

**ALÜMİNYUM ALAŞIMI MALZEMELERİN SÜRTÜNME  
KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE  
DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Mustafa SUDAĞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENDÜSTRİYEL TEKNOLOJİ EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Haziran 2011  
ANKARA**



Mustafa SUDAĞ tarafından hazırlanan “ALÜMİNYUM ALAŞIMI MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA NOKTA KAYNAĞI ile BİRLEŞTİRİLMESİ ve DAYANIM ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Adnan AKKURT .....  
Tez Danışmanı, End. Tek. Eğt. Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Endüstriyel Teknoloji Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. H. Güçlü YAVUZCAN .....  
End. Tek. Eğt. Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Adnan AKKURT (Tez Danışmanı) .....  
End. Tek. Eğt. Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Abdullah KURT .....  
Makine Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Doç. Dr. Abdullah TOGAY .....  
End. Tek. Eğt. Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. İbrahim ERTÜRK .....  
End. Tek. Eğt. Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih : 24/06/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Mustafa SUDAĞ

**ALÜMİNYUM ALAŞIMI MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA  
NOKTA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE DAYANIM  
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Mustafa SUDAĞ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Haziran 2011**

**ÖZET**

Bu çalışmada, özellikle otomotiv sanayinde yoğun kullanıma sahip elektrik direnç kaynağı yönteminin işlem sırasında malzemenin metalürjik ve mekanik özellikleri üzerindeki olumsuz sonuçlarından dolayı, alternatif bir yöntem olan sürtünme karıştırma nokta kaynağı(FSSW) ile AA 6061 ve AA 7075 levhalar birleştirildi. Araştırma için, 3mm kalınlıktaki AA 6061 ve AA 7075 levhalardan üç farklı numune kombinasyonu oluşturuldu. Her bir numune grubu için takım devir sayısı ve işlem süresi parametreleri sabit tutulurken üç farklı takım geometrisi değişken parametreler olarak kullanıldı. Sürtünme karıştırma nokta kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerinin araştırılması için çekme dayanımı testi ve mikrosertlik taraması gerçekleştirildi, ayrıca numune kesitleri üzerinde esas metal, ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) ve termomekanik etkilenen bölgeler (TMEB) yine bu bölgelerden elde edilen mikroyapı ve spektrum elektron mikroskopisi (SEM) fotoğrafları kullanılarak incelendi. En iyi mekanik ve metalürjik özellikler silindirik geometrili takım ile uygulanan sürtünme karıştırma nokta kaynaklı numunelerden elde edilmiştir.

**Bilim Kodu** : 705.03.014  
**Anahtar Kelimeler** : Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı, Mekanik özellikler  
**Sayfa Adedi** : 101  
**Tez Yöneticisi** : Doç. Dr. Adnan AKKURT

**JOINING OF THE ALUMINIUM ALLOY SHEETS WITH FRICTION STIR  
SPOT WELDING AND INVESTIGATION OF THEIR STRENGTH  
PROPERTIES  
(M.Sc. Thesis)**

**Mustafa SUDAĞ**

**GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**June 2011**

**ABSTRACT**

**Electric resistance welding is commonly used in automotive industry but it has negative effects on metallurgical and mechanical properties of materials and that's why friction stir spot welding (FSSW) is chosen in this study as an alternative method for welding, instead of electric resistance welding at the process of joining the sheets of Al 6061 and Al 7075. For investigation, three specimen combination were made up from the AA 6061 and AA7075 aluminium alloy sheets which have 3 mm thickness. Tool rotational speed and process time were constant and three different tool geometries were variable parameters for each specimen group. The tests of tensile strength, and micro hardness were used to find out the mechanical properties of friction stir spot welds, and also parent metal (PM), thermo mechanical affected zone (TMAZ) and heat affected zone (HAZ) were observed by using microstructure and scanning electron microscope (SEM ) pictures of the cross sections. Best mechanical and metallurgical results were gained from the specimens which were joined with friction stir spot welding (FSSW) by using cylindrical tool geometry.**

**Sicence Code** : **705.03.014**  
**Key Words** : **Friction Stir Spot Welding, Mechanical Properties**  
**Page Number** : **101**  
**Adviser** : **Associate Professor Adnan AKKURT**



## TEŞEKKÜR

Alüminyum alaşımı gibi sürekli kullanım alanı artan ve bu malzeme üzerinde uygulanabilen sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi gibi güncel bir konu üzerinde çalışmamı öneren ve bu çalışmalar sırasında her türlü yardımı esirgemeyerek bana rehberlik edip beni destekleyen hocam sayın Doç. Dr. Adnan AKKURT' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Numunelerin hazırlanması ve deney cihazlarının kullanılması gibi tüm deneysel aşamalarda yardımlarını esirgemeyen Hacettepe Meslek Yüksek Okulu Öğrt. Gör. Sayın İsmail OVALI' ya ve kaynak işlemleri sırasında ve öncesinde teknik destek sağlayan M Kalıp Plastik San. Tic. Ltd. Şti. yetkilisi Sayın Eyüp Ahmet ÇAĞLAYAN' a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca bu tezin gerçekleştirilebilmesi için gerekli maddi desteği 25/2010-03 kodlu projeyi kabul ederek sağlayan Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın sonuçlarının ülkemiz sanayisi ve ekonomisine yararlı olmasını dilerim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ .....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	3
2.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları.....	3
2.1.1. Alüminyumun elde edilmesi ve genel özellikleri .....	3
2.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması, Standart Gösterimleri ve Uygulanan Sertleştirme İşlemlerine Göre Simgelendirilmesi.....	8
2.2.1. Dövme alüminyum alaşımları .....	8
2.3. Dövme Alüminyum Alaşımlarının Türlerinin İncelenmesi .....	9
2.3.1. 6xxx serisi alaşımlar .....	9
2.3.2. 7xxx serisi alaşımlar .....	10
2.4. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Çeşitli Endüstri Kollarında Kullanım Alanları .....	10
2.4.1 Otomotiv endüstrisi .....	10
2.4.2. Gemi ve taşımacılık yapım endüstrisi .....	11

**Sayfa**

2.4.3. Savunma ve havacılık endüstrisi .....	11
3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KAYNAĞI .....	13
3.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti .....	13
3.2. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Kaynağını Etkileyen Faktörler .....	15
3.3. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarına Uygulanabilen Kaynak Yöntemleri..	19
3.3.1. Alüminyum ve alaşımlarının gaz kaynağı .....	19
3.3.2. Alüminyum ve alaşımlarının örtülü elektrot kaynağı .....	20
3.3.3. Alüminyum ve alaşımlarının miğ kaynağı .....	21
3.3.4. Alüminyum ve alaşımlarının tig kaynağı .....	24
3.3.5. Alüminyum ve alaşımlarının elektrik direnç kaynağı .....	25
3.3.6. Alüminyum ve alaşımlarının electrocüruf kaynağı.....	28
3.3.7. Alüminyum ve alaşımlarının elektrogaz kaynağı.....	27
3.3.8. Alüminyum ve alaşımlarının plazma kaynağı.....	28
3.3.9. Alüminyum ve alaşımlarının ultrasonik kaynağı .....	28
3.3.10. Alüminyum ve alaşımlarının patlama kaynağı.....	29
3.3.11. Alüminyum ve alaşımlarının elektron ışın kaynağı .....	30
3.3.12. Alüminyum ve alaşımlarının difüzyon kaynağı .....	31
3.3.13. Alüminyum ve alaşımlarının lazer ışın kaynağı.....	33
3.3.14. Alüminyum ve alaşımlarının manyetik puls kaynağı.....	35
3.3.15. Alüminyum ve alaşımlarının soguk basınç kaynağı .....	36
3.3.16. Alüminyum ve alaşımlarının sürtünme kaynağı .....	37
4. SÜRTÜNME VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK TEKNİKLERİ .....	40
4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı.....	40

**Sayfa**

4.2. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı .....	43
4.2.1 Sürtünme karıştırma nokta kaynağının uygulanması .....	44
4.2.2. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı kontrolü ve yöntem değişkenleri.....	46
4.2.3. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Makineleri .....	53
5. MALZEME SEÇİMİ VE KAYNAĞIN YAPILIŞI.....	55
5.1. Deney Malzemesi .....	55
5.2. Deney Parçalarının Boyutları .....	55
5.3. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Yönteminde Kullanılan Takım Malzemesi ve Takım Geometrisi .....	56
5.4. Kaynak İşlemlerinin Yapılışı.....	57
5.4.1. Deney numunelerinin hazırlanma esasları .....	57
5.4.2. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminde kullanılan kaynak parametreleri.....	57
5.4.3. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminin uygulanması .....	58
5.5. Mekanik Deneylerin Yapılışı .....	60
5.5.1. Çekme deneyleri.....	60
5.5.2. Mikrosertlik inceleme deneyleri.....	66
5.5.3. Metalografik inceleme deneyleri.....	73
6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	84
KAYNAKLAR .....	87
EKLER.....	89
EK-1. Mikroyapı fotoğrafları .....	90
EK-2 SEM fotoğrafları.....	97
ÖZGEÇMİŞ .....	101

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Alüminyumun genel özellikleri .....	5
Çizelge 2.2. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve uygulama alanlarının malzeme türüne göre sınıflandırılması .....	7
Çizelge 2.3. Alüminyum Birliği tarafından geliştirilen standardizasyona göre dövme alüminyum alaşımlarının simgelendirilmesi .....	8
Çizelge 4.1. Sürtünme karıştırma kaynağı(FSW) işleminin anahtar faydaları .....	41
Çizelge 5.1. Al 6061 alaşımının kimyasal kompozisyonu .....	55
Çizelge 5.2. Al 7075 alaşımının kimyasal kompozisyonu .....	55
Çizelge 5.3. Al 6061 ve Al 6061 levhaların silindir pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi .....	62
Çizelge 5.4. Al 6061 ve Al 6061 levhaların kare pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi. ....	62
Çizelge 5.5. Al 6061 ve Al 6061 levhaların üçgen pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi .....	62
Çizelge 5.6. Al 7075 ve Al 7075 levhaların silindir pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi .....	63
Çizelge 5.7. Al 7075 ve Al 7075 levhaların kare pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi.....	63
Çizelge 5.8. Al 7075 ve Al 7075 levhaların üçgen pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi.....	63
Çizelge 5.9. Al 6061 ve Al 7075 levhaların silindir pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi.....	64

**Çizelge****Sayfa**

Çizelge 5.10. Al 6061 ve Al 7075 levhaların kare pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi.....	64
Çizelge 5.11. Al 6061 ve Al 7075 levhaların üçgen pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi.....	65

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1. Hidrojenin alüminyum içerisinde çözünebilirliği .....	16
Şekil 3.2. MIG yöntemindeki ark bölgesi .....	23
Şekil 3.3. Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması a. Yüzey pürüzlerinin başlangıç teması b. Birinci aşama deformasyon ve sınır bağ düzeni c. ikinci aşama tane sınırı göçü ve gözeneklerin yok edilmesi d. Üçüncü aşama hacim difüzyonu ve gözeneklerin elimine edilişi .....	32
Şekil 3.4. Sürekli tahrikle sürtünme kaynağı .....	38
Şekil 4.1. FSW için birleşme konfigürasyonları. (a) Alın kaynağı. (b) Köşe kaynağı. (c) T alın kaynağı. (d) Bindirme kaynağı. (e) Bindirme kaynağı. (f) T bindirme kaynağı.(g) Köşe Kaynağı .....	41
Şekil 4.2. FSW için kullanılan farklı takım geometrileri .....	43
Şekil 4.3. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı prensibi .....	45
Şekil 4.4. FSSW işlemi için kullanılan pimli takımlara ait parametreler.....	48
Şekil 4.5. Malzeme akışını geliştirmek için tasarlanan farklı omuz biçimleri .....	48
Şekil 4.6. Farklı omuz geometrileri. ( a ) konveks geometrili omuza sahip takım, ( b ) konkav geometrili omuza sahip takım .....	49
Şekil 4.7. Yeni geliştirilen takıma ait konifgürasyon ve fotoğraf. Tüm ölçüler mm cinsindedir .....	50
Şekil 4.8. Anahtar deliği oluşumunun yeniden doldurma işlemi ile önlenişinin şematik gösterimi .....	51
Şekil 4.9. Farklı pim boylarına sahip silindirik geometrili takımlar görülmemektedir .....	52
Şekil 4.10. Farklı pim boylarına ait kesme makaslama yük değerleri görülmemektedir .....	53
Şekil 5.1. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı için hazırlanılan deney numunelerinin şematik gösterimi .....	56

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 5.2. Tüm birleştirmelerin yapımında kullanılan takımlar ve takımlara ait omuz ve pim geometrilerinin şematik gösterimi (a) kare geometrili pim, (b) silindir geometrili pim, (c) üçgen geometrili pim.....	57
Şekil 5.3. Kullanılan takım profiline göre Al 6061 numunelerinden edilen ortalama kesme makaslama yük değerleri(N) .....	65
Şekil 5.4. Kullanılan takım profiline göre AL 7075 numunelerinden elde edilen ortalama kesme makaslama yük değerleri(N) .....	66
Şekil 5.5. Kullanılan takım profiline göre Al 6061 ve Al 7075 numunelerinden elde edilen ortalama kesme makaslama yük değerleri(N).....	66
Şekil 5.6. Mikrosertlik ölçümlerinin elde edildiği noktaların kaynak numunesi üzerinde şematik gösterimi .....	67
Şekil 5.7. Silindirik pimli takım ile FSSW yapılan Al 6061 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları.....	68
Şekil 5.8. Kare pimli takım ile FSSW yapılan Al 6061 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları.....	69
Şekil 5.9. Üçgen pimli takım ile FSSW uygulanan Al 6061 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları.....	69
Şekil 5.10. Silindir pimli takım ile FSSW uygulanan Al 7075 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları.....	70
Şekil 5.11. Kare pimli takım ile FSSW uygulanan Al 7075 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları.....	70
Şekil 5.12. Üçgen pimli takım ile FSSW uygulanan Al 7075 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları.....	71
Şekil 5.13. Silindir pimli takım ile FSSW uygulanan Al6061 ve Al 7075 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları.....	72
Şekil 5.14. Kare pimli takım ile FSSW uygulanan Al6061 ve Al 7075 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları.....	72
Şekil 5.15. Üçgen pimli takım ile FSSW uygulanan Al6061 ve Al 7075 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları.....	73



**Şekil****Sayfa**

Şekil 5.16. Numuneler üzerinden mikroyapı görüntülerinin elde edildiği bölgelerin şematik gösterimi .....	74
---	----

## RESİMLERİN LİSTESİ

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 1.1. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı kullanılarak üretilmiş Mazda RX-8'in yan kapı paneli ve noktaların görünüşü .....	2
Resim 3.1. 6 mm kalınlığında TIG kaynaklı parçada, çok ince dağılmış gözenekler .....	16
Resim 3.2. Köşe kaynağında alüminyum oksit filmi .....	17
Resim 4.1. (a) FSW ile birleştirilen alüminyum alaşımlarının farklı bölgelerini gösteren mikroyapı görüntüsü, (b) Gerileyen kenar, (c) İlerleyen kenar, HAZ, ısıdan etkilenen bölge; TMAZ, termomekanik olarak etkilenen bölge .....	42
Resim 4.2. Japon otomobil üreticisi kuruluş tarafından geliştirilen FSSW yönteminin spor model bir otomobilin gövde panellerinin ve arka kapılarının sürtünme karıştırma nokta kaynağında kullanımı .....	46
Resim 4.3. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) uygulamalarında kullanılan takımlardan örnekler .....	49
Resim 4.4. AA 5754 Alüminyum alaşımı sacların FSSW yöntemiyle birleştirilmesi sonucu makro yapı ve mikro yapı görüntüsü (a) Makroyapı görüntüsü (b) Kaynak metali (c) TMEB (d) Esas metal .....	52
Resim 4.5. FSSW birleşmesinde yeniden doldurulan pim boşluğuna ait makroskopik görüntü: (a) kaynak bölgesinin üstten görünüşü, (b) kaynak bölgesinin kesit görünüşü .....	52
Resim 4.6. Solda bir Amerikan kuruluşunca geliştirilen tezgah üstü kaynak işlemleri yapabilen robotik FSSW makinesi, sağda tezgah FSSW uygulaması esnasında .....	54
Resim 4.7. Bir Amerikan kuruluşunca geliştirilen C- çerçeveli robotik FSSW makinesi .....	54
Resim 5.1. FSSW ile birleştirilmiş numuneler görülmektedir .....	59

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 5.2. FSSW ile birleştirilmiş numuneler ait alt ve üst görüntüleri, (a) üst görüntü (b) alt görüntü.....	59
Resim 5.3. Instron 8503 model 500 kN çekme ve basma kapasitesine sahip üniversal test cihazı.....	61
Resim 5.4. Shimadzu HMV2 Mikrosertlik cihazı.....	67
Resim 5.5. Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DM 4000 M marka optik mikroskop .....	74
Resim 5.6. Silindir pim profilinin kullanıldığı FSSW ile Birleştirilen Al 6061 levhaların mikroyapı görüntüsü, (a) Kaynak metali (b) TMEB (c) Esas metal .....	75
Resim 5.7. Kare pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 levhaların mikroyapı görüntüsü, (a) Kaynak metali (b) TMEB (c) Esas metal .....	76
Resim 5.8 Üçgen pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 levhaların mikroyapı görüntüsü, (a) Kaynak metali (b) TMEB (c) Esas metal .....	76
Resim 5.9. Silindir pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 7075 levhaların mikroyapı görüntüsü, (a) Kaynak metali (b) TMEB (c) Esas metal .....	77
Resim 5.10. Kare pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 7075 levhaların mikroyapı görüntüsü, (a) Kaynak metali (b) TMEB (c) Esas metal .....	77
Resim 5.11. Üçgen pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 7075 levhaların mikroyapı görüntüsü (a) Kaynak metali (b) TMEB (c) Esas metal .....	77
Resim 5.12. Silindir pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al6061 - Al 7075 levhaların kaynak metaline ait mikroyapı görüntüleri (a) Kaynak metali (Fıskıran bölge) (b) Kaynak metali(alt bölge) (c) Kaynak metali(yan bölge).....	78

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 5.13. Kare pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al6061 - Al 7075 levhaların kaynak metaline ait mikroyapı görüntüleri (a) Kaynak metal (Fıskıran bölge), (b) Kaynak metal (alt bölge), (c) Kaynak metal (yan bölge).....	78
Resim 5.14. Kare pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al6061 - Al 7075 .....	79
Resim 5.15. Jeol 6060 LV model tarama elektron mikroskobu (SEM).....	79
Resim 5.16. Silindir pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metal .....	80
Resim 5.17. Kare pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metal .....	80
Resim 5.18. Üçgen pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metal .....	81
Resim 5.19. Silindir pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 7075 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metal .....	81
Resim 5.20. Kare pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 7075 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metal .....	81
Resim 5.21. Üçgen pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 7075 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metal .....	82
Resim 5.22. Silindir pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 - Al 7075 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metal.....	82
Resim 5.23. Kare pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 - Al 7075 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metal.....	83

**Resim****Sayfa**

Resim 5.24. Üçgen pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 - Al 7075 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)Kaynak metali (fişkırın bölge) (b)Kaynak metali (alt bölge) .....	83
---	----

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>HRC</b>	Rockwell C- Sertliği
<b>TWI</b>	İngiliz Kaynak Enstitüsü
<b>FSW</b>	Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Friction Stir Welding)
<b>FSSW</b>	Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (Friction Stir Spot welding)
<b>HSS</b>	Yüksek Hız Çeliği
<b>ISO</b>	Uluslararası Standart Organizasyonu
<b>JIS</b>	Japon Standartları Birliği
<b>TSE</b>	Türk Standartları Enstitüsü
<b>DIN</b>	Alman Endüstrisi Normu
<b>IEB</b>	Isı Etkisinde Kalan Bölge
<b>TMEB</b>	Termomekanik Etkilenen Bölge
<b>SEM</b>	Spectrum Electron Microscopy
<b>RSW</b>	Elektrik Direnç Nokta Kaynağı (Resistance Spot Welding)
<b>ITAB</b>	Isı Tesiri Altındaki Bölge

## 1. GİRİŞ

Basınç kaynak yöntemlerinden elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi kaynak edilecek sac kalınlığına bağlı olarak oldukça hızlı bir kaynak yöntemidir. Yüksek üretim kapasitesine sahip birleştirme hatlarında kolaylıkla kullanılabilmesi ve otomasyona yatkınlığı dolayısıyla otomotiv endüstrisinde geniş bir kullanım olanağı bulmuştur. Nokta kaynağı yöntemi, ilave malzeme kullanılmadığından sağladığı hafiflik, yüksek kaynak mukavemeti, estetiklik, özel beceri gerektirmemesi ve kaynak hızının yüksek oluşu gibi nedenlerle günümüz endüstrisinde büyük ölçüde kullanılmaktadır [1].

Son yıllarda yakıt tasarrufunun çok önemli hale gelmesi sonucu araç toplam kütlesini azaltmaya yönelik girişimlerde bulunulmuştur. Bu girişimde Audi firması A8 modelinin kaporta imalatında alüminyum alaşımları kullanmıştır. Ancak yumuşak bir malzeme olan alüminyum alaşımının kaporta imalatında kullanılan elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesinde yaşanan güçlükler otomotiv kaportasında alüminyum alaşımlarının yaygın olarak kullanılmasını geciktirmiştir [1].

Ancak son yıllarda elektrik direnç nokta kaynağına alternatif olarak geliştirilmiş olan ve alışılmış sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) yönteminden yola çıkılarak geliştirilen sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yöntemi, kaynak teknolojisi konusundaki son gelişmelerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Yöntem, nokta sürtünme kaynağı (Spot Friction Welding- SFW) veya sürtünme nokta birleşmesi (Friction Spot Joining- FSJ) olarak da adlandırılmaktadır [1].

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi, ilk olarak literatüre 2000 yılında girmiş ve 2001 yılında temel prensibi hakkındaki ilk rapor yayımlanmıştır. Bu yöntem 1999 yılında bir Japon otomobil kurulumu olan Mazda tarafından geliştirilmiş ve daha sonra patenti alınarak ve literatür de yayımlanarak dünyaya tanıtılmıştır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ilk defa 2003 yılında Mazda RX-8'in yan kapı panel nokta kaynağında kullanılmıştır (Resim 1.1.) [1].



Resim 1.1. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı kullanılarak üretilmiş Mazda RX-8'in yan kapı paneli ve noktaların görünüşü [1]

Bu verilerden de anlaşıldığı üzere yaygınlaşma potansiyeli yüksek olan bu kaynak yöntemine ait elde edilmemiş parametrelerin incelenerek literatüre ve bilim camiasına kazandırılması hedeflenmiştir.

Bu amaçlar doğrultusunda ise 3mm kalınlıktaki Al 6061 ve Al 7075 levhalardan üç farklı numune grubu oluşturularak, bu numunelerin literatür çalışmalarında en yaygın olarak kullanılan üç farklı pim geometrisine sahip takımlarla sürtünme karıştırma nokta kaynaklı birleştirmeleri yapılmıştır ve ardından numuneler üzerinde çekme testi, mikrosertlik taraması, kesit yüzeylerin karakterizasyonu için SEM görüntü incelemeleri ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.



## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

### 2.1. Alüminyum Ve Alüminyum Alaşımları

#### 2.1.1. Alüminyumun elde edilmesi ve genel özellikleri

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, günümüzde çelikten sonra en çok tercih edilen endüstriyel malzemeler konumuna gelmişlerdir. Alüminyum, yer kürede, oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü element olmakla birlikte kullanım alanlarının yaygınlaşmasında savunma, otomotiv ve havacılık endüstrilerinin büyük bir katkısı olmuştur [1].

Alüminyum, her ne kadar yer kabuğunda en fazla bulunan metalsel element ise de, sürekli olarak bileşik durumunda bulunur ve elde edilmesi güç bir metaldir. Bunun nedeni alüminyum içeren minerallerin genellikle karmaşık ve kararlı yapıda olmasıdır. Bu minerallerden alüminyum metalinin indirgenmesi için çok yüksek enerji ve yüksek sıcaklık gereklidir. 18. yy.'ın sonları ile 19. yy.'ın başlarında Berzelius, Dalton, Davy, Lavoisier ve Oersted gibi ünlü bilim adamları alüminyum bileşikleri üzerine çalışmalar yapmışlardır. 1807 yılında Sir Humprey Davy bu bileşiklerin içerisinde bir metal bağlı olduğunu ileri sürmüştü ve buna "alüminyum" adını vermiştir. 1821'de Fransa, Les Baux'ta alüminyum üretiminin temel hammaddesi olan cevher bulunmuş ve yörenin adına dayanarak buna "boksit" adı verilmiştir. Daha sonra, 1825'de Hans Cristian Oersted, metal alüminyum üretimi için önemli bir bileşik olan alüminyum klorid bileşiğini hazırlamayı başarmıştır. Bundan iki yıl sonra, 1827'de Friedrich Wöhler bu bileşiğin potasyum ile reaksiyonu sonucu ilk metal alüminyum kimyasal yollarla elde etmeyi başarmıştır. Alüminyumun endüstriyel çapta elde edilmesi ancak 1886'da ABD'de Charles Martin Hall ve Fransa'da Paul L.T. Heroult tarafından birbirlerinden habersiz ve hemen hemen aynı zamanlarda patenti alınarak özel elektroliz yöntemi ile olanaklı olmuştur[15]. Doğada birçok tür alüminyum cevheri bulunmasına karşın, alüminyum elde edilmesinde günümüzde % 55-65  $Al_2O_3$  içeren ve boksit adı verilen bir cevher kullanılmaktadır. Bu cevher önce yabancı madde olarak içerdiği  $Fe_2O_3$  ve

SiO<sub>2</sub>'den arındırılır. Bunun için, cevher kızgın NaOH buharıyla tepkimeye sokulur ve alüminyum oksit suda çözünebilen NaAlO<sub>2</sub>'a dönüşür ve bir filtrasyon veya flotasyon işlemi ile demir ve silisyum bileşikleri cevherden temizlenir. Elde edilen çözelti içinde alüminyum, alüminyum hidroksit durumunda kristalize edilir ve sonra suyu uçurularak saf alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) elde edilir [1]. Alüminyumun, oksijene olan ilgisi, karbonunkinden daha büyük olduğundan burada demir cevherleri durumunda olduğu gibi karbonla redükleme yapılamaz. Bunun için elektroliz uygulanır. Elektrolizi gerçekleştirebilmek için bu oksitin ergitilmesi veya çözelti konumuna getirilmesi gereklidir. Alümina 2050°C'de ergir, bu nedenle ergitme yöntemi kullanılamaz. Alümina bir başka alüminyum cevheri olan "kriyolit" içinde çözünebilmektedir ve kriyolit de 950°C civarında sıvı duruma geçmekte ve alüminayı çözebilmektedir. Karbon astarlı özel elektroliz fırını içinde kriyolit ergitilir ve sonra alümina eklenerek çözelti elde edilir ve karbon anodlar kullanılarak elektroliz gerçekleştirilir. 5 V'luk bir gerilim uygulandığında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> parçalanırken, kriyolit değişime uğramaz ve alüminyum katod olarak kullanılan banyonun dibinde birikir ve buradan dışarı alınır ve banyoya sürekli alümina eklenir. Bu yöntemde enerji sarfiyatı 1 kg alüminyum için 17 kWh gibi oldukça yüksektir. Bu durum alüminyumun fiyatını etkilemektedir [1]. Bilim adamları alüminyumun elde edilmesiyle yeni bir metal türünün ortaya çıkmasının birçok problemi çözebileceğini düşünmüşlerdir. Başlangıçta az miktarda ve fazla enerji tüketilerek oldukça pahalıya üretilen alüminyum, altından daha değerli bir metal konumuna gelmiştir. İlk olarak Danimarkalı General VII. Frederik'in miğferinde kullanılan alüminyum, Fransa'da III. Napolyon'un ve diğer imparatorların saray mutfaklarında kullanılan lüks bir eşya olmuş ve yıllarca imparatorların hatırlı misafirlere ziyafet sofralarında tencere, tabak ve kadehlerin yapımında kullanılmıştır [1].

Alüminyumun en önemli özellikleri olarak; özgül ağırlığının düşük olması, elektriği ve ısıyı çok iyi bir şekilde iletmesi, çok yumuşak ve sünek olması ile bazı alaşımlarının çökeltme yolu ile sertleştirilebilmesi sayılabilir. Alüminyum genel özellikleri Çizelge 2.1'de özetlenmiştir. Alüminyum, atmosfer ile teması sonucunda üzerinde oluşan ince fakat yoğun ve refrakter karakterli oksit tabakasından (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ötürü havanın ve çeşitli kimyasal maddelerin korozif etkilerine karşı dirençlidir. Bu

tabaka su ile yıkanarak çıkarılamaz. Alüminyum ne kadar safsa o derece yüksek elektriksel iletkenlik ve korozyon mukavemetine sahip olmaktadır [1].

Çizelge 2.1. Alüminyumun genel özellikleri[1]

Atom ağırlığı	26.97
Yoğunluğu(20 <sup>0</sup> )	2.70
Ergime sıcaklığı	659.8 <sup>0</sup> C
Özgül ısısı	0.2259 cal/g <sup>0</sup> C
Ergime ısısı	93 cal/g
Isıl genleşme katsayısı	23.8.10 <sup>-6</sup> / <sup>0</sup> C
Elektrik Direnci(20 <sup>0</sup> C)	2.699 aQ.cm
Isıl iletkenliği(20 <sup>0</sup> C)	0.52 cal.cm/cm <sup>2</sup> .s. <sup>0</sup> C
Çekme Mukavemeti	400-900 N/mm <sup>2</sup>
Akma mukavemeti	100-300 N/mm <sup>2</sup>
Sertlik(HB <sub>25</sub> )	120-200
Elastiklik modülü	72000 N/mm <sup>2</sup>
Kopma uzaması	% 35-45
Katılşmada kendini çekme	% 1.7...1.8
Sıvılaşmada hacimsel büyüme	% 6.5

Alüminyum saflık derecesine göre sınıflandırılır. Mekanik özellikleri 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 büyük ölçüde değişir.

Gıda ve elektrik endüstrisinde kullanılan alüminyum % 99.99 safiyet derecesindedir; alüminyum borular ve saclar % 99.5 ile 99.8 ve bazı durumlarda da % 99-98 seviyesinde saftır. Bu tür alüminyumda geri kalan kısım genellikle katışık olarak bulunan silisyum ve demirden oluşmaktadır.

Alüminyumun bileşiminde katışık olarak bulunan demir, özelliklerini belirgin bir şekilde etkilemez, buna karşın alüminyum 250-350°C de tavllanır ise, katı çözeltili durumunda bulunan silisyum ayrışır ve bu sıcaklığın üstünde tekrar katı çözeltili durumuna geçer. Silisyumun ayrışması ile alüminyumun mukavemeti oldukça azalır, bu bakımdan bu sıcaklık derecelerinin üzerinde bir sıcaklığa kadar tavllanmış olan silisyum içeren alüminyum alaşımları, soğuma sırasında bu aralığı hızlı geçmelidir, örneğin kaynaktan sonra parça suya sokularak hızla soğutulmalıdır.

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 çok dirençlidir [1]

Günümüzde, alüminyum mutfak eşyaları, bina kaplamaları, elektrik iletkenleri üretiminde, kimya ve gıda endüstrisinde saf alüminyum, makina imalat, havacılık ve taşıt endüstrisinde de alüminyum alaşımları yaygın bir kullanma alanına sahiptir. Alüminyum ve alaşımlarının başlıca endüstriyel kullanım alanları Çizelge 2.2.'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.2: Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ürün biçimleri ve uygulama alanlarının malzeme türüne göre sınıflandırılması [16].

<b>Alüminyum Alaşımı</b>	<b>Ürün Biçimi</b>	<b>Uygulama Alanı</b>
<b>Saf alüminyum</b>	Folyo, haddelenmiş levha, ekstrüzyon ürünleri.	Ambalaj malzemesi ve folyo, çatı kaplama, zırlama, düşük mukavemetli korozyona dirençli kazan ve depolama tankları yapımı.
<b>2000 serisi (Al-Cu alaşımları)</b>	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar.	Çok yüksek zorlanmaya maruz parçalar, havacılık ve uzay araçlarında kullanılan yapısal elemanlar, ağır dövme parçalar, taşıt tekerlek jantları, silindir kafaları, pistonlar.
<b>3000 serisi (Al-Mn alaşımları)</b>	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar.	Ambalaj malzemesi, çatı kaplama ve zırlama, kimyasal madde varilleri ve tankları, kimyasal madde ve gıda taşıma ekipmanları.
<b>4000 serisi (Al-Si alaşımları)</b>	Tel, döküm parçalar.	Kaynak telleri, silindir kafaları, motor blokları, supap gövdeleri, mimari amaçlı kullanılan elemanlar.
<b>5000 serisi (Al-Mg alaşımları)</b>	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar, içi boş elemanlar ve borular.	Zırlama, kazan ana yapı levhaları, güçlü yapı elemanları, yapısal elemanlar, kazanlar ve depolama tankları, otomobil, tren vagonu, mimari amaçlı kullanılan elemanlar.
<b>6000 serisi (Al-Si- Mg alaşımları)</b>	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar, içi boş elemanlar ve borular.	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, otomobil, tren vagonu, deniz taşıtları ve deniz üstü yapı elemanları, mimari amaçlı kullanılan elemanlar.
<b>7000 serisi (Al-Mg- Zn alaşımları)</b>	Haddelenmiş levha ve sac, ekstrüzyon ürünleri, dövme parçalar.	Yüksek mukavemetli yapı elemanları, uçaklarda kullanılan kalın kesitli dövme parçalar, askeri köprüler, zırh levhaları, ağır taşıt ve vagonlarda kullanılan ekstrüzyon ürünleri.

## 2.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması, Standart Gösterimleri ve Uygulanan Sertleştirme İşlemlerine Göre Simgeleştirilmesi

Alüminyum alaşımları, alaşım elementlerinin çok farklı etkileri dolayısı ile birbirinden çok farklı özelliklere sahiptirler ve Bunlar dövme ve döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar [1].

### 2.2.1. 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.

Dövme alüminyum alaşımlarının simgeleştirilmesi ve standardizasyonu ilk olarak sistematik biçimde 1954 yılında Alüminyum Birliği tarafından gerçekleştirilmiştir. Burada dört numaralı bir tanımlama sistemi kullanılır (Çizelge 2.3). Bu sistem günümüzde hala geçerli olan bir sistemdir ve gerek Amerikan gerekse de Avrupa standartlarının temelini oluşturur [1].

Çizelge 2.3: Alüminyum Birliği tarafından geliştirilen standardizasyona göre dövme alüminyum alaşımlarının simgeleştirilmesi [15]

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

1xxx, 3xxx ve 5xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ısıl işlem uygulanamayan ve sadece şekil değişimiyle sertleştirilebilirler. 2xxx, 6xx ve 7xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ise ısıl işleme tabi tutulabilirler. 4xxx serisi hem ısıl işleme tabi tutulabilir hem de ısıl işleme tabi tutulamaz alaşımlar içerir.

Isıl işleme tabi tutulabilir alaşımlar, en yüksek mekanik özelliklerini en genel olarak çözeltiye alma ısıl işlemi veya yapay yaşlandırma ısıl işlemleri ile kazanırlar. Çözeltiye alma ısıl işleminde alaşım, çözelti (solution) içine alaşım elementleri veya bileşik katmak için yaklaşık 532°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 çözeltiden bir miktar element veya bileşiğin çökeltmesidir. İki yaşlandırma yöntemi vardır; ilki; oda sıcaklığında yapılan doğal yaşlandırma olarak adlandırılan yöntem, diğeri ise; yüksek sıcaklıklarda yapılan yapay yaşlandırmadır. Yapay yaşlandırma sıcaklıkları genel olarak yaklaşık 160°C dir. Çözeltiye alma ısıl işlemi ve yapay yaşlandırma koşulları içinde, bir çok ısıl işleme tabi tutulabilir alüminyum

alaşımları kaynaklı üretim için kullanılır. Isıl işleme tabi tutulamayan alaşımlar en yüksek mekanik özelliklerini, soğuk şekillendirme yoluyla mukavemeti artırma yöntemi olan şekil değiştirme sertleştirilmesi ile kazanırlar. 6061-T6, 6063-T4, 5052-H32 alaşımlarının gösteriminde olduğu gibi alaşım numaralama sistemini ısıl işleme bir tire ile birleştiren, serilerin harflerini alaşım gösterim numarasının takip ettiği sistemdir ve bu gösterim tüm standartlarda aynıdır [1].

### **2.3. Dövme Alüminyum Alaşımlarının Türlerinin İncelenmesi**

#### **2.3.1. 6xxx serisi alaşımlar**

Bu seri ısıl işleme tabi tutulabilir ve 124-221 N/mm<sup>2</sup> çekme mukavemetine sahiptir. Bunlar; Al-Mg-Si alaşımları (toplam magnezyum ve silisyum oranı yaklaşık %1'dir). Kaynaklı üretimde geniş çapta kullanılırlar, çoğunlukla ekstrüzyon ürünü ve farklı yapı bileşenlerini birleştirmek için kullanılırlar. Alüminyuma magnezyum ve

silisyum eklemekle, bu metale yüksek zorlanmalar için tavlama uygulamalarında çözünür, ergir duruma gelmesini sağlayan magnezyum silikat bileşimi oluşur. Bu alaşımlar doğal olarak eklenirken çatlama duyarlılığı ve bu nedenle kendi kendine (ek kaynak metali olmadan) kaynak yapılmamalıdır. Ark kaynağı yöntemi süresince uygun miktarda ek

kaynak metali kullanmak esas metalin ısınmasını sağlar, o sayede sıcak çatlama problemi önlenmiş olur. Bu alaşımlar, uygulama ve çalışma isteklerine bağlı olarak 4xxx ve 5xxx ek kaynak metallerinin her ikisi ile de kaynak edilirler [1].

### **2.3.2. 7xxx serisi alaşımlar**

Isıl işleme tabi tutulabilir, 221- 607 N/mm<sup>2</sup> çekme mukavemetli bu alüminyum - çinko alaşımları (toplam çinko oranı %0,8'den %12'ye kadardır) alüminyum alaşımları içinde en yüksek mukavemet değerine sahip olanlardır. Bu alaşımlar genellikle havacılık, uzay ve spor malzemeleri gibi yüksek performans istenen uygulamalarda kullanılır. 2xxx serisi gibi bu seri de, diğerleri gibi genelde başarıyla kaynak edilirken ark kaynağı için uygun olmayan bazı alaşımlar içermektedir. Genellikle bu serideki 7005 gibi kaynak edilebilir alaşımlar çoğunlukla 5xxx serisi ek kaynak metali kullanımıyla kaynak edilirler [1].

## **2.4. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Çeşitli Endüstri Kollarında**

### **Kullanım Alanları**

#### **2.4.1. Otomotiv endüstrisi**

Günümüzde, alüminyumun kaynak edilerek birleştirilmesinde en dinamik ilerleme, otomotiv endüstrisinde olmaktadır. Otomobilde görülen birçok bileşen alüminyumdan yapılmakta ve korozyon direnci, artırılmış yakıt verimi, yeniden dönüştürülebilmesi ve kullanımı gibi çevresel konulardan dolayı uygulamalar artmaktadır. Motor blokları, ön ve arka süspansiyon elemanları, şaft ve tekerlek jantları gibi ana yapısal bileşenlerin tamamen alüminyumdan üretilmesi; ısı



eşanjörleri, radyatör ve klima birimleri gibi daha geleneksel, yapısal olmayan bileşenleri bütünlemektedir [1].

Yakıt verimi sağlamasının dışında Alüminyumun kullanımıyla ilgili bir diğer etken de emniyettir. Alüminyumun temel fiziksel karakteristikleri, otomobil tasarımında; yalnızca çarpışmalarda daha iyi performans göstermekte kalmaz, kazaların tümünü önlemeye de yardım eder. Alüminyumun mukavemet-ağırlık oranı, daha üstün enerji absorpsiyonu için daha büyük araç parçaları tasarımına olanak sağlamaktadır. Çelikle aynı enerjiyi absorbe edebilmek için, ağırlığın sadece % 55'inde alüminyum yapılar tasarlanabilir. Bu ağırlık tasarrufu; bir çarpışmada daha az kinetik enerji absorbe gereksinimini getirir [1].

#### **2.4.2. Gemi ve taşımacılık yapım endüstrisi**

Deniz taşımacılığındaki yeni gelişmelerde, alüminyumun gemi yapımında kullanımıyla hızlı feribot projelerinde ilerlemeler ortaya çıkmıştır. Kar amacıyla, nakliye firmaları; hızlı, verimli ve az tamir bakım gerektiren alüminyum gövdeli yüksek hızlı feribotların yapımını araştırmaktadırlar. Hızlı feribotlar terimi, büyük yolcu yükü ve kargoyu yüksek hızlarda taşımak için yapılan küçük gemiler, dalgakıran salları ve tek veya çok bölmeli gemileri ifade etmektedir. Alüminyumun düşük ağırlık / yüksek mukavemet oranı ve korozyona dirençli olması, yüksek hızlı deniz taşıtı uygulamalarının gelişimini olanaklı yapmaktadır. Otomotiv endüstrisindeki nedenlere benzer olarak taşıma araçları daha çok alüminyum içerecek tasarımlarda üretilmektedirler. Isıtma sistemi demiryolu vagonları ve buhar hatlarında, mukavemet ve yüksek sıcaklık özelliğinden dolayı 5454 alüminyum alaşımı kullanılmaktadır [1].

#### **2.4.3. Savunma ve havacılık endüstrisi**

Bu endüstri dalları, bazı uygulamalar için, ısı işlem yapılamayan, yüksek mukavemetli 5xxx serisini kullanmakta, ancak bazı özel tür, üstün mekanik özellikler veren, ısı işlem yapılabilen alüminyum alaşımlarını da tercih etmektedirler.

Mermiler; 2019'dan ve 2219 alaşımlarından üretilmektedir. Geniş bir sıcaklık spektrumunda iyi mukavemet özellikleri veren alüminyum alaşımları havacılıkta kullanılmaktadırlar. Bu alaşımlar, 2219, 2014, 2090, 2024 ve 7075'i içermektedir. Bu esas malzemeler, özel olarak yüksek performans uygulamalarında kullanılmaktadır [1].

### **3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KAYNAĞI**

#### **3.1. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti**

Alüminyumun diğer metallere özellikle çelikten farklı fiziksel ve kimyasal özellikleri kaynak kabiliyeti üzerinde oldukça etkilidir. Bunlar;

1-Alüminyumun yüzeyindeki oksit tabakası

2-Yüksek ısı iletkenliği

3-Yüksek ısı genleşme katsayısı

4-Düşük ergime sıcaklığı,

5-Ergime sıcaklığına yaklaştığında renk değişimi göstermemesi (kısaca tav rengi göstermemesi).

Alüminyum aktif bir metaldir ve havadaki oksijenle reaksiyona girerek yüzeyinde alüminyum oksit oluşur. Alüminyum oksit, alüminyum malzemenin yüzeyini kaplayan dirençli ve hızlı oluşan bir oksittir ve alüminyuma çok iyi korozyon direnci kazandırır. Alüminyum ve alüminyum alaşımları, içerdikleri alaşım elementleri miktarlarına bağlı olarak farklı ergime sıcaklıkları gösterirler de genellikle saf metalin ergime sıcaklığı yaklaşık olarak 660°C'dir. Buna karşın malzemenin yüzeyinde oluşan alüminyum oksitin ergime sıcaklığı ise 2050°C'dir. Bu oksit tabakası, havadaki nem emerek daha kalın duruma geçebilir ve kaynak sırasında da ergimiş banyonun üzerinde yüzer. Buna ek olarak, nem içinde hidrojen olduğundan, hidrojenin kaynak metaline geçerek gözenek oluşturma tehlikesi ile karşılaşılır [1].

Alüminyum, kaynak edildiği zaman tav rengi vermediğinden, esas metalin ergime sıcaklığına gelip gelmediği, bu oksit filminin varlığından dolayı anlaşılabilir ve kaynakçı ısıtmaya devam ederken, esas metalin kendisi eriyerek akmaya başlar ve kaynak dikişinin oluşması güçleşir [1].

Alüminyumun alaşım içeriğine bağlı olarak ısı iletmesi çelikten 3 ile 5 kat daha hızlıdır. Bu açıdan alüminyumu eritmek için çok fazla enerji gereksinimi vardır. Isı iletkenliği çok yüksek olduğundan kalın kesitlerin kaynağı durumunda ön tavlama

gereksinim duyulur. Eğer ön tav sıcaklığı çok yüksek ve uygulama süresi de çok uzun tutulursa, ısıl işlemle ya da soğuk şekil değiştirmeyle sertleştirilen her iki türde de kaynak bağlantısının mukavemetinde düşme ile karşılaşılır. Alüminyum ve alaşımlarında ön tav sıcaklığı özel durumlar dışında 200°C'yi aşmamalıdır ve parçalar bu sıcaklıkta gerektiğinden daha uzun süre tutulmamalıdır. Yüksek ısıl iletkenliğinden dolayı yüksek ısı girdisi kullanılan kaynak yöntemleri çok hızlı yapılacak şekilde bir kaynak prosedürü uygulanmalıdır [1].

Alüminyum yüksek ısıl iletkenliği, ısının kaynak bölgesinden hızlı transfer olmasıyla kaynak metalinin hızlı katılaşması gibi bir yararlı etkiyi de beraberinde getirir, bu sayede alüminyum parçaların her pozisyonda kaynak edilebilme olanağı doğar. Alüminyumun ısıl genleşmesi çeliğe göre iki kat daha fazladır. Buna ek olarak, ergimiş durumdan katılaşmayla alüminyum kaynak metalinin kendini çekmesi hacimce % 6 oranındadır. Bu da, boyutlardaki değişime ve bunun sonucunda da açılmal çarpılmaya ve çatlamaya neden olur. Kaynak ağız biçimi ve kaynak metalinin oluşturulmasında kullanılan pasoların sayısı çarpılmanın oluşumunda oldukça önemli bir etkidir. I-alın kaynak ağızı açılmış bağlantılarda V- kaynak ağızı açılmış çok pasolu kaynaklara göre daha az açılmal çarpılma ortaya çıkar.

Kaynak hızı da açılmal çarpılmanın kontrol altında tutulmasında etkili bir etmendir. Yavaş kaynak hızları ısı girdisini arttırmaktadır. Bu açıdan kaynak edilecek parçaların çok iyi sabitlenmeleri gerekmektedir; bu şekilde ağızlarda kayma olmadan kaynak yapılabilmesinin yanı sıra çarpılma da önlenmiş olacaktır. Eğer, parçalar bağlanamıyorsa, puntaların dikkatlice yapılması gerekir, zira bu sayede parçalar istenilen konumda tutulabilirler. Alüminyum çok iyi korozyon direncine sahiptir, kolay biçimlendirilir. Bu özelliklerden dolayı da gıda endüstrisinde kullanım alanı bulur. Manyetik olmadığından dolayı kaynak sırasında ark üflemesi problemi ile karşılaşılmaz. Alüminyumun tav rengi göstermemesi, alüminyum ve alaşımlarının üfleçle yumuşak ve sert lehimlenmesini etkiler. Bu açıdan, bu yöntemlerin uygulanmasında dekapan kullanılır. Dekapan alüminyum alaşımının ergime sıcaklığının yaklaşık 50°C altında ergiyerek çalışma sıcaklığına yaklaşıldığını

göstermesinin yanı sıra yüzeydeki oksiti çözerek birleştirmenin sağlıklı yapılmasını sağlar [1].

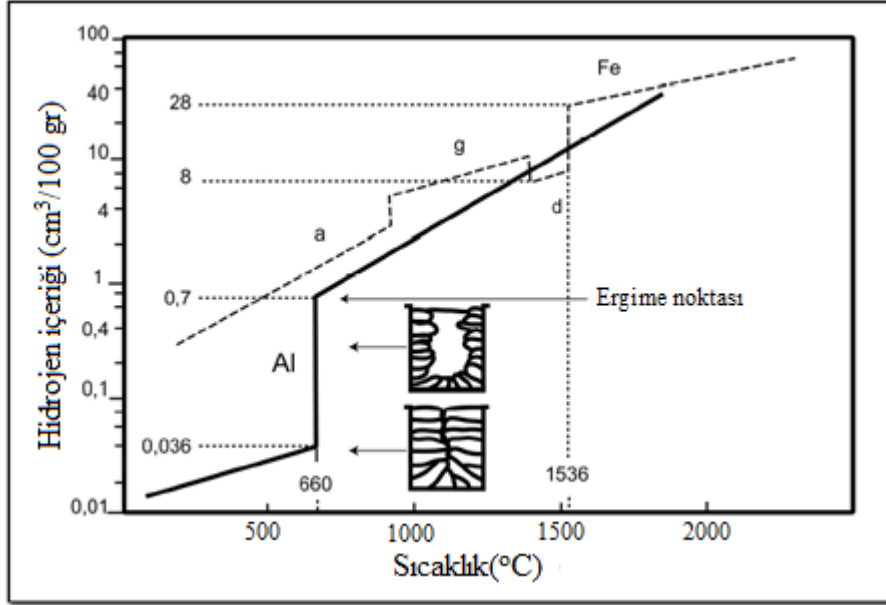
### **3.2. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarının Kaynağını Etkileyen Faktörler**

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında, birçok problemle karşılaşılır. Bu problemleri aşağıdaki, gibi sıralayabiliriz;

- 1-Gaz gözenekleri,
- 2-Oksit kalıntıları ve oksit tabakası,
- 3-Sıcak çatlak veya sıcak yırtılma,
- 4-Kaynak metali ve IEB'de mukavemet düşmesi,
- 5-Ergime eksikliği,
- 6-Korozyon direncinde azalma,
- 7-Elektrik direncinde azalma.

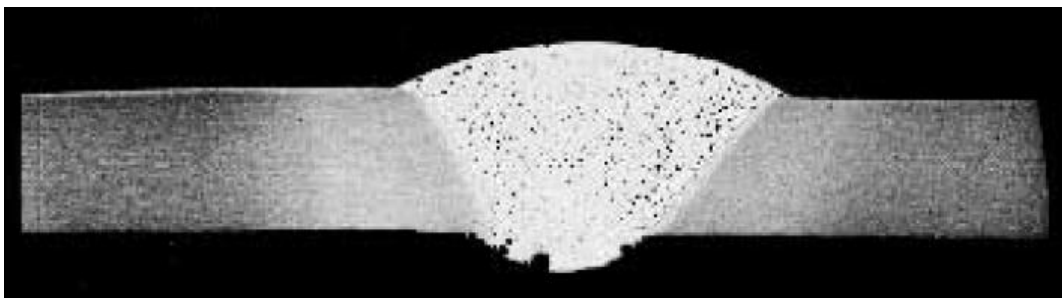
Özellikle, bu problemlerden ilk dördü olan; gözenek, oksit filmi, sıcak çatlama ve mukavemet azalması ve bunların önlenme yolları aşağıda anlatılmaktadır [1].

Gözenek, kaynak metalinde çözünen gaz nedeniyle oluşur ve katılma sırasında kaynak metalinde hapsolarak kalan gaz boşlukları olarak oldukça önemli bir problemdir; çünkü kesitin azalmasına, mekanik değerlerinin düşmesine ve zorlanmalar sırasında çentik etkisi oluşturarak kırılmasına neden olur. Gözenekler, mikro gözenek biçiminde oluşabildiği gibi 3-4 mm çapında balıkgözü olarak tabir edilen boyutlara da ulaşabilmektedir. Burada, ergimiş alüminyumda yüksek miktarda çözünebilirliğe ancak katı durumda çok düşük çözünebilirliğe sahip olan hidrojen etkilidir (Şekil 3.1). Çünkü katılma o kadar hızlı olmaktadır ki hidrojen, katı çözeltili içinde; gaz halinde hapsolarak kalmaktadır. Bu açıdan alüminyumun kaynağında, gözeneksiz kaynak dikişleri oluşturmak çok zordur.



Şekil 3.1: Hidrojenin alüminyum içerisinde çözünürlüğü

Kaynak teli kullanılmayan kaynak yöntemlerinde gözenek oluşma eğilimi oldukça düşüktür; ancak, ek kaynak metali kullanıldığında telden gelen kirlilikler dolayısı ile gözenek oluşma eğilimi artar. TIG kaynak yönteminde, MIG kaynak yöntemine göre, telin hidrojen oluşturan kirliliğine bağlı olarak daha düşük gözeneklilik oluşur (Resim 3.1.).

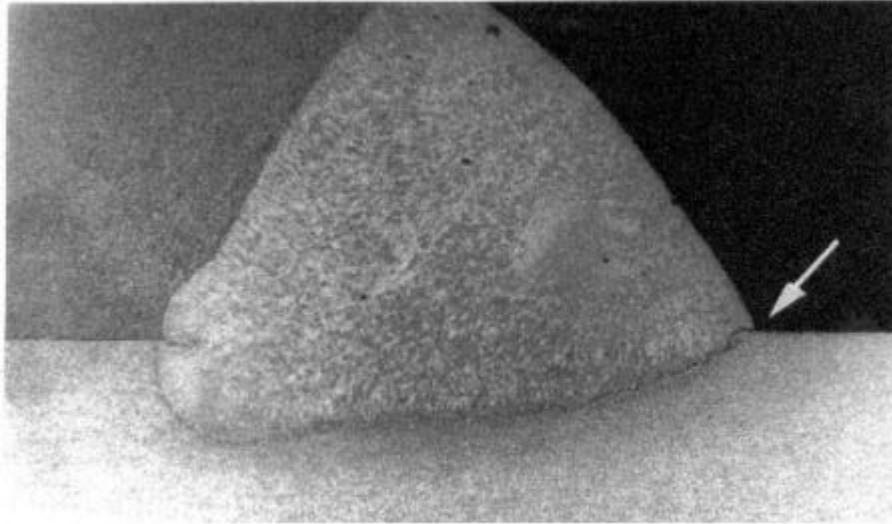


Resim 3.1. 6 mm kalınlığında TIG kaynaklı parçada, çok ince dağılmış gözenekler [1]

Kaynak akımının artırılması veya ilerleme hızının azaltılması, ark geriliminin yükseltilmesi gibi kaynak parametreleri ile oynanarak hidrojen nedenli gözeneklilik değiştirilir. Alaşım elementi içeriği de gözenek oluşmamasında yararlı bir etki sağlayabilir. Özellikle magnezyumun bu problemi azaltıcı etkisi olduğu

varsayılmaktadır. Örtülü elektrod ve tozaltı kaynak yöntemlerinde örtü ve tozdan gelebilecek nem, gözenek oluşumu üzerinde başlıca etkiye sahiptir. Bu açıdan, kullanılmadan önce alüminyum ve alüminyum alaşımları için geliştirilmiş örtülü elektrod ve tozların kurutulmaları gerekir. Gazaltı kaynak yöntemlerinde kullanılan koruyucu gazın da oldukça saf olması ve gaz hortumlarının su emmez türde olması gözenekliliği önlemede etkilidir. Çünkü son araştırmalar göstermiştir ki özellikle su soğutmalı torçlar kullanılması durumunda su hortumlarından koruyucu gaz hortumlarına su geçişi olabileceğini, bu açıdan torç bağlantı paketi içinde kullanılan gaz hortumlarının malzemelerinin su emme özellikleri düşük olan plastiklerden yapılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır [1].

Kaynaktan önce oksit filminin temizlenmesi gereksinimi, gözenek oluşum tehlikesini azaltmak içindir. Bu filmin, kaynak sırasında kırılarak dağıtılmasının bir gereksinimi de eksik ergime ve oksit film tutulmasından sakınmaktır. Şekil 2.3.'de köşe kaynağında oksit tutulmasının bağlantının mukavemeti üzerindeki güçlü etkisi görülmektedir.



Resim 3.2. Köşe kaynağında alüminyum oksit filmi [1]

Aslında alüminyum oksit, alüminyum malzemenin yüzeyini kaplayan dirençli ve hızlı oluşan bir oksittir ve alüminyuma çok iyi korozyon direnci kazandırır.

Alüminyum ve alüminyum alaşımları, içerdikleri alaşım elementleri miktarlarına bağlı olarak farklı ergime sıcaklıkları gösterebilir de genellikle saf metalin ergime sıcaklığı 660°C dir. Buna karşın malzemenin yüzeyinde oluşan alüminyum oksitinin ergime sıcaklığı 2050 °C dir. Bu oksit tabakası kaynak sırasında ergimiş banyonun üzerinde yüzer. Alüminyum, kaynak edildiği zaman tav rengi vermediğinden, esas metalin ergime sıcaklığına gelip gelmediği, bu oksit filminin varlığından dolayı anlaşılabilir ve kaynakçı ısıtmaya devam ederken, esas metalin kendisi ergiyerek akmaya başlar ve kaynak dikişinin oluşması güçleşir. Aynı zamanda ergimiş metal damlalarının kaynak ağzına nüfuz etmeden yapışarak kalması problemi ile karşılaşılır. Bu açıdan, kaynak öncesinde, oksit filminin çok iyi temizlenmesi ve temizleme ürünlerinin kaynak ağız bölgesinden uzaklaştırılması gereklidir. Bu problem kaynak makinası üreticileri tarafından bilindiğinden günümüzde, alüminyumun kaynağı için geliştirilmiş oksit kırma özellikli değişken kutuplamalı, alternatif akım ya da doğru akım kaynak makinaları da üretilmektedir [1].

Sıcak çatlama problemi, saf metallerde görülmeyen ancak alaşımlarda görülen bir kaynak problemidir ve yalnızca alüminyum alaşımlarında değil aynı zamanda çelikler, nikel ve bakır alaşımlarında da ortaya çıkar. Kaynak metalinde katılma sırasında soğuk ağız cidarlarından başlayan ve metal orta eksenine doğru uzayan iğnemsiz tanelerin, alaşım içindeki katılma sıcaklığı daha yüksek olan katışıkları ortaya doğru sürmesi ve bu bölgede katışıkça zengin segregasyon bölgeleri ortaya çıkmasına sebep olur. Bu bölgelerin soğuma sırasındaki çatlama kaynak ısı girdisi nedeniyle oluşan gerilmelerden dolayı çatlama hassas hale getirmesi sonucunda oluşur. Bu çatlaklara sıcak çatlak adı verilir.

Alüminyum ve alüminyum alaşımları halinde özellikle ek kaynak metal bileşimi ile oynanarak ve de kaynak ağız aralıkları değiştirilerek bu sorunun önüne geçilmeye çalışılır [1].

Kaynağa bağlı mukavemet azalması, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynak metallere ve IEB'lerinde ortaya çıkan bir durumdur. Bilindiği üzere ergitme kaynak yöntemlerinde, kaynak metal, esas metal ve ek kaynak metalinin



karışımından oluşmuş bir döküm yapısındadır. Kaynak metalinin özellikleri, ek kaynak metalinin tane boyutu, kalitesi ve bileşimine bağlı olarak değişir. Hızlı soğuma, çok ince tane yapıları verirken yavaş soğuma, daha iyi mekanik özellikler kazandırır. Küçük boyutlu kaynak dikişleri, büyük boyutlu kaynak dikişlerinden daha iyi özelliklere ve daha yüksek sıcak çatlama direncine sahiptir.

Alaşım elementlerinin kaynak arkı içinde yanarak yani oksijen ile reaksiyona girerek azalması sonucunda da kaynak metallere mukavemet azalması bilinen bir gerçektir. Bu durum, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağında da geçerlidir. Örneğin; lityumun oksijen ile reaksiyona girerek yanması ya da magnezyumun düşük kaynama sıcaklığı, magnezyum kaybına veya bazı alaşımlarda lityum kaybına neden olmakta ve böylece kaynak metallere mukavemetin azalması durumuyla karşılaşılmaktadır ve uygulamada koruyucu gazın dikkatlice seçilerek bu problemleri minimuma indirilmesi olanağı vardır [1].

### **3.3. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarına Uygulanabilen Kaynak Yöntemleri**

#### **3.3.1. Alüminyum ve alaşımlarının gaz kaynağı**

Basit ekipmana ve düşük maliyete sahip olması nedeniyle, bazen saf alüminyum ve bazı alüminyum alaşımlarını kaynak yapmak için gaz (oksi-asetilen) kaynağı kullanılmaktadır [2].

Gaz ergitme kaynağı her tür hafif metale uygulanabilir; bunda oksii-asetilen alevi en iyi sonucu verir. Bununla birlikte hidrojen-oksijen alevi, havagazı oksijeninki gibi, daha düşük alev sıcaklığına haiz olmasıyla, 1 mm' den az kalınlıkta saçlarda saçların delinme tehlikesini azaltır. Ancak H-O alevi, Al-Mg gibi alaşımlarda gözeneğe yol açar, magnezyum alaşımlarında da ergime akışını engelleyen kuvvetli bir oksitlenme oluşturur. Oksii-asetilen alevinin bir başka avantajı da, çok hassas ayarlanabilme kabiliyetidir [2].

6 mm ve daha kalın Al levhaların oksii-asetilen kaynağında tam nüfuziyeti sağlamakla çatlamaya karşı önlem olarak ön ısıtma avantajlı olmaktadır. Ön ısıtma sıcaklığı 150- 200°C arasında olup daha yüksek sıcaklıklar, ararılan niteliklerin kaybına ve gereksiz yere genişlemiş bir IEB' ye yol açar [2].

Oksii-asetilen alevinin göreceli olarak düşük ısı yoğunluğu ve alüminyumun yüksek ısı iletkenliği kaynak hızını düşürür ve büyük çekmelere neden olur ki bu kaynaklı birleştirmede gerilimler ve deformasyon oluşturur. Isı etkili bölge çok genişdir, soğuk şekil değiştirme veya yaslandırarak sertleştirilen iş parçalarında ana metal yumuşar ve mekanik mukavemetini kaybeder. Gaz kaynağı için gereken dekapan kaynak ağzının iki yüzeyine ve ilave metale fırça ile uygulanır [2].

### **3.3.2. Alüminyum ve alaşımlarının örtülü elektrot kaynağı**

Bu yöntemle bütün alüminyum türleriyle ısıl işlem yoluyla sertleşmeyen alaşımları kaynak etmek mümkündür. Yapısal sertleşmeli alaşımlar arasında Al-Si-Mg ve Al-Mg-Si tipi alaşımlar uygun şekilde örtülü elektrotla birleştirilebilirler; ancak dikişe yakın bölgelerde mekanik karakteristikler düşer. Çinko ve magnezyumlu alaşımlar, kaynaktan sonra, herhangi bir işlemi gerektirmeden, mekanik karakteristiklerinin az çok tümüne yeniden sahip olurlar [2].

Alüminyumun bu metal-ark kaynağında dikkate alınacak önemli etkenler nem, ön ısıtma, dekapan ve elektrotla iş parçasının temizliğidir. Elektrot örtüsünde nemin varlığı, gözenekliliğin başlıca nedenidir. Sağlam kaynaklar elde etmek için elektrotların kuru, temiz depolanma olanakları bulunacaktır. İş parçasının ön ısıtılması, özellikle kalın parçalarda, gereklidir. Elektrotu kaplayan örtü (dekapan) çok inatçı olup bunun dikiş içinde sıkışıp kalmaması için oldukça beceri gerekir. Kaynaktan sonra bu dekapanın (cürufun) temizlenmesinde gösterilecek özen de önemlidir [2].

Alüminyum üzerinde kaynaklı birleştirmelerin tasarımında önemli husus, ani kesit ve kaynak yönü değişmelerinden kaçınmaktır. Bunu sağlamak için bazen birleşecek

parçalar arasına ara parçalar koymak kolaylık sağlayabilir. Aynı bağlamda, takviye plakaları, kesitleri düzenli olarak azalacak şekilde kesilirler [2].

Alüminyum parçaların 200° C' a ön ısıtılması istenir ve levha kaynağında bu işlem gereklidir. Ön ısıtma, oksii-asetilen üfleci ya da elektriksel dirençle yapılabilir; bu sonuncusu için, küçük parçalarda, bir tungsten elektrot, kaynak pensesinin ucuna gümüşle lehimlenir. Topraklama mengenesi iş parçasına bağlandıktan sonra tungsten elektrottan parçaya intikal edecek akım, onu ısıtacaktır. Yöntem, büyük parçalara uygulanmaz. Genellikle 5 mm' ye kadar saçlar ön ısıtılmaz. Dökümler, kural olarak ön ısıtılır [2].

Alüminyumun örtülü çubuk elektrotla kaynağında arkın tutuşturulması, çelikte olanından farklıdır. Hem Al elektrot hem de ana metal az çok derhal ergiyip katılaştıklarından, elektrot yapışması bir sorun olabilmektedir. Bundan kaçınmak için ark, elektrotu ana metalin yüzeyi üzerinde bir fırçalama hareketi yaparak tutuşturulur [2].

### **3.3.3. Alüminyum ve alaşımlarının mig kaynağı**

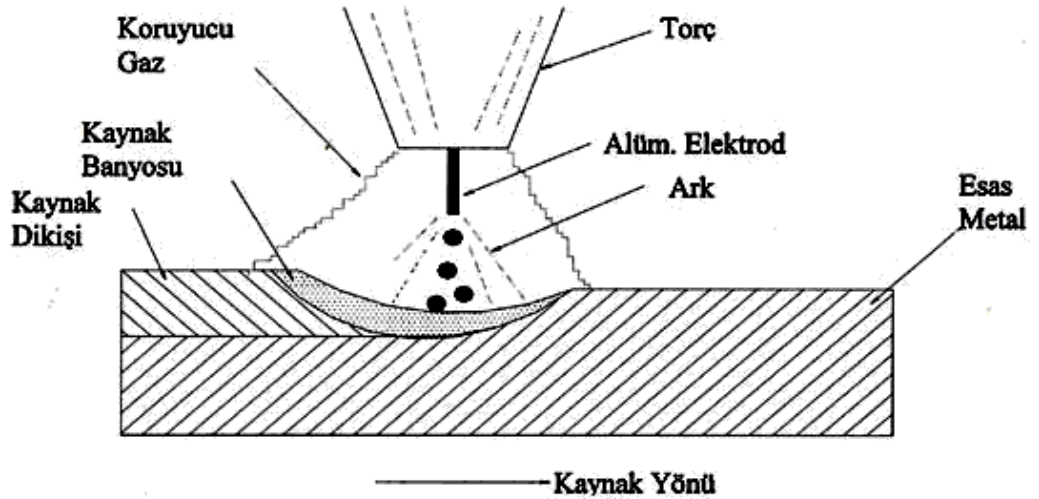
Günümüzde alüminyum konstrüksiyonunda en çok kullanılan kaynak metodu, ergiyen elektrodla bir koruyucu gaz veya gaz karışımı atmosferi altında yapılan MIG (Metal inert Gaz) kaynak tekniğidir. Ergiyen elektrod ile yapılan MIG gaz altı kaynağı çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. MIG kaynak yöntemi diğer kaynak yöntemlerine göre, mekanize edilebilme, daha hızlı çalışma, robot kullanma imkânı, çok karmaşık kaynak konstrüksiyonlarında kolay bir şekilde uygulanabilme, her pozisyonda kullanılabilme ve karbonlu çelik, paslanmaz çelik, alüminyum, bakır gibi bütün ticari metallerin kaynak edilebilmesi açılarından birçok avantajlar sağlamaktadır [22]. MIG yönteminin bir karakteristiği olan enerjinin verimli kullanılışı, çoğu kez ön ısıtmayı gereksiz kılar. Dolayısıyla süreç kalın Al kesitlerinin kaynağında geniş ölçüde uygulanır [2]. Bu teknik her kalınlıktaki alüminyum ve alaşımları için uygulanabilir olmasına rağmen genellikle 3 mm'den daha kalın alüminyum ve alaşımlarının kaynağında tercih edilen bir kaynak yöntemidir. Çünkü

MIG kaynağında kaynak hızı ve ergime gücü diğer gazaltı kaynak yöntemi olan TIG (tungsten inert gaz) kaynağına göre daha yüksek olduğu için çok ince levhalar ancak darbeli akım yöntemi uygulanarak kaynak yapılır [2].

Alüminyum ve alaşımları 550–660 °C arasındaki sıcaklık aralığında ergimelerine rağmen ısı iletkenliklerinin çok yüksek olması nedeni ile kaynak için gerekli ısı girdisi es kalınlıktaki çeliğin kaynağından daha fazla olmak zorundadır. Alüminyum ve alaşımlarının ısı genleşme katsayılarının büyük olması, kaynak bölgesinde ısınma ve soğuma sonucu oluşan sıcaklık farkları şiddetli gerilmeler ve büyük çaplı çarpılmaların olmasına neden olur. Alüminyum üzerinde hava ile teması sonucunda oluşan refrakter alüminyum oksit tabakası, alüminyum ve alaşımlarının kaynağını büyük çapta güçleştirir. Doğru akım, ters kutuplaşma (elektrot pozitif kutupta) ile yapılan kaynakta, banyo üzerinde yüzen oksit tabakası parçalanır ve ancak bu kutuplaşma ile kaynak gerçekleştirilebilir. Alüminyum ve alaşımlarının MIG kaynağında, malzemenin kalınlığı göz önüne alınmaksızın sprej ark ile kaynak yapmak daima tercih edilir. Sprej arkın yüksek ısı girdisine karşın alüminyumun yüksek ısı iletkenliği dolayısıyla ile kaynak banyosu oldukça çabuk katılaştığından her pozisyonda kaynak yapmak mümkün hale gelmektedir. Yalnız burada oksit tabakasının giderilebilmesi için sola kaynak yöntemi seçilmeli ve dikey pozisyonundaki kaynaklar aşağıdan yukarıya doğru yapılmalıdır. Böylece hem kaynak edilecek bölgelerdeki oksit tabakaları temizlenmiş olur hem de kaynak ağızları iyi bir şekilde ergiyerek uygun bir şekilde kaynak yapılmış olur. Sağa kaynak yöntemi uygulandığında ve dik kaynaklarda yukarıdan aşağıya doğru kaynak yapıldığında gözenekli, kötü görünüşlü ve yetersiz ergimeden dolayı tam kaynamamış bölgeler meydana gelir. Kaynak dikişi düz veya dar zikzaklarla çekilmelidir. Geniş zikzaklar kaynak dikişinin aşırı oksitlenmesine neden olduğundan kullanılmamalıdır. nce alüminyum levhaların gerek yarı otomatik gerekse de mekanize edilmiş MIG kaynağında genellikle Argon gazı kullanılır. Kalın alüminyum levhaların otomatik kaynağında ise daha sıcak bir kaynak banyosu ve daha iyi nüfuziyet elde etmek için Helyum gazı veya Helyum-Argon gaz karışımı kullanılır. Alüminyum alaşımlarının ısı iletkenliğinin yüksek olması özellikle kalın parçalarda kaynak bölgesinin şiddetli soğumasına neden olur. Bu bakımdan kalın ve

bilhassa döküm alüminyum parçalara kaynak öncesi ön tav uygulamak gerekir. Genellikle 15 mm'den daha kalın parçalara uygulanan ön tav sıcaklığı 2000 °C' yi geçmemelidir. Dövme alüminyum alaşımlarında genel olarak ön tav yerine daha yüksek akım şiddeti ve ark gerilimi ile daha yüksek ısı girdisi sağlanır. Soğuk şekil değiştirme veya ısıl işlem ile sertleştirilmiş alüminyum parçaların kaynak bölgesinde, sonradan kazanılmış olan bu sertlikte bir azalma görülür, bu bakımdan ısıl işlem ile sertleştirilmiş alüminyum alaşımlarına kaynak öncesi, bir çözeltiye alma tavi uygulanır ve kaynak sonrası tekrar ısıl işlem uygulanarak sertleştirilir [2].

MIG kaynak yönteminin uygulanması çok basittir. Toprak kablosunu iş parçasına veya kaynak masasına bağlayarak ve üfleç ucundaki tel elektrodu kaynak ağzına geçirilerek ark oluşturulur. Makine telin ilerlemesini ve uygun ark boyunu otomatik olarak sağlar. MIG kaynağı, uygulama kolaylığı nedeniyle bütün demir dışı metal ve alaşımların kaynağında çok popüler ve arandılan kaynak yöntemi haline gelmiştir.



Şekil 3.2. MIG yöntemindeki ark bölgesi [2]

Bu yöntemde kaynak arkı Şekil 3.2.'de de görüldüğü gibi iş parçası ile aynı zamanda ilave metal olan, tükenen tel elektrot arasında oluşur. Alüminyumun MIG kaynağı doğru akım, ters kutuplama (elektrot pozitif kutupta) ile yapılır. Bu kutuplama sprey damla geçişi olarak adlandırılır ve asal gaz atmosferi (Ar veya He veya Ar/He karışımı) altında korunur. MIG kaynak yöntemi kalın çaplı tel elektrot kullanarak

daha kararlı hale getirilebilir. Tel elektrodun düzgün olarak kaynak bölgesine iletilebilmesi için teflon spiral kullanılmalı, kılavuzlar ve tel sürme makaralarının yuvaları U biçimli olmalı, kontak meme daha uzun olmalı ve iç çap toleransının daha fazla olması gerekir.

MIG yöntemi ile 4 mm'den büyük kesit kalınlığına sahip malzemeleri alın kaynağını veya köse kaynağını tek pasoda yapmak mümkündür. Yüksek kaynak akımı ve güçlü bir nüfuziyet nedeniyle 6 mm'ye kadar kalınlığa sahip malzemelerde kaynak banyosunu desteklemek için kaynak altlığı kullanılır [2].

### **3.3.4. Alüminyum ve alaşımlarının tig kaynağı**

TIG sembolü, Tungsten Inert Gas kelimelerinin baş harflerinin alınmasıyla oluşturulmuştur [22]. TIG kaynak yöntemi; eritme esaslı buna karşın dolgu oranı düşük bir kaynak yöntemi olmasına karşın ısı girdisi yerel olduğundan ısı iletimi yüksek olan alüminyum ve alaşımlarının kaynağında çarpılmaları en aza indirdiği için tercih edilen bir gazaltı kaynak yöntemidir [2].

Bu yöntemde kaynak için gerekli olan ısı enerjisi, bir tungsten elektrod ve iş parçası arasında oluşturulan elektrik arkı tarafından sağlanmakta ve kaynak bölgesi de havanın olumsuz etkilerinden elektrod ile merkezlenmiş konumda bulunan bir nozülde gönderilen bir koruyucu gaz (He veya Ar veya He+ Ar karışımları) ile korunmaktadır [2].

TIG kaynağında, doğru ya da alternatif akım kullanılabilir. Fakat alüminyum ve magnezyum alaşımlarının kaynağında alternatif akım kullanılması gerekir [22]. Dövme alüminyum ve alüminyum alaşımlarını kaynak kabiliyetlerine göre şöyle sıralamak mümkündür: çok saf ve saf alüminyum, Al-Mn alaşımları, Al-Mg-Mn alaşımları, Al-Mg alaşımları, Al-Mg-Si alaşımları, Al-Cu-Mg alaşımları, Al-Cu-Ni alaşımları [2].

Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında sac kalınlığının 16 mm yi aştığı durumlarda, 150°C'lik bir ön tavlama faydalı olur. Ark önce başka bir parça üzerinde tutuşturulduktan sonra, esas kaynak edilecek parçalar üzerine getirilmelidir. Parçalarda meydana gelebilecek distorsiyonları azaltmak için parçaların kaynaktan önce tespiti ya da aksi yönlerde tertiplenmesi gerekir [2].

### **3.3.5. Alüminyum ve alaşımlarının elektrik direnç kaynağı**

Direnç kaynağı; iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda basıncın uygulanmasıyla yapılan bir kaynak yöntemidir. Malzemedен geçen elektrik akımının doğurduğu ısının dışında, herhangi bir ısı uygulanmamaktadır. Isı, kaynak edilecek kısımlarda oluşur ve basınç kaynak makinesindeki elektrotlar ya da çeneler aracılığıyla uygulanır [2].

Elektrik direnç kaynağı için gerekli alçak gerilim ve yüksek akım şiddetindeki elektrik gücü, kaynak transformatörlerinden, basınç ise hidrolik ya da mekanik donanımlarla sağlanır [2].

Bazı alüminyum alaşımlarının direnç kaynağı diğerlerine göre daha kolaydır. Genelde diğer kaynak prosesleri ile kaynaklanabilen döküm alaşımları direnç kaynağı ile de kaynaklanabilir. Sürekli döküm ve kum döküm alaşımları başarıyla nokta kaynağı yapılabilirken kalıp dökümlerinin bu metotla birleştirilmeleri zordur. Döküm alaşımları kendi kendileriyle, diğer döküm alaşımlarıyla ve dövme alaşımlarla nokta kaynağı ile kaynaklanabilirler [2].

Bir alüminyum alaşımının temperi onun kaynaklanabilirliğini etkiler. Tavlanmış durumdaki alüminyum alaşımlarının direnç kaynağı derin çentikler, distorsiyon ve artan uç ilerlemesi yüzünden işlem sertleşmesi ve çözültüye alma ısıl işlemi uygulananlardan zordur. Elektrot ömrü ve kaynak tutarlılığı daha sert temperler kaynaklandığında düzelir [2].

Nokta kaynağı elektrotlar tarafından bir arada tutulan iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdikleri dirençten elde edilen ısı ile parçaların bölgesel olarak ertirilip basınç altında birleştirilmeleridir. Kaynak dikişinin boyut ve sekli elektrotların boyut ve sekline bağlıdır [2].

Alüminyum ve alüminyum alaşımları yüksek termal ve elektrik iletkenliğe sahiplerdir. Nokta ve dikiş kaynağı yapabilmek için yüksek kaynak akımı değeri ve nispeten kısa kaynak süresi gereklidir. Alüminyum nokta kaynağında teçhizat seçimini etkileyen bir diğerk faktör ise kaynak sıcaklığında malzemenin hızla yumuşamasıdır [2].

Alüminyum levha yapıların imalinde nokta kaynağı pratik bir birleştirme metodudur. Sürekli döküm ve kum döküm alaşımlarda olduğu kadar tüm dövme alaşımlarda da kullanılabilir [2].

Alüminyumun nokta kaynağı için gerekli olan prosedürler ve ekipman çelikler için kullanılanlarla aynıdır. Bununla beraber, alüminyum alaşımlarının yüksek termal ve elektrik iletkenliği teçhizat ve kaynak planında bazı değişiklikler yapılmasını gerektirir [2].

Alüminyum AC (alternatif akım) ve DC (doğru akım) kullanılarak kaynaklanabilir. Yüksek kaynak akımı alüminyumun yüksek elektrik iletkenliği yüzünden gereklidir. Sonuç olarak, çelikle aynı kalınlıkta bir malzeme kaynaklandığında gerekli olan birincil enerji miktarı çelik için gerekli olandan daha yüksektir. En yüksek kalite için sürekli veya kesintili DC güç üreten makineler tercih edilmelidir [2].

Genelde tabaka ayrımı eğilimi daha az ve kaynak mukavemeti sabitliği daha iyi olduğu için yüksek mukavemetli 2024 ve 7075 alaşımlarının kaynağı daha kolaydır. Bununla beraber çatlama ve poroziteye karşı düşük mukavemetli alaşımlara nazaran daha fazla eğilim gösterirler. Gerçekte kaynak metalindeki çekme çatlakları neredeyse tamamen bakır ve çinko bazlı alaşımlar ( 2024 ve 7075 gibi) ile sınırlıdır [2].



### 3.3.6. Alüminyum ve alaşımlarının elektrocüruf kaynağı

Bu yöntemde kaynak yapılacak bölge, bir döküm kalıbı içine alınır. Ergitilerek dökülen sıvı metal, hem enerji taşıyıcı hem de ilave metal görevi yapar; bu sayede birleşme yüzeyleri gerekli kaynak sıcaklığına ulaşır. Dökülecek malzeme, ergitme ocaklarında veya alümino-termik reaksiyon yardımıyla ergitilir [2].

Elektrocüruf kaynağı taşıyıcı çubuklarda ve uygun duvar kalınlığındaki kazan ve tanklarda alüminyumun kaynağı için kullanılır [2].

Elektrocüruf prosesi ile yapılan kaynaklarda porozite yoktur ve tam bir ergime sağlanır. Halojen esaslı flaks kaynak süresince ergimiş metalden empüriteleri (özellikle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) temizleyen sürekli bir hareket üretir [2].

Kaynak; elektrocüruf kaynağında tipik olan dendiritik tane büyümesine sahiptir. Bununla beraber artan soğuma hızı sebebiyle taneler küçüktür [2].

### 3.3.7. Alüminyum ve alaşımlarının elektrogaz kaynağı

Elektrogaz kaynağında elektrocüruf kaynağında olduğu gibi, ergimiş metal banyosu hareketli (kayar) kalıplar (pabuçlar) tarafından yerinde tutulur. Elektrocürufda birleşme yerinin kenarları ve elektrot metali yüksek sıcaklığa getirilmiş bir elektriksel iletken cürufun teması ile ergirken, elektrogazda bu ergime (çeliklerde) CO<sub>2</sub> koruması altında, elektrotla banyo arasında tutuşan ark tarafından sağlanır [2].

Elektrogaz yönteminin alüminyuma uygulanmasında ilk ve en önemli sorun yukarıda sözü edilen pabuçlar olmuştur. Elektrogaz kaynağının alüminyuma uygulanması, pabuçların katılmış alüminyum üzerindeki kısmen sürükleyici etkisiyle kaynaktan meydana gelen yırtılma nedeniyle uzun süre mümkün olamamıştır. Ancak bu engelin üstesinden gelinmiş olup 45 mm kalınlıkta 5083-O alüminyum levha üzerinde 1200 mm uzunlukta kaynaklar, 5356, 5556 ve 5183 ilave metal elektrotlarla gerçekleştirilmiştir [2].

### 3.3.8. Alüminyum ve alaşımlarının plazma kaynağı

Bu kaynak metodunda direk kısa arklı bir plazma üflecinde sıkıştırılmış ve enerji yoğunluğu büyük bir plazma elde edilir. Plazma üflecinde çift gaz kullanılmaktadır. (içten) verilen gaz, plazma gazı adını alır. Plazma gazı olarak asal gaz, genellikle argon kullanılır. İkinci gaz koruma gazı olup, daha dıştan iş parçası ile üfleç arasına, plazmayı çepeçevre sarar şekilde verilir. Bu gaz genelde Argon ve moleküler bir gaz (H<sub>2</sub> veya N<sub>2</sub>) karışımıdır. Burada şekilde görüldüğü gibi plazma iş parçasını bir çivi gibi delip geçer. Kaynak yerinde eriyen malzeme (kaynak banyosu) plazma ilerledikçe plazmanın arkasında yüzey gerilimi nedeniyle kolayca katlaşır ve böylece belirli kalınlıklarda (2.5-8.0 mm arası) parçaları hiç dolgu malzemesi kullanmadan, tek pasoda kaynatmak mümkün olur [2].

Plazma arkı, metallerin, metal olmayan malzemelerin ve kombinasyonlarının birleştirme ve doldurma kaynağında kullanılır. Plazma ark kaynağı ile alaşımız, hafif ve yüksek alaşımlı çelikler, nikel ve nikel alaşımları, zirkonyum, bakır ve bakır alaşımları, alüminyum ve alüminyum alaşımları birleştirilebilir [2].

Plazma ark kaynağı ark boyutunun su soğutmalı nozül tarafından sınırlandırılması dışında gaz tungsten ark kaynağına benzer. Kaynaktan önce yüzey temizleme gereklidir. Nüfuziyet derinliğinin yüksek oluşu ve yüksek kaynak hızları plazma ark kaynağının gaz tungsten ark kaynağına üstün yönleridir. Kaynak öncesi ana metalin temizlenmesi, temiz dolgu teli ve kaynağın yeterli inert gaz ile korunması kaynak porozitesinin minimuma indirilmesi için gereklidir. 5XXX serisi ve Al-Li alaşımları için tüm kaynak yüzeylerinde inert gaz koruması gerekir [2].

### 3.3.9. Alüminyum ve alaşımlarının ultrasonik kaynağı

Ultrasonik kaynakta birleştirilecek parçalar, hareketli ultrasonik frekansla titreşen sonotrot ile sabit duran bir altlık arasına konur ve az bir kuvvetle bastırılır. Sonotrot tarafından oluşturulan ultrasonik titreşimler, yüzeye paralel olarak üstteki parçaya iletilir ve temas yüzeylerinde yani alt ve üst kaynak yerinde bağıl bir harekete neden

olur. Ultrasonik dikiş kaynağında bindirilen saclar dönen tekerlek şeklindeki sonotrotlar tarafından senkronize çalıştırılan altlık makaralarına bastırılır. Tekerlek şeklindeki sonotrotların levha titreşimleri üstteki iş parçasına iletilir [2].

Ultrasonik kaynak yöntemi alüminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımları, plastik malzemeler, cam ve beton gibi malzemenin kaynağında kullanılmaktadır. Ayrıca, alüminyum ile seramik ya da camın kaynağı gibi farklı malzemelerin birleştirilmesinde başarı ile uygulanmaktadır [2].

İş parçalarına düşük kenetlenme basıncı altında bir arada tutulduklarında yüksek frekanslı, düşük genlikli titreşimli hareketin bölgesel uygulanması ile yapılmaktadır. Proses folyo ve levha şeklindeki alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde ve de ince tellerin levha veya folyolara birleştirilmesinde kullanılır [2].

Tüm alüminyum alaşımları ultrasonik kaynakla kaynaklanabilir fakat kaynaklanabilirliğin derecesi alaşım ve temper durumuna göre değişir. Alüminyum alaşımları diğer metallerle bu proses ile birleştirilebilir [2].

Ultrasonik kaynak direnç kaynağının gerektirdiğinden daha az yüzey hazırlama gerektirir. Alüminyumun yağ giderilmesi normal olarak uygundur. Uniform bir kaynak elde etmek için ısıl işlem alaşımları ve yüksek oranda magnezyum içeren alaşımların 40

kaynaktan önce yüzey oksitlerinin giderilmesi gerekmektedir [2].

### **3.3.10. Alüminyum ve alaşımlarının patlama kaynağı**

Prensip bakımından soğuk basınç kaynağına benzer. Her iki yöntemde de dikey bir basınç kuvveti, teğetsel bir yükleme ile kombine şekilde etki eder. Bu, yüzeydeki oksit tabakasının yırtılmasına ve yüzeyin büyümesine neden olur [2].

Gerekli yüksek basınç, işlem gören parçalardan patlayıcı madde ile yüklü birinin patlaması ile diğerine karşı 2° ile 25° lik bir açı altında ve 100 ile 1000 m/sn hızla

kadar hızlanması koşuluyla ortaya çıkar. Bu sırada çarpma basıncı 10 ile 100 k bar a kadar çıkar [2].

Temizlenen yüzeyler bir kaç mm gibi yeterli bir aralık bırakılarak karşı karşıya (üst üste) getirilir. Aralıklar dalgalı metal şeritler ya da tellerle sağlanır. Bunlar sonra birlikte kaynak edilir. Birleştirilecek tabakaların üst yüzeyine ince bir koruyucu plastik tabakası ve bunun üzerine de patlayıcı madde yerleştirilir. Patlayıcı tutuşturulunca yüksek basınç ve hızla (1200 ile 7000 m/sn) patlama olur ve üstteki sac alttakine kaynak edilir [2].

Yaygın uygulaması paslanmaz çelik, bakır veya titanyum alaşımlarının alüminyum ile kaplanmasıdır. Patlama kaynağı uygulanmış bimetalik parçalar aslında geçiş parçaları olarak kullanılırlar. Alüminyumun patlama kaynağı için yüzey hazırlanması diğer kaynak proseslerine benzerdir. Temas yüzeyleri kaynaktan önce temizlenmelidir. Yüzey oksitleri kaynak süresince kırılıp dağılırlar [2].

### **3.3.11. Alüminyum ve alaşımlarının elektron ışın kaynağı**

Elektron ışını ile sağlanan ısının ya da gücün yoğunluğu, klasik kaynak yöntemlerinden yüksektir. Elektron ısınlarının güç yoğunluğu, yaklaşık  $10^8$  W/cm<sup>2</sup> dir. Bu güç yoğunluğu ile tabancadan 1 m uzaklıklara kadar çalışma mümkündür [2]. Isı kaynağı olarak elektron ışınının en önemli üstünlüğü, gaz alevi ve elektrik arkına karşılık, kaynak yerinde 10.000 misli daha yüksek bir ısı konsantrasyonunun elde edilmesidir [22]. Elektrik ark kaynağında yüzeye bırakılan ısı, yarım daire şeklinde bir bölgeye yayılırken, elektron ışının yüksek ısı yoğunluğu nedeniyle parçanın derinliklerine giren kanal şeklinde bir ısı dağılımı ortaya çıkar [2].

Arkın, plazma taneciklerinin enerjisi, yalnızca iş parçasının yüzeyinde bıraktığı ve bununla birlikte iç bölgelerin ısıtılmasında her yönden gelişen bir ısı dağılımına ayrıldığı için yarım daire şeklinde bir erime bölgesi oluşur. Elektron bombardımanı altında, kaynak yerinin kuvvetli bir şekilde ısınmasıyla etkili olan yüksek buhar

basma, eriyikte, elektronların enerjisini bırakmadan önce, iş parçasının derinliklerine kadar nüfuz edebildikleri bir kanalın oluşumunu sağlar [2].

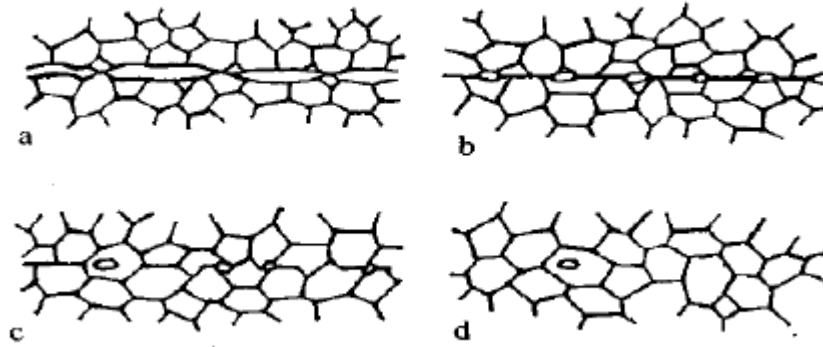
Oluşan ergime bölgesinin derinliğinin, ortalama genişliğe oranı: 25/1' e kadar olan bir kamanın şekline sahiptir [2].

Elektron ısıyı ile yapılan kaynakta, birleştirilecek parçalar kalın ağız formunda hazırlanır ve ek metal kullanmadan kaynak yapılır. Derin giriş nedeniyle altlık kullanılmaz. Fakat akmayı ya da yetersiz birleşmeyi önlemek için kaynak parametreleri çok dikkatli olarak seçilir. Elektron ısısının birleşme yerlerini etkilemeden geçmemesi ve aralığın ergimiş hacimle tamamen doldurulabilmesi için, kaynaklanacak iki parça arasında aralığın 1/100 mm den fazla olmaması gereklidir. Bu dar tolerans, freze ya da taslama ile ağızların dikkatli bir şekilde hazırlanmasını gerektirir. Diğer kaynak yöntemlerinde bu kadar dar toleranslara gerek yoktur.

Bazı durumlarda metalürjik nedenlerden dolayı, birleştirilecek parçaların arasına mekanik olarak ek bir tel ya da bant yerleştirilir. Araya konan bu ek metal elektron ısısının etkisiyle esas metal ile birlikte ergiyerek aralığın tam olarak doldurulmasını sağlar [2].

### **3.12 Alüminyum ve alaşımlarının difüzyon kaynağı**

Difüzyon kaynak mekanizması ile ilgili günümüze kadar birçok model sunulmakla beraber genelde üç aşamalı mekanizma kabul görmüştür. Bu üç aşamalı mekanizma Şekil 3.3 'de gösterilmiştir [2].



Şekil 3.3. Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması a. Yüzey pürüzlerinin başlangıç teması b. Birinci aşama deformasyon ve sınır bağ düzeni c. İkinci aşama tane sınırı göçü ve gözeneklerin yok edilmesi d. Üçüncü aşama hacim difüzyonu ve gözeneklerin elimine edilişi [2]

Birleştirilecek yüzeylerin birbirine teması sağlanıp kaynak için gerekli sıcaklık ve zamana ulaşılması ile yüzeyler arasında temas alanı artar. Kaynağın birinci aşamasında yüzeydeki pürüzlülüklerde akma ve sürünme mekanizmaları ile ara yüzeyde büyük bir alanda temas sağlanır. Bu aşamanın sonunda birleşme genelde tane sınırlarında oluşur. Basıncın etkisi ile yüzeydeki oksit kırılarak oksitlerin kırılmış olan noktalarından atom akışı başlar. İkinci aşamada difüzyon deformasyondan daha önemlidir. Birçok gözenek bu aşamada tane sınırı difüzyonu neticesinde kaybolur. Gözenekler tane sınırı göçü ile birleşme yerinden tane içine geçer ve tane içinde oluşur. Bunların tane sınırını hareketsiz hale getirme etkisi azdır. Başlangıçta düz olan birleşme çizgisi üçlü noktalarda bir malzemenin diğerine birkaç mikron kadar nüfuz etmesi ile eğrilir. Birleşme sınırı hareket ederken geride kalan gözenekler tanelerin içerisinde kalır ve burada tane sınırı ile temas alanını kaybederler. Difüzyon işlemleri bu gibi boşlukları küçülterek ortadan kaldırmaya yardımcı olur [2].

Üçüncü aşama, birleşmenin ve birleştirilecek parçalar arasındaki atomik bağın tamamlandığı aşamadır. İkinci aşama sonunda tane sınırlarından yok edilemeyen tane içine taşınan gözenekler bu aşamada hacim difüzyonu ile büyük oranda yok edilir. Yok, edilemeyen gözenek miktarının oranı kaynak sıcaklığı ile ilişkilidir [2].

Katı hal birleştirme tekniklerinden biri olan difüzyon kaynağı bu özellikleri sağlamasının yanı sıra ergime sıcaklıkları farklı metallerin ve metal/metal olmayan malzemelerin (metal/seramik gibi) birleştirilmelerini mümkün kılan bir birleştirme tekniğidir. Ayrıca birleşme alanının zamandan bağımsızlığı ayrı bir avantajdır. Kaynak için uygun şartlar sağlandığında birleşme bölgesinin mukavemeti malzemenin mukavemetine yakın değer vermektedir [2].

### **3.3.13. Alüminyum ve alaşımlarının lazer ışın kaynağı**

Lazer sistemi esas olarak optik resonatör (lazer kafası) ve kumanda düzenli enerji kaynağından oluşur. Lazer kafasının içerisine gönderilen enerjinin bir bölümü, lazer aktif madde (ortam) tarafından hacim ve zamana bağlı olarak elektromanyetik bir ısına çevrilir. Aktif madde katı, sıvı ya da gaz şeklinde olabilir. Sıvı hal lazeri, malzeme işlemek üzere şimdiye kadar hiç kullanılmamıştır. Lazerler sürekli ya da darbeleri olarak çalışırlar. Farklı lazerler, farklı dalga boylarında ısın ortaya çıkarırlar.

Lazer ısını ile kaynak, bir ergime kaynağıdır. Güç yoğunluğu, malzeme kuvvetle buharlaşmadan ergiyecek şekilde ayarlanmalıdır. Teorik olarak ek metal kullanılmadan kaynak yapıldığı için, parçalar birbirlerine tam olarak yaklaştırılmalıdır. Ağızlar arasındaki açıklık ergimiş banyo genişliğinin 1/5 i kadar olmalıdır. Ergimiş banyo genişliği ise, 100 mikron dolayındadır.

Enerji göndermenin ve zamana bağlı kumandanın basitliği nedeniyle hemen hemen bütün malzemelerin birbirleriyle kaynak edilebilmeleri, iyi bir şekilde otomatize edilebilir oluşu, iş parçasının üzerine hiçbir kuvvetin etkisinin olmayışı, atmosferde çalışma olanağı oluşu, hiçbir takım aşınması olmayışı, büyük çalışma aralıkları olanağının varlığı, ısının etkisi altındaki bölgelerin darlığı ve zor ulaşılan yerlerde kaynak yapma olanağı lazer kaynağının üstünlükleridir [2].

Alüminyum alaşımlarının kaynağında toplam ısı girdisinin azalması yararlı etki yapmaktadır. Neredeyse tüm endüstriyel alüminyum alaşımları çökelme sertleşmesi

ya da deformasyon sertleşmesi ile sertleştirilmektedir. Ark kaynağı süresince, IEB (ısı etkili bölge) da ulaşılan sıcaklık; çökme sertleşmeli alaşımlarda bölgesel aşırı yaşlanma veya deformasyon sertleşmeli alaşımlarda bölgesel yumuşama olması için yeterlidir. Bu aşırı yaşlanmanın veya yumuşamanın etkisiyle ana metal özelliklerine kıyasla IEB' in mekanik özelliklerinin bozulmasına sebep olur. Bu bozulma önemli olabilir. Ark kaynağı uygulanmış yüksek mukavemetli 2XXX serisi alaşımlarda mekanik özelliklerin % 50 ye kadar düşüşü sık görülür [2].

Ark kaynağıyla kıyaslandığında lazer ısın kaynağında görülen daha dar kaynak ve IEB daha az yaşlanmış ya da yumuşamış metal hacmiyle sonuçlanır. Bu aynı kalınlıktaki ark kaynağına göre lazer ısın kaynağının enine çekme testlerinde daha yüksek akma ve çekme mukavemeti göstermesiyle sonuçlanır. IEB' nin çok dar oluşu da bir dezavantajdır, mekanik özelliklerdeki uyumsuzluk (yani, kuvvetli ana metale kıyasla daha zayıf IEB) aşırı şekilde bölgeseldir. Sonuç olarak, lazer ısın kaynağının enine çekme testi tipik olarak kaynak veya IEB de sünekliğin olmamasından değil ama tüm deformasyonların IEB de meydana gelmesinden dolayı düşük uzama gösterir. Bu; parçalar lazer ısın kaynağı ile birleştirildiğinde problem olur. Kopma IEB da meydana gelir. Lazer ısın kaynağının darbe ve yorulma özelliklerinde deformasyonun bölgeselleşmesi zıt bir etkiye sebep olur [2].

Alüminyum alaşımlarının lazer ısın kaynağında temel zorluk Nd: YAG ve CO lazerlerle sırasıyla 1,06µm veya 10,5µm dalga boyu ışık yayınımlarında alüminyumun iyi birleşmemesidir. Bir diğer deyişle lazer ısın enerjisi alüminyum tarafından emilmek yerine yansıtılmak eğilimindedir bu da metalin ergimesi için gerekli olan enerjiyi sağlamaz. Parlatılmış alüminyum yüzeylerde % 90 kadar çok lazer enerjisi yansıtılır [2].

Ek olarak bir kez kaynak havuzu ve anahtar deliği oluşturulduğunda yansıtıcılık çarpıcı biçimde düşer ve bu güç yoğunluğunun çok yükselmesi ile sonuçlanır. Daha önceki lazer ısın kaynağı kontrol sistemleri yansıtıcılıktaki bu değişimi sağlayamıyorlardı. Kontrol sistemlerinin daha fazla gelişimine ihtiyaç duyulmaktadır.



Alüminyumun yansıtıcılığını azaltmanın bir diğer yolu; yüzeyi mekanik veya kimyasal pürüzlendirmeyele değiştirmek, çeşitli emici boya kaplamaları ile kaplamak veya alüminyum yüzeyin anotlanması ve boyanmasıdır.

Bu zorluklar alüminyumun diğer yapısal malzemelere göre lazer ısını ile kaynaklanmasını zorlaştırır. Bu zorluklara rağmen uzay endüstrisinde birçok uygulamada 2XXX ve 6XXX serisi alaşımlar başarıyla kaynaklanmaktadır. Otomotiv endüstrisinde de ince 2XXX ve 5XXX alaşım serisi levhalar başarıyla kaynaklanmaktadır. Alüminyum alaşımlarının lazer ısın kaynağı uygulamaları daha fazla ekipman ve proses gelişimi gerektirmesine rağmen lazer ısın kaynağının alüminyum alaşımları için kullanımı giderek artmaktadır [2].

#### **3.3.14. Alüminyum ve alaşımlarının manyetik puls kaynağı**

Kesikli manyetik alan metodunun kaynak konstrüksiyonda kullanılan diğer geleneksel yöntemlere avantajları oldukça uzun zamandır bilinmektedir. Fakat yakın zamana kadar bu kaynak cihazlarının ticari olarak üretilmeleri mümkün olmamıştır. Bir katı hal kaynak metodu olan bu yöntem patlamalı kaynak yöntemine benzer bir yöntem olup, günümüzde bu yöntemi kullanan kaynak makineleri ticari olarak üretilmektedir.

Bu yöntemde, paralel veya aralarında belli bir açı olan iki metal sac sargı arasına yerleştirilmektedir. Sargıdan yüksek akım geçirilerek iki manyetik alan oluşturulmaktadır. İki manyetik alanın birbirini itme kuvvetinden dolayı saclar uygulanan akımın karesi ile orantılı yüksek bir hızda birbirlerine çarpmaktadır. Yüksek hızdaki bu çarpma dolayısıyla plastik deformasyona uğrayan saclar kaynak olmaktadır. Bu yöntem ile iki parçanın kaynak edilebilmesi için, iki parçanın iletken olması ve yüksek hızda birbirine çarpması ve bu çarpma esnasında iki yüzeyin atomik temasının sağlanması gerekmektedir. Bu kaynak yönteminde elde edilen çarpma hızı, manyetik basınca, hızlandırılan malzemenin kütlesine, malzeme özelliklerine ve kaynak yapılacak parçalar arasındaki mesafeye bağlıdır.

Bu yöntem ile boru tipi parçaların bindirme kaynağını yapmak mümkün olup, şu anda birleştirilebilen boru geometrileri silindirik, eliptik ve kare kesitlidir. Bu yöntemin en önemli avantajı, diğer kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri mümkün olmayan Al-alaşımı parçaların birbiri ile veya diğer malzemelerden imal edilmiş parçalar ile kaynak edilebilmesidir. Elde edilen kaynak kalitesi oldukça yüksek olup, bu yöntemle elde edilen kaynaklarda kaynak bölgesi kesitinin daha büyük olmasından dolayı hasar kaynak bölgesi dışında olmaktadır. Bu kaynak metodu ile birleştirilmesi mümkün malzeme kombinasyonlarına örnek olarak Al-Al, Al-Mg, Al-paslanmaz çelik, Al-çelik, Al-pirinç ve Al-Cu verilebilir. Bu kombinasyonlara ilaveten diğer bazı malzeme kombinasyonlarında da bu yöntem kullanılabilir. Bu yöntem ile birleştirilen parçalarda, patlamalı kaynaktakine benzer bir kaynak bölgesi elde edilmektedir [2].

### **3.3.15. Alüminyum ve alaşımlarının soğuk basınç kaynağı**

Soğuk basınç kaynağı oda sıcaklığında ya da hafif sıcaklık uygulayarak basınç altında katı halde parçaları birbirine birleştirmektir. Parçaların en düşük yeniden kristalleşme sıcaklığı, en yüksek sınır sıcaklık olarak alınır. Metallerin yüzeyi çevre koşullarında her zaman yağ, oksit, sülfür ya da gaz gibi bir tabaka ile kaplandığından, bu tabakanın kaynak işleminden önce temizlenmesi gerekir ve kaynak sırasında uygulanan basınçla şekil değiştirmelidir [2].

Soğuk kaynak ısı girdisi olmadan gerçekleşir. Kaynaklanacak iki parçaya önemli miktarda plastik deformasyonla sonuçlanan bir dış basınç uygulanır. Soğuk kaynak için temel gereksinim metallerden en az birinin sünekliğinin yüksek olması ve soğuk işlem sertleşmesinin önemli derecede olmamasıdır. Tüm alın ve bindirme birleştirmeler soğuk kaynakla kaynaklanabilir [2].

Yöntemin önemli değişkenleri, işlem öncesi yüzey hazırlama, deformasyon, kaynaklanacak malzeme veya malzeme çiftlerinin özellikleri ve basınçtır. Kaynak öncesi yüzey işlemleri çok önemlidir. Yaygın olarak kullanılan yöntem, metal

yüzeylerinin yağdan temizlenmesi ve tel fırça ile fırçalanmasıdır. Bu mekanik yöntem olup ayrıca ısı ve kimyasal işlemler de vardır [2].

Sayılanlar arasında deformasyon en önemli kaynak parametresidir. Her bir metalin soğuk basınç kaynağında bağ oluşumu için minimum bir deformasyon-yüzey yayılması veya redüksiyon değeri bulunmaktadır. Al-Al birleştirmelerinde bu esik deformasyon değeri %40-%55-60 kabul edilmekte, alüminyumun kaynak öncesi gördüğü işlem, kalınlık, birleştirmenin şekli ve yüzey hazırlanmasında bu esik değerini doğrudan etkilemektedir [2].

Isıdan etkili bölge olmadığı için alın birleştirme kaynak ana malzemeyle aynı ya da yakın derecede sağlamdır. Birçok alüminyum alaşımı çatlak hassasiyetleri yüzünden ark kaynağı ile kaynaklanamazken soğuk kaynak ile başarıyla kaynaklanabilir. Örneğin alın kaynaklı 2024 ve 7075 alaşımları başarıyla soğuk kaynak yapılabilir fakat bindirme kaynağı yapılamaz [2].

Alın ve köse birleştirmeler tel, çubuk, boru ve basit ekstrüzyon şekillerindeki alüminyum malzemelere yapılabilirken; bindirme birleştirmelerin kaynağı levha malzemelere yapılabilir. Bindirme birleştirmelerin kaynağında kaynak bölgesinde kalınlıkta yaklaşık %70 azalma gerektirir ve sadece düşük mukavemetli 1XXX ve 3XXX serisi alaşımlar için pratiktir. Bu kaynak iyi kayma mukavemeti sağlar fakat egme tipi bir yüklemeye maruz kalındığında iyi bir performans göstermez [2].

### **3.3.16. Alüminyum ve alaşımlarının sürtünme kaynağı**

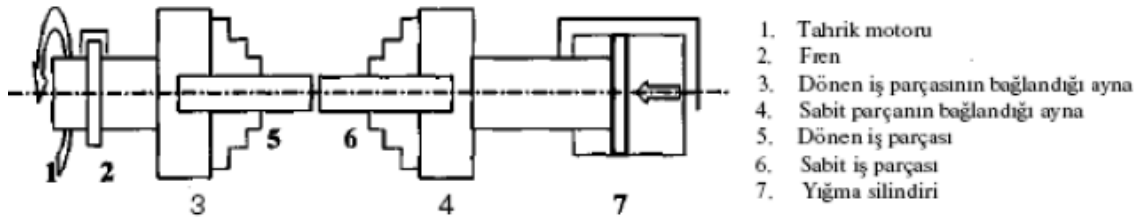
Sürtünme kaynak yöntemi, özellikle malzeme ve enerji tasarrufu sağlaması bakımından 1950 yılından sonra kendisine özel kaynak yöntemleri içerisinde yer bulmuştur. Sürtünme kaynağı, dışarıdan hiçbir mekanik enerji veya ısı kullanılmadan parçaların sürtünmeden oluşan mekanik enerjiyi, termal enerjiye dönüştürmesiyle parçaların birleştirilmesi olarak tanımlanabilir. Sürtünme kaynağında parametrelerin belirlenmesi büyük önem kazanmaktadır. Bu kaynak türündeki en önemli

parametreler; sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığma süresi, yığma basıncı ve devir sayısı olarak sayılabilir. Parçalar kaynak edilirken birleştirilecek parçaların yüzeylerinin de yağ ve oksitten arındırılması kaynak yapılırken olumlu bir işlem olacaktır [2].

Sürtünme kaynak yöntemi genel olarak;

- Klasik (Sürekli Tahrikli) Sürtünme Kaynağı
- Volanlı (Atalet) Sürtünme Kaynağı şeklinde ikiye ayrılabilir.

Klasik (Sürekli Tahrikli) sürtünme kaynağında (Şekil 3.4); birleştirilecek parçalardan biri eksenini etrafında döndürülmekte diğeri ise aksenal yönden hareketli olarak dönen parçaya belirli bir süre bastırılmaktadır. Sürtünen yüzeylerde yeterli sıcaklığa erişilince dönme işlemi ani olarak durdurulurken basınç arttırılmakta ve yumuşak malzeme bu yüksek basınç altında soğumaya bırakılmaktadır. Açıklamadan da anlaşılacağı gibi basınç iki kademeli olarak uygulanmaktadır. Basıncın birinci kademesine "Isınma veya Sürtünme Basıncı" ve ikinci kademesine de "Yığma veya Dövme Basıncı" denir [2].



Şekil 3.4. Sürekli tahrikle sürtünme kaynağı [2]

Volanlı (Atalet) sürtünme kaynağında; bir volandaki kinetik enerjiden yararlanır. Volan, işlemden önce belli bir devir sayısına getirilerek tahrik motoru devreden çıkarılır. Birleştirilecek parçaların birbirine bastırılmasıyla sürtünen yüzeyler ısınır ve kaynak edilir. Volan ise gittikçe artan bir şekilde yavaşlar ve durur. Ancak bundan sonra basınç ve sıcaklık azalmaya başlar ve moment ile devir sayısı birlikte sıfıra

erişir. Boy kısalması ise eriştiği değerde kalır. Burada dövme zamanı yoktur. Bu nedenle volanlı sürtünme kaynağı işlemi daha kısa zamanda gerçekleşmektedir [2].

Çatlak hassasiyeti yüzünden ark kaynağı ile kaynaklanamayan 7XXX serisi alaşımlar da dahil olmak üzere neredeyse tüm alüminyum alaşımları sürtünme kaynağı ile kaynaklanabilir. Sürtünme ısı ile yumuşayan metal kaynak bölgesinden uzaklaştırılır ve yüksek mukavemetli ısı işlem görebilen alüminyum alaşımlarında bile birleşmenin mukavemeti esas metalinkine yaklaşır. Kontak yüzeyindeki alüminyum oksit kırılır ve birleşmeden uzaklaşır. Kaynak öncesi temizleme diğer kaynak proseslerinde olduğu kadar kritik değildir [2].

Tüm malzeme kombinasyonları için mümkün olmamasına rağmen alüminyum alaşımları birçok başka metal ile sürtünme kaynağı ile kolayca birleştirilebilir. Elektrik endüstrisinde kullanılan alüminyumun bakır alaşımları ile kaynağı ve boru sistemleri ve basınçlı kapların geçiş bağlantılarında kullanılan alüminyumun paslanmaz çeliklerle kaynağı en yaygın iki kaynak kombinasyonudur [2].

## **4. SÜRTÜNME VE SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK TEKNİKLERİ**

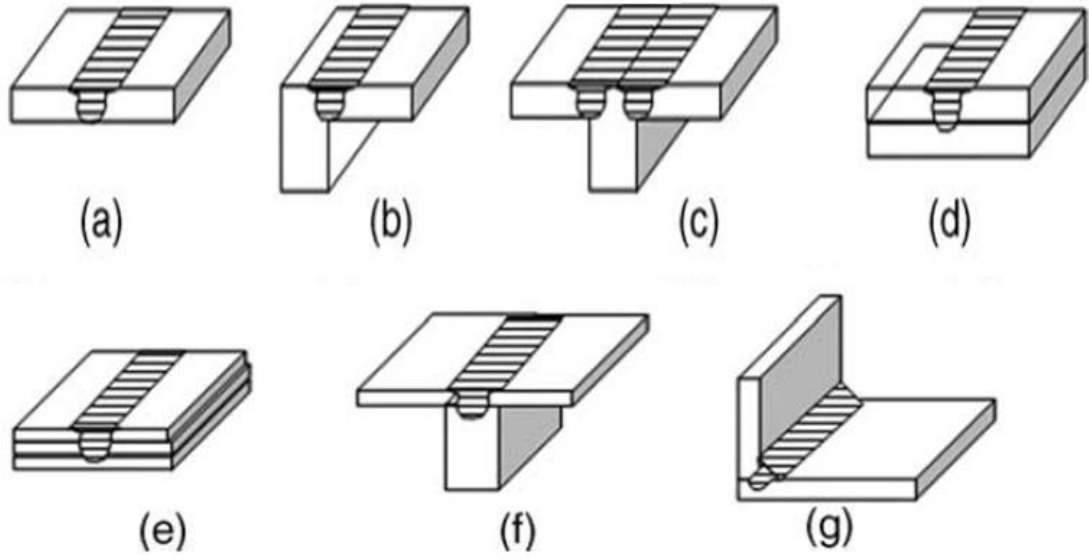
### **4.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağı**

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı(FSW), ilk defa 1991'de İngiltere Kaynak Enstitüsü (TWI) tarafından bir katı hal kaynak tekniği olarak alüminyum alaşımlarına uygulanarak gerçekleştirilmiştir. [11]

Sürtünme karıştırma kaynağı, sürtünme kaynağının bir türevi olup kaynak sonrası herhangi bir boşluk, çatlak veya deformasyon meydana gelmeksizin güvenli bir kaynak yapmanın çok zor olduğu birçok malzemenin birleştirilmesini kolaylaştırmıştır. Birçok sanayi kuruluşu bu tekniği üretimlerinde kullanmak için pilot çalışmalar yürütmektedir [5].

Günümüzde uçak, tren, roket, otomobil, gemi ve helikopter gibi araçların imalatında hafif olmasına rağmen, mekanik özellikleri çok iyi olan alüminyum alaşımlar büyük oranda kullanılmaktadır. Ancak alüminyum ve alaşımlarının ergitme kaynak teknikleri ile kaynatılması hem problemlili hem de zordur. Bu problemlerin çözümü için yeni bileştirme tekniklerinin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu amaçla sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, alüminyum alaşımlarının problemsiz ve kolay birleştirilmesi amacıyla geliştirilmiş ve endüstrideki uygulamalarına başlanmış bir birleştirme tekniğidir [1].

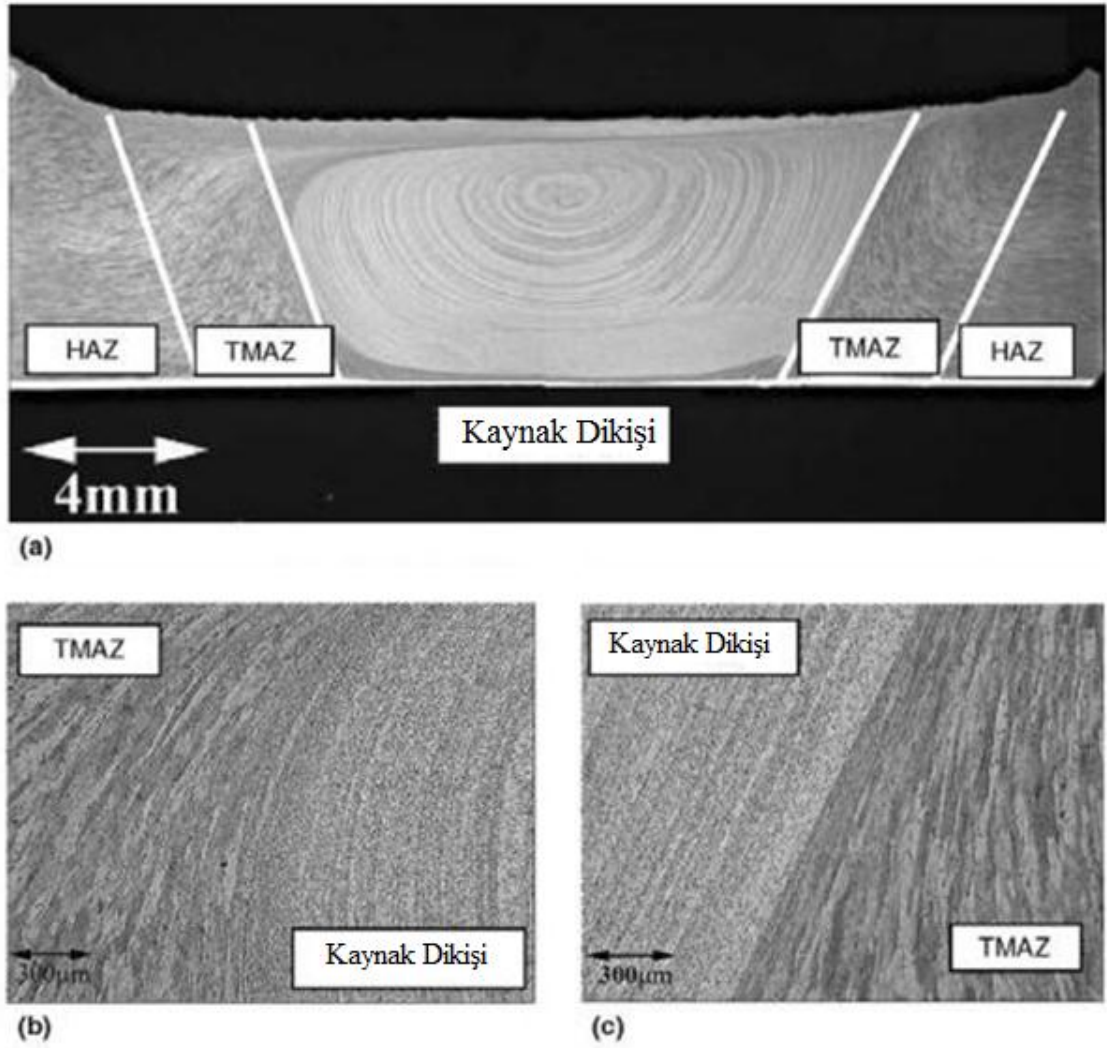
Sürtünme karıştırma kaynak tekniği, günümüz endüstrisinde yaygın olarak levha halindeki alüminyum, bakır, kurşun ve plastik gibi malzemelerin birleştirilmesinde, uzay mekiklerinde kullanılan yakıt tankı imalatında, otomobil gövde parçalarının imalatında, feribotların alüminyum güverte imalatında, tren, uçak, gövde parçalarının imalatında, alüminyum ekstrüzyon levhaların birleştirilmesinde ve büyük paneller haline getirilmesinde kullanılmaya başlanılmıştır [17].



Şekil 4.1. FSW için birleşme konfigürasyonları. (a) Alın kaynağı. (b) Köşe kaynağı. (c) T alın kaynağı. (d) Bindirme kaynağı. (e) Bindirme kaynağı. (f) T bindirme kaynağı (g) Köşe Kaynağı

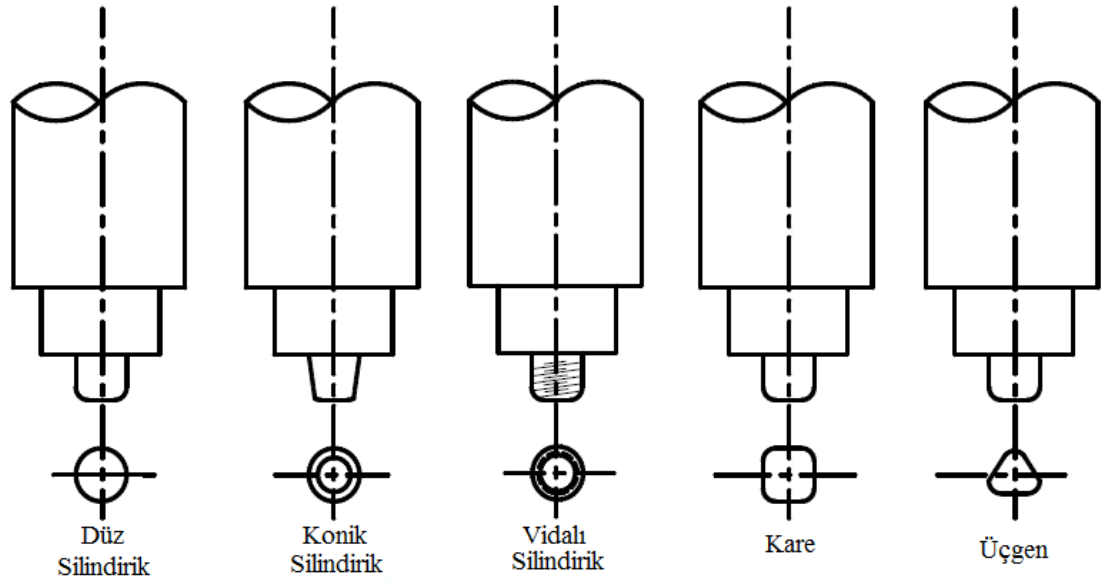
Çizelge 4.1. Sürtünme karıştırma kaynağı(FSW) işleminin anahtar faydaları [11]

Metalurjik yararlar	Çevresel yararlar	Enerji yararları
Katı hal işlemdir	Koruyucu gaz gerekmemektedir	Lazer kaynağının sadece % 2.5'i enerji gerektirmektedir.
Düşük çarpılma	Asgari yüzey temizliği gereksinimi	
İyi boyutsal kararlılık ve tekrarlanabilirlik	Taşlama artıklarını elimine eder	Farklı kalınlıklardaki malzeme kullanımını ağıt
Element kaybı yoktur	Temizleyici solvent kullanımı gerekmemektedir.	
Birleşme bölgesinde harika mekanik özellikler	İlave malzeme kullanımından tasarruf sağlar	Taşıma araçlarının hafiflemesi ile daha az yakıt tüketimi gerçekleşmektedir
Tekrar kristalleşmiş ince mikroyapı	Zararlı atıkları bulunmamaktadır	
Katılma çatlakları yoktur		
Tüm alüminyum alaşımlarına uygulanabilir		
Bağlama elemanları ile çoklu kaynak yapılabilir		



Resim 4.1. (a) FSW ile birleştirilen alüminyum alaşımlarının farklı bölgelerini gösteren mikroyapı görüntüsü, (b) Gerileyen kenar, (c) İlerleyen kenar, HAZ, ısıdan etkilenen bölge; TMAZ, termomekanik olarak etkilenen bölge[11]





Şekil 4.2. Sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) için kullanılan farklı takım geometrileri [20]

#### 4.2. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı

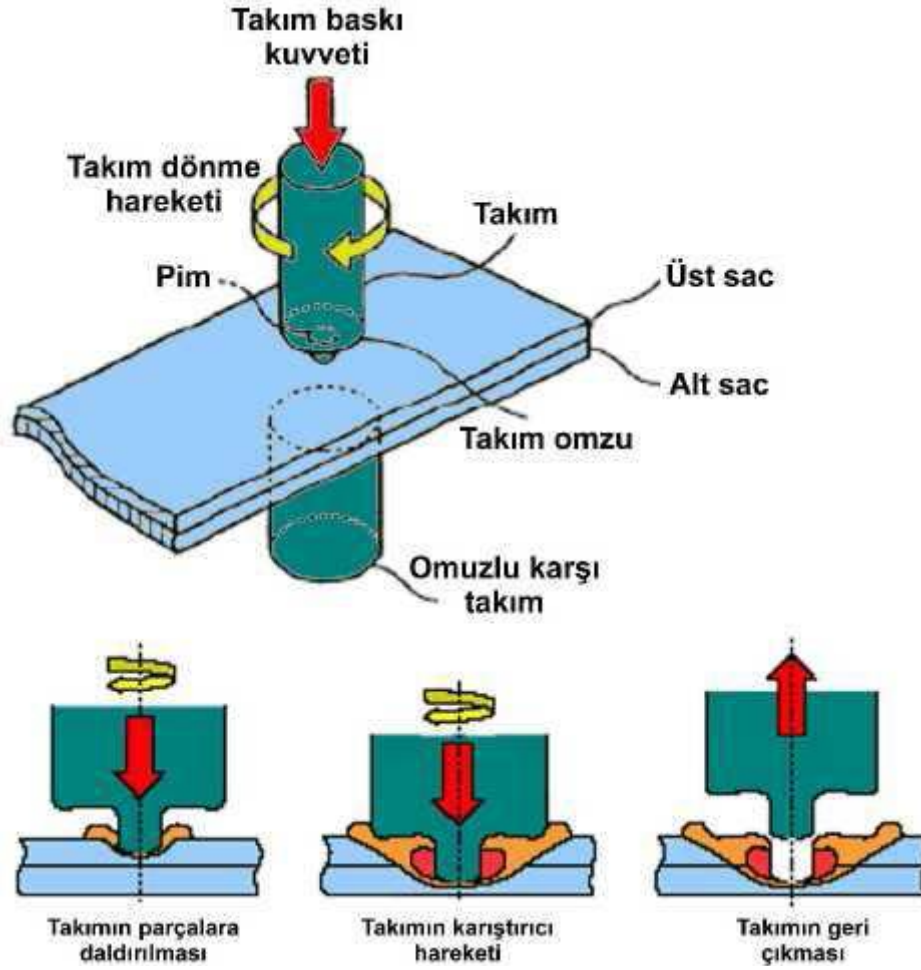
Elektrik direnç nokta kaynağına alternatif olarak geliştirilmiş olan ve alışılmış sürtünen elemanla kaynak veya yaygın adıyla sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) yönteminden yola çıkılarak geliştirilen sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yöntemi, kaynak teknolojisi konusundaki son gelişmelerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Yöntem, nokta sürtünme kaynağı (Spot Friction Welding- SFW) veya sürtünme nokta birleştirme (Friction Spot Joining- FSJ) olarak da adlandırılmaktadır [21]. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yöntemi, ilk olarak literatüre 2000 yılında girmiş ve 2001 yılında temel prensibi hakkındaki ilk rapor yayımlanmıştır. Bu yöntem 1999 yılında bir Japon otomobil kuruluşu olan Mazda tarafından geliştirilmiş ve daha sonra patenti alınarak ve literatür de yayımlanarak dünyaya tanıtılmıştır. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı ilk defa 2003 yılında Mazda RX-8'in yan kapı panel nokta kaynağında kullanılmıştır [1].

Son yıllarda otomotiv sektöründe alışılmış çelik sacların yerine daha hafif alaşımların kullanılması yönünde kritik kararlar alınmaktadır. Otomobil gövde

yapımında ve kapalı panellerde; bagaj kapağı, motor kapağı gibi arabanın birçok bölgesinde alüminyum alaşımı saclar ya da daha ince kesitlerde yüksek mukavemetli çelik saclar kullanılarak gövde ağırlığını azaltılmıştır. Ağırlığı azaltmak otomotiv endüstrisinde yakıt tasarrufu sağlamaktadır[4].

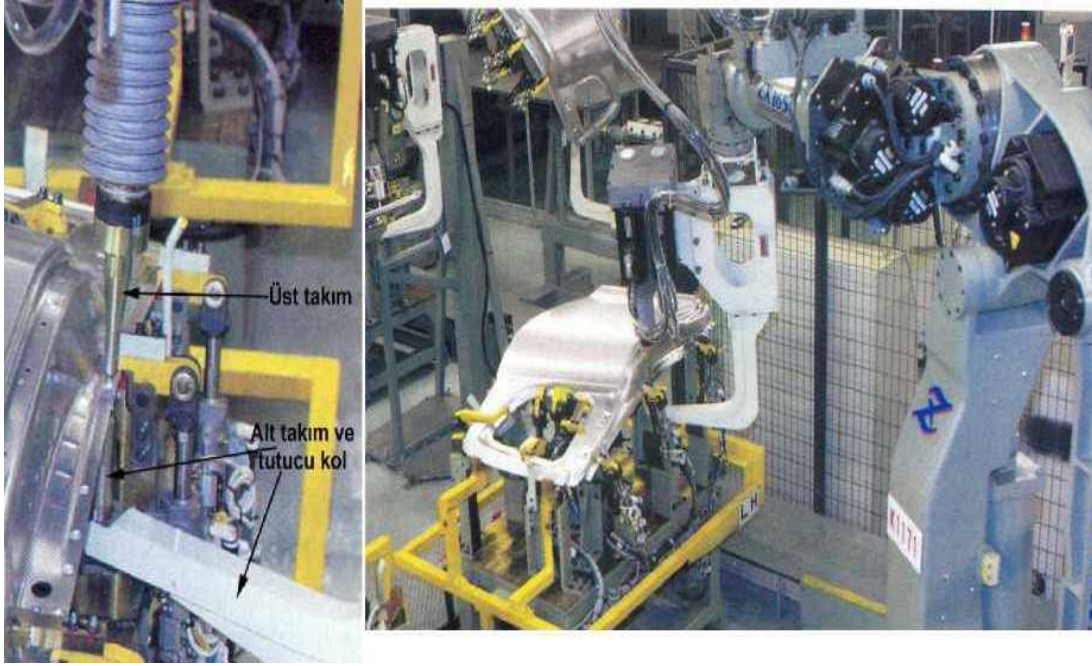
#### **4.2.1 Sürtünme karıştırma nokta kaynağının uygulanması**

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) prensibi Şekil 4.3'de verilmiştir. Bu yöntem bindirme pozisyonunda bulunan malzemelerin hem alt hem de üst bölgelerine uygulanır. Dönen uçlu aparat malzemeye sürtünme ısıyı oluşturmak için üst yüzeyinden bir süre uygulanır. Dönen aparat bitişik olan ısınmış ve yumuşamış olan malzemedeki plastik akışa neden olur. Bununla birlikte takım omuzu malzemeye baskı verir. Belirli bir süre sonra takım malzemedeki uzaklaştırıldıktan sonra nokta biçiminde kaynak oluşur [4].



Şekil 4.3. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı prensibi [1]

Yöntemi geliştiren ve ilk kullanan Japon otomobil kuruluşu, yöntemin uygulanmasında bu yöntem için özel olarak geliştirilen kaynak robotunu kullanarak üretmekte olduğu spor model otomobillerin arka kapılarını ve motor kaputlarını üretmektedir. Ekipman fiyatları bakımından sürtünme karıştırma nokta kaynak yöntemi direnç nokta kaynağına göre % 40 daha az yatırım masrafı gerektirdiği de belirtilmektedir. Şekil 4.12’de kaynak robotuyla yapılan FSSW kaynak uygulaması görülmektedir [1].



Resim 4.2. Japon otomobil üreticisi kuruluş tarafından geliştirilen FSSW yönteminin spor model bir otomobilin gövde panellerinin ve arka kapılarının sürtünme karıştırma nokta kaynağında kullanımı [1].

#### 4.2.2. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı kontrolü ve yöntem değişkenleri

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi(FSSW) ile elde edilen kaynaklı noktanın biçimi ve mekanik özellikleri kaynak işlemine dahil olan değişkenler tarafından belirlenmektedir.

##### Takım malzemesi

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) uygulamalarında kaynak edilecek malzemenin türüne bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda aşınma direncine sahip takımlar kullanılır. Yöntem önceleri alüminyum ve alüminyum alaşımları için kullanıldığından alaşımsız çeliklerden yapılmış takımlar ile iyi sonuçlar alınmıştır. Ancak yöntemin ısı işlem görmüş bazı alüminyum türlerinde de kullanılması takımın aşınmasına ve kısa sürede kırılmasına neden olmuştur. Zaman içinde alaşımsız çelik takımlar yerini alaşımlı çelik takımlara bırakmıştır. Alüminyum alaşımlarının normal türlerinde alaşımlı AISI 4140 ve AISI 4340 türü transmisyon

(mil) çelikleri kullanılabilmesinin yanı sıra (X40CrMoV51) sıcak iş takım çeliği ve bazı tür HSS (EN HS 6-5-3) yüksek hız çelikleri kullanılabilir. Önce alüminyum levhaların kaynağında da C45, C50, C60 gibi az alaşımlı takım çelikleri kullanılmaktadır [1].

#### Kaynak hızı ve takım dönme hızı

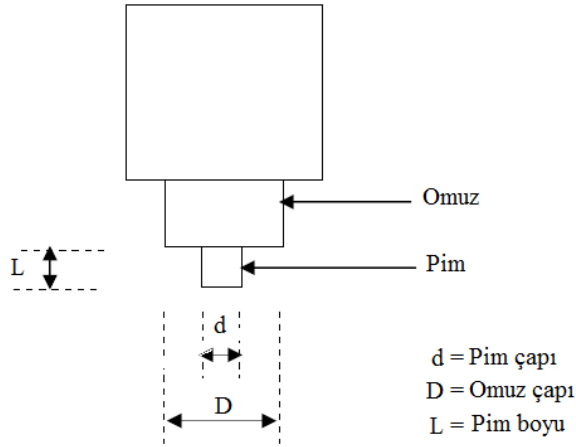
Yapılan çalışmalarda 1 ve 2 mm kalınlıklardaki levhaların FSSW işlemi ile birleştirilebilmesi için genel olarak takım devri 1000-3000 devir/dk değerlerindedir.

Bu devirler özellikle birleştirmenin mukavemeti ve kaynak süresi üzerinde olumlu ya da olumsuz etki yapmaktadırlar. Genel olarak ortaya çıkan kaynak süresi 1,5 sn ile 10 sn. arasında değişmektedir. Bu süre kaynak malzemesi ve takım devri ile değişmektedir [5].

Yapılan bu çalışmada literatür çalışmalarından farklı olarak 3mm kalınlıkta levhaların birleştirilebilirlikleri incelendiğinden ısı girdisinin daha kısa sürede temin edilebilmesi için takım dönme hızı 4500 devir/dk olarak belirlenerek uygulanmıştır.

#### Takım geometrisi

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda çok değişik geometriye sahip takımlar kullanılmıştır. Pim çapı, pim yüksekliği ve takım omuz çapı değerleri oluşturulan birleştirmenin mukavemetine en çok etki eden takım parametreleridir. Özellikle Pim çapı ve pim yüksekliği kaynağın nüfuziyetini ve dolayısıyla mukavemetini etkileyen en önemli parametrelerdendir[6]. FSSW işleminde kullanılan pimli takımlara ait parametreler şekil 4.1. 'de görülmektedir.

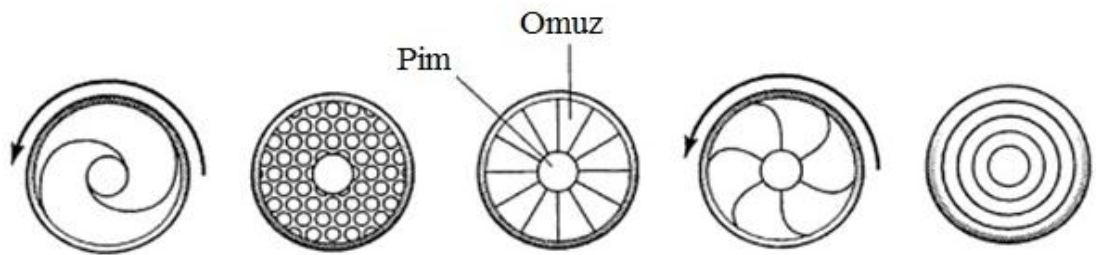


Şekil 4.4. FSSW işlemi için kullanılan pimli takımlara ait parametreler

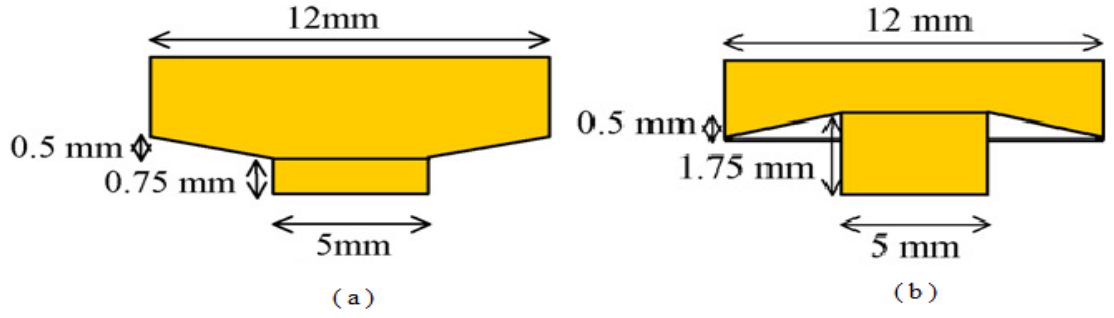
#### Takım omuz geometrisi

Sürtünme Karıştırma Kaynak yöntemi üzerine yapılan çalışmalarda omuz bölgesine sahip takımların omuz çapı, omuz geometrisi gibi özelliklerinin mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Örneğin takıma ait omuz kısım, kaynak işlemi sırasında üst malzemeye sürtünerek üst malzemenin ısınmasına dolayısı ile FSSW işlemi için gerekli ısının elde edilmesini sağlamaktadır.

Literatürde çeşitli omuz geometrilerinin kullanıldığı görülmüştür. Konkav, konveks ve düz omuz geometrileri bulunmaktadır. Konkav omuz geometrisi ile kaynak bölgesinde daha az malzeme fışkırması ve keskin kanca geometrisi oluşumu nedeni ile dayanım diğer geometrilere oranla daha yüksek çıkmaktadır [10]. Şekil 4.5.'de farklı omuz geometrileri görülmektedir.



Şekil 4.5. Malzeme akışını geliştirmek için tasarlanan farklı omuz biçimleri [19]



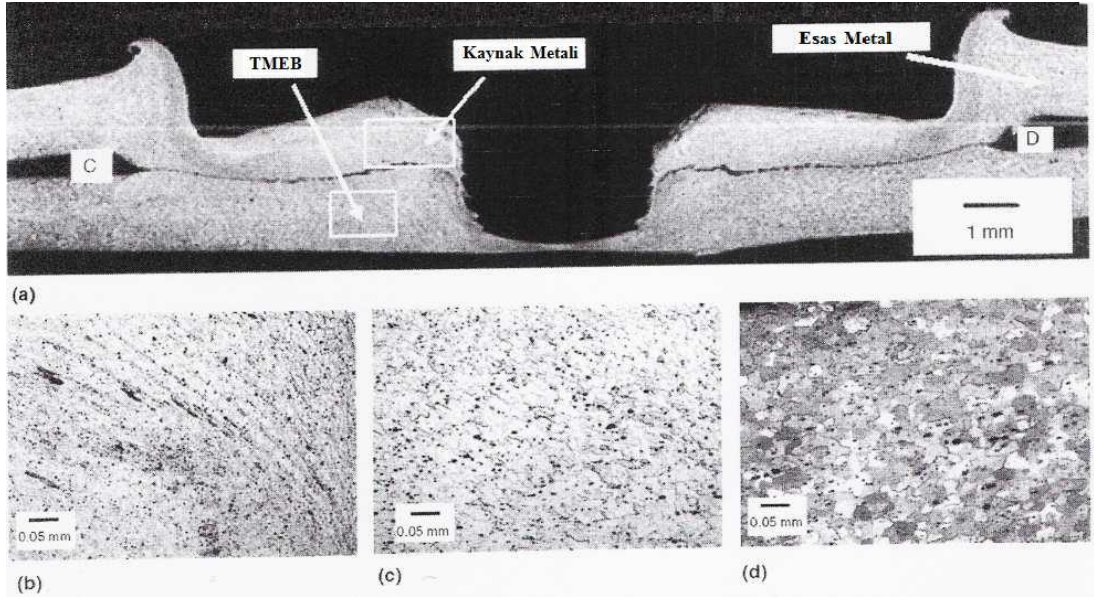
Şekil 4.6. Farklı omuz geometrileri. ( a ) konveks geometrili omuza sahip takım, ( b ) konkav geometrili omuza sahip takım [10]

### Takım pim geometrisi

Literatür çalışmaları incelendiğinde çok farklı pim geometrilerinin kullanıldığı görülmüştür. Resim 4.3. farklı pim geometileri görülmektedir.

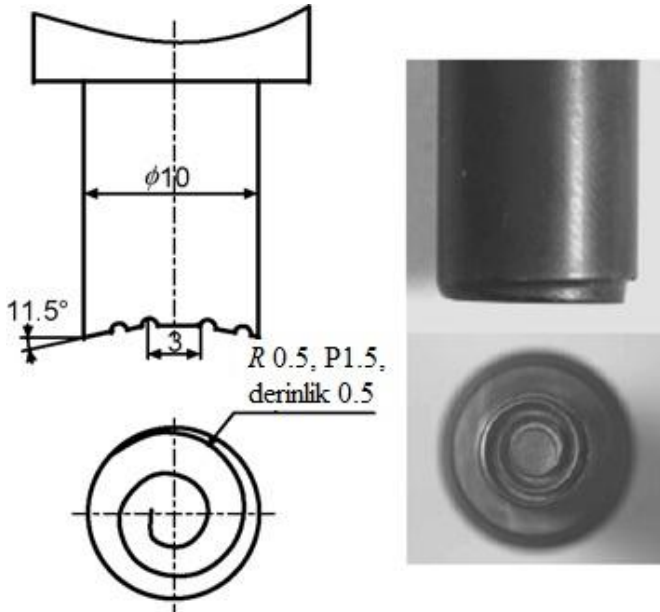


Resim 4.3. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) uygulamalarında kullanılan takımlardan örnekler [21]



Resim 4.4. AA 5754 Alüminyum alaşımı sacların FSSW yöntemiyle birleştirilmesi sonucu makro yapı ve mikro yapı görüntüsü (a) Makroyapı görüntüsü (b) Kaynak metali (c) TMEB (d) Esas metal [1]

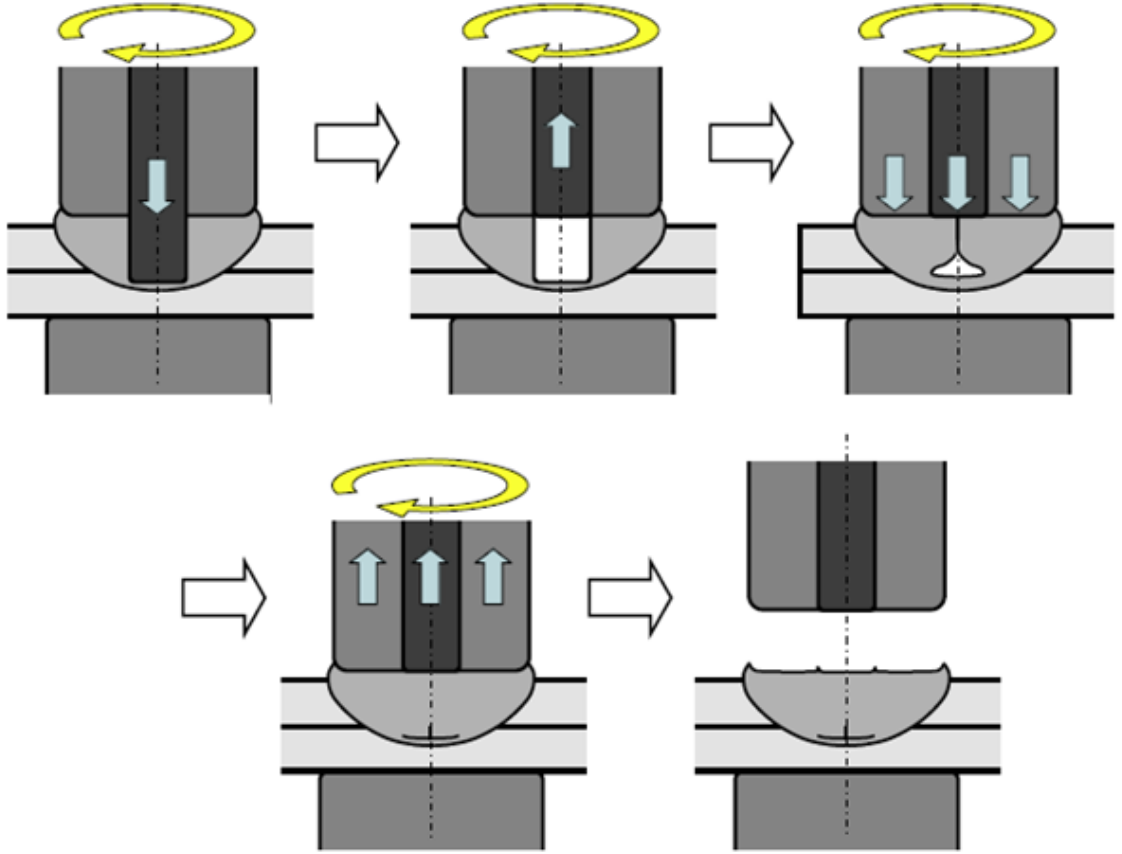
Bazı çalışmalarda ise Şekil 4.7.' de görüldüğü gibi pimsiz takımlar kullanılmıştır.



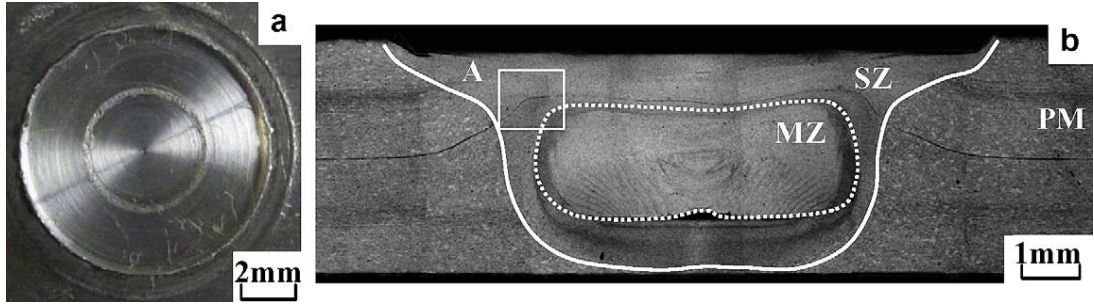
Şekil 4.7. Yeni geliştirilen takıma ait konifürasyon ve fotoğraf. Tüm ölçüler mm cinsindedir [23]



Şekil 4.8.'de görülen bir başka çalışmada ise omuzdan bağımsız hareket eden pim yapısı ile dışa malzeme taşmasını önleyerek anahtar deliği oluşumunu engelleyen bir takım tasarımı kullanılmıştır.

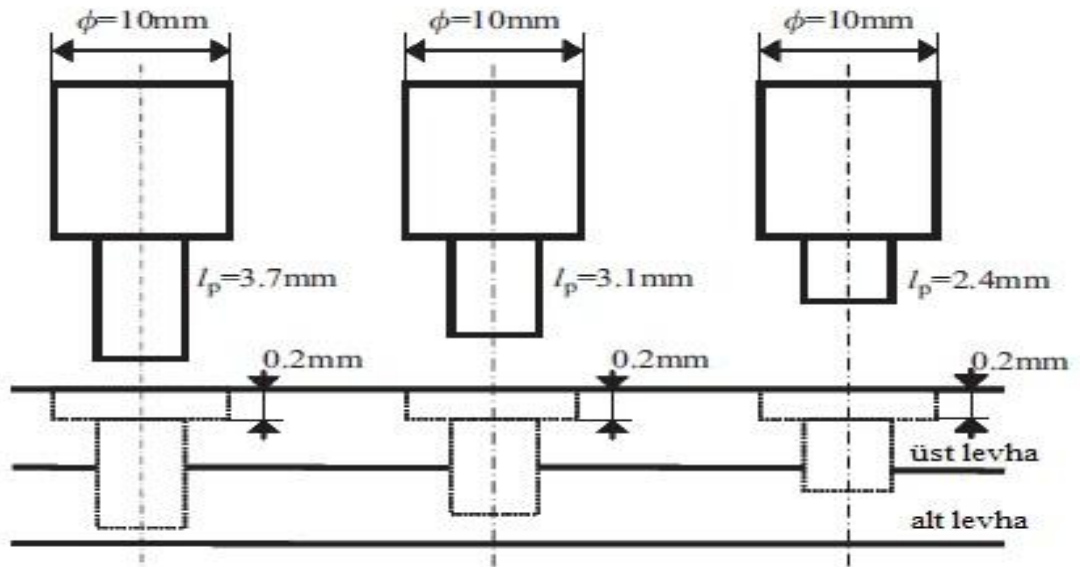


Şekil 4.8. Anahtar deliği oluşumunun yeniden doldurma işlemi ile önlenişinin şematik gösterimi [15]



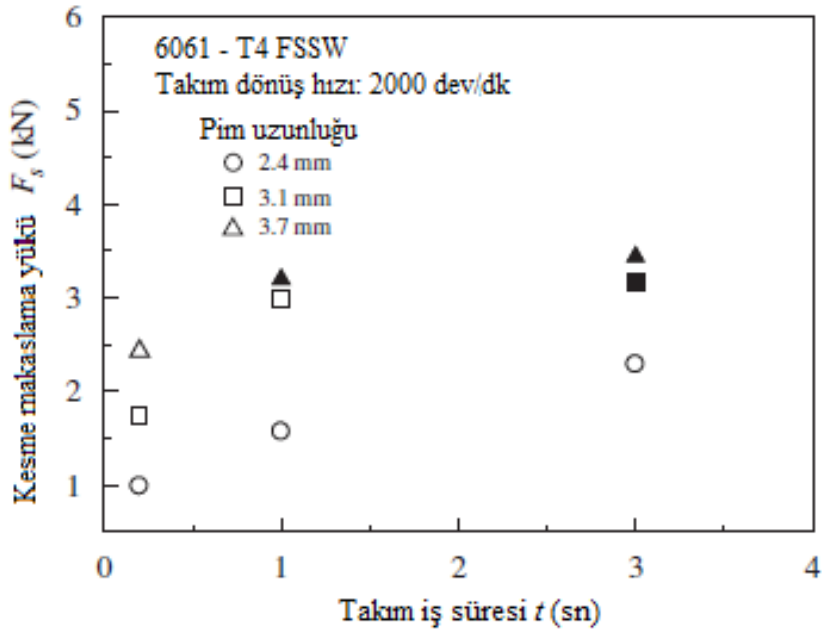
Resim 4.5. FSSW birleşmesinde yeniden doldurulan pim boşluğuna ait makroskopik görüntü: (a) kaynak bölgesinin üstten görünüşü, (b) kaynak bölgesinin kesit görünüşü [15]

Takım pim uzunluğu ve çapının da mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Buna göre birleştirilecek malzemenin kalınlığına göre de bu ölçülerin optimize edilmesi gerekmektedir. Şekil 4.9.'da farklı pim boylarına sahip takımlar görülmektedir.



Şekil 4.9. Farklı pim boylarına sahip silindirik geometrili takımlar görülmektedir [12]

Yapılan çalışma sonunda pim boyu uzatıldıkça kesme makaslama yük değerinin arttığı görülmüştür [12]. Şekil 4.10.' da farklı pim boylarına ait kesme makaslama yük değerleri görülmektedir.

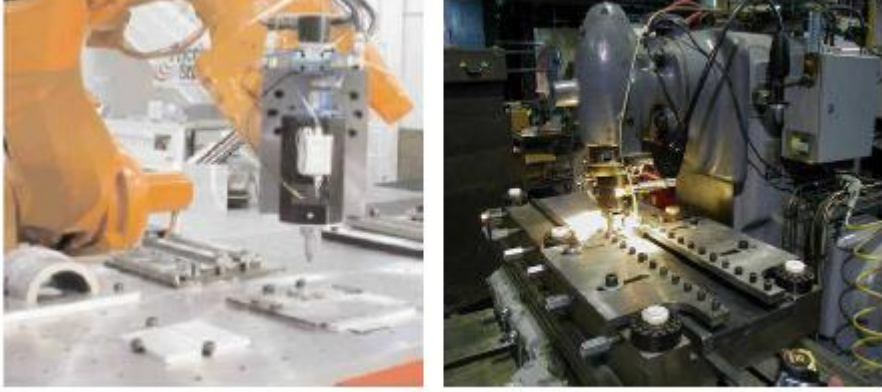


Şekil 4.10. Farklı pim boylarına ait kesme makaslama yük değerleri [12]

#### 4.2.3. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı makineleri

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı bu çalışmada olduğu gibi yarı otomatik freze tezgahlarında yapılabileceği gibi sadece FSSW yöntemi için geliştirilen tezgahlar ile de yapılmaktadır.

Düşük süre, düşük ekonomik maliyet ve hassasiyet istenen uygulamalarda ise özel tasarım tezgahlar ve özel donanımlı kaynak robotlarının kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.



Resim 4.6. Solda bir Amerikan kuruluşunca geliştirilen tezgah üstü kaynak işlemleri yapabilen robotik FSSW makinesi, sağda tezgah FSSW uygulaması esnasında [21]



Resim 4.7. Bir Amerikan kuruluşunca geliştirilen C- çerçevesi robotik FSSW makinesi [21]

## 5. MALZEME SEÇİMİ VE KAYNAĞIN YAPILIŞI

### 5.1. Deney Malzemesi

Bu çalışmada deney malzemesi olarak 3mm kalınlığında Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2’ de kimyasal kompozisyonu verilen Al 6061 ve Al 7075 alüminyum levhalar kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. Al 6061 alaşımının kimyasal kompozisyonu

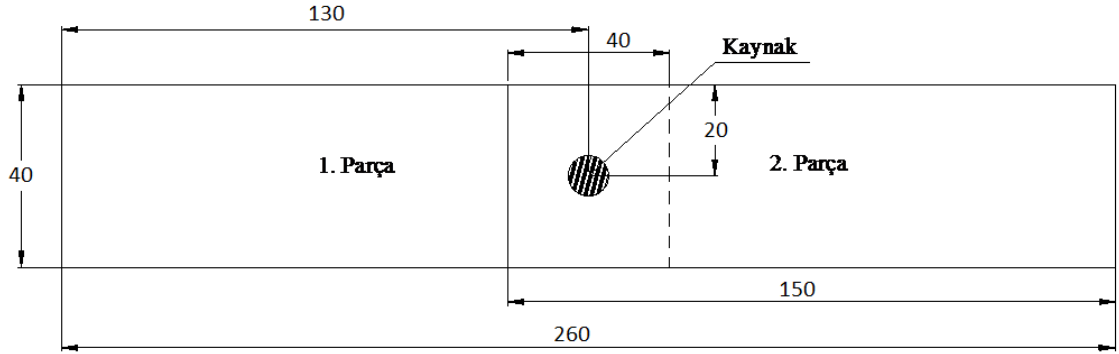
Al 6061(ISO AlMg1SiCu )								
Kimyasal Kompozisyon (%)								
Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
95.8 - 98.6	0.04 - 0.35	0.15 - 0.4	0.7	0.8 - 1.2	0.15	0.4 - 0.8	0.15	0.25

Çizelge 5.2. Al 7075 alaşımının kimyasal kompozisyonu

Al7075 (ISO AlZn5.5MgCu)								
Kimyasal Kompozisyon (%)								
Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
87.1 - 91.4	0.18 - 0.28	1.2 - 2	0.5	2.1 - 2.9	0.3	0.4	0.2	5.1 - 6.1

### 5.2. Deney Parçalarının Boyutları

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilecek numunelerin boyutları ve konumları 40 mm x 150 mm’ lik levhaların 40 mm x 40 mm bindirme pozisyonunda birleştirilmesi ile elde edilmiştir. Bu levhaların boyutları JIS Z3136 Japon Endüstriyel Standardına göre saptanmıştır. Kaynak edilecek parçaların boyutları Şekil 5.1.’ de verilmiştir.

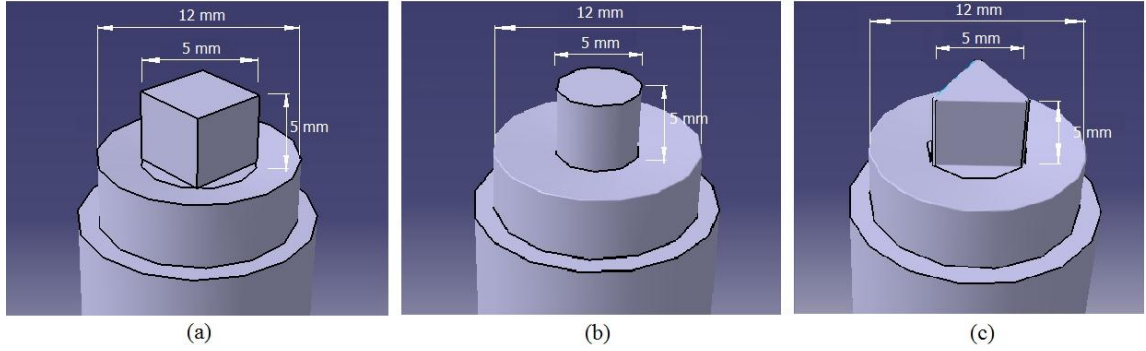


Şekil 5.1. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı için hazırlanan deney numunelerinin şematik gösterimi

### 5.3. Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı Yönteminde Kullanılan Takım Malzemesi Ve Takım Geometrisi

Bu çalışmada kullanılan takımlar 2714 sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiştir. Isıl işlem uygulamasından sonra takımlara 52 HRC sertlik kazandırılmıştır. Takım geometrileri için literatür çalışmalarında kullanılarak, başarılı sonuçlar elde edilen kare, silindir ve üçgen pin geometrilerine sahip üç takım geometrisi tercih edilmiştir. 3 mm kalınlıktaki malzemeler üzerinde uygulanmış çalışma bulunmaması nedeniyle bu çalışmadaki her biri 3 mm kalınlıktaki iki levhayı birleştirecek nitelikteki uç geometrisi hedeflenerek uç geometrilerinin tasarımı optimize edilmiştir.

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulamalarında önemli bir işleve sahip olduğu görülen omuz yapısı, yine literatür çalışmalarından yararlanılarak daha iyi mekanik özellikler elde edilmesini sağlayan konkav omuz geometrisi olacak şekilde takımlara kazandırılmıştır. Şekil 5.2’de takım geometrileri görülmektedir.



Şekil 5.2. Tüm birleştirmelerin yapımında kullanılan takımlar ve takımlara ait omuz ve pim geometrilerinin şematik gösterimi (a) kare geometrili pim, (b) silindir geometrili pim, (c) çgen geometrili pim

## 5.4. Kaynak İşlemlerinin Yapılışı

### 5.4.1. Deney numunelerinin hazırlanma esasları

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilecek numunelerin boyutları ve konumları 40 mm x 150 mm' lik levhaların 40 mm x 40 mm bindirme pozisyonunda birleştirilmesi ile elde edilmiştir. Bu levhaların boyutları JIS Z3136 Japon Endüstriyel Standardına göre saptanmıştır.

### 5.4.2. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminde kullanılan kaynak parametreleri

3mm kalınlıktaki Al 6061, Al7075 ve Al 6061-Al 7075 levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynaklı birleştirilmelerinde 10 sn işlem süresi, 4500 dev/dak takım dönüş hızı, konkav geometrili omuz yapısı, 12 mm omuz çapı, 5 mm dairesel pim çapı, 5mm pim boyu sabit parametreleri ve silindirik pim geometrili takım, kare pim geometrili takım ve üçgen pim geometrili takım değişken parametreleri kullanılmıştır.

### 5.4.3. Sürtünme karıştırma nokta kaynağı yönteminin uygulanması

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulamaları yarı otomatik freze tezgâhında gerçekleştirilmiştir. Her üç farklı kaynak grubunun FSSW ile birleştirilebilmesi için, üç takım için de aynı işlemler tekrar edilmiştir.

Levhaların sabitlenme işlemi için ayarlanabilir hızlı bağlama elemanlarından yararlanılmıştır. Ayrıca levhaların takımın dairesel hareketi ile savrulmaması ve her numuneye ayrı markalama yapılmaması için basit bir kalıp hazırlanarak pabuçlar ile tezgâhın tablasına sabitlenmiştir. Uygulanan FSSW işlem sırası şöyledir:

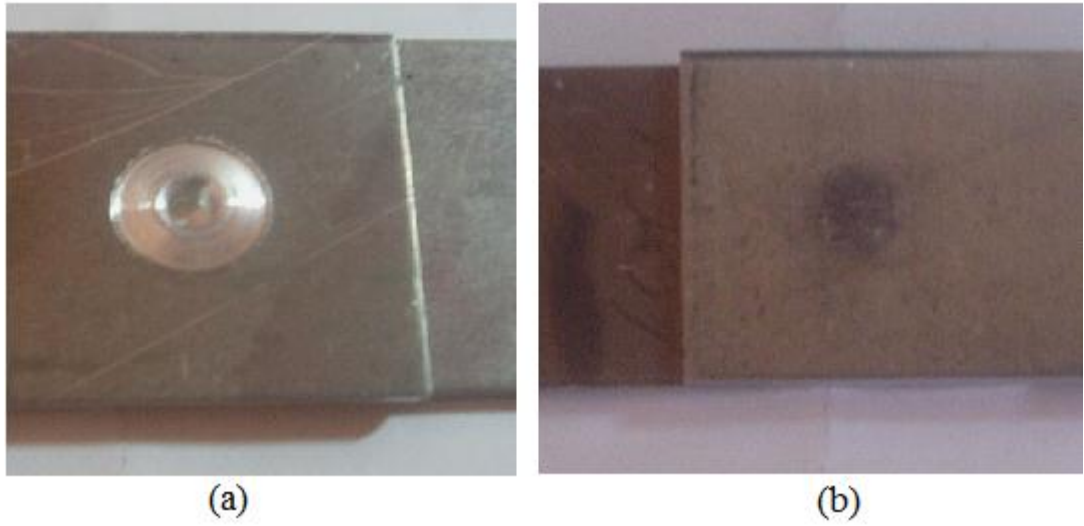
1. Levhalar kalıba yerleştirildikten sonra hızlı bağlama elemanı ile sabitlenir.
2. Takım, iş parçalarının yaklaşık 2 mm üzerine getirildikten sonra tezgâh çalıştırılır.
3. 4500 dev/dak hızla döndürülen takımın pimi üstteki levhaya sürtülerek ısı üretimi sağlanır daha sonra takım belirlenen ölçüde her iki malzemeye de daldırılır.
4. Takım belirlenen ölçüde tamamen daldırıldığında yaklaşık 3-4 sn bekletilir ve ardından yavaşça aynı ekseninde uzaklaştırılarak kaynak işlemi sonlandırılır.
5. Kaynaklı levhalar kalıptan sökülerek oda sıcaklığında soğumaya bırakılır.

Resim 5.1. de FSSW ile birleştirilmiş numuneler görülmektedir.





Resim 5.1. FSSW ile birleştirilmiş numuneler



Resim 5.2. FSSW ile birleştirilmiş numuneler ait alt ve üst görüntüleri, (a) üst görüntü (b) alt görüntü

Alt ve üst iş parçası olacak malzemelerin belirlenmesi

Aynı malzemeden elde edilen levhaların FSSW ile birleştirilebilirliklerinin aksine

farklı iki malzemenin birleştirilmesi sırasında alttaki ve üstteki iş parçalarının konumlarına ısı iletkenliği ve sertlik değerlerine bakılarak karar verilmiştir.

Isı girdisinin alttaki iş parçasına daha iyi iletilebilmesi için ısısal iletkenlik değeri 0,40 Cal/cmS°C ile Al 7075 malzemeye ait olan 0,29 Cal/cmS°C değerinden daha yüksek olan Al 6061 levhalar üst iş parçası olarak seçilmişlerdir.

Ayrıca Al 6061'in sertlik değerinin Al 7075'e ait sertlik değerinden düşük olması da bir başka olumlu nedendir, çünkü işlem sırasında takımın daha rahat malzemeye daldırılabilmesi takım ömrünü uzatacaktır ayrıca işlem süresini de kısaltarak zaman ve maliyet tasarrufu sağlayacağı öngörülmektedir.

FSSW işlemi sırasında üst iş parçası daha fazla karıştırılan ve dolayısı ile havadaki oksijen ile daha fazla temas halinde bulunan madde miktarına sahiptir. Bu nedenle korozyon direnci Al 7075 malzemeye ait korozyon direncinden daha yüksek olan Al 6061'in üst iş parçası olarak seçilmesi ile diğer olasılığa nispeten daha yüksek korozyon direncine sahip bir birleştirme noktasının elde edileceği öngörülmüştür.

## **5.5. Mekanik Deneylerin Yapılışı**

### **5.5.1. Çekme deneyleri**

Çekme testleri Resim 4.3.' de görülen Instron 8503 model 500 kN çekme ve basma kapasitesine sahip universal test cihazında oda sıcaklığında yapılmıştır.



Resim 5.3. Instron 8503 model 500 kN çekme ve basma kapasitesine sahip universal test cihazı

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulamalarında her üç pim geometrisine sahip takımla her üç malzeme işlem grubu için sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmiş numunelere ait kaynak bağlantılarının mukavemet değerlerindeki değişimi gösteren kesme makaslama yükü sonuçları Çizelge 5.3., Çizelge 5.4., Çizelge5.5., Çizelge 5.6., Çizelge 5.7, Çizelge 5.8., Çizelge5.9., Çizelge5.10., Çizelge5.11.,’ da gösterilmiştir. Bu çizelgeler ve Şekil 5.3, Şekil 5.4. ve Şekil 5.5. incelendiğinde kesme makaslama yük değerlerinin büyükten küçüğe sıralaması silindirik profil ile yapılan birleştirmeler, kare profil ile yapılan birleştirmeler ve üçgen profil ile yapılan birleştirmeler olarak görülmüştür. Pim profillerine göre elde edilen kesme makaslama yük değişimlerinin malzeme türü değişse bile yük değişimi sıralamasının değişmediği görülmüştür.

Çizelge 5.3. Al 6061 ve Al 6061 malzemelerin silindirik pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi

Malzeme	Kesme Makaslama Yüğü (N)	Ortalama Kesme Makaslama Yüğü (N)
Al 6061- Al 6061 / 1	3672,42	3958,137
Al 6061- Al 6061 / 2	4669,4	
Al 6061- Al 6061/ 3	3562,626	
Al 6061- Al 6061 / 4	4226,438	
Al 6061- Al 6061 / 5	3659,8	

Çizelge 5.4. Al 6061 ve Al 6061 levhaların kare pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi.

Malzeme	Kesme Makaslama Yüğü (N)	Ortalama Kesme Makaslama Yüğü (N)
Al 6061- Al 6061 / 1	3018,704	3420,72
Al 6061- Al 6061 / 2	3248,388	
Al 6061- Al 6061 / 3	3777,166	
Al 6061- Al 6061 / 4	3050,254	
Al 6061- Al 6061 / 5	4006,85	

Çizelge 5.5. Al 6061 ve Al 6061 levhaların üçgen pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi.

Malzeme	Kesme Makaslama Yüğü (N)	Ortalama Kesme Makaslama Yüğü (N)
Al 6061- Al 6061 / 1	879,614	1600,973
Al 6061- Al 6061 / 2	2233,74	
Al 6061- Al 6061 / 3	837,968	
Al 6061- Al 6061 / 4	1140,848	
Al 6061- Al 6061 / 5	2912,696	

Çizelge 5.6. Al 7075 ve Al 7075 levhaların silindirik pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi.

Malzeme	Kesme Makaslama Yüğü (N)	Ortalama Kesme Makaslama Yüğü (N)
Al 7075- Al 7075 / 1	3885,698	4043,448
Al 7075- Al 7075 / 2	4159,552	
Al 7075- Al 7075 / 3	4656,78	
Al 7075- Al 7075 / 4	3773,38	
Al 7075- Al 7075 / 5	3741,83	

Çizelge 5.7. Al 7075 ve Al 7075 levhaların kare pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi.

Malzeme	Kesme Makaslama Yüğü (N)	Ortalama Kesme Makaslama Yüğü (N)
Al 7075- Al 7075 / 1	4333,708	3709,2704
Al 7075- Al 7075 / 2	3507,098	
Al 7075- Al 7075 / 3	3555,054	
Al 7075- Al 7075 / 4	3250,912	
Al 7075- Al 7075 / 5	3899,58	

Çizelge 5.8. Al 7075 ve Al 7075 levhaların üçgen pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi.

Malzeme	Kesme Makaslama Yüğü (N)	Ortalama Kesme Makaslama Yüğü (N)
Al 7075- Al 7075 / 1	1893	2096,4344
Al 7075- Al 7075 / 2	2219,858	
Al 7075- Al 7075 / 3	1853,878	
Al 7075- Al 7075 / 4	2168,116	
Al 7075- Al 7075 / 5	2347,32	

Çizelge 5.9. Al 6061 ve Al 7075 levhaların silindir pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi.

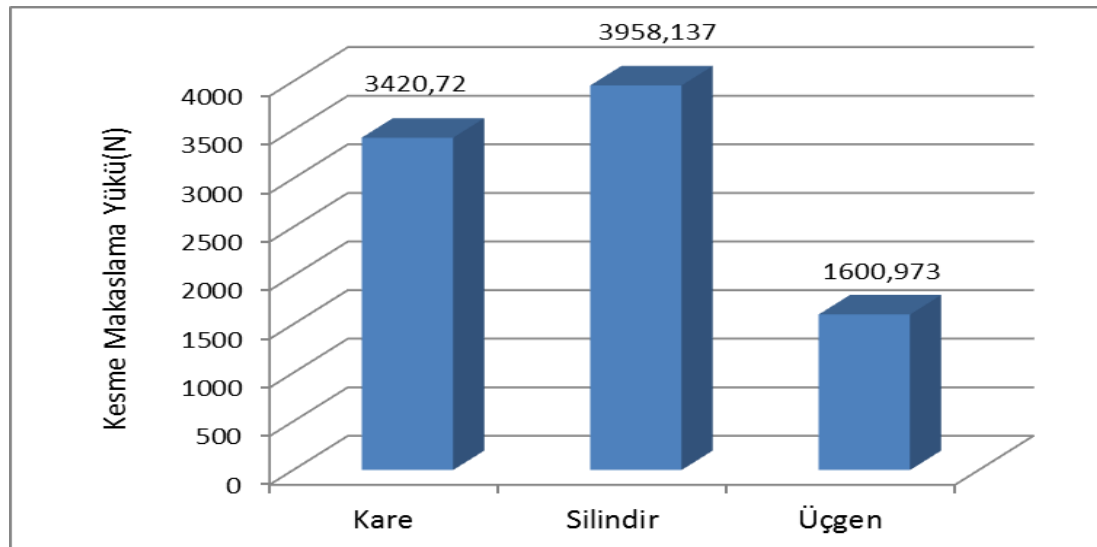
Malzeme	Kesme Makaslama Yüğü (N)	Ortalama Kesme Makaslama Yüğü (N)
Al 6061- Al 7075 / 1	3781,059	4001,3924
Al 6061- Al 7075 / 2	4414,476	
Al 6061- Al 7075 / 3	4110,703	
Al 6061- Al 7075 / 4	3999,909	
Al 6061- Al 7075 / 5	3700,815	

Çizelge 5.10. Al 6061 ve Al 7075 levhaların kare pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi.

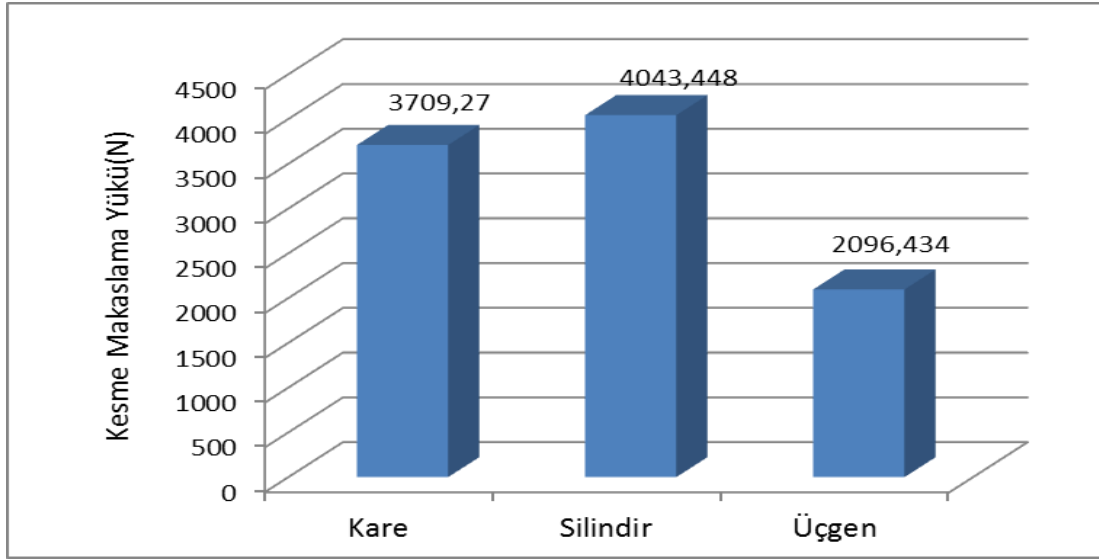
Malzeme	Kesme Makaslama Yüğü (N)	Ortalama Kesme Makaslama Yüğü (N)
Al 6061 - Al 7075 / 1	3679,206	3565,1714
Al 6061 - Al 7075 / 2	3374,743	
Al 6061 - Al 7075 / 3	3666,11	
Al 6061 - Al 7075 / 4	3150,583	
Al 6061 - Al 7075 / 5	3955,215	

Çizelge 5.11. Al 6061 ve Al 7075 levhaların üçgen pimli takım ile yapılan sürtünme karıştırma nokta kaynağına ait kesme makaslama yük değişimi.

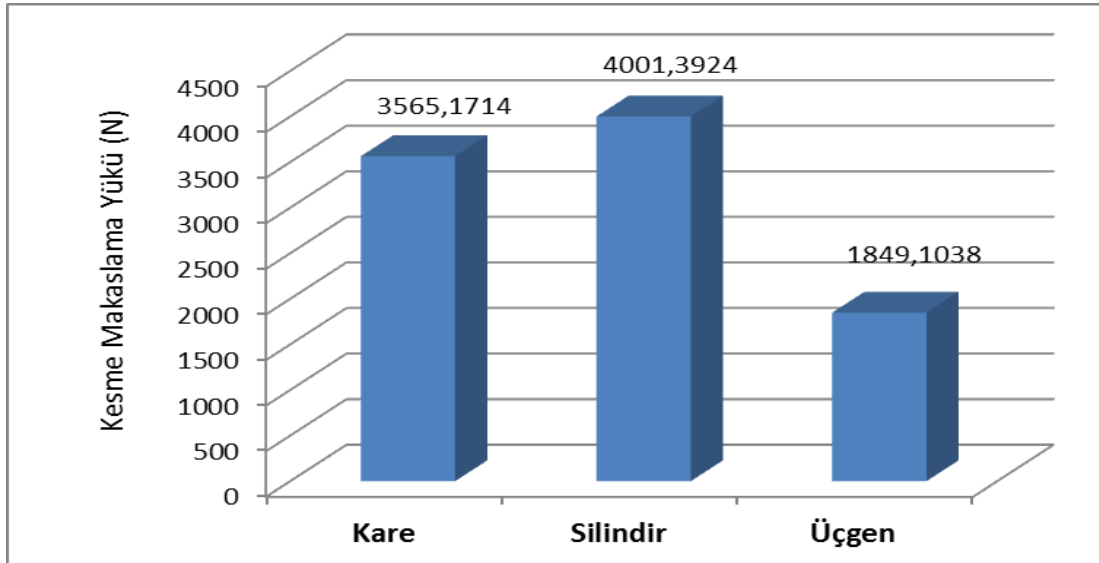
Malzeme	Kesme Makaslama Yüğü (N)	Ortalama Kesme Makaslama Yüğü (N)
Al 6061 - Al 7075 / 1	1390,307	1849,1038
Al 6061 - Al 7075 / 2	2226,799	
Al 6061 - Al 7075 / 3	1343,923	
Al 6061 - Al 7075 / 4	1654,482	
Al 6061 - Al 7075 / 5	2630,008	



Şekil 5.3. Kullanılan takım profiline göre Al 6061 numunelerinden elde edilen ortalama kesme makaslama yük değerleri (N)



Şekil 5.4. Kullanılan takım profiline göre Al 7075 numunelerinden elde edilen ortalama kesme makaslama yük değerleri (N)



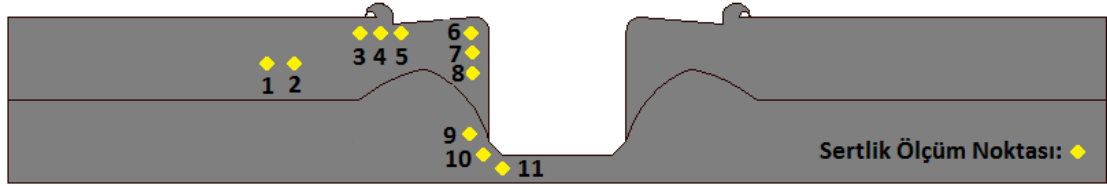
Şekil 5.5. Kullanılan takım profiline göre Al 6061 ve Al 7075 numunelerinden edilen ortalama kesme makaslama yük değerleri (N)

### 5.5.2. Mikrosertlik inceleme deneyleri

Zımparalama ve elektro-parlatma ile metalografi deneyleri için hazır hale getirilen numunelere ait sertlik değerlerinin elde edilebilmesi için vickers sertlik ölçümleri gerçekleştirildi. Mikro-sertlik ölçümleri Resim 5.4.' de görülen Shimadzu HMV 2



model mikro-sertlik ölçme cihazında 1 kgf yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri esas metalden başlanılarak, sırasıyla termomekanik etkilenmiş bölge ve ardından ısıdan etkilenmiş bölgelerde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.6.' de sertlik ölçümlerinin yapıldığı noktalar görülmektedir.



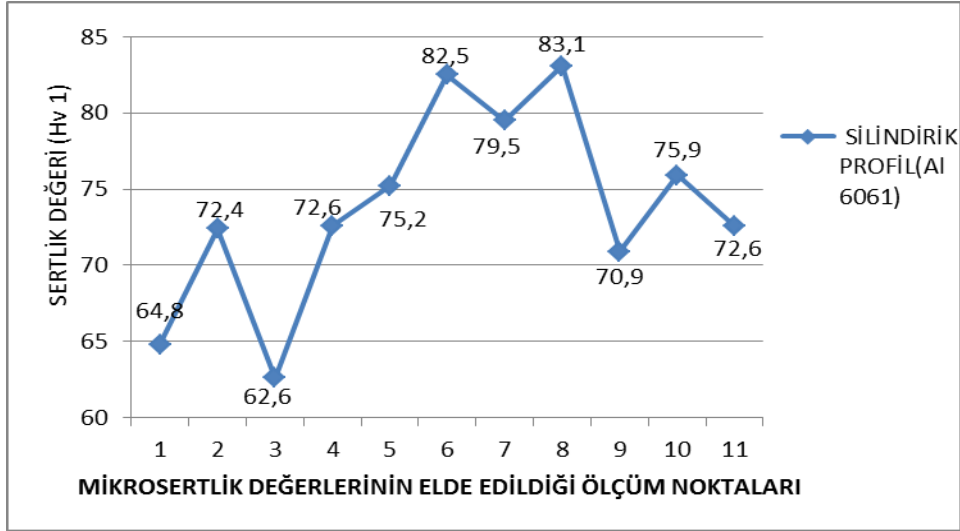
Şekil 5.6. Mikrosertlik ölçümlerinin elde edildiği noktaların kaynak numunesi üzerinde şematik gösterimi



Resim 5.4. Shimadzu HMV2 Mikrosertlik cihazı

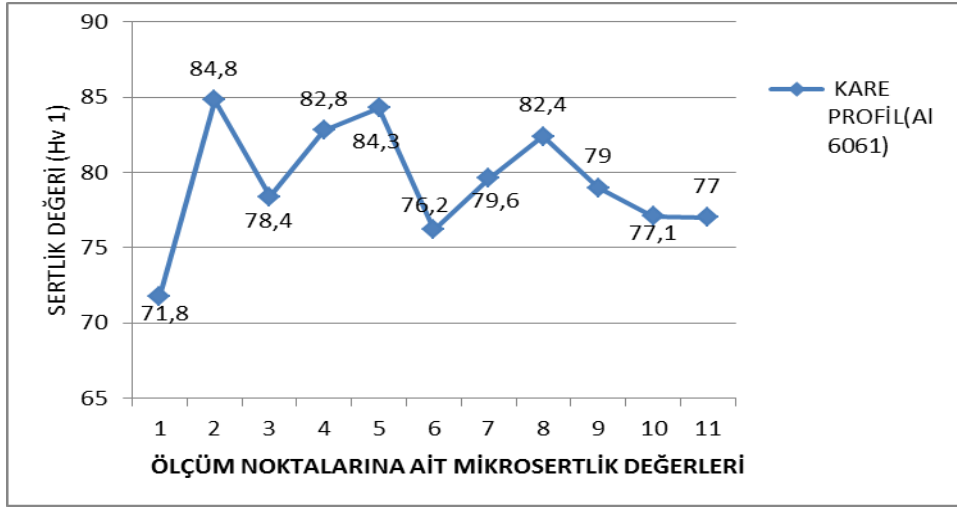
Silindirik pimli takım ile gerçekleştirilen sürtüne karıştırma nokta kaynaklı

numuneye ait sertlik değerlerinin özellikle termomekanik (TMEB) etkilenen bölgede yükseldiği görülmüştür.

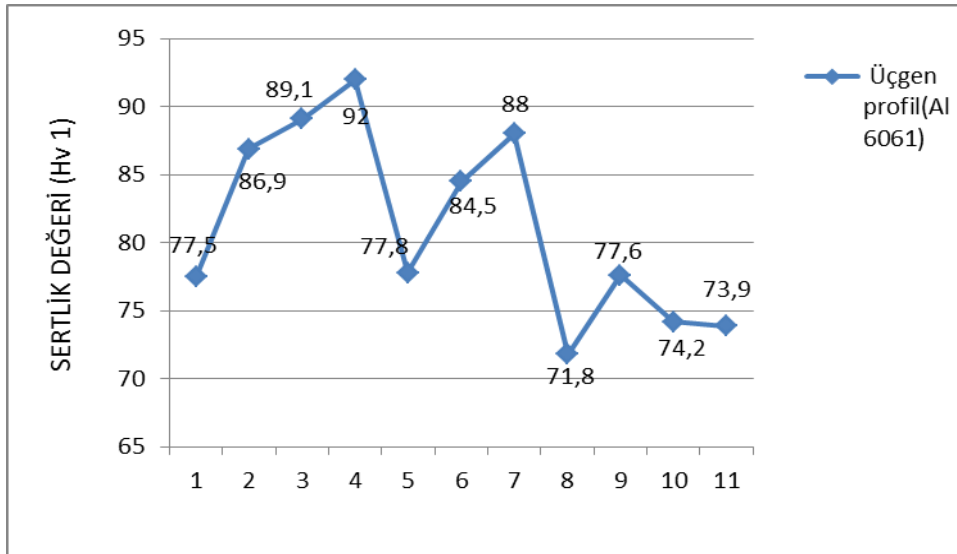


Şekil 5.7. Silindirik pimli takım ile sürtünme karıştırmaya nokta kaynağı (FSSW) yapılan Al 6061 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları

Kare pimli takım ile gerçekleştirilen sürtüne karıştırmaya nokta kaynaklı numuneye ait sertlik değerlerinin termomekanik (TMEB) etkilenen bölgede yükseldiği ancak yükselme oranının silindirik pimli takım ile gerçekleştirilen bağlantıya ait sertlik değişi oranından düşük olduğu görülmüştür.

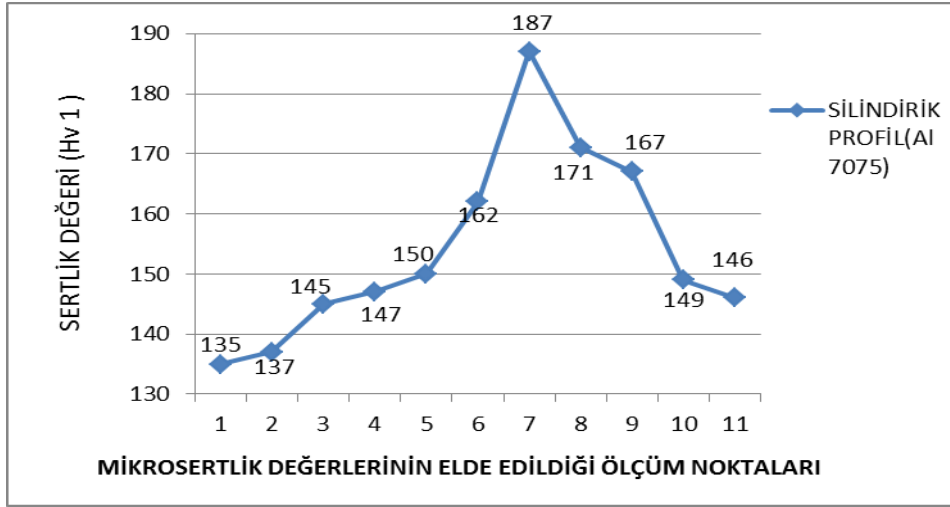


Şekil 5.8. Kare pimli takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yapılan Al 6061 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları



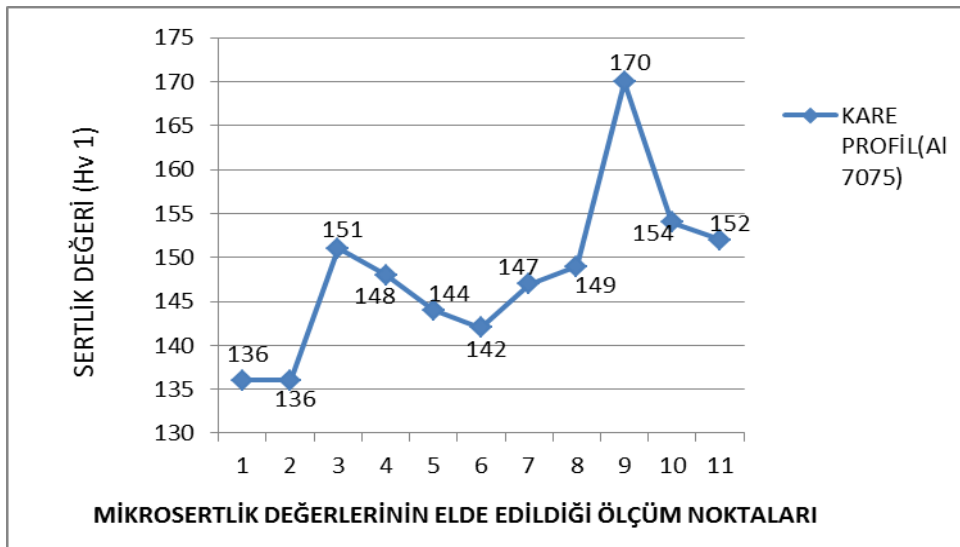
Şekil 5.9. Üçgen pimli takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) uygulanan Al 6061 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları

Silindirik pimli takım ile gerçekleştirilen sürtüne karıştırma nokta kaynaklı Al 7075 numunesine ait sertlik değerlerinin özellikle termomekanik (TMEB) etkilenen bölgede yükseldiği görülmüştür, elde edilen bu değerler diğer takımlar ile elde edilen sertlik değerlerinden daha yüksektir.



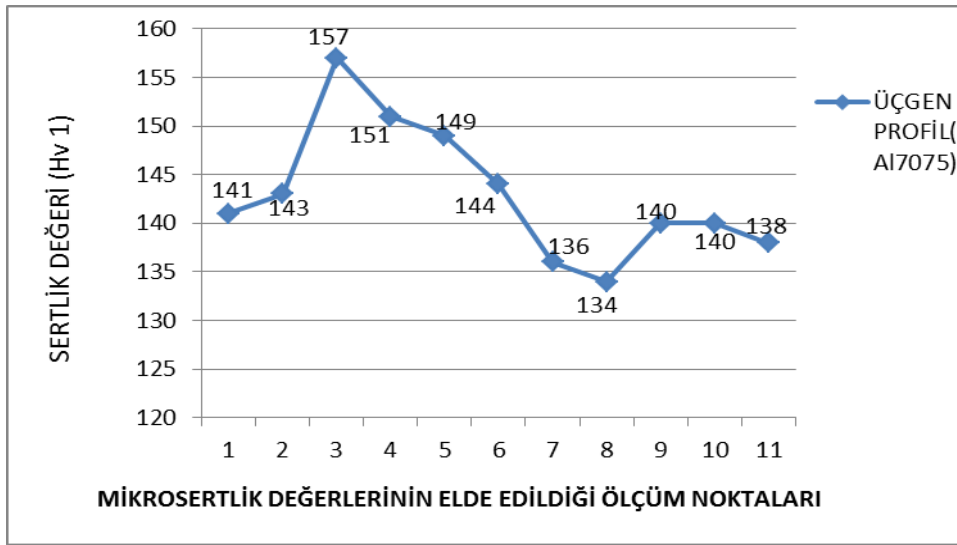
Şekil 5.10. Silindir pimli takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) uygulanan Al 7075 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları

Kare pimli takım ile gerçekleştirilen sürtüne karıştırma nokta kaynaklı Al 7075 numunesine ait sertlik değerlerinin artış miktarı silindir pimli takıma ile gerçekleştirilen sürtünme karıştırma nokta kaynaklı(FSSW) numuneye ait sertlik değerlerinden daha düşük iken üçgen pimli takım ile yapılan uygulama numunesine ait değerlerden daha yüksektir.



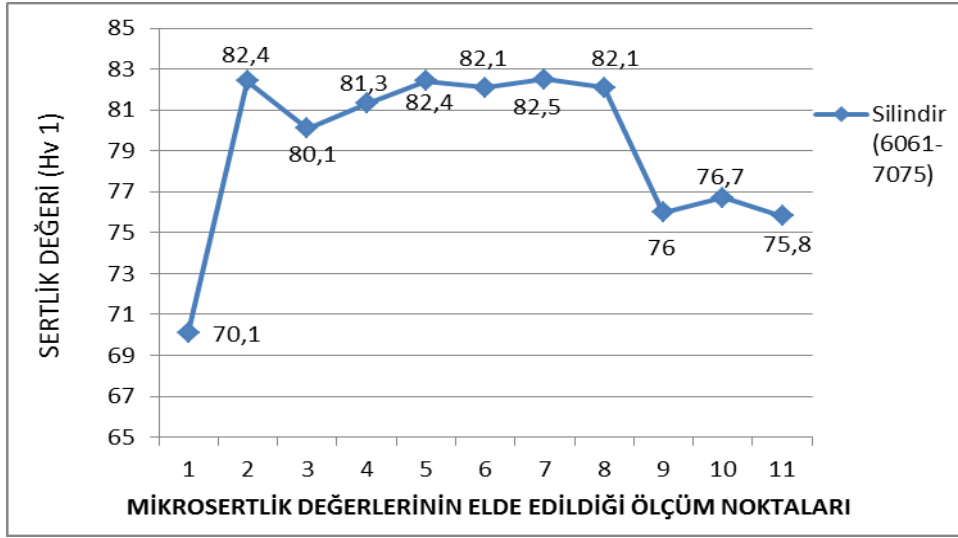
Şekil 5.11. Kare pimli takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) uygulanan Al 7075 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları

Üçgen pimli takım ile gerçekleştirilen sürtüne karıştırma nokta kaynaklı Al 7075 numunesine ait sertlik değerlerinin termomekanik (TMEB) etkilenen bölgede ve ısı tesiri altındaki bölgede ( ITAB) diğer numunelere nispeten çok düşük sertlik artış görülmüştür. Bu düşük artış üçgen pimli takım ile elde edilen kesme makaslama yük miktarının, silindirik ve kare pimli takımlarla elde edilen çekme makaslama yüklerinden neden daha düşük olduğunu açıklamaktadır.

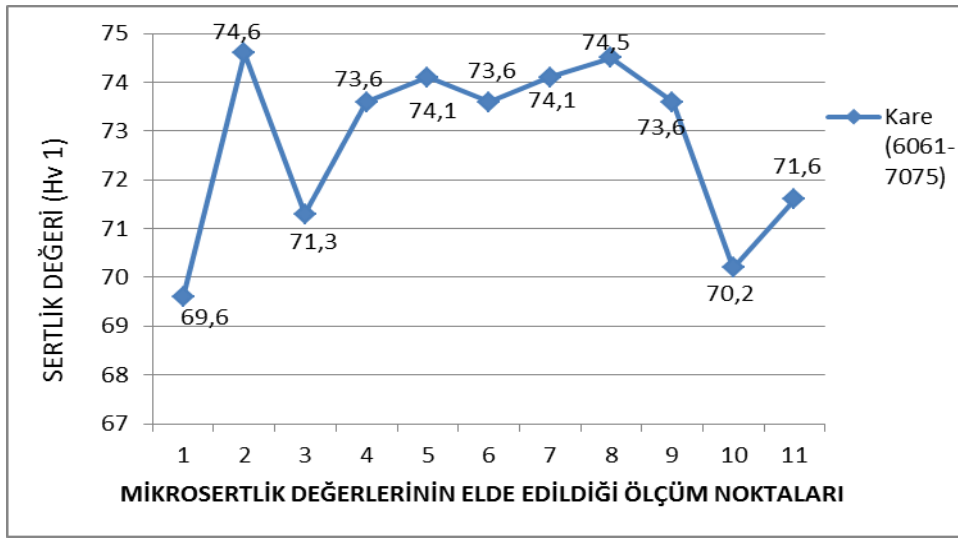


Şekil 5.12. Üçgen pimli takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) uygulanan Al 7075 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları

Diğer iki numune grubunda olduğu gibi en yüksek sertlik artışı silindir pimli takım ile gerçekleştirilen sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) bağlantısından elde edilmiştir.

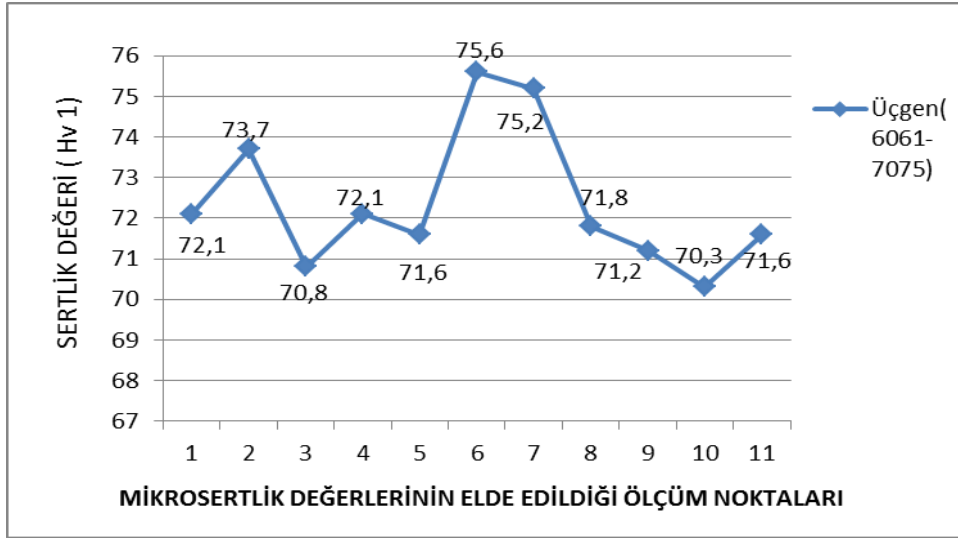


Şekil 5.13. Silindir pimli takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) uygulanan Al6061 ve Al 7075 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları



Şekil 5.14. Kare pimli takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) uygulanan Al6061 ve Al 7075 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları

Al 6061 ve Al 7075 grubu numunesine ait sertlik değerlerinin en düşük artışı gösterdiği takım üçgen pimli takım olmuştur.



Şekil 5.15. Üçgen pimli takım ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) uygulanan Al6061 ve Al 7075 levhaların mikrosertlik tarama sonuçları

Sertlik ölçümleri esas metalden başlanılarak, sırasıyla termomekanik etkilenmiş bölge ve ardından ısıdan etkilenmiş bölgelerde gerçekleştirilmiştir. 2 ve 3 numaralı grafiklerde sertlik ölçüm noktalarına göre Vickers(Hv) cinsinden sertlik değerleri görülmektedir. Bu değerlerden de anlaşılacağı üzere esas metale ait sertlik değerleri silindirik geometrili pin kullanılan sürtünme karıştırma kaynağı numunesinde kare geometrili pin kullanılan numuneye nispeten sertlik değerlerinin değişme oranı daha yüksektir. Bu sonuçlar ile çekme deneyi sonuçları arasında ilişki kurulduğunda silindirik geometrili takımda daha yüksek çekme makaslama yükü değeri elde edilmesi açıklanmaktadır.

### 5.5.3. Metalografik inceleme deneyleri

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelerden, incelenecek kaynaklı bölgeler kesilerek elde edildikten sonra yüzeyleri 400, 600, 800 ve 1200 numaralı SiC su zımparası ile zımparalanmıştır ve ardından elektro-parlatma yöntemi ile mikro yapı incelemelerine hazır hale getirilmişlerdir.

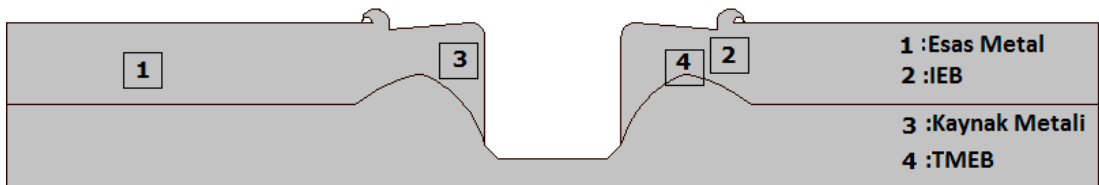
Kaynaklı bölgede kayna metali, termomekanik etkilenmiş bölge, esas metal ve ısı tesiri altında kalmış bölgelerden 25, 50, ve 100 büyütme mikroyapı resimleri

çekilmiştir. Tüm mikroyapıların görüntülenmesinde Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DM 4000 M marka optik mikroskop kullanılmıştır.



Resim 5.5. Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DM 4000 M marka optik mikroskop

Aynı numuneler üzerinde Şekil 5.16.' da gösterilen bölgelerden 250, 500, 1000 ve 2000 büyütmeli SEM görüntüleri elde edilerek incelenmiştir.



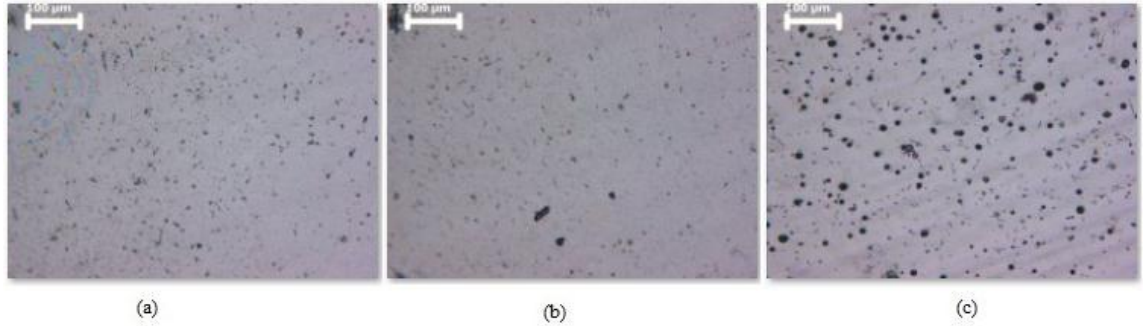
Şekil 5.16. Numuneler üzerinden mikroyapı görüntülerinin elde edildiği bölgelerin şematik gösterimi



### Mikroyapı incelemeleri

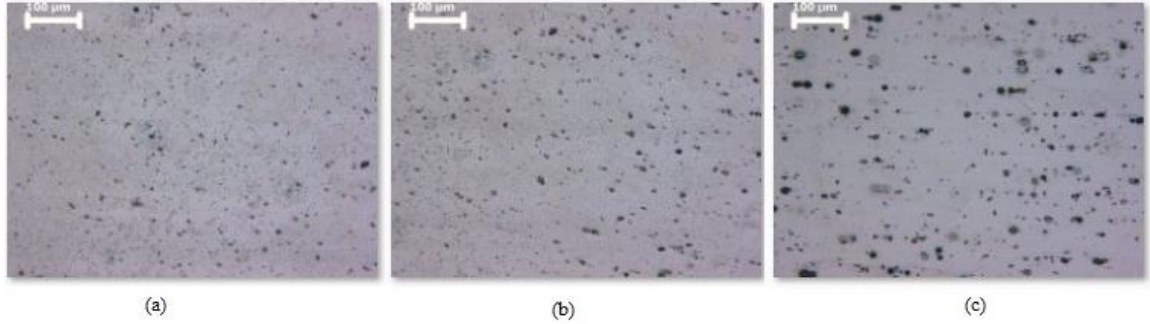
Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde kaynak metalinde gözenek yapısının küçüldüğü, TMEB’de gözenek yapısının esas metale göre küçük olduğu fakat kaynak metaline göre daha iri olduğu gözlenmiştir. Gözenek yapısının küçülerek sıklaşması mikrosertlik ve kesme makaslama yük değişimini arttırarak daha yüksek bir birleşme dayanımı meydana getirmiştir. Üç farklı takıma ait mikroyapı görüntüleri her üç malzeme grubunda da benzerlik göstermiştir.

Silindir pim profilinin kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilen Al 6061 levhaların mikroyapı görüntüleri incelendiğinde esas metale nispeten kaynak metali ve termomekanik etkilenen bölgede gözenek yapısının küçüldüğü görülmektedir. Bu durum elde edilen mikrosertlik değerlerindeki artışı açıklamaktadır.



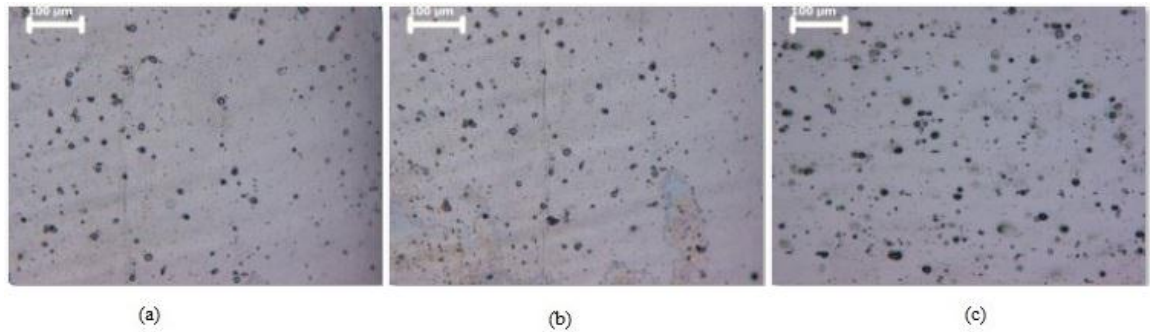
Resim 5.6. Silindir pim profilinin kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilen Al 6061 levhaların mikroyapı görüntüsü, (a) Kaynak metali (b) TMEB (c) Esas metal

Kare pim profilinin kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilen Al 6061 levhaların mikroyapı görüntüleri incelendiğinde esas metale nispeten kaynak metali ve termomekanik etkilenen bölgede gözenek yapısının küçüldüğü görülmektedir. Bu durum elde edilen mikrosertlik değerlerindeki artışı açıklamaktadır.

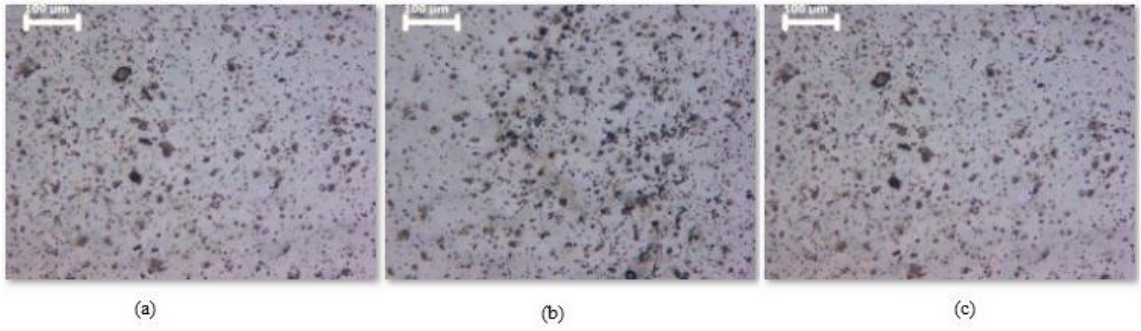


Resim 5.7. Kare pim profilinin kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı ( FSSW ) ile birleştirilen Al 6061 levhaların mikroyapı görüntüsü, (a) Kaynak metali (b) TMEB (c) Esas metal

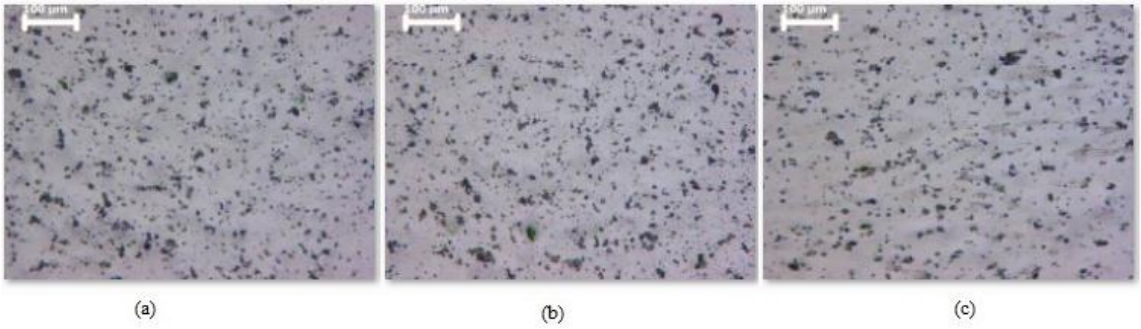
Üçgen pim profilinin kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilen Al 6061 levhaların mikroyapı görüntüleri incelendiğinde diğer iki takım ile elde edilen görüntülerden çok farklı olarak gözenek yapısının çok değişmediği ve diğer numunelere nispeten kaynak metali ve termomekanik etkilenen bölgede daha iri gözenek yapısının olduğu görülmüştür. Bu durum diğer iki takım ile elde edilen sertlik değerleri ve çekme makaslama yük değişimi değerlerinden daha düşük sertlik artış miktarı ve çekme makaslama yük değerlerini açıklamaktadır.



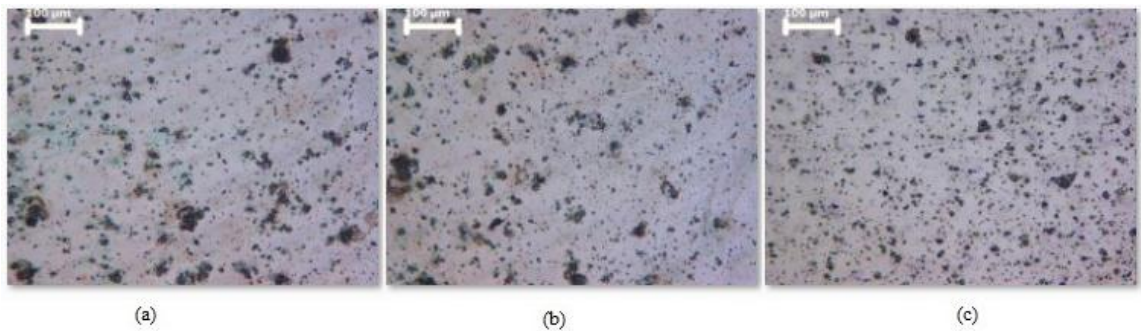
Resim 5.8 Üçgen pim profilinin kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı ( FSSW ) ile birleştirilen Al 6061 levhaların mikroyapı görüntüsü, (a) Kaynak metali (b) TMEB (c) Esas metal



Resim 5.9. Silindir pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 7075 levhaların mikroyapı görüntüsü, (a) Kaynak metali (b) TMEB (c) Esas metal

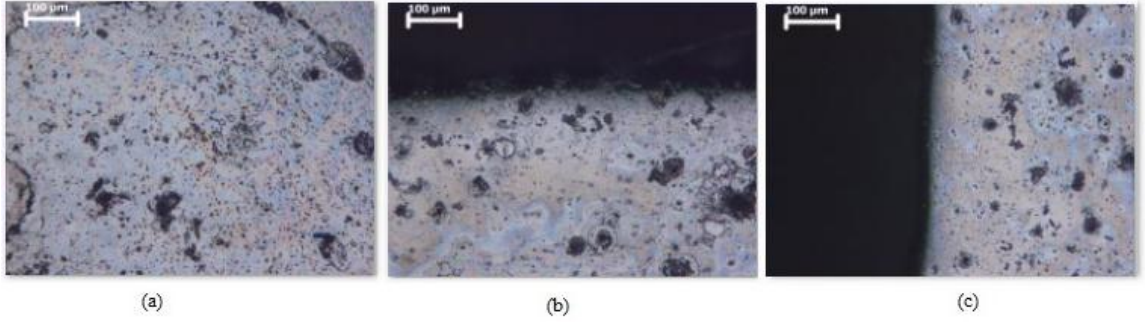


Resim 5.10. Kare pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 7075 levhaların mikroyapı görüntüsü, (a) Kaynak metali (b) TMEB (c) Esas metal

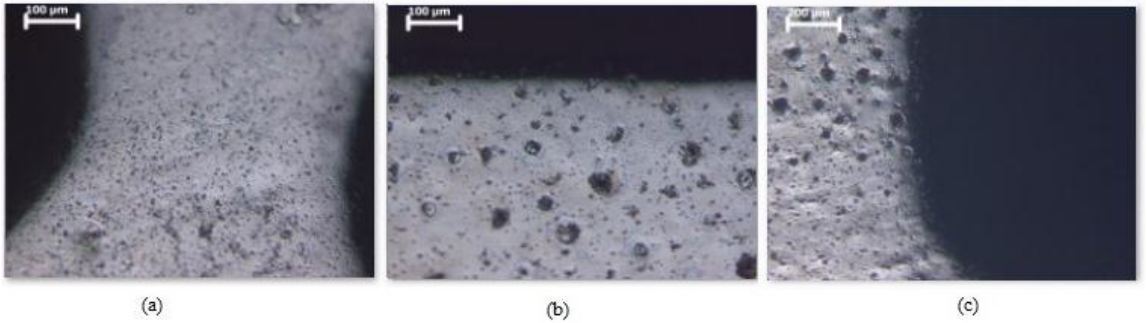


Resim 5.11. Üçgen pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 7075 levhaların mikroyapı görüntüsü (a) Kaynak metali (b) TMEB (c) Esas metal

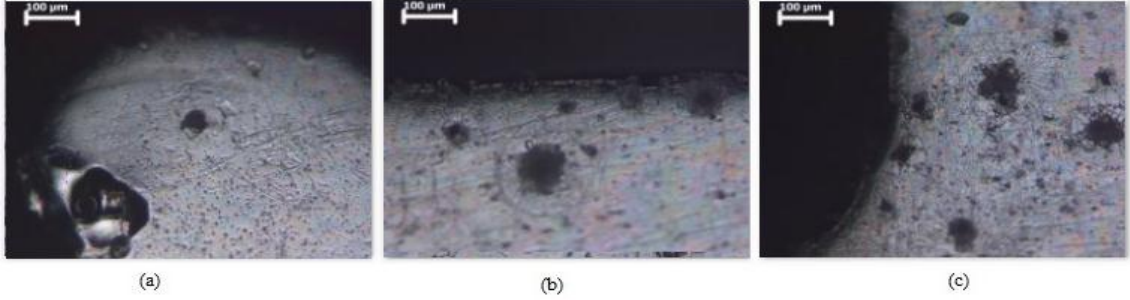
Silindir pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al6061 - Al 7075 levhaların kaynak metaline ait mikroyapı görüntüleri incelendiğinde fişkırın bölgede çok küçük gözenek yapısı görülmektedir.



Resim 5.12. Silindir pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al6061 - Al 7075 levhaların kaynak metaline ait mikroyapı görüntüleri (a) Kaynak metalini (Fişkırın bölge) (b) Kaynak metalini (alt bölge) (c) Kaynak metalini (yan bölge)



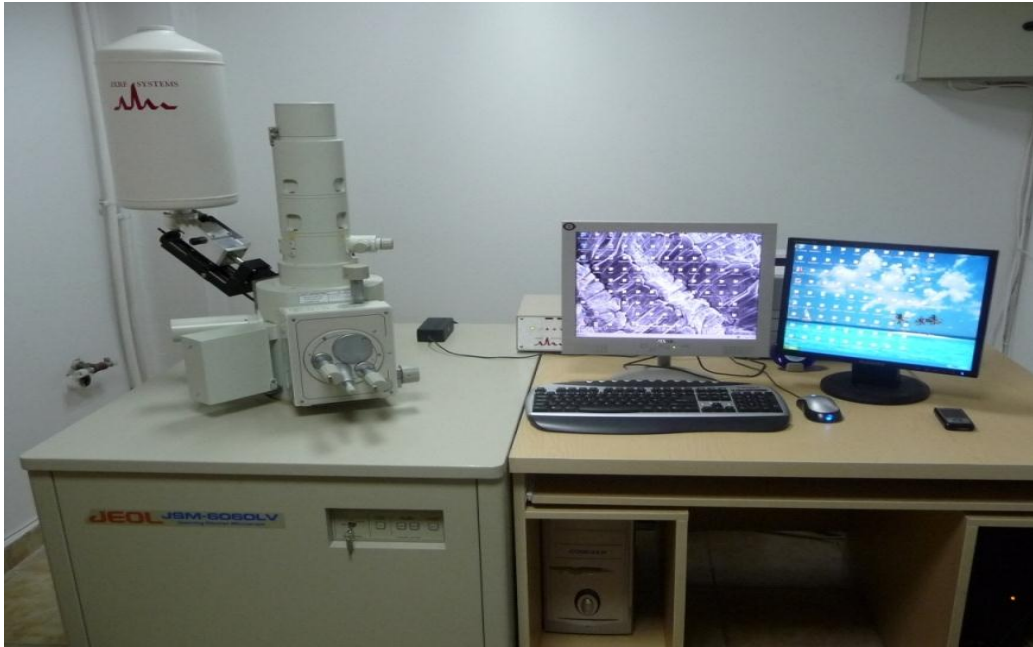
Resim 5.13. Kare pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al6061 - Al 7075 levhaların kaynak metaline ait mikroyapı görüntüleri (a) Kaynak metalini (Fişkırın bölge), (b) Kaynak metalini (alt bölge), (c) Kaynak metalini (yan bölge)



Resim 5.14. Üçgen pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al6061 - Al 7075 levhaların kaynak metaline ait mikroyapı görüntüleri (a) Kaynak metal(Fıskıran bölge), (b) Kaynak metal(alt bölge), (c) Kaynak metal(yan bölge)

### SEM incelemeleri

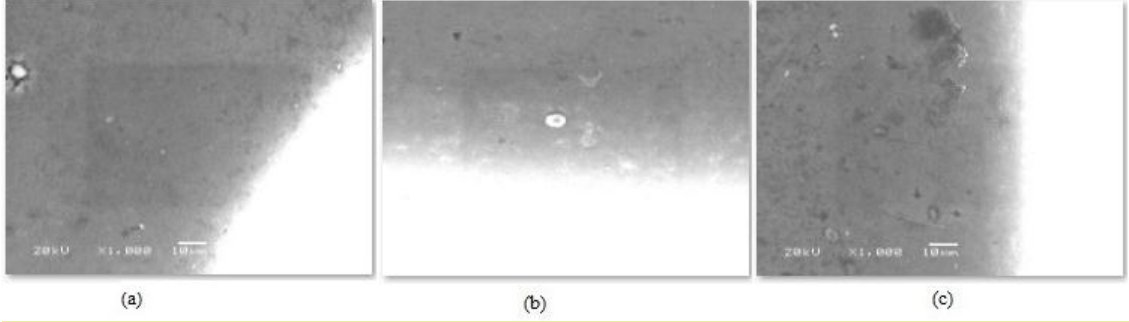
Numune kesit yüzeylerinin karakterizasyonunda Resim 5.15.'de görülen Jeol 6060 LV model tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Resim 5.15. Jeol 6060 LV model tarama elektron mikroskobu (SEM)

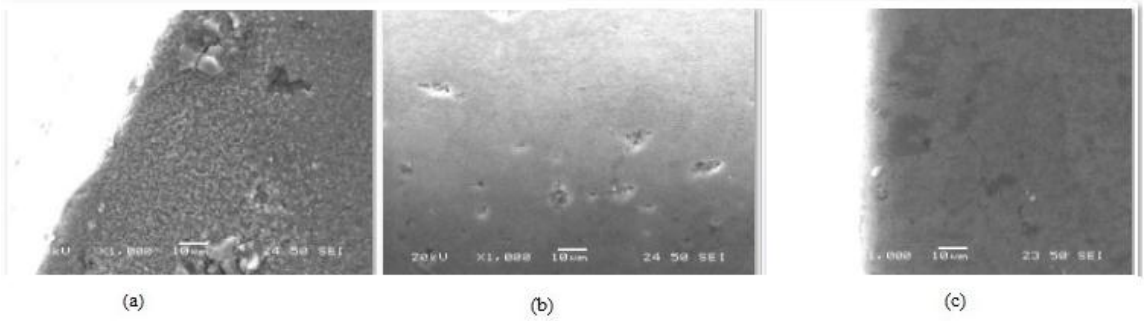
SEM görüntüleri, ITAB (ısı tesiri altındaki bölge), TMEB (termomekanik etkilenen bölge) ve kaynak metal bölgelerinden 250, 500, 1000 ve 2000 büyütmeyle elde

edilerek incelenmiştir. Elde edilen verilerin mikroyapı incelemeleri, çekme deneyleri ve mikrosertlik taramaları ile uyumlu olduğu görülmüştür.

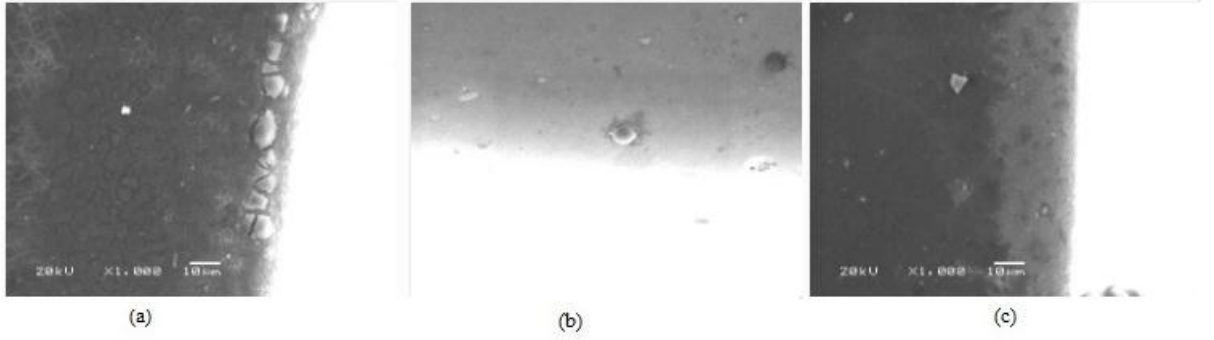


Resim 5.16. Silindir pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metali

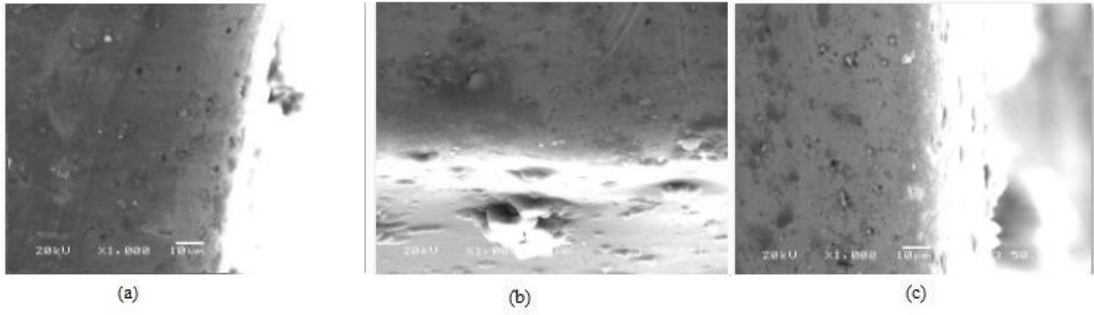
Resim 5.17.'de numune kesiti üzerindeki gözenekler görülmektedir.



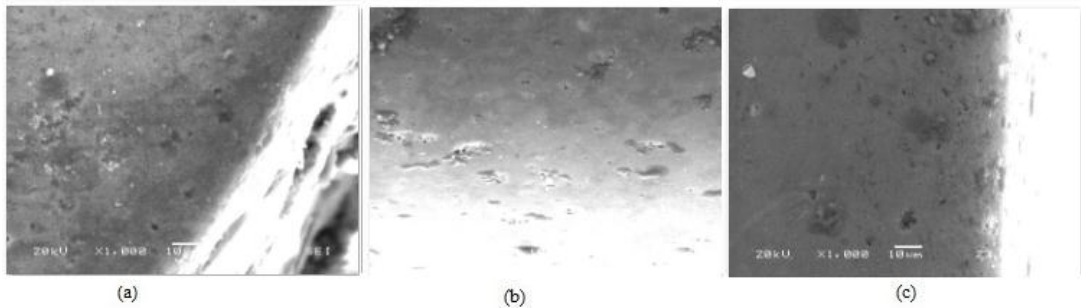
Resim 5.17. Kare pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metali



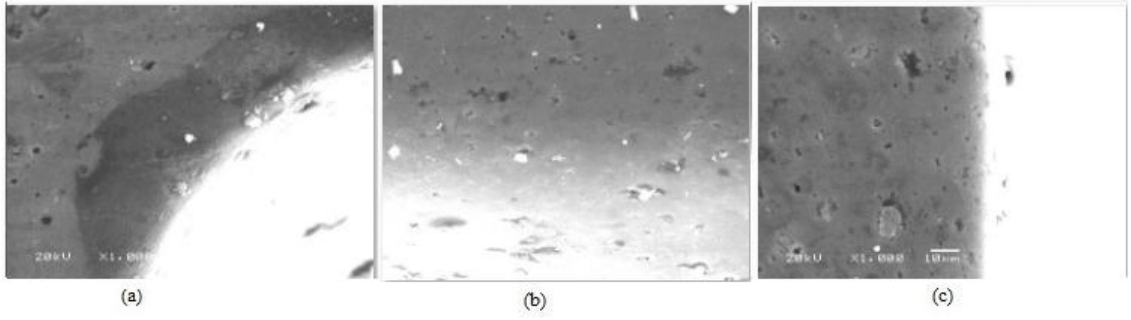
Resim 5.18. Üçgen pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metali



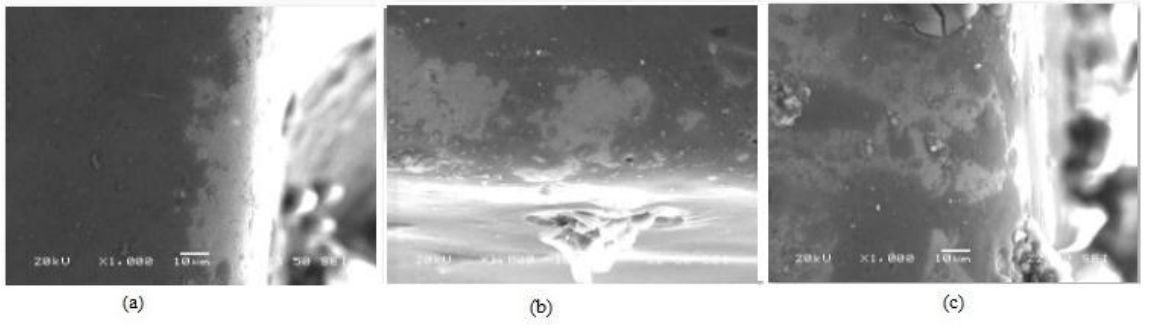
Resim 5.19. Silindir pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 7075 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metali



Resim 5.20. Kare pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 7075 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metali

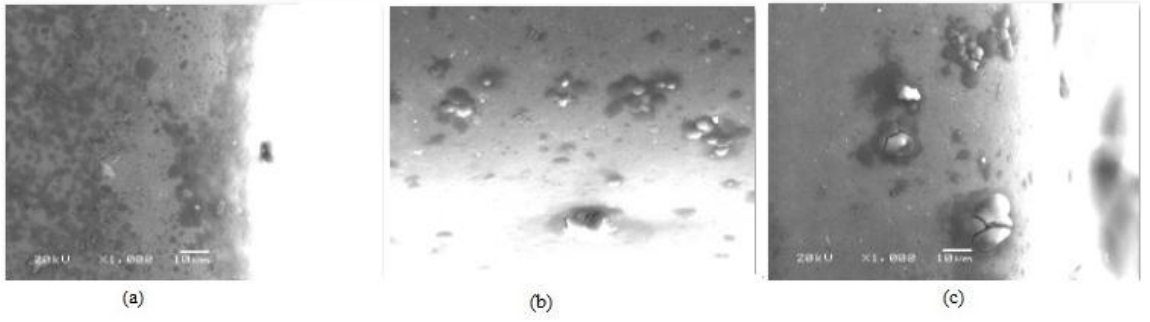


Resim 5.21. Üçgen pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 7075 levhaların 1000 büyütmeli SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metali

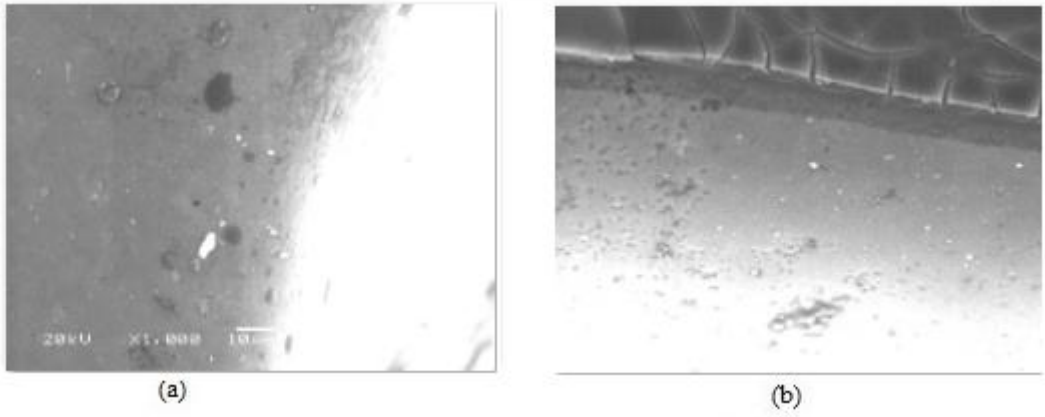


Resim 5.22. Silindir pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 - Al 7075 levhaların 1000 büyütmeli SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metali





Resim 5.23. Kare pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 - Al 7075 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)ITAB (b) TMEB (c) Kaynak metali



Resim 5.24. Üçgen pim profilinin kullanıldığı FSSW ile birleştirilen Al 6061 - Al 7075 levhaların 1000 büyütme SEM görüntüleri, (a)Kaynak metali (fişkiran bölge) (b)Kaynak metali (alt bölge)

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sürtünme karıştırma nokta kaynağını (FSSW) etkileyen önemli parametrelerden biri de takım geometrisidir.

Bu çalışmada, literatürden elde edilen verilere göre en çok tercih edilen üç farklı pim geometrisine sahip takımlar kullanılarak Al 6061 ve AL 7075 levhaların hem kendi aralarında hem de diğer malzeme ile sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilebilirlikleri araştırılmıştır.

Yapılan bu deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- 3mm kalınlıktaki Al 6061, Al7075 ve Al 6061-Al 7075 levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynaklı birleştirilmelerinde 10 sn işlem süresi, 4500 dev/dak takım dönüş hızı, konkav geometrili omuz yapısı, 12 mm omuz çapı, 5 mm dairesel pim çapı, 5mm pim boyu gibi sabit parametreler ile başarılı sonuçlar elde edilmiştir.
- Pimler üzerinde köşelere sahip olan kare ve üçgen geometrili pimli takımlar ile yapılan FSSW ile birleştirme işleminde takımın üstteki iş parçasına daldırılması sırasında frezelemenin yani talaş kaldırmanın meydana gelmesinden ötürü dayanımın azaldığı gözlenmiştir.
- İki farklı malzeme olan Al 6061 ve Al 7075 malzemelerin FSSW işlemi ile birleştirilmesi için üst iş parçası olarak Al 6061, alt iş parçası olarak da Al 7075 seçilmelidir.
- 52 Rockwell sertlikteki 2714 sıcak iş takım çeliği ile başarılı sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulamaları yapılmıştır.
- Al 6061 levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesinde en iyi mekanik ve metalografik özellikler silindirik pim geometrili takım ile elde edilmiştir.
- Al 6061 levhalar kare pim geometrili takım ile uygulanan sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile silindir pimli takımdan daha düşük, üçgen pimli takımdan ise daha iyi dayanım özellikleri ile birleştirilmiştir.
- Al 6061 levhalar üçgen pim geometrili takımı ile diğer iki takıma nispeten

daha düşük dayanım özelliklerine sahip olarak sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmiştir.

- Al 7075 levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesinde en iyi mekanik ve metalografik özellikler silindirik pim geometrili takım ile elde edilmiştir.
- Al 7075 levhalar kare pim geometrili takım ile uygulanan sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile silindir pimli takımdan daha düşük, üçgen pimli takımdan ise daha iyi dayanım özellikleri ile birleştirilmiştir.
- Al 7075 levhalar üçgen pim geometrili takımı ile diğer iki takıma nispeten daha düşük dayanım özelliklerine sahip olarak sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmiştir.
- Al 6061 ve Al 7075 levhaların sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmesinde en iyi mekanik ve metalografik özellikler silindirik pim geometrili takım ile elde edilmiştir.
- Al 6061 ve Al 7075 levhalar kare pim geometrili takım ile uygulanan sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile silindir pimli takımdan daha düşük, üçgen pimli takımdan ise daha iyi dayanım özellikleri ile birleştirilmiştir.
- Al 6061 ve Al levhalar üçgen pim geometrili takımı ile diğer iki takıma nispeten daha düşük dayanım özelliklerine sahip olarak sürtünme karıştırma nokta kaynağı ile birleştirilmiştir.
- Sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulamasında kalıp ile birlikte hızlı bağlama elemanları kullanılarak kaynak öncesi hazırlıklar hızlandırılabilir.

Sonuç olarak; Sürtünme karıştırma nokta kaynağı uygulamasında kullanılan parametrelerin özellikle de pim geometrisinin mekanik ve metalografik özellikleri ve kaynak biçimini doğrudan etkilediği görülmüştür.

Öneriler;

Sürtünme karıştırma nokta kaynağı özellikle otomotiv sanayiinde kullanılmaktadır. FSSW kullanım alanı elektrik direnç nokta kaynağının (RSW) uygulandığı tüm alanlara genişletilebilir fakat literatürde önerilen deneysel değerlerin dışında her malzeme ve kalınlığa göre optimum değerler bulunmamaktadır.

Farklı malzemeler ve farklı ölçüler için standart parametrelerin belirlenmesi çalışmaları yapılmalıdır. Deneysel parametre optimizasyon çalışmaları için ise robot kollar veya CNC tezgahlar gibi bilgisayar kontrollü makinelerin kullanımı daha kararlı deney sonuçları elde edilmesine olanak sağlayacaktır.

Bü yöntemin ülke ekonomisine kazandırılarak fayda getirmesini sağlamak üzere işlemin yapımını kolaylaştırarak kullanım alanını arttıracak makine ve takım tasarımları yapılabilir.

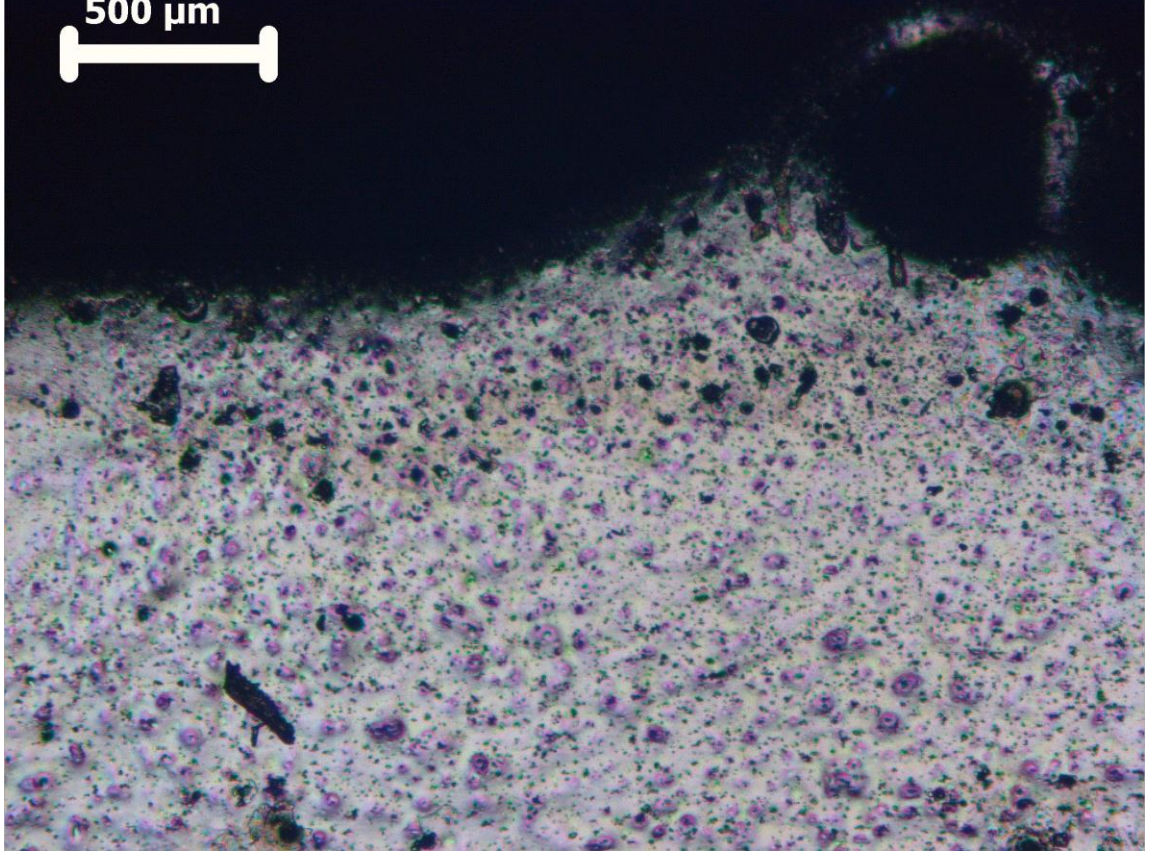
## KAYNAKLAR

1. Kahraman B., “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan 5754 Alüminyum Alaşımı Sacların Direnç Nokta Kaynağı (RSW) Ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı (FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2009).
2. Binal A., “AA 2024-T3 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametrelerinin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere etkileri”, **Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2006).
3. Gould, J.E., Feng, Z., “Heat flow model for friction stir welding of aluminum alloys”, **Journal of Material Processing and Manufacturing Science**, 7(1): 185-199 (1998).
4. Badarinarayan, H., Hunt, F., Okamoto, K., “Friction Stir Welding and Processing”, R.S. Mishra, M.W. Mahoney, Friction Stir Spot Welding, **American Society for Metals**, 235-250, Amerika, (2007).
5. Sederstorm, J.H., “Spot Friction Welding of Ultra High-Strength Automotive Sheet Steel”, **School of Technology Brigham Young University**, April (2007).
6. Gerlich, A., Yamamoto, M., North, T. H., “Local Melting and Cracking in Al 7075-T6 and Al 2024-T3 Friction Stir Spot Welds, **Science and Technology of Welding and Joining**, 12( 6): 474-475, (2007)
7. Kahraman, B., “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan 5754 Alüminyum Alaşımı Sacların Direnç Nokta Kaynağı(RSW) Ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı(FSSW) İle Birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 1-55 (2009).
8. Çam, G., “Al-Alaşımaları için geliştirilen yeni kaynak yöntemleri”, **III. Ulusal Kaynak Teknologileri Kongresi**, İstanbul, 227-267 (2001).
9. Yılmaz, M., “Farklı Takım Çeliklerinin Sürtünme Kaynağında Kaynak Bölgesinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 20-25 (1993).
10. Hirasawa S., Badarinarayan H., Okamoto K., Tomimura T., Kawanami T., “Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method”, **Journal of Materials Processing Technology** 1455–1463(2010).
11. Mishra R. S., Mahoney M.W., “Friction Stir Welding and Processing”, **ASM International**, Materials Park Ohio 2-205 (2007).

12. Tozaki Y., Uematsu Y., Tokaji K., “Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47: 2230–2236 (2007).
13. Awang M., Mucino V. H., “Energy Generation during Friction Stir Spot Welding (FSSW) of Al 6061-T6 Plates”, *Materials and Manufacturing Processes*, 25: 167–174 (2010).
14. Kaluç, E., Taban, E., “İleri Kaynak Teknolojisi Ders Notları”, Elektrik Direnç Kaynak Yöntemleri, *Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, 138: 56-61 (2004).
15. Uematsu Y., Tokaji K., Tozaki Y., Kurita T., Murata S., “Effect of re-filling probe hole on tensile failure and fatigue behaviour of friction stir spot welded joints in Al–Mg–Si alloy”, *International Journal of Fatigue*, 30: 1956–1966, (2008).
17. Bozu B., “ Sürtünme Karıştırma kaynağında farklı kaynak Parametrelerinin deneysel olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 5-85 (2007).
18. Dormaar, J.F., Adams, B.W., Willms, W.D.,. “Effect of Grazing and Abandoned Cultivation on a Stipa-Bouteloua Community”, *.J.Range Management*, 47:28-32 (1994).
19. Kaluç, E., Taban, E., Sürtünen Eleman ile Kaynak (FSW) Yöntemi, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası*, 460: 60-77, (2007c).
20. Padmanaban G., Balasubramanian V., “Selection of FSW tool pin profile, shoulder diameter and material for joining AZ31B magnesium alloy – An experimental approach”, *Materials and Design* 30: 2647–2656, (2009).
21. Coşkun M. H., “Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan IF 7114 ve DP 600 Çelik Sacların Direnç Nokta Kaynağı (RSW) Ve Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı(FSSW) Yöntemleri İle Birleştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2009).
22. Lathabai M., Painter M. J., Cantin G. M.D., Tyagi V. K., “Friction spot joining of an extruded Al–Mg–Si alloy”, *Scripta Materialia* 55: 899–902 (2006).
23. Tozaki Y., Uematsu Y., Tokaji K., “A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance”, *Journal of Materials Processing Technology* 210: 844–851 (2010).

**EKLER**

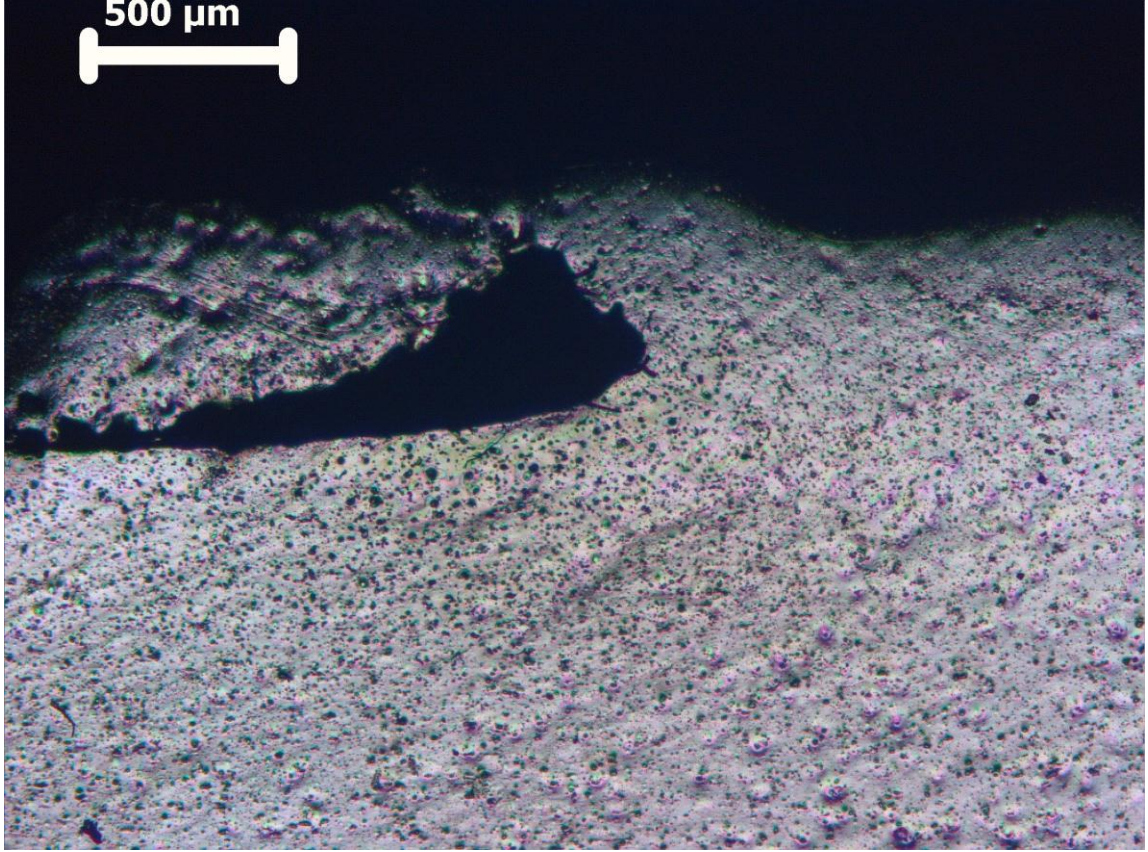
## EK-1. Mikroyapı fotoğrafları



Resim 1.1. Kare pimli takımın kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilmiş AA 7075 levhaların kaynak noktası üzerinde takım omuzunun baskısı ile plastik akışın şekillendirildiği bölge

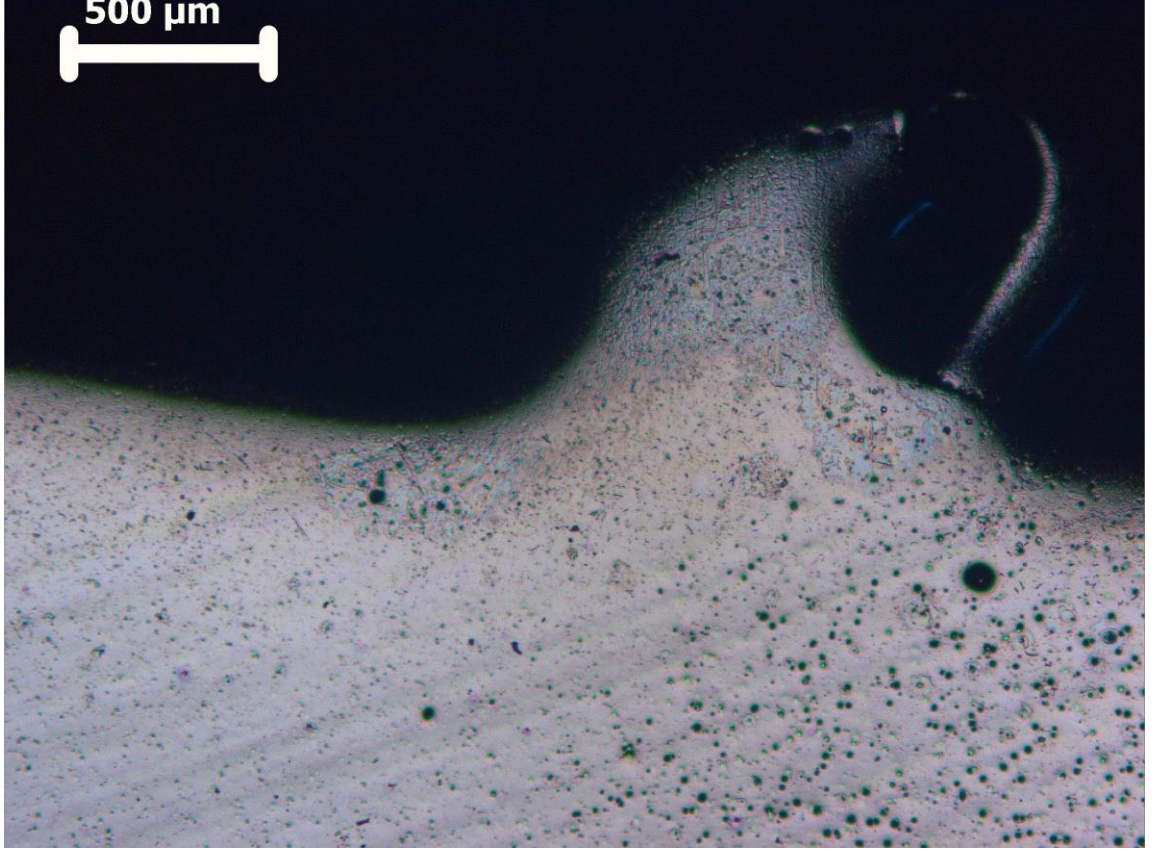


## EK-1. (Devam) Mikroyapı fotoğrafları



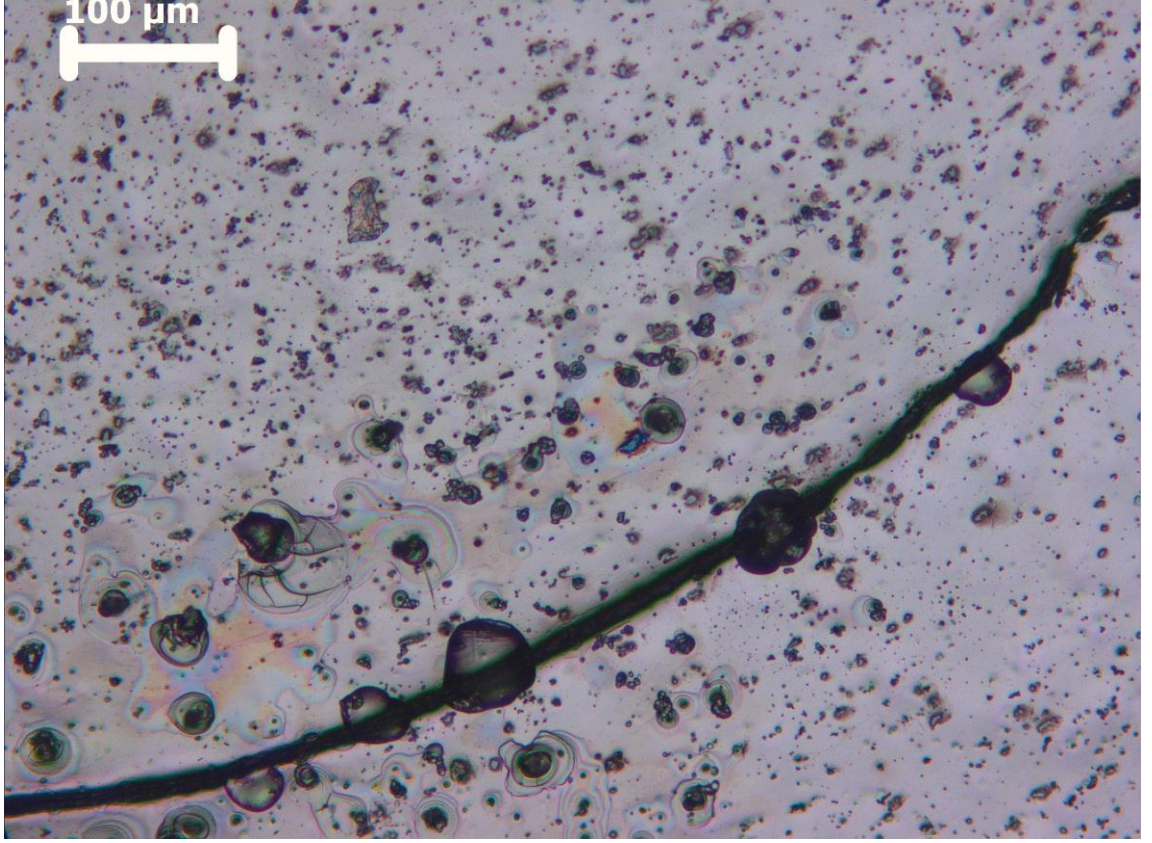
Resim 1.2. Silindir pimli takımın kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilmiş AA 7075 levhaların kaynak noktası üzerinde takım omuzunun baskısı ile plastik akışın şekillendirildiği bölge

## EK-1. (Devam) Mikroyapı fotoğrafları



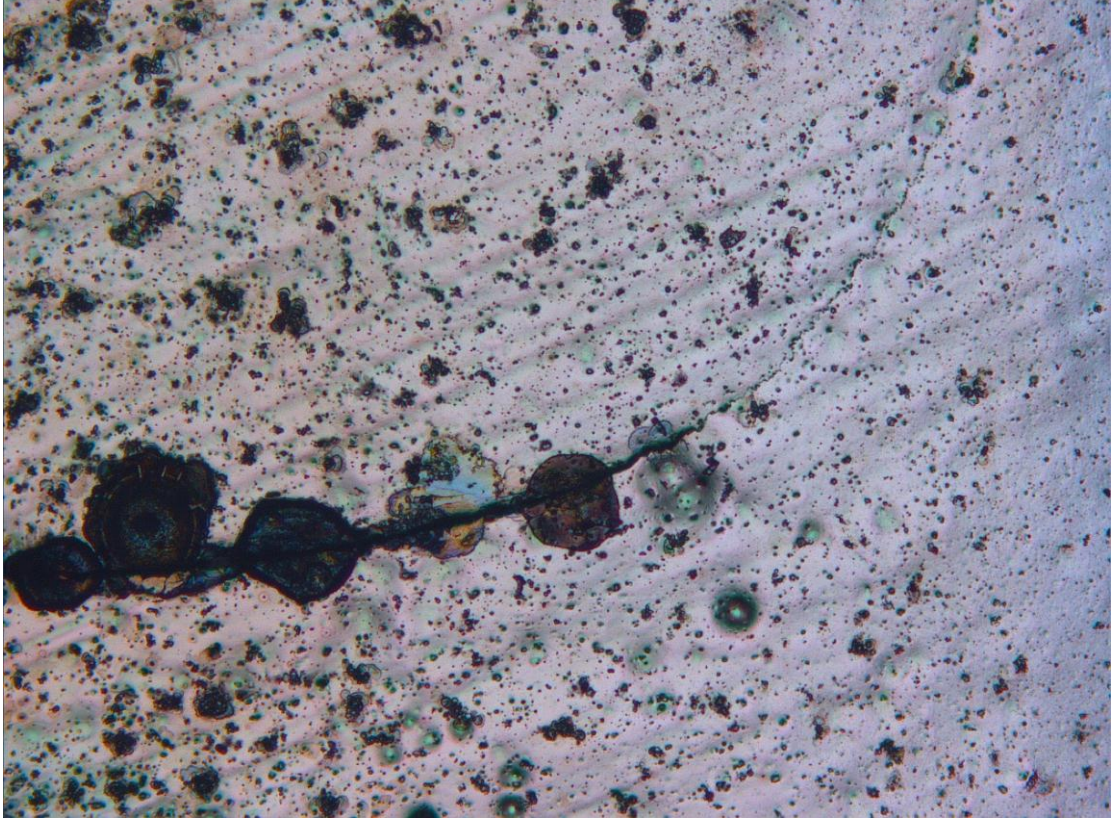
Resim 1.3. Silindir pimli takımın kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilmiş AA 6061 levhaların kaynak noktası üzerinde takım omuzunun baskısı ile plastik akışın şekillendirildiği bölge

## EK-1. (Devam) Mikroyapı fotoğrafları



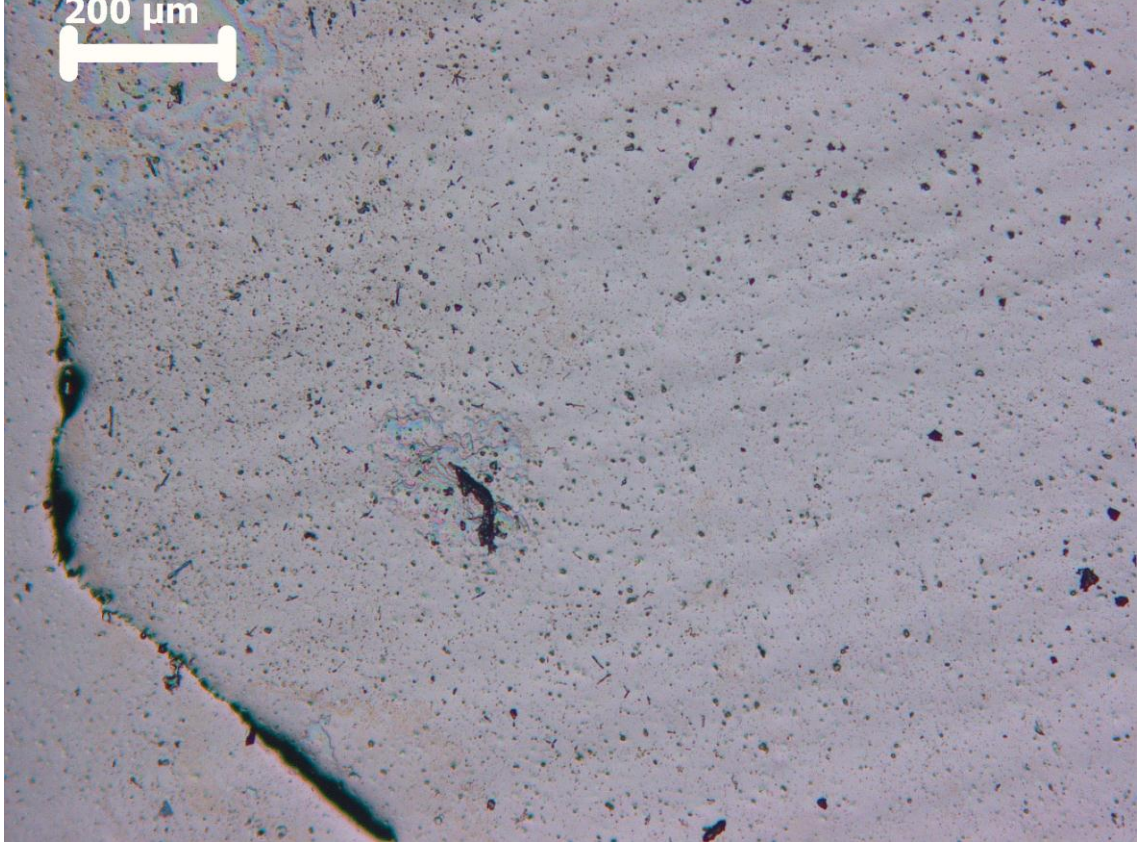
Resim 1.3. Silindir pimli takımın kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilmiş AA 7075 levhaların kaynak sonrasında aralarında kalan boşluk

EK-1. (Devam) Mikroyapı fotoğrafları



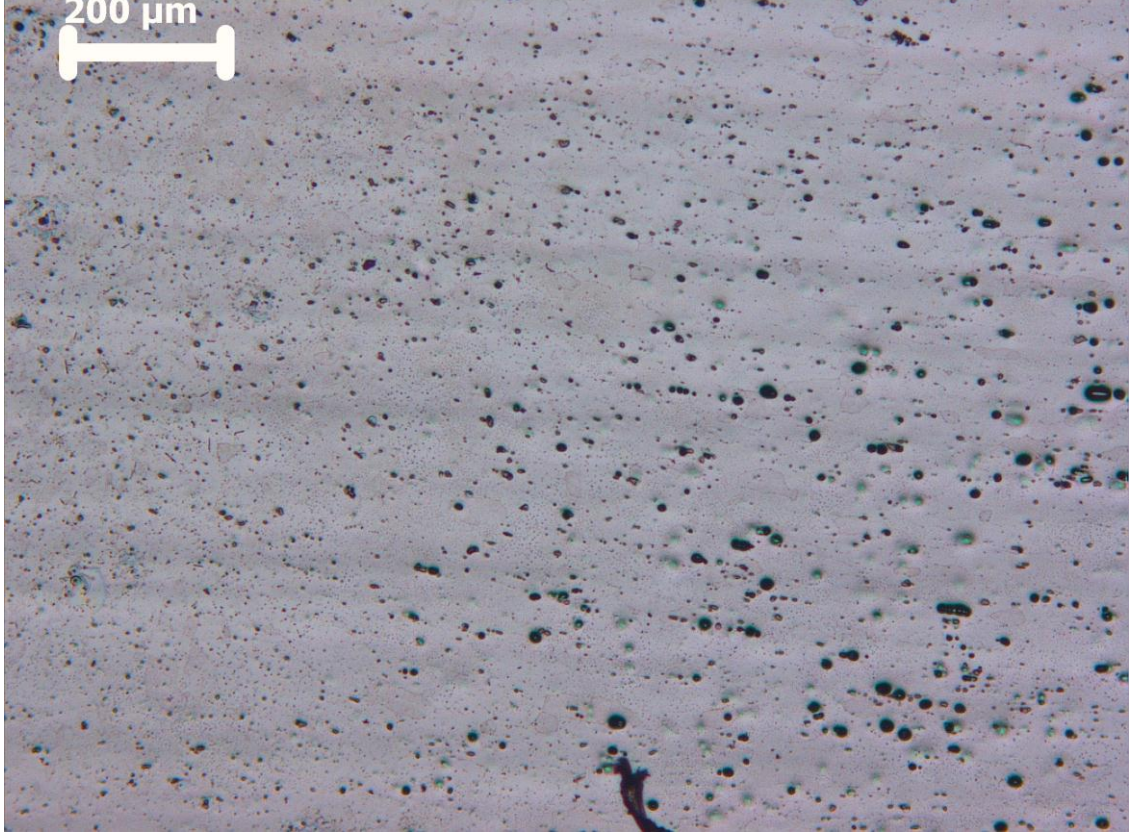
Resim 1.4. Üçgen pimli takımın kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilmiş AA 7075 levhaların kaynak sonrasında aralarında kalan boşluk

## EK-1. (Devam) Mikroyapı fotoğrafları



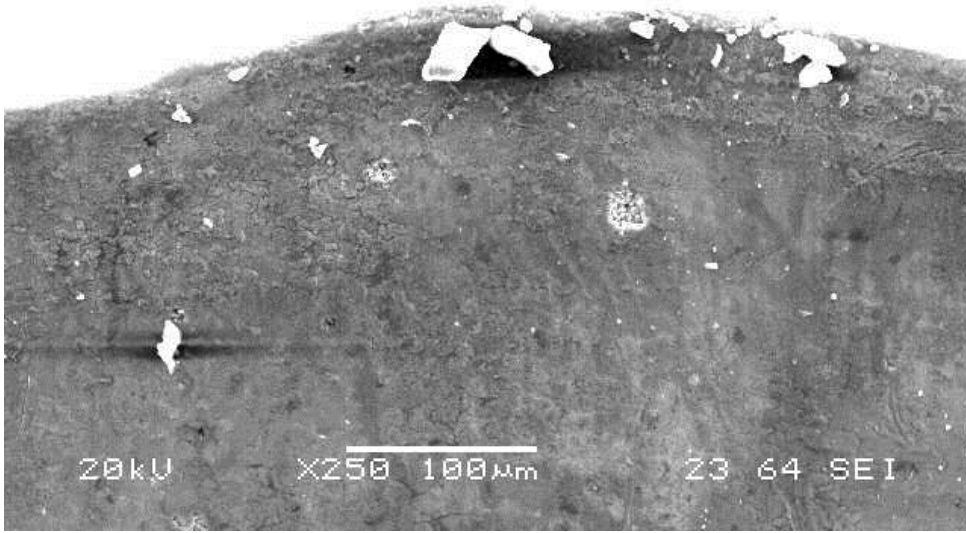
Resim 1.5. Silindir pimli takımın kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilmiş AA 6061 levhaların kaynak sonrasında aralarında kalan boşluk

## EK-1. (Devam) Mikroyapı fotoğrafları



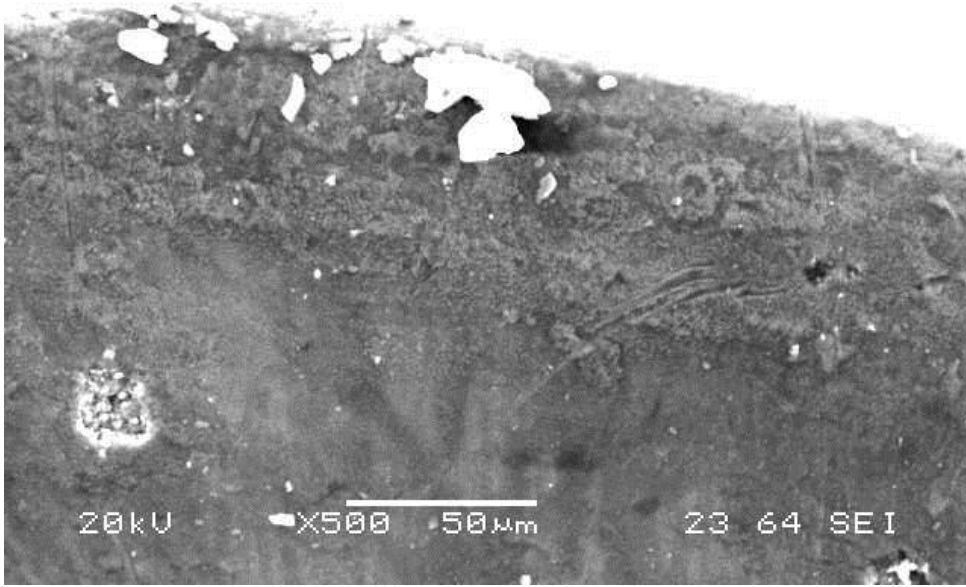
Resim 1.6. Kare pimli takımın kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilmiş AA 6061 levhaların termomekanik etkilenen bölge(TMEB) ve ısı tesiri altındaki bölge arasındaki gözenek yapı farkı

EK-2 SEM fotoğrafları



Resim 2.1. Kare pimli takımın kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilmiş AA 6061 levhaların termomekanik etkilenen bölgesine(TMEB) ait SEM görüntüsü

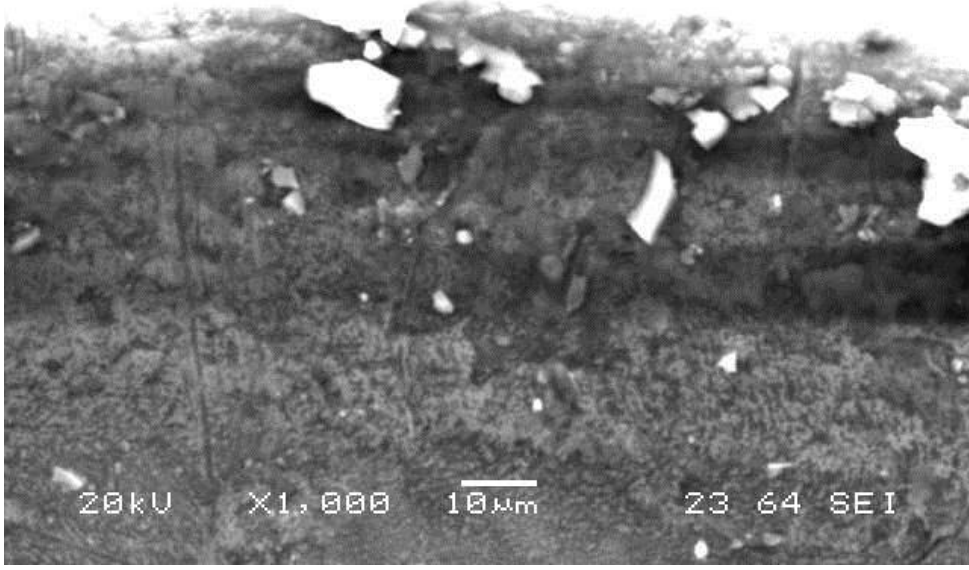
## EK-2 (Devam) SEM fotoğrafları



Resim 2.2. Kare pimli takımın kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilmiş AA 6061 levhaların termomekanik etkilenen bölgesine(TMEB) ait SEM görüntüsü

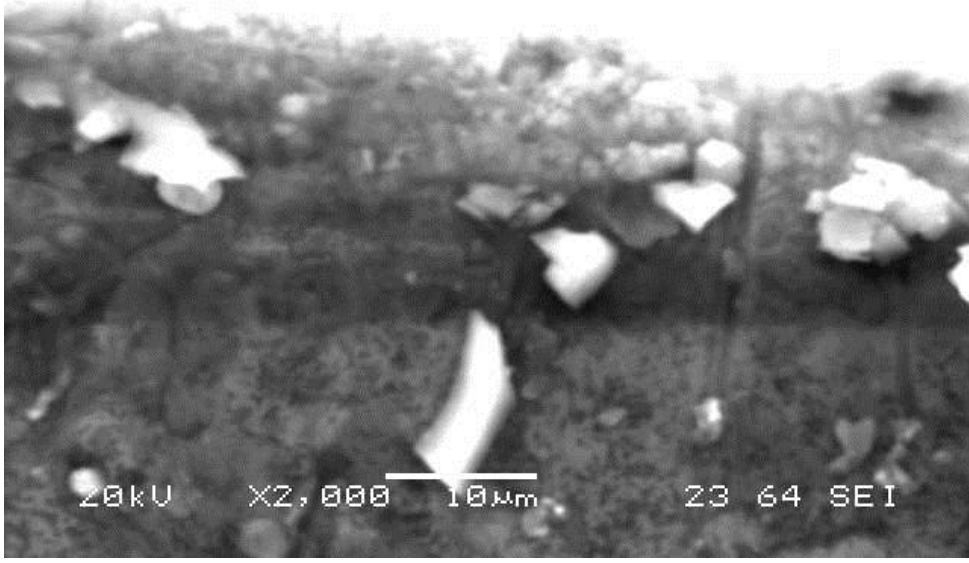


## EK-2 (Devam) SEM fotoğrafları



Resim 2.3. Kare pimli takımın kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilmiş AA 6061 levhaların termomekanik etkilenen bölgesine(TMEB) ait SEM görüntüsü

## EK-2 (Devam) SEM fotoğrafları



Resim 2.4. Kare pimli takımın kullanıldığı sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) ile birleştirilmiş AA 6061 levhaların termomekanik etkilenen bölgesine (TMEB) ait SEM görüntüsü

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SUDAĞ, Mustafa  
Uyruğu : T.C.  
Doğum tarihi ve yeri : 04.02.1984 İzmir  
Medeni hali : Evli  
Telefon : 0 (432) 2130162  
e-mail : sudag84@yahoo.com

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üni. / Endüstriyel Teknoloji Eğt.	2007
Lise	Urla Anadolu Meslek Lisesi	2002

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006(07-09)	MORGAN CORP.	Montaj Hattı
2007- .....	M.E.B.	Tek. ve Tas. Öğretmeni

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayımlar

-

### Hobiler

Karting, bilgisayar teknolojileri, maket ve model yapımı.