

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI (SKK) : Al-ALAŞIMLARI İÇİN GELİŞTİRİLMİŞ YENİ BİR KAYNAK TEKNOLOJİSİ

Gürel ÇAM

Mustafa Kemal Üniversitesi, Müh.-Mim. Fak., Makina Müh. Böl.,

Ergitme kaynak yöntemleri ile Al-alaşımlarının kaynağında yüksek miktarlarda çatlak ve porozite oluşumu gibi problemler mevcuttur. Bu sorunlar, özellikle yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış yüksek mukavemetli Al-alaşımlarının kaynağında daha bariz olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu alaşımlarının kaynağı esnasında çatlak oluşumunun nedeni, bu malzemelerin tipik olarak geniş katılaşma sıcaklık aralıklığına ve yüksek ısı genleşme katsayısına sahip olmalarıdır.

Lazer ve elektron kaynağı gibi yöntemlere kıyasla ark kaynağındaki yüksek ısı girdisi, bu malzemelerin ısı genleşmelerinin yüksek ve katılaşma sıcaklık aralıklarının geniş olması sonucu özellikle çatlak oluşumuna daha duyarlı yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış Al-alaşımlarında (AA7075 gibi) kaynak dikişinde çatlak oluşumuna neden olur. Ark kaynağındaki yüksek ısı girdisi ayrıca, ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB) tane sınırlarında düşük ergime dereceli fazların oluşumuna ve dolayısıyla bu bölgede çatlak oluşumuna neden olabilir.

Porozite oluşumunun nedeni ise alüminyumun hidrojen çözünürlüğünün sıvı halde katı haldekenden çok daha yüksek olması, dolayısıyla kaynak dikişine kaynak işlemi esnasında giren hidrojenin katılaşma esnasında gaz olarak açığa çıkmasıdır. Vakum ortamında yapılan elektron ışını kaynağı yöntemi porozite açısından en avantajlı ergitme kaynak yöntemidir. Fakat, yüksek sıcaklıkların sözkonusu olduğu elektron kaynağı vakum ortamında yapıldığı için düşük buharlaşma sıcaklığına

sahip alaşım elementleri içeren Al-alaşımlarında kaynak dikişinde alaşım elementi kaybı dolayısıyla mukavemet düşüşü problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Al-alaşımlarının ark kaynağında karşılaşılan diğer bir güçlük bu alaşımların ısı iletkenlik katsayılarının yüksek olması nedeniyle ısının kaynak bölgesine çok hızlı bir şekilde uygulanması zorunluluğudur. Düşük ısı girdisine rağmen lazer kaynağı Al-alaşımlarının kaynağında sorunsuz kullanılamamaktadır. Al-alaşımlarının lazer ışını yansıtması bu yöntemin bu malzemelerde kullanılmasında dikkate alınması gereken diğer bir husustur. Al-alaşımlarının özellikle yaşlandırma sertleştirilmesine tabi tutulmuş türlerin ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmelerinde karşılaşılan bir başka sorun kaynak dikişinde sertleştirici çökeltilerin çözünmesi ve tane sınırı segregasyonu sonucu ve ITAB' de aşırı yaşlanma sonucu sertlik ve mukavemetin düşmesidir. Bu durum kaynak yapılan baz malzeme ile kaynak bölgesinde mekanik uyumsuzluğa (strength mismatch) neden olmakta ve kaynak bölgesinde mukavemet düşüşü (strength undermatching) olarak bilinmektedir. Ayrıca, Al-Li alaşımları ve AA7075 gibi bazı Al-alaşımları ergitme kaynak yöntemi ile kaynak edilememektedirler.

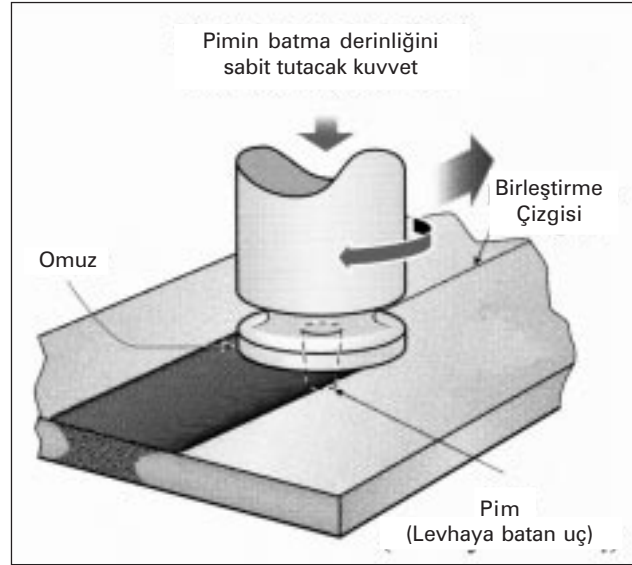
Kısaca özetlersek, birçok mevcut kaynak yönteminin Al-alaşımlarında uygulanmasında özellikle kaynak kabiliyeti daha düşük olan yüksek mukavemetli türlerinde problemler karşımıza çıkmaktadır. Fakat, bu makalede tanıtılacak olan yeni geliştirilmiş sürtünme karıştırma

kaynağı ile Al-alışımlarının kaynağında ticari kaynak yöntemlerinde karşılaşılan bu problemlerin çoğu sözkonusu değildir.

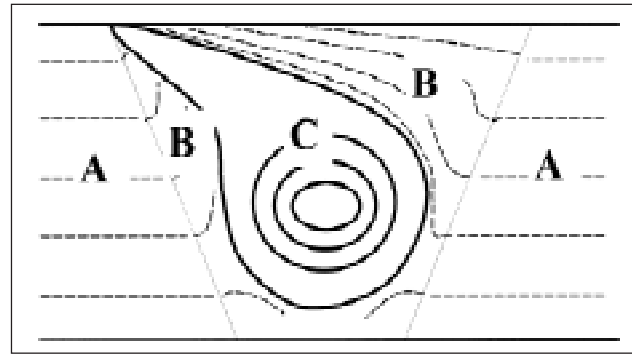
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

1990'lı yılların başlarında The Welding Institute (TWI), İngiltere'de geliştirilen ve patentlenen sürtünme karıştırma kaynağı (friction stir welding), genel olarak levhaların alın kaynağında kullanılmakta olup, diğer sürtünme kaynaklarına göre prensip olarak bazı farklılıklar gösterir [1-10]. Diğer sürtünme kaynaklarında kaynaklanacak parçalar birbiri üzerinde hareket ettirilirken, bu yöntemde tablaya alın altına sabitlenmiş parçalar birbirine sürtünmezler. Yöntem, karıştırıcı (batıcı) uç olarak adlandırılan ve yüksek devirlerde dönen omuzlu bir pimin, kaynak edilecek parçalar bir tabla üzerinde alın altına getirilip sabitlendikten sonra, bu parçaların içine daldırılarak sürtünmeden dolayı meydana gelen ısının tesiri ile parçaları yumuşatması ve çamurumsu bir kıvama gelen malzemenin karıştırılması ve pimin omuz kısmı tarafından sıvanması yoluyla, kaynak yapılacak parçalar boyunca ilerletilmesi suretiyle parçaların birleştirildiği bir sürtünme kaynağı yöntemidir. Yöntemin uygulama şekli Şekil 1'de şematik olarak gösterilmiştir [1-10]. Kaynak bölgesinde oluşan karakteristik iç yapı Şekil 2'de şematik olarak gösterilmektedir [3-11]. Kaynak bölgesi, farklı mikroyapıların oluştuğu üç belirgin bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler, dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB), termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB) ve sıvı hal kaynak yöntemlerinde olduğu gibi ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak adlandırılmaktadır.

Belirli bir pim yüzey geometrisi kullanılarak yapılan sürtünme karıştırma kaynağında elde edilen birleştirme karakteristiklerini belirleyen üç faktör vardır. Bunlar



Şekil 1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının (friction stir welding) Şematik Gösterimi [1-10].



Şekil 2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Oluşan Kaynak Bölgesi İç Yapısının Şematik Görünümü. A: Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB), B: Termodinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (TEB), C: Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (DKB) [3-11].

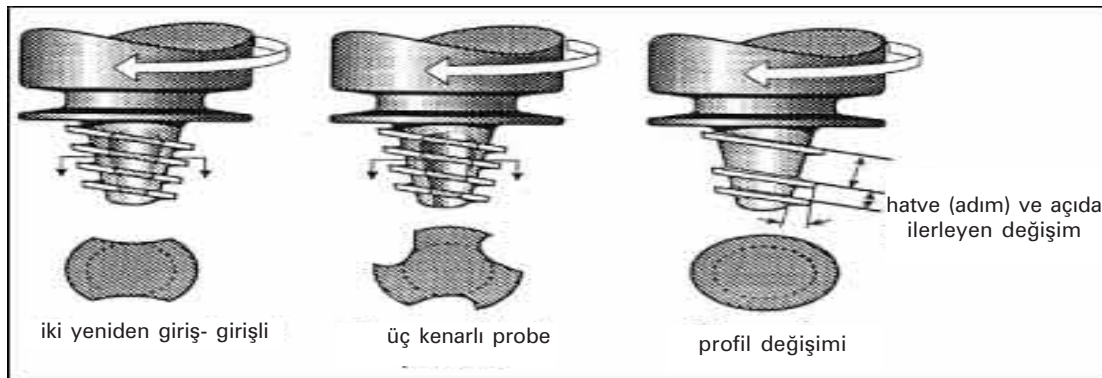
sırasıyla pimin devir hızı, pimin ilerleme hızı ve pimin batma derinliğidir. Bunlardan ilk ikisi rahatlıkla kontrol edilebilmektedir. Fakat, pimin batma derinliği kritik bir faktör olup, kontrol edilmesi güçtür. Batma derinliğinin kaynak işlemi süresince sabit kalması gerekmektedir. Fakat, özellikle uzun levhaların birleştirme işlemlerinde yüzeylerin çok düzgün olmaması durumunda bunu sağlamak mümkün olmayabilir. Bu yüzden kaynak öncesi yüzey hazırlama oldukça kritik olup, bu hususta özen gösterilmesi gerekmektedir.

Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir husus, yeterli hirostatik basınç elde edilemez ise, kaynaklanan levhaların tabana yakın kısımda soğuk birleşme (yetersiz nüfuziyet) oluşumudur [3,10]. Bu sorun yukarı doğru hareket etme eylemindeki çamur kıvamındaki malzemenin aşağıya doğru hareketini kolaylaştırıp kaynak dikişinde kalmasını sağlayabilecek optimum batıcı uç ve omuz dizaynı yapılması, devir hızının artırılması gibi önlemler ile ortadan kaldırılabılır. Bu bağlamda, karıştırıcı uç üzerine verilen profiller (spiral dişler) sayesinde aşağı doğru itme kuvveti sağlanarak malzemenin yukarı doğru akması önlenir. Bu önlem aynı zamanda kaynak bölgesindeki malzemenin omuz altından kaybı sonucu kaynak dikişi içerisinde oluşan tünel şeklinde porozite (boşluk) probleminin de giderilmesini sağlar [3-10]. Batıcı uç omuzu özellikle ince levhalarda sürtünme işlemini dolayısıyla gerekli ısının büyük bir kısmını sağlar. Karıştırıcı uç omuzları önceleri 1-2° eğik yapılırken, daha sonraları omuz profilleri, yani yüzeylerinde yivler (kanallar) bulunan omuzlu takımlar geliştirilmiştir. Omuz yüzeyindeki bu kanallar kaynak sırasında dışarı kaçmaya çalışan malzemeyi engeller, ayrıca takım ucundaki sıkıştırmayı (hidrostatik basıncı) artırır. Dolayısıyla, omuz profili bulunan takımlar kullanılarak daha yüksek hızda kaynak işlemi gerçekleştirilebilir.

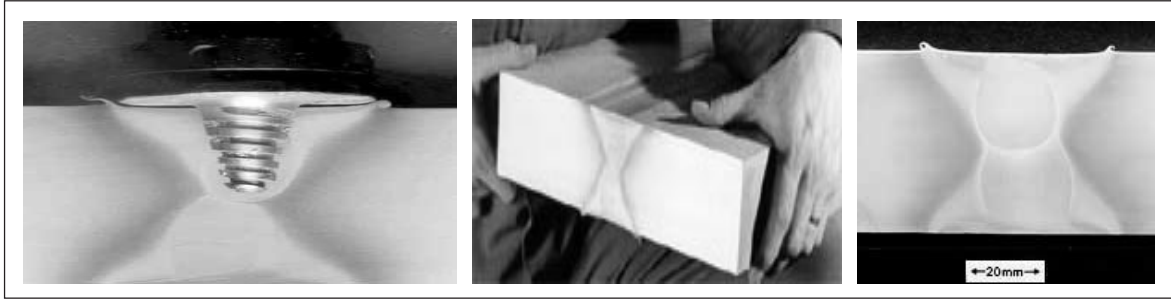
Sürtünme karıştırma kaynağında, özellikle kalın levhaların birleştirme işlemlerinde kaynak bölgesinde

boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktör dinamik süpürme hacminin (karıştırıcı ucun dönmesi sırasındaki hacminin) statik hacme oranıdır. Bu oran batıcı uç yüzeyine değişik profiller işlenerek artırılabilir, dolayısıyla batıcı uç etrafında ve altında malzeme akış yolları genişletilerek malzemenin kaynak dikişi içerisinde kalması desteklenir. Bu amaçla, kalın levhaların kaynağında ince levhalar için geliştirilmiş olan geleneksel silindirik karıştırıcı ucun yerine hacminin yaklaşık %60-70'i boşaltılmış olan konik uç kullanılmaktadır, Şekil 3, 4, 5 ve 6, [12-14]. Bu sayede kaynak esnasında gerekli kuvvet de azaltılmış olur. Batıcı ucun geometrisi (profilleri) ve ebatı kaynaklanacak levhaların kalınlığına ve kaynağın türüne (alın veya bindirme) bağlıdır. Günümüzde levhaların gerek alın gerekse daha geniş kaynak bölgesi istenen bindirme kaynağı için ayrı ayrı özel batıcı uçlar üretilmektedir, Şekil 7, [14].

Tek parça karıştırıcı uç kullanıldığında kaynak sonunda ucun çekilmesi sonucu boşluk (delik) kalır. Bu hata, özellikle depolama tankları ve borular kaynağında olduğu gibi çevresel kaynaklarda kabul edilemez. Bu takımların bir başka dezavantajı ise farklı kalınlıktaki levhaların kaynağı için farklı uzunluklara sahip ayrı ayrı uçlara gereksinim olmasıdır. Bu sorunu gidermek için bilgisayar ile otomatik olarak kontrol edilebilen ve geri çekilebilen özel karıştırıcı uçlar geliştirilmiştir. Kaynak sonunda bu



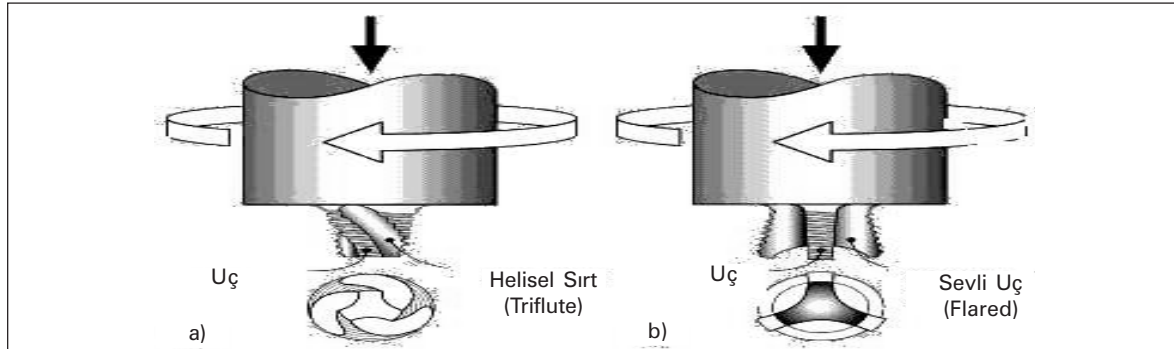
Şekil 3. Çeşitli Whorl™ Konfigürasyonları [12].



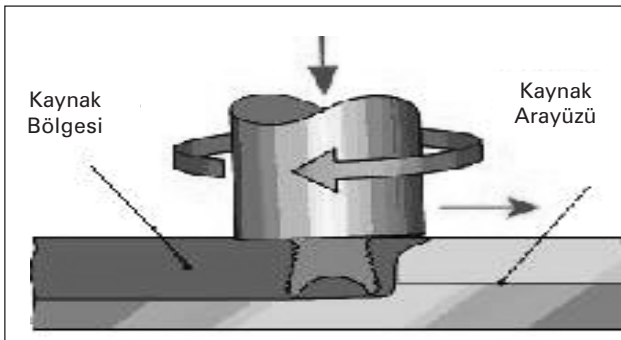
Şekil 4. 75mm Kalınlığındaki AA6082T6 Alaşımının Kaynağında Whorl™ Takımını Kullanılması, Kaynağın Bitmiş Hali ve Kaynak Dikişinin Görüntüsü [12,13].



Şekil 5. MX Triflute™ Pimin Esin Kaynağı Deniz Kabuklarıdır. MX Triflute™ Serisi Pimin Resim ve Şematik Çalışma Şekli [13,14].



Şekil 6. MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ Dizaynları [14].



Şekil 7. Flared Triflute Probe ile Yapılmış Olan Bindirme Kaynağında Kaynak Arayüzünün Görünümü [14].

otomatik geri çekilebilir uçlar dönme hareketi devam ederken yavaş yavaş çekilerek boşluk kalmadan kaynak işlemi tamamlanır. Batıcı uçlar takım çeliği veya yüksek hız çeliklerinden imal edilmektedir.

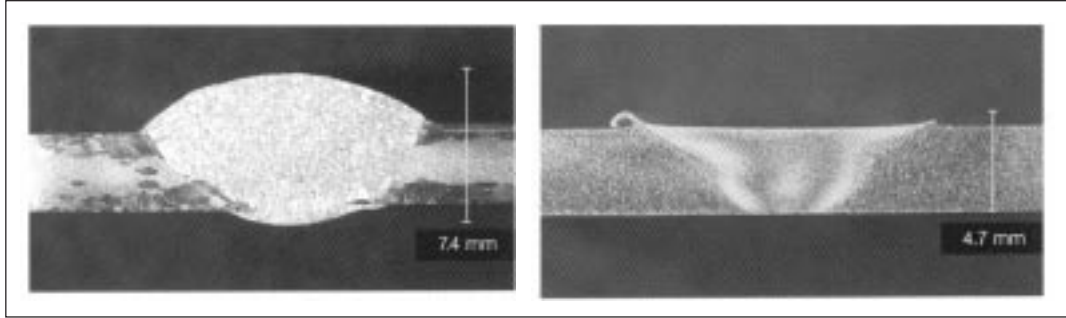
KAYNAK PERFORMANSI

Sürtünme karıştırma kaynağı ile elde edilen birleştirmeler ergitme kaynaklarına nazaran daha ideal bir kaynak profili ve daha pürüzsüz bir yüzey kalitesi gösterirler. Şekil 8 ark kaynağı ve sürtünme karıştırma

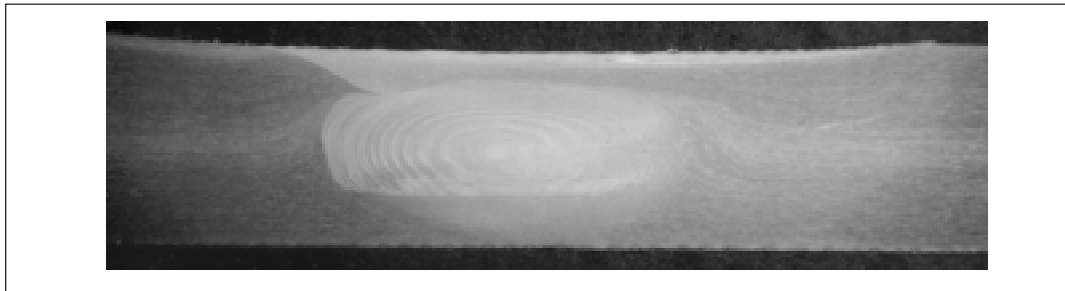
kaynağı ile Al-alışımlarında elde edilen birleştirmeleri karşılaştırmaktadır. Kaynak işleminin uygun yapılması ve optimum kaynak parametrelerinin kullanılması ile kusursuz kaynak elde etmek mümkündür. Batıcı ucun istikrarsız hareketi ve parametrelerin uygun olmaması durumunda sırasıyla yüzey pürüzlülüğü ve daha önce bahsedildiği gibi kaynak dikişinin tabana yakın kısmında soğuk birleşme gibi sorunlarla karşılaşılabilir. Bu yöntemde oluşabilecek bir başka kaynak hatası da kaynak dikişinde tünel şeklinde boşluk (porozite) kalmasıdır. Bu hatanın nedeni karıştırıcı uç tasarımındaki hatadan dolayı çamur kıvamına gelen malzemenin omuz altından dışarı taşmasıdır. Karıştırıcı uç üzerine ve omuz üzerine uygun profillerin işlenmesi ile bu sorun ortadan kaldırılabilir. Bu bahsedilen hususlar dikkate alınarak kusursuz kaynak elde edilebilir. Şekil 9 Al-alışımlarında sürtünme karıştırma kaynağı ile elde edilen bir kusursuz birleştirmenin kesit resmini vermektedir.

Tablo 1 sürtünme karıştırma kaynağı ile muhtelif Al-alışımlarında elde edilen kaynak performanslarını ve

kullanılan kaynak parametrelerini vermektedir [3, 15-21]. Isıl işleme duyarsız (5XXX serisi gibi) Al-alışımlarının, özellikle düşük mukavemet elde edilecek şekilde ısıtılma uygulanmış levhaların, sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde önemsiz bir mukavemet kaybı gerçekleşir. Bilhassa, kaynak bölgesinde ince taneli bir içyapı oluşturulabilirse kaynak bölgesinde mukavemet kaybı önemsiz mertebelerde olmaktadır. Örneğin, AA5454-O ve AA5083-O gibi Al-alışımlarında sürtünme karıştırma kaynağı sonrası kaynaklı numunelerin baz malzeme mukavemetine çok yakın değerler gösterdiği tespit edilmiştir [16, 22, 23]. Fakat, AA5005-H14 alaşımında sürtünme karıştırma kaynağı sonrası %25'lik bir mukavemet kaybı rapor edilmiştir [15]. Bu sonuçlar açıkça göstermektedir ki bu tür Al-alışımlarında alaşıma uygulanan ısıtılma işlemi kaynak performansını belirleyen en önemli faktördür. Mukavemeti artırılmış türlerde dolayısıyla mukavemet kaybı daha yüksek oranlarda olmaktadır. Fakat, bu durum yüksek mukavemetli yaşlandırma sertleşmesi yapılmış alaşımlardan daha düşük



Şekil 8. Kaynak Bölgesi Kesitleri: a) Ark Kaynağı ve b) Sürtünme Karıştırma Kaynağı [6, 10].



Şekil 9. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılmış Bir Al-Alaşımlarının Kaynak Bölgesinin Kesiti [3-10].

Tablo 1. Otojen Elektron Işını Kaynağı ve Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılmış Al-Alaşımlarının Mekanik Özellikleri [3].

Malzeme	Kaynak Yöntemi	Devir Hızı (dev/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	% uzama	Kaynak Performansı*		Ref.
							Muk. %	uzama %	
2195-T8	BM+	--	--	--	610	--	--	--	19
2195-T8	SKK+	--	--	--	410	--	67.2	--	19
5005-H14	BM†	--	--	147	158	7.0	--	--	15,17
5005-H14	EK†	--	--	96	125	5.4	79.1	77.1	17
5050-H14	SKK†	--	--	73	118	7.0	74.7	100	15
5454-O	BM‡	--	--	106	235	25.0	--	--	16
5454-O	SKK‡	9.7	4.2	108	230	24.0	97.9	96.0	16
5454-O	SKK‡	12.5	4.2	106	236	26.5	100	106	16
5454-O	SKK‡	25.3	12.7	107	234	25.0	99.6	100	16
5454-H32	BM‡	--	--	230	360	14.0	--	--	16
5454-H32	SKK‡	9.7	1.4	123	258	20.4	71.7	146	16
5454-H32	SKK‡	9.7	4.2	126	258	19.2	71.7	137	16
5454-H32	SKK‡	12.5	4.2	124	257	17.3	71.4	124	16
5454-H32	SKK‡	25.3	12.7	126	254	14.6	70.6	104	16
2024-T351	BM*	--	--	350	493	19.0	--	--	15,17
2024-T351	EK*	--	--	312	348	1.2	70.6	6.3	17
2024-T351	SKK*	--	--	268	410	5.1	83.2	26.8	15
2024-T3	BM§	--	--	424	497	14.9	--	--	18
2024-T3	SKK§	800	80	279	408	6.6	82.0	44.3	18
2024-T3	SKK§	1000	100	296	423	8.1	85.0	54.4	18
2024-T3	SKK§	1250	125	304	432	7.6	87.0	51.0	18
2024-T3	BM#	--	--	325	472	21.0	--	--	18
2024-T3	SKK#	1200	120	301	424	6.3	90.0	30.0	18
2024-T3	SKK#	1800	180	315	434	6.9	92.0	32.9	18
2024-T3	SKK#	2400	240	325	461	11.0	98.0	52.4	18
6061-T6	BM*	--	--	281	319	15.6	--	--	15,17
6061-T6	EK*	--	--	182	255	3.0	80.0	19.2	17
6061-T6	SKK*	--	--	162	252	7.2	79.0	46.2	15
7020-T6	BM*	--	--	326	385	13.6	--	--	3,15
7020-T6	EK*	--	--	262	343	3.7	89.1	27.2	3
7020-T6	SKK*	--	--	242	325	4.5	84.4	33.1	15

Kaynak performansı mukavemet yüzdesi ve uzama yüzdesi olarak kaynaklı numuneden elde edilen değerlerin baz malzeme numunesinden elde edilen değerlere oranının 100 ile çarpımı ile bulunmaktadır. (BM: baz malzeme, EK: elektron ışın kaynağı ve SKK: sürtünme karıştırma kaynağı)+ levha kalınlığı=8.1 mm; † levha kalınlığı = 3 mm; ‡ levha kalınlığı =3.9 mm; * levha kalınlığı =5 mm; § levha kalınlığı = 4 mm; # levha kalınlığı =1.6 mm

mertebelerdedir. Benzer davranışlar Al-alışımlarının ergitme kaynağında da karşımıza çıkmaktadır.

Yukarıda bahsedildiği üzere, kaynak bölgesinde mukavemet kaybı yüksek mukavemetli yaşlandırma sertleşmesi yapılmış Al-alışımlarında (2XXX, 6XXX ve 7XXX serileri) mukavemet artırıcı çökelti partiküllerinin kaynak esnasında çözeltiye alınmasından dolayı daha büyük mertebelerde olmaktadır. Çökelti partiküllerinin

çözeltiye alınmasından dolayı gerçekleşen mukavemetteki düşüş kaynak bölgesinde ince taneli içyapı eldesi ile azaltılabilir. Örneğin, AA2024-T3 alaşımında kaynak bölgesinde ince taneli mikroyapı oluşumu sonucu mukavemette önemli bir düşüş olmadığı belirlenmiştir [18]. Benzer şekilde, AA2014-T6 alaşımında da sürtünme karıştırma kaynağı sonucu kaynak bölgesinde önemli bir mukavemet kaybı gözlenmemiştir [24]. Fakat, değişik

araştırmacılar [15, 18, 25] yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış Al-alışımlarında sürtünme karıştırma kaynağının kaynak bölgesinde yüksek mertebelerde mukavemet kaybına neden olduğunu rapor etmişlerdir. Ancak, Biallas ve ark. [18] bu alışımlarda mukavemet kaybının kaynak parametrelerine dolayısıyla kaynak dikişinde oluşan içyapının tane boyutuna bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Yüksek kaynak hızlarında kaynak dikişinde ince taneli yapı oluşmakta, dolayısıyla mukavemet kaybı daha düşük mertebelerde olmaktadır. Benzer sonuçlar diğer yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış Al-alışımlarında da elde edilmiştir [3, 15, 16, 22, 26-28]. Genellikle, sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış yaşlandırma sertleşmesi yapılmış Al-alışımlarında en düşük mukavemet diğer ergitme kaynaklarında olduğu gibi aşırı yaşlanmanın gerçekleştiği ITAB'de sözkonusudur. Kaynak sonrası yaşlandırma ısı işlemi ile kaynak dikişindeki mukavemet artılabilmekte iken, diğer ergitme kaynaklarında olduğu gibi ITAB'de mukavemet değeri orijinal mertebelere restore edilememektedir.

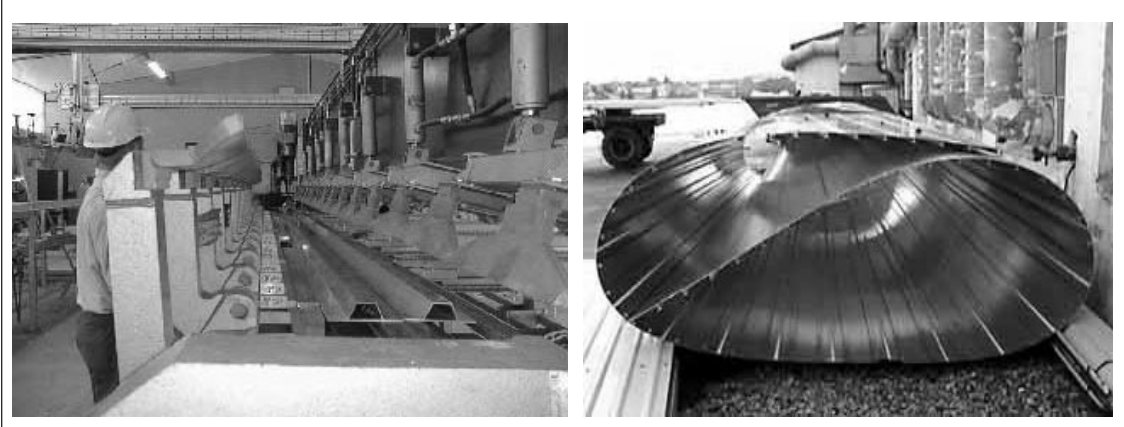
YÖNTEMİN UYGULAMA ALANLARI

Bu kaynak yönteminin uygulaması konvansiyonel dik freze tezgahlarda özel uç kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Ticari olarak üretilmiş değişik ebatlarda sürtünme karıştırma kaynak cihazları mevcut olup, maliyetleri 1 milyon \$'a kadar çıkmaktadır. Yöntem Al-alışımlarının kaynağına yönelik özel olarak geliştirilmiş olmakla birlikte klasik ergitme kaynak yöntemleri ile kaynağı mümkün olmayan veya güç olan Al-Li alışımlarının, 7075 Al-alışımının ve 0.8 mm kalınlığındaki çinko sacların kaynağında bu yöntem başarı ile uygulanmıştır. Yöntem, ayrıca Cu ve Cu-alışımları, Mg-alışımları, Ti-alışımları, Al-alışımı matris kompozit malzemeler, kurşun, yumuşak çelikler (düşük karbonlu), düşük mukavemetli paslanmaz çelikler ve benzer ergime derecesi gösteren farklı malzemelerin

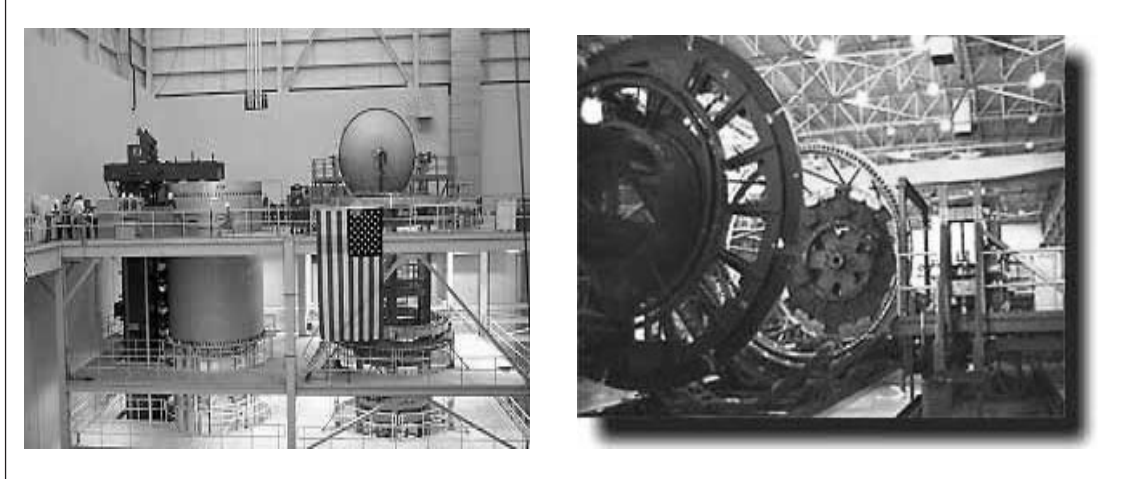
(değişik Al-alışımlarının birbiri ile ve Al-alışımlarının Mg-alışımları ile) kaynak işlemlerinde kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Bu yöntemle, Al-alışımlarında tek pasoda 50 mm ve çift taraftan kaynak yapmak suretiyle 100 mm kalınlığa kadar levhaların alın kaynağı yapılabilmektedir [3-10]. Bu kaynak yöntemi levhaların bindirme kaynağında da başarılı bir şekilde uygulanabilmektedir. Ayrıca, bu kaynak yöntemi ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirme işlemi pimin eğik konumda levhalara daldırılması ile yapılabilmektedir. Kaynak hızı kaynaklanacak levha kalınlığına bağlı olarak değişmekte olup, 6 mm kalınlığındaki Al-alışımı levhalarda tipik olarak 600 mm/dk'dir.

Bu kaynak tekniği günümüzde ticari olarak gemi inşaatı, hızlı tren imalatı, havacılık sanayi gibi değişik alanlarda uygulanmaktadır. Yüksek hız feribotlarında kullanılan standart boydaki alüminyum ekstrüzyon panelleri sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmektedir (Şekil 10). Ergitme kaynaklarına kıyasla ısı girdisinin düşük olması panellerdeki distorsiyon ve kalıntı gerilmelerini minimum düzeyde olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, bu yöntem Al-Li 2195 alışımlarından üretilen uzay mekiklerinin yakıt tanklarının son kubbe kısımlarının kaynağında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Şekil 11). Sürtünme karıştırma kaynağı yolcu uçakları gibi hafif alüminyum iskeletli yapılarda büyük potansiyel arz etmektedir ve bu konuda araştırmalar yoğun olarak sürdürülmektedir. Buna ilaveten, özellikle Japonya'da hızlı trenlerin vagonlarının üretiminde, alüminyum ekstrüzyonlardan kaynak konstrüksiyonla petek panellerin imalatında bu kaynak yöntemi uygulanmaktadır (Şekil 12).

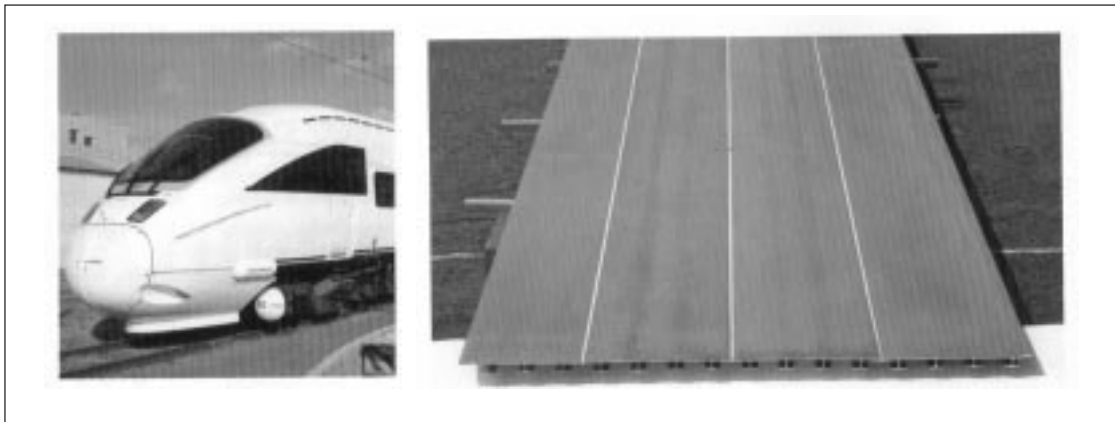
Sürtünme karıştırma kaynağı, gemi, uçak ve uzay aracı, tren ve kara taşıtlarının imalatı gibi çok geniş bir potansiyel uygulama alanı yelpazesine sahiptir. Bu uygulamalarda, bu yeni kaynak teknolojisi sınırlı da olsa ticari olarak



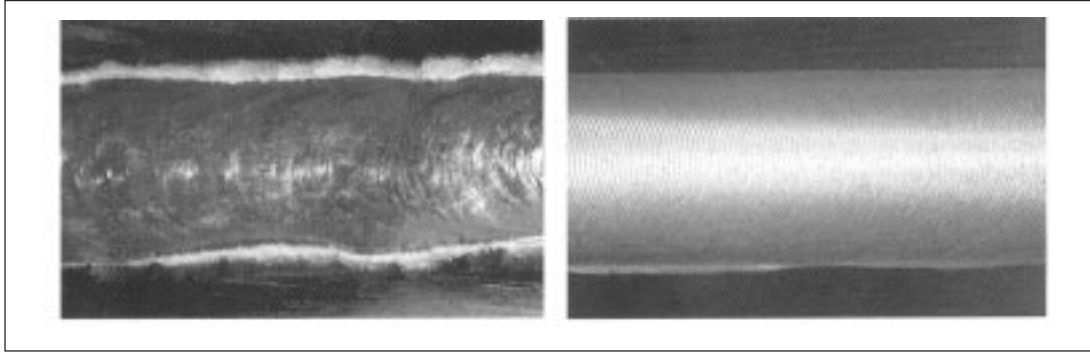
Şekil 10. Yüksek Hız Feribotlarında Kullanılan Alüminyum Ekstrüzyon Panellerinin Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilmesi [10, 29].



Şekil 11. Space Shuttle External Tank Projesi ve Marshall Space Flight Center Laboratuvarlarındaki Sürtünme Karıştırma Kaynak Sistemlerinden Görüntüler [10, 30].



Şekil 12. Japonya 'da Sürtünme Karıştırma Kaynağının Kullanıldığı Hızlı Tren ve Bu Yöntem ile Kaynağı Yapılan Al-Paneller [10, 31].



Şekil 13. Kaynak Yüzey Görünümleri: a) Ark Kaynağı ve b) Sürtünme Karıştırma Kaynağı.

kullanılmaya başlanmıştır. Robotik sürtünme karıştırma kaynağı ile Al- ve Mg-alışımlarının kaynağında katedilecek aşamalar daha hafif taşımacılık sistemlerinin seri üretimini mümkün kılacak ve bu şekilde araçlarının yakıt tüketiminde de önemli tasarruflar sağlanacaktır. Bu yeni kaynak yönteminin özellikle gemi inşaatında, uçak ve uzay endüstrisinde, otomotiv sektöründe ve diğer imalat sektörlerinde kullanımı her geçen gün artacaktır.

YÖNTEMİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Sürtünme karıştırma kaynağının üstünlükleri şunlardır:

- Ergitme kaynağı zor olan 2XXX ve 7XXX serisi Al-alışımları ve Al-Li alışımları kaynak edilebilir.
- Kaynak esnasındaki toplam ısı girdisi düşüktür, dolayısıyla mekanik özelliklerdeki kayıp minimumdur.
- Özellikle ince levhalarda büzülme, distorsiyon ve kalıntı gerilmeler çok düşüktür.
- Kaynak öncesi yüzey hazırlama aşırı kritik değildir, yüzeyde ince oksit filmleri tolere edilebilir.
- Katı hal kaynağı olduğu için çatlak ve porozite oluşumu gibi ergitme kaynaklarında karşılaşılan problemler söz konusu değildir.
- Dolgu malzemesine gereksinim yoktur.
- Kaynak sonrası kaynak yüzeyi talaş alınmış gibi düzgündür ve yüzey işleme gerektirmez.

- Alın ve bindirme kaynağı yapılabilir.
- Aynı karıştırıcı uç ile tipik olarak 1000 m kaynak yapılabilir.
- Yöntemin doğası gereği ark, kıvılcım, gaz ve toz söz konusu olmadığından çok temiz ve çevreci bir kaynak yöntemidir.
- Enerji verimliliği yüksek bir kaynak yöntemidir.
- Otomasyona ve robotik uygulamaya çok uygundur. Yöntemin dezavantajları ise:
- Her malzemenin kaynağı mümkün değildir. Yalnızca mukavemeti düşük ve özellikle düşük ergime dereceli malzemelerin kaynağına uygundur.
- Kaynaklanacak parçaların çok sıkı tespit edilmesi şarttır.
- Kaynak hızı bazı ergitme kaynaklarından düşüktür (tipik olarak 5 mm kalınlıktaki 6XXX serisi Al-alışımı levhalarda 750 mm/dk civarında).
- Tek parçalı karıştırıcı uç kullanıldığında kaynak sonunda delik kalır.
- Özellikle kalın levhaların kaynağı için çok güçlü tezgahlara ihtiyaç vardır.

KAYNAKÇA

1. W.M. Thomas ve ark., "Friction Stir Butt Welding", International Patent Appl. No. PCT/GB92/0220 and GB Patent Appl. No. 9125978.8, Dec. 1991, US Patent No. 5,460,317

2. **D. Nicholas**, TWI Bulletin 6, Nov./Dec. 1991, Vol. 32, S. 124-127
3. **G. Çam and M. Koçak**, Joining of Advanced Materials, Area 6: Materials Science and Engineering, Topic 6.36.4: Materials Processing and Manufacturing Technologies, edited by Rees D. Rawlings, in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Developed under the auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK, (on line). Available: <http://www.eolss.net/>
4. **G. Çam ve M. Koçak**, Progress in Joining of Advanced Materials, International Materials Reviews, 43 (1), 1998, S. 1-44
5. **H. Yavuz ve G. Çam**, Yeni Bir Kaynak Teknolojisi: Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Endüstri ve Otomasyon, Sayı 51, Haziran 2001, S. 18-202
6. **G. Çam**, Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler, Makina Tek., Sayı 80, Haziran 2004, S. 44-49
7. **G. Çam**, Al-Alaşımları İçin Geliştirilen Yeni Kaynak Yöntemleri, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildirler Kitabı, 19-20 Ekim 2001, İstanbul, S. 267-277
8. **G. Çam**, Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Uygulamaları, 9. Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 8-10 May 2002, Pamukkale University, Denizli, 2002, S. 450-458
9. **H. Ataoğlu**, Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Alüminyum Alaşımlarının İç Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002
10. **G. Çam**, Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi, 24-26 Ekim 2003, Kocaeli, S. 47-64
11. **P. Dong ve ark.**, Proc. of the 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, 14-16 June 1999, Thousand Oaks, CA, USA
12. **S.D. Smith ve ark.**, Proc. of Aluminium Joining Symposium, USA, 2001
13. **W.M. Thomas**, Proc. of 7th International Conference on Joints in Aluminium, USA, 1998
14. **W.M. Thomas ve R.E. Dolby**, Proc. of 6th International Conference on Trends in Welding Research, 15-19 April 2002, Callaway Gardens, Pine Mountain, Georgia, USA
15. **A. von Strombeck ve ark.**, Proc. of the 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, 14-16 June 1999, Thousand Oaks, CA, USA
16. **A.P. Reynolds**, Proc. of the 5th Int. Conf. on Trends in Welding Research, 1-5 June 1998, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, USA, eds.: J.M. Vitek et al., ASM, Metals Park, OH, USA, 1999, S. 563-567
17. **G. Çam ve ark.**, Science and Technology of Joining and Welding, 1999, 4 (5), S. 317-323
18. **G. Biallas ve ark.**, Proc. of the 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, 14-16 June 1999, Thousand Oaks, CA, USA
19. **A.P. Reynolds, T.U. Seidel ve M. Simenson**, Proc. of the 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, 14-16 June 1999, Thousand Oaks, CA, USA
20. **G. Çam ve ark.**, Journal of Science and Technology of Welding and Joining, 1999, 4 (5), S. 317-323
21. **G. Çam ve ark.**, Practical Metallography, 2000, 37 (2), S. 59-89
22. **L. Karlsson, L.-E. Svensson ve H. Larsson**, Proc. of the 5th Int. Conf. on Trends in Welding Research, 1-5 June 1998, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, USA, eds.: J.M. Vitek et al., ASM, Metals park, OH, USA, 1999, S. 574-579
23. **T. Hashimoto ve ark.**, Proc. of the 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, 14-16 June 1999, Thousand Oaks, CA, USA
24. **M. Strangwood ve ark.**, Proc. of the 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, 14-16 June 1999, Thousand Oaks, CA, USA
25. **G. Bussu and P.E. Irving**, Proc. of the 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, 14-16 June 1999, Thousand Oaks, CA, USA
26. **M.W. Mahoney, C.G. Rhodes, J.G. Flintoff, R.A. Spurling**, and W.H. Bingel, Metall. Mater. Trans. A, (1998), Vol. 29A, S. 1955-1964
27. **Svensson, L.-E. and Karlsson L.**, Proc. of the 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, 14-16 June 1999, Thousand Oaks, CA, USA
28. **T.J. Lienert, R.J. Grylls, J.E. Gould, and H.L. Fraser**, Proc. of the 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, 14-16 June 1999, Thousand Oaks, CA, USA
29. **S.W. Kallee ve ark.**, Proc. of 8th International Conference on Joints in Aluminium, Munich, Germany, 2001, S. 16
30. **S.W. Kallee ve ark.**, Seminar at Schweisstechische Lehr- und Vursuchsanstalt (SLV), Berlin-Brandenburg, Germany, 20 March 2002
31. **S.W. Kallee ve ark.**, Welding Journal, Vol. 81, No 10, Oct. 2002, S. 47-50