

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE YAPILAN ALÜMİNYUMUN
KAYNAĞINDA KAYNAK BÖLGESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Aydın ŞİK¹
Özgür KAYABAŞ²

ÖZET

Bu çalışmada; sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle, AA 1050 Alüminyum levhalar alın pozisyonunda birleştirilerek, oluşan bağlantının mekanik özellikleri incelenmiştir. Kaynak esnasında karıştırıcı ucun devir hızı ve kaynak ilerleme hızları değişken parametreler olarak seçilmiştir. Kaynak ilerleme hızı sabit iken, artan karıştırıcı uç devir hızlarında, malzemeye ısı girdisinin arttığı ve malzemede sertlik ve çekme dayanımının düştüğü görülmüştür. Bu nedenle de artan karıştırıcı uç devir hızında; kaynak ilerleme hızı da artırılmış ve malzemeye giren ısı miktarının azalmasıyla, malzemenin mekanik özelliklerinde bir artış olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Al-alaşımları, Sürtünme karıştırma kaynağı, mekanik özellikler, kaynak performansı, sertlik profilleri

**EXAMINATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF WELDING ZONE IN
ALUMINIUM ALLOY PRODUCED BY USING FRICTION STIR WELDING**

ABSTRACT

In this study, by using friction stir welding method AA 1050 Aluminium. Plates were joined in butt position and the mechanical properties of the occurring joint are examined. During welding, rotational speed of the mixer's tip and welding speed are choosen as the variable parameters. While weld peneration rate in accelerating mixer's tip rotational speed was static, it was seemed that heat input increased and hardness and tensile strength of the material decreased. There fore weld penetration rate was increased at the accelerating mixer's tip rotational speed and with the decrease the heat amount entering into the material it was determined that there is an increase in the material's mechanical properties.

Key Words : Al-alloys, Friction stir welding, Mechanical properites, Joint performance, Hardness profiles

¹ Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi, Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Bölümü, Ankara

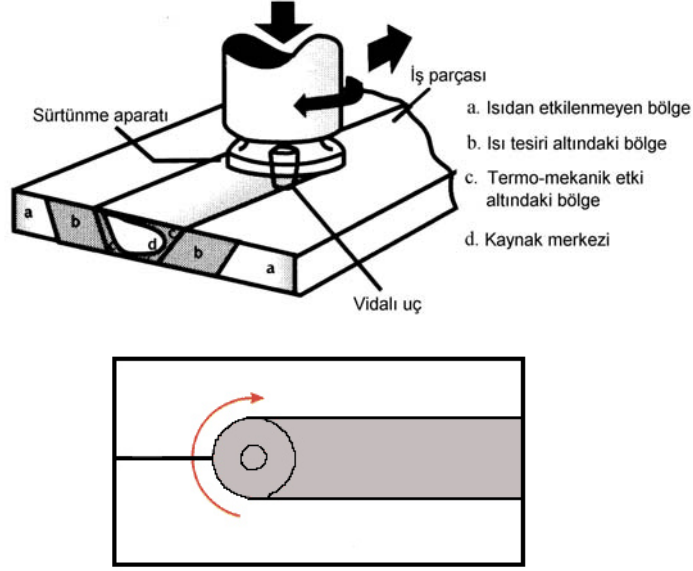
² Teknoloji Öğretmeni, Kayadibi İlköğretim Okulu, Elmadağ - Ankara

1. GİRİŞ

Yeni geliştirilmiş malzemeler genellikle modern birleştirme tekniklerine ihtiyaç duyarlar. Son yirmi yılda alaşımların geliştirilmesinde bu malzemelerin kaynağı ile ilgili büyük ilerlemeler olmuştur. 1990'ların başında geliştirilen bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), geleneksel ergitmeli kaynak yöntemleriyle kaynağı güç olan özellikle yaşlanma sertleştirilmesine tabi tutulmuş alüminyum alaşımlarının kaynağında başarıyla kullanılmıştır (Çam, 2002: 450). Bir katı hal birleştirme işlemi olan sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak konstrüksiyonu güç olan malzemelerin birleştirme işlemleri için kısa kaynak süresi, minimum yüzey hazırlama ve otomasyon kolaylığı gibi kendine özgü avantajlarından dolayı uygun bir alternatif kaynak yöntemidir (Çam, 2003: 47).

Yöntemin uygulanması sırasında duman ve ışın oluşmaması, koruyucu gaz, toz ve ilave tele gereksinim duyulmaması, kaynak ağzı hazırlığı gerekmemesi, tüm pozisyonlarda kaynak yapılabilmesi olanağının bulunması ve otomasyona da yatkınlığı gibi daha birçok üstünlüğün bulunması, yöntemin uygulama alanlarını daha da genişletmektedir (Külekçi ve Şık, 2003: 71). Yöntem uçak, uzay, gemi, otomotiv sektöründe, yakıt deposu, gıda depolama elemanları ve radyoaktif atık madde taşıyıcılarının üretiminde kullanılan 2000, 5000, 6000, 7000 ve 8000 serisi Al-alaşımlarının yanı sıra Cu-alaşımlarının, Ti-alaşımlarının ve bazı tür çeliklerin birleştirilmesinde uygulama alanı bulmaktadır (Kaluç ve Mert, 2003: 103).

Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı Şekil 1'de gösterilmiştir. Birleştirilecek parçalar, alın altına aralarında boşluk kalmayacak şekilde sabitlenir. Yöntemin uygulama aşaması iki farklı şekilde olabilir. Parçaların hareketi söz konusu olabileceği gibi, takımın dönme ve ilerleme hareketi de mümkün olmaktadır (Atlamaz, 2002: 3). Geniş silindirik omuzlu, delme yapabilecek şekilde bir pim (karıştırıcı uç), freze tezgahı ekipmanları ve arka tutucular kullanılarak yüksek devirde döndürülerek; kaynak yapılacak parçalara daldırılır ve kaynak yapılacak uzunluk boyunca ilerletilir. Pim, malzemelere temas ettiğinde sürtünme kaynağındaki duruma benzer bir durum oluşarak temas noktasında ısı, sürtünmenin de etkisiyle hızla artar ve malzemelerin plastik değişimine neden olur. Bu değişim malzemelerin akışını sağlar (Dong vd., 1999: 14). Karıştırıcı uçtan omuza kadar olan bölgedeki kombine sürtünme ısı, gömülmüş olan karıştırıcının çevresi ile malzeme üst yüzeyi ve omuzun temas ettiği temas yüzeyinde yumuşamış bir metal oluşturur; pim etrafındaki malzeme sürtünmeyle ısınır yumuşayarak pimin ucundan arka yüzeye doğru karıştırılır. Karıştırılan malzeme, hidrostatik basınç koşullarında soğuyarak katılaşıp ve birleşme olayı gerçekleşir (Nagasawa ve Osuka, 2004).



Şekil 1. Sürtünen eleman ile birleştirme kaynak yönteminin prensibi (Çam, 2001: 267 Mahoney, 1997: 7)

Şekil 1’de sürtünme karıştırma kaynağında oluşan simetrik olmayan kaynak dikişinin kesitindeki tipik bir içyapı şematik olarak gösterilmiştir. Kaynak bölgesi, farklı mikroyapıların olduğu üç belirgin bölgeden oluşmaktadır (Kaluç ve Mert, 2003: 105). Tipik olarak soğan halkaları, ağaçlardaki yaş halkaları gibi pek çok konsantrik halkalar oluşmaktadır ve kaynak metalinin biçimi çok değişken olarak oluşmaktadır ve bu biçim kaynak edilen alaşım türüne, kaynak işlem parametrelerine bağlıdır (Jonhson ve Kallee, 1999: 751).

2. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, Al-alaşımı levhalar kaynak edilerek; kaynak parametrelerinin birleşebilirliğe ve mekanik özelliklere etkisi test edilmiştir. Al-alaşımı levhaların farklı devirler ve hızlar kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı ile çift taraflı ve tek taraflı alın kaynağı gerçekleştirilmiştir. Elde edilen birleştirmelerde, kaynak kalitesini belirlemek amacıyla gözle muayene, mikrosertlik ölçümleri, çekme ve bükme deneyleri yapılmıştır. Aynı zamanda, batıcı uç kaynak devir hızının ve ilerleme hızının kaynak kalitesine etkisi belirlenmiştir.

Çalışmada ticari saflıkta 4 mm kalınlığındaki AA 1050 [TSE normu Al 99,5 (Etial-5)] Al-alaşımı levhalar alın alına sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle, değişik kaynak parametreleri kullanarak kaynak edilmiştir. Çizelge 1’de malzemenin kimyasal bileşimi ve Çizelge 2’de de malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 1. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi

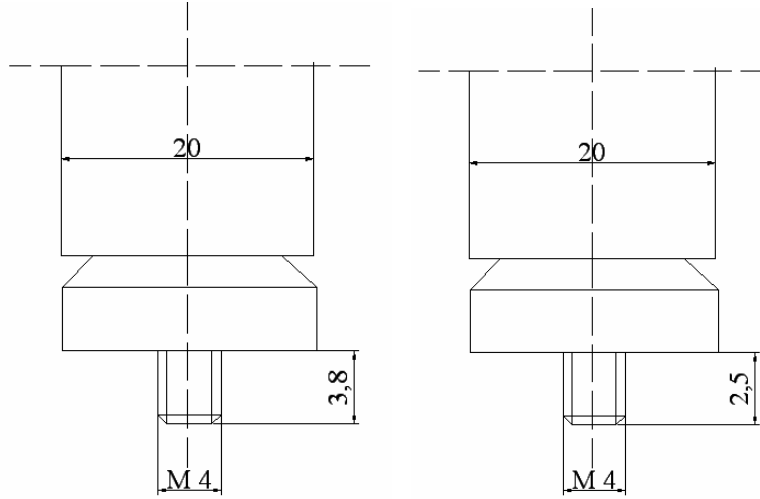
Element	Al	Si	Ni	Zn	Fe	Sn	Ti	Cu
%	99.50	0.10	0.0015	0.05	0.30	0.0010	0.04	0.05

Çizelge 2. Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri

Kondüsyon	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	% Uzama	Sertlik (HB) (Kg/mm ²)
H18	120	140 min.	3	20

Karıştırıcı uç malzemesi, ergime derecesi alüminyum malzemenin yaklaşık üç katı olan 2344 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiştir. Bunun için 2344 sıcak iş takım çeliğinden pim istenilen ölçüde kesilmiş daha sonra tornada Şekil 2’de gösterilen ölçülere getirilip ve yüzeyi taşlanan pimin vida uçlarına M4 paftası çekilerek helisel diş açılmıştır (Şekil 2). Uygulanan ısıl işlemler sonucu pimin sertlik değeri HRC 55 Rockwell olarak ölçülmüştür.

Frezeze bağlanan kısmın çapı 20 mm, boyu 100 mm’dir. Bu ölçüler kaynak için kritik değildir; freze aynasına bağlanacak ölçülerde olması yeterlidir.

**Şekil 2. Deneyde kullanılan karıştırıcı uç (pim) malzemesi**

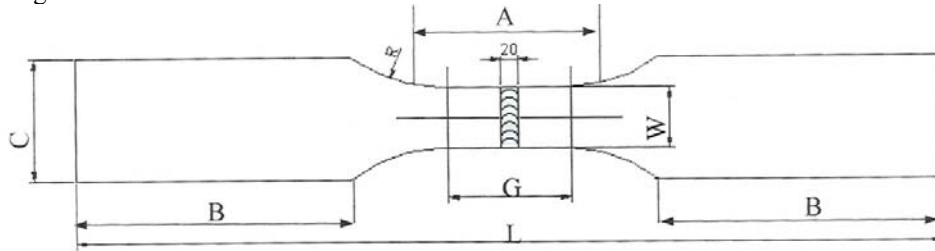
4 mm kalınlığındaki Al-alaşımı parçalar alın kaynağı yapıldığından; karıştırıcı kaynak ucunun çapı 4 mm ve kaynak ucu boyu çift taraftan yapılan birleştirmede 2,5 mm, tek taraftan yapılan birleştirmede 3,8 mm olarak hazırlanmıştır (Şekil 2). Sürtünme karıştırma kaynak işlemi, maksimum devir hızı 3750 dev/dakika olan yarı otomatik freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Levhalar kaynaklanacak kenarları temas edecek tarzda freze tezgahı

tablasına bağlama pabuçları yardımıyla bağlanmıştır. Sürtünme aparatı frezinin düşey miline monte edilerek, kaynak işlemi Çizelge 3’te verilen kaynak parametreleri kullanılarak yapılmıştır.

Çizelge 3. Kaynak işleminde kullanılan kaynak işlem parametreleri

Numune No	Devir Sayısı (dev/dak)	Kaynak İlerleme Hızı (mm/dak)
1 (çift taraflı)	2500	120
2 (çift taraflı)	1500	120
3 (çift taraflı)	1000	120
4 (tek taraflı)	2500	200

Çekme deneyleri Şekil 3’te verilen standart çekme numuneleri kullanılarak, TSE Makine laboratuvarında 40 ton kapasiteli AMSLER marka çekme cihazında 2 ton kuvvet kullanılarak yapıldı. Her deney parametresi için en az 3 çekme numunesi test edilerek, değerler alınmıştır. Şekil 3’te TSE 138’e göre hazırlanan standart çekme deney numunesi şekli gösterilmektedir.

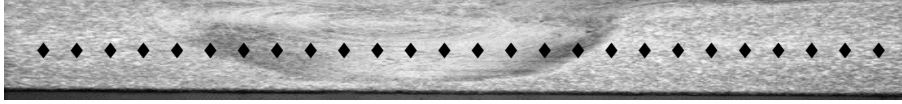


Standart Deney Parçası	(mm)
Anma Genişliği	12,5
G Ölçü uzunluğu	50,0 ± 0,5
W Genişlik	12,5 ± 0,10
T Kalınlık	Malzeme kalınlığı
R Yuvarlama yarıçapı, min.	12,5
L Toplam uzunluk, min.	200
A Gövde uzunluğu, min.	57
B Kavrama uzunluğu	50
C Kavrama genişliği (yaklaşık)	20

Şekil 3. Kaynaklı malzemenen çıkarılan standart deney çekme numunesi

Eğme deney numuneleri; TSE Makine Laboratuvarında en fazla 40 ton kapasiteli AMSLER çekme-eğme cihazında yapılmıştır.

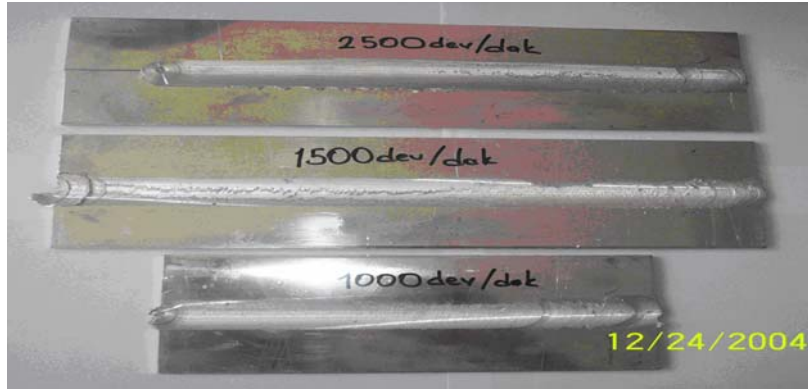
Kaynaklı birleştirilen parçaların sertlik değerleri; kaynak yüzeyinde kaynak dikiş yönüne dik bir hat boyunca ölçülerek grafiklerde verilmiştir. Numunelerin sertlik ölçümleri Vickers (HV) yöntemi ile 3 mm aralıklarla 500 gr deney yükü (HV5) uygulanarak TSE Makine laboratuvarında bulunan “DVK-Matsuzawa” marka sertlik ölçüm cihazında yapılmış ve sertlik profilleri belirlenmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Mikro sertlik ölçümlerinin yapılışının şematik gösterimi

3. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Kaynakların çıplak gözle yapılan muayenelerinde, SKK ile elde edilen kaynakların görüntü ve yüzey pürüzlülüğü yönünden, diğer ergitmeli kaynak yöntemlerine nazaran oldukça düzgün olduğu görülmüştür (Şekil 5).



Şekil 5. 120 mm/dak kaynak ilerleme hızında devir sayısına bağlı olarak dikiş profilleri

Devir sayısı ve kaynak hızına bağlı olarak elde edilen çekme deneyi sonuçları Çizelge 4’de verilmiştir. Elde edilen çekme sonuçları Şekil 9’da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Sonuçlar normal olup dinamik olarak yeniden kristalleşen kaynak metalinin akma ve çekme dayanım değerleri termo-mekanik olarak etkilenen (ITAB) bölgesinden daha yüksek olduğu için çekme deneyi sonucunda kopmalar ITAB’de meydana gelmiştir (Şekil 6,7,8).



Şekil 6. Esas malzemeden çıkartılan çekme deney numuneleri



Şekil 7. 1000 dev/dak-120 mm/dak. kaynak dikişinin çekme deney numuneleri

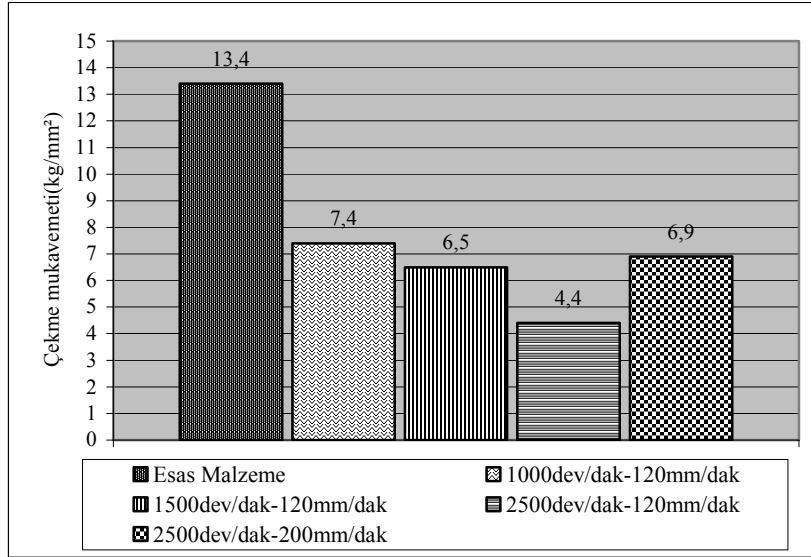


Şekil 8. 2500 dev/dak-200 mm/dak. kaynak dikişinin çekme deney numuneleri

Çizelge 4. Devir hızı ve kaynak ilerleme hızına bağlı olarak numunelerin kaynak sağlamlığının çekme deneyi sonuçları

Devir Sayısı (dev/dak)	Kaynak İlerleme Hızı (mm/dak)	Çekme Dayanımı (Kg/mm ²)	Uzama (%)	Mukavemet Performansı (%) [*]
Esas Malzeme		13,5	15,5	-
Esas Malzeme		13,5	15,5	-
Esas Malzeme		13,4	11,1	-
Ortalama		13,4	14	-
2500	120	4,9	4	37
		4,2	4	32
		4,1	4	31
Ortalama		4,4	4	34
1500	120	6,4	8	52
		5,6	8,6	42
		7,5	16,1	56
Ortalama		6,5	10,9	50
1000	120	7,6	22,2	57
		7,8	26,2	59
		7,8	24	59
Ortalama		7,4	24,1	59
2500	200	5,3	15,5	40
		6,7	18,1	50
		8,7	34,2	65
Ortalama		6,9	22,6	50

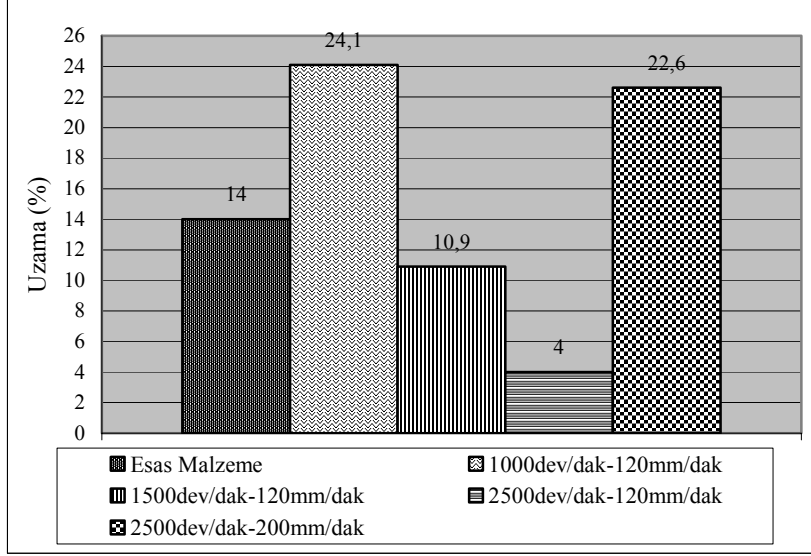
* Performans değerleri baz malzemeden elde edilen ortalama değerlere bölünerek hesaplanmıştır.



Şekil 9. Esas malzeme ve deney numunelerinin sağlamlığının ortalama çekme deneyi sonuçlarının mukayesesi

Çizelge 4. ve Şekil 9. incelendiğinde kaynak ilerleme hızı 120 mm/dak. sabit iken artan kaynak devir hızlarında çekme dayanımının hızla düştüğü görülmektedir. Yüksek devir hızında iken kaynak ilerleme hızının da artırılmasıyla çekme dayanımının tekrar arttığı da görülmektedir. Bunun nedeni; kaynak ilerleme hızı sabit iken artan devir hızlarında, malzemeye ısı girdisi artmaktadır. Böylece kaynaklı bağlantının ITAB bölgesinde mukavemet artırıcı partiküllerin malzeme içinde daha kaba (inhomojen) şekilde çökmesi ile bağlantının çekme dayanımını düşürmektedir. Bununla birlikte devir hızı artırıldığında, kaynak ilerleme hızı da artırılarak malzemeye giren ısı miktarı azaltılabilmekte ve böylece ITAB bölgesinin genişliği karıştırıcı uç devir hızı ve kaynak ilerleme hızı gibi değişken parametrelerle kontrol edilebilmektedir.

Çekme deneyi yapılan numunelerde karıştırıcı uç devir hızına bağlı olarak kaynak hızının malzemelerin % uzama sonuçları Çizelge 4’de verilmiştir. Deney numunelerinin % uzamaya etkisi de Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 10. Kaynak devir ve ilerleme hızının uzamaya etkisi

İlerleme hızı 120 mm/dakikada sabit iken, karıştırıcı uç devir hızının 1000 mm/dak.'dan 1500-2500 dev/dak'ya artması; malzemeye ısı girdisini arttırdığı için % uzama miktarının hızla azaldığı görülmektedir (Şekil 10). Buna bağlı olarak artan devir hızına paralel olarak kaynak ilerleme hızı da artırıldığında (2500 dev/dakikaya 200 mm/dak) % uzama miktarının da arttığı görülmektedir.

Bu sonuçlar çekme deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında en yüksek çekme mukavemetine sahip numunelerin % uzama miktarlarının da yüksek olduğu görülmektedir. Çizelge 5'de özetlenen eğme deney sonuçlarından anlaşılacağı üzere hiçbir deney numunesinin kök kısmında gözle görünür çatlama görülmemiştir. Buda gerçekleştirilen bağlantıların hatasız olduğunun göstergesidir. Normal kaynaklı eğme deneyinin amacı burada kullanılan esas metalin içinde bulunabilecek süreksizlikten dolayı bir çatlamanın olup olmayacağını saptanması amaçlanmıştır ki burada esas metalde bir hata olmayacağı görülmüştür (Şekil 11).

Çizelge 5. Kaynaklı ve kaynaklı numunelerde eğme deneyleri sonuçları

Deney Numunesi	Eğme Açısı	Sonuç
1000 dev/dak-120 mm/dak	180°	Çatlama görülmedi
1500 dev/dak-120 mm/dak	180°	Çatlama görülmedi
2500 dev/dak-120 mm/dak	180°	Çatlama görülmedi
2500 dev/dak-200 mm/dak	180°	Çatlama görülmedi
Esas Malzeme	180°	Çatlama görülmedi



Şekil 11. Bükme deneyi sonucunda kaynak dikişinin görünümü

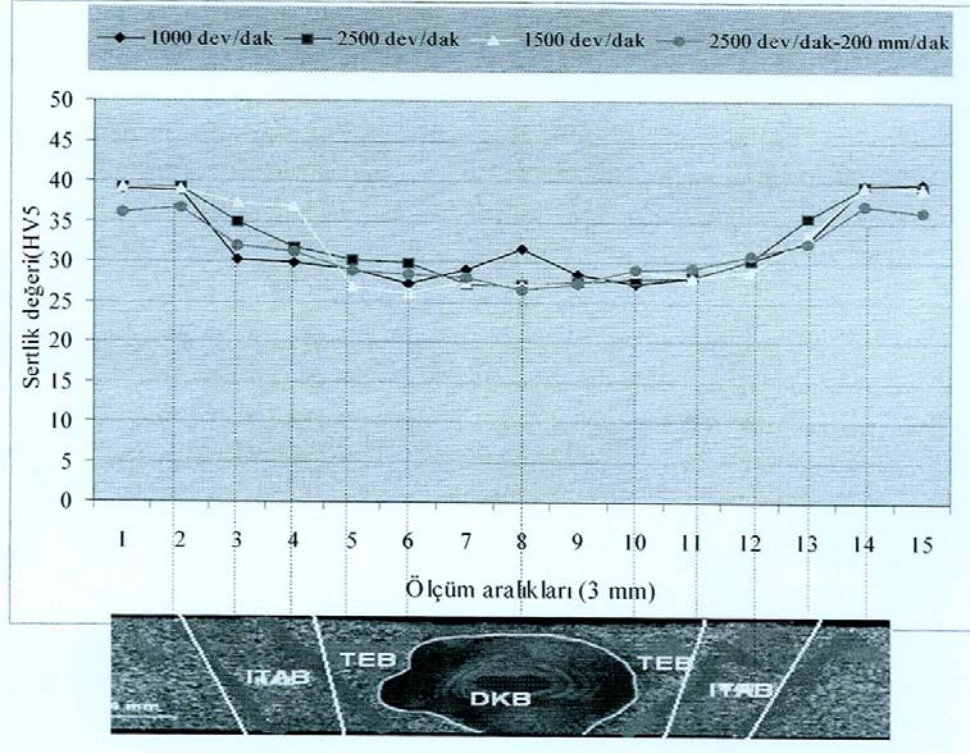
Farklı devir ve kaynak hızlarında kaynaklanan numunelerin kaynak merkezinden ana metale doğru sertlik ölçümleri alınarak, kaynak metali ile ana metal arasındaki sertlik farkları sonuçları her bir bağlantı için; Şekil 12'de kullanılan dört farklı parametreyle yapılan sürtünme karıştırma kaynaklı malzemelerin ilgili sertlik taraması profilleri beraber gösterilmektedir.

Şekil 12 incelendiğinde, sonuçların gayet normal olduğu ve bütün numunelerin sertliklerinin kaynak metalinden, ana malzemeye doğru arttığı görülmektedir. Kaynak merkezinden toparlanma bölgesine doğru sertlikte küçük bir düşüş gözlenirken, toparlanma bölgesinde sertliğin ana malzemeye doğru arttığı görülmüştür. Kaynak merkezinden ana malzemeye doğru 10 mm'den sonra ana malzemenin sertliğinde herhangi bir değişme görülmemiştir. Bu da ısının karıştırıcı omuz bölgesinin dışında malzeme özelliklerini etkilemediğini göstermektedir. Kaynak merkezinde yaklaşık 4 mm'lik bölge dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgedir. Bu bölge deformasyonun en fazla olduğu bölge olduğundan bazı numunelerde kaynak bölgesinde sertliğin yüksek çıktığı düşünülmektedir. Kaynak bölgesinde 20 mm'lik mesafe toparlanma bölgesidir. Yani pim omzunun malzemeye temas ederek; malzemeye ısı girdisinin sağlandığı bölgedir. Bu nedenle ısı girdisinin fazla olmasından dolayı, sertliği ana malzemeye göre daha düşük çıkmıştır.

Numunelerin kaynak alanında göstermiş olduğu sertlik düşüşü birbirine yakın değerlerde çıktığı görülmüştür. En yüksek sertlik değeri, 1000 dev/dak ve 120 mm/dak. kaynak hızında yapılan birleştirmelerde kaynak metalinin sertliği 31,6 HV, ITAB'ın sertliği 29 HV, esas metalin sertliği 39,3 HV ölçülürken, en düşük sertlik değeri ise 2500 dev/dak ve 120 mm/dak. kaynak hızında yapılan birleştirmede kaynak metalinin sertliği 27,1 HV, ITAB'ın sertliği 27,2 HV, esas metalin sertliği ise 39,3 HV olarak ölçülmüştür. Burada da görüldüğü gibi devir sayısı arttıkça sertlik değerinde bir düşme meydana gelmiştir.

Bunun nedeni, yüksek devirde malzemeye giren ısı miktarının fazla olmasından dolayı malzemelerin soğuması daha yavaş olmakta ve bu da sertliği düşürmekte bir etken olmaktadır. Kaynak ilerleme hızının, yüksek devirle yapılan birleştirmede (2500 dev/dak-200 mm/dak) artırılmasıyla malzemenin sertlik değerinde bir artış gözlenmiştir. Bunun nedeni de yüksek kaynak hızlarında malzemeye daha düşük miktarlarda ısı girmesidir ve böylece malzeme daha hızlı soğumaktadır. Meydana gelen sertlik düşüşü diğer kaynak yöntemlerinde meydana gelen sertlik düşüşünden daha az gerçekleşmektedir. Bunun nedeni

sürtünme karıştırma kaynağında malzemeye giren kaynak ısısı miktarı diğer yöntemlere nazaran çok daha düşük olmasıdır.



Şekil 12. Farklı parametrelerle kaynaklanan numunelerin sertlik değerlerinin karşılaştırılması (HV5)

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada; ticari saflıkta alüminyum malzemeler farklı devir ve kaynak hızlarında alın alına getirilerek sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle esas malzemenin çekme dayanımına oranla mukavemet performansı %59'luk bir başarıyla gerçekleştirilmiştir.

- 4 mm kalınlığındaki Al-alışımı levhalar başarılı bir şekilde çift taraftan ve tek taraftan birleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelerin, kaynak dikişi görüntüsünün, diğer kaynak yöntemlerine göre çok daha düzgün olduğu ve herhangi bir temizlik v.b. işleme gerek olmadığı görülmüştür. Kaynak ilerleme hızı sabit iken artan

kaynak devir hızlarında kaynak dikişlerinin ondüleli görüntüsünde malzemeye giren ısı miktarının artmasıyla az da olsa dönme yönünde süreksizlikler, bozulmalar meydana geldiği tespit edilmiştir.

- Kaynak numunelerine uygulanan çekme testlerinde numuneler kaynak dikişinin hemen yanındaki ITAB bölgesinden kopmuştur. Bu bölge termo-mekanik olarak oluşan kaynak ısısının etkisi altındaki bölgedir.
- Esas malzemenin çekme dayanımı $13,4 \text{ kg/mm}^2$ olarak ölçülmüştür. Kaynak ilerleme hızı 120 mm/dak. yapılan birleştirmelerde devir hızı 1000 dev/dak. $7,4 \text{ kg/mm}^2$, 1500 dev/dak. $6,5 \text{ kg/mm}^2$, 2500 dev/dak. $4,4 \text{ kg/mm}^2$ çekme dayanımı ölçülmüştür. Buradan anlaşılacağı gibi artan devir hızlarında kaynaklı malzemenin çekme dayanımında düşüş meydana gelmektedir. Çekme dayanımındaki bu düşüşün nedeni kaynak ilerleme hızı sabit iken, kaynak devir sayısı arttıkça malzemeye giren ısı miktarı artmakta ve mekanik özellikler bakımından zayıf olan kaynaklı bağlantının ITAB bölgesinde mukavemet artırıcı partiküllerin malzeme içinde daha kaba(inhomojen) şekilde çökmesi ile bağlantının çekme dayanımını düşürmektedir.
- 2500 dev/dak. kaynak devir hızında iken kaynak ilerleme hızı 120 mm/dakikadan 200 mm/dak. Çıkarıldığında kaynaklı bağlantının çekme dayanımı $6,9 \text{ kg/mm}^2$ 'ye artmıştır. Çekme dayanımındaki bu artışın nedeni; kaynak ilerleme hızının artırılmasıyla kaynak bölgesine giren ısı miktarının azalması ve ısının tesiri altındaki bölgenin daralmasıdır.
- 180° bükme deneyi sonucunda numunelerin kaynak bölgesinde gözle görünür bir hataya rastlanmamıştır ve deney numunelerinin bükme sonuçları birbiriyle paralel bir davranış göstermiştir.
- Esas malzemenin % uzaması %14 olarak tespit edilmiştir. Kaynak ilerleme hızı 120 mm/dakikada sabit iken artan devir hızlarında 1000 dev/dak. %24,1, 1500 dev/dak. %10,9, 2500 dev/dak. %4'lük bir uzama ölçülmüştür. Çekme dayanımına da paralel olarak artan devir hızlarında % uzama miktarında hızlı bir düşüş meydana gelmiştir. Yine artırılan devir hızlarında, kaynak ilerleme hızı da arttırıldığında 2500 dev/dak. dönme hızında kaynak ilerleme hızı 200 mm/dak. çıkarıldığında % uzama miktarı da %4'den %22,6'ya çıkmıştır.
- Bütün kaynaklı numunelerde esas malzemeden kaynak metaline doğru gidildikçe sertlik değerinde bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Bütün kaynak parametrelerinde(hız ve devir değiştiğinde) kaynak bölgesinde yaklaşık 8-12 HV'lik bir sertlik düşüşü gözlenmiştir. Soğuk haddelenmiş Al-alaşımlarında kaynak esnasındaki ısı girdisi nedeniyle bu sertlik düşüşü normaldir. Meydana gelen sertlik düşüşü diğer kaynak yöntemlerinde meydana gelen sertlik düşüşünden daha az gerçekleşmektedir. Bunun nedeni sürtünme karıştırma kaynağında malzemeye giren kaynak ısısı miktarı diğer yöntemlere nazaran çok daha düşük olmasıdır. Ayrıca daha yüksek devir ve ilerleme hızı kullanılarak soğuma hızı artırılabilir, dolayısıyla tane boyutu rafinasyonu sağlanarak; sertlik düşüşü daha da azaltılabilir.

- En yüksek sertlik değeri, 1000 dev/dak ve 120 mm/dak. kaynak hızında yapılan birleştirmelerde kaynak metalinin sertliği 31,6 HV, ITAB'ın sertliği 29 HV, esas metalin sertliği 39,3 HV ölçülürken, en düşük sertlik değeri ise 2500 dev/dak ve 120 mm/dak. kaynak hızında yapılan birleştirmede kaynak metalinin sertliği 27,1 HV, ITAB'ın sertliği 27,2 HV, esas metalin sertliği ise 39,3 HV olarak ölçülmüştür. Burada da görüldüğü gibi devir sayısı arttıkça sertlik değerinde bir düşme meydana gelmiştir. Bunun nedeni, yüksek devirde malzemeye giren ısı miktarının fazla olmasından dolayı malzemelerin soğuması daha yavaş olmakta ve bu da sertliği düşürmekte bir etken olmaktadır. Kaynak ilerleme hızının, yüksek devirle yapılan birleştirmede (2500 dev/dak-200 mm/dak) artırılmasıyla malzemenin sertlik değerinde bir artış gözlenmiştir. Bunun nedeni de yüksek kaynak hızlarında malzemeye daha düşük miktarlarda ısı girmesidir
- Yüksek ilerleme ve düşük dönme hızı kullanıldığında kaynak bölgesinde sertlik düşüşü daha az olmaktadır. Bunun sebebi, yüksek hızla yapılan kaynaklardaki yüksek soğuma hızlarından dolayı mukavemetlendirici partiküllerin malzeme içinde daha ince dağılmış(homojen) şekilde çökmesidir. Düşük kaynak hızı ve yüksek dönme hızı kullanılarak yapılan birleştirmelerde kaynak bölgesindeki sertlik düşüşünün daha fazla olduğu deneysel olarak gösterilmiştir.
- Yukarıda belirtilen sonuçlardan da anlaşılabilceği gibi kaynak metaline giren ısı miktarı, karıştırıcı uç devir hızı ve kaynak ilerleme hızı ayarlanarak; kontrol edilebilmektedir.

KAYNAKLAR

- Atlamaz, M. (2002), "Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile 6××× serisi alüminyum alaşımlarının alın ve bindirme kaynağının uygulanabilirliğinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Antakya, 1–33.
- Çam, G. (2003), "Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler", *TMMOB Makine Mühendisleri Odası "Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi"*, Kocaeli, 47-62.
- Çam, G. (2002), Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Uygulamaları, *9. Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 8–10 May 2002, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, S. 450–458.
- Çam, G. (2001), Al-Alaşımları İçin Geliştirilen Yeni Kaynak Yöntemleri, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, 19–20 Ekim 2001, İstanbul, S 267–277.
- Çam, G., Yavuz, H. (2001), : Yeni Bir Kaynak Teknolojisi: Sürtünme Karıştırma Kaynağı, *Endüstri ve Otomasyon*, Sayı 51, S. 18-202.

- Jonhson, R., Kallee S. (1999), “Friction Stir Welding”, *Materials World* Volume 7, No.12, p.751–753.
- Kaluç, E., Mert, Ş. (2003), “Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler”, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası “Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi”*, Kocaeli, 103-114.
- Külekci, M.K., Şık, A. (2003), “Sürtünme karıştırma kaynağı ile alüminyum alaşımı levhaların birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7.3 :70–75.
- Lockwood, W.D., Reynolds, A.P. (2003), “Simulation of the global response of a friction stir weld using local constitutive behavior” *Materials Science&Engineering*, A339, 35–42.
- MAHONEY, M.W. (1997), “Science Friction”, *Welding & Joining*, January / February, pp.7-12.
- Nagasawa, T., Otsuka, M. (2004), “Structure and mechanical properties of Friction Stir Weld Joints of Magnesium Alloy AZ31”, [http : // www.mc.mat.shibaura-it.ac.jp /master/ abstract /298110. htm](http://www.mc.mat.shibaura-it.ac.jp/master/abstract/298110.htm) 06.03.2004.