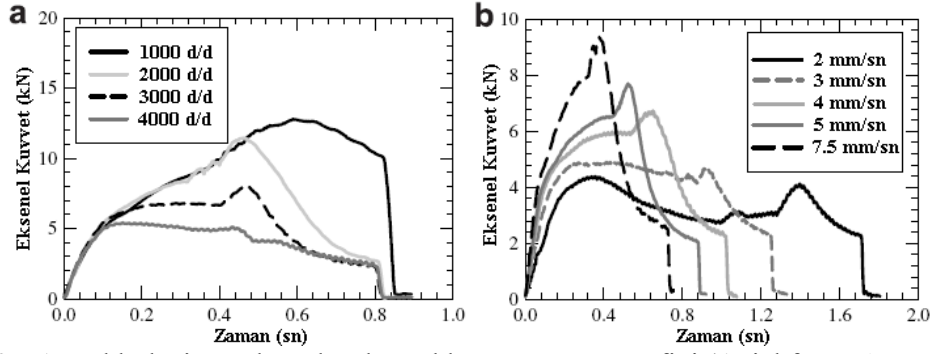
Kaynak parametrelerinden biri olan dalma hızının artırılması sonucu F_1 ve F_2 kuvvetlerinin de artış gösterdiği bildirilmiştir. Bir diğer parametre olan takım devir hızının artışıyla ortaya çıkan ısı artışı sonucu daha fazla yumuşayan malzemenin F_1 kuvvetinde azalmaya neden olduğu da bildirilmiştir (Şekil 8) [7].



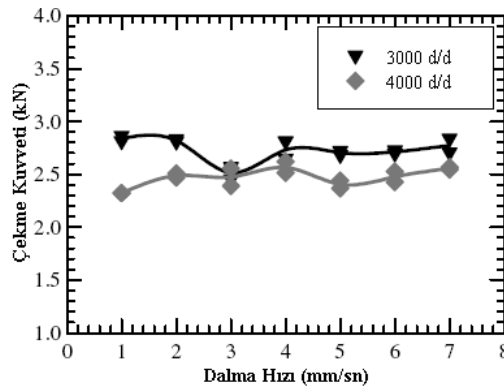
Şekil 8. Al 5754-H12 malzeme için, zamana bağlı olarak eksenel kuvvetin devir sayısı ile değişimi (Effect of RPM variations on the axial force/time output for Al 5754-H12 base material) [7].

Lathabai ve diğerleri benzer bir çalışma ile kalıpta çekilmiş Al-Mg-Si alaşımının bindirme tipi SKNK'da eksenel kuvvet, takımın bekleme süresi, dalma derinliği, dalma hızı ve devir sayısının etkisini incelemiştir [19].

Şekil 9(a)'da farklı devir sayıları için eksenel kuvvetin zamanla olan değişimi gösterilmiştir. Önceki çalışmada olduğu gibi iki tepe noktası söz konusudur. İlk tepe noktası takım ucunun malzemeye dalmaya başladığından malzemenin yumuşama göstermesine kadar ortaya çıkan kuvvet artışı göstermektedir. İkinci tepe noktası ise takım omzunun üst parça yüzeyine temas etmesiyle ulaşılan noktadır. Şekil 9(b)'de ise, takım dalma hızının eksenel kuvvet üzerine olan etkisi görülmektedir. Dalma hızı artışı, eksenel kuvveti de arttırmaktadır. Şekil 10 incelendiğinde ise, iki farklı takım devrinde de, dalma hızının elde edilen kaynaklı bağlantıda çekme kuvvetine pek bir etkisi olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla, bu iki sonuç beraber değerlendirildiğinde dalma hızının kaynak işlem süresini azaltmak amacıyla yüksek tutulabileceği sonucu ortaya çıkmaktadır [19].

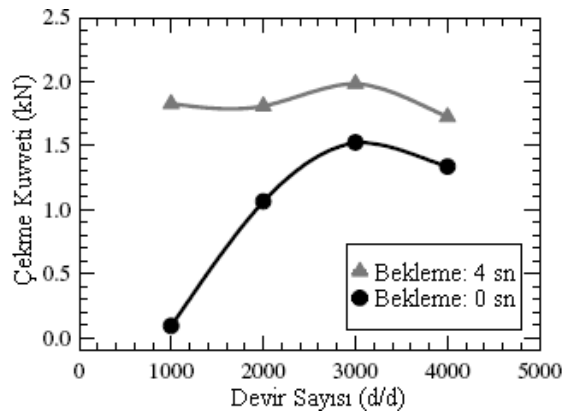


Şekil 9. a) Farklı devir sayılarında, eksenel kuvvet-zaman grafiği (Axial force-time plots for different rotational speeds). b) Farklı dalma hızlarında, eksenel kuvvet-zaman grafiği (Axial force-time plots for different plunge rates) [19].



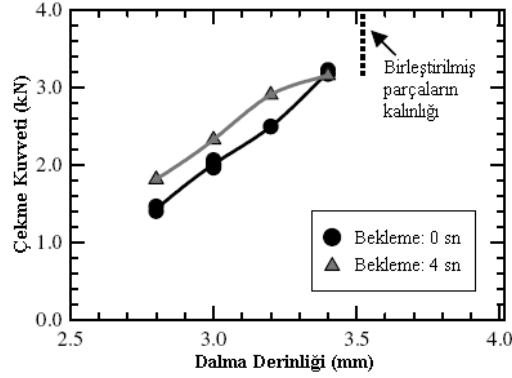
Şekil 10. İki farklı devir sayısı için, dalma hızının çekme kuvveti üzerine etkisi (Effect of plunge rate on tensile failure load for two rotational speeds) [19].

Kaynak bağlantısının dayanımına etki eden en önemli olay, malzemenin yumuşatılması ve yumuşayan bu malzemenin yeterince karıştırılarak bir bağ elde edilmesidir. Dolayısıyla ortaya çıkacak ısı miktarını arttıran devir sayısı ve takım bekleme süresi önemli parametrelerdir. Bu iki parametrenin çekme kuvvetine olan etkileri Şekil 11’de gösterilmiştir. Devir sayısı açısından bakıldığında çekme kuvvetinin belirli bir takım devrine kadar artış gösterdiği ve bu devirden sonra düşüş eğilimine girdiği tespit edilmiştir. Oysa hangi devir olursa olsun, takım bekleme süresinin artışı çekme kuvvetini hep arttırma yönünde sonuç vermiştir [19].



Şekil 11. Bekleme süresi ve devir sayısının çekme kuvveti üzerine etkisi (Effect of rotational speed and dwell time on tensile failure load) [19].

Şekil 12 incelendiğinde de, takım bekleme süresinin çekme kuvvetini artırıcı etkisi görülmektedir. Ancak bu grafik aynı zamanda takım dalma derinliğinin de etkisi olduğunu göstermektedir. Takımın malzemeye dalma derinliği arttıkça çekme kuvveti de artmaktadır [19].



Şekil 12. Dalma derinliği ve bekleme süresinin çekme kuvveti üzerine etkisi (Effect of plunge depth and dwell on tensile failure load) [19].

4. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin bir türevi olan sürtünme karıştırma nokta kaynak yöntemi özellikle otomotiv sanayisinde oldukça sık kullanılan direnç nokta kaynağının yerini alabilecek yeni bir yöntem olarak dikkat çekmektedir. Yapılan çalışmalar bu sektörde kullanılan malzemelerin bindirme tipi bağlantıları için uygun olduğunu göstermektedir. SKNK yönteminin, günümüzde metal malzemelere ilaveten plastik malzemelere de uygulanabilmesi, DNK yöntemine göre önemli bir üstünlüğüdür. Çalışmalar aynı zamanda bu yöntem için takım geometrisinin dışında takım devir sayısı, takım dalma derinliği ve bekleme süresinin bağlantının çekme kuvveti üzerine önemli etkisi olduğunu göstermiştir.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Anık, S., Oğur, A., Vural, M., and Turan, H., (Ekim 2002). Direnç nokta kaynak elektrodu ömrünün deneysel analizi, *Mühendis ve Makina*, 513.
- [2]. T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, (2007). Elektrik Direnç Kaynağı, Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, *Metal Teknolojisi*, Ankara.
- [3]. 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.
- [4]. 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, *Mater. Sci. and Eng.*, 441, 79-96.
- [5]. Dolby, R. E., Sanderson, A., and Threadgill, P. L., (2001). Recent Developments & Applications in Electron Beam and Friction Technologies, *7th International Aachen Welding Conference*, 3rd/4th May, TWI, UK.
- [6]. Thomas, W. M., Nicholas, E. D., and Smith, S. D., (2001). Friction Stir Welding - Tool Developments, *Aluminum Joining Symposium TMS Annual Meeting*, 11-15 February, New Orleans, Louisiana, USA.
- [7]. Gerlich, A., Su, P., North, T. H., and Bendzsak, G. J., (2005). Friction stir spot welding of aluminum and magnesium alloys, *Materials Forum* 29, 290-294.

- [8]. Awang, M., Mucino, V. H., Feng, Z., and David, S. A., (2005). Thermo-Mechanical Modeling of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process: Use of an Explicit Adaptive Meshing Scheme, *SAE International*, 2005-01-1251.
- [9]. Dawes, J., Friction Stir Welding, (1999). *The Welding Institute*, Abington Hall, , Training in Aluminium Application Technologies Lecture 4410, Cambridge <http://www.twi.co.uk/bestprac/datashts /fswintro.html>, visit date: 1999.
- [10]. Arıcı, A. A., and Sınmazçelik, T., (Mart-Nisan 2004). Plastiklerin kaynaklı birleştirme yöntemleri, *PAGEV Plastik Dergisi*, 124-133.
- [11]. Sınmazçelik, T., and Arıcı, A. A., (Kasım-Aralık 2004). Polimer malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi, *PAGEV Plastik Dergisi*, 142-148.
- [12]. Smith, C. B., Hinrichs, J. F., and Ruchl, P. C., (2006). Friction stir and friction stir spot welding, *Friction Stir Link Inc*, www.frictionstirlink.com, visit date: 21 March 2006.
- [13]. Feng, Z., Santella, M. L., David, S. A., Steel, R. J., Packer, S. M., Pan, T., Kuo, M., and Bhatnagar, R. S., (2005). Friction Stir Spot Welding of Advanced High-Strength Steels-A Feasibility Study, *Oak Ridge National Laboratory, SAE Technical Paper Series*, 2005-01-1248, USA.
- [14]. Mortimer, J., (2005). Jaguar Road Map rethinks self-piercing technology, *Industrial Robot: An International Journal*, 32(3), 209-213.
- [15]. Kimberley, W., (November 2005). Joining up, *Focus Manufacturing*, 36.
- [16]. Kawasaki Heavy Industries Ltd., (2006). A new method for light alloy joining - friction spot joining - kawasaki robot, Japan, www.kawasakirobot.com, visit date: 18 March 2006.
- [17]. Hinrichs, J., (2006). Friction Stir Spot Welding, *Friction Stir Link Inc.*, www.frictionstirlink.com, visit date: 21 March 2006
- [18]. Mert, Ş., and Arıcı, A., (2011). Design of optimal joining for friction stir spot welding of polypropylene sheets, *Science and Technology of Welding and Joining*, 16(6), 522-527.
- [19]. Lathabai, S., Painter, M. J., Cantin, G. M. D., and Tyagi, V. K., (2006). Friction spot joining of an extruded Al-Mg-Si alloy, *Scripta Materialia*, 55, 899-902.
- [20]. Gerlich, A., Su, P., and North, T. H., (2005). Tool penetration during friction stir spot welding of Al and Mg alloys, *Journal of Materials Science*, 40, 6473-6481.
- [21]. Zhang, Z., Yang, X., Zhang, J., Zhou, G, Xu, X., and Zou, B., (2011). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy, *Materials and Design*, 32, 4461-4470
- [22]. Arıcı, A., and Mert, Ş., (2008). Friction stir spot welding of polypropylene, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27, 2001-2004.
- [23]. Yusof, F., Miyashita, Y., Seo, N., Mutoh, Y., and Moshwan, R. (2012). Utilising friction spot joining for dissimilar joint between aluminium alloy (A5052) and polyethylene terephthalate, *Science and Technology of Welding and Joining*, 17, 544-549.
- [24]. Bilici, M., K., and Yukler, A., İ., (2012). Effects of welding parameters on friction stir spot welding of high density polyethylene sheets, *Materials and Design*, 33, 545-550
- [25]. Bilici, M., K., and Yukler, A., İ., (2012). Influence of tool geometry and process parameters on macrostructure and static strength in friction stir spot welded polyethylene sheets, *Materials and Design*, 2012, 33, 145-152