



Yüksek Yoğunluklu Polietilen Levhaların Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağında Kaynak Ucu Geometrisinin Kaynak Mukavemetine Etkisi

Mustafa Kemal BİLİCİ¹, Ahmet İrfan YÜKLER¹, Memduh KURTULMUŞ¹

¹ Marmara Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, 34724, Kadıköy /İSTANBUL

Özet

Bu çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynak birleştirilmesinde kullanılan takımın uç geometrisinin kaynak kopma kuvvetine etkileri incelenmiştir. Dört farklı uç profili (silindirik, konik, vida dişi açılmış silindirik ve üçgen), koniklik açısı, kesit boyutu ve uç uzunluğuna sahip takımlarla oda sıcaklığında kaynak yapılmıştır. Bütün kaynaklarda aynı kaynak parametreleri kullanılmıştır. Kaynak kopma kuvveti çekme makaslama deneyi ile tespit edilmiştir. Kaynak esnasında oluşan kuvvet ölçümü ve dikişlerin kesit incelemesi yapılmıştır. Takım uç profilinin, uç uzunluğunun, uç kesit boyutunun ve koniklik açısının polietilen SKNK birleştirme özellikleri üzerindeki etkileri tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme karıştırma nokta kaynağı, sürtünme karıştırma kaynağı, sürtünme karıştırma nokta kaynak takımı, polietilenin kaynağı, plastiklerin sürtünme karıştırma nokta kaynağı.

Effects Weld Strength of Tool Pin Geometry on Friction Stir Spot Welding of High Density Polyethylene Sheets

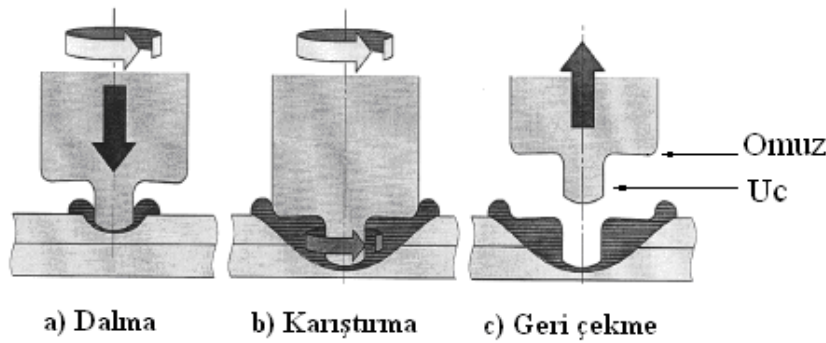
Abstract

The effect of tool pin geometry on static strength in friction stir spot welds of high density polyethylene sheets was studied. Four different tool pin profiles (straight cylindrical, tapered cylindrical, threaded cylindrical and triangular) with different sizes, pin angles and pin lengths were used to fabricate the joints. All the welding operations were done at the room temperature. Lap-shear tests were carried out to find the weld static strength. Weld cross section appearance observations and the welding force measurements were also done. From the experiments the effect of pin profile, pin length, pin angle and pin size on friction stir spot welding formation and weld strength were determined.

Keywords: friction stir spot welding, friction stir welding, friction stir spot welding tool, polyethylene welding, plastics friction stir spot welding.

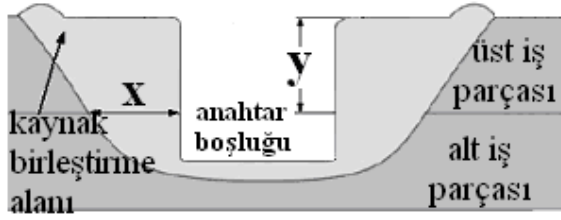
Giriş

Otomotiv endüstrisinde alüminyum sacların elektrik direnç nokta kaynağının sorunlarından kurtulmak için geliştirilen sürtünme karıştırma nokta kaynak (SKNK) yöntemi başarı ile alüminyum [1,2], magnezyum [1,3] ve çelik saclarına [1,4] uygulanmaktadır. Bu kaynak yöntemi, çizgisel kaynak dikişi üreten sürtünme karıştırma kaynağının [5], nokta halinde dikiş üreten bir versiyonudur. SKNK yönteminin uygulama safhaları Şekil 1’de görülmektedir [6]. Kaynak işleminde kullanılan takım uç ve omuz adı verilen iki kısımdan oluşmaktadır [7]. Belli bir hızda dönen kaynak takımının üst üste yerleştirilmiş iş parçalarına belli bir derinliğe kadar dalması, belirlenen derinlikte kaynak takımının belli bir süre dönmesi ve dönme süresi bittiğinde kaynak takımının geri çekilmesi ile iş parçalarının SKNK birleştirmesi gerçekleşir [6]. Yapılan tanımdan anlaşıldığı gibi bu kaynak yönteminin dalma, dönme ve geri çekme adı verilen 3 safhası mevcuttur.



Şekil 1. SKNK yönteminin üç safhası: (a) Dalma, (b) Karıştırma ve (c) Geri çekme [6].

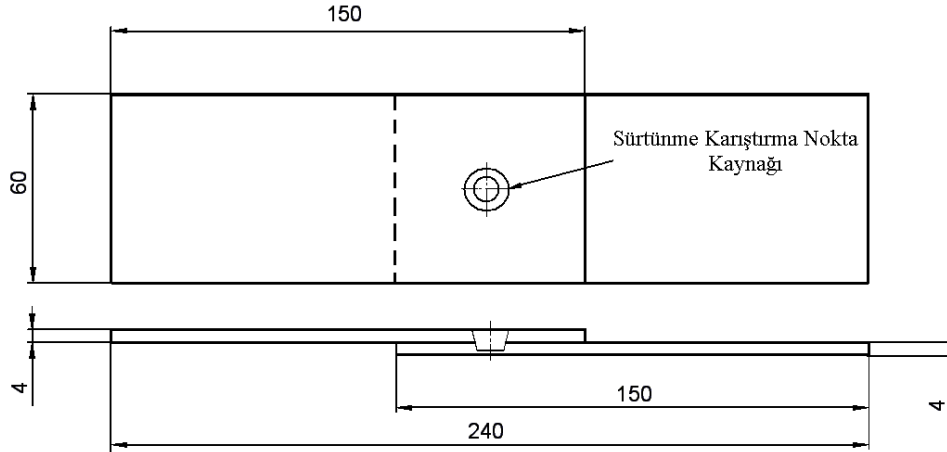
SKNK dalma ve dönme safhalarında kaynak takım ucu ve takım omuzu çevresindeki malzemeleri karıştırmaktadır. Karıştırılan malzemede ise sürtünme sebebi ile ısınma gerçekleşmektedir [7, 8]. Sürtünme ile ısınan malzeme yumuşamaktadır. Takımın dönmesi ile alt ve üst iş parçalarının yumuşamış kısımları birbiri içerisinde karışmaktadır [7]. Kaynak takım omuzunun yumuşamış sıcak malzemeye yaptığı basma kuvvetine kaynak kuvveti adı verilmektedir [9]. Kaynak takımı omuzunun kaynak bölgesine uyguladığı kaynak kuvveti tesiri ile metal iş parçaları arasında katı halde kaynak birleşmesi gerçekleşir [10]. Metallerin SKNK birleştirmesinde takım ucunun boyutu [11], uç profili [12], ucun uzunluğu [13] ve uç üzerindeki dişlerin geometrisi [14] ve konikliği [15] birleştirilecek malzemenin ısınmasında ve karıştırma hareketinde direkt etkili olmaktadır. Böylece takım ucu kaynak dikişi oluşumunu etkileyerek kaynak kopma kuvvetini tayin etmektedir. Uygun olmayan takım uçları ile düşük kopma kuvveti ve kaynak hatası içeren dikişler elde edilmektedir [16-18]. Tipik bir metal SKNK kesiti Şekil 2’de şematik olarak görülmektedir [8]. Bu şekildeki koyu kısımlar iki iş parçasını birleştiren kaynak çekirdeğini ifade etmektedir. Birleştirilen alt ve üst iş parçaları, birleştirmeyi sağlayan kaynak birleştirme alanı (kaynak dikişi) ve kaynak takım uç geometrisine bağlı olarak oluşan karakteristik anahtar boşluğu Şekil 2’de detaylı gösterilmiştir. Kaynak dikişinin 2 önemli boyutu olduğu Şekil 2’de belirtilmiştir. Alt ve üst iş parçalarının temas ettiği düzlemde dikişin genişliği (x) ve iş parçaların temas düzlemi üzerinde kalan dikiş yüksekliği (y) dikişin çok önemli iki boyutudur. Bu iki boyut kaynak kopma kuvvetini doğrudan tayin etmektedir [17-22]. Bu iki boyuttan dikişin kaynak kopma kuvveti üzerindeki etkisi daha fazla olmaktadır [18].



Şekil 2. Bir sürtünme karıştırma nokta kaynağının kesidi. x: Dikiş genişliği ve y: dikiş yüksekliği [8].

Dikiş genişliği, kendisi ile aynı düzlemde olan daire halkası şeklindeki kaynak birleştirme kesit alanının boyutunu direkt olarak tayin etmektedir. Dikiş genişliği arttıkça kaynak birleştirme kesit alanı büyüdüğünden dikişin yük taşıma kapasitesi artmakta ve buna bağlı olarak kaynak kopma kuvveti yükselmektedir [17]. Dikiş yüksekliği azaldıkça kaynak kopma kuvveti düşmektedir [19]. Şekil 2’de kaynak dikişinin takım omuz sınırlarından bir miktar malzeme taşması yaptığı da görülmektedir. Bu taşan malzeme üst parçanın üzerinde halka halinde bulunur.

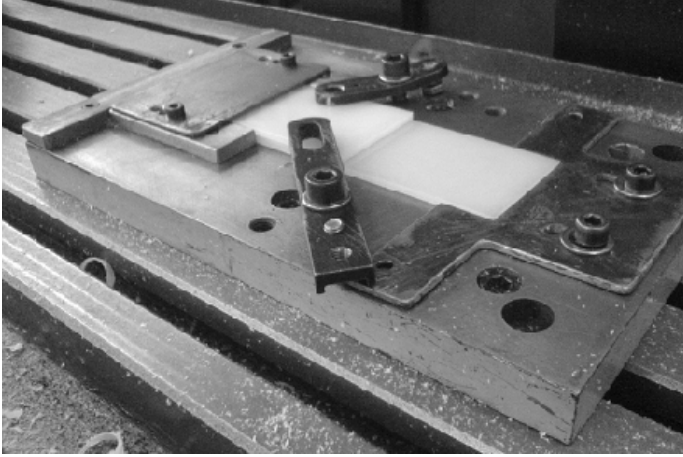
Plastik malzemelerin hem sürtünme karıştırma kaynak [23-26] hem de sürtünme karıştırma nokta kaynak [27-29] özellikleri hakkında çok az yayın mevcuttur. Bu nedenle polietilen levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynak özellikleri üzerinde araştırma yapılmıştır. Bu makalede sadece yüksek yoğunluklu polietilen levhaların SKNK işlemlerinde kullanılan takımların uç geometrilerinin etkileri incelenmiştir.



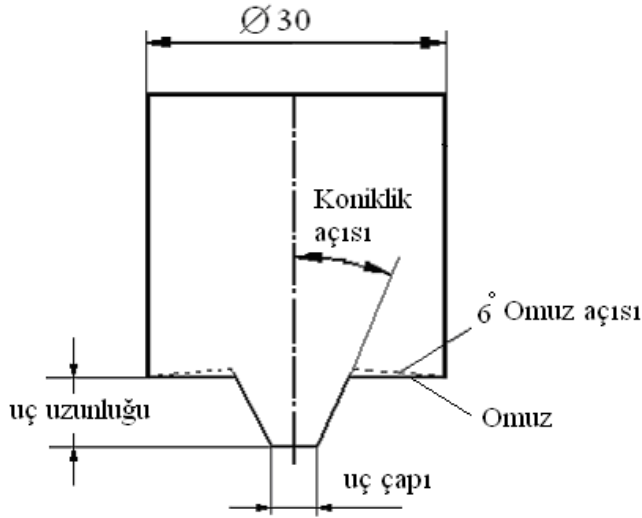
Şekil 3. Çekme-makaslama numunesinin boyutları.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada 4 mm kalınlıkta yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) levhalar kullanılmıştır. Bu levhalardan çekme makaslama kaynak numuneleri kesilmiştir. Deney numunelerinin boyutu ve bunlara uygulanan kaynak Şekil 3’de görülmektedir. Kaynak birleştirme noktasının çekme-makaslama numunesinin tam ortasında teşekkül etmesi için bir bağlama kalıbı kullanılmıştır. Bu kalıp sayesinde bütün deneylerin kaynak işlemleri standart halde gerçekleştirilmiştir. Bağlama kalıbının fotoğrafı Şekil 4’ de gösterilmiştir.



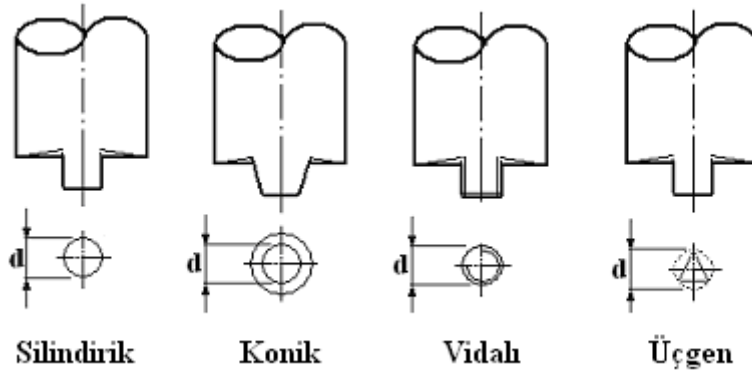
Şekil 4. Bağlama kalıbına yerleştirilmiş çekme-makaslama kaynak numuneleri.



Şekil 5. Kaynak işleminde kullanılan çelik takımın genel görüntüsü.

Kaynak işleminde kullanılan çelik takımların genel görüntüsü Şekil 5’de ve uçların profilleri ise Şekil 6’da görülmektedir. Bütün takımların omuzu 30 mm çapında olup 6° konkav omuz açısına sahiptir. Uç uzunluğu konik takımlarda 3,8 mm ile 6,5 mm arasında değişirken diğer takımların uç uzunluğu 5,5 mm olarak sabit tutulmuştur. Sadece konik takımlarda 25° açığa kadar koniklik açısı verilmiştir. Diğer uçlarda koniklik açısı sıfır olmuştur. Silindirik takımda uç boyutu (d) yani çap 7,5 mm olurken konik uçların taban çapı 5-10 mm arasında değiştirilmiştir. 8 mm çaplı silindirik bir uca M8 standart diş açılmış ve daha sonra dış çap 7,5 mm olacak şekilde tornalama yapılarak vida dişli uç elde edilmiştir. Üçgen uç, döndüğünde 7,5 mm çaplı bir daire oluşturacak şekilde eşkenar uzunlukta üçgen kesit ucu profiline sahiptir.

Kaynak işlemleri universal bir freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Bütün kaynak işlemlerinde takım dönme hızı 710 d/d, takım dalma hızı 0.33 mm/s , takım omzunun üst iş parçasına dalma derinliği en fazla 0,2 mm ve dönme süresi 45 saniye olarak sabit tutulmuştur. Dönme süresi bitince takım dönmesi durdurulmuş ve 30 saniye beklemeden sonra takım geri çekilmiştir. Bütün kaynak işlemleri oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Her deney koşulunda 6 numune hazırlanmıştır.



Şekil 6. Kaynak işleminde kullanılan uçların profilleri.

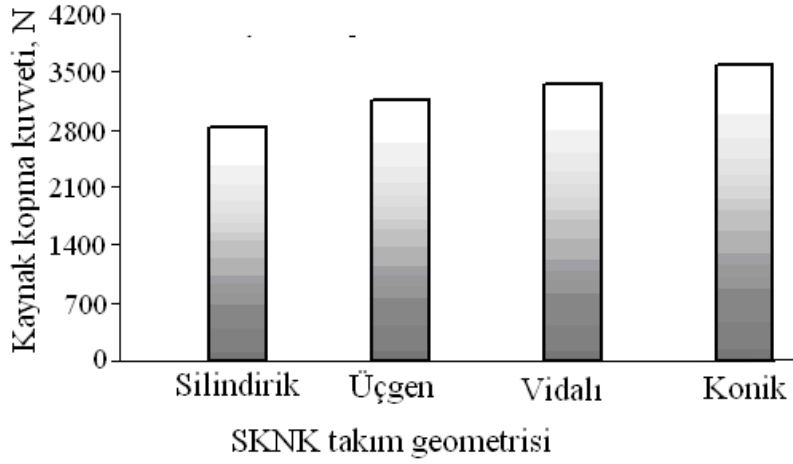
Kaynak işlemleri sırasında kaynak kuvveti ölçümü yapılmıştır. KISTLER 9443B dinamometre platformu ve KISTLER 5019B amplifikatör kullanılarak kaynak takımında oluşan aksel kuvvet ölçülmüştür. Kaynak kuvvetinin kaynak işlemi sırasındaki değişiminin grafikleri elde edilmiştir.

Çekme makaslama deneyleri oda sıcaklığında Instron çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Bütün deneylerde çekme hızı 5 mm/s olarak sabit tutulmuştur. Aynı şartlarda kaynaklanan 5 numunenin testlerinden elde edilen kopma kuvvetlerinin basit aritmetik ortalaması alınmıştır. Çekme-makaslama deneyinden elde edilen ortalama kaynak kırılma sonucu makale içerisinde kaynak kopma kuvveti olarak belirtilmiştir. Kaynak bölgesi boyutlarını tayin etmek için çekme makaslama numunelerin ortasından 30 µm kalınlıkta ince film tabakası çıkartılmıştır. Bu numuneler Leica R6125 model dönen mikrotom ile kesilmiştir. İki cam arasına yerleştirilen dilimlerin 12,88X büyütmede VSC-5000 model video spektral kompratör yardımı ile fotoğrafları alınmıştır.

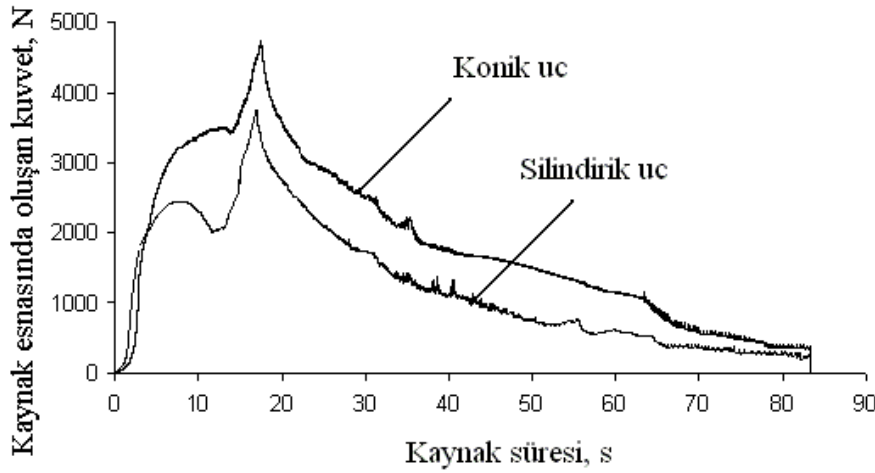
Deneyel Bulgular

Takım uç profilinin kopma kuvveti üzerindeki tesiri Şekil 7'de görülmektedir. Bu deneylerde kullanılan konik takım ucunun taban çapı 7,5 mm, koniklik açısı 15° ve uç uzunluğu 5,5 mm'dir. Bütün takımların uç uzunluğu ve kesit boyutu aynı olduğundan uç profilinin kopma kuvveti üzerindeki tesiri açıkça ortaya çıkartılmıştır. En büyük kopma kuvveti konik uça ve en küçük kopma kuvveti ise silindirik uça elde edilmiştir. Bu farkın sebebini bulmak için bu iki takımın kaynak kuvvet dağılımı (Şekil 8) ve dikiş kesit geometrisi (Şekil 9) elde edilmiştir. 25° koniklik açısı olan ve taban çapı 7.5 mm olan takım ile elde edilen çekirdek mikroyapısı Şekil 9'a ilave edilmiştir. Kaynak işlemi süresince kaynak takımının kaynak bölgesine uyguladığı basma kuvvetinin (kaynak kuvveti) değişimi Şekil 8'de görülmektedir.

Kaynak takımının iş parçasına dalma safhası boyunca kaynak kuvveti artmaktadır. Dalma safhası dalma hızına bağlı olarak yaklaşık 17 saniye sürmektedir. Dalma safhasının sonunda kaynak kuvveti maksimum seviyesine ulaşmaktadır. Takım dalma hareketinin olmadığı dönme safhasında ise kaynak kuvveti sürekli düşme göstermektedir. Konik uça maksimum kaynak kuvvetinin silindirik uca nazaran % 20 daha fazla olduğu Şekil 8'de görülmektedir. Konik uç çevresindeki malzemede daha fazla sürtünme ısısı oluşmaktadır [16]. Bu durum Şekil 8'de açıkça görülmektedir.



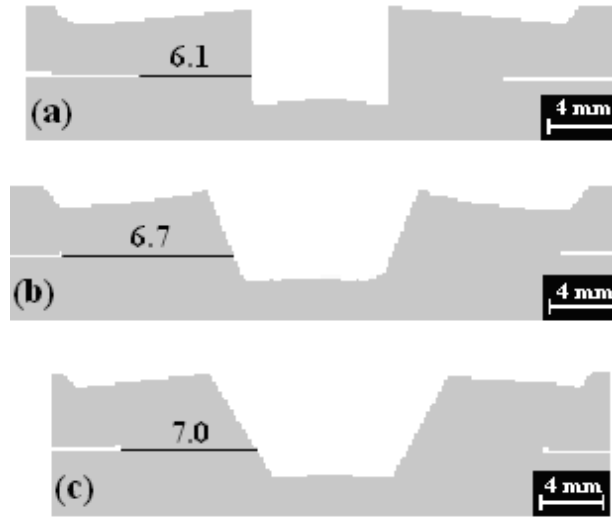
Şekil 7. Takım uç profillerinin kaynak kopma kuvvetine etkisi.



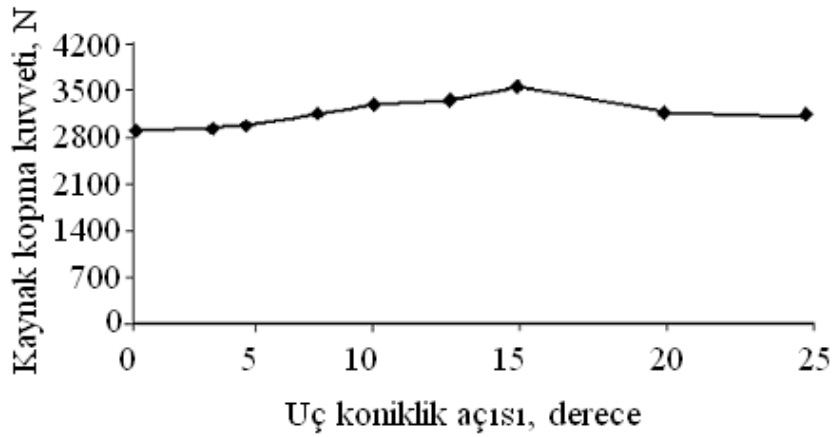
Şekil 8. Kaynak kuvvet dağılımı.

Dönme süresinin başlangıcı olan 17. saniyede ve dönme süresi içerisinde kalan 30. saniyede konik uç silindirik uca nazaran daha fazla kaynak kuvveti uyguladığı görülmektedir. SKNK işleminde oluşan sürtünme ısı ile takım kaynak kuvveti arasında doğrusal ilişki mevcuttur [6]. Yüksek kaynak kuvveti kaynak bölgesinde daha fazla ısı üretmekte ve dolayısıyla malzemenin daha çabuk ve daha fazla ısınmasını sağlamaktadır. Bu nedenle 15° konik ucun oluşturduğu dikişin genişliği silindirik uç dikişinden daha fazla olmaktadır (Şekil 9). Takım ucunun koniklik açısı arttıkça dikiş genişliğinin arttığı Şekil 9’da görülmektedir. En düşük dikiş genişliği silindirik uçla (0° koniklik açısı) elde edilirken 25° konik uçla en büyük dikiş genişliği elde edilmiştir. Büyük dikişin genişliği, daha büyük dikiş kesit alanı oluşturduğundan 15° koniklik açısı olan ucun kaynak kopma kuvveti silindirik uçtan daha büyük olmaktadır [30].

Konik uçlarda koniklik açısının tesirini bulmak için 7,5 mm taban çaplı, 5,5 mm uç uzunlukta olan farklı koniklik açısına sahip uçlar ile yapılan deneylerden Şekil 10’daki grafik elde edilmiştir. Koniklik açısı sıfırdan 15 dereceye kadar arttırılınca kopma kuvveti yükselmiştir. Koniklik açısının optimum değeri 15° olmaktadır.



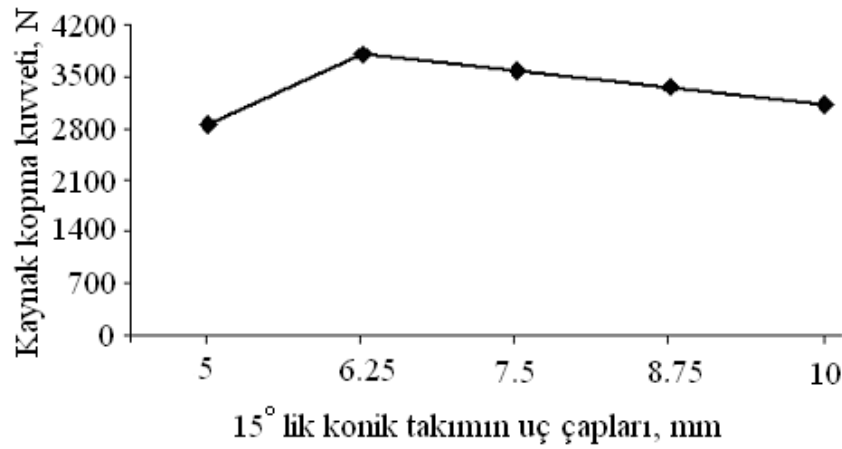
Şekil 9 . Takım koniklik açısının dikişin genişliğine etkisi. (a) Silindirik uç, (b) 15° konik uç ve (c) 25° konik uç.



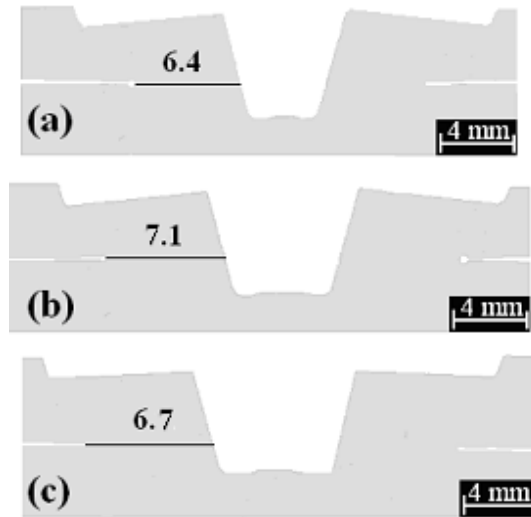
Şekil 10. Uç koniklik açısının kaynak kopma kuvvetine etkisi.

Koniklik açısı 15° değerini aşınca kaynak kopma kuvveti düşmektedir. Bu düşmenin sebebini sadece Şekil 9'daki kesit görüntülerinden faydalanarak açıklamak mümkün değildir. Kaynak kopma kuvveti üzerinde sadece dikişin genişliği etkin olsaydı, 25° konik ucun dikiş kesidi daha büyük dikişin genişliğine sahip olduğundan kaynağın dayanımı 15° konik uçtan daha yüksek olması gerekirdi. Ancak 25° konik uç dikişinde mekanik bölünme [31] gerçekleştiğinden kaynak kopma kuvveti düşmektedir. Sıcaklığı yüksek sıvı termoplastik malzemelerin şekillendirilmesi sırasında uygulanan kalıp basıncının yüksek olması halinde malzemenin moleküler ağırlığında azalma olmaktadır [31]. Mekanik bölünme adı verilen bu olay termoplastik malzemenin kuvvetini azaltmaktadır [32,33]. Kaynak bölgesindeki sıvı polietilene kaynak takımının yaptığı basma gerilmesi kaynak dikişi moleküler ağırlığında azalmaya yol açtığından kaynak kopma kuvveti düşmektedir [34]. Aşırı sürtünme ısısı oluşturan ekstrem kaynak parametreleri ve takım geometrisi ile kaynak birleştirilmesi yapılması halinde kaynak bölgesinde mekanik bölünme etkin olarak kaynak kopma kuvvetini düşürmektedir [34].

Konik uçlarda uç çapının dikiş oluşumu ve kaynak kopma kuvveti üzerindeki etkisini bulmak için deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde 15° konik açısına sahip ve 5,5 mm uç uzunluğunda farklı çapı olan uçlar kullanılmıştır. Çekme makaslama deneylerinin sonuçları Şekil 11’de görülmektedir. Optimum kopma kuvveti 6,25 mm çaplı uçta elde edilmiştir. Bu çapın altında ve üstünde olan çaplı takımlarla kaynak yapıldığında daha düşük kaynak kopma kuvveti elde edilmektedir. Farklı uçların dikişlerine ait kesitler Şekil 12’de görülmektedir. En büyük dikişin genişliği 6,25 mm çaplı çubukta olduğundan bu dikişin kopma kuvveti en yüksek değerde olmuştur. SKNK birleştirmelerinde kaynak birleştirmelerinde kaynak birleştirme kesit alanının kopma kuvveti üzerindeki etkisine bağlı olarak optimum uç çapı elde edilmektedir. 6,25 mm çaplı takım ucunda en büyük dikişin genişliği elde edildiğinden bu dikişin kaynak dayanımı maksimum olmaktadır. Elde edilen optimum çap sadece 15° koniklik açısı olan uçlar için geçerlidir. Koniklik açısı değiştirilirse veya uç yüzeyine dış açılırsa optimum çapta değişiklik olacağı aşıkardır.

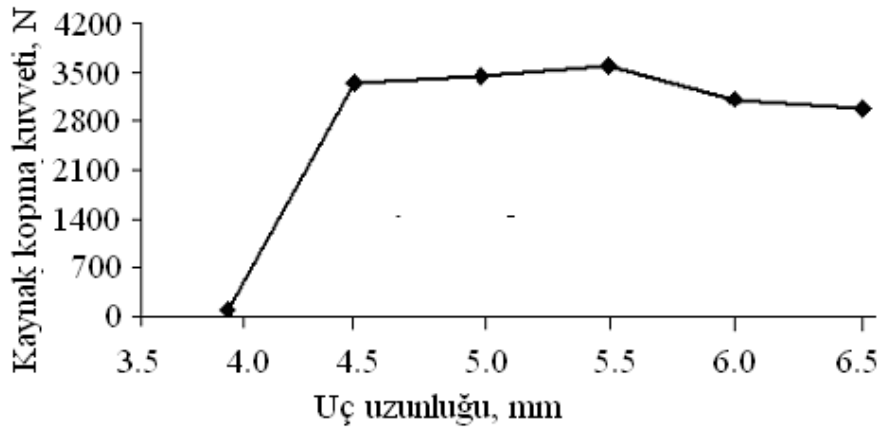


Şekil 11. Konik takım uç çapının kaynak kuvvetine etkisi.

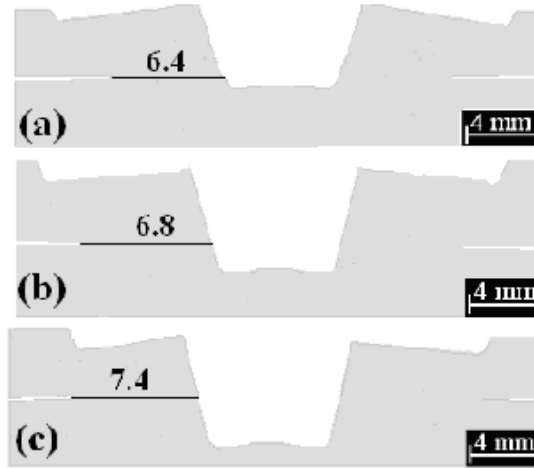


Şekil 12. 15° Konik takım uç çapının kaynak dikişine etkisi (a) 5 mm çaplı takım, (b) 6,25 mm çaplı takım ve (c) 7,5 mm çaplı takım.

7.5 mm çaplı ve 15° koniklik açısı olan konik uçlarda uç uzunluğunun dikiş dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 13'de görülmektedir. 3.8 mm uzunluktaki uçta takım omuzu üst iş parçasına dalmamıştır. Bu nedenle kaynak takım ucunun dışarıya doğru fişkırtmak istediği malzeme, takım omuzu tarafından engellenmemiştir. Bu uç ile yapılan kaynaklarda takım ucu bir matkap görevi yapmıştır. Takımın dalması ile üst iş parçasına ait malzemeler dışarı fişkırmış ve bir kaynak dikişi oluşmamıştır. Bu nedenle kaynak kopma kuvveti hiç yoktur. Kaynak dikişi oluşumu omuzun üst iş parçasına dalması ile başlamıştır. Omuzun üst iş parçasına dalması ile malzeme fişkırması önlenmiş ve omuz sürtünme ısı oluşumuna katkı sağlamıştır [12]. Bu nedenle dalma derinliği ile kaynak kopma kuvveti artmıştır. 5,5 mm takım uç uzunluğunda maksimum kaynak kopma kuvveti elde edilmiştir. Uç uzunluğu 5,5 mm üzerine çıktıkça kaynak kopma kuvveti düşmüştür. Optimum uç uzunluğu 5,5 mm bulunmuştur. Uç uzunluğunun dikiş üzerindeki etkisi ise Şekil 14'de görülmektedir.



Şekil 13. Konik takım uç uzunluğunun kaynak mukavemetine etkisi



Şekil 14. Konik takım uç uzunluğunun kaynak dikişine etkisi. (a) 4,5 mm uç uzunluğu, (b) 5,5 mm uç uzunluğu ve (c) 6,5 mm uç uzunluğu.

Uç uzunluğu arttıkça dikişin genişliği artmaktadır. En büyük dikişin genişliği 6,5 mm çubuk uzunluğunda elde edilmektedir. Ancak bu dikişin dayanımı 5,5 mm uzunluktaki ucun dayanımından daha düşük olması (Şekil 13), bu dikiş oluşurken mekanik bölünmenin gerçekleştiğini göstermektedir. Ayrıca takım ucunun ve omuzun oluşturduğu ısının malzemenin her noktasına eşit miktarda transfer olması düşünülemez. Bu yüzden halka çapı

artıkça halkanın dış kısımlarına gelen ısı azalmakta ve bu kısımların yeteri kadar yüksek sıcaklıklara ulaşmasını engellemektedir. Kaynaklanmış bölgenin alanı artmış olsa da halkanın dış kısımlarında sıcaklığın daha düşük olması nedeniyle kaynak kalitesinde ve kaynak kopma mukavemetinde azalma meydana gelmesi kaçınılmaz olmaktadır. Optimum kaynak dayanımına bağlı olarak, eşit kalınlıktaki polietilen levhaların SKNK birleştirmelerinde takım uç uzunluğunun toplam iş parçası kalınlığına olan oranının %69 olması gerektiği hesaplanmıştır.

Sonuçlar

4 mm kalınlıktaki yüksek yoğunluklu polietilen levhaların farklı kaynak takım uç geometrisi ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynak deneylerinden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- 1) Konik takım uç profilinin en yüksek kaynak kopma kuvvetine sahip kaynak dikişi oluşturduğu tespit edilmiştir.
- 2) Kaynak takım uç kesit boyutu ve koniklik açısı dikiş oluşumu ve kaynak kopma kuvveti üzerinde etkili olmaktadır. Optimum uç profilinin 15 derece koniklik açısına ve 6,25 mm taban çapına sahip olması gerektiği tespit edilmiştir.
- 3) Takım uç uzunluğunun toplam parça kalınlığının % 69'u kadar olması halinde optimum kaynak kopma kuvveti elde edilmektedir.
- 4) Boyutları optimum takım uç profilinin altında kalan takımlar ile kaynak yapıldığında ufak dikişin genişliği ve dolayısıyla düşük kaynak kopma kuvveti elde edilmektedir.
- 5) Aşırı uç koniklik açısına veya uç uzunluğuna sahip takımlar ile yapılan kaynaklarda büyük dikişin genişliği elde edilmesine rağmen kaynak bölgesi malzemesinde mekanik bölünme meydana geldiğinden kaynak kopma kuvveti düşmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, FEN-DKR-270306-0053 nolu proje kapsamında verdiği destekten ötürü, Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

- [1] Kaluç, E., Taban, E., (2007). Sürtünen Eleman ile Kaynak (FSW) Yöntemi, (Sürtünme Karıştırma Kaynağı)" (Friction Stir Welding), *TMMOB MMO Yayını*, 460 739.
- [2] Fujimoto, M., Koga, S., Abe, N., Sato, Y.S., Kokawa, H. (2009). Microstructural analysis of the stir zone of Al alloy produced by friction stir spot welding. *Weld. Inter.*, 23 (6), 403-410.
- [3] Yin, Y.H., Sun, N., North, T.H., Hu, S.S. (2010). Hook formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds. *J. Mater. Proc. Technol.*, 210 (14), 2062-2070.
- [4] Khan, M.I., Kuntz, M.L., Su, P., Gerlich, A., North, T., Zhou, Y. (2007). Resistance and friction stir spot welding of DP 600: A comparative study. *Sci. Technol. Weld. Joining.*, 12, 175-182.
- [5] Mishra, R.S., Ma, Z.Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Mater. Sci. Eng.*, 50, 1-78.

- [6] Awang, M., Mucino, V.H., Feng, Z., David, S.A. (2005). Thermo-mechanical modeling of friction stir spot welding (FSSW) process: Use of an explicit adaptive meshing scheme", *SAE Inter. Paper.*, 01, 1251-1256.
- [7] Yang, Q., Mironov, S., Sato, Y.S., Okamoto, K. (2010). Material flow during friction stir spot welding. *Mater. Sci. Eng. A.*, 527 (169) 4389-4398.
- [8] Bozzi, S., Helbert, A.L., Baudin, T., Klosek, V., Kerbiguet, J.G., Criqui, B. (2010). Influence of FSSW parameters on fracture mechanisms of 5182 aluminium welds. *J. Mater. Proc. Technol.*, 210, 1429-1435.
- [9] Kaluç, E., Taban, E. (2007). Otomotiv endüstrisinde direnç nokta kaynağına alternatif yeni bir yöntem: Sürtünen elemanla nokta kaynağı (FSSW). *Kaynak Teknolojisi VI. Ulusal Kongresi*, Bildiriler Kitabı, 51- 62, Ankara.
- [10] Gerlich, A., Su, P., North, T.H., Bendzsak, G.J. (2005). Friction stir spot welding of aluminum and magnesium alloys. *Mater. Forum.*, 29, 290-294.
- [11] Kulekçi, M.K., Şık, A., Kaluç, E. (2008). Effects of tool rotation and pin diameter on fatigue properties of friction stir welded lap joints. *Inter. J. Advance Manuf. Technol.*, 36, 877-882.
- [12] Vijay, S.J., Murugan, N. (2010). Influence of tool pin profile on the metallurgical and mechanical properties of friction stir welded Al-10 wt.% TiB₂ metal matrix composite. *Mater. Des.*, 31, 3585-3589.
- [13] Tozaki, Y., Uematsu, Y., Tokaji, K. (2007). Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys. *Inter. J. Machine Tools Manuf.*, 47, 2230-2236.
- [14] Chowdhury, S. M., Chen, D.L., Bhole, S.D., Cao, X. (2010). Effect of pin tool thread orientation on fatigue strength of friction stir welded AZ31B-H24 Mg butt joints. *Procedia Eng.*, 2, 825-833.
- [15] Hirasawa, S., Badarinarayan, H., Okamoto, K., Tomimura, T., Kawanami, T. (2010). Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. *J. Mater. Proc. Technol.*, 210, 455-1463.
- [16] Elangovan, K., Balasubramanian, V. (2008). Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy. *Mater. Des.*, 29, 362-373.
- [17] Hattingh, D.G., Blignault, C., Van Niekerk, T.I., James M.N. (2008). Characterization of the influences of FSW tool geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool., *J. Mater. Proc. Technol.*, 203, 46-57.
- [18] Kaluç, E., Kahraman, B., Coşkun, M.H. (2009). W-5754 Alüminyum alaşımının direnç nokta kaynak (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynak (FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi ve bağlantı özelliklerinin incelenmesi, *4. Alüminyum Sempozyumu, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*, Bildiriler Kitabı, 235- 244, İstanbul.
- [19] Tozaki, Y., Uematsu, Y., Tokaji, K. (2007). Effect of processing parameters on static strength of dissimilar friction stir spot welds between different aluminium alloys. *Fatigue Fracture Eng. Mater. Structures.*, 30, 143-148.
- [20] Badarinarayan, H., Shi, Y., Li, X., Okamoto, K. (2009). Effect of tool geometry on hook formation and static strength of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets", *Inter. J. Machine Tools Manuf.*, 49, 814-823.

- [21] Badarinarayan, H., Yang, Q., Zhu, S. (2009). Effect of tool geometry on static strength of friction stir spot welded aluminum alloy. *Inter. J. Machine Tools Manuf.*, 49, 142-148.
- [22] Kahraman, B. (2009). Otomotiv endüstrisinde kullanılan 5754 alüminyum alaşımlarının direnç nokta Kaynağı (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi, *KOÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- [23] Arııcı, A., Sınmaz, T. (2005). Effect of double passes of the tool on friction stir welding of Polyethylene. *J. Mater. Sci.*, 40, 3313-3316.
- [24] Arııcı, A., Şelale, S. (2007). Effects of tool tilt angle on tensile strength and fracture locations of friction stir welding of polyethylene. *Sci. Technol. Weld. Joining.*, 12, 536-539.
- [25] Squeoi, E.A., Bruno, G., Guglielmott, A., Quadrini, F. (2009). Friction stir welding of polyethylene sheets”, *The Annals of Dunarea de Jos University of Galati, Technol. Machine Building*, 5, 241-246.
- [26] Aydın, M. (2010). Effects of welding parameters and preheating on the friction stir welding of UHMW-polyethylene”, *Polymer-Plastics Technol. Eng.* 49, 595- 601.
- [27] Arııcı, A., Mert, S. (2008). Friction stir spot welding of polypropylene. *J. Reinf. Plastics and Compos.*, 1, 1-4.
- [28] Oliveria, P.H.F., Filho, S.T.A., Santos, J.F., Hage, E., (2010). Preliminary study on the feasibility of friction spot welding in PMMA. *Mater. Lett.*, 64, 2098-2101.
- [29] Bilici M.K., Yükler, A.I., Kurtulmuş, M., (2011). The optimization of welding parameters for friction stir spot welding of high density polyethylene sheets. *Mater. Des.*, 32, 4074- 4079.
- [30] Santella, M.L., Grant, G.J., Feng, Z., Hovanski, Y., (2006). *Friction stir spot welding of advanced high strength steel*. FY Progress Report, Oak Ridge National Laboratory, USA.
- [31] Costa, H.M., Ramos, V.D., Rocha, M.C.G. (2005). Rheological properties of polypropylene during multiple extrusion. *Polymer Testing.*, 24, 86-93.
- [32] Smith, A.P., Spontek, R.J., Ade, H. (2001). On the similarity of macromolecular responses to high energy processes: mechanical milling v.s. irradiation. *Polymer Degradation Stability.*, 72, 519-524.
- [33] Capone, C., Landro, L.D., Inzoli, F., Penco, M., Sartore, L. (2007). Thermal and mechanical degradation during polymer extrusion processing. *Polymer Eng. Sci.*, 47, 1813-1819.
- [34] Gan, Y.X., Solomon, D., Reinbolt, M. (2010). Friction stir processing of particle reinforced composite materials. *Mater.* 3, 329-350.