



**MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI YÖNTEMİYLE ALIN KAYNAĞI**  
**YAPILMIŞ AI-5086 H32 LEVHALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN**  
**İNCELENMESİ**

**SİNAN GÜÇLÜER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Antakya/HATAY**

**TEMMUZ-2007**

**MUSTAFA KEMAL ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI YÖNTEMİYLE ALIN KAYNAĞI YAPILMIŞ**

**AI-5086 H32 LEVHALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**SİNAN GÜÇLÜER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Prof. Dr. Gürel ÇAM danışmanlığında hazırlanan bu tez 20/08/2007 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Gürel ÇAM

Yrd. Doç. Dr. Selçuk MISTIKOĞLU

Yrd. Doç. Dr. Ersin ÖZDEMİR

Başkan

Üye

Üye

Bu tez Enstitümüz Makine Mühendisliği Anabilim Dalında hazırlanmıştır.

**Kod No:**

Prof. Dr. Nejat AĞCA  
Enstitü Müdürü

**Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.**

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	III
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
1. GİRİŞ .....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı .....	3
2.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlar .....	6
2.3. Kaynak Metalurjisi.....	12
2.4. Kaynak Bölgesinin Mekanik Özellikleri.....	15
2.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Alanları.....	22
2.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları.....	26
2.7. Alüminyum Alaşımları ve Özellikleri .....	27
2.7.1. Dövme Alüminyum Alaşımları.....	28
2.7.2. Döküm Alüminyum Alaşımları.. .....	32
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	33
3.1. Kullanılan Malzeme .....	33
3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynak Uçları.....	34
3.3. Kaynaklanacak Levhaların Tezgaha Sabitlenmesi.....	35
3.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Freze Tezgahı .....	35
3.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılması .....	37
3.6. Kaynak Bölgesinde Oluşan İç Yapının İncelenmesi.....	37
3.7. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi .....	38
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....	40
4.1. Kaynak Bölgesinin İç Yapısı ve Kaynak Kalitesi.....	40
4.2. Sertlik Profili.....	41
4.3. Kaynak Performansı.....	42
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	46
KAYNAKLAR .....	48
TEŞEKKÜR.....	50
ÖZGEÇMİŞ .....	51

**ÖZET****SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI YÖNTEMİYLE ALIN KAYNAĞI  
YAPILMIŞ Al-5086 H32 LEVHALARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

Bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağının Al5086-H32 levhalara uygulanabilirliği araştırılmış ve sabit devir hızında (1600 dev/dk) farklı ilerleme hızlarının kaynak performansına etkisi incelenmiştir. Sürtünme karıştırma kaynak işlemlerinde takım çeliğinden imal edilmiş batıcı uç kullanılmıştır. Kaynak kalitesi, içyapı incelemesi, mikrosertlik ölçümleri ve çekme deneyi yapmak suretiyle belirlenmiştir. Kaynak ilerleme hızına bağlı olarak kaynak bölgesinde mikroyapıdaki değişimler incelenmiş ve bu değişimlerin kaynak performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. En iyi kaynak performansı 200 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir.

Tüm levhaların sürtünme karıştırma kaynağı işlemi dik freze tezgahı kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan kaynak sistemi geliştirilmeye ve otomasyona çok uygundur. Elde edilen sonuçlar, dik freze tezgahında takım çeliğinden yapılmış batıcı uç kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı ile Al5086 levhaların alın kaynağı yapılabildiğini göstermiştir. Elde edilen kaynak kaliteleri kaynak parametreleri optimize edilerek daha da geliştirilebilir.

2007, 50 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Al-alaşimleri, alın kaynağı, sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak performansı.

**ABSTRACT****INVESTIGATION INTO MECHANICAL PROPERTIES OF FRICTION STIR  
BUTT WELDED Al5086-H32 PLATES**

In this study, the applicability of friction stir welding to Al-alloy plates (i.e., Al5086-H32) and the effect of welding speed at a given rotational speed on the performance of the welded plates have been investigated. A welding tool made of tool steel was employed in the welding of Al-alloy plates. The joint performance was determined by conducting optical microscopy, microhardness measurements and mechanical testing (e.g. tensile tests). The effect of welding speed at a given rotational speed on the microstructure and thus on the mechanical performance was also determined. The highest joint performances were obtained at a welding speed of 200 mm/min at the rotational speed of 1600 rpm used in this study.

Friction stir welding of the plates was conducted using a vertical-spindle type milling machine. The welding system used in this study can be developed further and is very convenient for automation. The findings of the present work indicate that using the present welding system Al-alloy plates were successfully friction stir welded in the butting configuration using a tool steel stirring pin. The joint quality obtained in this study will further be improved by optimizing welding parameters.

2007, 50 pages

**Keywords:** Al-alloys, butt welding, friction stir welding, welding performance.

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

Sayfa

Çizelge 2.1. Otojen elektron kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-alaşımlarının ve baz malzemelerin çekme deneyi sonuçları .....	18
Çizelge 2.2. Otojen elektron kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-alaşımlarının kaynak edilmiş durumda kırılma tokluğu değerleri.....	19
Çizelge 2.3. Alüminyumun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri .....	28
Çizelge 2.4. Alüminyum Birliği tarafından geliştirilen standardizasyona göre dövme alüminyum alaşımlarının simgelenmesi .....	29
Çizelge 2.5. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının temel ısıtma işlemlerinin gösterimi.....	30
Çizelge 2.6. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının sertleştirme (H) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi .....	31
Çizelge 2.7. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının T (ısıtma işlemi) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi .....	31
Çizelge 2.8. Alüminyum Birliği standartlarına göre döküm alüminyum alaşımlarının simgelenmesi .....	32
Çizelge 3.1. Al5086 alaşımının kimyasal kompozisyonu .....	33
Çizelge 3.2. Al5086-H32 alaşımının mekanik özellikleri .....	34
Çizelge 3.3. EN 895'e göre çekme numunesi boyutları .....	39
Çizelge 4.1. Al5086-H32 baz malzemeden ve kaynaklı levhalardan çıkarılan çekme numunelerinin deney sonuçları .....	42

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Sürtünme karıştırma kaynağının (friction stir welding) şematik gösterimi .....	4
Şekil 2.2. Lineer sürtünme kaynağının şematik gösterimi .....	5
Şekil 2.3. Özel tasarlanmış M5 vida adımlı probe (batıcı uç).....	6
Şekil 2.4. Çeşitli Whorl™ takım konfigürasyonları .....	8
Şekil 2.5. 75mm kalınlığındaki AA6082-T6 alaşımının kaynağında Whorl™ takımının kullanılması, kaynağın bitmiş hali ve kaynak dikişinin görüntüsü .....	8
Şekil 2.6. MX Triflute™ takımın resim ve şematik çalışma şekli .....	9
Şekil 2.7. MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ takım dizaynları .....	9
Şekil 2.8. Flared Triflute takım ile yapılmış olan bindirme kaynağında kaynak arayüzeyinin görünümü .....	10
Şekil 2.9. Skew-Stir takımın çalışma prensibi ve A-Skew takımın resmi .....	11
Şekil 2.10. Whorl™ ve MX Triflute™ takımlarının omuz profilleri .....	11
Şekil 2.11. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü .....	13
Şekil 2.12. Sürtünme karıştırma kaynağında batıcı ucun eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi .....	15
Şekil 2.13. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-alaşımının kaynak bölgesinin kesiti .....	16
Şekil 2.14. Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile birleştirilmesi.....	25
Şekil 2.15. Space Shuttle External Tank projesi ve Marshall Space Flight Center laboratuvarındaki Sürtünme Karıştırma Kaynak sistemlerinden görüntüler.....	25
Şekil 3.1. Kaynak işleminde kullanılan ucu yuvarlatılmış konik batıcı uçlu takım.....	35
Şekil 3.2. Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin yapıldığı dik freze tezgahı .....	36
Şekil 3.3. Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin yapıldığı tezgahın detay görünümü .	36
Şekil 3.4. Mikrosertlik ölçümlerinin yapılışının şematik gösterimi.....	38
Şekil 3.5. Bu çalışmada kullanılan standart çekme numunesinin şematik görünümü ....	39
Şekil 4.1. Sürtünme karıştırma kaynaklı levhaların kaynak bölgesi .....	40
Şekil 4.2. Sürtünme karıştırma kaynaklı levhaların kaynak bölgesindeki porozite.....	40
Şekil 4.3. Sürtünme karıştırma kaynaklı numunelerin mikrosertlik dağılımı .....	41

- Şekil 4.4. 1600 devir ve 175 mm/dak ilerleme hızıyla kaynak edilen Al5086-H32 levhalardan çıkarılan numunelerin çekme deneyinde elde edilen gerilme - % uzama eğrilerinin baz malzeme sonuçları ile karşılaştırılması.....43
- Şekil 4.5. 1600 devir ve 200 mm/dak ilerleme hızıyla kaynak edilen Al5086-H32 levhalardan çıkarılan numunelerin çekme deneyinde elde edilen gerilme - % uzama eğrilerinin baz malzeme sonuçları ile karşılaştırılması.....43
- Şekil 4.6. 1600 devir ve 225 mm/dak ilerleme hızıyla kaynak edilen Al5086-H32 levhalardan çıkarılan numunelerin çekme deneyinde elde edilen gerilme - % uzama eğrilerinin baz malzeme sonuçları ile karşılaştırılması.....44



## 1. GİRİŞ

Herhangi bir malzemenin başka bir malzeme ile birleştirilmesi veya kaynak edilmesi mühendislik uygulamalarında daima ihtiyaç duyulan işlemlerden biridir. Bir malzemenin kaynak edilebilirliği, o malzemenin daha yaygın olarak kullanılmasını sağlayan ve o malzemedен parça üretim yönteminin tayin edilmesinde önemli rol oynayan bir özelliğidir. Yeni geliştirilmiş malzemeler genellikle modern birleştirme tekniklerine ihtiyaç duyarlar. Yeni teknolojik ürünlere olan talebin her geçen gün artması yeni birleştirme tekniklerinin de geliştirilmesini sağlamaktadır. Son yıllarda alaşımların geliştirilmesiyle birlikte bu malzemelerin kaynağı ile ilgili olarak büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Lazer teknolojisindeki yeni ilerlemeler ile birlikte de özellikle kaynağı zor olan birçok malzemenin kaynak edilebilme sorunu ortadan kalkmıştır (Çam ve Koçak, 1998). Benzer şekilde sürtünme karıştırma kaynağı konusunda gerçekleştirilen gelişmeler Al-alaşımı gibi klasik kaynak yöntemleri ile kaynağı sorunlu olan malzemelerde üretim sistemlerini büyük oranda etkilemiş ve etkilemeye devam etmektedir.

Birleştirme işlemi, kaynak, lehimleme, yapıştırma ve mekanik bağlantı gibi pek çok işlemi kapsayan genel bir terimdir. Bu işlemlerin bir veya daha fazlası basit ürünlerin imalatında kullanılır (Örneğin; mutfak bıçaklarının tahta saplarının kesici kısma metal bağlantılarla tutturulması). Birleştirmenin rolü, otomobil ve uçaklar gibi pek çok farklı birleştirme işlemleriyle montaj edilen daha kompleks parçaların üretiminde daha önemlidir.

Birleştirme işlemleri, birleştirmede kullanılan dolgu malzemesine, dışarıdan uygulanan ısı ve basınç ve birleştirilecek malzemelerin durumuna göre sınıflandırılabilir. Katı hal birleştirme (basınç kaynağı) işlemlerinde dolgu malzemesi kullanılmaz. Birleştirme difüzyon kaynağındaki gibi dışarıdan uygulanan basınç ve ısı veya sürtünme kaynağındaki gibi işlem esnasında oluşan sürtünme ısı ve basınç ile sağlanır. Oksi-asetilen, ark ve direnç kaynağı gibi sıvı hal (ergitme kaynağı) işlemleri birleştirilecek malzemelerin kısmen erimesini içerir. Bu işlemler oksi-asetilen ve ark kaynağındaki gibi ısı ve direnç kaynağındaki gibi ısı ve basınç uygulamalarına ihtiyaç duyarlar. Isı kaynağı kimyasal, elektriksel veya optik (lazer gibi) olabilir.

Son yıllarda geliştirilen bir katı hal (basınç) kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemi, difüzyon kaynağı gibi bir katı hal birleştirme kaynağı olup, birleştirme bölgesinde iç yapıyı önemli oranda değiştirmedikten, ergitme kaynağı güç olan Al-alaşımların alın birleştirilmesinde başarıyla kullanılmış ve Al-alaşımı levhaların alın ve bindirme kaynağında sıvı hal (ergitme) kaynak metodlarından daha iyi sonuçlar alınmıştır. Bu kaynak yönteminde kaynaklanan malzemelerde ergime söz konusu değildir. Aynı şekilde pirinç levhaların bindirme ve alın kaynağı da bu yöntem ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ayrıca bu yöntem, Mg-alaşımları ve yumuşak çelikler gibi malzemelerin kaynağında kullanılabilme potansiyeline sahiptir. Son yıllarda geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağının nokta kaynağı uygulaması bu yöntemin yeni bir versiyonu olup, perçin ve elektrik direnç nokta kaynağına alternatif oluşturmuştur.

Ayrıca, lazer teknolojisi ve sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili yapılan yeni çalışmalar, levhaların üst üste bindirmeye gerek kalmadan alın altına birleştirilmesi ile parçaların toplam ağırlıklarında önemli oranda azalma sağlar. Bu da ulaşım ve uzay endüstrisinde yakıt tüketiminde önemli tasarruflar sağlamaktadır.

Hatasız birleştirme, yeni bir malzeme için araştırma ve geliştirmede bir kilometre taşı olarak düşünülmektedir. Bununla birlikte yeni malzemelerin yaygın kullanımları için kaynak birleştirmelerinin içyapı-mekanik özellikler ilişkileri iyi anlaşılmalıdır. Bu çalışmanın amacı, sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin Al-5086 H32 levhaların kaynağı işleminde kullanılabilirliğini tespit etmektir.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

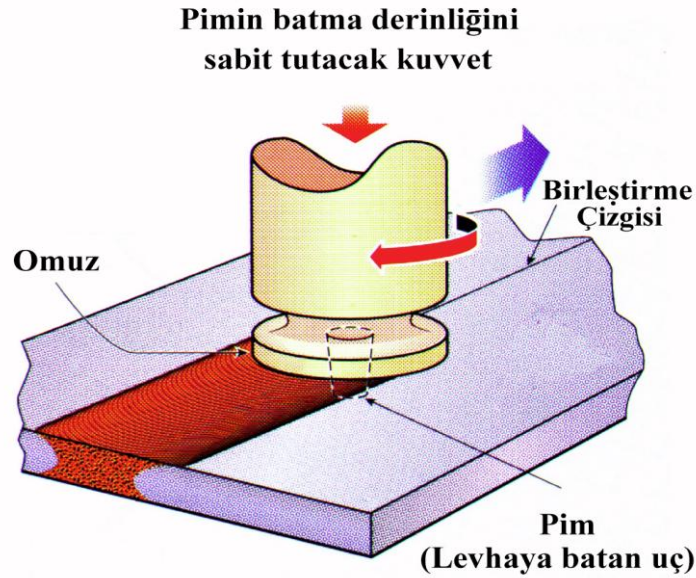
### 2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Ergitme kaynak yöntemleri ile Al-alaşımının kaynağında yüksek miktarlarda çatlak ve porozite oluşumu gibi problemler mevcuttur. Bu sorunlar, özellikle yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış yüksek mukavemetli Al-alaşımının kaynağında daha bariz olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu alaşımların kaynağı esnasında çatlak oluşumunun nedeni, bu malzemelerin tipik olarak geniş katılma sıcaklık aralığına ve yüksek ısıl genleşme katsayısına sahip olmasıdır. Porozite oluşumunun nedeni ise alüminyumun hidrojen çözünürlüğünün sıvı halde katı haldekenden çok daha yüksek olması, dolayısıyla kaynak dikişine kaynak işlemi esnasında giren hidrojenin katılma esnasında gaz olarak açığa çıkmasıdır. Sürtünme karıştırma kaynağı ile Al-alaşımının kaynağında ticari kaynak yöntemlerinde karşılaşılan bu problemlerin çoğu söz konusu değildir (Serindağ, 2006; Çam, 2005a'dan).

İngiltere'de The Welding Institute (TWI) tarafından geliştirilen ve 1990'lı yılların başında patentlenen sürtünme karıştırma kaynağı (friction stir welding), genel olarak levhaların alın kaynağında kullanılmakta olup, diğer sürtünme kaynaklarına göre prensip olarak bazı farklılıklar gösterir (Thomas, 1991; Çam, 2003; 2005a). Diğer sürtünme kaynaklarında kaynaklanacak parçalar birbiri üzerinde hareket ettirilirken, bu yöntemde tablaya alın altına sabitlenmiş parçalar birbirine sürtünmezler. Yöntem, karıştırıcı (baticı) uç olarak adlandırılan ve yüksek devirlerde dönen omuzlu bir takımın, 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 takımın omuz kısmı tarafından sıvanması yoluyla, kaynak yapılacak parçalar boyunca ilerletilmesi suretiyle parçaların birleştirildiği bir sürtünme kaynağı yöntemidir (Şekil 2.1) (Çam, 2005a; Serindağ, 2006).

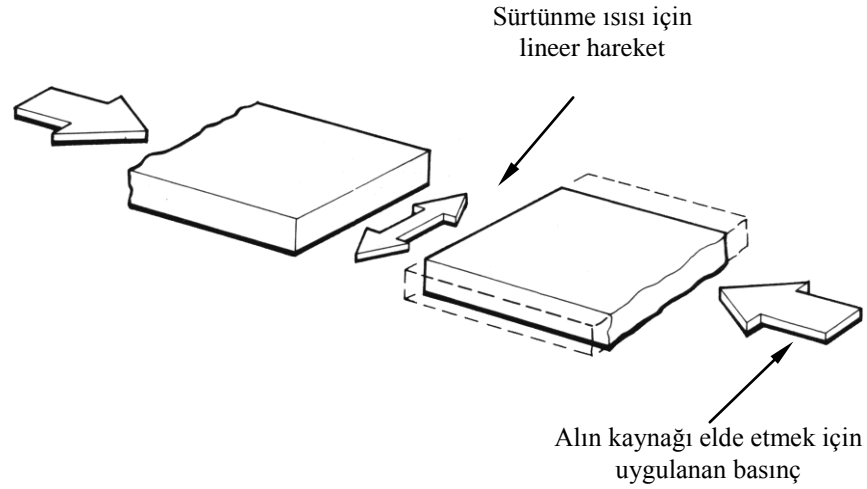
Sürtünme karıştırma kaynağı, uzay, otomotiv, gemi imalatı ve askeri imalat gibi önemli endüstri dallarında geniş uygulama potansiyeline sahip, son yıllarda geliştirilen değişik bir kaynak tekniğidir. Yöntemin uygulandığı şematik olarak Şekil 2.1'de gösterilmiştir (Çam, 2001; 2002; 2003; 2005a; 2005b; Çam ve Yavuz, 2001, Ataoğlu;

2002; Serindağ, 2006). Birleştirilecek parçalar, arkalarına bir plaka konularak, alın altına aralarında boşluk olmayacak şekilde sabitlenir. Geniş silindirik omuzlu, delme yapabilecek tipte bir takım (batıcı uç), freze tezgahı ekipmanları ve arka tutucular kullanılarak yüksek devirde döndürülür, kaynak yapılacak levhalara daldırılır ve kaynak yapılacak uzunluk boyunca ilerletilir. Takım etrafındaki malzeme sürtünmeyle ısınır yumuşayarak takım ucundan arka yüzeye doğru karıştırılır ve karıştırılan malzeme katılaştır ve hidrostatik basınç koşullarında soğur (Thomas ve ark., 1999; Rhodes ve ark., 1997; Serindağ, 2006).



Şekil 2.1. Sürtünme karıştırma kaynağının (friction stir welding) şematik gösterimi (Çam, 2001; 2002; 2003; 2005a; 2005b; Çam ve Yavuz, 2001)

Klasik sürtünme kaynağı kullanımı, bu yöntemdeki enerji iletilmesinin doğasından dolayı katı veya boru şeklinde silindirik kesitlerle sınırlıdır. Silindirik olmayan kesitler için (levhalar için) lineer sürtünme kaynak işlemi geliştirilmiş ve bazı sınırlı uygulamalarda kullanılmıştır (Şekil 2.2) (Nicholas, 1991). Son yıllarda, sürtünme kaynağının kullanımı bu yöntemin yeni bir versiyonunun geliştirilmesi sonucu artmaktadır. Bu yöntem sürtünme karıştırma kaynağı olup, levhalar alın altına ilave tel kullanılmadan birleştirilebilmektedir.



Şekil 2.2. Lineer sürtünme kaynağının şematik gösterimi (Nicholas, 1991)

Kaynak işlemi süresince tatbik edilen yüksek yükleme hızı ve yüksek sıcaklık deformasyonu, klasik ve lineer sürtünme kaynağında kaynak dikişinde malzemenin metalurjik ve mekanik özelliklerini değiştirmektedir (Serindağ, 2006; North ve ark., 1999'dan). Bu aşağıdaki gibi değişik metalurjik olaylara neden olur.

i) Gaz metal ark kaynağı ile yapılan birleştirmelerde oluşan büyük, uzun taneler yerine sürtünme kaynağında birleştirme bölgesinde dinamik olarak yeniden kristalleşme sonucu eş eksenli ince tanelerin oluşması (Midling ve Grong, 1994).

ii) Yaşlandırma sertleştirmesine tabi tutulan Al-alaşımının kaynağında çözeltiye alma, aşırı yaşlanma ve tekrar çökeltme sonucu düşük mukavemetli yumuşak bölge oluşması.

iii) Yeni ve bazen kırılğan fazların oluşması. Örnek, biri östenitik paslanmaz çelik olan farklı malzemelerin kaynağında deformasyon sonu martenzit oluşumu (Pan ve ark., 1996).

iv) Farklı metalik malzemelerin kaynağında kırılğan intermetalik fazların oluşması.

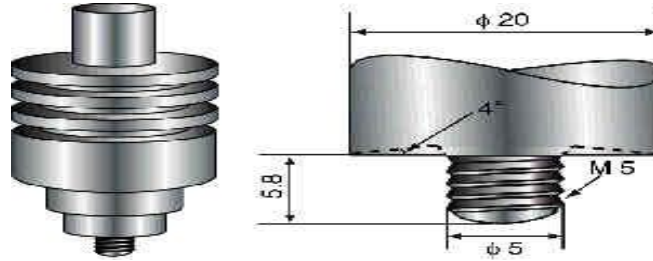
v) Al ve Mg esaslı kompozit malzemelerin kaynağında mukavemetlendirici partiküllerin kırılması (North ve ark., 1997); Fe-bazlı süper alaşım MA956'nın sürtünme kaynağında partikül aglomerasyonu (salkımlanması) (Kang ve ark., 1996).

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ark kaynağına oranla, işlem kolaylığı, dolgu malzemesi ve koruyucu gaz kullanımına ihtiyaç duyulmaması, kaynak dikişinde

ince taneli yapı oluşumu, mekanik özellik kaybı olmaması sayesinde yüksek performans gösteren birleştirme elde edilmesi, hatasız kaynak dikişi elde edilmesi ve düşük distorsiyon ve düşük kalıntı gerilmeleri oluşması gibi avantajları olan bir kaynak usulüdür (Thomas ve ark., 1999; Rhodes ve ark., 1997). Bu birleştirme yöntemiyle yüksek performanslı hatasız birleştirmeler elde edilmesi, her malzeme ve farklı levha kalınlıkları için uygun bir işlem parametre aralığı bulunmasını gerektirir. Kalınlıkları 1,2 mm'den 75 mm'ye kadar olan Al-alaşımı levhalar tek ve çift taraftan sürtünme kaynağı yapılarak birleştirilebilir(Serindağ, 2006).

## 2.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlar

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ilk geliştirildiği yıllarda kullanılan batıcı uçlar yüzeyine helisel diş açılmış uzunluğu kaynak edilecek levha kalınlığından biraz kısa silindirik takımlardı. Fakat son yıllarda sürtünmeden açığa çıkan ısı ile akıcı kıvama gelen malzemenin kaynak bölgesinde kalmasını geliştirmek için çok değişik takım dizaynları geliştirilmiştir (Serindağ, 2006; Çam, 2003'den).



Şekil 2.3. Özel tasarlanmış M5 vida adımlı probe (batıcı uç) (Nagasawa ve Otsuka, 1999)

Kaynağı zor veya daha kalın malzemelerde, plastik şekil değiştiren kısmın, karıştırıcı uç kısmı etrafındaki akışı, göz önünde tutulması gereken önemli bir noktadır. Eğer, oldukça geniş çapta karıştırıcı uç kısımlar gerekli ise çok geniş hacimli malzeme hareketi olacaktır. Takımlar, plastik şekil değiştirebilen malzemenin, karıştırıcı uç kısmı etrafındaki akışını arttıracak şekilde geliştirilmelidir (Thomas ve Nicholas, 1996; Mert ve Kaluç, 2003).

Mikser tipi içi boş karıştırıcı uç kısma sahip takım, plastik şekil değiştiren malzemenin, karıştırıcı uç kısmın içinden geçmesine olanak sağlar. Benzer çaptaki dolu takımlar ile karşılaştırıldığında, daha az miktarda malzeme yer değiştirir. Bu sayede, sürtünme etkisinde kalan bölge, yer değiştiren hacimden daha büyüktür (Thomas ve Nicholas, 1996; Mert ve Kaluç, 2003).

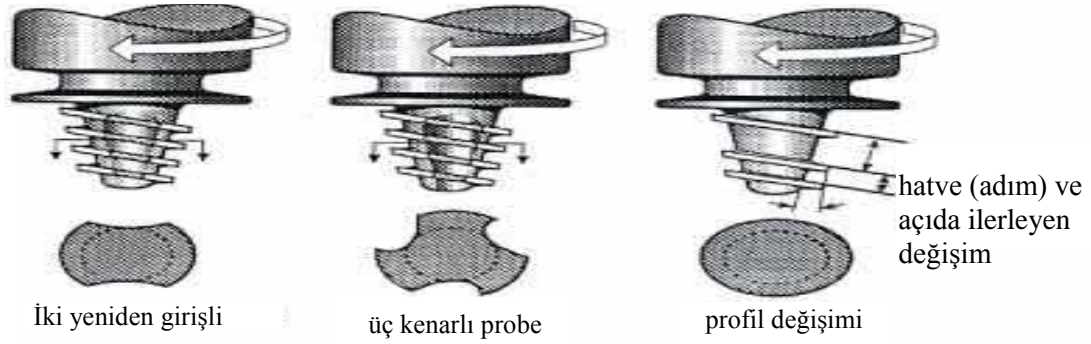
Sürtünme karıştırma kaynağında, özellikle kalın levhaların birleştirme işlemlerinde kaynak bölgesinde boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktör dinamik süpürme hacminin (karıştırıcı ucun dönmesi sırasındaki hacminin) statik hacme oranıdır. Bu oran batıcı uç yüzeyine değişik profiller işlenerek arttırılabilir, 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 2.4, 2.5, 2.6 ve 2.7) (Smith ve ark., 2001; Thomas ve Dolby, 2002; Çam, 2005a). 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 (Thomas ve Dolby, 2002; Çam, 2005a).

Silindirik uç yerine üzerine spiral diş açılmış konik bir uç kullanılabileceği düşünülerek Whorl™, Triflute™ ve Skew-Stir™ serisi özel profilli sürtünme karıştırma kaynağı takımları dizayn edilmiş ve geliştirilmiştir. Bu takımlar ile 25-40 mm kalınlığındaki AA6082 T6 levhalar tek pasoda, 40-75 mm kalınlığındaki levhalar da çift taraftan kaynak yapılabilmektedir (Serindağ, 2006; Çam, 2003'den).

Denemeler sonunda, değişik Whorl™ konfigürasyonları belirlenmiştir (Şekil 2.4). Kesik koni şeklindeki Whorl™ takım (probe), plastik akışa uğrayan metali aşağıya doğru yönlendirmek için helisel sırtlı profiller ihtiva etmektedir (Smith ve ark., 2001; Çam, 2003).

Whorl™ konsepti dairesel olmayan probe kesitleri sağlar. Bu nedenle, malzemenin daha kolay akmasına imkan vermek için takımın yer değiştirme miktarı, dönme miktarından daha az olması gerekmektedir. Şekil 2.5'de 75 mm kalınlığındaki AA 6082-T6 alaşımının içine geçmiş Whorl™ serisi takım görülmektedir ve buradan da

TEB ile takım profilinin ilişkisi açıkça görülmektedir. Takım etrafındaki malzemenin daha etkili akması için her bir helisel sırt arasındaki uzaklığın sırt kalınlığından daha büyük olması gerekir. Takım ucunun helisel sırtlarla paralel olması kritik bir husus değildir (Kalle ve ark., 2001; Çam, 2003).



Şekil 2.4. Çeşitli Whorl™ takım konfigürasyonları (Smith ve ark., 2001; Çam, 2001; 2003; 2005a)



Şekil 2.5. 75 mm kalınlığındaki AA6082-T6 alaşımının kaynağında Whorl™ takımının kullanılması, kaynağın bitmiş hali ve kaynak dikişinin görüntüsü (Smith ve ark., 2001; Çam, 2003; 2005a; 2005b)

Multi-Helix takımların (MX Triflute™) yivlerinin çevresinde helisel sırtların bulunması takımın hacmini düşürmekle beraber malzeme akışına yardım eder ve yüzeydeki oksitleri dağıtır (Şekil 2.6 ve Şekil 2.7).

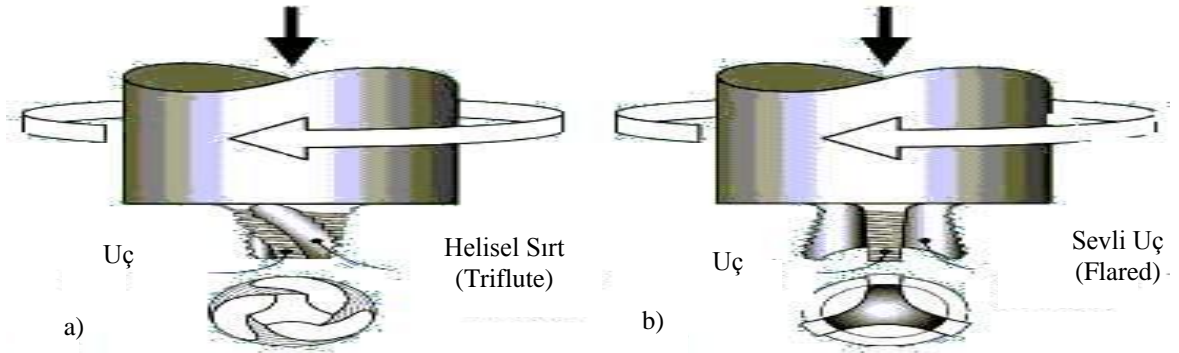
Alın kaynağında kullanılan Whorl™ ve Triflute™ takımları kesik piramit şeklindedir ve yüzeylerinde aşağıya doğru delme etkisini kolaylaştırmak amacıyla kaba işlenmiş helisel oluklar bulunmaktadır. Bu girintili köşe şekilleri ucun hacmini azaltır ve statik hacim oranı için uygun olan karıştırma hacmini sağlar. Daha iyi bir hacim oranı ile malzemenin akış yolu daha iyi olur ve böylece takım daha etkili çalışır. Ayrıca özellikle ucun etrafındaki kaba işlenmiş helisel sırtlarda bulunan girintili köşe özellikleri



kaynak bölgesindeki yüzey oksitlerinin parçalanmasına ve dağıtılmasına yardımcı olur (Çam, 2003).

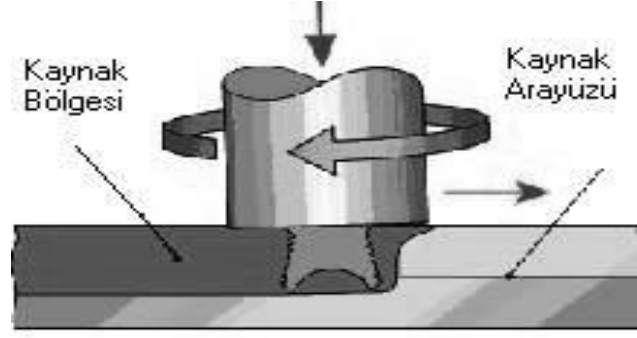


Şekil 2.6. MX Triflute™ takımın resim ve şematik çalışma şekli (Smith ve ark., 2001; Çam, 2003; 2005a) (MX Triflute™ takımın esin kaynağı deniz kabuklarıdır)



Şekil 2.7. MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ takım dizaynları (Thomas ve Dolby, 2002; Çam, 2003; 2005a)

Bindirme kaynağında ise takım (baticı uç), daha geniş kaynak bölgesi sağlamak ve kaynak yapılan ara yüzelerde daha büyük levha kalınlıklarından dolayı oluşabilecek problemleri önlemek amacıyla daha farklı dizayn edilmiştir (Şekil 2.8). Bindirme kaynağında takım yüzeyi kaynak ara yüzeyine zorunlu olarak diktir ve alttaki levhaya yeteri kadar nüfuz edebilmesi ana amaçtır. Kaynak ara yüzeyinin üst yüzeyden mesafesi ve takımın girintilerinin kaynağın kenarı ile kesiştiği açı çok önemlidir. Bu özellik, yorulma ile doğrudan bağlantılıdır. Bu takımın karakteristiği, süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki farkın artmasıyla ucun etrafındaki ve aşağısındaki akış yolunun büyümesidir (Çam, 2003).



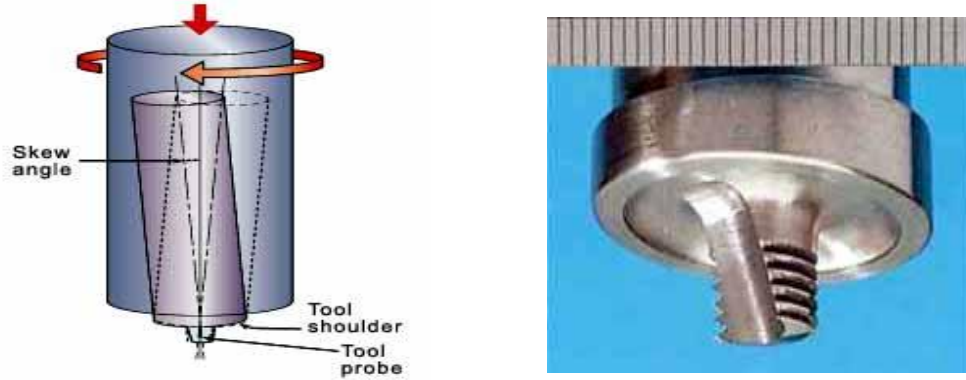
Şekil 2.8. Flared Triflute takım ile yapılmış olan bindirme kaynağında kaynak arayüzünün görünümü (Thomas ve Dolby, 2002; Çam, 2003; 2005a)

Karıştırıcı takımın uç kısmındaki sürekli spiral kısmın eğimi, kaynak edilecek malzemeye uygun bir şekilde tasarlanıp üretilebilir. Spiral kenarın eğimindeki değişim, plastik şekil değiştiren malzemenin aşağı doğru hareketine ve karıştırılmasına olanak sağlar. Whorl™ ve Triflute™ takımlar dönme sırasında saat ibresi yönünde spiral hareketi sayesinde plastik şekil değiştiren malzemeye aşağı yönde itme kuvveti uygular. Ayrıca, her iki takımın diğer geleneksel takımlardan önemli bir üstünlüğü (özellikle kalın parçaların kaynağında) karıştırıcı ucun dönmesi sırasındaki hacminin (dinamik süpürme hacmi), kendi hacmine (statik hacim) oranının yüksek olmasıdır. Çünkü bu kaynak sırasında yeterli akışın sağlanmasında oldukça büyük bir öneme sahiptir (Dolby ve ark., 2001; Thomas ve ark., 2001; Serindağ, 2006; Kalle ve ark., 2001; Mert ve Kaluç, 2003).

Sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması için geliştirilen Skew-Stir™ serisi takım, takım eksenine iş mili eksenine göre biraz eğim verilmesi ile diğer takımlardan ayrılır. Skew-Stir™ serisi takımlar, dinamik süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki oranı takımın eğik hareketi ile artırılabilir. Bu oran, boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktördür (Serindağ, 2006).

Şekil 2.9 da görüleceği üzere, omuz yüzeyi, eğik takım eksenine belirli bir eğim oluşturmaktadır. Omuz yüzeyi ise, plakanın üst kısmına bağlı olarak sabit durmaktadır. Omuz, iş parçası üzerinde iken dairesel hareket yapar. Takımın odak noktası, iş parçası yüzeyine veya iş parçasının herhangi bir noktası üzerine geldiğinde, omuzun temas yüzeyi eksen dışı bir yörüngede hareket eder. Ayrıca, omuzun bu yörünge hareketi, omuzun eğrilik açısına ve odak noktası ile levhanın üst yüzeyi arasındaki mesafeye

bağlıdır. Eğrilik açısı ve aradaki mesafe arttıkça, omuzun hareket sahası da artacaktır(Serindağ, 2006).



Şekil 2.9. Skew-Stir takımın çalışma prensibi ve A-Skew takımın resmi (Kallee ve ark., 2002; Çam, 2003)

Yeni jenerasyon Whorl™ ve Triflute™ takımlarının omuzları (shoulder) da özel profillere sahiptir. Omuz profilleri, omuz ile iş parçası arasında daha iyi bir temas yüzeyi sağlamak amacıyla kullanılır. Sürtünme ısı ile akıcı hale gelen malzemenin kaynak bölgesinden ayrılması önlenmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Whorl™ ve MX Triflute™ takımlarının omuz profilleri (Smith ve ark., 2001; Çam, 2003)

Tek parça takım kullanıldığında kaynak sonunda ucun çekilmesi sonucunda boşluk (delik) kalır. Bu hata, özellikle depolama tankları ve boruların kaynağında olduğu çevresel kaynaklarda kabul edilemez. Bu takımların bir başka dezavantajı ise farklı kalınlıklardaki levhaların kaynağı için farklı uzunluklara sahip ayrı ayrı uçlara gereksinim olmasıdır. Bu sorunu gidermek için bilgisayar ile otomatik kontrol edilebilen ve batıcı ucu geri çekilebilen özel takımlar geliştirilmiştir. Kaynak sonunda bu otomatik geri çekilebilir uçlar dönme hareketi devam ederken yavaş yavaş çekilerek

boşluk kalmadan kaynak işlemi tamamlanır. Takımlar, takım çeliği, sıcak iş çeliği veya yüksek hız çeliklerinden imal edilmektedir (Çam, 2005a).

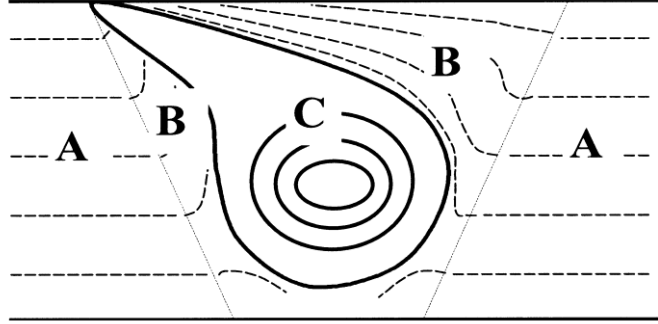
Omuzun yüzeyine açılan yivler (kanallar), kaynak sırasında dışarı çıkmaya çalışan malzemeyi tutar. Bu sırada takım bağlantı hattı boyunca yol alır. Takımın omuz kısmına açılan bu yivlerin sağladığı mekanik üstünlük ise takımın uç kısmında sıkıştırmayı artırır. Bu gelişme 6 mm kalınlığındaki 5083 Al-alaşımı üzerinde test edilmiş ve omuzda kanallar olmayan takımlara göre iki kat hızda yüksek kaliteli kaynaklar gerçekleştirilmiştir. Normalde 1-3° arasında takıma eğim verilirken, bu gelişme sayesinde, takımın 0° lik eğimli pozisyonda, kullanımına olanak sağlanmıştır. Ortaya çıkan bu sadelik ve kolaylıklar, kaynağın x ve y eksenleri yönünde yapılmasını kolaylaştırmıştır (Thomas ve ark., 2001; Mert ve Kaluç, 2003).

Yöntemde, yüksek sıcaklıklarda aşınma direncine sahip malzemelerden üretilen, değişik takımlardaki, tükenmeyen döner takımlar kullanılır. Örneğin, Amerikan Deniz Kuvvetleri'nde ani saldırı ve hücum amaçlı ileri amfibik (hem karada hem suda kullanılan) aracın kaynak bağlantılarında H13 (X40 CrMoV 5 1) takım çeliğinden tek parça takımlar ve karıştırıcı uç kısmın malzemesi olarak yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruyan MP159 malzemesinden ve omuz kısmı ise H13 takım çeliğinden imal edilmiş ve iki parçalı olan takımlar kullanılmıştır. Ayrıca bu konudaki gelişmeler de hızla devam etmektedir (Nicholas ve Kallee, 2000; Kallee ve ark., 2001; Colligan ve ark., 2003; Mert ve Kaluç, 2003; Çam, 2005a).

### **2.3. Kaynak Metalurjisi**

Şekil 2.11' de sürtünme karıştırma kaynağında oluşan simetrik olmayan kaynak dikişinin kesitindeki tipik bir iç yapı şematik olarak gösterilmiştir (Çam, 2001; 2002; 2005a; Çam ve Yavuz, 2001; Dong ve ark., 1999; Çam ve Koçak, 2002). Tipik olarak soğan halkaları veya ağaçlardaki yaş halkaları gibi pek çok konsantrik halkalar oluşmaktadır (Dong ve ark., 1999; Andersson ve ark., 1997). Kaynak bölgesindeki iç yapı tipik olarak üç farklı bölgeden oluşur. Bu bölgeler, A: ark kaynağındaki ITAB' a benzer dikişten uzakta ısının tesiri altındaki bölge (ITAB), B: dikişe bitişik termomekanik olarak etkilenmiş bölge (TEB) ve C: dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) olarak adlandırılmaktadır (Çam, 2001; Çam ve Yavuz, 2001; Dong ve ark.,

1999; Threadgill, 1997). Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgenin dinamik toparlanma (dynamic recovery) sonucu oluştuğu kabul edilmektedir (Yang, 1998).



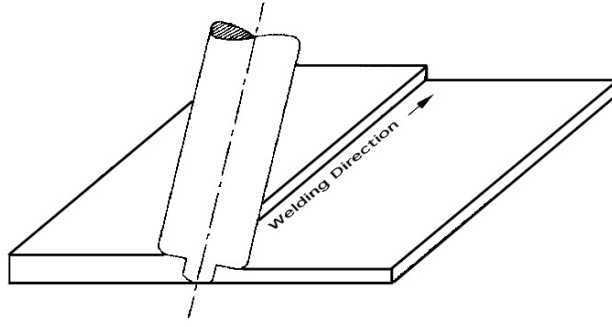
Şekil 2.11. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü. A: ısının tesiri altındaki bölge (ITAB), B: termodinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (TEB), C: dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) (Çam,2001; 2003; 2005a; Çam ve Yavuz, 2001; Dong ve ark., 1999)

Belirli bir takım geometrisi kullanılarak yapılan sürtünme karıştırma kaynağında elde edilen birleştirme karakteristiklerini belirleyen üç temel parametre vardır. Bunlar, takımın devir hızı, ilerleme hızı ve batma derinliğidir (Serindağ, 2006; Loftus ve ark., 1999'dan). Bunlardan ilk ikisi, devir ve ilerleme hızları kontrol edilebilir ve sabit takım geometrisi ile yapılan kaynaklarda kaynak sırasında önemli oranda değişmezler. Fakat, takımın batma derinliği kritik ve kontrol edilmesi güç bir parametredir. 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 (Çam, 2005a). Kaynak işleminde iyi bir nüfuziyet elde etmek için, takım ucunun arka yüzeye yaklaşık olarak 0,508 mm mesafede sabit tutulması gerektiği deneysel olarak gösterilmiştir (Serindağ, 2006; Loftus ve ark., 1999'dan). Takımın ucu ile iş parçasının arka yüzeyi arasındaki mesafe "nüfuz etme mesafesi" olarak bilinmektedir. Bundan dolayı sürtünme karıştırma kaynağında, yüzey hazırlama klasik ve lineer sürtünme kaynaklarından daha kritiktir. Kaynak işlemi süresince nüfuz etme mesafesini sabit tutmak için malzeme kalınlığındaki değişimler minimum düzeyde olmalıdır. Takım ölçüsü, düşük ısı girdisi

ve küçük kaynak dikişi sağladığı ve dolayısıyla büzülmeyi azalttığı için mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır.

Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir husus, yeterli hidrostatik basınç elde edilemez ise, kaynaklanan levhaların tabana yakın kısmında soğuk birleşme (yetersiz nüfuziyet) oluşumudur (Çam, 2003; Çam, 2005a). Bu sorun yukarı doğru hareket etme eğilimindeki 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 hareketi sağlanarak malzemenin yukarı doğru akması önlenir. Bu önlemler aynı zamanda kaynak bölgesindeki malzemenin omuz altından kaybı sonucu kaynak dikişi içerisinde oluşan tünel şeklinde porozite (boşluk) probleminin de giderilmesini sağlar (Çam, 2003; Çam, 2005a).

Sürtünme karıştırma kaynağı, otomatik çekilebilir takımların geliştirilmesiyle batıcı ucun işlem sonunda levhadan geri çekildiği yerde delik oluşmaması sonucu dairesel (çevresel) kaynak işlemlerinde ve takımın eğik daldırılması sonucu farklı kalınlıklardaki levhaların kaynak işlemlerinde de kullanılabilir (Ding ve Oelgoetz, 1999). Farklı kalınlıklardaki Al-Li alaşımı 2195 levhaların birleştirme işlemlerinde eğik takım daldırma yöntemi ile umut verici sonuçlar elde edilmiştir (Ding ve Oelgoetz, 1999). Eğik takım daldırma yöntemi Şekil 2.12' de şematik olarak gösterilmektedir (Çam, 2001; Çam ve Yavuz, 2001; Kallee ve Mistry, 1999). Son yıllarda otomotiv endüstrisinde konstrüksiyona hazır levhaların (tailored blanks) kaynak işleminde sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin kullanılması büyük bir ilgi çekmektedir. Pimin farklı kalınlıklardaki levhalara açılı daldırılması ile lazer kaynağında elde edilenden daha düzgün bir yüzey elde edilebilmektedir.



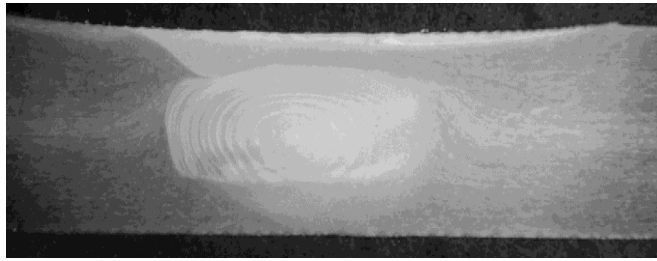
Şekil 2.12. Sürtünme karıştırma kaynağında batıcı ucun eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi (Çam, 2001; Çam ve Yavuz, 2001; Kallee ve Mistry, 1999)

Takım omuzu özellikle ince levhalarda sürtünme işlemini dolayısıyla gerekli ısının büyük bir kısmını sağlar. Takım 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(Serindağ, 2006).

#### 2.4. Kaynak Bölgesinin Mekanik Özellikleri

Ergitme esaslı kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında, sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan birleştirmeler daha ideal bir kaynak profili ve daha pürüzsüz bir yüzey kalitesi gösterirler. 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 takım 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 (Çam, 2005a). Takım omzunun dönmesi sonucu, bu metot ile elde edilen kaynağın üst yüzeyleri makine ile işlenmiş gibidir ki bu

da yorulma ömrünü arttırmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı ile yukarıda bahsedilen hususlar dikkate alınarak Al-alaşımında hatasız kaynak dikişi elde edilebilir. Şekil 2.5’de bu yöntem ile elde edilmiş hata içermeyen bir Al-alaşımında kaynak dikişinin kesiti gösterilmektedir (Çam, 2001; Çam ve Yavuz, 2001; Von Strombeck ve ark., 1999). Bu kaynak yöntemi ile kaynak edilmiş Al-alaşımında elde edilen kaynağın tipik özelliği, özellikle yaşlandırma sertleşmesi yapılmış alaşımlarda, kaynak bölgesinde sertlik ve mukavemet düşüştür (strength undermatching). Fakat, kaynak bölgesinde mukavemet kaybı tüm ergitme kaynak yöntemlerinde bu yöntemden daha fazladır.



Şekil 2.13. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-alaşımının kaynak bölgesinin kesiti (Çam, 2001; Çam ve Yavuz, 2001; Von Strombeck ve ark., 1999)

#### **2.4.1. Katı Eriyik Sertleşmesi Yapılmış Al-Alaşımında Kaynak Bölgesinin Mekanik Özellikleri**

Katı eriyik sertleşmesi yapılmış 5XXX serisi Al-alaşımaları, kaynak dikişinde mukavemetlendirici partiküllerinin çözeltiye alınması ve ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB) aşırı yaşlanma olmamasından dolayı sürtünme karıştırma kaynağı yapıldıklarında kaynak bölgesinde marjinal mukavemet kaybı gösterirler. Örneğin, sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış 5083-0 Al-alaşımının kaynak bölgesinde sertlikte önemli bir değişim gözlenmemiştir ve birleştirmeler tavlanmış baz malzemeninki ile kıyaslanabilir mukavemet göstermiştir (Ataoğlu, 2002; Karlsson ve ark., 1999’dan).

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde, kaynak parametresi olarak adlandırılan pimin dönme hızı/pimin ilerleme hızı ( $R_t/v$ ) oranının kaynak performansını etkileyen önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir (Ataoğlu, 2002; Hashimoto ve ark., 1999’dan). Fakat, 4 mm kalınlıktaki 5083-0 Al-alaşımı için bu parametre penceresinin



oldukça geniş olduğu ve bu yöntem ile elde edilen kaynakların esas malzeme ile karşılaştırılabilir, çekme mukavemeti sergiledikleri tespit edilmiştir (302 MPa) (Ataoğlu, 2002; Hashimoto ve ark., 1999'dan).

3,9 mm kalınlıktaki 5454-0 Al-alaşımında da bu metot ile elde edilen kaynaklarda sertlik ve mukavemet kaybı gözlenmemiş ve baz malzemeninkine benzer çekme özellikleri gözlenmiştir (Ataoğlu, 2002; Reynolds, 1998'den). Fakat, farklı kalınlıklardaki sacların kaynağında tungsten inert gaz ark (TİG) kaynağı, sürtünme karıştırma kaynağından daha iyi sonuç vermiştir. Aynı alaşım temperlenmiş (H32) durumda sürtünme karıştırma kaynağı yapıldığında önemli oranda mukavemet kaybı gözlenmiştir (Çizelge 2.1). Benzer şekilde, 3 mm kalınlığındaki 5005-H14 Al-alaşımında sürtünme karıştırma kaynağı sonucu kaynak bölgesinde önemli oranda sertlik kaybı ve mukavemet düşüşü kaydedilmiştir (Çizelge 2.2). %75 düzeyinde bir kaynak mukavemet verimi (joint efficiency) elde edilebilmiştir (Ataoğlu, 2002; Von Strombeck ve ark., 1999'dan). Bu sonuçlar, temperlemenin kaynak performansını önemli oranda etkilediğini, dolayısıyla yüksek mukavemetli alaşımlarda kaynak bölgesinde mukavemet kaybının daha yüksek olduğunu göstermektedir (Ataoğlu, 2002).

Çizelge 2.1. Otojen elektron kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-alışımlarının ve baz malzemelerin çekme deneyi sonuçları (Ataoglu, 2002; Çam ve Koçak, 2002'den)

Alaşım ve temper durumu	Kaynak Prosesi	Dönme Hızı (rpm)	İlerleme Hızı (mm.min <sup>-1</sup> )	Akma Muk. (MPa)	Çekme Muk. (MPa)	uzama (%)	Kaynak Performansı	
							Muk. (%)	uzama( %)
2195-T8	BM+	--	--	--	610	--	--	--
2195-T8	SKK+	--	--	--	410	--	67.2	--
5005-H14	BM†	--	--	147	158	7.0	--	--
5005-H14	EK†	--	--	96	125	5.4	79.1	77.1
5050-H14	SKK†	--	--	73	118	7.0	74.7	100
5454-O	BM‡	--	--	106	235	25.0	--	--
5454-O	SKK‡	9.7	4.2	108	230	24.0	97.9	96.0
5454-O	SKK‡	12.5	4.2	106	236	26.5	100	106
5454-O	SKK‡	25.3	12.7	107	234	25.0	99.6	100
5454-H32	BM‡	--	--	230	360	14.0	--	--
5454-H32	SKK‡	9.7	1.4	123	258	20.4	71.7	146
5454-H32	SKK‡	9.7	4.2	126	258	19.2	71.7	137
5454-H32	SKK‡	12.5	4.2	124	257	17.3	71.4	124
5454-H32	SKK‡	25.3	12.7	126	254	14.6	70.6	104
2024-T351	BM*	--	--	350	493	19.0	--	--
2024-T351	EK*	--	--	312	348	1.2	70.6	6.3
2024-T351	SKK*	--	--	268	410	5.1	83.2	26.8
2024-T3	BM§	--	--	424	497	14.9	--	--
2024-T3	SKK§	800	80	279	408	6.6	82.0	44.3
2024-T3	SKK§	1000	100	296	423	8.1	85.0	54.4
2024-T3	SKK§	1250	125	304	432	7.6	87.0	51.0
2024-T3	BM#	--	--	325	472	21.0	--	--
2024-T3	SKK#	1200	120	301	424	6.3	90.0	30.0
2024-T3	SKK#	1800	180	315	434	6.9	92.0	32.9
2024-T3	SKK#	2400	240	325	461	11.0	98.0	52.4
6061-T6	BM*	--	--	281	319	15.6	--	--
6061-T6	EK*	--	--	182	255	3.0	80.0	19.2
6061-T6	SKK*	--	--	162	252	7.2	79.0	46.2
7020-T6	BM*	--	--	326	385	13.6	--	--
7020-T6	EK*	--	--	262	343	3.7	89.1	27.2
7020-T6	SKK*	--	--	242	325	4.5	84.4	33.1

+ 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

Çizelge 2.2. Otojen elektron kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış Al-alaşımlarının kaynak edilmiş durumda kırılma tokluğu değerleri (3 mm kalınlığındaki 5005 alaşımı hariç diğer levhaların kalınlıkları 5 mm' dir) (Ataoğlu, 2002; Çam ve Koçak, 2002'den)

Alaşım	Kaynak Prosesi	CTOD ( $\delta_5$ ) <sub>m</sub> [mm]		
		Baz Malzeme (BM)	Ergime Bölgesi Veya Kaynak Dikişi	ITAB/TEB
Al5005-H14	EK	0.43; 0.34; 0.29*	1.43; 1.37; 1.20	---
Al5005-H14	SKK	0.43; 0.34; 0.29	1.62; 1.68; 1.41	1.47; 1.52; 1.20
Al2024-T351	EK	0.31; 0.29; 0.29	0.20; 0.19; 0.17	0.14; 0.13; 0.11
Al2024-T351	SKK	0.31; 0.29; 0.29	0.23; 0.23; 0.21	0.21; 0.18
Al6061-T6	EK	0.28; 0.31; 0.24	0.62; 0.60; 0.57	0.43; 0.42; 0.41
Al6061-T6	SKK	0.28; 0.31; 0.24	1.01; 0.95; 0.92	0.62; 0.66; 0.61
Al7020-T6	EK	0.41; 0.39; 0.39	0.55; 0.50; 0.44	0.51; 0.55; 0.49
Al7020-T6	SKK	0.41; 0.39; 0.39	0.52; 0.44	---

- Koyu değerler ölçülen en düşük değerlerdir.

#### 2.4.2. Yaşlandırma Sertleşmesi Yapılmış Al-Alaşımlarında Kaynak Bölgesinin Mekanik Özellikleri

Kaynak bölgesindeki mukavemet kaybı, bu bölgede mevcut dislokasyonların azalması ve mukavemetlendirici çökeltilerin kaybından dolayı yaşlandırma sertleşmesi yapılmış Al-alaşımlarda daha yüksektir. Fakat, sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış 2024-T3 Al-alaşımının kaynak dikişinde mukavemetlendirici çökeltilerin çözünmesi sonucu malzemenin yumuşamasına rağmen ince taneli bir mikroyapı oluşmasından dolayı bir miktar sertlik düşüşü gözlenmiştir (Ataoğlu, 2002; Biallas ve ark., 1999'dan). Sertlik, bu alaşımın kaynak bölgesinde mukavemetlendirici çökelti partiküllerinin irileşerek sertleştirici etkilerin yok olduğu kaynak dikişi dışındaki aşırı yaşlanma bölgesinde en düşüktür. Bu kaynak işleminde simetrik olmayan bir kaynak dikişi elde edildiği için kaynak dikişinin her iki tarafındaki sertlik minimum olduğu bölgeler kaynak dikişine eşit mesafede değildir. Ayrıca, kaynak dikişinin her iki tarafında

kaynak merkezinden  $\pm 15$  mm mesafede, yapay yaşlandırma sonucu S' fazının ( $Al_2CuMg$ ) çökmesiyle sertliğin maksimum olduğu bölgeler mevcuttur. Yüksek dönme ve ilerleme hızı kullanıldığında kaynak bölgesinde sertlik düşüşü daha az olmaktadır. Bunun sebebi, yüksek hızda yapılan kaynaklardaki yüksek soğuma hızlarından dolayı mukavemetlendirici partiküllerin kısmen tekrar çökmesidir (Ataoğlu, 2002; Rhodes ve ark., 1997; Biallas ve ark., 1999'dan). Düşük kaynak hızı kullanılarak yapılan birleştirmelerde kaynak bölgesinde sertlik düşüşünün daha yüksek olduğu deneysel olarak gösterilmiştir (Ataoğlu, 2002; Biallas ve ark., 1999'dan). Bu kaynaklarda, sertlik kaynak dikişinde ITAB' den biraz yüksektir ve minimum sertlik termo-mekanik olarak etkilenen bölge civarındaki ITAB' dedir (Ataoğlu, 2002).

Aynı kaynak parametreleri kullanıldığında ince sacların kaynak dikişinde kalın sacların kaynak dikişine oranla daha düşük mukavemet kaybı olduğu tespit edilmiştir. Örneğin, sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış 6,35 mm kalınlığında 2014-T6 Al-alaşımında kaynak bölgesinde önemli bir sertlik kaybı olmadığı, minimum sertliğin kaynak bölgesinden uzakta ITAB' de olduğu ve kaynak merkezinin sertliğinin baz malzemenin yüksek olduğu gözlenmiştir (Ataoğlu, 2002; Strangwood ve ark., 1999'dan). Kaynak sonrası 160 °C' de yapılan yaşlandırma işleminin ITAB' de sertliği arttırmadığı, ancak yaşlandırma işlemi öncesi yapılan 505 °C' de çözeltiye alma işlemi ile ITAB ve kaynak dikişinde baz malzemenin sertlik değerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan, sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış 5 mm kalınlığındaki 2024-T351 Al-alaşımında kaynak bölgesinde yüksek sertlik kaybı gözlenmiştir (Ataoğlu, 2002; Mahoney ve ark., 1998; Bussu ve Irving, 1999'dan).

5 mm kalınlığındaki 2024 Al-alaşımında sürtünme karıştırma kaynağı ile elde edilen kaynak performansı (%83) (Ataoğlu, 2002; Von Strombeck ve ark., 1999'dan), otojen elektron kaynağından (%70.6) (Ataoğlu, 2002; Çam ve ark., 1999; Çam ve ark., 2000'den) daha yüksektir. Benzer şekilde, başka bir çalışmada 800 devir/dak dönme hızı ve 80 mm/dak ilerleme hızı kullanılarak sürtünme karıştırma kaynağı yapılan 2024-T3 Al-alaşımında %83' lük bir kaynak performansı elde edilmiştir (Ataoğlu, 2002; Biallas ve ark., 1999'dan). Daha yüksek hızlar kullanılarak (kaynak parametresi = dönme hızı ( $R_t$ ) / ilerleme hızı ( $v$ ) = 10) sürtünme karıştırma kaynağı yapılan 4 mm ve 1,6 mm kalınlığındaki levhalarda sırasıyla %87 ve %98' lik bir kaynak performansına ulaşılmıştır (Ataoğlu, 2002; Karlsson ve ark., 1999'dan).

4 mm kalınlıktaki 2024-T6 Al-alaşımı için kaynak parametre aralığını bulmak amacıyla yapılan bir çalışmada, aralığın biraz dar olduğu (örnek  $R_t/v = 3-5$ ) gözlenmiştir (Ataoğlu, 2002; Hashimoto ve ark., 1999'dan), ki bu her zaman için geçerli değildir (Ataoğlu, 2002; Biallas ve ark., 1999'dan). Bir başka çalışmada, sürtünme karıştırma kaynaklı 2024-T351 Al-alaşımının çekme ve yorulma özellikleri incelenmiştir (Ataoğlu, 2002; Pedwel ve ark., 1999'dan). Çekme deneyi sonuçları, kaynak bölgesinde baz malzemeye oranla çekme mukavemetinde %10' luk bir düşüş olduğunu göstermiştir. Yorulma deneyleri de, sürtünme karıştırma kaynaklı numunelerin yorulma özelliklerinin baz malzeme kadar iyi olmadığını göstermiştir (Ataoğlu, 2002; Bussu ve Irving, 1999; Pedwel ve ark., 1999'dan). Fakat sürtünme karıştırma kaynağının yorulma performansı uçaklarda şu anda kullanılan perçinli birleştirmelerle karşılaştırıldığında yorulma ömrünün sürtünme karıştırma kaynağında 100 kat fazla olduğu görülmektedir (Ataoğlu, 2002; Pedwel ve ark., 1999'dan). Buna ilaveten, yüksek dönme ve ilerleme hızları ile sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirmelerin yorulma mukavemeti artmaktadır (Ataoğlu, 2002; Biallas ve ark., 1999'dan). Genel olarak, sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirmelerin üst yüzeylerinde pim omzunun etkisi ile oluşan profil çentik etkisi yaparak yorulma ömrünü azaltmaktadır. Dolayısıyla, kaynağın yorulma performansını geliştirmek için kaynak sonrası yüzey işlenmelidir (Ataoğlu, 2002; Bussu ve Irving, 1999'dan). Yüzey pürüzlülüğünün giderilmesi ile, sürtünme karıştırma kaynaklı 2024-T351 Al-alaşımının yorulma ömrünün baz malzeme düzeyine çıkarılabildiği deneysel olarak gösterilmiştir (Ataoğlu, 2002; Bussu ve Irving, 1999'dan). Ayrıca, değişik kaynak yöntemleri arasında (SKK, ergitme kaynağı ve perçinleme) yorulma dayanımını en az olumsuz yönde etkileyen yöntem sürtünme karıştırma kaynağıdır (Ataoğlu, 2002).

Yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış Al-Mg-Si alaşımının (6061) kaynak dikişinde sürtünme karıştırma kaynağı esnasında mukavemetlendirici fazların çözünmesi ile mukavemet kaybı olur (Ataoğlu, 2002; Von Strombeck ve ark., 1999; Karlsson ve ark., 1999; Reynolds, 1998; Mahoney ve ark., 1998; Svensson ve Karlsson, 1999'dan). 6XXX serisi alaşımlarda temel sertleştirici faz  $\beta''$  ( $Mg_5Si_6$ ) fazıdır. Bu faz ısıtma sırasında sıcaklık 200-250 °C' nin üzerine çıktığında kolayca çözünür. Soğutma esnasında, kaynak dikişinde değil ITAB' de  $\beta'$  ( $Mg_{1,7}Si$ ) gibi daha az sertleştirici özelliğe sahip fazlar çöker. Bundan dolayı, bu alaşımın kaynak bölgesinde önemli

oranda sertlik kaybı gözlenir. Fakat, muhtemelen sertleştirici çökelti partiküllerinin büyümesi sonucu minimum sertlik kaynak dikişine yakın ITAB' dedir (Ataoğlu, 2002; Von Strombeck ve ark., 1999'dan). Fakat, ITAB' deki bu sertlik kaybı TİG kaynağından çok daha düşüktür. Bunun sebebi sürtünme karıştırma kaynağında soğumanın daha hızlı olması sebebiyle aşırı yaşlanmanın daha az olmasıdır. Elektron kaynağında sertlik minimumu kaynak dikişinde iken (Ataoğlu, 2002; Çam ve ark., 1999; Çam ve ark., 2000'den), TİG kaynağında olduğu gibi sertlik minimumu sürtünme karıştırma kaynağında da ITAB' deki aşırı yaşlanma bölgesindedir. Ayrıca, sürtünme karıştırma kaynak dikişindeki sertlik TİG kaynaklarının kaynak dikişinde elde edilen sertlik değerinden çok daha yüksektir. Bu yöntemde elde edilen kaynak dikişinde sertliğin yüksek olması, sertleştirici partiküllerin çökmesi, Mg ve Si atomlarının katı eriyik sertleşmesi ve kaynak dikişinde tane rafinasyonu gibi karıştırma kaynaklı Al-alaşımında kaynak dikişlerinin mukavemet değerlerinin baz malzemelerden düşük olmasından dolayı sürpriz değildir (Ataoğlu, 2002).

8,1 mm kalınlığındaki 2195-T8 Al-Li alaşımının sürtünme karıştırma kaynak sonucunda kaynak dikişinin çekme mukavemetinde büyük bir düşüş olduğu ve kaynak performansının %67,2 olduğu kaydedilmiştir (Ataoğlu, 2002; Reynolds ve ark., 1999'dan). Fakat, sürtünme karıştırma kaynağında elde edilen bu %67,2' lik kaynak performansı aynı levha için değişken kutup plazma ark (veriabe polarty plasma arc) kaynağında ulaşılan performanstan önemli oranda yüksektir. Benzer şekilde, sürtünme karıştırma kaynaklı 8,1 mm kalınlıktaki 2195-T8 alaşımı oda sıcaklığında ve çok düşük sıcaklıklarda yapılan çekme testlerinde klasik ergitme kaynaklarından çok daha iyi sonuç vermiştir (Ataoğlu, 2002; Kinchen ve ark., 1999'dan). Ayrıca, sürtünme karıştırma kaynaklı 2195 alaşımı hem oda sıcaklığında hem de çok düşük sıcaklıklarda ergitme kaynaklarındakinden daha yüksek süneklik göstermiştir (Ataoğlu, 2002; Loftus ve ark, 1999'dan).

## **2.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulama Alanları**

Bu kaynak yönteminin uygulaması konvansiyonel dik freze tezgahlarda özel takım kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Ticari olarak üretilmiş değişik ebatlarda sürtünme karıştırma kaynak cihazları mevcut olup, maliyetleri 1 milyon \$'a kadar

çıkmaktadır. Yöntem Al-alaşımlarının kaynağına yönelik özel olarak geliştirilmiş olmakla birlikte klasik ergitme kaynak yöntemleri ile kaynağı mümkün olmayan veya güç olan bazı alaşımların kaynağında başarılı sonuçlar vermiştir. Bu yöntemle Al-alaşımlarının tek pasoda 50 mm ve çift taraftan kaynak yapmak suretiyle 100 mm kalınlığa kadar levhaların alın kaynağı yapılabilmektedir (Serindağ, 2006; Çam ve Koçak, 2000; Çam, 2003; Çam, 2005a'dan).

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin Al-alaşımlarında uygulanabilirliği üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır (Serindağ, 2006; Çam ve Koçak, 2002; Çam, 2003'den). Bu araştırma sonuçları göstermektedir ki, bu yöntem gerek yaşlandırma sertleşmesi yapılan gerekse yaşlandırma sertleşmesi yapılamayan (1xxx ve 5xxx gibi ısıl işleme duyarlı olmayan) Al-alaşımlarında başarı ile kullanılabilir. Bu yöntemle elde edilen birleştirmelerin hem yüzey kalitesi hem de kaynak performansı klasik ergitme kaynaklarına nazaran daha iyidir (Serindağ, 2006; Çam ve Koçak, 2002; Çam, 2002; 2003; Kalle ve Mistry, 1999'dan). Ayrıca sürtünme karıştırma kaynağında takım ilerleme hızını arttırarak bu mukavemet düşüşünün daha da azaltılması ve batıcı uç çapının küçük seçilmesi ile mekanik özelliklerin etkilendiği bölgenin eninin küçültülmesi mümkündür. Buna ilaveten, bu yöntem ile kaynak edilen 5454 alaşımının korozyon performansının da oldukça iyi olduğu tespit edilmiştir. Hatta geleneksel kaynak yöntemleri ile kaynağı çok güç olan 7075 alaşım bile bu yöntem ile başarılı bir şekilde birleştirilmiş ve elde edilen birleştirmeler oldukça iyi mekanik özelliklere göstermiştir (Serindağ, 2006; Çam, 2003'den).

Al-alaşımlarının dışında, ergitme kaynak yöntemleri ile kaynağı mümkün olmayan veya güç olan Al-Li gibi bazı alaşımlar ve 0.8 mm kalınlığındaki çinko sacların kaynağında bu yöntem başarı ile uygulanmıştır. Ayrıca, düşük karbonlu yumuşak çeliklerin, Mg-alaşımlarının, Ti-alaşımlarının, saf Cu ve pirinç gibi Cu-alaşımlarının, düşük sertlikteki östenitik paslanmaz çeliklerin ve ergime derecesi birbirine yakın farklı iki malzemenin kaynağında da bu yöntem başarı ile uygulanabilir. Özel amaçlı sürtünme karıştırma kaynağı makinelerinde 50 mm kalınlığındaki saf bakır levha 100 mm/dak kaynak hızında mükemmel kalitede kaynak edilmiştir (Serindağ, 2006; Çam, 2003'den).

Sürtünme karıştırma kaynağı, en az çinko ve kurşun levhalarda olduğu kadar magnezyum alaşımlarında da başarı ile uygulanabilmektedir. İngiliz Kaynak

Enstitüsünde (TWI) 9.5 mm kalınlığındaki magnezyum AZ61A alaşımında yapılan ilk deneyler başarı ile sonuçlanmıştır. Japonya da yapılan bir çalışmada da, 6 mm kalınlığındaki AZ31 magnezyum alaşımı üzerinde yapılan ileri laboratuvar deneylerinde, kaynak esnasında ince yeniden kristalleşmiş tane yapısının oluşmasından dolayı, numunelerin mukavemeti ile baz malzemenin mukavemet değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu tespit edilmiştir (Serindağ, 2006; Çam, 2003'den).

Uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan titanyum alaşımlarında sürtünme karıştırma kaynağı denemeleri ilk olarak Ti-6Al-4V alaşımında başarı ile gerçekleştirilmiş ve diğer alaşımlar üzerinde çalışmalar başlatılmıştır. Yüksek korozyon dayanımından dolayı petrol boru hattı şebekeleri ve su üstü platformlarında rakipsiz olan bu alaşımın bu tür uygulamalarında sürtünme karıştırma kaynağının kullanılabilirliği konusunda araştırmalar sürdürülmektedir (Serindağ, 2006; Çam, 2003'den).

Bu kaynak tekniği günümüzde ticari olarak gemi inşaatı, hızlı tren imalatı, havacılık gibi değişik alanlarda uygulanmaktadır. Yüksek hız feribotlarında kullanılan standart boydaki alüminyum ekstrüzyon panelleri sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmektedir (Şekil 2.14). Ergitme kaynaklarına kıyasla ısı girdisinin düşük olması panellerdeki distorsiyon ve kalıntı gerilmelerini minimum düzeyde olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, bu yöntem Al-Li 2195 alaşımından üretilen uzay mekiklerinin yakıt tanklarının son kubbe kısımlarının kaynağında başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Şekil 2.15). 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 (Serindağ, 2006; Çam, 2005a'dan).





Şekil 2.14. Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile birleştirilmesi (Serindağ, 2006; Çam, 2003; 2005a; Kalle ve ark.,2001'den)



Şekil 2.15. Space Shuttle External Tank projesi ve Marshall Space Flight Center laboratuvarındaki Sürtünme Karıştırma Kaynak sistemlerinden görüntüler (Serindağ, 2006; Çam, 2003; 2005a; Kalle ve ark.,2001'den)

Sürtünme karıştırma kaynağı, gemi, uçak ve uzay aracı, tren ve kara taşıtlarının imalatı gibi çok geniş bir uygulama alanı yelpazesine sahiptir. Bu uygulamalarda, bu yeni kaynak teknolojisi sınırlı da olsa ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Robotik sürtünme karıştırma kaynağı ile Al- ve Mg-alaşımlarının 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 kullanımının her geçen gün artacağı beklenmektedir (Serindağ, 2006; Çam, 2005a'dan).

## 2.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları

Sürtünme karıştırma kaynağının üstünlükleri şunlardır.

- 1) Ergitme kaynağı zor olan 2XXX ve 7XXX serisi Al-alaşimleri ve Al-Li alaşimleri kaynak edilebilir.
- 2) Kaynak esnasındaki toplam ısı girdisi düşüktür, dolayısıyla mekanik özelliklerdeki kayıp minimumdur.
- 3) Özellikle ince levhalarda büzülme, distorsiyon ve kalıntı gerilmeler çok düşüktür.
- 4) Kaynak öncesi yüzey hazırlama aşırı kritik değildir, yüzeyde ince oksit filmleri tolere edilebilir.
- 5) Katı hal kaynağı olduğu için çatlak ve porozite oluşumu gibi ergitme kaynaklarında karşılaşılan problemler söz konusu değildir.
- 6) Dolgu malzemesine gereksinim yoktur.
- 7) Kaynak sonrası kaynak yüzeyi talaş alınmış gibi düzgündür ve yüzey işleme gerektirmez.
- 8) Alın ve bindirme kaynağı yapılabilir.
- 9) Aynı takım ile tipik olarak 1000 m kaynak yapılabilir.
- 10) Yöntemin doğası gereği ark, kıvılcım, gaz ve toz söz konusu olmadığından çok temiz ve çevreci bir kaynak yöntemidir.
- 11) Enerji verimliliği yüksek bir kaynak yöntemidir.
- 12) Otomasyona ve robotik uygulamaya çok uygundur.

Yöntemin dezavantajları ise şunlardır:

- 1) Her malzemenin kaynağı mümkün değildir. Yalnızca mukavemeti düşük ve özellikle düşük ergime dereceli malzemelerin kaynağına uygundur.
- 2) Kaynaklanacak parçaların çok sıkı tespit edilmesi şarttır.
- 3) Kaynak hızı bazı ergitme kaynaklarından düşüktür (tipik olarak 5 mm kalınlığındaki 6XXX serisi Al-alaşımı levhalarda 750 mm/dak civarında).
- 4) Tek parçalı takım kullanıldığında kaynak sonunda delik oluşur.
- 5) Özellikle kalın levhaların kaynağı için çok güçlü tezgahlara ihtiyaç vardır (Çam, 2005a).

## 2.7. Alüminyum Alaşımları ve Özellikleri

Yer kabuğunda en çok bulunan ikinci metalsel element olan ve günümüz endüstrisinde çelikten sonra en fazla kullanılan alüminyum ve alüminyum alaşımları; hafif olmaları, iyi ısı ve elektrik iletkenlikleri, artırılabilen mukavemet özellikleri ve korozyona karşı dirençleri nedeniyle mühendis ve tasarımcılar için günümüzde önemli bir malzeme konumundadır. Özellikle son yıllarda, enerji tasarrufuna dönük çalışmalar, daha az yakıt harcayan hafif ve ekonomik taşıtların üretimini gündeme getirmiş ve alüminyum alaşımları, otomobillerde, otobüslerde, trenlerde, deniz taşıtları yapımında öncelikli olarak tercih edilen metalsel malzemeler olmuştur. Esasında bu alaşımlar, uzun yıllardır havacılık endüstrisinde kullanılmakta olan malzemelerdir ve artırılmış mukavemet ve darbe özellikleri sayesinde savunma sanayiinde de kullanıma girmişlerdir (Anonim, 2007).

Endüstride kullanılan alüminyum alaşımları dövme ve döküm alüminyum alaşımları olarak 2 tipte üretilmektedirler. Alüminyum alaşımlarının ısı işlem uygulanamayan (soğuk şekil değiştirme sertleştirmeli) ve ısı işlem uygulanabilen (çökelme sertleştirmeli) birçok türü uçak, uzay araçları ve gemi yapım endüstrisinde geniş uygulama alanı bulmaktadır. Bunlar genellikle; 2xxx, 5xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımlarıdır (Anonim, 2007).

Alüminyumun ergime sıcaklığı düşük, buna karşın kendini çekmesi çok fazladır, bu bakımdan döküm yolu ile şekillendirme için saf alüminyum yerine, alüminyum alaşımları tercih edilir (Anonim, 2007; Anık ve Dorn, 1995; Tülbentçi, 1987'den).

Çizelge 2.3. Alüminyumun fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri (Mathers, 2002)

Özellik	Alüminyum
Kristal kafes yapısı	YMK
Yoğunluğu (g/cm <sup>3</sup> )	2.7
Ergime sıcaklığı (°C)	660
Özgül ısısı (J/ kg K)	930
Isıl iletkenliği (W/m K)	235
Isıl genleşme katsayısı (Δl/l °C)	33.9x10 <sup>-6</sup>
Elektrik direnci (μΩcm)	2.65
Elastisite modülü E (N/mm <sup>2</sup> )	6.7x10 <sup>4</sup>
Maksimum çekme mukavemeti (N/mm <sup>2</sup> )	65

Alüminyum saflık derecesine göre sınıflandırılır. Mekanik özellikleri, içeriğindeki Si, Fe, Ti, Cu ve Zn gibi elementlerin etkisi ile yükselmesine karşın kimyasal maddelere karşı olan direnci azalır; mekanik özellikler alüminyuma uygulanan şekil verme işlemine bağlı olarak ta büyük ölçüde değişir (Anonim, 2007; Tülbentçi, 1987; Anık ve ark., 1993'den).

Alüminyum % 99.0- 99.5- 99.8- 99.99 safiyet derecelerinde üretilir; % 99.99 saflıktaki alüminyum yüksek nitelikte saf alüminyum olarak tanımlanır ve burada fiziksel ve mekanik özellikler belirli bir şekilde kendini gösterir. Bu alüminyum yumuşaktır ve kolay işlenebilir, ısı ve elektriği iyi iletir, ışığı iyi yansıtır ve korozyona karşı oldukça dirençlidir. Dünyada ve ülkemizde endüstriyel uygulamaları hızla artan alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kısaca tanıtımı aşağıda yapıldıktan sonra, endüstride en çok kullanılan dövme alüminyum alaşımlarının Avrupa Standartlarına (EN) göre sınıflandırılmaları ve gösterimleri ele alınmıştır (Anonim, 2007).

### 2.7.1. Dövme Alüminyum Alaşımları

Bu türe giren alaşımlar Cu, Mg, Mn, Si ve Ni gibi elementler içerirler; çoğu kez önce sürekli döküm yöntemi ile blok biçiminde elde edildikten sonra, homojenleştirme tavı uygulanır, haddeleme veya ekstrüzyon ile biçimlendirilirler. Döküm yapısında tane sınırlarında oluşan sürekli gevrek fazlar, şekillendirme sırasında parçalanır ve ana

kütleye dağılır ve böylece alaşım soğuk şekillendirmeye uygun duruma geçer (Anonim, 2007; Domke, 1988'den).

Dövme alüminyum alaşımlarının simgelenmesi ve standartlaştırılmaları ilk olarak sistematik biçimde 1954 yılında Alüminyum Birliği tarafından gerçekleştirilmiştir. Burada dört numaralı bir tanımlama sistemi kullanılır. Bu sistem günümüzde hala geçerli olan bir sistemdir ve gerek Amerikan gerekse de Avrupa Standartlarının temelini oluşturur(Anonim, 2007).

Çizelge 2.4. Alüminyum Birliği tarafından geliştirilen standardizasyona göre dövme alüminyum alaşımlarının simgelenmesi (Anderson, 2000)

Alüminyum Birliği No.	Başlıca Alaşım Elementi
1xxx	Min. %99.0 veya daha fazla alüminyum
2xxx	Bakır
3xxx	Mangan
4xxx	Silisyum
5xxx	Magnezyum
6xxx	Magnezyum ve Silisyum
7xxx	Çinko
8xxx	Diğer elementler
9xxx	Kullanılmayan seriler

Çeşitli ülkelerin ulusal standartlarında farklı simgelenme ile tanımlanan dövme alüminyum alaşımları EN 573 serisi standartlarda detaylı olarak ele alınmıştır. Dövme alüminyum ve alüminyum alaşımlarının simgelenmesi ve kimyasal bileşimleri EN 573-3: 1995'te tanımlanmıştır. Ülkemizde de TS EN 412/Ocak 1987 "Biçimlenebilen Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları- Kimyasal Bileşimi" olarak standartlaştırılmışlardır(Anonim, 2007).

1xxx, 3xxx ve 5xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ısıtma işlemi uygulanamayan türlerdir ve bunlar yalnızca şekil değişimiyle sertleştirilebilirler. 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ise ısıtma işlemine tabi tutulabilirler. 4xxx serisi hem ısıtma işlemine tabi tutulabilir hem de ısıtma işlemine tabi tutulamaz alaşımlar içerir (Anonim, 2007; Anderson; 2000'den).

Isıtma işlemine tabi tutulabilir alaşımlar, en yüksek mekanik özelliklerini en genel olarak çözeltiye alma ısıtma işlemi ile kazanırlar. Çözeltiye alma ısıtma işleminde alaşım, çözelti içine alaşım elementleri veya bileşik katmak için yaklaşık 530°C'ye kadar

ısıtılır, arkasından hızlı soğutma gelir, bu işlem; oda sıcaklığında aşırı doymuş çözelti sağlamak için genelde su içinde yapılır. Genellikle bunu, yaşlandırma ısıl işlemi takip eder. Yaşlandırma; istenen akma özellikleri için, aşırı doymuş çözültiden bir miktar element veya bileşiğin çökeltmesidir. Burada, çökeltme sonucunda tanelerin içinde, ışık mikroskobu ile seçilemeyen çok ufak zerreler oluşur. Bu submikroskobik zerreler kafeste kaymayı önler böylece alaşım sertleşir ve akma ve çekme mukavemeti yükselir (Anonim, 2007; Tülbentçi,1987; Anık ve ark., 1993'den).

Isıl işleme tabi tutulamayan alaşımlar en yüksek mekanik özelliklerini, soğuk şekillendirme yoluyla sertlik ve mukavemeti artırma yöntemi olan şekil değiştirme sertleştirilmesi ile kazanırlar. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanan temel sertleştirme işlemlerinin gösterimi Çizelge 2.5, Çizelge 2.6 ve Çizelge 2.7'de verilmiştir(Anonim, 2007).

Çizelge 2.5. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının temel ısıl işlemlerinin gösterimi (Anderson, 2000, Metals Handbook, 1991)

Harf	Anlamı
F	Üretim- Ürünlerde hiç bir özel ısıl kontrol veya sertleştirme koşulları kullanılmayan şekillendirme sistemi
O	Tavlama- Uygulanan tav, en düşük mukavemet koşullarını, süneklik ve boyutsal kararlılığı sağlamak için uygulanır.
H	Şekil değiştirme sertleştirilmesi- soğuk şekillendirme ile üretilen ürünlere uygulanır. Şekil değiştirme sertleşmesini, mukavemeti bir miktar düşüren ek ısıl işlem uygulanması takip eder. H' 1 genelde iki veya daha çok sayı takip eder.
W	Çözeltiye alma (çökelti sertleştirilmesi) ısıl işlemi- kararlı olmayan alaşımlara yalnızca çözeltiye alma tavlamasından sonra oda sıcaklığında kendiliğinden yaşlanmayı sağlayan tav uygulanır.
T	Isıl İşlem- F, O, H' dan daha kararlı tav sağlamak içindir. Ürünlere tav uygulaması bazen sabit sertlik derecesi sağlamak için şekil değiştirme sertleştirilmesiyle birlikte uygulanır.

6061-T6, 6063-T4, 5052-H32 ve 5083-H112 alaşımlarının gösteriminde olduğu gibi alaşım numaralama sistemini ısıl işlemle bir tire ile birleştiren, serilerin harflerini alaşım gösterim numarasının takip ettiği sistemdir ve bu gösterim tüm standartlarda aynıdır (Anonim, 2007).

Çizelge 2.6. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının sertleştirme (H) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi (Anderson, 2000; Metals Handbook, 1991)

<p><b><u>H' dan sonraki ilk rakam temel işlemi tanımlar.</u></b></p> <p><b>H1</b>— Sadece Şekil Değişirme Sertleştirilmesi</p> <p><b>H2</b>— Şekil Değişirme Sertleştirilmesi ve Yapay Yeniden Kristalleştirme</p> <p><b>H3</b>— Şekil Değişirme Sertleştirilmesi ve Yapı Dengelemesi</p> <p><b>H4</b>— Şekil Değişirme Sertleştirilmesi ve Parlatma veya Boyama</p> <p><b><u>H' dan sonraki ikinci rakam şekil değiştirme sertliği derecesini tanımlar.</u></b></p> <p><b>Hx2</b>— Dörtte bir</p> <p><b>Hx4</b>— Yarım Sert</p> <p><b>Hx6</b>— Üç-çeyrek Sert</p> <p><b>Hx8</b>— Tam Sert</p> <p><b>Hx9</b>— Çok Sert</p>
--

Çizelge 2.7. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının T (ısıtma işlemi) işlemlerinin alt bölümlerinin gösterimi (Anderson, 2000; Metals Handbook, 1991).

<p><b>T1</b>— Ekstrüzyon gibi yüksek sıcaklıkta şekil verilmiş parçalar soğutulduktan sonraki doğal yaşlandırma</p> <p><b>T2</b>— Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve ardından doğal yaşlandırma</p> <p><b>T3</b>— Çözeltiye alma ısıtma işlemi, soğuk şekillendirme ve doğal yaşlandırma</p> <p><b>T4</b>— Çözeltiye alma ısıtma işlemi ve doğal yaşlandırma</p> <p><b>T5</b>— Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra yapay yaşlandırma</p> <p><b>T6</b>— Çözeltiye alma ısıtma işlemi ve yapay yaşlandırma</p> <p><b>T7</b>— Çözeltiye alma ısıtma işlemi ve stabilizasyon (aşırı yaşlandırma)</p> <p><b>T8</b>— Çözeltiye alma ısıtma işlemi, soğuk şekillendirme ve yapay yaşlandırma</p> <p><b>T9</b>— Çözeltiye alma ısıtma işlemi, yapay yaşlandırma ve soğuk şekillendirme</p> <p><b>T10</b>— Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve sonra yapay yaşlandırma</p> <p><b>Eklenen numaralar gerilme gidermeleri tanımlar.</b></p> <p><b>Örnek:</b></p> <p><b>Tx51</b> veya <b>Txx51</b>— Çekmeyle gerilim giderme</p> <p><b>Tx52</b> veya <b>Txx52</b>— Basma ile gerilim giderme</p>
--

### 2.7.2. Döküm Alüminyum Alaşımları

Bu tür alaşımların büyük çoğunluğu silisyum içerir; %11.7Si içeren alaşım ötektik bileşimde olduğundan çok üstün döküm özelliklerine sahiptir. Bu alaşımın korozyona direnci ve kaynak kabiliyeti de oldukça iyidir. Döküm alüminyum alaşımlarına bir miktar bakır katılması, talaş kaldırma özelliklerini geliştirir, buna karşın, korozyon direncinde azalmaya neden olur (Anonim, 2007; Tülbentçi ve Kaluç, 1985'den).

Çizelge 2.8. Alüminyum Birliği standartlarına göre döküm alüminyum alaşımlarının simgelenmesi (Anderson, 2000; Metals Handbook, 1991)

Alüminyum Birliği No.	Başlıca Alaşım Elementi
1xx•x	Saf alüminyum (%99'dan daha fazla)
2xx•x	Bakır
3xx•x	Silisyum+bakır ve/veya Magnezyum
4xx•x	Silisyum
5xx•x	Magnezyum
6xx•x	Kullanılmayan seriler
7xx•x	Çinko
8xx•x	Kalay
9xx•x	Diğer elementler

Döküm alüminyum alaşımlarına silisyumdan başka magnezyum katılarak çökeltme yolu ile sertleştirilebilen ve deniz suyunun korozyon etkilerine dirençli alaşımlar elde edilir (Anonim, 2007).

Alüminyum Birliği'nin standardizasyonuna göre alaşımları ülkemizde de TS 410/Nisan 1975'de yayımlanmış "Alüminyum Alaşımlarından Yapılan Dökümlerin Bileşimi" adlı standardda tanımlanmışlardır. Günümüzde bu tür alaşımlar için hazırlanmış olan EN 1706 ve EN 1780 serisi standartlar geçerlidir (Anonim, 2007).



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı yapılan Al-alaşımı levhalar FNSS firmasından (Ankara) temin edilmiştir. 3 mm kalınlığında Al5086-H32 levhaların sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile alın kaynağı gerçekleştirilmiştir. Bu kaynak işleminde kullanılan levhalar yaklaşık olarak 297 mm boy, 210 mm en ve 3 mm kalınlığa sahiptir. Bu çalışmada, alın kaynak işlemleri 1600 dev/dak. devir hızı ve 175 mm/dak, 200 mm/dak ve 225 mm/dak olmak üzere üç farklı ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir. Bu birleştirme işleminde kullanılan cihaz ve sistemler aşağıda verilmektedir. Ayrıca birleştirme işleminin nasıl yapıldığı, hangi safhalardan oluştuğu ve kaynak bölgesinde oluşan içyapının incelenmesi ile mekanik özelliklerinin nasıl belirlendiği bu bölümde açıklanacaktır.

#### 3.1. Kullanılan Malzeme

Bu çalışmada kullanılan malzeme 3 mm kalınlığındaki Al5086-H32 levhalardır. Bu alaşım Al-Mg alaşımı olup, soğuk şekil verme sertleştirmesi ve yapı dengelemesine tabi tutulmuş olup, soğuk şekil verme sertleşmesi  $\frac{1}{4}$  (bir çeyrek) mertebesindedir. Çizelge 3.1 Al5086 alaşımının kimyasal kompozisyonunu ve Çizelge 3.2 de bu alaşımın mekanik özelliklerini vermektedir.

Çizelge 3.1. Al5086 alaşımının kimyasal kompozisyonu

Bileşen	% (Ağırlık)
Al	93 – 96.3
Mg	3.5 – 4.5
Mn	0.2 – 0.7
Cr	0.005 – 0.25
Cu	Max. 0.1
Fe	Max. 0.5
Si	Max. 0.4
Ti	Max. 0.15
Zn	Max. 0.25
Diğer elementler	Max. 0.15

Çizelge 3.2. Al5086-H32 alaşımının mekanik özellikleri

Sertlik, Vickers	88
Maksimum Çekme Gerilmesi, MPa	290
Akma Gerilmesi, MPa	207
Uzama, %	12
Elastisite Modülü, GPa	71

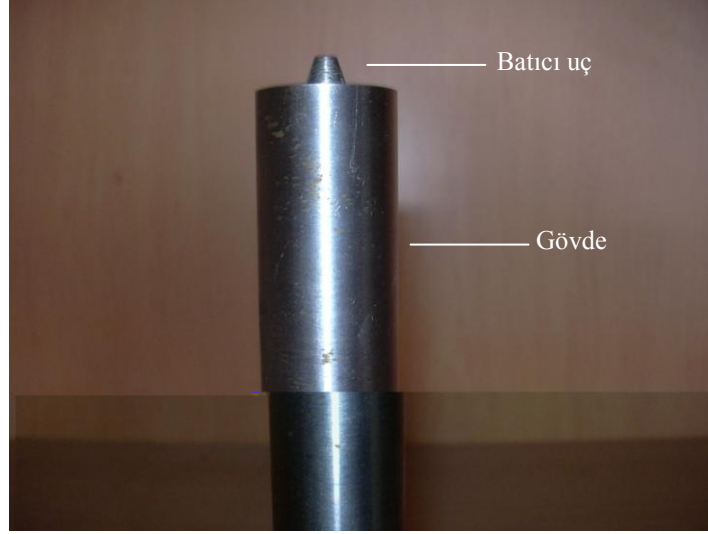
### 3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynak Uçları

Bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynaklarını yapmak için gerekli takımlar (baticı uçlar) 1.3207 malzeme numaralı ( % 1,27 C, %4 Cr, %3,6 Mo, %9,5 W, %10 Co, %3,2 V içeren ) yüksek hız çeliğinden yapılmıştır. Baticı uçlarda standart dışı helisel kanal açılmış ve ucu yuvarlatılmıştır. Baticı uçlar konik olup, tabandaki çapı 4 mm iken uç çapı yaklaşık 3 mm'dir.

Kaynak uçları iki bölümden oluşmaktadır. Bunlar:

1. Üniversal frezenin başlığına bağlanan takımın omuz kısmı: Baticı ucun tezgah başlığına kolay bağlanması için çapı piyasadan temin edildiği gibi seçilmiştir. Çap 22 mm, boyu 110 mm'dir. Baticı ucun boyu tezgah başlığının kavrayacağı büyüklükte olmalıdır. Bu kısmın ölçüleri kaynak ucu için çok kritik değildir.

2. Konik sürtünme karıştırma kaynak ucu: Çapı ve boyu sürtünme karıştırma kaynağı yapılacak levhanın kalınlığına bağlıdır. Al-alaşımı levhaların kaynağında kullanılan takım çeliği baticı ucun üzerine standart dışı helisel diş açılmış ve ucu yuvarlatılmıştır. Bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı yapılacak levhaların et kalınlığı 3 mm olduğundan, kaynak ucunun uzunluğu alın kaynağında 2.8 mm seçilmiştir. Diğer bir deyişle baticı uçla taban arasında 0.2 mm mesafe bırakılmıştır. Bunun sebebi, kaynak işlemi süresince kaynak ucunun alttan çıkmaması ve levhaların bağlandığı kalıba temas etmemesidir.



Şekil 3.1. Kaynak işleminde kullanılan ucu yuvarlatılmış konik batıcı uçlu takım

### 3.3. Kaynaklanacak Levhaların Tezgaha Sabitlenmesi

Üniversal freze tezgahında, sürtünme karıştırma kaynağı yapılacak levhaların tablaya bağlanarak kaynak yapılabilmesi için, öncelikle levhaların sabitleneceği freze tablasına uygun sıkıştırma aparatları imal edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan üniversal freze tezgahının tabla boyutları ve dizaynı kullanılan levhaların ebatlarına uygun olmadığından freze tablasının üzerine platinadan (et kalınlığı 20 mm'den fazla olan çelik sac) imal edilen bir blok yerleştirilmiş ve kaynağı yapılacak levhalar bu blok üzerine yerleştirilmiştir. Kaynak esnasında sabit kalması gereken levhalar daha sonra blok üzerine yerleştirilen her bir levhanın üzerine ayrı birer blok konularak pabuçlar ile sabitlenmiştir.

### 3.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Freze Tezgahı

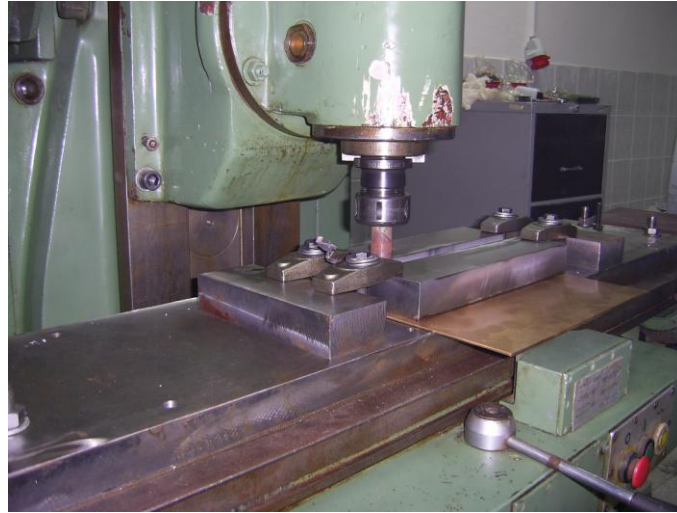
Bu çalışmada, sürtünme karıştırma kaynağı işlemleri üniversal dik freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.2 ve 3.3 kullanılan üniversal dik freze tezgahını göstermektedir. Dik freze tezgahı maksimum 2000 dev/dak ve 5.5-260 mm/dak. ilerleme hızı aralığında çalışabilmekte ve X ekseninde tabla hareket mesafesi (kurs boyu) yaklaşık 1100 mm'dir. Diğer bir deyişle uygun bağlama tertibatı kullanıldığında bu tezgahta yaklaşık 1100 mm uzunluğunda levhalar kaynaklanabilir. Freze elektrik

motoru ile çalışmakta, motordan aldığı dönme hareketini kasnak kayışı vasıtasıyla frezenin düşey başlığı içerisindeki freze başlık miline aktarmakta ve yağ soğutmalıdır. Düşük hızda tezgahın ilerletilebilmesi için redüktör ve elektrik motorları kullanılarak tabla hareketi yavaşlatılmıştır.

Sürtünme karıştırma kaynağının yapıldığı universal freze tezgahının, kaynağa başlamadan önce kontrollerinin yapılması gerekmektedir. Bu kontroller, kaliteli bir kaynak için şarttır. Aksi takdirde, tezgahtan kaynaklanan kaynak hataları meydana gelmektedir.



Şekil 3.2. Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin yapıldığı dik freze tezgahı



Şekil 3.3. Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin yapıldığı tezgahın detay görünümü

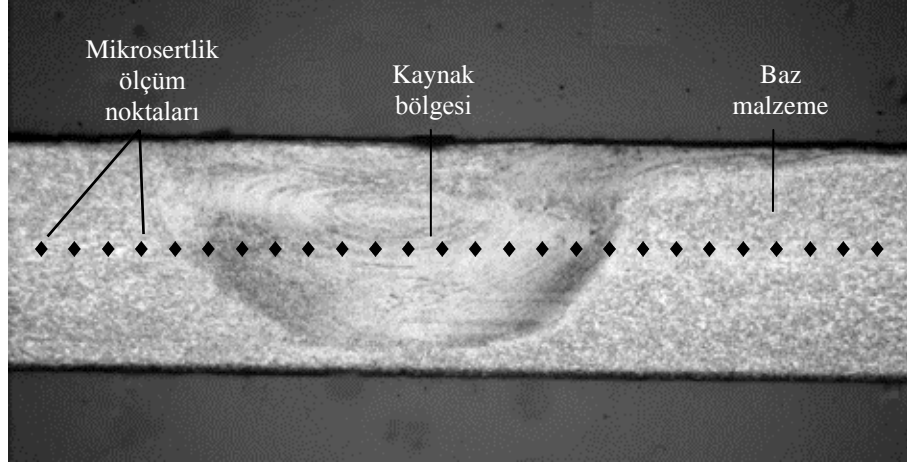
### 3.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Yapılması

Kaynak işlemi, takımın dönme hareketi, takımın malzemeye batması ve levhaların bağlı olduğu tablanın ilerleme hareketi olmak üzere üç temel safhadan oluşur. Takıma dönme hareketini freze başlığı içerisindeki freze başlık mili verir. Batma hareketi tablanın yukarı hareketi ile sağlanır. İlerleme hareketi ise tablanın ucuna takılan ve tezgahın yanında bir kontrol paneli olan elektrik motoru sayesinde otomatik olarak sağlanır. Bu işlemlerin sonunda, tablaya özel bir aparatla alın altına bağlanmış olan ve üst üste bindirilen 2 parça halindeki levhaların alın veya bindirme kaynağı yapılır. Bu işlem sırasında dikkat edilmesi gereken önemli noktalar birisi takımın saat yönünün tersi yönde dönüş hareketi yapmasıdır. Bu dönüş yönü, matkaplarda delme işlemindeki dönme yönünün tersidir. Bunun amacı ise takımla temas halinde bulunan çamur kıvamındaki malzemenin uç yüzeyindeki kanallar vasıtasıyla yüzeyden aşağıya doğru basılmasının gerekliliğidir. Diğer hususlar ise, takım omzunun levha yüzeyine oturana kadar kaynak ucunun levhalara kademeli olarak batırılması (bu işlemlerin hepsi mevcut sistemde el ile yapılmıştır) ve otomatik ilerleme verilmesidir. Kaynaklama işlemi sürekli gözle kontrol edilir.

### 3.6. Kaynak Bölgesinde Oluşan İç Yapının İncelenmesi

Kaynak bölgesinde oluşan iç yapıyı incelemek amacıyla kaynaklı levhalardan metalografi numuneleri kesilmiştir. Daha sonra kesilen bu parçalar kaynak kesiti yüzeyde olacak şekilde oda sıcaklığında katılaştıran polimer (polyester) esaslı kalıp malzemesi kullanılarak kalıplanmıştır. Bu kalıplar tabanlarının düzgün olması için parmak frezede düzeltilmiştir. Daha sonra sırasıyla 240, 400, 800, 1000 ve 1200 grid zımpara kâğıtlarında zımparalanmış, 1 µm ve 0.3 µm tane boyutunda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Alümina) solüsyonu kullanılarak parlatma disklerinde parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra hazırlanan bu numuneler 15 ml HNO<sub>3</sub>, 10 ml HF ve 90 ml saf sudan oluşan solüsyon kullanılarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiş, hazırlanan bu numuneler üzerinde son olarak kaynak bölgesinde oluşan mikroyapı ve herhangi bir kaynak hatasının olup olmadığının belirlenmesi için optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca, bu

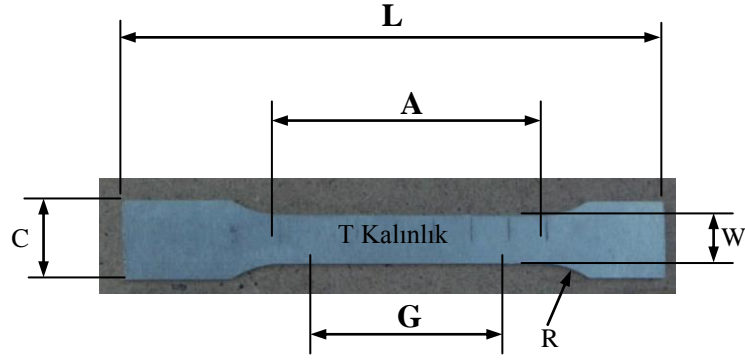
numuneler üzerinde mikrosertlik ölçümleri yapılarak sertlik profilleri belirlenmiştir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Mikrosertlik ölçümlerinin yapıışının şematik gösterimi

### 3.7. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Kaynak kalitesinin tespit edilmesi için Şekil 3.5’de görünümü ve Çizelge 3.3’de ölçüleri verilmiş EN 895 standardına göre 3 farklı ilerleme hızında kaynakları yapılan levhaların her birinden ve baz malzemedan 4 adet olmak üzere çekme numuneleri çıkarılmış ve bunlar 10 mm/dak çekme hızında test edilmiştir. Ayrıca baz malzemedan ve kaynaklı levhalardan 2 adet olmak üzere 20 mm eninde ve 180 mm boyunda standart dışı bükme numuneleri çıkarılmış ve bu numuneler 180 dereceye kadar bükülerek bükme esnasında kaynak bölgesinde çatlama olup olmadığı tespit edilmiştir. Bükme deneylerinde kullanılmak üzere malzeme yetersizliğinden dolayı standart dışı ince dikdörtgen şeklinde (kaynak bölgesi ortada olacak şekilde) numuneler hazırlanmıştır. Ayrıca, elde edilen kaynaklardan çıkarılan bu standart dışı numunelerin biri kaynak tabanı içe ve diğeri dışa gelecek şekilde 180 dereceye kadar bükülmüştür.



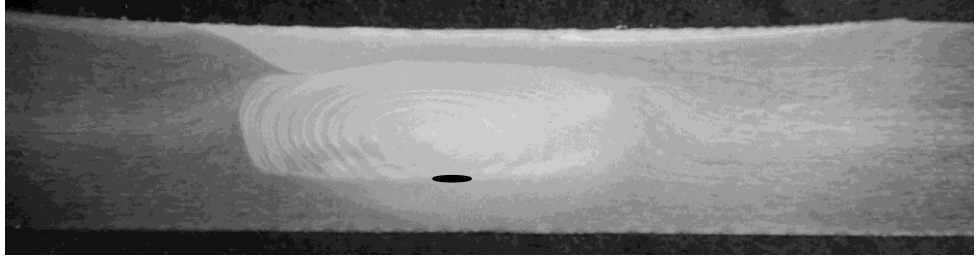
Şekil 3.5. Bu çalışmada kullanılan standart çekme numunesinin şematik görünümü

Çizelge 3.3. EN 895' e göre çekme numunesi boyutları

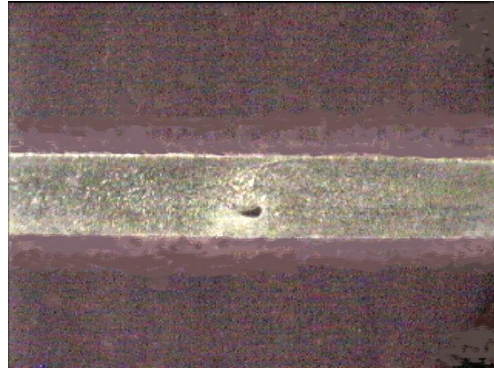
	[mm]
Anma Genişliği	12,5
Ölçü uzunluğu, G	50,0
Genişlik, W	12,5 ± 0,10
Kalınlık, T	Malzeme kalınlığı
Yuvarlatma yarı çapı (mm), R	12,5
Toplam uzunluk (mm), L	180
Gövde uzunluğu (mm), A	60
Kavrama genişliği (yaklaşık) (mm), C	20

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Al5086-H32 levhaların alın kaynağı sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1). Tüm kaynaklı levhaların kaynak bölgesinde az miktarda boşluk (porozite) gözlenmiştir, Şekil 4.2.



Şekil 4.1. Sürtünme karıştırma kaynaklı levhaların kaynak bölgesi (x60)



Şekil 4.2. Sürtünme karıştırma kaynaklı levhaların kaynak bölgesindeki porozite (x20)

##### 4.1. Kaynak Bölgesinin İç Yapısı ve Kaynak Kalitesi

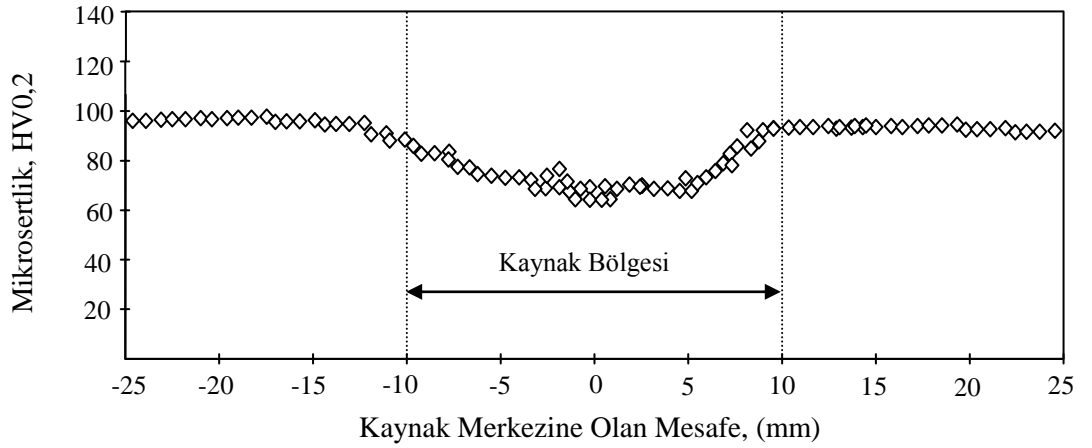
Sürtünme karıştırma kaynağı ile alın kaynağı yapılan Al5086-H32 levhalardan çıkarılan numunelerin kaynak sonrasında birleştirme bölgelerinde herhangi bir kaynak hatası olup olmadığı optik mikroskop ile detaylı olarak incelenmiş ve elde edilen birleştirmelerin kaynak bölgelerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de verilmiştir. Şekil 4.1' de görüleceği üzere, Bölüm 2' de bahsedildiği gibi, sürtünme karıştırma kaynağında gözlenen üç farklı bölgeden oluşan bir iç yapı gözlenmiştir.



Kaynak bölgesinde porozite oluşumu malzemenin omuz kısmından malzeme kaybı sonucu oluştuğu düşünülmektedir (ÇAM, 2001; 2003; 2005a; 2005b; ÇAM ve YAVUZ, 2001).

#### 4.2. Sertlik Profili

Üç farklı ilerleme hızı ile kaynaklanmış olan Al5086-H32 levhalardan çıkarılan numuneler mikroskop ile mikroyapı incelemesi yapıldıktan sonra aynı numuneler üzerinde mikrosertlik ölçümleri yapılmış ve yapılan ölçümler sonucunda Şekil 4.3'deki sertlik dağılımına benzer sertlik dağılımları elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Sürtünme karıştırma kaynaklı numunelerin mikrosertlik dağılımı

Mikrosertlik dağılımları incelendiğinde, tüm hızlarda elde edilen birleştirmelerde kaynak bölgesinde mukavemet düşüşü gerçekleşmiş olup, bu durum gerek soğuk şekil verme sertleşmesi gerekse de yaşlandırma sertleşmesi yapılmış Al-alaşımlarının kaynağında karşılaşılan normal bir durumdur. Dolayısıyla, ortaya çıkan bu sonuçlar çekme deneyinde elde edilen sonuçlarla uyum içerisindedir.

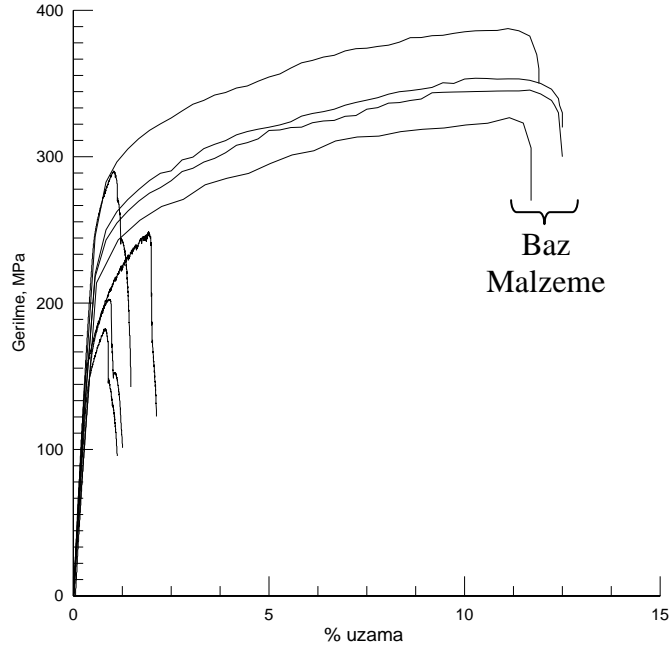
### 4.3. Kaynak Performansı

Üç farklı ilerleme hızı ile alın alına kaynaklanmış Al5086-H32 levhaların kaynak performanslarını ve kaynak kalitesini belirlemek amacıyla bu birleştirmelerden kesilen numuneler üzerinde standart çekme ve standart dışı endüstriyel bükme deneyleri (180°) yapılmıştır. Kaynaklı numunelerin çekme deneyindeki performanslarını belirlemek amacıyla baz malzemedan 5, farklı ilerleme hızları ile kaynağı yapılmış levhaların her birinden de 5 adet olmak üzere standart çekme numuneleri çıkarılmış ve bunlardan en az dört tanesi oda sıcaklığında çekme deneyine tabi tutulmuştur.

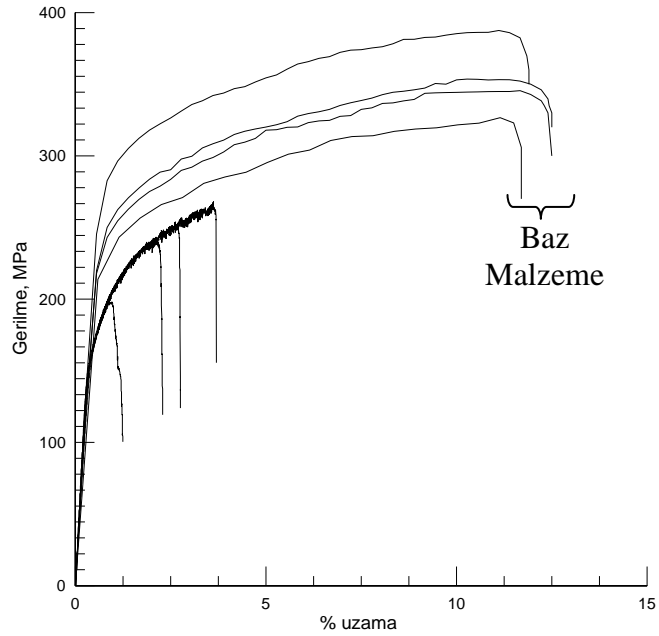
Kaynak performanslarının tespiti için baz malzeme ve kaynaklı levhalardan çıkarılan numunelerle yapılan çekme deneylerinin sonuçları Çizelge 4.1’de verilmektedir. Ayrıca, farklı ilerleme hızları ile kaynaklanmış levhalardan çıkarılan numunelerden elde edilen gerilme - % uzama eğrilerinin baz malzeme sonuçları ile mukayesesi Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.1. Al5086-H32 baz malzemedan ve kaynaklı levhalardan çıkarılan çekme numunelerinin deney sonuçları

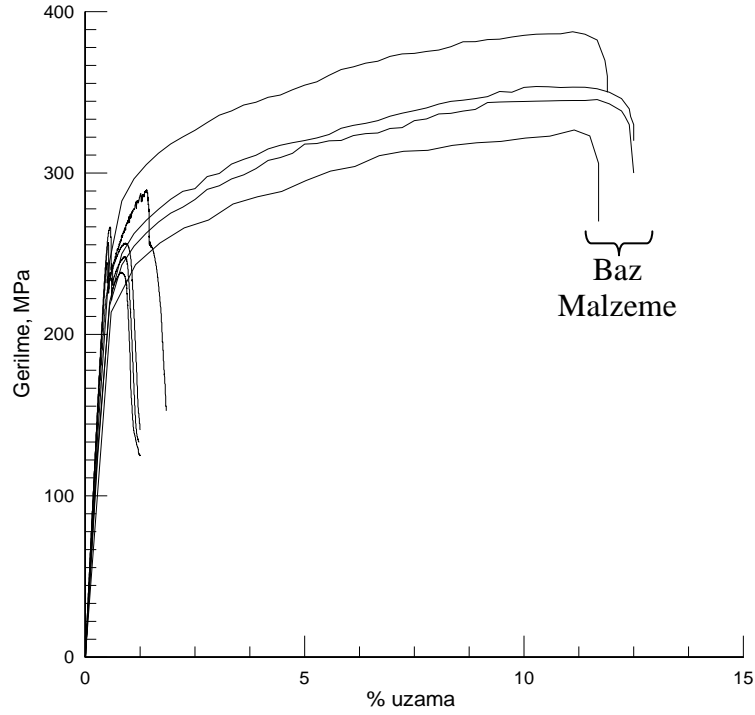
Numune	Çekme Mukavemeti (MPa)	% Uzama	Mukavemet Performansı (%)	Süneklik Performansı (%)
Baz malzeme	327; 346 354; 388 (Ort.: 354)	12,5; 12,5 11,9; 11,7 (Ort.: 12,2)	--	--
1600 dev/dk, 175 mm/dk ilerleme	183; 203 249; 290 (Ort.: 231)	1,1; 1,3 2,0; 1,5 (Ort.: 1,5)	52; 57 70; 82 (Ort.: 65)	9; 11 16; 12 (Ort.: 12)
1600 dev/dk, 200 mm/dk ilerleme	198; 241 250; 268 (Ort.: 239)	1,2; 2,3 2,8; 3,7 (Ort.: 2,5)	56; 68 71; 76 (Ort.: 68)	10; 19 23; 30 (Ort.: 21)
1600 dev/dk, 225 mm/dk ilerleme	244; 248 257; 289 (Ort.: 260)	1,2; 1,2 1,2; 1,8 (Ort.: 1,4)	69; 70 73; 82 (Ort.: 74)	10; 10 10; 15 (Ort.: 11)



Şekil 4.4. 1600 devir ve 175 mm/dak ilerleme hızıyla kaynak edilen Al5086-H32 levhalardan çıkarılan numunelerin çekme deneyinde elde edilen gerilme - % uzama eğrilerinin baz malzeme sonuçları ile karşılaştırılması



Şekil 4.5. 1600 devir ve 200 mm/dak ilerleme hızıyla kaynak edilen Al5086-H32 levhalardan çıkarılan numunelerin çekme deneyinde elde edilen gerilme - % uzama eğrilerinin baz malzeme sonuçları ile karşılaştırılması



Şekil 4.6. 1600 devir ve 225 mm/dak ilerleme hızıyla kaynak edilen Al5086-H32 levhalardan çıkarılan numunelerin çekme deneyinde elde edilen gerilme - % uzama eğrilerinin baz malzeme sonuçları ile karşılaştırılması

Bu eğriler incelendiğinde Al5086-H32 levhalar için en iyi sonuçlar 200 ve 225 mm/dk ilerleme hızları kullanılarak yapılan birleştirmelerde elde edilmiştir (Şekil 4.4-4.7 ve Çizelge 4.1). En iyi mukavemet performansı (%74) 225 mm/dk ilerleme hızında, en iyi süneklik performansı ise (%21) 200 mm/dk ilerleme hızında yapılan birleştirmeden çıkarılan numunelerde elde edilmiştir. 225 mm/dk ilerleme hızında yapılan birleştirmeden çıkarılan numunelerde elde edilen süneklik performansı da %11 olup, bu sonuç gerek soğuk şekil verme sertleştirilmesi gerekse de yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış Al-alaşımlarının kaynağında karşılaşılan normal bir durumdur. Bu düşük süneklik performansının nedeni kaynak dikişinde mukavemet düşüşü olduğu durumda çekme numunesinin toplam boyunun çok küçük bir kısmı kaynak bölgesinden ve büyük bir bölümünün daha yüksek mukavemetli baz malzemedan oluşması ve deney esnasında kaynak dikişi şekil değiştirirken yüksek mukavemetli baz malzeme kısmının elastik durumda olmasıdır. Bu sonuçlar Al5086-H32 levhaların sürtünme karıştırma alın

kaynağında 200 ve 225 mm/dk kaynak hızlarında hatasız ve kabul edilebilir kaynak kalitesi elde edildiğini göstermektedir.

Ayrıca yapılacak bükme deneyi için, kaynaklı levhaların kaynak bölgelerinin bükmeye karşı dayanımını belirlemek ve numunelerde çatlak oluşup oluşmadığını gözlemek amacıyla standart dışı 20 mm eninde ve 180 mm boyunda bükme deneyi numuneleri hazırlanmıştır. Kaynak tabanı içe ve dışa gelecek şekilde her bir kaynaklı levhadan toplam ikişer numune 180° bükme deneyine tabi tutulmuştur. Hiçbir numunede çatlama meydana gelmemiştir. Bunun nedeni, bu kaynaklı levhaların kaynak bölgelerinde mukavemet düşüşü nedeniyle sünekliğin artmasıdır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

3 mm kalınlığındaki Al5086-H32 levhaların sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi ile alın kaynağının başarılı bir şekilde yapılabilceği gösterilmiştir. Ancak, tüm kaynaklı birleştirmelerin kaynak bölgesinde az miktarda porozite gözlenmiştir. Bu sorunun daha yüksek devir sayısı kullanılarak giderilebileceği düşünülmektedir.

Yapılan inceleme sonucunda 1600 dev/dk devir hızında 200 ve 225 mm/dk ilerleme hızı ile kaynak edilmiş olan Al5086-H32 levhalardan çıkarılan numunelerde kaynak performansının kabul edilebilir düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

En yüksek mukavemet performansı (%74) 225 mm/dk ilerleme hızında ve en iyi süneklik performansı (%21) 200 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. Bu değerler kabul edilebilir düzeydedir. Özellikle süneklik performansı kaynak bölgesinde mukavemet düşüşü olan Al-alışımı gibi malzemelerde gayet normaldir. Bunun sebebi, çekme numunesinde deney esnasında ölçülen % uzama numunenin sadece küçük bir bölümünü teşkil eden düşük mukavemetli kaynak bölgesinde meydana gelen şekil değişimi olup, büyük bir bölümü deney esnasında elastik davranan baz malzemedan oluşan homojen olmayan numune boyuna ( $l_0$ ) bölünerek bulunduğu için yanıltıcıdır. Diğer bir deyişle, kaynak bölgesinde mukavemet değişimi nedeniyle uzamanın çekme numunesi boyunca homojen olmaması, yani kaynak bölgesinde mukavemet kaybı olmasından dolayı deney esnasında uzamanın gerçekleştiği numune boyunun homojen baz malzeme numune boyundan çok küçük olması bu sonuca neden olmaktadır.

Kaynaklı levhalardan çıkarılan bükme numuneleri üzerinde kaynak tabanı içe ve dış tarafa gelecek şekilde 180° endüstriyel bükme deneyleri yapılmış ve deneyler sonucunda hiçbir numunede çatlak tespit edilmemiştir. Bunun nedeni, bu kaynaklı levhaların kaynak bölgelerinde mukavemet düşüşü nedeniyle sünekliğin artmasıdır.

**Öneriler;**

Bu çalışmada, 1600 dev/dk sabit devir hızında, üç farklı ilerleme hızı kullanılarak Al5086-H32 levhaların alın kaynağı yapılabilirliği araştırılmıştır. Ayrıca, değişik devir hızları kullanılarak bu parametrenin de kaynak edilebilirliğe etkisi araştırılabilir. Özellikle bu alaşımın bu kaynak yöntemiyle kaynağında daha yüksek bir devir hızı değerinin kullanılmasının (örneğin 2000 veya 2500 dev/dk) daha iyi sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Anderson, T., 2000. The Advancement of Al within the Welding Fabrication Industry and Its Many Product Design Applications, **Svetsaren**, No. 2, pp. 3-5.
- Andersson, C.G. ve ark., 1997. **Proc. of IBEC'97**, Advanced Technologies & Processes, pp. 105-110.
- Anonim, 2007. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımların Standart Gösterimleri <http://www.bilesim.com.tr/tr/index.nsf?lf=/tr/leftbaryayincilik.html&rf=http://www.bilesim.com.tr/mistoportal/showmakale.nsf?xd=3885.xml>
- Ataoglu, H., 2002. “**Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Alüminyum Alaşımlarının İç Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**”, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- Colligan, K. J. Ve ark., 2003. “**Friction Stir Welding Demonstrated for Combat Vehicle Construction**”, *Welding Journal*, Vol. 82, pp. 34-40.
- Çam, G. ve KoçaK, M., 1998. “**Progress in Joining of Advanced Materials**”, *Int. Mater. Rev.*, Vol. 43, No. 1, pp. 1-44.
- ve Yavuz, H, 2001, “**Yeni Bir Kaynak Teknolojisi: Sürtünme Karıştırma Kaynağı**”, *Endüstri ve Otomasyon*, Sayı 51, S. 18-20.
- , 2001. “**Al-Alaşımları İçin Geliştirilen Yeni Kaynak Yöntemleri**”, TMMOB Makina Mühendisleri Odası “Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi, 19-21 Ekim, S. 267-277, İstanbul.
- , 2002. ” **Sürtünme Karıştırma Kaynağı ve Uygulamaları**”, 9. Denizli Malzeme Sempozyumu, 8-10 Mayıs, Denizli, S. 450-458.
- , 2003. “**Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler**”, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 24-25 Ekim, 47-64, Kocaeli.
- , 2005a. “**Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK): Al-Alaşımları İçin Geliştirilmiş Yeni Bir Kaynak Teknolojisi**”, *Mühendis ve Makine*, Cilt 46, Sayı 541, Şubat 2005, S. 30-39.
- , 2005b. “**Kaynak Teknolojisindeki Gelişmeler**”, Kaynak Teknolojisi V. Ulusal Kongre Bildiriler Kitabı, 11-12 Kasım, 87-97, Kocaeli.
- Ding, R.J. ve Oelgoetz, A. 1999. **Proc. of the 1<sup>st</sup> Int. Symp. on Friction Stir Welding**, 14-16 June , Thousand Oaks, CA, USA.
- Dolby, R. ve ark., 2001. “**Recent Developments&Applications in Electron Beam and Friction Technologies** ”, 7th International Aachen Welding Conference, 3-4 May.
- Dong, P. ve ark, 1999. **Proc. of the 1<sup>st</sup> Int. Symp. on Friction Stir Welding**, 14-16 June. Thousand Oaks, CA, USA.
- Kallee, S. ve Mistry, A., 1999. **Proc. of the 1<sup>st</sup> Int. Symp. on Friction Stir Welding**, 14-16 June. Thousand Oaks, CA, USA.
- ve ark., 2001. **Friction Stir Welding, Invention, Innovations and Applications**”, 8th International Conference on Joints in Aluminium, 16 S., Munich, Germany, 28-30 March.
- ve ark., 2002. “**Seminar 'Rührreischweißen (FSW) - ein modernes Fügeverfahren' (Friction welding - a modern joining process) at Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt (SLV)**”, 18 Sayfa Berlin-Brandenburg, 20 March.



- Kang ve ark.,1996. **Metal. Trans.**, Vol. 27A, No. 12, 4019-4029.
- Mathers, G., 2002. **The Welding of Aluminium and Its Alloys**, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.
- Metals Handbook, 1991. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials- Volume 2, Tenth Edition**, ASM, USA.
- Mert, Ş. ve Kaluç, E., 2003. “**Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlardaki Gelişmeler**”, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 24-25 Ekim, s. 103-115, Kocaeli.
- Midling, O.T. ve Grong, O., 1994. **Acta Metall Material**, Vol. 42, 1595-1609.
- Nagasawa, T. ve Otsuka, M., 1999. “**Structure and Mechanical Properties of Friction Stir Weld Joints of Magnesium Alloy AZ31**”, <http://www.mc.mat.shibaura-it.ac.jp/master/abstract/298110.html>
- Nicholas, E. D., 1991. **TWI Bulletin 6**, Nov./Dec. 1991, Vol. 32, pp. 124-127.
- ve Kalle, S. W., 2000. “**Friction Stir Welding – A Decade On**”, IIW Asian Pasific International Congress, Sydney.
- North T.H. ve ark., 1997. **Metal. Trans. A**, Vol. 28A, No. 11, pp. 2371-2384.
- Pan, C., HU J., LI, Z., North ,T.H., 1996. **Journal of Material Science**, Vol. 31, 3667-3674.
- Rhodes, C.G. ve ark., 1997. **Scripta Mater.**, Vol. 36, Iss. 1, pp. 69-75.
- Serindağ, T., 2006. **Pirinç Levhaların Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Alın Kaynağı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**. Yüksek Lisans Tezi (Basılmamış), Mustafa Kemal Üniversitesi, 52 s, Antakya.
- Smith, S.D. ve ark., 2001. “**Friction Stir Welding Tool Developments**”, Aluminum Joining Symposium. USA.
- Thomas, W.M ve ark., 1991. “**Friction Butt Welding**”, International Patent Appl. No. PCT/GB92/0220 and GB Patent Appl. No. 9125978.8, US Patent No. 5,460,317, December.
- , ve Nicholas, E. D., 1996. “**Emerging Friction Joining Technology for Stainless Steel and Aluminium**”, IIW. Asian Pasific Welding Congress, Auckland, New Zealand, February.
- ve ark., 1999. **Science and Technology of Welding and Joining**, Vol. 4, No. 6, pp. 365-372.
- ve ark., 2001. “**Friction Stir Welding – Tool Developments**”, Aluminium Joining Symposium, TMS Annual Meeting, 11-15 February, New Orleans, Lousiana, USA.
- , ve Dolby R.E., 2002. **6th International Conference on Trends in Welding Research**, 15 - 19 April 2002, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, USA.
- Threadgill, P.L., 1997. “**Friction Stir Welds in Aluminium Alloys - Preliminary Microstructure Assessment**”, TWI Bulletin, March/April 1997.
- Von Strombeck, A. ve ark., 1999. **Proc. of the 1<sup>st</sup> Int. Symp. on Friction Stir Welding**, 14-16 June. Thousand Oaks, CA, USA.
- Yang, H.S., 1998. “**Aluminum Alloys**”, Proclaim of ICAA-6 ,Vol. 3, pp. 1483-1488

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans tez konumun belirlenmesinde ve çalıőmalarımın her aőamasında yardımlarını esirgemeyen danıőman hocam Sayın Prof. Dr. Gürel AM'a (Mustafa Kemal Üniversitesi Mimarlık-Mühendislik Fakültesi) ve deneysel çalıőmalarımın gerçekleştirilmesinde yardımlarını gördüğüm başta Sayın Dr. Yük. Müh. Ahmet ÇAKAN, Arő. Gör. Tarık SERİNDAG olmak üzere, Ekmekçi Makina A.ő.'den Volkan EKMEKÇI'ye, Al-alaşımı levhaların temininde yardımlarını esirgemeyen FNNS Savunma Sistemleri A.ő. den Melih ŐAHİN ve Özgür AKAM'a, ve bana destek olan herkese teőekkürlerimi sunarım. Ayrıca, eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi katkılarını esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

## ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında İskenderun'da doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimi İskenderun'da tamamladım. 2000 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü kazandım. 2004 yılında aynı bölümden mezun oldum. 2004 yılında Milangaz A.Ş.'de, 2005 yılında İSDEMİR A.Ş.'de makine mühendisi olarak çalıştım. Aynı yıl eylül ayında T.C. KARAYOLLARI GENEL MÜDÜRLÜĞÜ bünyesinde makine mühendisi olarak çalışmaya başladım ve halen bu görevimi sürdürmekteyim.