

**DOĞRUSAL OLMAYAN TAKIM YOLUYLA ALÜMİNYUM ALAŞIMLI
SAC MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİ VE KAYNAK BÖLGESİNİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İRDELENMESİ**

Ender AĞCA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2010
ANKARA**

Ender AĞCA tarafından hazırlanan DOĞRUSAL OLMAYAN TAKIM YOLUYLA ALÜMİNYUM ALAŞIMLI SAC MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLMESİ VE KAYNAK BÖLGESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İRDELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Faruk MENDİ
Tez Danışmanı, Makine Eğitimi Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. Adem KURT
Metal Eğitimi AD., G.Ü.

Prof. Dr. Faruk MENDİ
Makine Eğitimi AD., G.Ü.

Prof. Dr. Süleyman TEKELİ
Metal Eğitimi AD., G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Hakan DİLİPAK
Makine Eğitimi AD., G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. Selim TÜRKBAŞ
Makine Mühendisliği AD., G.Ü.

Tarih: 27 /05/ 2010

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.

Ender AĞCA

**DOĞRUSAL OLMAYAN TAKIM YOLUYLA ALÜMİNYUM ALAŞIMLI SAC
MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİ VE KAYNAK BÖLGESİNİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İRDELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Ender AĞCA

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2010**

ÖZET

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, son yıllarda keşfedilmiş ve geliştirilmiş bir katı hal kaynak tekniğidir. Klasik ergitme kaynakları ile kaynatıldığında bazı problemler oluşturan ve özellikle havacılık, uzay ve savunma sanayii gibi yaygın alanlarda kullanılan, farklı özelliklere sahip alüminyum alaşımlarının, bu yöntem ile kaynak edilebilirliği basitleştirilmiştir.

Bu çalışmada, alüminyum levhalar, doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollarıyla, farklı işlem parametreleri kullanılarak sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Doğrusal olmayan takım yolu seçilmesinin temel amacı, kaynak dikiş uzunluğunu artırarak kaynak bölgesinin mukavemet özelliklerini yükseltmektedir. Ayrıca, bu yöntemin bu güne kadar hiç denenmemesi ve ilk defa uygulanması ve elde edilen bulguların teknolojiye ne denli katkı sağlayacağı hep merak konusu olmuştur. Kaynak süresince, karıştırıcı ucun devir sayısı ve kaynak ilerleme hızı, değişken parametreler olarak alınmış, karıştırıcı uç geometrisi ise sabit tutulmuştur. Kaynak kalitesi; içyapı incelemesi, mikrosertlik ölçümleri ve çekme deneyi yapılmak suretiyle

belirlenmiştir. Takım yoluna, kaynak ilerleme hızına ve karıştırıcı uç devir sayısına bağlı olarak kaynak bölgesinde meydana gelen değişimler incelenmiş ve bu değişimlerin kaynak performansını nasıl etkilediği araştırılmıştır. Yapılan kaynaklar ve deneyler sonucunda, kaynaklı birleştirmelerin mukavemetlerinin kaynak parametrelerine göre farklılık gösterdiği ve doğrusal olmayan takım yolu kullanılmasının kaynaklı birleştirmenin mukavemet değerlerini artırdığı tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 708.3.029

Anahtar Kelimeler : Sürtünme karıştırma kaynağı, alüminyum alaşımı, doğrusal olmayan takım yolu

Sayfa Adedi : 103

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Faruk MENDİ

**THE WELDING OF ALUMINUM ALLOYED SHEET MATERIAL USING
FRICTION STIR WELDING METHOD BY NON-LINEAR TOOL PATH AND
THE INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF WELDING
AREA**

(M.Sc. Thesis)

Ender AĞCA

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
May 2010**

ABSTRACT

Friction stir welding is a solid state welding method which has been found and improved in recent years. The weldability of aluminum alloys at different properties, which has problems with classical melt welding, and specially used in aerospace, space and defence industry, has been simplified with this welding method.

In this study, aluminum sheets were welded by friction stir welding method by linear and non-linear tool paths using different operation parameters. The aim of choosing non-linear tool path is to increase strength properties of welding area by enhancing weld length. Also it is the first time of trying and applying of this technique and it is always wondered how findings add value to technology. The revolution number of stirrer and welding rate of need are taken as parameters during welding operations. The geometry of stir is also taken as constant. The quality of welding is examined microhardness measurement, performing of tensile test and investigation of structure of material. Depending on tool path,

welding rate of feed and revolution number of stir; the variations of welding region and the effects of these variations on welding performance are investigated. It is observed from the experiments and welding, the strength of welding shows differences according to welding parameter and the usage of nonlinear tool path increases the strength value of welding.

Science Code	: 708.3.029
Key Words	: Friction stir welding, aluminum alloys, non-linear tool path
Page Number	: 103
Adviser	: Prof. Dr. Faruk MENDİ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışman hocam Prof. Dr. Faruk MENDİ'ye, Makine Öğretim Elemanı Mehmet Tuncay KAYA'ya, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan değerli eşime, aileme, çalışma arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ TANITIMI	3
2.1. Alüminyumun Özellikleri	3
2.2. Alüminyumun Kullanım Alanları	5
2.3. Alüminyum Üretimi.....	8
2.4. Alüminyumun Türkiye'deki Gelişimi	9
2.5. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırma ve Temper Tasarımları ..	11
2.5.1. Alüminyum - bakır alaşımları (2xxx Serisi)	15
2.5.2. Alüminyum - mangan alaşımları (3xxx Serisi)	16
2.5.3. Alüminyum - silisyum alaşımları (4xxx Serisi).....	16
2.5.4. Alüminyum - magnezyum alaşımları (5xxx Serisi).....	16
2.5.5. Alüminyum-silisyum-magnezyum alaşımları (5xxx Serisi)	17
2.5.6. Alüminyum - çinko alaşımları (6xxx Serisi)	17
2.6. Alüminyum ve Alaşımlarının Isıl İşlem Özellikleri	18

Sayfa

3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAĞI.....	20
3.1. Ergitme Kaynak Yöntemleri.....	22
3.1.1. Gaz (Oksi - Asetilen) kaynağı	22
3.1.2. Elektrik ark kaynağı.....	23
3.1.3. TIG kaynağı	24
3.1.4. MIG kaynağı.....	25
3.1.5. Plazma kaynağı	28
3.1.6. Elektron ışın kaynağı	30
3.1.7. Lazer kaynağı	30
3.2. Katı Hal Kaynak Yöntemleri	32
3.2.1. Sürtünme kaynağı.....	32
3.2.2. Difüzyon kaynağı	33
3.2.3. Direnç kaynağı	34
3.2.4. Ultrasonik kaynak.....	35
3.2.5. Patlama kaynağı	36
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI	37
4.1. Kaynak Metalürjisi	39
4.2. Kaynak Hataları	40
4.3. Kaynak Parametrelerinin Etkileri	40
4.3.1. Malzeme kalınlığı.....	40
4.3.2. Karıştırıcı uç malzemesi ve dizaynı.....	41
4.3.3. Takım ilerleme hızı ve devir sayısı.....	47
4.3.4. Kaynak pozisyonu ve birleştirme geometrileri	48

Sayfa

4.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulandığı Malzemeler.....	50
4.4.1. Alüminyum alaşımları.....	50
4.4.2. Bakır alaşımları.....	51
4.4.3. Titanyum alaşımları.....	51
4.4.4. Çelikler	52
4.4.5. Magnezyum alaşımları	52
4.4.6. Metal matrisli kompozitler	52
4.4.7. Farklı alaşım ve kompozitler	53
4.4.8. Plastikler	53
4.5. Yöntemin Uygulama Alanları.....	54
4.5.1. Gemi inşasında ve deniz endüstrisinde uygulamalar	54
4.5.2. Havacılık endüstrisi	54
4.5.3. Demiryolu endüstrisi.....	55
4.5.4. Otomotiv endüstrisi.....	55
4.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları.....	56
5. ÇALIŞMANIN LİTERATÜRDEKİ YERİ VE ÖNEMİ	58
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	64
6.1. Malzeme ve Metot.....	64
6.2. Sürtünme Elemanının Üretimi	66
6.3. Numunelerin Kaynağa Hazırlanması.....	67
6.4. Kaynak İşleminin Uygulanışı	68
6.5. Deneylerde Kullanılan Kaynak Parametreleri.....	69
6.6. Mekanik ve Metalografik Testler İçin Numunelerin Hazırlanması	70

Sayfa

6.6.1. Mikroyapı incelemeleri.....	71
6.6.2. Mikrosertlik ölçümleri	72
6.6.3. Çekme deneyleri	72
7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ.....	74
7.1. Görsel İnceleme Sonuçları	74
7.2. Çekme Deney Sonuçları	80
7.3. Mikroyapı İnceleme Sonuçları	84
7.3.1. Devir sayısının mikroyapı üzerindeki etkisi	85
7.3.2. İlerleme hızının mikroyapı üzerindeki etkisi	88
7.4. Mikrosertlik Deney Sonuçları.....	90
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	95
8.1. Sonuçlar	95
8.2. Öneriler	98
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ.....	103

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Saf alüminyumun özellikleri.....	4
Çizelge 2.2. Alüminyumun fiziksel özellikleri	4
Çizelge 2.3. Alüminyumun kullanım alanlarına göre dağılımı	7
Çizelge 2.4. Seydişehir tesisleri sıvı alüminyum üretimi.....	11
Çizelge 2.5. Alüminyum alaşımları için tanımlama sistemi.....	13
Çizelge 2.6. Isıl işleme bağlı olarak mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler	19
Çizelge 6.1. Deneyde kullanılan alüminyumun kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)	65
Çizelge 6.2. Deneyde kullanılan alüminyumun tipik özellikleri	65
Çizelge 6.3. Sürtünme elemanının kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)	66
Çizelge 6.4. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan kaynak parametreleri	70
Çizelge 7.1. Görsel inceleme sonuçları.....	75
Çizelge 7.2. Çekme numunelerinin deney sonuçları	80

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Birincil alüminyum üretiminin kademeleri: alümina ve alüminyum elde edilmesi	9
Şekil 3.1. MIG kaynak yöntemindeki ark bölgesi.....	27
Şekil 3.2. Plazma ark kaynağı.....	29
Şekil 3.3. Difüzyon kaynağı.....	34
Şekil 4.1. Sürtünme karıştırma tekniği	38
Şekil 4.2. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik gösterimi	39
Şekil 4.3. Farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi	41
Şekil 4.4. Sürtünme karıştırma aparatı.....	42
Şekil 4.5. Helezonik takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri	44
Şekil 4.6. Üç yivli takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri	44
Şekil 4.7. Skew-Stir metodunun çalışma prensibi	45
Şekil 4.8. Helezonik ve üç yivli takımların omuz profilleri	46
Şekil 4.9. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde gerçekleştirilen birleştirmeler.....	48
Şekil 6.1. Doğrusal olmayan takım yolu ile birleştirilen alüminyum levhanın geometrisi	65
Şekil 6.2. SKK kullanılan karıştırıcı uç ve geometrisi	66
Şekil 6.3. Doğrusal takım yolu için kullanılan bağlama kalıbı	67
Şekil 6.4. Doğrusal olmayan takım yolu için kullanılan bağlama kalıbı.....	68
Şekil 6.5. Deneyde kullanılan tezgah	69

Şekil	Sayfa
Şekil 6.6. Kaynak işleminin uygulanışı	69
Şekil 6.7. TS EN ISO 15614-2'ye göre test numunelerinin kaynaklı levhadaki yeri	71
Şekil 6.8. Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı noktaların şematik gösterimi	72
Şekil 6.9. Standart çekme numunesi şekli ve ölçüleri	73
Şekil 7.1. Doğrusal kaynak dikiş profilleri n:900 dev/dk	76
Şekil 7.2. Doğrusal kaynak dikiş profilleri n:1100 dev/dk	77
Şekil 7.3. Doğrusal olmayan kaynak dikiş profilleri n:900 dev/dk	78
Şekil 7.4. Doğrusal olmayan kaynak dikiş profilleri n:1100 dev/dk	79
Şekil 7.5. Doğrusal takım yollu kaynakta ilerleme hızının çekme dayanımına etkisi.....	82
Şekil 7.6. Doğrusal olmayan takım yollu kaynakta ilerleme hızının çekme dayanımına etkisi.....	83
Şekil 7.7. Doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollu birleştirmelerin karşılaştırmalı çekme deneyi sonuçları	84
Şekil 7.8. Doğrusal takım yollu birleştirmede 170 mm/dak ilerleme hızında devir sayısının mikroyapı üzerindeki etkisi	86
Şekil 7.9. Doğrusal olmayan takım yollu birleştirmede 100 mm/dak ilerleme hızında devir sayısının mikroyapı üzerindeki etkisi.....	87
Şekil 7.10. Doğrusal takım yollu birleştirmede 1100 dev/dak devir sayısında ilerleme hızının mikroyapı üzerindeki etkisi.....	89
Şekil 7.11. Doğrusal olmayan takım yollu birleştirmede 900 dev/dak devir sayısında ilerleme hızının mikroyapı üzerindeki etkisi.....	89
Şekil 7.12. Doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollu numunelerin mikroyapılarının karşılaştırılması	90
Şekil 7.13. Doğrusal takım yolu ile 900 dev/dak'da kaynaklanan numunenin sertliği	91

Şekil	Sayfa
Şekil 7.14. Doğrusal takım yolu ile 1100 dev/dak'da kaynaklanan numunenin sertliği	92
Şekil 7.15. Doğrusal olmayan takım yolu ile 900 dev/dak'da kaynaklanan numunenin sertliği	92
Şekil 7.16. Doğrusal olmayan takım yolu ile 1100 dev/dak'da kaynaklanan numunenin sertliği	93
Şekil 7.17. Doğrusal yollu kaynakta kaynak hızı ile kaynak metalinin sertliği arasındaki ilişki	93
Şekil 7.18. Doğrusal olmayan yollu kaynakta kaynak hızı ile kaynak metalinin sertliği arasındaki ilişki	94
Şekil 7.19. S3 ve N3 numunelerinin sertlik değerlerinin karşılaştırılması	94

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
h	Pimin uç kısmının uzunluğu, mm
n	Karıştırıcı uç devir sayısı, dev/dak
v	Karıştırıcı uç ilerleme hızı, mm/dak
t	Malzeme kalınlığı, mm
Kısaltmalar	Açıklama
DKB	Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge
ITAB	Isının tesiri altındaki bölge
MIG	Metal inert gas
MTA	Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
SKK	Sürtünme karıştırma kaynağı
TEB	Termomekanik olarak etkilenen bölge
TIG	Tungsten inert gas
TWI	The Welding Institute

1. GİRİŞ

Kaynaklı birleştirmeler günlük hayatımızın her safhasında karşılaştığımız ve kullandığımız bir birleştirme türüdür. Yeni geliştirilmiş malzemeler genellikle modern birleştirme tekniklerine ihtiyaç duyarlar. Son yirmi yılda alaşımların geliştirilmesinde bu malzemelerin kaynağı ile ilgili büyük ilerlemeler olmuştur [1]. Bu ilerlemeler neticesinde geliştirilen kaynak yöntemlerinden birisi de sürtünme karıştırma kaynağıdır (SKK). Son yıllarda geliştirilen sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), ilk defa 1991 yılında The Welding Institute (TWI) tarafından bulunan en yeni katı hal kaynak yöntemidir. Günümüzde alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde karşılaşılan bazı problemlerin giderilmesi amacıyla araştırmacılar, bu yeni katı hal kaynak yöntemi üzerindeki çalışmalara yönelmişlerdir [2]. Alüminyum ve alaşımlarının klasik ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde karşılaşılan problemler ise, kaynak bölgesinde (kaynak dikişi ve ısı tesiri altındaki bölgede) çatlak oluşumu ve kaynak dikişinde tolere edilmeyecek düzeyde gaz boşluğu (porozite) oluşumudur [3].

SKK, kaynak konstrüksiyonu güç olan malzemelerin birleştirme işlemleri için kısa kaynak süresi, minimum yüzey hazırlama ve otomasyon kolaylığı gibi kendine özgü avantajlarından dolayı uygun bir alternatif kaynak yöntemidir [1]. Yöntemin uygulanması sırasında duman ve ışıın oluşmaması, koruyucu gaz, toz ve ilave tele gereksinim duyulmaması, kaynak ağzı hazırlığı gerekmemesi, tüm pozisyonlarda kaynak yapılabilme olanağının bulunması ve otomasyona da yatkınlığı gibi daha birçok üstünlüğünün bulunması, yöntemin uygulama alanlarını daha da genişletmektedir [4]. Yöntem; gemi, uçak ve uzay aracı, tren ve kara taşıtlarının imalatı gibi çok geniş bir potansiyel uygulama alanı yelpazesine sahiptir. Bu uygulamalarda, bu yeni kaynak teknolojisi sınırlı da olsa ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır [5].

SKK yöntemi, alın altına sabitlenmiş iki levhaya yüksek devirde dönen omuzlu bir pimin daldırılarak kaynak yapılmak istenen uzunluk boyunca belirli bir

hızda ilerletilmesinden ibarettir. Kaynak edilecek parçalar öncelikle sabit bir yüzey üzerine yerleştirilir. Yöntemin uygulama aşaması iki farklı şekilde olabilir. Parçaların hareketi söz konusu olabileceği gibi, takımın dönme ve ilerleme hareketi de mümkün olmaktadır. Pim, malzemelere temas ettiğinde sürtünme kaynağındaki duruma benzer bir durum oluşarak temas noktasında ısı, sürtünmenin de etkisiyle hızla artar ve malzemelerin plastik değişimine neden olur. Bu değişim malzemelerin akışını sağlar ve birleşme olayı gerçekleşir [6].

Bu çalışmada, geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirmesi sorunlu olan ve özellikle havacılık, uzay ve savunma sanayisi gibi yaygın alanlarda kullanılan alüminyum levhalar, yeni ve alternatif bir yöntem olan SKK ile birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde, karıştırıcı ucun dönme hızı (devir sayısı) ve kaynak ilerleme hızı gibi değişken parametreler, literatür ışığında belirli aralıklarda değiştirilerek, farklı mekanik ve mikroyapı özelliklerine sahip birleştirmeler elde edilmiştir. Karıştırıcı uç geometrisi sabit tutulmuş, ancak numuneler doğrusal olmayan takım yolu izlenilerek kaynatılmıştır. Böylece doğrusal olmayan takım yollu SKK'nın, malzemenin mekanik özellikleri üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Daha sonra elde edilen kaynaklı bağlantıların; mikroyapıları incelenmiş, mikrosertlik ve çekme testleri uygulanmıştır. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veri ve belgeler, ilgili literatür ışığında değerlendirilerek sonuçlar yorumlanmıştır.

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ TANITIMI

Alüminyum, demir – çelikten sonra dünyada en çok kullanılan metaldir. 1900'lü yılların başlarında dünya alüminyum üretimi 172 000 ton iken, 1977' de 13 360 000 tona, 1980' ler de 17.5 milyon tona ulaşmıştır. Diğer demir dışı metaller yanında alüminyum metal üretimi ve tüketimindeki yüksek artış hızının nedenleri; alüminyumun özelliklerindendir ki bunlar düşük yoğunluk, yüksek ısısal ve elektriksel iletkenlik, ışık ve ısı yansıtıcılığı, sıcak ve soğuk şekillendirilebilme kolaylığı, değişik dayanım imkanları, yeniden kullanılabilme gibi belirgin özellikler ve fiyatının 1974 yılına dek diğer rakip metallere göre daha düşük oranda artmış olmasıdır. Bugün bütün dünyada alüminyum ve alaşımları büyük ticari değeri olan ve büyük miktarlarda üretilen malzeme grubu haline gelmiştir. Alüminyumun uçak ve otomotiv sanayinde önemli rol oynaması “stratejik” bir metal sayılmasına neden olmuştur. Alüminyum ve alaşımları bütün imalat sanayinin hem her dalında, tarım, inşaat, kimya, gıda, ulaştırma, elektrik ve elektronik sektörlerinde giderek artan oranlarda kullanılmaktadır [7].

2.1. Alüminyumun Özellikleri

Saf alüminyumun özellikleri Çizelge 2.1'de, alüminyumun fiziksel özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Bu özellikler alüminyuma ilave elementlerin etkisi ile değiştirilebilir. Alüminyumun metal olarak özellikleri birçok durumda onun ideal ve ekonomik bir malzeme olmasına sağlar. Bu özellikler aşağıda belirtilmiştir [8]:

- 1) Uygun mekanik özelliklerle birlikte düşük ağırlık,
- 2) Koku ve kimyasallara karşı dayanım ve hijyenik koşullar,
- 3) Yüksek ısı iletkenliği,
- 4) Parlama ve alev almazlık,
- 5) Manyetik nötralize,
- 6) Kolay şekillendirilebilme kabiliyeti,

7) Çok farklı yöntemlerle yüzey işlemleri.

Çizelge 2.1. Saf alüminyumun özellikleri

Kimyasal sembol	Al
Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26.98 gr
Kafes yapısı	YMK
Yoğunluğu (20°C)	2.7 gr/cm ³
Elastik modül, E.	6.7x10 ³ N/mm ²
Ergime ısısı	94.6 cal/gr
Elektrik İletkenliği	37.74 m/Ohm.mm ²
Isı iletkenliği	0.55 cal/cm.s. °C
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	150-300°C

Çizelge 2.2. Alüminyumun fiziksel özellikleri [9]

Fiziksel Özellik	Değeri
Atom ağırlığı, r (gr)	26.98
Dökme Alüminyumun özgül ağırlığı, r (gr/cm ³)	2.65-2.69
Hadde Alüminyumun özgül ağırlığı, r (gr/cm ³)	2.7
Ergime noktası (°C)	660
Kaynama noktası (°C) 1800	1800
Isı geçirgenlik katsayısı, k (W/mK)	173
Sıcaklık tesiri ile uzama, (mm/m) 0-50°C 100°C 200°C 400°C 500°C	1.17 2.28 4.94 0.60 13.70
Kendini çekme miktarı (dl/l) (%)	1.7-1.8
Katı halden sıvı hale geçerken meydana gelen hacim büyümesi (%)	6.5

Bazı alüminyum alaşımları yumuşak çelikle mukayese edilecek derecede sağlamdır. Alüminyum sıfır derecenin altında şekil değiştirme kabiliyetine sahiptir. Alüminyum bükülebilir, haddelenebilir, preslenebilir, çekilebilir, bükülüp uzatılabilir ve rulo haline getirilebilir. Ayrıca çekiçle dövülüp, kızdırılıp işlenebilir veya kalıptan çekilerek çok büyük şekiller verilebilir. Alüminyum ve alaşımların kaynağında müspet neticeler almak için alüminyum ve alaşımlarının özelliklerini iyi bilmek gerekir. Alüminyum ve alaşımlarının gösterdiği mukavemet özellikleri malzemenin saflığına ve imal edildiği yöntem şekline göre farklılıklar gösterir [9].

2.2. Alüminyumun Kullanım Alanları

Alüminyum daha önce açıklanan özellikleri nedeniyle yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Bu açıdan ekonomi içinde önemli bir yeri vardır [10].

1) İnşaat Sektöründe:

- Konut yapımında
- Konut dışı yapılarda
- Karayollarında
- Diğer yapısal kullanımlarda

2) Kimya ve Gıda Sanayinde:

- Organik bileşikler üretiminde
- Plastik ve sentetik fiber sanayinde
- Kâğıt sanayinde
- Gübre sanayinde
- Patlayıcı maddeler üretiminde
- Mineral asit üretiminde
- Karbonat ve kükürt üretiminde
- Saf su ve buhar üretiminde
- Elektrokimyasal sanayinde

- Petrol rafinerilerinde
- Gıda, ilaç ve meşrubat sanayinde
- Atom enerjisi sanayinde
- Boya maddesi ve boya üretiminde
- Ambalaj sanayinde

3) Ulaştırma Sektöründe:

- Karayolu taşıtlarında
- Demiryolu taşıtlarında
- Denizyolu taşıtlarında
- Havayolu taşıtlarında

4) Elektrik ve Elektronik Sektöründe:

- Tel ve kablo üretiminde
- Enerji dağıtım cihazlarında
- Güç üretim ve düzeltme araçlarında
- Haberleşme ve elektronik cihazlarda
- İç dağıtım ve aydınlatma gereçlerinde

5) Makine ve Ekipman İmalat Sektöründe:

- Makine yatakları imalinde
- Pompa, kompresör, fan vs. imalinde
- Endüstri makineleri imalinde
- Tarım alet ve makineleri imalinde
- İş makineleri imalinde
- Çeşitli enstrümanların imalinde
- Isıtma, havalandırma ve soğutma sistemlerinde
- Malzeme taşıma ekipmanları imalinde
- Maden ve petrol ürünleri araçları imalinde
- Tekstil ve matbaa makineleri imalinde
- Elektrik sistemlerinde

- Askeri araç-gereç ve silahların yapımında

6) Metal Sanayinde:

- Alaşım metali
- Çelik deoksidasyonu
- Alüminyum kaplamalı çelik
- Alüminyumlama
- Alüminotermik reaksiyonlar

7) Diğer Yerlerde Kullanım Alanları:

- Dayanıklı tüketim mallarında
- Muhtelif ev eşyalarında
- Mutfak eşyası yapımında
- Mobilya yapımında
- Dekorasyon ürünlerinde
- Takım ve el aletleri yapımında
- Diğer uygulamalarda

Alüminyumun kullanım alanlarına göre dağılımı Çizelge 2.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Alüminyumun kullanım alanlarına göre dağılımı

İnşaat	% 25
Ulaşım	% 24
Ambalaj	% 15
Elektrik/Elektronik	% 10
Genel Mühendislik	%9
Mobilya, ofis eşyaları	% 6
Demir çelik, metalurji	% 3
Kimya ve tarım ürünleri sanayi	% 1
Diğer	% 7

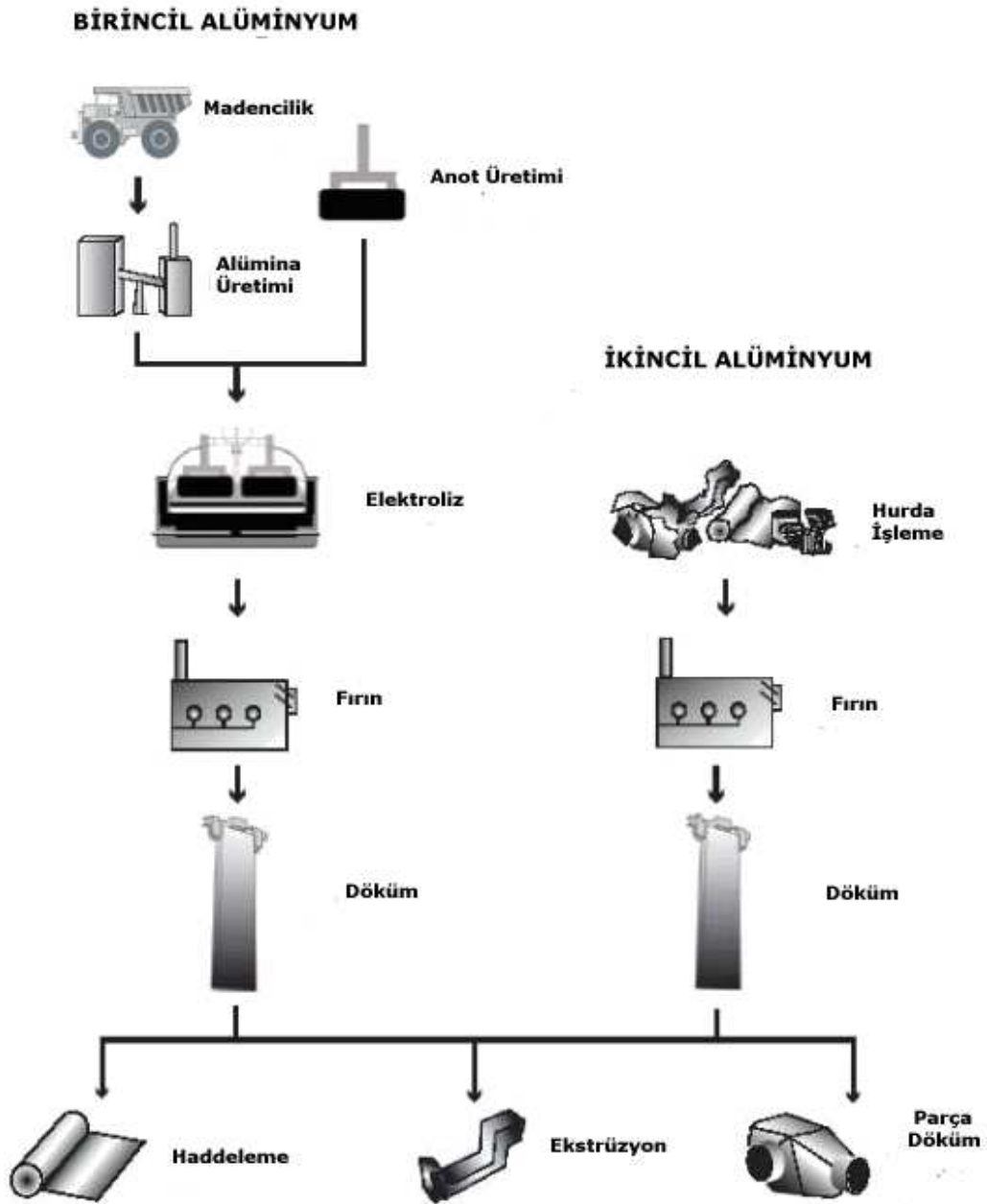
2.3. Alüminyum Üretimi

Alüminyum geri dönüşüm çemberi ile tekrar geri kazanılır. Alüminyum, hammaddeden üretim için gerekli enerjinin sadece %5'i kadar bir enerji ile tekrar ergitilebilir ve yepyeni ürünler için kullanılabilir. Bu sonsuz bir çevrimdir. Konstrüksiyon parçalarının %70'i, proses ve işleme hurdalarının %100'ü tekrar geri kazanılabilir.

Alüminyum bazı metallerle birlikte bileşik yapmış şekilde yer kabuğunun %8'ini oluşturmaktadır. Günümüzde demirden sonra en çok kullanılan metal olarak bilinmektedir. Alüminyum boya tespit edici, ateşe karşı koruyucu anlamına gelen "ALÜM" kelimesinden türemiştir. Alüminyum bileşiklerinin milattan önce dahi kullanıldığı ve birçok maddenin bileşimine girdiği bilinmektedir.

Alüminyumun oksijenle çok şiddetli yanma eğilimi nedeniyle redüksiyonunun karbonla yapılması mümkün değildir. Saf alüminyumun üretimi genel olarak iki kademe yapılır: 1. Alüminyum oksidin elde edilmesi, 2. Metalik alüminyum üretimi için ergimiş metal elektrolizi ile oksitlerin redüksiyonu.

Bunların dışında termomekanik işlemler olmasına rağmen, bu yöntemler teknolojik öneme sahip değildir. Alüminyum üretimi önceki yüzyılın sonundan itibaren bilinmekte olup, üç ana kademe yapılır. Şekil 2.1'de alüminyum üretiminde uygulanan yöntemler şematik olarak gösterilmiştir. Birinci aşama boksit madeninden Al_2O_3 elde edilmesidir. Bu aşama Bayer prosesi olarak adlandırılan bir prosesle gerçekleştirilir. Bayer prosesi çeşitli madencilik aşamalarını içerir. Ancak alüminadan (Al_2O_3) alüminyum üretimi ise 950–970 °C arasında alüminyum oksidin redüksiyonuna dayanır. Bu aşama Hall-Heroult yöntemi olarak bilinen bir indirgeme işlemi olan elektroliz aşamasıdır. Buradan çıkan alüminyum %99.5-99.9'dan daha fazla saf değildir. Saf alüminyum (%99.99) elde etmek için ayrıca rafinasyon işlemi uygulanmalıdır [11].



Şekil 2.1. Birincil alüminyum üretiminin kademeleri: alümina ve alüminyum elde edilmesi

2.4. Alüminyumun Türkiye'deki Gelişimi

Gelişmiş ülkeler ile karşılaştırıldığında alüminyumun ülkemizde kısa bir geçmişi vardır. 1956 yılında, çok küçük ve az sayıdaki atölyelerde, 100 ton

kadar alüminyum işlendiği söylenmektedir. 1960'lardan itibaren, özellikle dayanıklı tüketim mallarının üretimine başlanması ve otomotiv sektöründeki gelişmeler, alüminyuma olan talebi arttırmış, 1970 yılı tüketimi olan 20 000 tondan 1992 yılında 150 000 tona, 1998'de ise 200 000 tona yükselmiştir.

Türkiye'de 2.5 kg./yıl olan kişi başına tüketim, gelişmiş ülkelerdeki 30 kg./yıl seviyesindeki tüketimin çok altındadır. Ancak, kişi başına 30 kg./yıl gibi seviyelere çıkabilen kullanım, sektörün önünde büyük bir gelişme alanı olduğunu göstermektedir. Artan talebe bağlı olarak, planlı ekonomiye geçişle birlikte, ülkemiz alüminyum ihtiyacının yurt içinden karşılanması amacı ile cevher araştırmalarına girilmiş, MTA tarafından Seydişehir'in Mortaş ve Doğankuzu mevkieilerinde işletilebilir rezervler tespit edilerek, sahalar 1965 yılında, işlenmek amacı ile Etibank'a devredilmiştir.

Boksit cevherinin değerlendirilmesi amacı ile kurulacak bir birincil alüminyum tesisi için, bu alanda söz sahibi ülke ve kuruluşlarla yapılan temaslar sonucu, 1967 yılında Etibank ile TİAJPROMEXPORT (SSCB) arasında, proje, teçhizat ve gerekli diğer mühendislik konularını kapsayan bir anlaşma imzalanmıştır. 5 Ağustos 1967 tarihinde temeli atılan Seydişehir Alüminyum tesislerinden ilk alümina üretimi Mayıs 1973'de, ilk sıvı alüminyum üretimi de 21 Ekim 1974'de gerçekleştirilmiştir.

Tesisler yılda 461 000 ton boksit işleyerek 200 000 ton alümina ve 60 000 ton sıvı alüminyum üretebilecek kapasitededir. Alüminanın 120 000 tonu sıvı alüminyum üretiminde kullanılmakta, kalan 80 000 tonun büyük çoğunluğu ise ihraç edilmektedir.

1977 başına kadar, tam kapasitede sıvı alüminyum üretmek amacı ile tüm birimlerin işletmeye alınmasına rağmen, özellikle en önemli girdi olan enerjinin sağlanmasındaki sorunlar nedeniyle kapasite daha sonra düşürülmüştür. Tam kapasite üretime ilk defa 1986 yılında ulaşılmıştır.

Seydişehir Alüminyum Tesislerinin yıllar itibarıyla sıvı alüminyum üretimi Çizelge 2.4’de gösterilmektedir [10].

Çizelge 2.4. Seydişehir tesisleri sıvı alüminyum üretimi

Yıl	Üretim (Ton)	Yıl	Üretim (Ton)
1974	-	1987	41.685
1975	18.149	1988	56.500
1976	37.508	1989	58.564
1977	51.331	1990	60.902
1978	32.288	1991	55.802
1979	31.720	1992	58.581
1980	33.574	1993	58.501
1981	39.985	1994	59.754
1982	36.521	1995	61.513
1983	30.381	1996	62.100
1984	37.887	1997	62.020
1985	54.150	1998	61.803
1986	60.003		

Seydişehir’in sıvı alüminyum üretiminde tek kuruluş olması ve kapasitesinin yurt içi talebi karşılayamaması sonucu talep ile üretim arasındaki fark ise 1985 yılından beri ithalatla karşılanmaya çalışılmaktadır. Ülkemizin birincil alüminyum üretim kapasitesini arttırmak için, yeni tesisler kurulması veya Seydişehir’in kapasitesinin artırılması yönünde projeler geliştirilmiş olup, daha çok finansal nedenlerden dolayı bu projeler uygulanamamıştır.

2.5. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırma ve Temper Tasarımları

Alüminyuma katılan alaşım elemanları, mukavemet özelliklerini yükseltir. Başlıca alaşım elemanları: Magnezyum (Mg), manganez (Mn), silisyum (Si),

bakır (Cu), çinko (Zn) ve bazen de kurşun (Pb), nikel (Ni) ve titanyumdan ibarettir. Alaşım elemanları, alaşım içinde üç farklı halde bulunur [9];

- 1) Alüminyum içinde katı halde eriyebilirler (katı eriyik),
- 2) Katı halde alüminyumda erimeyip veya sınırlı eriyip mekanik bir karışım teşkil ederler,
3. Alüminyumla veya birbirleriyle metaller arası veya kimyasal bileşik teşkil ederler.

Alüminyum alaşımları üretim metotları esas alınarak dövme ve döküm olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Bu da, imal usullerinin farklı ihtiyaçları olduğunu gösterir. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alaşımlar, döküm alaşımlardan oldukça farklı mikroyapı ve bileşimlere sahiptirler. Her ana grup içindeki alaşımlar, ısıtılabilir ve yapılamaz alaşımlar olmak üzere iki alt gruba ayrılabilirler. Isıtılabilir alaşımlar, yaşlandırma işlemi ile sertleştirilebilirken, ısıtılmayan alaşımlar ise katı eriyik sertleşmesi, pekleşme ve dağılım (dispersiyon) sertleştirilmesi ile mukavemetlendirilirler.

Dövme alaşımlarında dört basamaklı sayısal bir tasarım sistemi, alüminyum ve alüminyum alaşımlarını dökülmüş ve dökümhane ingotu şeklinde tanıtmada kullanılır. İlk basamak alaşım grubunu gösterir. Bir kesir işaretiyle diğerlerinden ayrılan son basamak ürünün biçimini, örneğin dökümler veya ingotu gösterir. Orijinal alaşım veya empurite sınırlarının bir modifikasyonu sayısal tasarımdan önce bir seri harfle gösterilir. Harf "x" deneysel alaşımlar için kullanılır. Bununla beraber alüminyum döküm alaşımları daha yaygın olarak üç basamakla tanımlanır. Dövme ve döküm alüminyum alaşımları Çizelge 2.5' de belirtilen numara sistemi ile tanımlanmaktadır [8].

Temper tasarımları; alaşım tasarımlarını takip eder ve ön ek (örneğin 3003-Q) ile ayrılır. Bir temel temperin alt bölümleri tekrar bir veya daha çok ilave basamaklarla (örneğin 3003-H14) takip edilir.

Çizelge 2.5. Alüminyum alaşımları için tanımlama sistemi

Dövme Alaşımlar	
1XXX Ticari saflıkta Al(>%99 Al)	Yaşlandırılmaz
2XXX Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3XXX Al-Mn	Yaşlandırılmaz
4XXX Al-Si ve Al-Mg-Si	Eğer Mg varsa yaşlandırılabilir
5XXX Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6XXX Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7XXX Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
Döküm Alaşımlar	
1XX.X Ticari saflıkta Al	Yaşlandırılmaz
2XX.X Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3XX.X Al-Si-Cu ve Al-Mg-Si	Biraz yaşlandırılabilir
4XX.X Al-Si	Yaşlandırılmaz
5XX.X Al-Mg	Yaşlandırılmaz
7XX.X Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir
8XX.X Al-Sn	Yaşlandırılabilir

Temel temper durumları:

- F Üretildiği gibi. Pekleşme üzerine kontrol yok; mekanik özellikler sınırlaması yok
- O Tavlanmış ve yeniden kristallenmiş. En düşük dayanım ve en yüksek sünekliğe sahip temper
- H Pekleştirilmiş (alt bölümler için aşağıya bakınız)
- T F ve O'dan başka kararlı temperler üretmek için ısıtılmış uygulanmış (alt bölümler için aşağıya bakınız)

Pekleştirilmiş alt bölümler:

- H1x Sadece soğuk şekillendirilmiş (x soğuk şekillendirme miktarına ve mukavemetlendirmeye işaret eder).
- H12 Soğuk şekillendirme, O ve H14 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar.
- H14 Soğuk şekillendirme, O ve H18 temperleri arasında bir çekme dayanımı sağlar.
- H16 Soğuk şekillendirme, H14 ve H18 temperleri arasında ortalarda bir çekme dayanımı sağlar.
- H18 Soğuk şekillendirme, yaklaşık %75 azalma sağlar.
- H19 Soğuk şekillendirme, H18 temperleme ile elde edilen çekme dayanımından 13.789 MPa fazla dayanım sağlar.
- H2x Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlanmış.
- H3x Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş.

Isıl işlem uygulanmış alt bölümler:

- W Çözündürme uygulanmış.
- T Yaşlandırılmış.
- T1 Fabrikasyon sıcaklığından soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış.
- T2 Fabrikasyon sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal olarak yaşlandırılmış.
- T3 Çözündürme uygulanmış, soğuk şekillendirilmiş ve doğal olarak yaşlandırılmış.
- T4 Çözündürme uygulanmış ve doğal olarak yaşlandırılmış
- T5 Fabrikasyon sıcaklığından soğutulmuş ve yapay olarak yaşlandırılmış.
- T6 Çözündürme uygulanmış ve yapay olarak yaşlandırılmış.

- T7 Çözündürme uygulanmış ve aşırı yaşlandırma ile kararlı hale getirilmiş.
- T8 Çözündürme uygulanmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış.
- T9 Çözündürme uygulanmış, yapay olarak yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş.
- T10 Fabrikasyon sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış.

2.5.1. Alüminyum – bakır alaşımları (2XXX Serisi)

Bu grup alüminyum alaşımlarında bakır temel alaşım elemanıdır. Optimum özellikler için bu alaşımlara çökeltme ısı işlemi uygulanır. Çözeltiliye alınmış durumda mekanik özellikleri düşük karbonlu çeliklerinki ile aynıdır ve bazen daha yüksek olabilir. Bazı durumlarda mekanik özellikleri daha fazla arttırmak için çökeltme (yaşlanma) ısı işlemi uygulanır. Bu işlem, alaşımın sünekliğini azaltırken akma dayanımını artırır, çekme dayanımına büyük bir etkisi olmaz.

2XXX grubundaki alüminyum alaşımlarının korozyon dirençleri diğer birçok alaşımdaki kadar iyi değildir ve belirli şartlar altında taneler arası korozyona maruz olabilirler. Bu nedenle, levha şeklindeki bu alaşımlar çoğunlukla yüksek saflıktaki alüminyum veya 6XXX grubu magnezyum-silisyum alaşımı ile kaplanarak, çekirdek malzemenin galvanik korunması sağlanır ve böylece bu alaşımların korozyon dirençleri büyük oranda artırılır.

2XXX grubu alaşımlar özellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranlarının gerekli olduğu parçalar ve yapılar için uygundur. Çoğunlukla araç ve uçak tekerlerinde, araçların süspansiyon parçalarında, uçak gövdelerinde ve 150°C'ye kadar olan sıcaklıklarda dayanım gerektiren parçalarda kullanılmaktadır. Bu alaşımların kaynaklanabilirliği kısıtlıdır, ancak bu gruptaki bazı alaşımlar üstün işlenebilirlik özelliğine sahiptirler [12].

2.5.2. Alüminyum – mangan alaşımları (3XXX Serisi)

Bu alaşımlar, saf alüminyum ile yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları arasındaki boşluğu doldururlar. Zira %1.5 mertebesindeki bir mangan ilavesi, mukavemetin önemli miktarda (100 ila 170 N/mm²) artmasına, fakat sünekliğin ise cüzi miktarda azalmasına sebebiyet verir. Ticari alüminyum mukavemetinden daha yüksek bir mukavemete sahip ve işlem sırasında sertleşebilen bir alaşımı gerektiren yerlerde bu cins alaşımlar kendilerine uygulama alanı bulurlar [13].

2.5.3. Alüminyum – silisyum alaşımları (4XXX Serisi)

4XXX serisi Al alaşımlarında ana alaşım elemanı silisyumdur (toplam silisyum oranı %0.6'dan %21.5'e kadardır). Yalnızca bu seri hem ısıtılabilir hem de ısıtılabilir tabi tutulamayan alaşımlar içermektedir. Bu alaşımlar 172-379 N/mm²'lik çekme mukavemetine sahiptir.

Silisyum alüminyuma eklendiğinde ergeme sıcaklığını yükseltir ve ergimiş durumdaki akışkanlığını iyileştirmiş olur. Özellikle, yaklaşık %12 Si içeren alaşımın akışkanlığı yüksektir ve bu açıdan döküm kabiliyeti iyidir ve ısıtılabilir özelliği de iyi olduğundan kaynak teli olarak kullanımı oldukça yaygındır. Bu karakteristikler, tüm ergitme kaynakları ve lehimlemenin her ikisi için de kullanılan ek kaynak metalleri için istenir. Bundan dolayı bu seriler, çoğunlukla ek kaynak metali olarak kullanılırlar [14].

2.5.4. Alüminyum magnezyum alaşımları (5XXX Serisi)

İkili alüminyum magnezyum alaşımları ısıtılabilir uygulanamayan 5XXX serileri için esas oluşturmaktadır. Magnezyum, alüminyumda önemli bir eriyebilirliğe sahip olmakla beraber (451 °C' de % 14.9) katı eriyebilirlik sıcaklık düştükçe azalır. Alüminyum magnezyum alaşımları %7 Mg'dan daha az konsantrasyonlarda kayda değer çökelme sertleşmesi göstermezler. Buna

karşın magnezyum katı eriyik mukavemetlenmesi ile alüminyum önemli ölçüde mukavemetlendirir ve bu yüksek pekleşme özelliği sağlar. Al-Mg alaşımları geniş bir aralıkta dayanım, iyi şekillendirilebilirlik, kaynak özellikleri ve yüksek bir korozyon direncine sahiptir. Argon korumalı ark kaynak işlemi kullanıldığında iyi kaynak tepkisi Al-Mg yüksek dayanım alaşımlarının üstün bir özelliğidir [11].

2.5.5. Alüminyum – silisyum – magnezyum alaşımları (6XXX Serisi)

Bu seri ısıtılma işlemine tabi tutulabilir ve 124-221 N/mm²'lik 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 ki silisyum tavlama çözünerek magnezyum silikat bileşimi oluşur, bu alaşımlar doğal olarak çatlama duyarlılığı nedeniyle (ek kaynak metali kullanılmadan) kaynak edilmemelidir. Ark kaynağı yöntemi süresince uygun miktarda ek kaynak metali kullanmak esas metalin ısılanmasını sağlar, bu 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 [14].

2.5.6. Alüminyum – çinko alaşımları (7XXX Serisi)

Bu alaşımlar bütün alüminyum alaşımları içinde en mukavemetli olanlarıdır ve İkinci Dünya Savaşı esnasında hava kuvvetlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Bileşim bakımından % 8'e kadar çinko, % 4 magnezyum, % 3 bakır ve küçük miktarlarda krom, titan, manganez veya nikel ihtiva ederler. Bu alaşımlar imal güçlükleri arz ederler ve şekillendirme işlemi, ergitme ısıtılma işleminden hemen sonra yapılmalıdır. Bunu çökelme ısıtılma işlemi takip eder [13].

2.6. Alüminyum ve Alaşımlarının Isıl İşlem Özellikleri

Arzu edilen bazı özellikleri temin etmek gayesiyle alüminyum alaşımları üzerinde ısıtım işlem etkileri geniş ölçüde denenmiştir. Bir cins ısıtım işleminin tatbiki ile mukavemet ve sertlik arttırılabildiği gibi, diğer bir ısıtım işlemin uygulanması ile sünekliğin ıslah edilmesine yarar.

Isıtım işlem, katı metallerin ısıtılması ve soğutulmasını icap ettiren ve kimyasal bileşimde herhangi bir işlem olarak tarif edilebilir. Alüminyum alaşımlarının bahis konusu olduğu hallerde üç cins işlem yapılabilir.

Eritme ısıtım işlemi bir alaşımı, tayin edilen bir zaman zarfında, bazı yapı bileşenlerinin katı eriyik teşkil ettiği bir sıcaklığa ısıtmak ve bu bileşenleri çözelti halinde tutmak maksadıyla, (aşırı doymuş olarak muhafaza edebilmek için) genellikle su vermek suretiyle bu sıcaklıktan süratle soğutulmaktan ibarettir.

Çökeltme ısıtım işlemi, aşırı doymuş bir katı eriyikte bulunan yapı bileşenlerinin çökmesini sağlamak gayesiyle alaşımı alçak bir sıcaklığa yeniden ısıtmaktan ibarettir. Bu işlem genel olarak “ yaşlanma ” veya “ yaşlanma sertleşmesi ” olarak bilinir.

Tavlama işlemi, yapıda mevcut tanelerin yeniden kristalleşmesini temin etmek amacıyla alaşımı eritme ve çökeltme ısıtım işlemi sıcaklıkları arasında bir dereceye kadar ısıtmaktan ibarettir. Bu ameliye, soğuk işlemin (veya yaşlanma sertleşmesinin) sertleşme etkilerini bertaraf eder. Herhangi bir metalin, haddeme, çekme veya presleme gibi bir soğuk işleme tabi tutulması, sertliği ve çekme mukavemetini arttırır fakat sünekliğini azaltır. Metalin soğuk olarak işlenmesine devam edebilmek için tavlama işlemi tatbik edilerek metal yumuşatılır.

Alüminyum alaşımlarına eritme ısı işlemi tatbik edilirken sıcaklığın çok sıkı bir şekilde kontrolü icap eder. Bu da, malzemeyi (şekli ve boyutu müsait olduğu zaman) ergimiş sodyum ve potasyum nitrat banyosuna daldırmakla elde edilir. Bu işlem için fırın da kullanılabilir. Bu takdirde fırın, sıcaklığın ısıtma bölgesinin her tarafına üniform bir şekilde dağılmasını temin edecek şekilde dizayn edilmiştir. Mekanik özelliklerde maksimum ilerlemeyi elde etmek için ısı işlem sıcaklığı mümkün olduğu kadar yüksek seçilir zira 500 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda alüminyum alaşımları yumuşak ve eğilmeye müsaittirler.

Süratli su verme işlemi de, uygun sıcaklık kontrolünün önemine eşittir. Zira genellikle yavaş su vermenin, istenilen fiziksel özellikleri meydana getirmesine rağmen, yavaş su verilmiş malzemenin korozyona mukavemeti, süratli su verilmiş alaşımlarinkine nazaran daha düşüktür [7]. Isı işlemin tipik bir alüminyum alaşımının mekanik özellikleri üzerine olan etkisi Çizelge 2.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.6. Isı işleme bağlı olarak mekanik özelliklerde meydana gelen değişimler

Uygulanan Isı İşlem	Emniyet Gerilmesi (%0.1) (Ton / İnç ²)	Çekme Mukavemeti (Ton / İnç ²)	% Uzama (2 inç üzerinde)
Tavlanmış tabaka	10	15	20
Eritme ısı işlemine tabii tutulmuş ve su vermeden hemen sonra deneye tabii tutulmuş	7-8	20-21	19
Eritme ısı işlemine tabii tutulmuş ve yaşlandırılmış	15		15
Eritme ve çökelme ısı işlemlerine tabii tutulmuş	26	30	8

3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAĞI

İmalat tekniğinde amaç, yalnızca malzemelerin birleştirilmesiyle parça elde edilmesi değildir. Aynı zamanda yapılan parçanın çalışma şartlarında bozulmaması ve görevini yerine getirmesi gerekir. Bu sebepten, kaynaklı bağlantılardan da bazı esasları yerine getirmesi istenir. Söz konusu esasların gerçekleşme derecesi, kaynaklanan malzemenin “kaynak kabiliyeti” olarak değerlendirilir [15]. Alüminyum ve alaşımlarının kaynak edilebilirliği; uygun kaynak metodu, birleştirme şekli ve dolgu metalinin belirlenmesine bağlıdır.

Alüminyum ve alüminyum alaşımları ergitme kaynak yöntemleri ile kaynak yapılabilir. Çeliklere kıyasla alüminyum malzemeleri kaynak yaparken, malzemeye has bazı özellikler dikkate alınmalıdır. Alüminyum malzemeler, yapısal çeliklere göre daha yüksek termik iletkenliğe sahip olduğundan kaynak nüfuziyeti daha düşük ve kaynak banyosunun gazlardan arınması daha geç olur. Sonuç olarak, kaynak dikişinde yetersiz ergime ve gözenekler oluşabilir. İş parçasını ön tav yaparak ve kalın kesitli malzemeleri kaynak esnasında da tavlayarak, bu tür kaynak hataları önlenabilir.

Kaynağa başlamadan önce, yüzeydeki alüminyum-oksit tabakası kaynak bölgesinden frezeleme yoluyla veya paslanmaz çelik fırça ile fırçalayarak tamamen temizlenmelidir. Kaynak ağzı yüzeyleri ve kaynağa yakın bölgeler (kaynak ağzının en az 50 mm yakını) temiz, yağsız ve kuru olmalıdır. İyi bir depolama ve mekanik işlemler sonrası kaynak yüzeylerinin özel bir yağ çözücü ile temizlenmesi, bu tür hazırlık işlerini kolaylaştırır. Bunların yanında, alüminyum malzemelerin kaynağında kullanılan el aletleri yalnız bu malzemeler için kullanılmalıdır.

Alüminyum malzemeler çok yansıtıcı bir yüzeye sahip olduğu için, kaynak esnasında oluşan ultraviyole radyasyon yanıklarından korunmak için koruyucu giysiler giymek zorunludur.

Dövme alüminyum alaşımlarından ısıtıl işlem yapılamayan 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileri, gaz korumalı ark işlemleri ile en kolay kaynatılabilen grupta yer almaktadırlar. Isıtıl işlem yapılabilen 2xxx ve 4xxx serisi alaşımlar özel ark kaynak teknikleri ile kaynatılabilirler. Yüksek mukavemetli ısıtıl işlem uygulanabilen 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının 7075 ve 7178 serileri kaynağı problem oluşturmaktadır. Bu alaşımlarda, ısıtılın tesiri altındaki bölgede (ITAB) sertlik, kaynatılan ana metale göre daha fazladır ve kaynak edildiklerinde, sıcak çatlama meydana gelme olasılığı yüksektir. Bu nedenle kaynakları tavsiye edilmez. Buna karşılık 7005 ve 7039 alaşımları kaynak için özel olarak geliştirilmişlerdir ve kaynak kabiliyetleri iyidir [16].

Alüminyumun kaynağında daha yoğun olarak kullanılan MIG ve TIG metodunun dışında gaz kaynağı, örtülü elektrod kaynağı, plazma kaynağı ve direnç kaynağı metotları kullanılmaktadır. Basit ekipmana ve düşük maliyete sahip olması nedeniyle, bazen saf alüminyumu ve bazı alüminyum alaşımlarını kaynak yapmak için gaz (oksi-asetilen) kaynağı kullanılmaktadır. Kaynak gazları (yanıcı gaz-oksijen) olarak genellikle asetilen ve oksijen gazları kullanılmaktadır. Alüminyumu örtülü elektrodla ile elle kaynak yaparak daha yüksek kaynak hızları elde edilir. 8 mm'den kalın malzemeleri kaynak yaparken, gözeneksiz ve iyi bir birleştirme sağlayabilmek için en az 200°C'ye ön tav yapılması tavsiye edilir. Kaynak dikişinin korozyon direncini korumak için, tüm cüruf kalıntılarının temizlenmesi gereklidir. Alüminyumun kaynağında kullanılan bir diğer önemli kaynak metodu ise gaz altı kaynağıdır. Bu kaynak metodu TIG ve MIG yöntemlerini içermektedir. Bu metotların havayı kaynak banyosundan uzak tutmanın yanında, koruyucu gazın, arkın kararlılığı ve sonuçtaki kaynak kalitesi üzerinde çok büyük etkisi vardır. Şu ana kadar Argon ve Helyum asal gazları ayrı ayrı veya karışımları alüminyumun kaynağında çok iyi sonuçlar vermiştir. Fakat saf argonun, Ar+He karışımına göre daha sessiz ve kararlı bir arkı vardır. Diğer taraftan Ar+He karışımı kullanımı, aynı kaynak parametrelerinde daha yüksek performanslı kaynak arkı sağlarlar. Ancak MIG veya TIG kaynak yöntemlerinin kullanımı parça

kalınlığı, akım şekli gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Ayrıca alüminyumun kaynağında plazma ve direnç kaynağı yöntemleri de kullanılmaktadır [17].

3.1. Ergitme Kaynak Yöntemleri

3.1.1. Gaz (Oksi-Asetilen) kaynağı

Kaynak için gerekli biri yanıcı, diğeri yakıcı olan gazların yakılmasıyla oluşan alevden faydalanılarak yapılan kaynağa gaz kaynağı adı verilir. Basit ekipmana ve düşük maliyete sahip olması nedeniyle, bazen saf alüminyum ve bazı alüminyum alaşımlarını kaynak yapmak için bu yöntem kullanılmaktadır. Yanıcı gaz olarak oksijen, yakıcı gaz olarak genellikle asetilen kullanılmaktadır.

Alüminyum ve alaşımlarının gaz kaynağı en eski birleştirme yöntemlerinden birisidir ve her tür hafif metale uygulanabilir. Bu yöntemde, oksi-asetilen alevi ısıyı bölgesel olarak yoğunlaştırabildiği için hidrojen-oksijen alevinden daha az çarpımalara yol açar. Oksi-asetilen alevinin en sıcak noktasında 3200°C'lik sıcaklık elde edildiği için, yöntem kalın parçaların birleştirilmesinde kullanılabilir. Hidrojen-oksijen alevi de ince parçaların kaynağında kullanılabilir (2000°C). Hidrojen-oksijen alevi Al-Mg alaşımlarında gözenekliliğe yol açar. Magnezyum alaşımlarında, ergime akışını engelleyen oksitlenme meydana gelir. Hafif metallerin kaynağında hafif, yani karbürleyici alevle çalışır. Kesinlikle oksitleyici alevden kaçınılmalıdır [16].

Alüminyum ve alaşımlarının gaz eritme kaynağı 0.75-25 mm'ye kadar parçaların kaynağında rahatlıkla kullanılmaktadır. Daha kalın parçaların bu kaynak yöntemiyle birleştirilmesinde önemli problemler oluşturmaktadır. Örneğin alüminyum ısı iletme kabiliyeti yüksek olduğundan kaynak esnasında malzemede önemli derecede çarpımlar oluşabilmektedir. 0.75 mm'den ince parçaların kaynağında ise genellikle TIG kaynak yöntemi kullanılır [16].

Gaz kaynağının avantajları şöyle sayılabilir: Ucuz, basit ve kolay taşınabilir teçhizatlı, kullanılması çok kolay bir üfleç, bu üfleç erişilmesi güç yerlerde ve zor pozisyonlarda iyi kullanılabilir, ucuz dikiş ön hazırlığı ve nihayet, özellikle kalın sacların çok pasolu kaynağında, dikişlerin sıcak olarak çekiçlenebilmesi olanağı ki, böylece mükemmel düz ve kolay temizlenebilir yüzeyler elde edilir. Dezavantajları da, dikiş içine girmelere neden olabilecek bir dekapanın kullanılması, bu dekapanın korozyona sebebiyet vermesi nedeniyle bunun artıklarının temizlenmesi gereği (pahalı kaynak sonrası işlemler gerektirmesi); dikişin her iki yanında ITAB'de, ıslah edilmiş veya sertleştirilmiş metal alaşımlarında iş parçası düzeyinde zayıf mukavemetli bölgeler oluşturması ve nihayet ergitme kaynağında meydana gelen büyük çarpılmalar için pahalı düzeltme işlemlerinin gerekmesidir [16].

3.1.2. Elektrik ark kaynağı

Kaynaklı bağlantı için gerekli ısıyı elektrotlar arasında oluşturulduğu ve ark vasıtasıyla sağlandığı eritme kaynağı türüne elektrik ark kaynağı adı verilir.

Örtülü elektrotla elektrik ark kaynak yöntemi ile bütün alüminyum türleri ile ısı işlem yoluyla sertleşmeyen alaşımları kaynak etmek mümkündür. Alüminyum, özellikle yüksek sıcaklıklarda kuvvetli oksijen emme eğilimi gösterir. Her ne kadar yüzeyde oluşan oksit tabakası faydalıysa da kaynak işlemi sırasında büyük problemler çıkarır. Bunun nedeni, yüzeyde oluşan oksidin ergime derecesinin (2100°C), alüminyumun ergime derecesinden çok fazla olmasıdır. Kaynak sırasında yüzeydeki oksidin ergimesi için fazla ısı gerekir. Oksidin ergimesi esas gerecin bir anda eriyerek çökmesine neden olur. Bu sorunu gidermek için, kaynak yapılacak alüminyum gerecin yüzeyindeki oluşan oksit tabakasının giderilmesi gerekir. Alüminyum alaşımlarının çekme gerilmelerinin yüksek olması ve birleştirilecek parçaların sabitlenmediği takdirde kaynak metalinde sıcak çatlaklar oluşmasına neden olur. Ön tavlama yaparak, birleşme yerinin tasarımını değiştirerek ve daha uygun elektrot seçilerek çatlaklar en aza indirilir [18].

Alüminyum gereçler zorunlu olmadıkça puntalanmaz ve tek pasoda kaynak çekilmesi tercih edilir. Çünkü alüminyumun sıcaklık karşısında hemen oksitlenmesi, puntalama ve birden fazla dikiş çekilmesiyle birlikte her defasında temizleme işlemi gerektirecektir. Bundan dolayı alüminyum gereçler ağırlıklarla, çeşitli sabitleme elemanlarıyla sabitlenir. Alüminyum puntalama ve dikişten sonra elektrot ucunda oluşan krater elektrotun ucunu kapatır ve arkın oluşmasını engeller. Bu yüzden elektrot ucundaki krater yan keskiyle açılır [18].

Alüminyum elektrotu kaplayan örtü çok inatçı, yani ergimesi güç olduğundan kaynak dikişinin içerisine girer ve kaynak metalinin soğumasıyla dikiş içerisinde cüruf kalıntısı meydana getirir. Meydana gelen bu cüruf kaynak metalinin dayanımını düşürerek çatlamasına neden olur. Bu nedenle daha yüksek hızda kaynak yapılmalıdır [18].

3.1.3. TIG kaynağı

Endüstride alüminyum alaşımlarının kaynağında en çok kullanılan yöntemlerin başında TIG ve MIG kaynakları gelmektedir. TIG kaynağı, ergimeyen (tükenmeyen) tungsten bir elektrod ile iş parçası arasında meydana gelen ark ve kaynak bölgesinin de asal bir gaz (argon, helyum, argon-helyum karışımı) tarafından korunduğu bir gazaltı kaynak yöntemidir. Bu kaynak yönteminde yüksek kalitede birleştirmeler elde etmek mümkündür. TIG kaynağı en çok, alüminyum, magnezyum, bakır ve titanyum gibi diğer ergitmeli kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri oldukça güç olan düşük yoğunluklu metallerin kaynağında kullanılır [19].

TIG kaynağında, doğru veya alternatif akım kullanılabilir. Fakat alüminyum ve magnezyum alaşımlarının kaynağında alternatif akım kullanılması gerekir [15].

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 [15].

Yaşlandırma ile sertleştirilmeyen alaşımlar her hangi bir ilave metal kullanmadan da kaynak yapılabilir. Alüminyum malzemelerin TIG kaynağı alternatif akımda ve argon koruyucu gazı kullanarak yapılır. Mekanize TIG kaynağı ilave metal kullanarak veya kullanmadan da yapılabilir.

3.1.4. MIG kaynağı

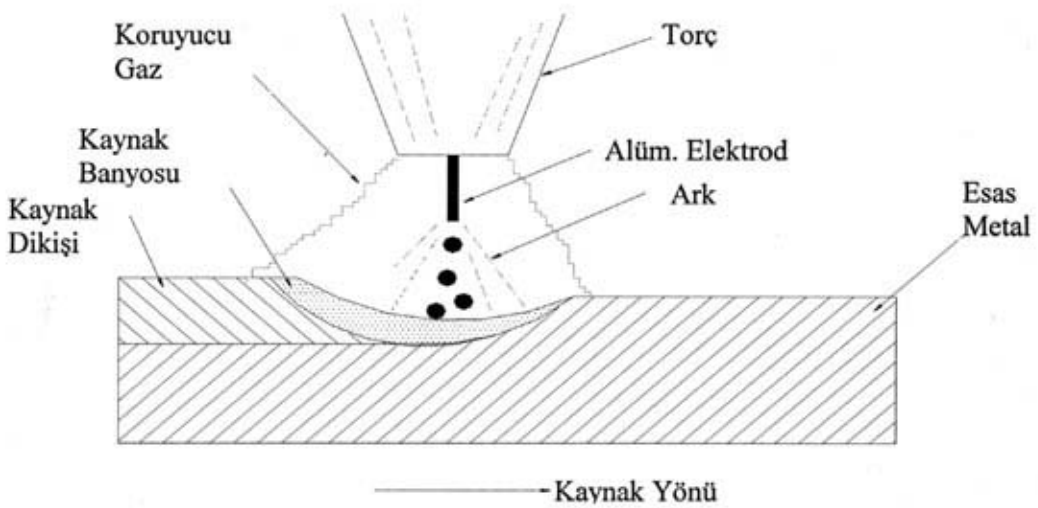
Soy gaz atmosferi altında eriyen elektrodla yapılan bu gazaltı kaynağı türü, SIGMA kaynağı olarak da bilinir. Soy gaz olarak genellikle, argon gazı kullanılmaktadır. MIG sembolü, Metal Inert Gas ifadesinin baş harflerinin alınmasıyla oluşturulmuştur [15].

Günümüzde alüminyum konstrüksiyonunda en çok kullanılan kaynak metodu, eriyen elektrodla bir koruyucu gaz veya gaz karışımı atmosferi altında yapılan MIG kaynak tekniğidir. Eriyen elektrod ile yapılan MIG gaz altı kaynağı çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. MIG kaynak yönteminin 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. Ayrıca her geçen gün bu metodun pazar payı yüzdesi artmaktadır. 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 kaynağına göre daha yüksek olduğu için çok ince levhalar ancak darbeli akım yöntemi uygulanarak kaynak yapılır [17].

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 dolayısı 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 erimeden dolayı tam kaynamamış bölgeler meydana gelir. Kaynak dikişi düz veya dar zikzaklarla çekilmelidir. Geniş zikzaklar kaynak dikişinin aşırı oksitlenmesine neden olduğundan kullanılmamalıdır. İnce 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 parçala kaynak öncesi ön tav uygulamak gerekir. Genellikle 15 mm'den daha kalın parçalara uygulanan ön tav sıcaklığı 200°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 tavı uygulanır ve kaynak sonrası tekrar ısıl işlem uygulanarak sertleştirilir [17].

MIG kaynak yönteminin uygulanması çok basittir. Toprak kablosunu iş parçasına veya kaynak masasına bağlayarak ve torç ucundaki tel elektrodu kaynak ağzına değdirerek 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 aranan kaynak yöntemi haline gelmiştir. MIG kaynak yöntemindeki ark bölgesi şematik olarak Şekil 3.1’de gösterilmiştir [17].



Şekil 3.1. MIG kaynak yöntemindeki ark bölgesi

Kaynağa başlamadan önce, yüzeydeki alüminyum-oksit tabakası kaynak bölgesinden frezeleme yoluyla veya paslanmaz çelik fırça ile fırçalayarak tamamen temizlenmelidir. Kaynak ağzı yüzeyleri ve kaynağa yakın bölgeler (kaynak ağzının en az 50 mm yakını) temiz, yağsız ve kuru olmalıdır. İyi bir depolama ve mekanik işlemler sonrası kaynak yüzeylerinin özel bir yağ çözücü ile temizlenmesi, bu tür hazırlık işlerini kolaylaştırır. Bunların yanında, alüminyum malzemelerin kaynağında kullanılan el aletleri yalnız bu malzemeler için kullanılmalıdır.

MIG yöntemi ile 4 mm'den büyük kesit kalınlığına sahip malzemeleri alın kaynağını veya köşe 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 [17].

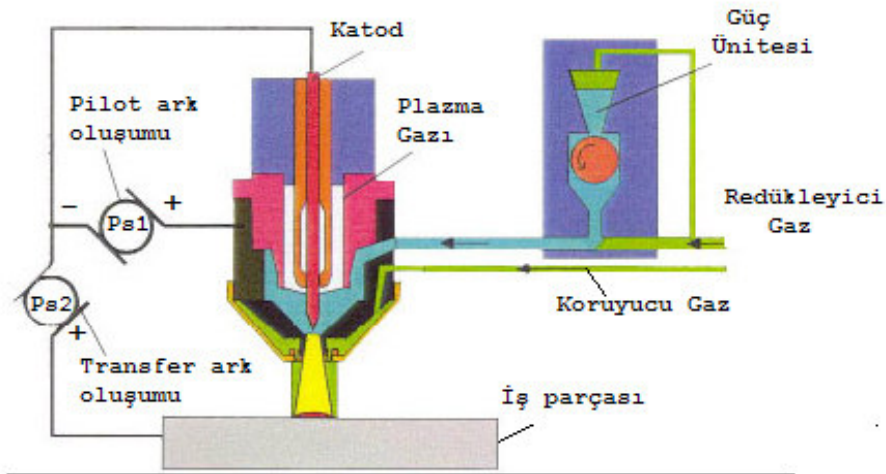
3.1.5. Plazma kaynağı

Kaynakta kullanılan plazmada gaz, elektrik arkı yardımıyla ısıtılarak iyonize olmaktadır. Bu tanıma göre ark kaynağı yöntemlerinde elektrik arkı bir plazma oluşturmaktadır. Isıl kesme ve kaynak işlemlerinde plazma olarak adlandırılan ark radyal doğrultuda sıkıştırılıp, büzülerek enerji yoğunluğu artırılmış arktır [20].

Plazma birleştirme kaynağı, kalın saçların küt alın birleştirilmelerinde ilave metal kullanmadan tatbik edilir. Kaynak hızı, TIG kaynağının yaklaşık iki katı kadardır. Plazma kaynağı ile hafif ve yüksek alaşımlı çelikler, nikel ve alaşımları, zirkonyum, bakır ve alaşımları birleştirilebilir. Mikroplazma donanımları ile 0.01 mm kalınlıktaki folyeler 0.5 amper akım şiddetiyle birleştirilebilir [15]. 0.03 mm'den 25 mm'ye kalınlıklar tek pasoda kaynak edilebilir ve şimdilik bu yöntem, bu kalınlıkta sınırlıdır. Ostenitik paslanmaz çeliklerde, alın kaynağı yapılabilecek azami sac kalınlığı 8-10 mm'dir. Kaynak bağlantıları, gayet iyi mekanik özellikler gösterirler ve gözenekli değildirler [20].

Alüminyumun plazma arkı ile kaynağında, kare dalgalı alternatif akım veren akım üreteçleri kullanılarak yüzeydeki oksit filmi kırılarak kaliteli kaynak dikişleri gerçekleştirilir. Alüminyumun plazma ark kaynağı oluk, yatay ve aşağıdan yukarıya dik pozisyonda uygulanabilir. Bu kaynak metodunda doğrudan kısa arklı bir plazma üflecinde sıkıştırılmış, enerji yoğunluğu büyük bir plazma elde edilir. Şekil 3.2'de yöntem şeması verilen plazma üflecinde çift gaz kullanılmaktadır. İçten verilen gaz, plazma gazı adını alır. Genellikle

asal gaz grubundan argon, plazma gazı olarak kullanılır. Koruyucu gaz, daha dıştan iş parçası ile üfleç arasına, plazmayı çepeçevre saracak şekilde verilir. Bu gaz genelde argon ve moleküler bir gaz (H_2 veya N_2) karışımıdır. Oluşan plazma iş parçasında derin nüfuziyet oluşturmaktadır. Tek pasoda herhangi bir dolgu metali kullanmadan, 8 mm'ye kadar kaynatmak mümkün olur. En çok kullanılan pozisyon oluk pozisyonu olmasına karşın, aşağıdan yukarıya doğru dik pozisyonda kaynak uygulamasında kaynak banyosu daha rahat kontrol edilir. Silindirik depolama tanklarının yapımında parçayı döndüren durum ayarlayıcısı (pozisyoner) kullanılarak oluk pozisyonunda kaynak yapılır. Ancak, gerektiği durumlarda örneğin, 4-5 mm kalınlığındaki alüminyum saclardan üretilen taşıyıcı kasalarda dik pozisyonda kaynak tercih edilir. Son yıllarda, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının plazma ark kaynağı daha derin nüfuziyet, daha az kaynak ağzı hazırlığı, daha az açılmal çarpılmaya neden olacak ısı girdisi ve az sayıda paso ile kaynak ağzının doldurulabilmesi gibi üstünlüklerinden dolayı TIG kaynağına göre daha çok kullanılır konuma gelmiştir [16].



Şekil 3.2. Plazma ark kaynağı

3.1.6. Elektron ışın kaynağı

Elektron ışını ile kaynakta gerekli ısı, elektron ışınlarından sağlanmaktadır. Elektron ışını ile temin edilen ısıнын veya gücün yoğunluğu, klasik kaynak usullerinden yüksektir. Elektrik ark kaynağında yüzeye bırakılan ısı, yarım daire şeklinde bir bölgeye yayılırken; elektron ışının yüksek ısı yoğunluğu sebebiyle, parçanın derinliklerine nüfuz eden kanal şeklinde bir ısı dağılımı ortaya çıkar [15].

Elektron ışını ile; mikron mertebesinde, 100 mm kalınlıklara kadar levhaların tek paso ile kaynağı mümkün olmaktadır. Diğer kaynak usulleriyle bu kadar kalın levhaların tek paso ile kaynağı yapılamamaktadır. Aynı zamanda; diğer kaynak metotlarına nazaran, kaynak hızı daha yüksektir. Kaynaktan sonra parçalarda meydana gelen distorsiyon miktarı da, yaklaşık olarak ark kaynağının onda biri kadardır [15].

Al alaşımlarının çoğu elektron ışın kaynağı ile kaynak edilebilir. Ancak 6061, 2004 ve 7075 gibi ısı işlem kabul eden bazı alaşımlarda çatlamaya rastlanabilir. Belli bir ısı girişi ile kaynak edilebilen kalınlıklar geniş ölçüde değişir. Böylece belli bir makine 5083 alaşımından 130 mm, 2219 alaşımdan ise sadece 50 mm kalınlığı kaynak edebilir. Küt alın birleştirmesi 150 mm kalınlığa kadar kullanılmıştır. Kalın kesitlerin tek pasoda kaynağında bütün kalınlık genişliğince aynı kaynak genişliğini tutmak uygun olur. Böylece iyi bir kök ergimesi ve minimum kusur sağlanmış olur [16].

3.1.7. Lazer kaynağı

Lazer ışını ile kaynak, bir eritme kaynağıdır. Güç yoğunluğu, malzeme kuvvetle buharlaşmadan eriyecek şekilde ayarlanmalıdır. Teorik olarak ilave metal kullanılmadan kaynak yapıldığı için, parçalar birbirlerine tam olarak yaklaştırılmalıdır. Ağızlar arasındaki açıklığın miktarı, erimiş banyo

genişliğinin 1/5'i kadar olmalıdır. Erimiş banyo genişliği ise, 100 mikron civarındadır. Lazer kaynağı, aşağıdaki üstünlüklere sahiptir [15] :

- 1) Enerji sevkini ve zamana bağlı kumandanın basitliği sebebiyle, hemen hemen bütün malzemeler birbirleriyle kaynak edilebilirler.
- 2) İyi bir şekilde otomatize edilebilir.
- 3) İş parçasının üzerine, hiçbir kuvvetin tesiri yoktur.
- 4) Atmosferde çalışma imkânı vardır.
- 5) Hiçbir takım aşınması yoktur.
- 6) Büyük çalışma aralıkları imkânı vardır.
- 7) Isının tesiri altındaki bölgeler dardır.
- 8) Zor ulaşılan yerlerde kaynak yapma imkânı vardır.

Alüminyum alaşımlarının lazer kaynağında temel zorluk, lazer ışın enerjisinin alüminyum tarafından emilmek yerine yansıtılma eğilimi göstermesidir. Yüksek lazer güçlerinin gelmesiyle, geliştirilmiş ışın odaklama sistemleri ve daha iyi ışın kalitesi, yeterli güç yoğunluklarıyla alüminyumun yüksek yüzey yansıtmasının üstesinden gelinmesini sağlamıştır. Bazı alaşımlar çatlamaya karşı dayanıksızdır ama kaynak koşullarının optimizasyonu ve dolgu telinin kullanımı sayesinde bu problem ortadan kalkabilir. Alüminyum alaşımlarının lazer ışını ile kaynaklanabilme özellikleri aşağıda belirtilmiştir [21]:

- 1) 5000 serisi alaşımlar - dolgu teliyle ya da dolgu teli olmadan iyi kaynaklanabilir,
- 2) 6000 serisi alaşımlar - dolgu teliyle ya da dolgu teli olmadan iyi kaynaklanabilir,
- 3) 2000 serisi alaşımlar - parametre geliştirmesi devam etmektedir,
- 4) 7000 serisi alaşımlar - parametre geliştirmesi devam etmektedir.

Alüminyumun lazer kaynağında, hidrojenin metal banyosunda tutulmasından dolayı gözeneklilik de oluşabilir. Bu sorun, doğru temizleme ve yeterli korumayla en aza indirgenebilir.

Alüminyumların lazer kaynağının şu anki ve gelecekteki uygulamaları, hızlı feribotları, alüminyum araba parçalarını ve uçak gövdesi yapılarını kapsamaktadır [21].

3.2. Katı Hal Kaynak Yöntemleri

3.2.1. Sürtünme kaynağı

Sürtünme kaynağı; parçaların ara yüzeylerinde sürtünme yoluyla oluşturulan mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilen ısı yardımıyla gerçekleştirilen bir kaynak türüdür. Genel olarak sürtünme kaynağı eksensel simetriye sahip ve daire kesitli parçaların birleştirilmelerinde kullanılmasına rağmen cihazların otomasyonu ve bilgisayarlı kontrol olanaklarının gelişmesiyle birlikte daire dışı kesitli parçaların birleştirilmesinde de kolaylıkla kullanılabilmektedir. Ayrıca, bu kaynak yönteminde malzeme ve enerji tasarrufu sağlamak gibi önemli bir avantaja da sahip olduğu için gittikçe artan oranlarda tercih edilmektedir. Yine bunlara ek olarak sürtünme kaynağıyla aynı veya farklı malzeme türleri, eşit veya farklı kesitli parçaların birleştirilmesi de kolaylıkla gerçekleştirilmektedir [22].

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. Sürtünme kaynak yöntemi genel olarak;

- Klasik (Sürekli Tahrikli) Sürtünme Kaynağı
- Volanlı (Atalet) Sürtünme Kaynağı şeklinde ikiye ayrılabilir [22].

Klasik (sürekli tahrikli) sürtünme kaynağında, birleştirilecek parçalardan biri eksen etrafında döndürülmekte diğeri ise aksenal yönden hareketli olarak

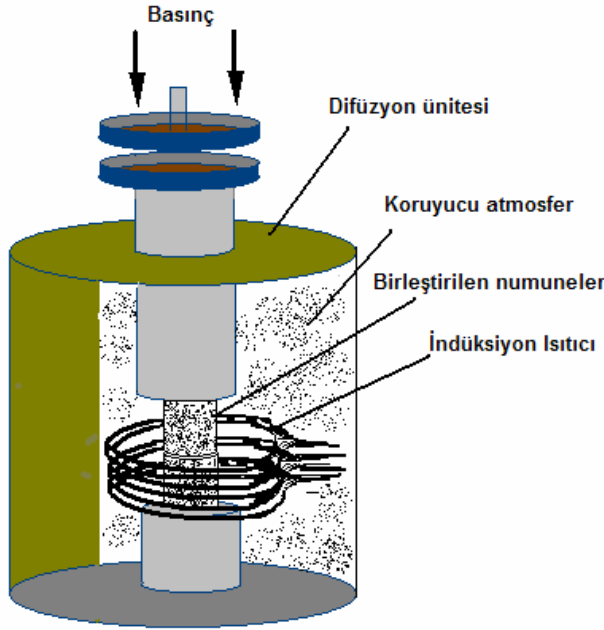
dönen parçaya belirli bir süre bastırılmaktadır. Sürtünen yüzeylerde yeterli sıcaklığa erişilince dönme işlemi ani olarak durdurulurken basınç arttırılmakta ve yumuşak malzeme bu yüksek basınç altında soğumaya bırakılmaktadır. Açıklamadan da anlaşılabilir gibi basınç iki kademeli olarak uygulanmaktadır. Basıncın birinci kademesine “Isınma veya Sürtünme Basıncı” ve ikinci kademesine de “Yığma veya Dövme Basıncı” denir [22].

Volanlı (atalet) sürtünme kaynağında, bir volandaki kinetik enerjiden yararlanılır. 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 [22].

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, basınçlı kapların geçiş bağlantılarında kullanılan alüminyumun paslanmaz çeliklerle kaynağı en yaygın iki kaynak kombinasyonudur.

3.1.2. Difüzyon kaynağı

Difüzyon kaynağı, özellikle uzay ve nükleer enerji alanında geniş çapta kullanılan bir kaynak yöntemidir. Difüzyon kaynağı, birbirleri ile temasta olan yüzeyler arasında minimum makroskopik deformasyon ile belirli bir süre ısı ve basınç uygulayarak kontrollü difüzyonla oluşturulan katı hal kaynağıdır. Bu tanımdan görüleceği üzere, difüzyon kaynağının birinci aşaması, birleştirilecek parçaların genelde bir vakum ortamında ısıtılması ve basma kuvvetinin uygulanmasıdır. İkinci aşamada ise metal atomlarının bir parçadan diğerine yayınması ve kuvvetli bir bağın oluşmasıdır. Bazı hallerde ince bir metal ara tabaka da kullanılmaktadır [15]. Şekil 3.3’de difüzyon kaynağı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Difüzyon kaynağı

Alüminyumun difüzyon kaynağında ara tabaka kullanılmayan difüzyon kaynaklarının çoğu 450-500 °C arasında ve 4 saate kadar çıkan sürelerde yapılır. Fakat bu işlemde ara bölgede oluşan oksit tabakası birleşebilirliği olumsuz etkilemektedir. Bunun için sıvı faz difüzyon işlemi (TLP) tercih edilir. Bu yöntemde, ara bölgeye daha düşük ergime dereceli ilave metal yardımıyla oksit tabakanın oluşumu önlenabilmektedir [16].

3.2.3. Direnç kaynağı

Direnç kaynağı; iş parçalarından elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda, basıncın tatbikiyle yapılan bir kaynak yöntemidir. Malzemedan geçen elektrik akımının meydana getirdiği ısıнын dışında, herhangi bir ısı tatbik edilmemektedir. Isı, kaynak edilecek kısımlarda meydana gelir ve basınç kaynak makinesindeki elektrodlar veya çeneler vasıtasıyla uygulanır. Bütün direnç kaynağı usulleri, uygun bir akım şiddeti-kaynak zamanı düzenlemesini gerektirir. Kaynak bölgesinin ısınma ve soğuma hızları, zaman ekonomisi bakımından mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır. Demir esaslı malzemelerde bu hız gevrek bir

kaynak dikişı meydana getirecek kadar yüksek ise, ayrıca bir temperleme işlemi gerekir [15].

Alüminyum alaşımlarının difüzyon kaynağında yüzey oksitlerinin dağıtılması ve çözünmesi sağlanmalıdır. Kaynak mukavemeti ve birleşme kolaylığı (gümüş, bakır veya altın-bakır alaşımı gibi) bir diğer metalden ince ara tabaka ile sağlanır. Sıcaklık, basınç ve zaman geniş aralıklarla kullanılabilir. Kaynak vakumda veya inert gaz atmosferinde gerçekleştirilmelidir [11].

3.2.4. Ultrasonik kaynak

Ultrasonik kaynakta birleştirilecek parçalar, hareketli ultrasonik frekansla titreşen sonotrot ile sabit duran bir altlık arasına konur ve az bir kuvvetle bastırılır.

Ultrasonik kaynak, bir pres (basınç) kaynağı yöntemidir. Kısmen veya tamamen mekanik hale sokulabilir. Kaynak işleminden sonra dikişlerin tekrar işlenmesine gerek yoktur.

Ultrasonik kaynak yöntemi; alüminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımları, plastik malzemeler, cam ve beton gibi malzemenin kaynağında kullanılmaktadır. Ayrıca farklı malzemelerin birleştirilmesinde başarı ile tatbik edilebilmektedir. Örneğin alüminyum ile seramik veya camın kaynağı gibi [15].

Tüm alüminyum alaşımları ultrasonik kaynakla kaynaklanabilir fakat kaynaklanabilirliğin derecesi alaşım ve temper durumuna göre değişir. Alüminyum alaşımları diğer metallerle bu proses ile birleştirilebilir. Ultrasonik kaynak direnç kaynağının gerektirdiğinden daha az yüzey hazırlama gerektirir. Alüminyumun yağ giderilmesi normal olarak uygundur. Uniform bir kaynak elde etmek için ısıtma işlemi alaşımları ve yüksek oranda magnezyum

içeren alaşımların kaynaktan önce yüzey oksitlerinin giderilmesi gerekmektedir [11].

3.2.5. 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. Patlamalı kaynak yöntemi ile nokta ve çizgisel şekilde birleştirmeler elde edilebileceği gibi, geniş levha yüzeylerinin birbirleriyle birleştirilmesi de sağlanır. Birleştirilecek yüzeylerin pisliklerden arınmış olması ve metalik temiz bir yüzeyin elde edilmesi kaynak için çok önemlidir.

Genel olarak %5'den fazla uzayan (genleşen) metal ve alaşımlar patlama kaynak yöntemi ile kaynak edilebilir. Çelik ve alüminyum, titan, tantal, zirkonyum veya bakır ve alüminyum gibi gevrek metaller arası bileşikler oluşturan malzemelerin kombinasyonunda da patlamalı kaynak başarı ile uygulanmaktadır [15].

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 [11].

4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Yeni geliştirilmiş malzemeler genellikle modern birleştirme tekniklerine ihtiyaç duyarlar. Son yirmi yılda alaşımların geliştirilmesinde bu malzemelerin kaynağı ile ilgili büyük ilerlemeler olmuştur. 1990'ların başında geliştirilen bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), geleneksel ergitmeli kaynak yöntemleriyle kaynağı güç olan özellikle yaşlanma sertleştirilmesine tabi tutulmuş alüminyum alaşımlarının kaynağında başarıyla kullanılmıştır.

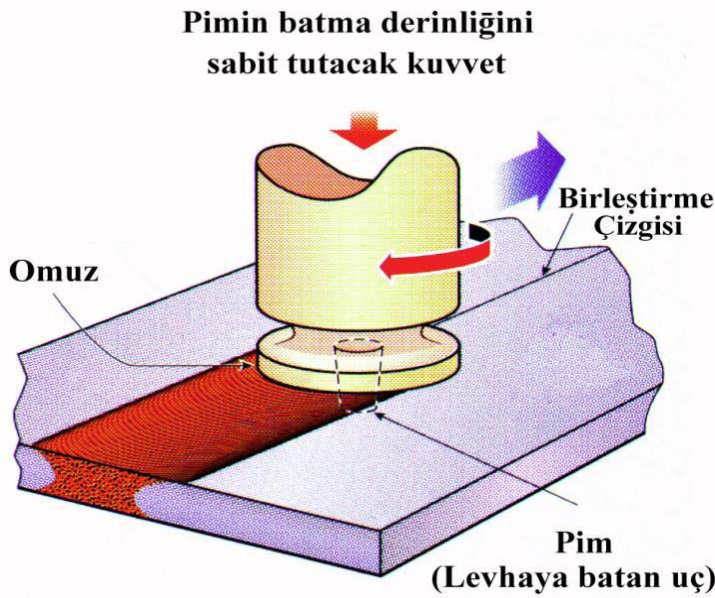
Bir katı hal birleştirme işlemi olan SKK, kaynak konstrüksiyonu güç olan malzemelerin birleştirme işlemleri için kısa kaynak süresi, minimum yüzey hazırlama ve otomasyon kolaylığı gibi kendine özgü avantajlarından dolayı uygun bir alternatif kaynak yöntemidir.

Yöntemin uygulanması sırasında duman ve ışın oluşmaması, koruyucu gaz, toz ve ilave tele gereksinim duyulmaması, kaynak ağzı hazırlığı gerekmemesi, tüm pozisyonlarda kaynak yapılabilmesi olanağının bulunması ve otomasyona da yatkınlığı gibi daha birçok üstünlüğün bulunması, yöntemin uygulama alanlarını daha da genişletmektedir [1].

İşlem, kaynak yapılacak parçadan daha sert bir malzemedan üretilmiş sürtünme aparatının dönen ucu ile kaynaklanacak parçaların birleşme bölgesinde ısı meydana getirilmesi prensibine dayanır [23]. Bu işlemin temel ilkesi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

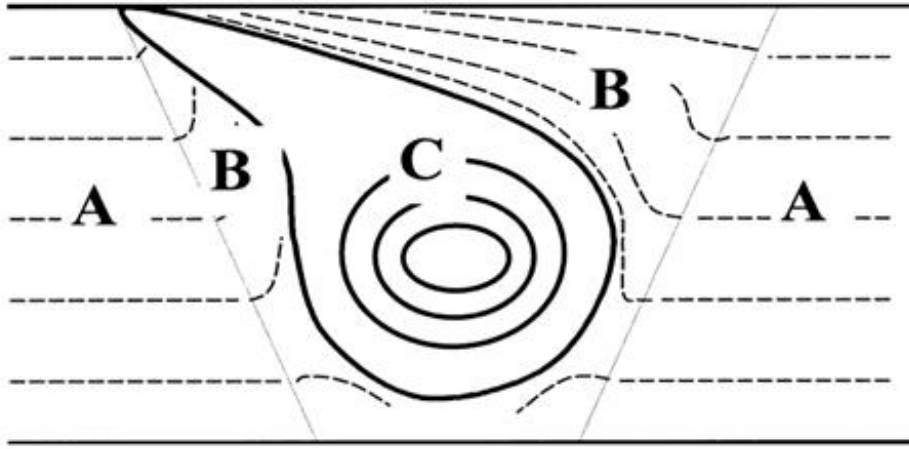
Karıştırıcı uç, daha geniş çaplı bir metal gövdeye bağlı, daha küçük çaplı bir sonda olarak şekillenmiştir. Karıştırıcı uç birleşme bölgesi içine daldırıldığında geniş çaplı omuz diye tarif edilecek metal kısım birleştirilecek yüzeylere önce bir temas yapar. Karıştırıcı ucun dalma derinliği kaynak nüfuziyeti olarak da söylenebilir. Omzun malzemeye teması kaynak bölgesine ilave bir ısı sağlamanın yanı sıra, yumuşayan bölgeye karıştırıcı

ucun kesik koni şeklindeki ucu daldırılır. Isıl olarak yumuşayan metal karıştırıcı uça doğru giderek daralan ancak üst yüzeyde omuz ile temas eden daha geniş bir görünüm arz eder. Karıştırıcı uçtan omuza kadar olan bölgedeki kombine sürtünme ısısı, gömülmüş olan karıştırıcının çevresi ile malzeme üst yüzeyi ve omuzun temas ettiği temas yüzeyinde yumuşamış bir metal oluşturur. Karıştırıcı uç çevresinde malzeme akışı, karıştırıcı uç arkasında ise malzeme ile dönen uç arasında izafi bir dönüş meydana gelmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı, kendi kendine oluşan bir birleştirme tekniğidir. Birleşen malzeme doğal katı faz haldedir ve ergime kaynağı hataları içermez [23].



Şekil 4.1. Sürtünme karıştırma tekniği

Kaynak bölgesinde oluşan iç yapı Şekil 4.2.'de şematik olarak gösterilmiştir. Kaynak bölgesi üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB) ve sıvı hal kaynak yöntemlerinde olduğu gibi ısıнын tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak adlandırılmaktadır [23].



Şekil 4.2. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinde oluşan iç yapının şematik görünümü.

A : Isının tesiri altındaki bölge (ITAB),

B : Termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB),

C : Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB).

4.1. Kaynak Metalurjisi

Belirli bir takım geometrisi kullanılarak yapılan sürtünme karıştırma kaynağında elde edilen birleştirme karakteristiklerini belirleyen üç temel parametre vardır. Bunlar, takımın devir hızı, ilerleme hızı ve batma derinliğidir. Bunlardan ilk ikisi, devir ve ilerleme hızları kontrol edilebilir ve sabit takım geometrisi ile yapılan kaynaklarda kaynak sırasında önemli oranda değişmezler. Fakat takımın batma derinliği kritik ve kontrol edilmesi güç bir parametredir. Batma derinliğinin kaynak işlemi süresince sabit kalması gerekmektedir. Özellikle uzun levhaların birleştirme işlemlerinde yüzeylerin çok düzgün olmaması durumunda bunu sağlamak mümkün olmayabilir. Bu yüzden kaynak öncesi yüzey hazırlama oldukça kritik olup, bu hususta özen gösterilmesi gerekmektedir [24]. Kaynak işlemi süresince dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Bunlar:

- 1) Kaynak işlemi süresince nüfuz etme mesafesini sabit tutmak için malzeme kalınlığındaki değişimler minimum düzeyde olmalıdır.
- 2) Takım ölçüsü, düşük ısı girdisi ve küçük kaynak dikişi sağladığı ve dolayısıyla büzülme azalttığı için mümkün olduğunca küçük tutulmalıdır.

4.2. Kaynak Hataları

Sürtünme karıştırma kaynağında genellikle üç tip kaynak kusuru karşımıza çıkmaktadır. Bunlardan ilki, kaynak yüzey kalitesinin düşük olmasıdır. Bu kusur, batıcı ucun kaynak yapılacak levhaya uygun bir şekilde daldırılmaması ve pim omzunun yüzeye temasının düzgün yapılamamasından dolayı kaynak hattı boyunca pimin hareketinin istikrarsız olmasından kaynaklanmaktadır.

Sık karşılaşılan ikinci kusur, batıcı ucun batma derinliğinin yetersizliğinden dolayı tabana yakın kısımda karıştırılmamış bölge kalmasıdır. Sürtünme karıştırma kaynağında karşılaşılan sonuncu fakat en önemli kaynak kusuru kaynak dikişinde tünel şeklinde porozite oluşmasıdır. Bu hatanın nedeni pim üzerine helisel kanal açılmamış olmasıdır.

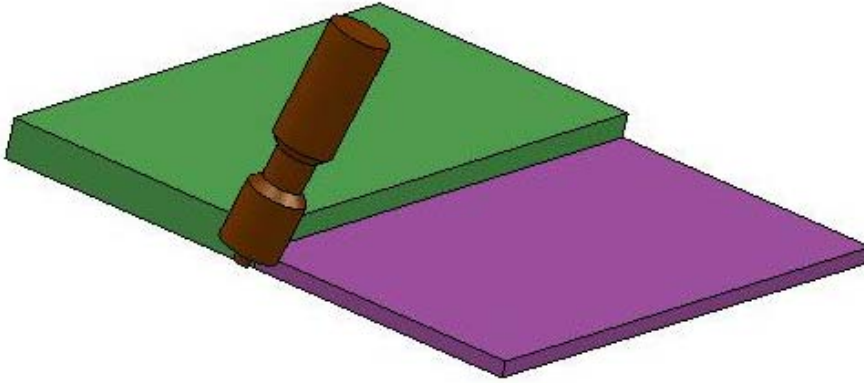
Dikkat edilecek olursa, kaynak kusurlarının nedeni batıcı uç dizaynı ve proses parametrelerinin uygun seçilmeyişidir. İyi bir batıcı uç dizaynı, pimin kaynak yapılacak levhaya daldırılma işleminin iyi kontrol edilmesi ve batma derinliğinin kaynak boyunca iyi ayarlanıp sabit tutulması ile bu kaynak kusurları giderilerek kusursuz bir kaynak elde edilebilir [3].

4.3. Kaynak Parametrelerinin Etkileri

Sürtünme karıştırma kaynağında etkin olan parametreler; malzeme kalınlığı, karıştırıcı uç malzemesi ve dizaynı, takım ilerleme hızı ve devir sayısı, kaynak pozisyonu ve birleştirme geometrileridir [11].

4.3.1. Malzeme kalınlığı

Bu kaynak yöntemi ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirme işlemi pimin eğik konumda levhalara daldırılması ile yapılabilmektedir (Şekil 4.3). Ayrıca çift taraftan kaynak yaparak kalın parçalarında birleştirilmeleri mümkündür.



Şekil 4.3. Farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi

Bu kaynak yöntemi, büyük uzunluktaki kaynakların ergime olmaksızın yapılmasını sağlamaktadır. Ergitme kaynakları ile karşılaştırıldığında önemli bazı metalürjik avantajlar sağlar. Bunlar:

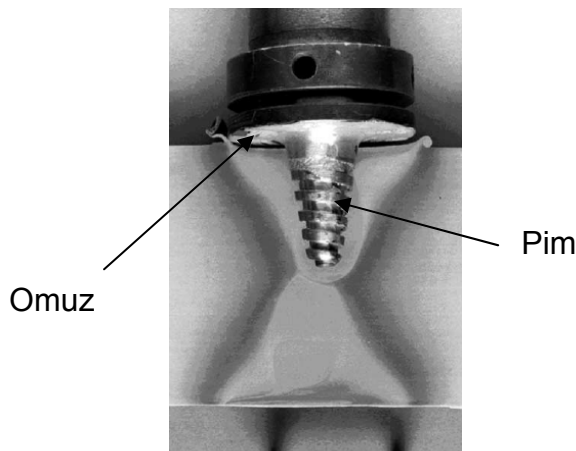
- 1) Ergime olmaması katılaşma çatlaklarının giderilmesini sağlar.
- 2) Farklı ve uyumsuz alaşımlar başarıyla birleştirilebilir.
- 3) İnce taneli yapı üretir.
- 4) Düşük kaynama noktasına sahip alaşım elementleri buharlaşma yoluyla kaybolmazlar [11].

Kaynak için kullanılan profillerin kalınlıkları 1.2 mm'den 50 mm'ye kadar çıkabilmekte ve tek paso ile sürekli kaynak bağlantısı elde etmek mümkün olmaktadır [6]. İnce parçaların (< 1.25 mm) sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi etkili değildir [25].

4.3.2. Karıştırıcı uç malzemesi ve dizaynı

Yöntemde karıştırıcı uç malzemesi olarak, yüksek sıcaklıklarda aşınma direncine sahip malzemelerden üretilen, değişik tasarımlardaki, tükenmeyen döner takımlar kullanılır [11].

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinin mikroyapısına ve mekanik mukavemetine etki eden en önemli parametrelerden biri, karıştırıcı ucun yapısı ve tasarımıdır. Karıştırıcı uç omuz ve pim olarak adlandırılan iki kısımdan oluşmaktadır (Şekil 4.4). Omuz kısmı, SKK için gerekli olan ısı girdisinin bölgesel olarak oluşmasını sağlamaktadır. Kaynak tipine ve birleştirilecek olan malzemeye bağlı olarak birçok karıştırıcı aparat geliştirilmiştir [25].



Şekil 4.4. Sürtünme karıştırma aparatı

Bu kaynak yöntemi geliştirildiğinde ilk kullanılan batıcı uçlar yüzeyine helisel diş açılmış uzunluğu kaynak edilecek levha kalınlığından biraz kısa silindirik pimlerdi. Fakat son yıllarda sürtünmeden açığa çıkan ısı ile akıcı kıvama gelen malzemenin kaynak bölgesinde kalmasını geliştirmek için çok değişik pim dizaynları geliştirilmiştir [3].

Kaynağı zor veya daha kalın malzemelerde, plastik şekil değiştiren kısmın, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akışı, göz önünde tutulması gereken önemli bir noktadır. Eğer, oldukça geniş çapta karıştırıcı uç kısımlar gerekli ise çok geniş hacimli malzeme hareketi olacaktır. Takımlar, plastik şekil değiştirebilen malzemenin, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akışını artıracak şekilde geliştirilmelidir. Oldukça geniş hacimli karıştırıcı uç kısımlar, içi boş olarak tasarlanmıştır.

Kullanılan karıştırıcı uç kısım profilleri, sürtünme karıştırma kaynak yönteminin kalitesini artırmak için vidaya benzer yivli veya sarmal yivli, mikser veya pervane şekilli olarak geliştirilmiştir [26].

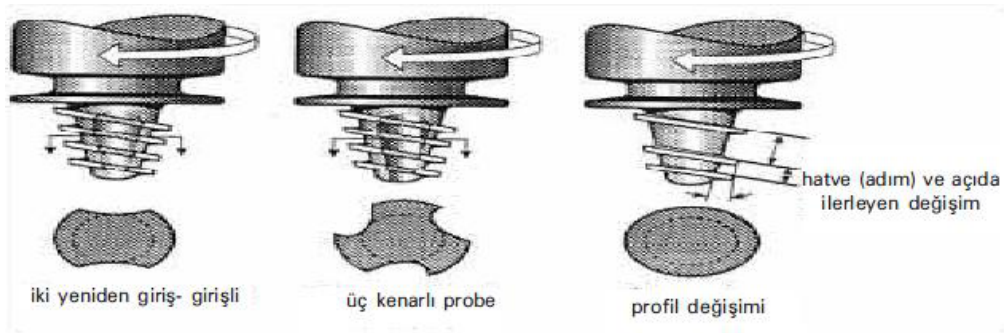
4.3.2.1. Üç yivli ve helezonik takımlar

Son yıllarda, TWI tarafından üç oluklu veya üç yivli (MX Triflute) ve helezonik (Whorl) takımlar geliştirilmiştir. Bu yöntemde kullanılan takım genel olarak omuz ve karıştırıcı uç kısım olmak üzere iki önemli bölümü içerir. Takımın omuz kısmı, plastik şekil değiştiren kaynak bölgesinin diğer bir deyişle iş parçasının yüzeyi üzerinden sıkıştırarak (baskı uygulayarak) hareket eder. Isı, ince parçaların kaynağında dönen takımın omuz kısmı ile iş parçasının yüzeyi üzerindeki sürtünmeden oluşur, bu kaynak işlemi için gerekli ısının ana kaynağıdır. Bununla beraber, iş parçasının kalınlığı arttıkça, takımın omuz kısmı ile iş parçası yüzeyleri arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan ısıya ek olarak, iş parçası ile takımın karıştırıcı ucu arasındaki dönme sırasında sürtünmeden de elde edilen ısı daha da artar. Bunlara ek olarak, takımın karıştırıcı ucunun ana işlevi, kaynak hattındaki işlenen malzemenin yeterliliğini sağlamak ve doyurucu bir kaynak dikişini, takımın etrafındaki malzemenin akışı ile kontrol etmektir.

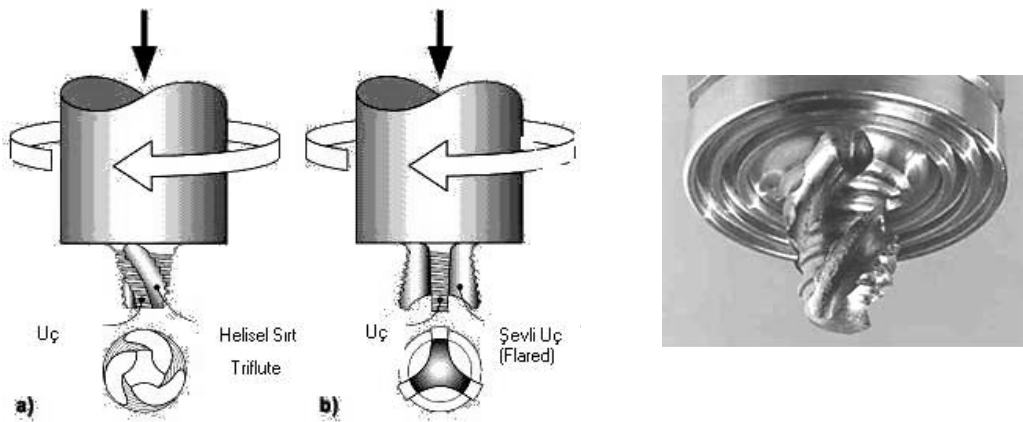
1 mm ile 50 mm arasındaki kalınlıklara sahip alüminyum alaşımlı levhalar, bir pasoda, sürtünme karıştırma kaynak yöntemi sayesinde başarıyla kaynak edilir. Bu, helezonik takım ile iki pasoda ve her bir pasoda yaklaşık 38 mm nüfuziyet sağlayarak başarı ile kaynak edilmiştir. MX üç yivli takım kullanılarak, 6 mm'den 50 mm'ye kadar olan kalınlıklardaki malzemelerin tek pasoda kaynaklarını yapmak oldukça iyi sonuçlar vermiştir.

Esas itibarıyla, her iki takımda da karıştırıcı uç, kesik koni biçiminde ve çapı eşit silindirik biçimli malzemelerden işlenerek şekillendirilmiştir. Helezonik takımın karıştırıcı ucunun hacminin yaklaşık %60'ı boşaltılmış iken, üç yivli takımın karıştırıcı ucunun hacminin yaklaşık %70'i boşaltılmış durumdadır.

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde kullanılan takımların karıştırıcı uçları dairesel etkilere ve burulma yüklerinin etkisi altındadır. Her iki karıştırıcı uçta, kaynak işlemi sırasında geleneksel pim türü karıştırıcı uçlardan daha fazla etkili olacak şekilde akışa neden olur. Şekil 4.5’de helezonik takımların enine kesitleri, Şekil 4.6.’da üç yivli takımların enine kesitleri görülmektedir. Ayrıca, her iki takımında diğer geleneksel takımlardan önemli üstünlüğünün (özellikle kalın parçaların kaynağında) karıştırıcı uç kısmının dönmesi sırasında hacminin (dinamik hacim), kendi hacmine (statik hacim) olan oranı ile belirlenen önemli bir faktör olduğu ifade edilir. Çünkü bu oran kaynak sırasında yeterli akışın sağlanmasında oldukça büyük bir önem ortaya çıkarır [26].



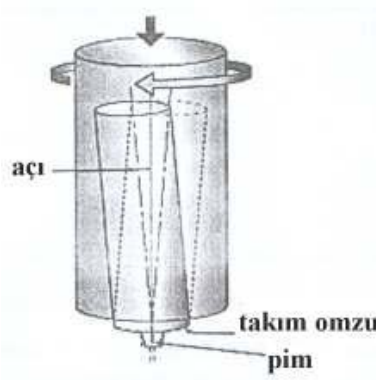
Şekil 4.5. Helezonik takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri



Şekil 4.6. Üç yivli takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri

4.3.2.2. Skew-Stir™ ve A-Skew™ serisi pimler (batıcı uçlar)

Sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması için geliştirilen Skew-Stir™ serisi pim, pim ekseninin iş mili eksenine göre biraz eğim verilmesi ile diğer pimlerden ayrılır. Skew-Stir™ serisi pimler, dinamik süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki oranı pimin eğik hareketi ile artırebilmektedirler. Bu oran, boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktördür.



Şekil 4.7. Skew-Stir metodunun çalışma prensibi

Şekil 4.7'de görüleceği üzere, omuz yüzeyi, eğik takım eksenile belirli bir eğim oluşturmaktadır. Omuz yüzeyi ise, plakanın üst kısmına bağlı olarak sabit durmaktadır. Omuz, iş parçası üzerinde iken dairesel hareket yapar. Takımın odak noktası, iş parçası yüzeyine veya iş parçasının herhangi bir noktası üzerine geldiğinde, omuzun temas yüzeyi eksen dışı bir yörüngede hareket eder. Ayrıca, omuzun bu yörünge hareketi, omuzun eğrilik açısına ve odak noktası ile levhanın üst yüzeyi arasındaki mesafeye bağlıdır. Eğrilik açısı ve aradaki mesafe arttıkça, omuzun hareket sahası da artacaktır [3].

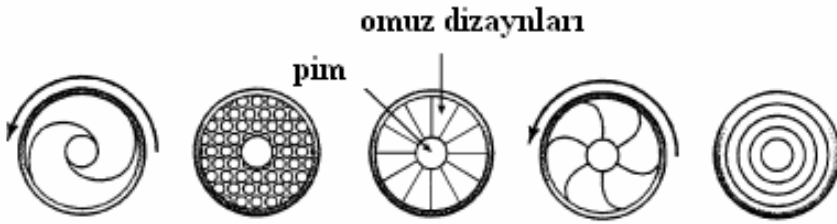
4.3.2.3. Trivex ve MX Trivex takımlar

TWI tarafından takımlar üzerine yapılan çalışmalar ile dış bükey özellikler sayesinde, parçalar kaynak edilirken, takımın karşıdan karşıya geçmesi için gerekli kuvvet en aza indirilmiştir. Trivex takımında yivler olmamakla birlikte,

MX Trivex takımında ise uzunlamasına yivler açılmıştır. Bu iki takım, aynı boyutlardaki karıştırıcı uç kısım ve omuz boyutları için, üç yivli takımlarla karşılaştırıldığında, değişik kaynak hızı ve devir sayılarında, takımın karşıdan karşıya geçme kuvvetinin en düşük olduğu durumun, Trivex takımlarda gerçekleştiği görülmüştür [26].

4.3.2.4. Omuz dizaynları

Yeni jenerasyon helezonik ve üç yivli takımların omuzları (shoulder) da özel profillere sahiptir (Şekil 4.8). Omuz profilleri, omuz ile iş parçası arasında daha iyi bir temas yüzeyi sağlamak maksadıyla kullanılır. Sürtünme teması ile akan malzemenin kaynak bölgesinden ayrılması önlenmektedir [3].



Şekil 4.8. Helezonik ve üç yivli takımların omuz profilleri

4.3.2.5. Karıştırıcı uç ve kaynak parametrelerinin seçimi

Literatür araştırmaları neticesinde karıştırıcı uç ve malzemesi ile ilgili elde edilen bilgiler aşağıdadır:

- 1) Uç, takım çeliği veya yüksek hız çeliklerinden yapılmalıdır [5].
- 2) Karıştırıcı uç malzemesi ergime derecesi, alüminyum malzemenin yaklaşık üç katı olarak seçilebilir [1].
- 3) Karıştırıcı uç, yüksek sıcaklıklarda dinamik ve statik özelliklere sahip, aşınmaya dayanıklı, en az 62 Rc sertliğinde çelik malzemelerden yapılmalıdır [13].

- 4) Karıştırıcı uç, birleştirilecek iki levhanın kaynak aralığının tam ortasına gelecek şekilde ayarlanmalıdır [13].
- 5) Karıştırıcı ucun, tüm yüzeylere eşit oranda batması gerekmektedir [27].
- 6) Karıştırıcı uç birleştirilecek plakalara dik olarak ayarlanır, literatüre uygun olarak 2.5° başlık eğim açısı verilir [2].
- 7) Düşük kaynak hızlarında ince dişli pim profilinin, yüksek kaynak hızlarında ise kaba dişli pim profilinin kaynaklı bölgenin mukavetini artırdığı görülmüştür [25].
- 8) Kaynak kalitesi açısından en iyi sonuç, omuz çapı pim çapının üç katı olan kaynak değişkenlerinde elde edilmiştir [25].
- 9) Omuz genişliği arttıkça çekme dayanımı ve sertlik düşmektedir [27].

4.3.3. Takım ilerleme hızı ve devir sayısı

Sürtünme karıştırma kaynağında iki parametre çok önemlidir. Bunlar saat yönünde veya saat yönünün tersi yönde takımın devir sayısı (n , dev/dk) ve kaynak hattı boyunca takımın ilerleme hızıdır (V , mm/dk). Takımın dönmesi dönen pim etrafındaki malzemenin karışmasına sebep olur, takımın dönmesi karışan malzemeyi pimin önünden arkasına taşır ve kaynak prosesi sonlanır. [11].

Sürtünme karıştırma kaynağında takım ilerleme hızı (kaynaklama hızı); ısı girdisi miktarını etkileyen önemli bir parametre olduğundan, takım ilerleme hızına bağlı olarak hem mikroyapı hem de sertlik ve çekme gibi mekanik özelliklerde de etkili olmaktadır. Artan kaynak ilerleme hızı ile kaynak metalinin yönlenmesi artmakta, ancak düşük kaynak ilerleme hızında kaynak metali yönlenmesi fazla belirgin görülmemektedir [23].

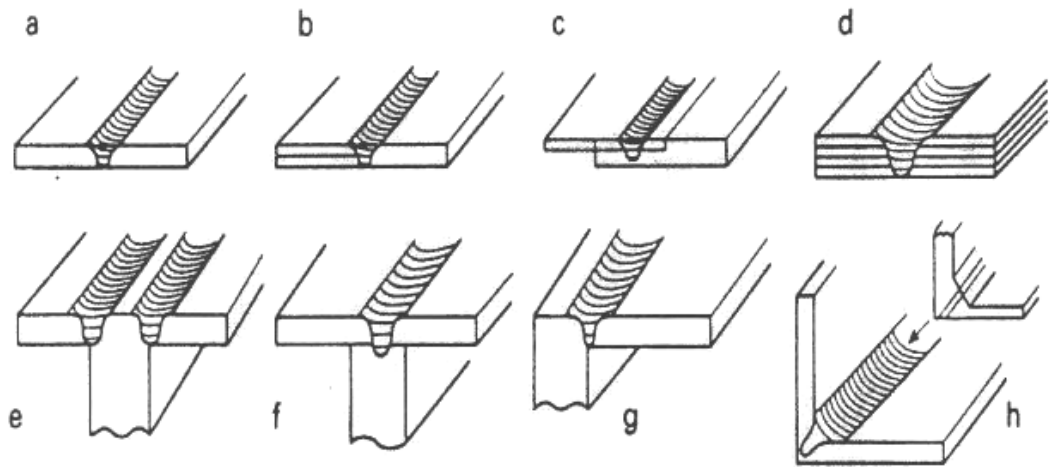
Kaynak ilerleme hızı sabit iken artan kaynak devir hızlarında çekme dayanımının hızla düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni; kaynak ilerleme hızı sabit iken artan devir hızlarında, malzemeye ısı girdisi artmaktadır. Böylece kaynaklı bağlantının ITAB bölgesinde mukavemet artırıcı partiküllerin

malzeme içinde daha kaba (homojen olmayan) şekilde çökmesi ile bağlantının çekme dayanımını düşürmektedir. Devir hızı artırıldığında, kaynak ilerleme hızı da artırılarak malzemeye giren ısı miktarı azaltılabilmekte ve böylece ITAB bölgesinin genişliği karıştırıcı uç devir hızı ve kaynak ilerleme hızı gibi değişken parametrelerle kontrol edilebilmektedir [4]. Kaynak ilerleme hızının artmasına bağlı olarak malzemelerin kopma mukavemetinde az da olsa bir artma görülmektedir [23].

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynaklanma hızının değişmesi malzeme sertliğini de değiştirmektedir. Artan kaynak ilerleme hızlarında sertlik değerleri de artmaktadır. Bunun nedeni yüksek kaynak hızlarında malzemeye aktarılan ısı girdisinin azalmasıdır [11].

4.3.4. Kaynak pozisyonu ve birleştirme geometrileri

Sürtünme karıştırma kaynağında uygulanabilir birleştirme türleri; küt alın, bindirme, T-köşe, dış ve iç köşe, boyuna ve çevresel birleştirmelerdir (Şekil 4.9). Ayrıca bu yöntem yerçekiminin etkisi olmadığından tüm pozisyonlarda rahatlıkla uygulanabilir [3].



Şekil 4.9. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde gerçekleştirilen birleştirmeler.

Bu kaynak yöntemi ile düz ve çeşitli profillerdeki sac ve levhaların alın ve bindirme kaynağı yapılabilir. Al-alışımı veya mukavemeti düşük diğer malzemelerden T ve L profillerin üretiminde ve boru bağlantı kaynaklarında da bu yöntem kullanılabilir [3].

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde birleştirilecek levha kalınlığı değiştikçe, sürtünme aparatı boyutu da değişmektedir. Tek taraflı alın kaynaklarında aparatın malzeme içerisinde kalan uç kısmının uzunluğu (h), kaynak edilecek levhaların kalınlığına yakındır ($h \approx 0.1$). Çift taraflı alın kaynaklarında ise uç kısmın uzunluğu (h) malzeme kalınlığının (t) yaklaşık yarısı kadar alınmaktadır. Malzeme kalınlığına göre aparatın h değerinin değişmesi gerekmektedir [28].

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde tek parça takım kullanılması güven açısından önemli bir sınırlamadır. Yüksek hızda dönen ve iki malzeme arasında kaynak işlemini gerçekleştiren takım ucu, yavan bir şekilde birleştirilecek bölgeye daldırılır. Kaynağın sonunda tek parça takım ucu geri çekilir; ancak, bir anahtar deliği bırakılmış olur. Bu durum, depolama tankları, borular, davul biçimindeki ve silindir biçimli parçaların kaynağı gibi 360°'lik çevresel kaynaklar yapılacağı zaman kabul edilemez bir hatadır. Diğer sınırlama ise, değişik kalınlıklardaki malzemelerin kaynağı yapılacağı zaman, farklı uzunluklardaki takım uçları gerekmesidir. Bu sınırlamaları önlemek için otomatik olarak çalışan, bilgisayar ile kontrol edilen ve geri çekilebilen bir takım ucu tasarlanmıştır. Geri çekilebilir takım ile başlangıç noktasına tekrar gelindiğinde, motor, karıştırıcı uç kısmı yavaş yavaş omuzun içine otomatik olarak çekmeye başlar. Bu sırada karıştırıcı uç kısım daha az olan nüfuziyetteki kaynağı, anahtar deliği kapanana kadar kaynak eder. Omuz da bu sırada dönmeye devam ettiği için anahtar deliği oluşumu engellenir. Bu durum iki parçalı takımın önemli bir üstünlüğüdür. Ayrıca, bu takım tasarımı değişik malzeme kalınlıkları için takım ucunun ayarlanmasına olanak sağlar. Malzemenin çarpılmasını en aza indirmede önemli bir üstünlük sağlamıştır [26].

4.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulandığı Malzemeler

SKK yöntemi; Al-alışımlarının kaynağına yönelik özel olarak geliştirilmiş olmakla birlikte klasik ergitme kaynak yöntemleri ile kaynağı mümkün olmayan veya güç olan Al-Li alışımlarının, 7075 Al-alışımının ve 0.8 mm kalınlığındaki çinko sacların kaynağında başarı ile uygulanmıştır. Yöntem, ayrıca Cu ve Cu-alışımları, Mg-alışımları, Ti-alışımları, Al-alışımı matris kompozit malzemeler, kurşun, yumuşak çelikler (düşük karbonlu), düşük mukavemetli paslanmaz çelikler ve benzer ergime derecesi gösteren farklı malzemelerin (değişik Al-alışımlarının birbiri ile ve Al-alışımlarının Mg-alışımları ile) kaynak işlemlerinde kullanılabilme potansiyeline sahiptir [5].

4.4.1. Alüminyum alışımları

Günümüzde alüminyum alışımlarının birleştirilmesinde karşılaşılan bazı problemlerin giderilmesi amacıyla araştırmacılar, bu yeni katı hal kaynak yöntemi üzerindeki çalışmalara yönelmişlerdir. Özellikle ısıtım işlem ve dövme ile mukavemet kazandırılan alüminyum alışımlarının geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle (MIG, TIG, elektrik ark kaynağı) birleştirmelerinde yüksek ısı girdisi, bu alışımların ısıtım genleşmelerinin yüksek olması ve katılma sıcaklık aralıklarının geniş olmasından dolayı kaynak dikişinde çatlak oluşumuna neden olabilmektedir. Bununla birlikte ısıtım işlemli alüminyum alışımlarında yüksek ısı girdisi sebebiyle kaynaklı bölgede, sertleştirici çökeltilerin çözünmesi ve ITAB'da aşırı yaşlanma sonucu sertlik ve mukavemette kayda değer düşüşler söz konusu olmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağında, geleneksel ergitmeli kaynak yöntemlerine göre daha düşük ısı girdisiyle çalışılması, malzemedeki mikroyapısal ve mekanik bozulmaları minimize etmektedir. Düşük ısı girdisinin, kaynak bölgesinin ve ITAB'ın mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediği bilinmektedir. Bunun sağlanabilmesi için uygun kaynak parametrelerinin seçimi önemlidir [2].

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin Al- alaşımlarında kullanılabilirliği üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırma sonuçları göstermektedir ki, bu yöntem gerek yaşlandırma sertleştirmesi yapılmış gerekse yaşlandırma sertleştirmesi yapılamayan (1xxx ve 5xxx serileri gibi ısı işleme duyarlı olmayan) Al- alaşımlarında başarıyla kullanılabilir. Hatta geleneksel kaynak yöntemleri ile kaynağı çok güç olan 7075 alaşımı bile bu yöntem ile başarılı bir şekilde birleştirilmiş ve elde edilen birleştirmeler oldukça iyi mekanik özellikler göstermiştir [29].

4.4.2. Bakır alaşımları

Çelik ve nikel alaşımlarına göre 10-100 kez daha büyük olan yüksek termal yayılma gücü sebebiyle bakırın geleneksel kaynak yöntemleriyle kaynaklanması zordur. Bu yüzden kaynak için gerekli olan ısı girdisi çok yüksektir bu da oldukça düşük kaynak hızlarıyla sonuçlanır. 1.5-50 mm kalınlıktaki bakır plakaların sürtünme karıştırma kaynağı başarıyla yapılmaktadır. SKK yapılmış bakır alaşımlarının çekme mukavemetleri ana malzeme ile benzer değerler vermektedir [8].

4.4.3. Titanyum alaşımları

Her ne kadar birçok titanyum alaşımları gaz tungsten ark kaynağı gibi geleneksel ergitme prosesleri ile kaynak yapılabilse de kaynak sonrası ısı işleme gerektirebilmektedir. Bu ilave işlem üretim maliyetini arttırmaktadır. Bir katı hal kaynak prosesi olan SKK' nın kaynak sonrası ısı işleme olan ihtiyacı ortadan kaldırması beklenmektedir. Ne yazık ki titanyum alaşımlarının SKK ile ilgili bilgiler şu an için yetersizdir.

İlk araştırmalar SKK'nın titanyum alaşımlarının birleştirilmesinde etkili bir kaynak yöntemi olduğunu gösterse de SKK sırasında mikroyapısal gelişimin anlaşılabilmesi için daha çok araştırma yapılması gerekmektedir [11].

4.4.4. Çelikler

SKK'nın çeliklerde uygulanabilirliği üzerine yapılan araştırmalar, SKK'nın farklı çelik tiplerinin birleştirilmesi uygulamalarında kullanılabilirliği açısından ümit vericidir. Bunların yanında çeliklerin SKK'ında kullanılan uygun takım malzemelerinin seçimi kritik bir konudur. SKK için temel gereksinim takım ve iş parçası malzemesi arasında sertlik ve yüksek sıcaklık özellikleri arasındaki uygun farkı korumaktır. Çünkü çelikler çok yüksek sertliğe ve yüksek sıcaklık özelliklerine sahiptir. Takım malzemesinin 1000 °C ve üzerindeki sıcaklıklarda iyi aşınma direnci ve tokluk göstermesi önemlidir [11].

4.4.5. Magnezyum alaşımları

Magnezyum alaşımlarının SKK'nın kalitesi, devir sayısı ve ilerleme hızı ile ilgilidir. Genellikle bir sıvı faz oluşumuyla sonuçlanmaz. Alüminyum alaşımlarının SKK'da olduğu gibi Mg alaşımlarının SKK'da da üç mikroyapısal bölge bulunmaktadır. Bunlar karıştırma bölgesi (kaynak metali), ısı etkili bölge ve termomekanik etkilenen bölgedir. Magnezyum alaşımlarının SKK'da karıştırma bölgesinde ince yeniden kristalleşmiş taneler meydana gelmektedir [8].

4.4.6. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler tek matrisli malzemelere göre artan rijitlik, mukavemet ve aşınma direnci gösterirler. Bununla beraber bu kompozitlerin kaynaklanabilirliği seramik takviye ilaveleri yüzünden önemli derecede azalmaktadır. Metal matrisli kompozitlerin katı hal kaynak teknikleriyle birleştirilmeleri istenmektedir. Sürtünme kaynağı partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozitlere son on yıldır uygulanmaktadır. Geleneksel sürtünme kaynağı ile iyi mekanik özelliklere sahip sağlam kaynaklar yapılabilmektedir. Yinede çubuk ya da boru şeklinde nispeten basit geometrili parçalarla sınırlıdır.

Metal matrisli kompozitlerin SKK ile ilgili kritik sorun, SKK'da kullanılan takımın sert seramik takviyelerin varlığı yüzünden fazla miktarda aşınmasıdır. SKK süresince takımın aşınması yüksek sıcaklıklarda meydana gelir. Bu yüzden takımın yüksek sıcaklıklarda aşınma direnci gösteren alaşımlardan yapılması takımdaki zararı azaltır. Ayrıca takım geometrisinin dizaynı takım aşınmasının azaltılmasında önemlidir [11].

4.4.7. Farklı alaşım ve kompozitler

SKK farklı alaşım ve metallerin kaynaklanmasında kullanılan yeni bir kaynak yöntemi olarak tanımlanabilir. Farklı alüminyum alaşımlarının ya da bakır alaşımlarının birbirleriyle veya alüminyum alaşımlarının diğer metallerle kaynaklanması konularında çalışmalar yapılmaktadır. Çok sert bir alüminyum alaşımının çok yumuşak bir alüminyum alaşımıyla karıştırılması durumunda kaynak verimliliğinin azaldığı gözlenmektedir. Önceki çalışmalar göstermiştir ki; farklı metallerin (alüminyumun bakıra kaynağı gibi) SKK kusursuz bir kaynak ile sonuçlanmamaktadır. Fakat son zamanlarda yapılan bazı çalışmalarda alüminyumla çelik ve alüminyumla magnezyum gibi farklı metallerin SKK ile birleştirilmelerinde başarılı sonuçlar alınmıştır [8].

4.4.8. Plastikler

Plastikler birçok uygulamada kullanılmaktadır ve verimli bir şekilde birleştirilmeleri önemlidir. Plastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı basit birkaç adımda yapılmaktadır. Dönen bir takım sıkıca bağlanmış iki iş parçasının arasına dalmaktadır. Pim ve iş parçası arasındaki sürtünme malzemenin ısısının yükselmesine sebep olur ve takım birleşme hattı boyunca hareket eder. Malzeme takım etrafında hareket ederken kaynak bölgesinde karışır. Proses süresince birincil ısı üretimi takım ve iş parçası arasındaki sürtünme ile olur. Bununla beraber polimerler, artan sıcaklıkla kendiliğinden yağlanma eğilimindedir bu nedenle sık sık dış ısı ilavesi gerekir [11].

4.5. Yöntemin Uygulama Alanları

Sürtünme karıştırma kaynağı; gemi, uçak ve uzay aracı, tren ve kara taşıtlarının imalatı gibi çok geniş bir potansiyel uygulama alanı yelpazesine sahiptir. Bu uygulamalarda, bu yeni kaynak teknolojisi sınırlı da olsa ticari olarak kullanılmaya başlanmıştır. Robotik sürtünme karıştırma kaynağı ile Al-ve Mg-alaşımlarının kaynağında kat edilecek aşamalar daha hafif taşımacılık sistemlerinin seri üretimini mümkün kılacak ve bu şekilde araçların yakıt tüketiminde de önemli tasarruflar sağlanacaktır. Bu yeni kaynak yönteminin özellikle gemi inşaatında, uçak ve uzay endüstrisinde, otomotiv sektöründe ve diğer imalat sektörlerinde kullanımı her geçen gün artacaktır [5].

4.5.1. Gemi inşasında ve deniz endüstrisinde uygulamalar

Ticari uygulamalar için yöntem adaptasyonu olan ilk endüstriyel sektörlerden ikisi gemi inşaatı ve deniz endüstrisidir. Bu yöntem aşağıdaki uygulamalar için uygundur [6].

- 1) Güverte, kenar, bölme ve döşeme panelleri,
- 2) Alüminyum ekstrüzyonları,
- 3) Tekne elemanları,
- 4) Helikopter platformu,
- 5) Deniz üssü yapılar,
- 6) Gemi direkleri,
- 7) Soğuk hava tesisleri.

4.5.2. Havacılık endüstrisi

- 1) Kanatlar, uçak gövdeleri, kuyruk takımı,
- 2) Taşıtlar için yakıt tanklarını soğutma ünitesi,
- 3) Uçuş yakıt tankları,
- 4) Askeri uçaklar için dıştaki atım tankları,

- 5) Askeri ve araştırma roketleri,
- 6) Hatalı MIG kaynaklarının tamiri.

4.5.3. Demiryolu endüstrisi

Modern yolcu treni vagonlarının imalatında, alüminyum ekstrüzyonlardan üretilen petek paneller daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu panellerde, uzun Al-ekstrüzyonlar aralarına sıkılık artırıcı destekler yerleştirilerek birleştirilmektedir. Bu sayede, hem çarpışmalarda emniyet hem de bükme kuvvetlerine dayanım artırılmaktadır. Klasik ergitme kaynağı, özellikle yüksek mukavemetli Al-alışımlarında ITAB bölgesinde aşırı mukavemet kaybına sebep olduğu için, son yıllarda Almanya ve İngiltere'de meydana gelen hızlı tren kazalarında daha dayanıklı kaynaklara ihtiyaç duyulduğu gerçeği ortaya çıktı. Sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak bölgesinde daha düşük seviyelerde mukavemet kaybına neden olduğundan cazip bir alternatif oluşturduğu için son yıllarda Avrupa ve Japonya 'da hızlı tren vagonlarının üretiminde bu kaynak teknolojisi ile imal edilen Al-alışımı petek paneller kullanılmaya başlanmıştır [3].

4.5.4. Otomotiv endüstrisi

Otomotiv sektöründe alüminyum kullanımının hızla artması yakıt ve ağırlık tasarrufunda daha etkili araçların üretilmesine yol açmıştır. Süspansiyon kolları gibi küçük çaptaki parçalar bu yöntem ile Japonya 'da üretilmektedir. Bunun yanı sıra Norveç'te tekerlek jantlarının bu yöntem kullanılarak yapımı da gerçekleştirilmektedir. Yöntem, ayrıca alüminyum esaslı arabalarda iç kapı panellerinin yapımında da uygulanmıştır. Amerika'da Smith Corporation sürtünme karıştırma kaynak yöntemini kullanarak ilk prototip motor tezgahlarını geliştirmiştir. Yine aynı yıllarda Amerika'da Tower Automotive, Simulform olarak adlandırılan şasi parçalarının bağlantısı için bağlantı elemanları ve özel gövde yapıları üretmiştir [6].

4.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları

Mevcut uygulamaları oldukça yaygınlaşan bu yöntemin çeşitli avantajları vardır. Bu avantajlar aşağıda sıralanmaktadır:

- 1) Kaynak yöntemi basittir, dolgu malzemesine ve kaynak ağzı hazırlığına ihtiyaç yoktur [30].
- 2) Kaynak öncesinde oksit kaldırma gereksizdir.
- 3) Ergitme kaynağı zor olan 2XXX ve 7XXX serisi Al-alışımları ve Al-Li alışımları kaynak edilebilir [5].
- 4) Kaynak esnasındaki toplam ısı girdisi düşüktür, dolayısıyla mekanik özelliklerdeki kayıp minimumdur.
- 5) Özellikle ince levhalarda büzülme, distorsiyon ve kalıntı gerilmeler çok düşüktür.
- 6) Katı hal kaynağı olduğu için çatlak ve porozite oluşumu gibi ergitme kaynaklarında karşılaşılan problemler söz konusu değildir.
- 7) Kaynak sonrası kaynak yüzeyi talaş alınmış gibi düzgündür ve yüzey işleme gerektirmez.
- 8) Alın ve bindirme kaynağı yapılabilir.
- 9) Aynı karıştırıcı uç ile tipik olarak 1000 m kaynak yapılabilir.
- 10) Yöntemin doğası gereği ark, kıvılcım, gaz ve toz söz konusu olmadığından çok temiz ve çevreci bir kaynak yöntemidir.
- 11) Enerji verimliliği yüksek bir kaynak yöntemidir.
- 12) Otomasyona ve robotik uygulamaya çok uygundur.
- 13) Kaynak bölgesinde mukavemet nispeten yüksektir.
- 14) İlave tel ve koruyucu gaza ihtiyaç duyulmaz.
- 15) Çeşitli metaller ve alüminyumların birçok pozisyonda birleştirilebilmesi mümkündür.
- 16) Yatırım maliyeti lazer ve elektron kaynağı cihazlarından düşüktür.
- 17) Çok az bakım ister [6].
- 18) Ekstrüzyon ürünü veya döküm olan çoğu parçalar bu yöntemle kaynatılabilir.

Yöntemin dezavantajları ise:

- 1) Her malzemenin kaynağı mümkün değildir. Yalnızca mukavemeti düşük ve özellikle düşük ergime dereceli malzemelerin kaynağına uygundur [5].
- 2) Kaynaklanacak parçaların çok sıkı tespit edilmesi şarttır.
- 3) Kaynak hızı bazı ergitme kaynaklarından düşüktür (tipik olarak 5 mm kalınlıktaki 6XXX serisi Al-alaşımı levhalarda 750 mm/dk civarında).
- 4) Tek parçalı karıştırıcı uç kullanıldığında kaynak sonunda delik kalır.
- 5) Özellikle kalın levhaların kaynağı için çok güçlü tezgâhlara ihtiyaç vardır.
- 6) İş parçaları tablaya bağlandığından dolayı ekipmanların taşınması zordur.
- 7) %100 nüfuziyet isteniyorsa parçalar ters çevrilip arka tarafından da kaynak yapılmalıdır [6].

5. ÇALIŞMANIN LİTERATÜRDEKİ YERİ VE ÖNEMİ

Sürtünme karıştırma kaynağı ilk olarak 1991 yılında İngiltere’de tanıtılmış ve özellikle 1990’lı yıllarda gelişmiş ve halen de gelişim sürecinde olan bir kaynak yöntemidir. Söz konusu yöntem, geleneksel ergitme kaynağına alternatif olarak geliştirilmiş oldukça ekonomik katı hal kaynak yöntemidir. Yöntemin birçok malzeme için uygun olmasına karşın, en önemli uygulama alanı alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirilmesidir. Sürtünme karıştırma kaynağının karmaşık mikroyapısal yönlerini, mekanik davranışlarını ve değişken parametrelerin bu davranışlar üzerindeki etkilerini belirlemek üzere pek çok araştırmalar yapılmış ve bu araştırmalar halen devam etmektedir. Yapılan literatür taramasında sürtünme karıştırma kaynağı üzerine yapılmış olan araştırmalar ve bu araştırmaların sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

- 1) Şık, sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle AA 1050 alüminyum levhaları küt alın kaynağı ile birleştirerek, kaynak parametrelerinin birleşebilirliğe ve eğmeli yorulmaya etkisini incelemiştir. Kaynak parametreleri olarak karıştırıcı ucun devir hızını ve kaynak ilerleme hızını seçmiştir. Kaynak ilerleme hızı sabit iken artan kaynak devir hızlarında, malzemeye ısı girdisinin arttığını ve bu nedenle sertlik ve yorulma dayanımının düştüğünü, kaynak ilerleme hızının artırılmasıyla malzemeye giren ısı miktarının azaldığını ve mekanik özelliklerde bir artış olduğunu tespit etmiştir [1].
- 2) Sarsılmaz ve Özdemir, sürtünme kaynak yöntemiyle AA 1050 ve AA 5083 alüminyum alaşımları, alın pozisyonunda sabit devir (1400 dev/dak) ve sabit uç profilinde (konik vida), beş farklı ilerleme hızlarında birleştirerek oluşan bağlantının, mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Mikroyapı incelemelerinde, ITAB bölgesinin artan ilerleme hızı ile daraldığını tespit etmişler ve ayrıca karıştırıcı uçta, dönme etkisiyle DKB bölgesinde soğan halkaları olarak tanımlanan mikroyapısal

oluşumlara rastlamışlardır. Çekme deneyi incelemelerinde, artan ilerleme hızının oluşturduğu daha düşük sürtünme sıcaklığı nedeniyle kaynaklı bağlantının mukavemet değerlerinin kademeli olarak arttığını belirtmişlerdir [2].

- 3) Çam, son yıllarda geliştirilen bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı ile Al alaşımı levhaların alın ve bindirme kaynağında başarı ile kullanılabileceğini belirtmiş ve uygulamalara örnek vererek, kaynağın diğer kaynak yöntemlerine olan üstünlüklerinden, kullanım alanlarından ve uygulama yöntemlerinden bahsetmiştir [3].
- 4) Ataoğlu ve arkadaşları, TSE EN AW 5754 Al alaşımını, yüzeyi düz ve M4 vida dişi açılmış olmak üzere iki farklı uç yüzey geometrisine sahip karıştırıcı uçla birleştirerek, oluşan bağlantının mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Düz uç ile elde edilen kaynaklarda, kaynak dikişi içerisinde tabana yakın kısımda tünel şeklinde porozite oluştuğunu ve bu nedenle çekme dayanımının düşük çıktığını, vida dişli uç ile elde edilen kaynaklarda porozite oluşmadığı için çekme dayanımının daha yüksek çıktığını ve her iki uçla yapılan kaynakların benzer sertlik profilleri gösterdiğini belirtmişlerdir [31].
- 5) Külekçi ve Şık, TSE EN AW 2014 alüminyum alaşımı levhaları sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Oluşan bağlantının mikroyapı ve mekanik özelliklerini MIG kaynağı ile karşılaştırarak, sürtünme karıştırma yönteminin üstünlüklerini, uygulama yöntemlerini ve skk yapılırken dikkat edilmesi gereken hususları belirtmişlerdir [28].
- 6) Kurt ve arkadaşları, alüminyum levhaları sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirerek oluşan bağlantının mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kaynak parametresi olarak kaynak hızını seçmişlerdir. Kaynak hızının artmasına bağlı olarak; malzemelerin kopma

mukavemetinde az da olsa bir azalma olduğu, malzeme yüzeyinde meydana gelen ondülelerin azaldığını tespit etmişlerdir [29].

- 7) Çam, sürtünme karıştırma kaynağının esasları üzerinde durmuş, kaynağın avantajları, dezavantajları ve kullanım alanlarını belirtmiş, endüstrinin birçok dalında uygulama alanı bulan bu yöntemin getirdiği üstünlük ile ergitme kaynak yöntemlerine göre daha uygun bir yöntem konumuna geldiğini belirtmiş, özellikle alüminyum ve alaşımları için mekanik özelliklerdeki iyileştirmeler, kaynak sonrası oluşabilecek hatalardaki azalmalarla da gelecekte otomotiv endüstrisi, gemi inşaatı, uçak ve uzay endüstrisi ve diğer imalat sektörlerinde kullanımının her geçen gün artacağını bildirmiştir [5].
- 8) Özsoy ve Kaluç, sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının esasları üzerinde durmuş, kaynak parametrelerinin birleşebilirliğe etkilerini, yöntemin uygulama esaslarını, birleştirme türlerini, yöntemin üstünlüklerini, sınırlamalarını ve uygulama alanlarını belirtmiş, bu yöntemin diğer ergitme kaynak yöntemlerine göre daha uygun bir yöntem konumuna geldiğini bildirmiştir [6].
- 9) Şık ve Kayabaş, sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle AA 1050 alüminyum levhaları alın pozisyonunda birleştirerek oluşan bağlantının mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kaynak parametresi olarak karıştırıcı ucun devir hızlarını ve kaynak ilerleme hızlarını seçmişler, kaynak ilerleme hızı sabit iken artan karıştırıcı uç devir hızlarında malzemeye ısı girdisinin arttığını ve malzemede sertlik ve çekme dayanımının düştüğünü belirtmişler ve bu nedenle de artan karıştırıcı uç devir hızlarında kaynak ilerleme hızını arttırmış ve malzemeye giren ısı miktarını azaltarak malzemenin mekanik özelliklerinde bir artış olduğunu tespit etmişlerdir [4].

- 10) Çakır ve arkadaşları, toz metal Al malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında devir sayısının kaynaklanabilirliğe etkisini incelemişlerdir. Alüminyum tozları presleme ve sinterleme işlerine tabi tutulmuş ve oluşturulan numunelerle mekanik ve metalografik inceleme yapılarak presleme, sinterleme ve kaynak parametrelerinin etkilerini araştırmışlardır. Yapılan incelemeler neticesinde; bütün kaynaklı numunelerde esas malzemedan kaynak metaline doğru gidildikçe sertlik değerinde plastik deformasyonun sebep olduğu bir artış meydana geldiğini, 900 dev./dak. dönme ve 6 mm./dak. ilerleme hızında skk ile birleştirilmiş numunelerin gerek mekanik gerekse metalurjik olarak en iyi birleştirmeyi sağladıklarını belirtmişlerdir [32].
- 11) Sarsılmaz ve arkadaşları, skk yöntemi ile birleştirilen AA 6061 / AA 7075 çiftinde, karıştırıcı uç omuz genişliğinin mekanik özellikler üzerine etkisini incelemişlerdir. AA 6061 ve AA 7075 alüminyum alaşımlarını, alın pozisyonunda sabit devir (1120 dev./dak.) ve sabit ilerleme hızında (250 mm./dk.) üç farklı omuz genişlikleri kullanılarak başarılı bir şekilde birleştirmişlerdir. En yüksek sıcaklık değerini en büyük omuz genişliğinde, çekme test deneylerinde en yüksek mukavemet değerini en küçük omuz genişliğinde elde etmişlerdir. Azalan omuz genişliğiyle birlikte mikrosertlik değerlerinde kademeli artış görüldüğünü belirtmişlerdir [27].
- 12) Özdemir ve arkadaşları, skk yöntemi ile birleştirilmiş AA 1030 alaşımında karıştırıcı uç, devir sayısı ve ilerleme hızının mekanik davranışlar üzerine etkisini incelemişlerdir. İnceleme neticesinde; çekme test sonuçlarına devir sayısının önemli bir etkisinin gözlenmediğini, ilerleme sayısı ve karıştırma elemanı uç profilinin kaynaklı bağlantıların mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduklarını gözlemlenmiştir. Artan ilerleme hızı ile birlikte ısı girdisinin azaldığı ve mekanik özelliklerin arttığını, artan devir sayısına bağlı olarak çekme gerilmesinin düştüğünü, üçgen profilili karıştırıcı uç ile yapılan kaynaklı bağlantılarda ulaşılan

maksimum çekme gerilmesinin vida profilli karıştırıcı uç kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantılardan daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir [33].

- 13) Sarsılmaz ve Özdemir, AA 1050 / AA 6061 alüminyum alaşım çiftinin sürtünme karıştırma kaynağında karıştırıcı uç profillerinin mekanik özellikler üzerine etkisini incelemişlerdir. AA 1050 ve AA 6061 alüminyum alaşımlarını, alın pozisyonunda sabit devir (1120 dev./dak.) ve sabit ilerleme hızında (250 mm./dak.) üç farklı uç profili kullanarak başarılı bir şekilde birleştirmişlerdir. Vidalı karıştırıcı uç geometrisinin, kaynaklı bağlantıların mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirtmişlerdir. Karıştırıcı uç yüzeyinin düz ve oluksuz olmasının kaynak esnasında gözenek ve boşluk oluşumlarını artırdığını ve iyi mekanik özelliklere sahip kaynaklı birleştirmeler için geniş adımlı vida uç profilinin, farklı tip Al alaşımların kaynağı için uygun olabileceğini belirtmişlerdir [34].
- 14) Taban ve Kaluç, EN AW-5083-H321 alüminyum alaşımını MIG, TIG ve sürtünme karıştırma kaynak yöntemiyle birleştirmiş, kaynaklı bağlantıların mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemiş, sürtünme karıştırma kaynak yönteminin diğer yöntemlere nazaran daha iyi mekanik ve mikroyapısal özelliklere sahip olduklarını saptamıştır [35].
- 15) Haşçalık ve arkadaşları, AA 5251 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliğine uç geometrisinin etkisini incelemişlerdir. Karıştırıcı uç olarak; kare, üçgen, üçgen piramit, koni ve kare piramit geometrilerini kullanmışlardır. En mukavemetli birleştirmenin, kare piramit geometrisine sahip karıştırıcıda olduğunu, en zayıf birleşmenin koni kesitli uçta gerçekleştiğini belirtmişlerdir [36].
- 16) Babu ve arkadaşları, AA 2219 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağındaki parametrelerini, matematiksel modelleme yöntemi ile

hesaplamışlar ve çekme mukavemetinde %95'lik güven sağlamışlardır [37].

- 17) Okuyucu ve arkadaşları, sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilen alüminyum levhaların mekanik özelliklerini yapay sinir ağıları kullanılarak hesaplamaya çalışmışlar ve yapay sinir ağlarının, mekanik özelliklerin hesaplanmasında alternatif bir yol olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir [38].

Bu çalışmanın amacı, sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş alüminyum alaşımlarında işlem parametrelerinin mekanik davranışlar üzerine etkisinin araştırılmasıdır. Farklı takım yolları, devir sayıları ve ilerleme hızları değişken parametre olarak seçilmiştir. Bu parametrelerin mikroyapı ve mekanik davranışlar üzerinde büyük etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Doğrusal olmayan takım yolu kullanılarak kaynak dikiş uzunluğunun artırılması ve böylece mekanik özelliklerdeki ve mikroyapıdaki değişimlerin ortaya konması hedeflenmiştir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada; alüminyum levhalar sürtünme karıştırma kaynağı ile doğrusal ve doğrusal olmayan takım yolları kullanılarak, farklı devir ve ilerleme hızlarında birleştirilerek, kaynak parametrelerinin birleşebilirliğe, mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisi ve doğrusal ile doğrusal olmayan takım yollarının birbirine karşı üstünlükleri incelenmiştir. Doğrusal olmayan takım yolu seçilmesinin sebebi kaynak dikiş uzunluğunu artırarak, kaynaklı birleştirmenin mukavemetinin artırılmasını sağlamaktır. Yapılan literatür araştırmalarında, alüminyum levhaların sürtünme karıştırma kaynağının doğrusal olmayan takım yolu kullanılarak gerçekleştirilmediği tespit edilmiştir. Doğrusal olmayan takım yolu kullanılmasının birleşebilirliğe, mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisini incelemek amacıyla bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu birleştirme işleminde kullanılan malzeme, cihaz ve işlemin nasıl yapıldığı, deney numunelerinin hazırlanışı ve mekanik özellikler ile mikroyapıların nasıl incelendiği bu bölümde açıklanmıştır.

6.1. Malzeme ve Metot

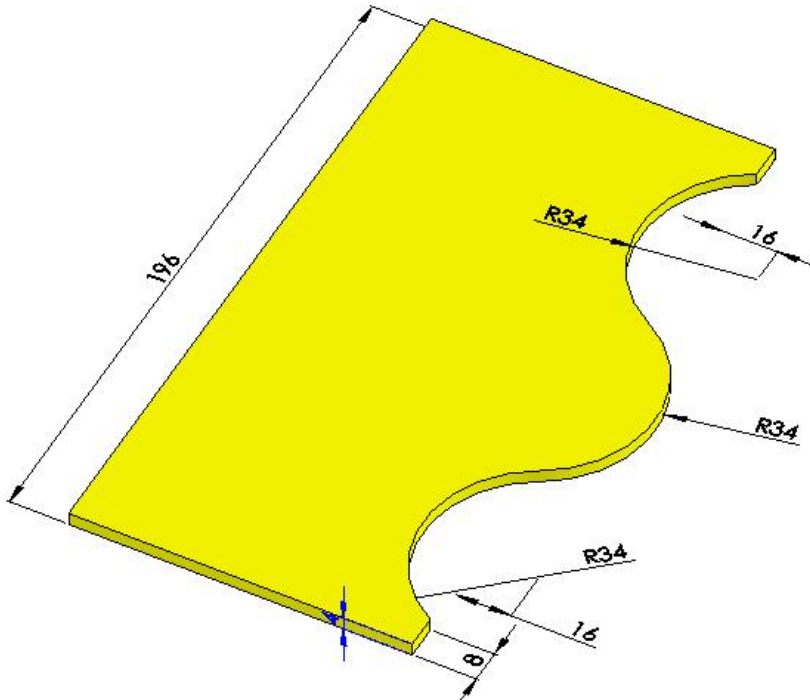
Bu çalışmada; kimyasal bileşimi Çizelge 6.1’de, mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 6.2’de verilmiş olan AA1050 alüminyum levhalar kullanılmıştır. Doğrusal takım yollu birleştirmelerde 76x196 mm ebatlarında, doğrusal olmayan takım yollu birleştirmelerde ise 95x196 mm ebatlarında alüminyum levhalar kullanılmıştır. Doğrusal olmayan takım yollu birleştirmelerde daha büyük ölçülerde alüminyum levhalar kullanılmasının sebebi, çekme numunesini çıkartabilecek ebatları sağlamaktır. Doğrusal olmayan takım yolunun geometrisi Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Doğrusal olmayan takım geometrisinde, aynı yarıçapta bir geometri izlenmiştir. Bunun sebebi ise; bu çalışmanın amacının, en iyi mukavemet değerine sahip doğrusal olmayan takım yolu geometrisini bulmak değil, doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollarının mekanik ve metalografik özelliklerini karşılaştırmak olduğu içindir.

Çizelge 6.1. Deneyde kullanılan alüminyumun kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)

Al	Fe	Ti	Zn	Mg	Mn	Cr	Ni	Si	Pb
99.756	0.208	0.016	0.007	0.006	0.001	0.002	0.001	0.001	<0.001

Çizelge 6.2. Deneyde kullanılan alüminyumun tipik özellikleri

Mekanik Özellikler				
Akma Dayanımı N/mm ²	Çekme Dayanımı N/mm ²	Uzama A5 %	Sertlik (HB)	
85.38	107.22	7	33.5	
Fiziksel Özellikler				
Özgül Ağırlık gr/cm ³	Elastite Modülü GPa	Isıl İletkenlik	Termal Genleşme	Elektriksel Direnç
2.71	71	222 W/mK	24x10 ⁻⁶ / K	0.0282x10 ⁻⁶ Ω.m



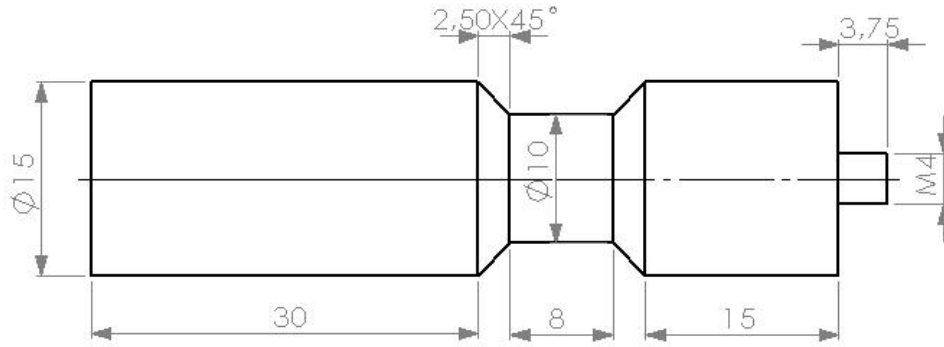
Şekil 6.1. Doğrusal olmayan takım yolu ile birleştirilen alüminyum levhanın geometrisi

6.2. Sürtünme Elemanının Üretimi

Sürtünme elemanı (pim), kimyasal bileşimi Çizelge 6.3’de verilmiş olan AISI 4140 çeliğinden Şekil 6.2’de verilen ölçülere uygun olarak TC77-SMCY Sprinner CNC torna tezgahı kullanılarak imal edilmiştir. İstenilen ölçülere getirilen pim ucuna M4 paftası ile diş açılmıştır. Sürtünme elemanına 850°C’de 45 dakika ısıtıl işlem uygulanarak yağ ortamında soğutma yapılmıştır. Isıl işlem öncesi sertliği 33 Rc olan pimin sertliği ısıtıl işlem sonrası 53 Rc olarak ölçülmüştür.

Çizelge 6.3. Sürtünme elemanının kimyasal bileşimi (ağırlıkça %)

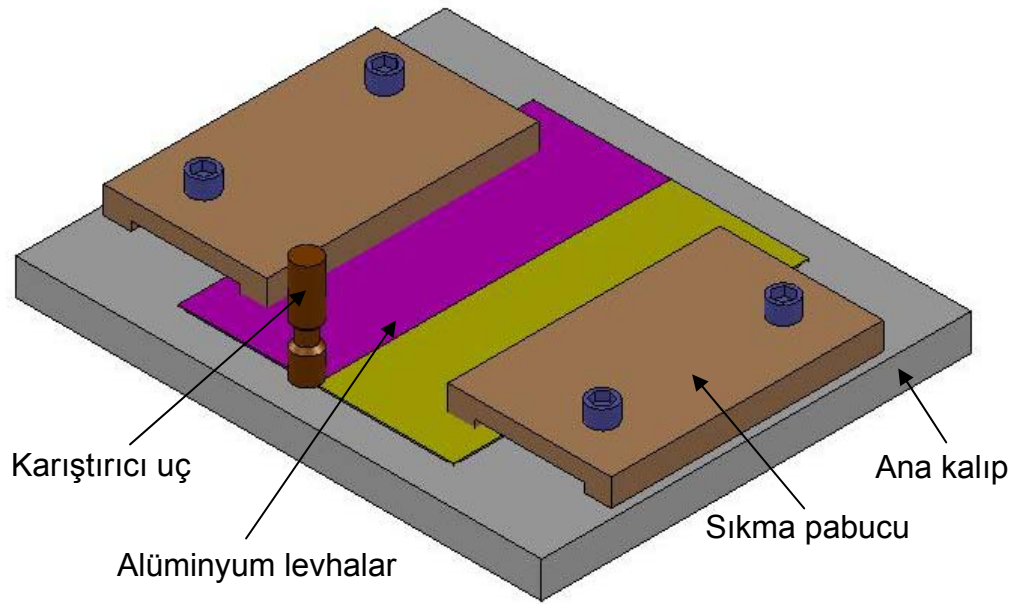
C	Mn	Cr	Mo	Si	Al	Cu	V	S	Ni
0.422	0.786	0.963	0.193	0.292	0.011	0.147	0.006	0.027	0,159



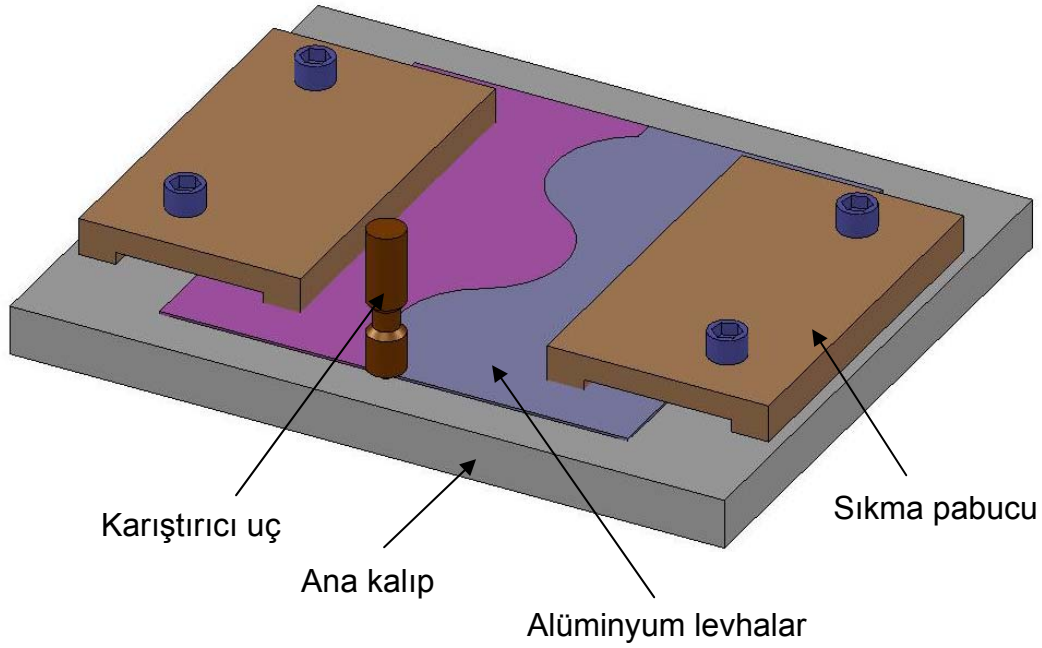
Şekil 6.2. SKK kullanılan karıştırıcı uç ve geometrisi

6.3. Numunelerin Kaynağa Hazırlanması

Alüminyum levhalar; doğrusal takım yolu kullanılarak kaynak yapılmak üzere 4x76x196 mm ebatlarında, doğrusal olmayan takım yolu kullanılarak kaynak yapılmak üzere 4x95x196 mm ebatlarında plakalar şeklinde kesildi ve birleştirilecek olan yüzeyler alın frezeleme ile düzeltildi. Kesilen plakaları tezgâha bağlamak için çift taraflı kalıp imal edildi. Kalıbın bir tarafı doğrusal takım yolu ile kaynatılacak plakaları bağlamak (Şekil 6.3), diğer tarafı ise doğrusal olmayan takım yolu ile kaynatılacak plakaları bağlamak için kullanıldı (Şekil 6.4).



Şekil 6.3. Doğrusal takım yolu için kullanılan bağlama kalıbı



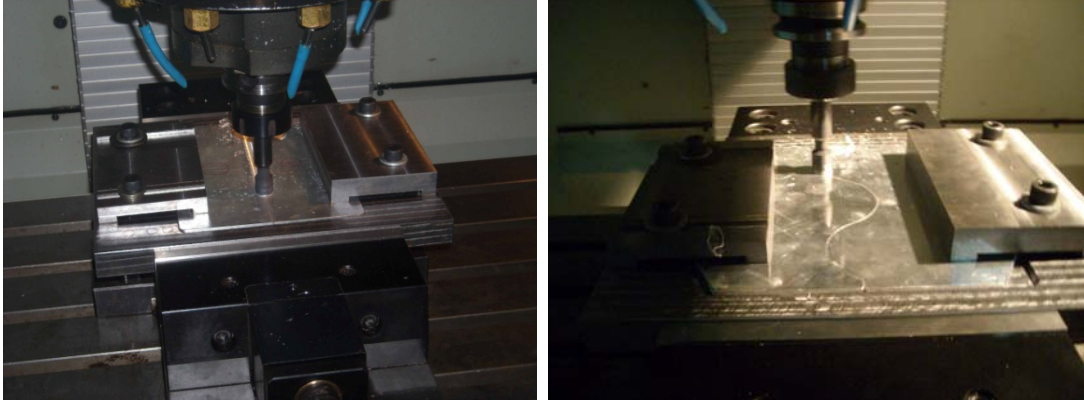
Şekil 6.4. Doğrusal olmayan takım yolu için kullanılan bağlama kalıbı

6.4. Kaynak İşleminin Uygulanışı

Sürtünme karıştırma kaynağı deneyleri, Şekil 6.5’de gösterilen First MCV 600 CNC dik işleme merkezi kullanılarak yapıldı. Plakaların birleşme yüzeyleri komparatör ile kontrol edilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynak işleminde alüminyum malzemeye kaynak işlemi öncesinde herhangi bir yüzey hazırlama, ısıtma işlemi ve oksit giderme işlemi yapılmamış, levhalara kaynak ağzı açılmamıştır. Dönme hareketi ile karıştırıcı ucun omuz yüzeyi, iş parçasına temas edinceye kadar düşey yönde ilerleme sağlanmıştır. Bu konumda, 30 saniye beklenerek karıştırıcı ucun omuz bölgesinin levhaları ısıtması sağlanmıştır. Yeterli sıcaklık sağlandıktan sonra, tezgâh otomatik olarak birleşme yüzeyleri boyunca ilerletilmiş ve kaynak işlemi tamamlanmıştır. Kaynak işleminden sonra numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Şekil 6.6’da doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollu kaynak işleminin uygulanması görülmektedir.



Şekil 6.5. Deneylerde kullanılan tezgah



Şekil 6.6. Kaynak işleminin uygulanışı

6.5. Deneylerde Kullanılan Kaynak Parametreleri

Yapılan deneylerde; karıştırıcı ucun dönme hızı, ilerleme hızı ve yolu değişken parametreler olarak alınmıştır. Yapılan literatür araştırmalarına uygun olarak karıştırıcı ucun dönme ve ilerleme hızları belirlenmiştir. Doğrusal olmayan takım yolunun tespitinde her hangi bir araştırmadan faydalanılmamıştır. Sürtünme karıştırma kaynağının yapılmasında Çizelge 6.4'de verilmiş olan değişken parametreler kullanılmıştır.

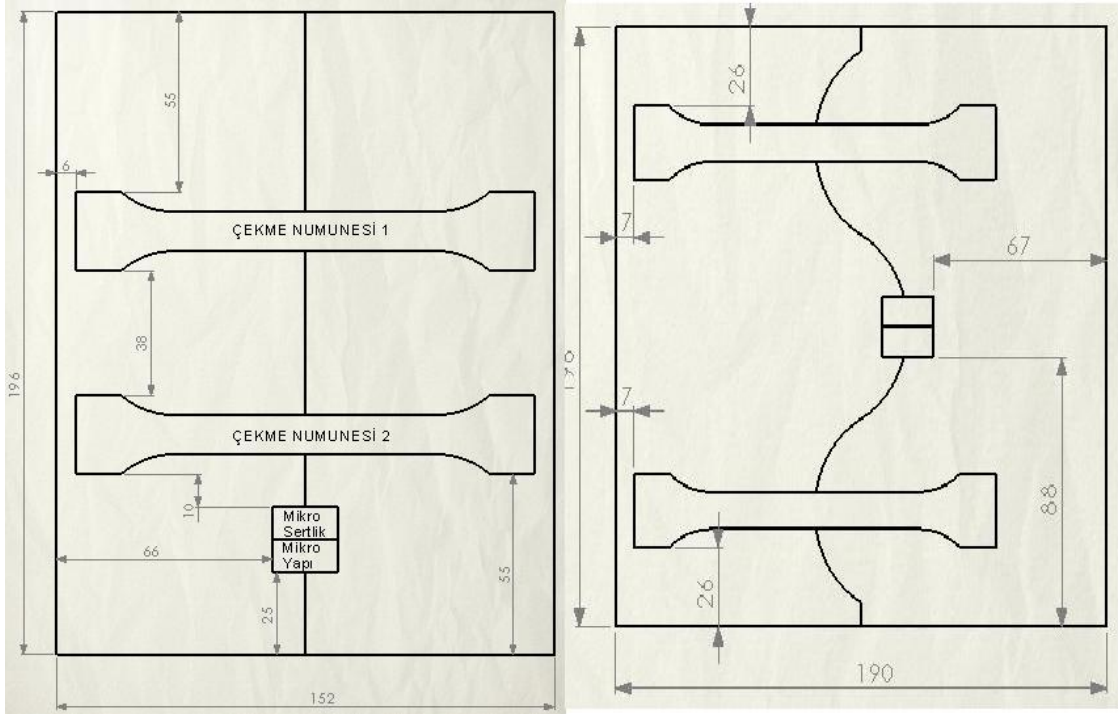
Çizelge 6.4. Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan kaynak parametreleri

TAKIM YOLU	DÖNME HIZI (dev./dak.)	İLERLEME HIZI (mm./dak.)	NUMUNE NO
Doğrusal	900	100	N1
		120	N2
		170	N3
	1100	100	N4
		120	N5
		170	N6
Doğrusal olmayan	900	100	S1
		120	S2
		170	S3
	1100	100	S4
		120	S5
		170	S6

6.6. Mekanik ve Metalografik Testler İçin Numunelerin Hazırlanması

Her bir numunenin kaynak yüzey görünümüleri fotoğraf ile görüntülenmiştir. Görsel muayeneden geçen levhalardan, yapılacak deney planına göre TS EN ISO 15614-2 standardına uygun deney numuneleri şerit testerede soğutma sıvısı kullanılarak kesilmiştir. Kaynaklı levhaların başlangıç ve bitiminden itibaren 25 mm.'lik kısımları kesilerek atılmıştır (Şekil 6.7). Bunun sebebi kaynağın başlangıç ve bitiminde oluşabilecek hatalı bölgeleri kullanmamaktır.

Bu çalışmada deney planına göre mikroyapı incelemeleri, mikrosertlik ölçümleri ve çekme deneyleri yapılmıştır. Buradaki amaç kaynaklı parçaların çekme performanslarını incelemektir. Sertlik ölçümlerinin ve yapı incelemelerinin yapılma nedeni ise kaynak bölgesinde oluşan bölgelerin faz yapısını ve kritik sertlik değerlerinin belirlenmesidir.



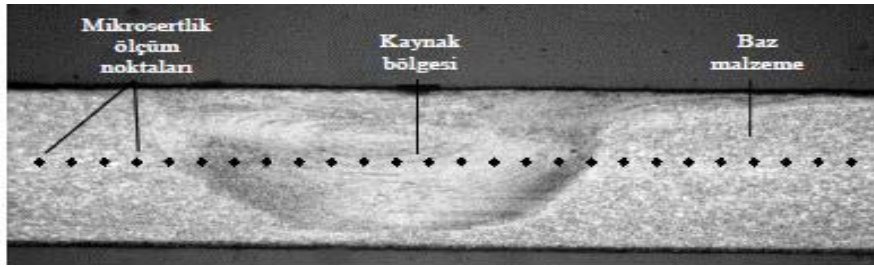
Şekil 6.7. TS EN ISO 15614-2'ye göre test numunelerinin kaynaklı levhadaki yeri

6.6.1. Mikroyapı incelemeleri

Kaynak bölgesindeki mikro düzeydeki değişimi ve aynı zamanda da kaynak değişkenlerinin mikroyapıdaki etkilerini gözlemlemek amacıyla mikroyapı incelemelerinin yapılması planlanmıştır. Bu maksatla; kaynak yönüne dik olarak kaynak bölgesinden 20x10 mm ölçülerinde alınan numuneler, polyester kalıba alındıktan sonra sırasıyla 150, 180, 360 ve 1000 grid zımpara kâğıtlarında zımparalanmıştır. Daha sonra 3 µm tane boyutunda alümina solüsyonu kullanılarak parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra hazırlanan bu numuneler, Tucker Reaktifi (25 ml su, 15 ml HF, 45 ml HCl, 15 ml HNO₃) kullanılarak dağlanmıştır. Yapı incelemeleri için XJP-6A Ters Tip Metal Mikroskobu kullanılmıştır.

6.6.2. Mikrosertlik ölçümleri

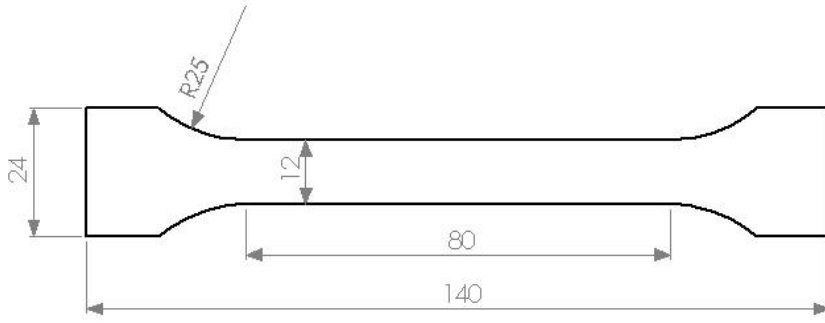
Kaynaklı parçaların sertlik ölçümleri için Metkon MH-6 mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri için kaynak kesitinden 4x20 mm ölçülerinde alınan numunelerin orta ekseninde mikrosertlik ölçümleri yapılarak, bölgeler arasındaki değişimi incelenmiştir. Alınan numunelerin 4 mm kalınlığındaki yüzeylerine mikroyapı incelemelerinde belirtilen zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri uygulanmıştır. Sertlik ölçümünde 100 gr yük ve 5 sn süre kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri kaynak doğrultusuna dik kesitin eksenine doğrultusunda 1 mm aralıklarla yapılmıştır (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı noktaların şematik gösterimi

6.6.3. Çekme deneyleri

Mekanik davranışları belirlemek için, kaynaklı bağlantılardan TS 287 EN 895'e uygun olarak Şekil 6.9'da verilen boyutlarda ve birleşme hattına dik doğrultuda numuneler çıkartılmış ve TS 138 EN 10002-1 standardına göre çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Her deney parametresinden ikişer adet çekme numunesi alınmıştır. Yapılan çekme testleri, çekme kapasitesi 10 kN olan Alşa marka elektromekanik çekme test cihazında 2 mm/dak çene hızı uygulanarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.9. Standart çekme numunesi şekli ve ölçüleri

7. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

Kaynak işlemi sonrasında hazırlanan numunelere, görsel ve mikroyapı muayeneleri ile mekanik deneyler (çekme ve mikrosertlik) yapılmıştır.

7.1. Görsel İnceleme Sonuçları

Kaynaklanan malzemelere çıplak gözle yapılan muayenelerde, SKK yönteminin görüntü ve yüzey pürüzlülüğü yönünden diğer ergitmeli kaynak yöntemlerine nazaran oldukça üstün olduğu görülmüştür. SKK ile elde edilen kaynak yüzeylerinin temizleme veya herhangi bir kaynak sonrası işlem gerektirmemesi de diğer bir avantaj olarak tespit edilmiştir.

Doğrusal ve doğrusal olmayan takım yolu ile birleştirilen levhalar yüzey pürüzlülüğü bakımından karşılaştırılmış ve sonuçlar her iki yöntem için de paralellik göstermiştir. Görsel inceleme sonuçları Çizelge 7.1’de karşılaştırmalı olarak verilmiş ve sonuçlar aşağıda açıklanmıştır (Şekil 7.1-7.4).

- 1) Karıştırıcı ucun ilk temasından itibaren tüm numunelerde ortalama 40 mm’lik kısımlarda soğan halkalarının daha belirgin olduğu ve yüzeyde ufak çatlaklar olduğu tespit edilmiştir. Bunun sebebinin de karıştırıcı ucun ilk temasından itibaren yeterli ısı girdisini hemen sağlayamaması ve omuz kısmının parça yüzeyine tam temasını hemen sağlayamamasıdır.
- 2) Sabit devir sayısında ilerleme arttıkça, kaynak dikişindeki soğan halkaları şeklinde oluşan yüzey pürüzlülüğünün arttığı, sabit ilerlemede devir arttıkça, kaynak dikişindeki soğan halkaları şeklinde oluşan yüzey pürüzlülüğü azaldığı görülmüştür.
- 3) Düşük devirlerde yapılan birleştirmelerde yüzey kalitesi bozuk ve dikiş yüzeyi, düşük ısı girdisinin sonucu tam karışamamadan dolayı gözenekli

ve çapaklı oluşmuştur. Artan devir sayısı ile daha pürüzsüz ve gözeneksiz dikiş yüzeyleri oluşmuştur. Artan devir sayısı ile kaynak bölgesine aktarılan ısı girdisi arttığından malzemenin plastik akışı kolaylaşmış olur, bu da daha homojen karışımlı bir kaynak metali ve dikiş yüzeyi oluşmasını sağlamıştır.

- 4) Kaynaklı birleştirmelerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmemiş, görsel olarak değerlendirilmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollu birleştirmelerde yüzey kalitesi farkı görülmemektedir. Ancak karıştırıcı uç devir sayısı arttıkça ve ilerleme hızı azaldıkça yüzey kalitesinin arttığı görülmüştür.

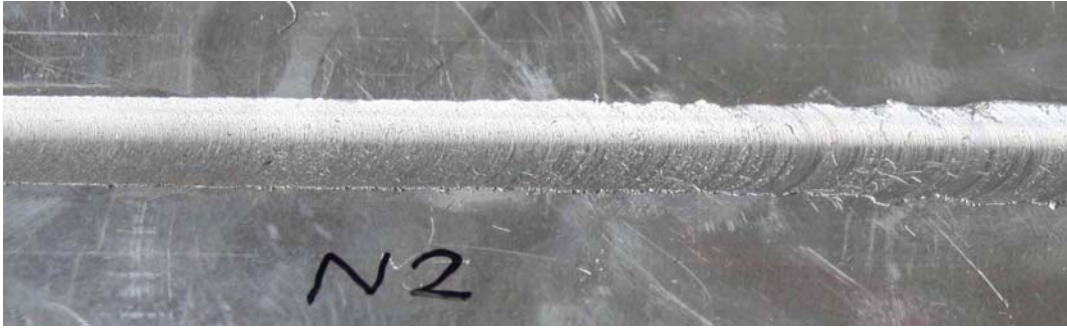
Çizelge 7.1. Görsel inceleme sonuçları

TAKIM YOLU	DÖNME HIZI	İLERLEME	NUMUNE NO	İNCELEME SONUCU ¹
Doğrusal	900	100	N1	4
		120	N2	5
		170	N3	6
	1100	100	N4	1
		120	N5	2
		170	N6	3
Doğrusal olmayan	900	100	S1	4
		120	S2	5
		170	S3	6
	1100	100	S4	1
		120	S5	2
		170	S6	3

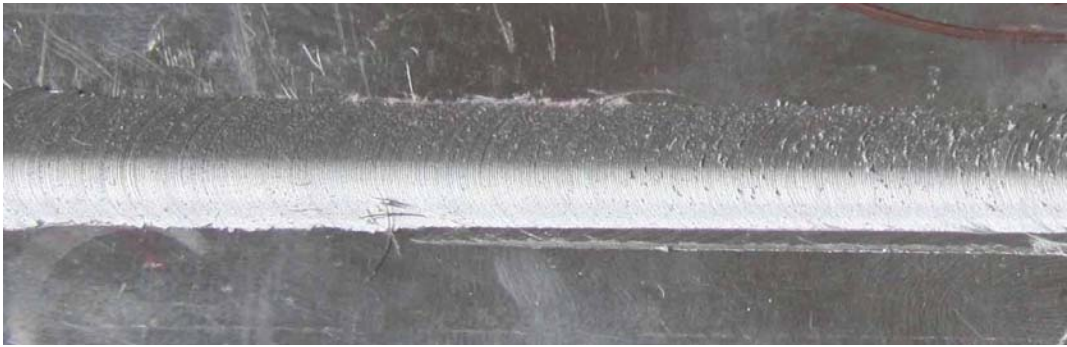
¹ Yüzey kalitesinde en iyi sonuç 1 ile numaralandırılmıştır.



1)



2)



3)

Şekil 7.1. Doğrusal kaynak dikiş profilleri n: 900 dev/dk., 1) V: 100 mm/dk.,
2) V: 120 mm/dk., 3) V: 170 mm/dk.



1)



2)



3)

Şekil 7.2. Doğrusal kaynak dikiş profilleri n: 1100 dev/dk., 1) V: 100 mm/dk., 2) V: 120 mm/dk., 3) V: 170 mm/dk.



1)



2)



3)

Şekil 7.3. Doğrusal olmayan kaynak dikiş profilleri n: 900 dev/dk., 1) V: 100 mm/dk., 2) V: 120 mm/dk., 3) V: 170 mm/dk.



1)



2)



3)

Şekil 7.4. Doğrusal olmayan kaynak dikiş profilleri n: 1100 dev/dk., 1) V: 100 mm/dk., 2) V: 120 mm/dk., 3) V: 170 mm/dk.

7.2. Çekme Deney Sonuçları

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollarıyla alın altına birleştirilen levhaların, çekme deneyindeki performansını belirlemek amacıyla, her bir numuneden alınan ikişer adet çekme deney numunesi, TS 138 EN 10002-1 sayılı standarda uygun olarak çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Çekme deney sonuçları Çizelge 7.2’de verilmiştir. Mukavemet performansı; kaynaklı numunelerin çekme dayanımlarının, esas malzemenin çekme dayanımına oranı olarak tespit edilmiştir.

Çizelge 7.2. Çekme numunelerinin deney sonuçları

TAKIM YOLU	NUMUNE NO	DEVİR SAYISI (dev/dak)	İLERLEME HIZI (mm/dak)	ÇEKME DAYANIMI N/mm ²	KOPMA UZAMASI %	MUKAVEMET PERFORMANSI %
Esas malzeme		-	-	107,22	20	-
DOĞRUSAL	N1	900	100	56,63	4,27	52,82
	N2		120	58,12	4,18	54,21
	N3		170	62,73	3,27	58,51
	N4	1100	100	62,37	2,45	58,17
	N5		120	65,79	3,09	61,36
	N6		170	71,76	4,45	66,93
DOĞRUSAL OLMAYAN	S1	900	100	70,29	3,64	65,56
	S2		120	66,32	3,09	61,85
	S3		170	66,88	2,73	62,38
	S4	1100	100	74,09	3,18	69,10
	S5		120	67,74	3,36	63,18
	S6		170	68,71	3,45	64,08

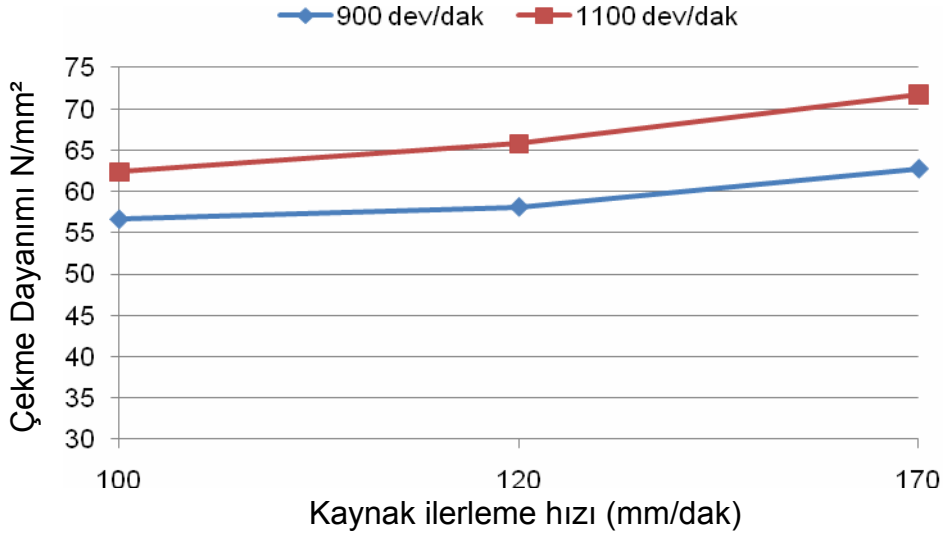
Çekme testi sonrası numuneler incelendiğinde kopmanın kaynak bölgesi dışarısında bir yerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu bölge ITAB’a karşılık

gelmektedir. Çünkü dinamik olarak yeniden kristalleşen kaynak metalinin akma ve çekme dayanım değerleri, termo-mekanik olarak etkilenen ITAB bölgesinden daha yüksektir.

Çizelge 7.2 incelendiğinde:

1) Doğrusal takım yollu SKK'nda;

- N1 ve N4 numunelerinin çekme dayanımlarının, diğer bütün numunelerin maksimum gerilme değerlerinden düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, düşük ilerleme hızlarında daha fazla ısı girdisi olduğundan, yapılan kaynaklı bağlantıların mukavemetlerinin az olduğunu göstermektedir.
- Devir sayısı ve kaynak hızına bağlı olarak çekme dayanımındaki değişimler Şekil 7.5'de gösterilmiştir. Çekme numunelerinin geneline bakıldığında devir sayısı sabitken ilerleme hızının artmasıyla kaynaklı parçaların mukavemet değerlerinde artış gözlemlenmektedir. Sabit devir sayısında artan ilerleme hızı ile malzemeye giren ısı miktarı azalmakta bu da malzemenin mukavemetinin artmasına neden olmaktadır.
- İlerleme hızı sabitken, devir sayısının artmasıyla kaynaklı parçaların mukavemet değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu durum, düşük devir sayısının olduğu deneylerde, yeterli plastikliğe ve viskoziteye ulaşamayan malzemenin, boşluklu ve homojen olmayan bir karışımın oluşmasına neden olduğunu ve bu homojen olmayan boşluklu karışımın yeniden kristalleşmede mikroyapısal farklılıklara yol açarak bağlantıların mekanik özelliklerini zayıflattığını göstermektedir.
- N6 numaralı numunenin 71.76 N/mm^2 ile en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülürken, N1 numunesinin en düşük çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir.



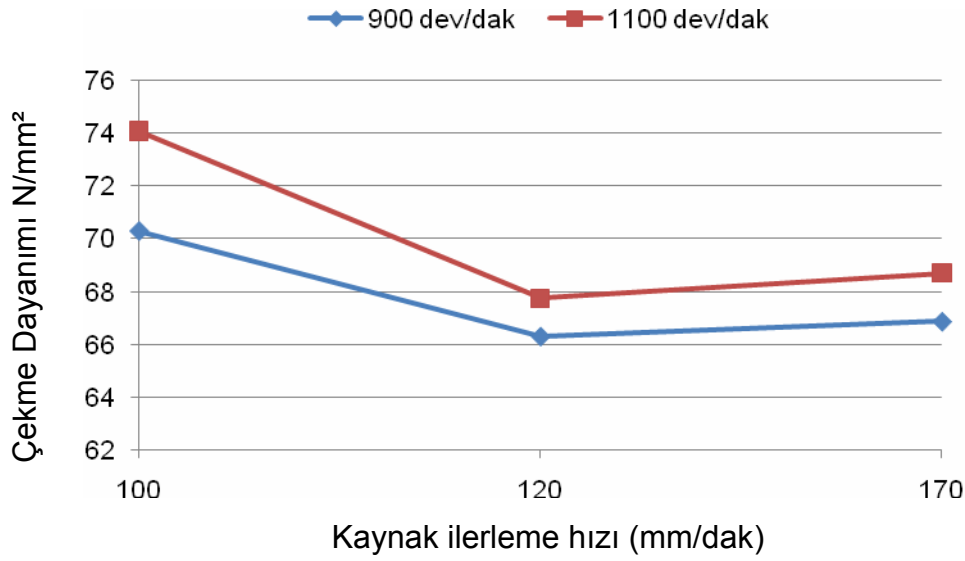
Şekil 7.5. Doğrusal takım yollu kaynakta ilerleme hızının çekme dayanımına etkisi

2) Doğrusal olmayan takım yollu SKK'nda;

- Doğrusal takım yollu numunelerin aksine en küçük çekme dayanımlarının S2 ve S5 numaralı numunelerde olduğu görülmektedir. Devir sayısı ve kaynak hızına bağlı olarak çekme dayanımındaki değişimler Şekil 7.6'da gösterilmiştir. İlerlemenin artmasıyla birlikte ısıнын azalacağı ve mukavemet değerinin artacağı beklenirken, düşük ilerleme hızlarında mukavemet değerlerinin yüksek çıktığı görülmüştür. Bunun nedeni; yüksek devirde plastikleşen malzemenin düşük ilerleme hızında karıştırıcı uç yardımı ile tam yoğun bir karışımın olması ve ayrıca düşük ilerleme, plastik malzemeye dövme pekleşmesi gibi işlem yaptığından mukavemet artışına neden olur. Bu durum, ilerleme hızının artmasının doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollu birleştirmelerde farklı mukavemet değerlerini ortaya çıkardığını göstermektedir.
- İlerleme hızı sabitken, devir sayısının artmasıyla kaynaklı parçaların mukavemet değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu durum, düşük devir sayısının olduğu deneylerde, yeterli plastikliğe ve viskoziteye ulaşamayan malzemenin, boşluklu ve homojen olmayan bir karışımın oluşmasına

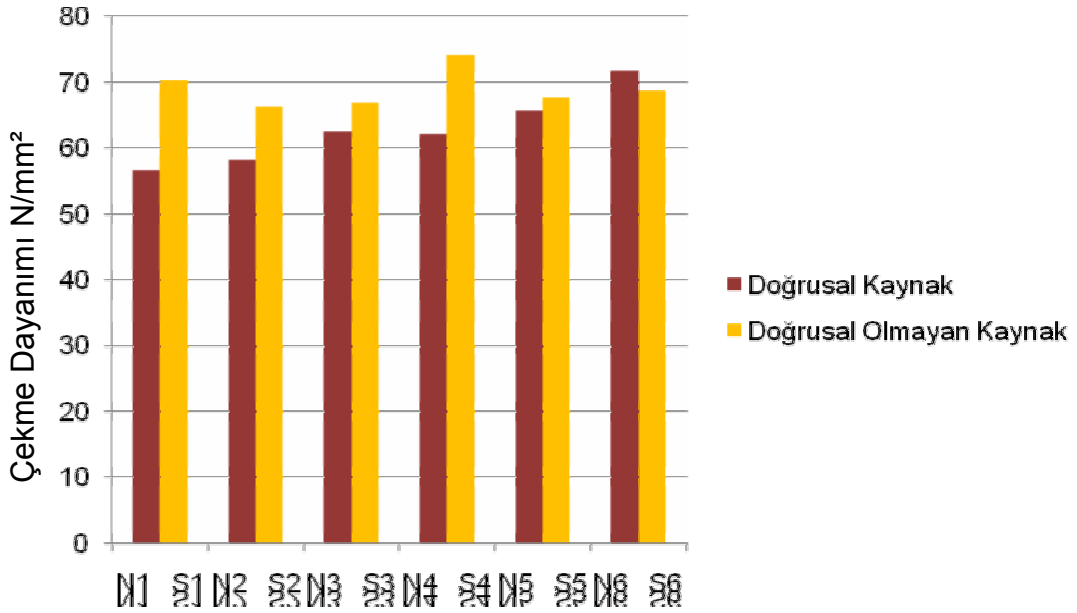
neden olduğunu ve bu homojen olmayan boşluklu karışımın bağlantıların mekanik özelliklerini zayıflattığını göstermektedir.

- S4 numaralı numunenin 74.09 N/mm^2 ile en yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülürken, S2 numunesinin en düşük çekme dayanımına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 7.6. Doğrusal olmayan takım yollu kaynakta ilerleme hızının çekme dayanımına etkisi

- 3) Doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollu numunelerin çekme deney sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 7.7’de verilmiştir. Şekil 7.7 incelendiğinde; doğrusal olmayan takım yollu numunelerin çekme dayanımlarının, doğrusal takım yollu numunelerin çekme dayanımlarından yüksek olduğu görülmüştür. Doğrusal olmayan takım yolu kullanılması, kaynak alanını ve süresini artıracığından toplam ısı girdisi artacaktır. Böylece malzemenin plastik akışı kolaylaşarak, tam yoğun denebilecek dikiş oluşmakta bu da dayanımı artırmaktadır.



Şekil 7.7. Doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollu birleştirmelerin karşılaştırmalı çekme deney sonuçları

7.3. Mikroyapı İnceleme Sonuçları

Alüminyum levhaların alın kaynağı sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelerde, birleştirme bölgesinin alt tarafında tünel şeklinde boşluk oluştuğu görülmektedir. Bunun sebebi literatürde; karıştırıcı ucun vida dişinin yönünden dolayı [30,39] ya da karıştırıcı ucun omuz kısmından malzeme kaybı sonucu oluştuğu [24] belirtilmektedir.

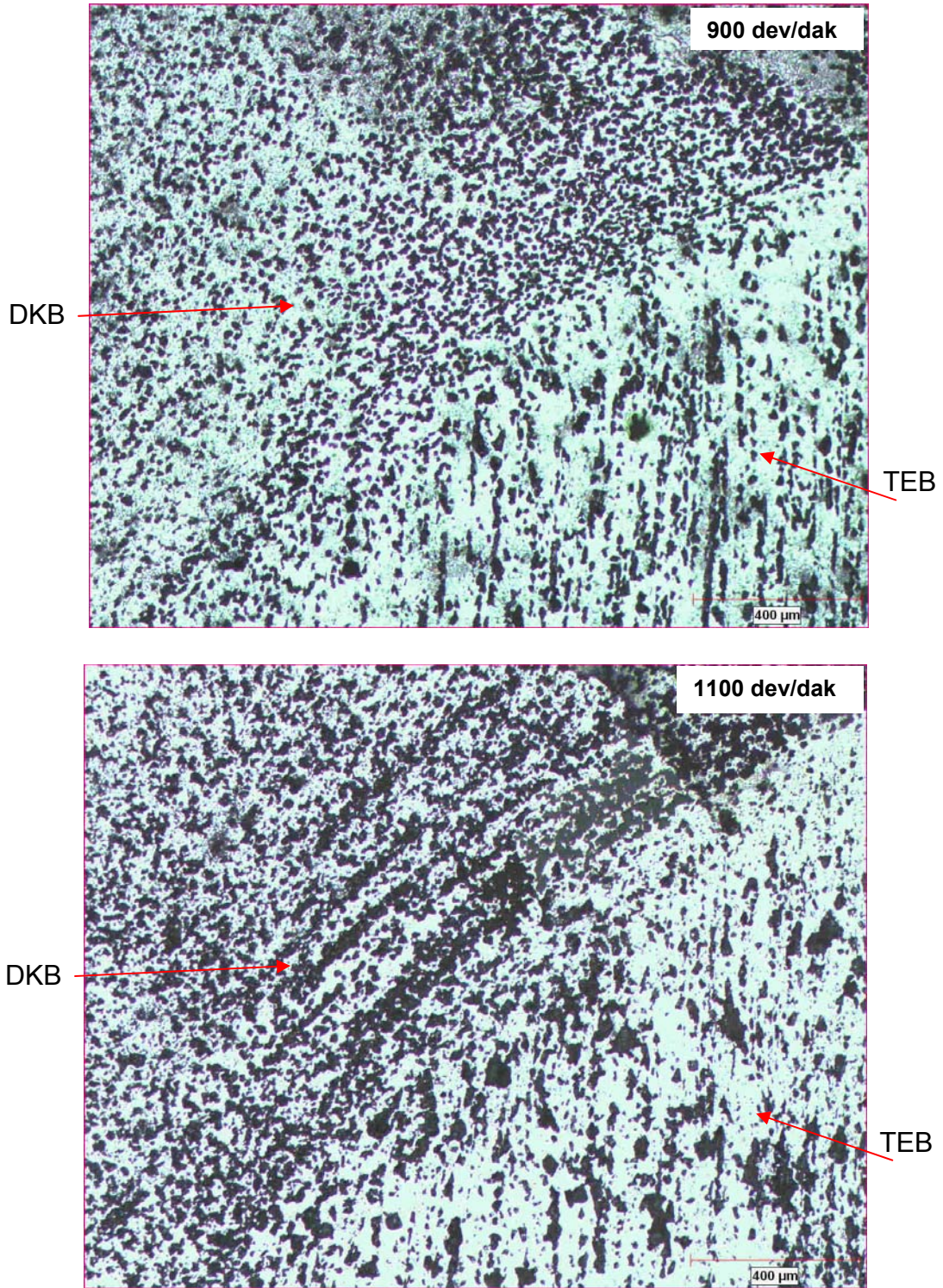
SKK yapılmış parçaların kaynak yönüne dik kesitlerinde mikroyapı incelemesi sonucu üç farklı bölge tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 4.2). Bunlar C: dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB), B: termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB) ve A: ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) olarak tamamen mikroyapı karakteristiğine bağlı olarak adlandırılmıştır.

7.3.1. Devir sayısının mikroyapı üzerindeki etkisi

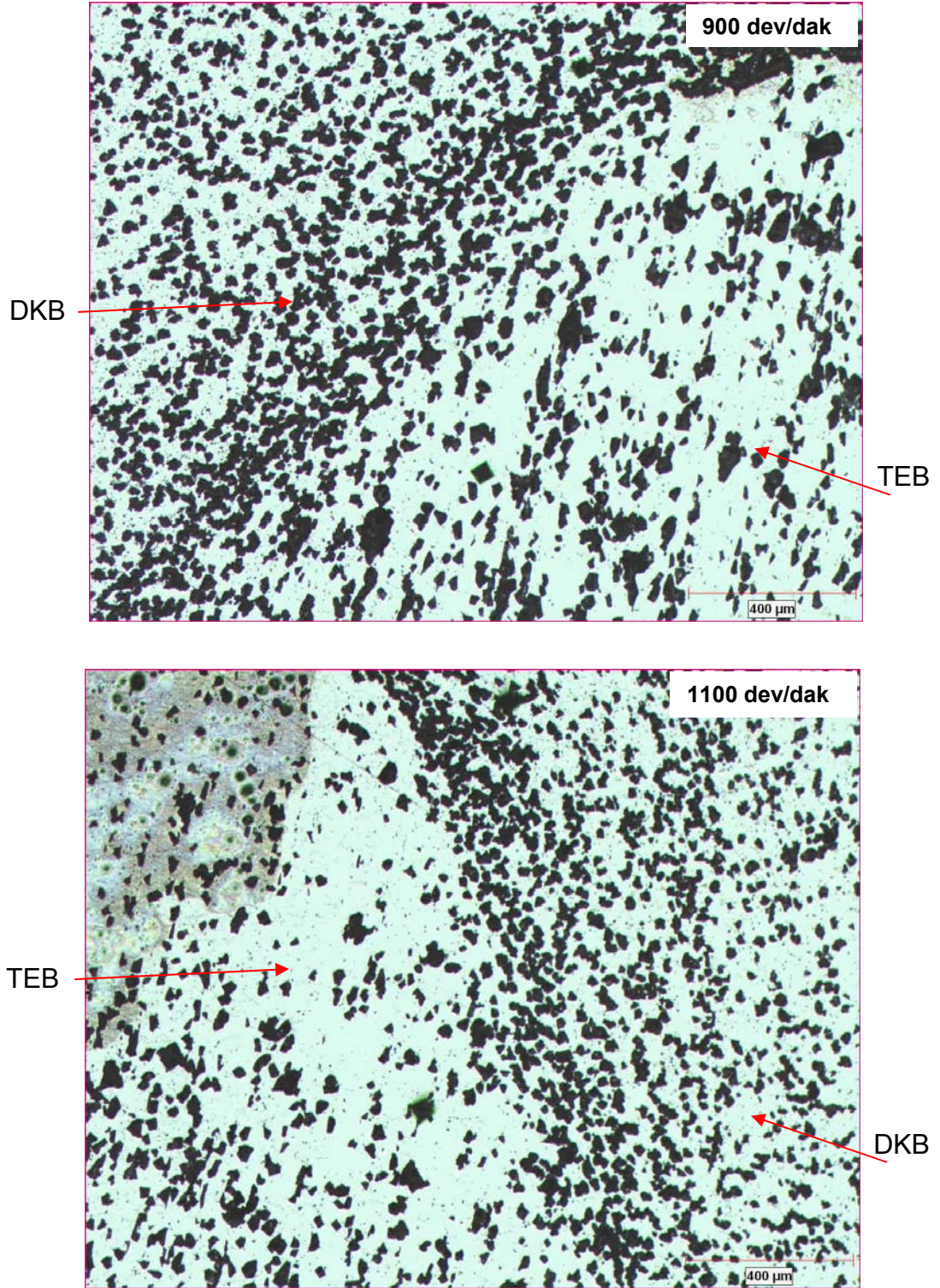
Doğrusal takım yollu kaynaklı birleştirmelere ait numunelerin, 900 dev/dak ve 1100 dev/dak dönme hızları ve sabit ilerleme hızı (170 mm/dak) şartlarında birleştirilen N3 ve N6 numunelerin DKB ve TEB arasındaki bölgede oluşan tane yapıları ve deformasyon bantları Şekil 7.8'de görülmektedir. İki resim incelendiğinde devir sayısının artışına paralel olarak DKB-TEB ara bölgesinde tanelerin kademeli olarak irileştiği dikkat çekmektedir. Tane yapılarındaki bu değişmeye, sürtünme sıcaklığının neden olduğu düşünülmektedir. Artan devir sayısı, birim zamanda yüzeyde oluşan ısı enerjisini artırmaktadır ve böylece sıcaklığın etkisiyle kaynak bölgesindeki mikroyapı özelliklerini değiştirerek ve oluşan fazla ısıyla tavlanarak tane yapılarında irileşmelere yol açmaktadır.

Doğrusal olmayan takım yollu kaynaklı birleştirmelere ait numunelerin 900 dev/dak ve 1100 dev/dak dönme hızları ve sabit ilerleme hızı (100 mm/dak) şartlarında birleştirilen S1 ve S4 numunelerin DKB ve TEB arasındaki bölgede oluşan tane yapıları ve deformasyon bantları Şekil 7.9'da görülmektedir. İki resim incelendiğinde artan devir sayısına bağlı olarak tane yapılarında irileşmeler görülmektedir. Bu sonuç doğrusal takım yolu kullanılarak birleştirilen numuneler ile paralellik göstermektedir.

Şekil 7.8 ve Şekil 7.9'daki mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, dövme ve plastik deformasyon ile DKB bölgesinde TEB bölgesine nazaran daha ince taneli bir yapı oluşumu meydana geldiği görülmektedir. Her iki bölgede oluşan tane yapıları, işlem parametrelerinin etkisi sonucu farklılıklar göstermiştir. Özellikle kaynak esnasında oluşan deformasyon ve ekstrüzyon şiddetinin, bütün kaynaklı bağlantıların DKB'sinde tanelerin küçülmesine neden olduğu bilinmektedir. TEB bölgesinde ise DKB'de oluşan ekstrüzyonun ve dövmenin neden olduğu düşünülen yüksek sıcaklık söz konusudur. Yüksek sıcaklık bu bölgedeki yapıyı tavlayarak tanelerin irileşmesine neden olmaktadır.



Şekil 7.8. Doğrusal takım yolu birleştirmelerde 170 mm/dak ilerleme hızında devir sayısının mikroyapı üzerindeki etkisi (x50)



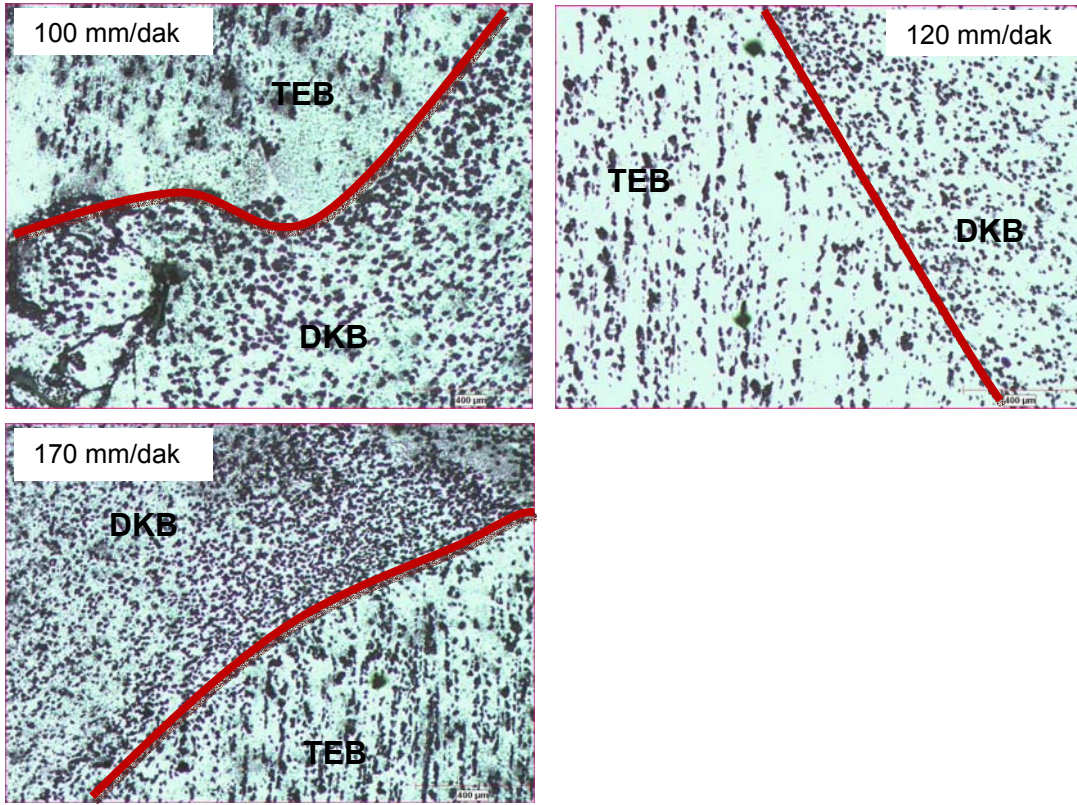
Şekil 7.9. Doğrusal olmayan takım yolu birleştirmelerde 100 mm/dak ilerleme hızında devir sayısının mikroyapı üzerindeki etkisi (x50)

7.3.2. İlerleme hızının mikroyapı üzerindeki etkisi

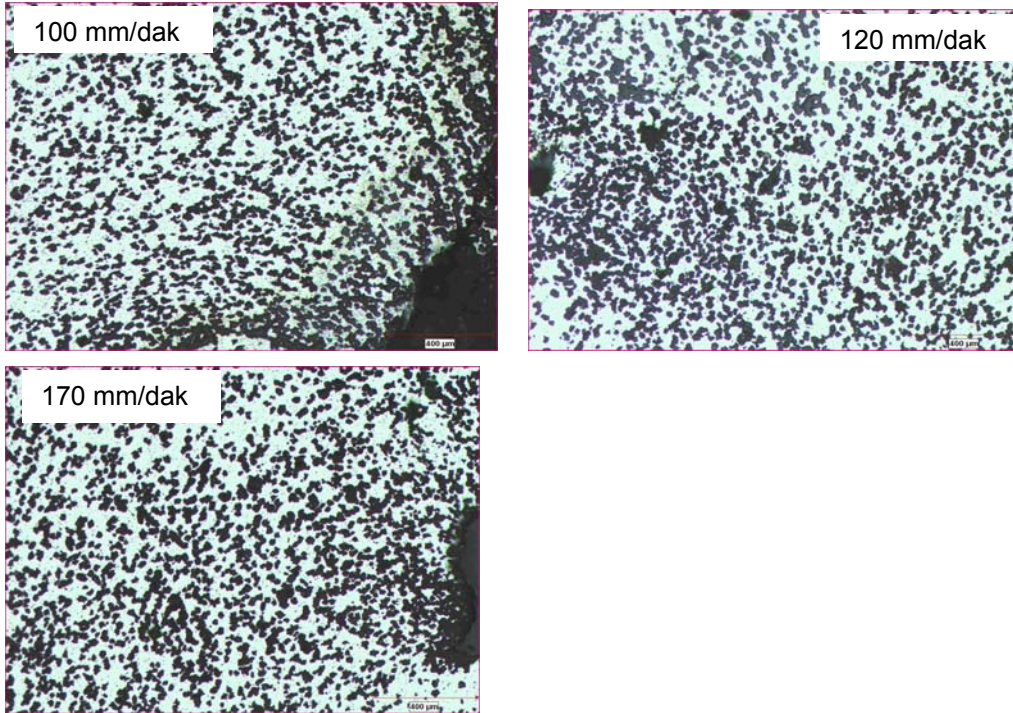
Doğrusal takım yollu kaynaklı birleştirmelere ait numunelerin 1100 dev/dak dönme hızı ve sırasıyla 100, 120 ve 170 mm/dak ilerleme hızlarında birleştirilen N4, N5 ve N6 numunelerinin ara bölgelerinden alınan mikroyapı fotoğrafları Şekil 7.10'da gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde artan ilerleme hızlarıyla kaynak metalinin yönlenmesi artmakta, ancak düşük kaynak ilerleme hızında kaynak metali yönlenmesi fazla belirgin görülmemektedir. Kaynak ilerleme hızı 170 mm/dak'ya ulaştığında yönlenme daha homojen bir dağılım göstermektedir. Ayrıca ilerleme hızının kaynak çekirdeğindeki tane yapısına etkisi incelendiğinde, artan ilerleme hızı ile tane boyutlarının küçüldüğü görülmektedir. Artan ilerleme hızı kaynak esnasında takımın herhangi bir bölgedeki temas süresini ve dolayısıyla kaynak sıcaklığına maruz kalma süresini azaltacağından bu sonuç uygun bir sonuçtur.

Doğrusal olmayan takım yollu kaynaklı birleştirmelere ait numunelerin 900 dev/dak dönme hızı ve sırasıyla 100, 120, 170 mm/dak ilerleme hızlarında birleştirilen S1, S2 ve S3 numunelerinin kaynak bölgesinden (DKB) alınan mikroyapı fotoğrafları Şekil 7.11'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde artan ilerleme hızıyla kaynak çekirdeğindeki kaynak metali yönlenmesi artmakta, ancak düşük kaynak ilerleme hızında kaynak metali yönlenmesi fazla belirgin görülmemektedir. Bu durum doğrusal takım yollu numuneler ile paralellik göstermektedir.

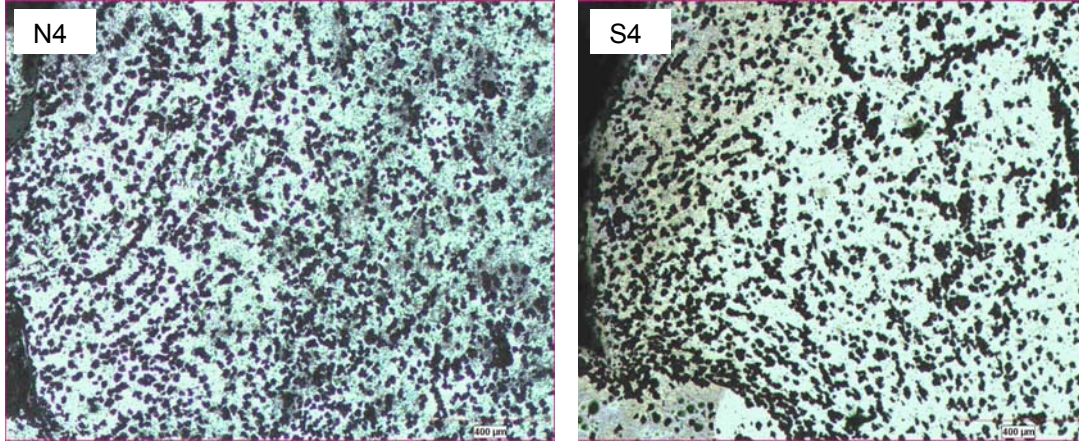
Doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollu birleştirmelerin aynı devir ve aynı ilerleme hızındaki birleştirmelerine ait numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 7.12'de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde, doğrusal olmayan takım yollu birleştirilen numunelerin kaynak çekirdeğindeki karışımın daha homojen ve yönlenmelerin daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 7.10. Doğrusal takım yolu birleştirmelerde 1100 dev/dak devir sayısında ilerleme hızının mikroyapı üzerindeki etkisi (x50)



Şekil 7.11. Doğrusal olmayan takım yolu birleştirmelerde 900 dev/dak devir sayısında ilerleme hızının mikroyapı üzerindeki etkisi (x50)



Şekil 7.12. Doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollu numunelerin mikroyapılarının karşılaştırılması

7.4. Mikrosertlik Deney Sonuçları

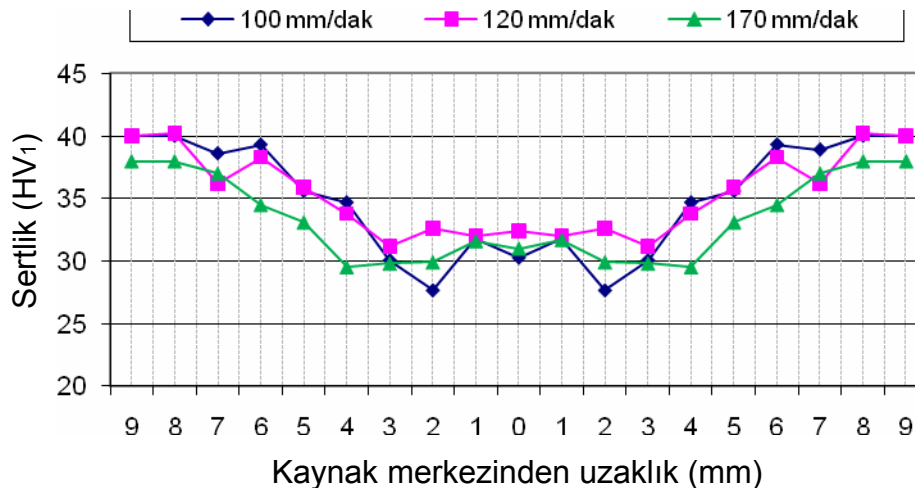
Farklı devir ve ilerleme hızlarında, doğrusal ve doğrusal olmayan takım yolları kullanılarak kaynaklanan numunelerin kaynak merkezinden ana metale doğru sertlik ölçümleri alınarak, kaynak metali ile ana metal arasındaki sertlik farkları Şekil 7.13, Şekil 7.14, Şekil 7.15, Şekil 7.16'da gösterilmiştir.

Şekillerin tamamına bakıldığında sonuçların normal olduğu ve bütün numunelerin sertlik değerlerinin kaynak metalinden, ana malzemeye doğru arttığı görülmektedir. Kaynak merkezinden toparlanma bölgesine doğru sertlikte küçük bir düşüş gözlenirken, toparlanma bölgesinde sertliğin ana malzemeye doğru arttığı görülmektedir. Kaynak merkezinden ana malzemeye doğru 8 mm'den sonra ana malzemenin sertliğinde bariz bir değişme görülmemiştir. Bu da ısıнын karıştırıcı omuz bölgesinin dışında malzeme özelliklerini etkilemediğini göstermektedir.

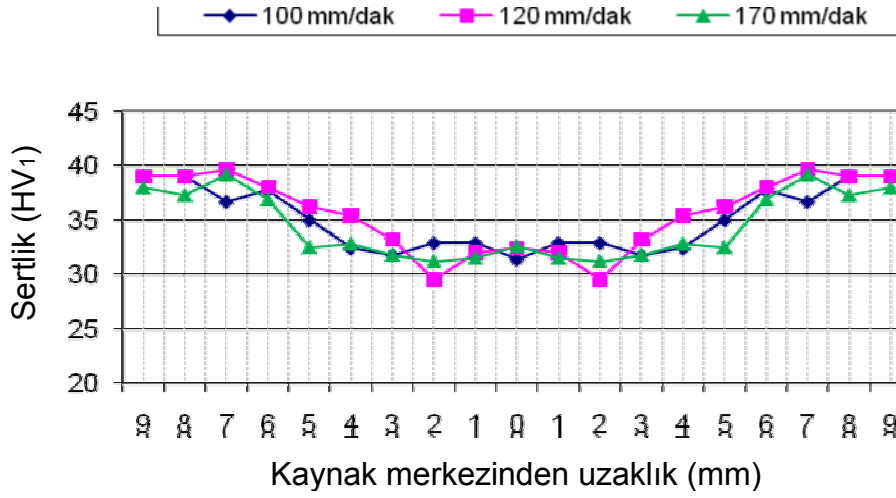
Kaynak merkezinden yaklaşık 4 mm'lik bölge dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgedir. Bu bölge deformasyonun en fazla olduğu bölge olduğundan bazı numunelerde kaynak bölgesinde sertliğin yüksek çıktığı

görülmektedir. Kaynak bölgesinde 15 mm'lik mesafe toparlanma bölgesidir. Yani pim omzunun malzemeye temas ederek, malzemeye ısı girdisinin sağlandığı bölgedir. Bu nedenle ısı girdisinin fazla olmasından dolayı, sertliği ana malzemeye göre daha düşük çıkmıştır.

Şekil 7.13 ve Şekil 7.14'deki doğrusal takım yolu numunelere ait sertlik değerleri incelendiğinde, ilerleme hızının artması ile birlikte, ısı girdisi azalacağından kaynak metali sertliği düşük hızlara göre artmaktadır. İlerleme hızının değişmesi ile sertlik miktarındaki değişimlerin çok fazla olmadığı görülmektedir. En yüksek sertlik değerinin, 1100 dev/dak devir sayısında, 170 mm/dak kaynak hızında yapılan birleştirmede, kaynak metalinin sertliği 32.6 HV, ITAB'ın sertliğinin 31.8 HV, esas metalin sertliğinin 38 HV olduğu görülmektedir.

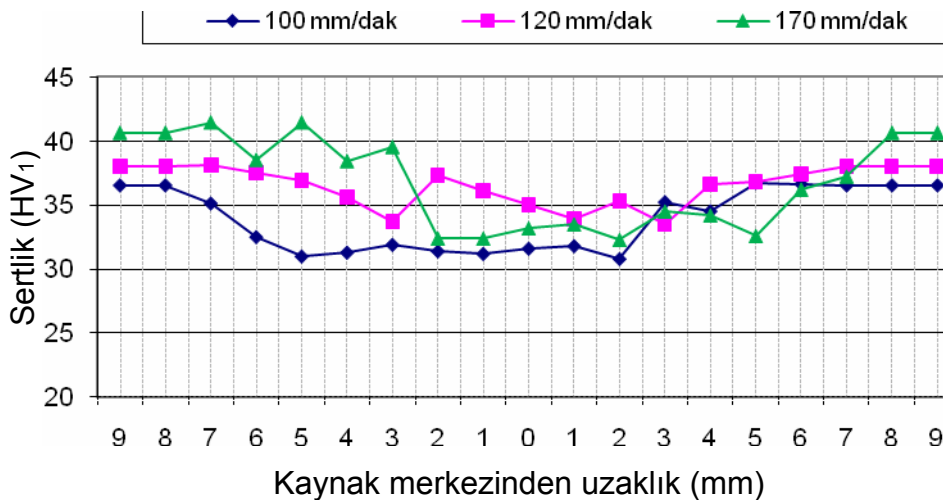


Şekil 7.13. Doğrusal takım yolu ile 900 dev/dak.'da kaynaklanan numunenin sertliği

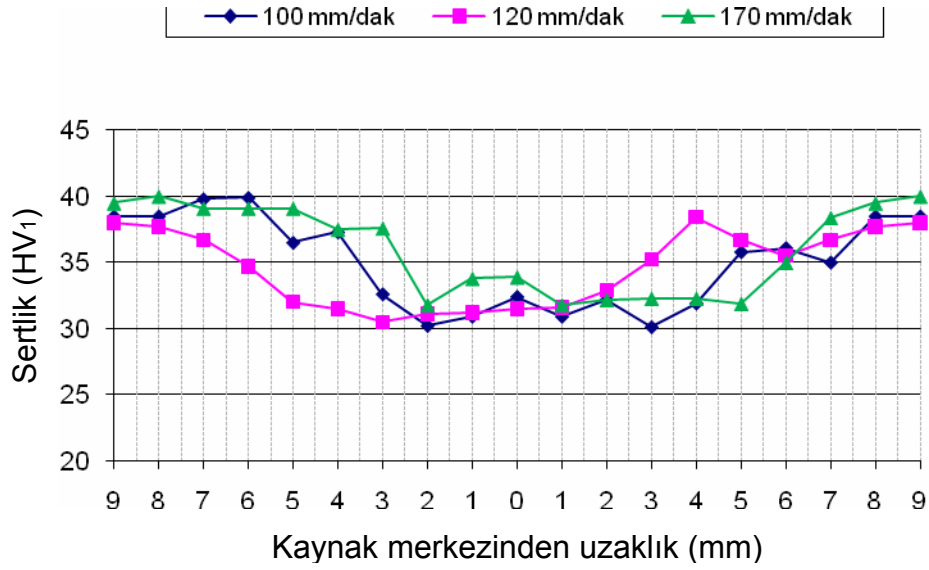


Şekil 7.14. Doğrusal takım yolu ile 1100 dev/dak.'da kaynaklanan numunenin sertliği

Şekil 7.15 ve Şekil 7.16'daki doğrusal olmayan takım yollu numunelere ait sertlik değerleri incelendiğinde, ilerleme hızının artması ile birlikte, ısı girdisi azalacağından kaynak metali sertliği düşük hızlara göre artmaktadır. En yüksek sertlik değerinin, 900 dev/dak devir sayısında, 120 mm/dak kaynak hızında yapılan birleştirmede, kaynak metalinin sertliği 35 HV, ITAB'ın sertliğinin 36 HV, esas metalin sertliğinin 38 HV olduğu görülmektedir.

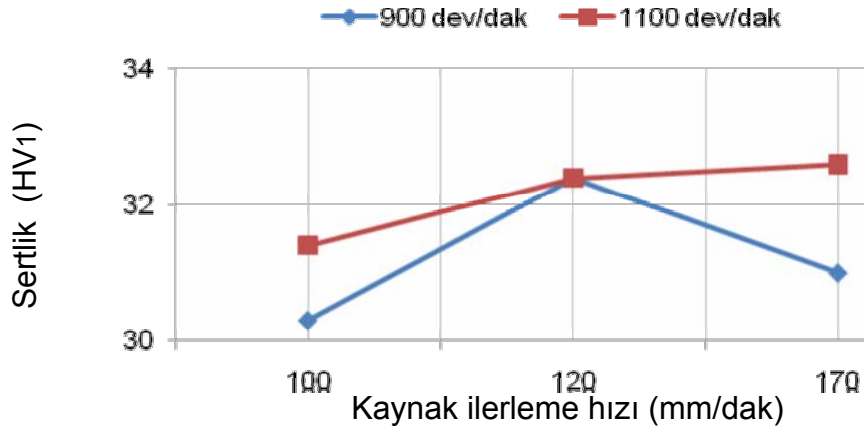


Şekil 7.15. Doğrusal olmayan takım yolu ile 900 dev/dak.'da kaynaklanan numunenin sertliği



Şekil 7.16. Doğrusal olmayan takım yolu ile 1100 dev/dak.'da kaynaklanan numunenin sertliği

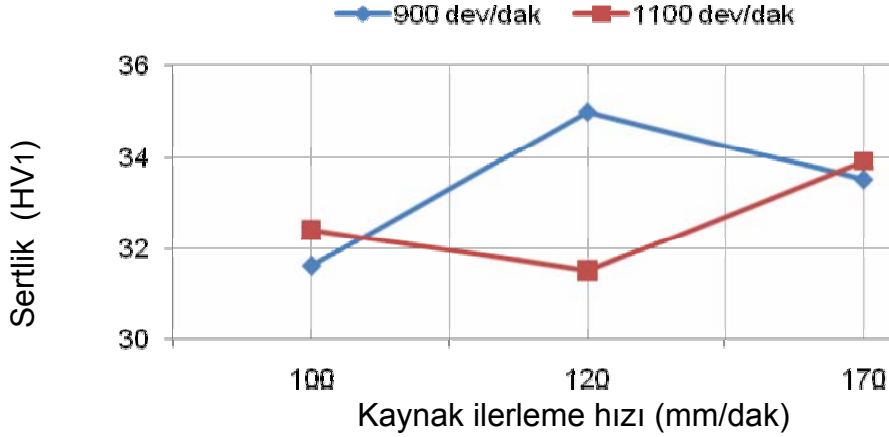
Şekil 7.17'deki doğrusal takım yollu numunelere ait sertlik değerleri incelendiğinde, devir sayısı arttıkça sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni yüksek devir sayısında malzemenin, yeterli plastikliğe ve viskoziteye ulaşarak yoğun bir karışım oluşturmasıdır.



Şekil 7.17. Doğrusal yollu kaynaktaki kaynak hızı ile kaynak metalinin sertliği arasındaki ilişki

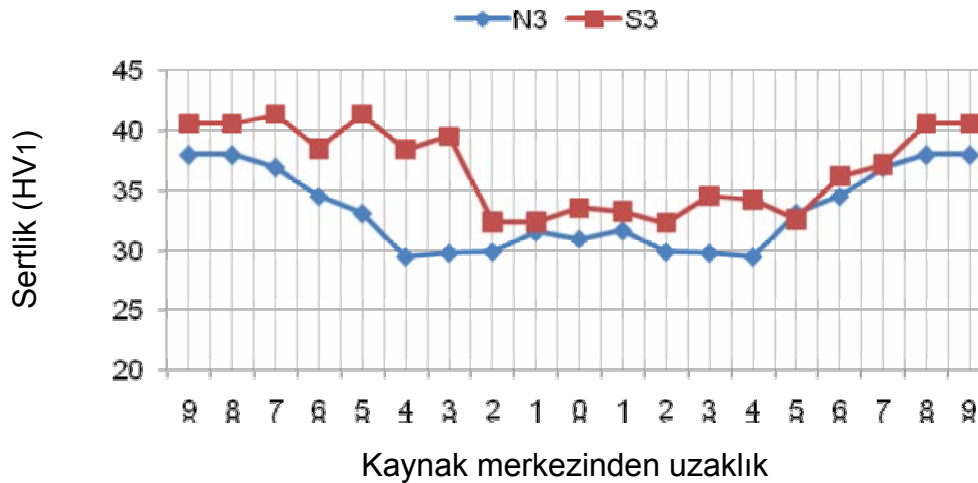
Şekil 7.18'deki doğrusal olmayan takım yollu numunelere ait sertlik değerleri incelendiğinde, devir sayısı arttıkça sertlik değerlerinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni yüksek devir sayısında malzemenin, yeterli plastikliğe ve

viskoziteye ulaşarak homojen bir karışım oluşturmaktadır. Sadece S2 ve S5 numaralı numunelerin istisnai olarak bu durumun dışında olduğu görülmektedir.



Şekil 7.18. Doğrusal olmayan yollu kaynakta kaynak hızı ile kaynak metalinin sertliği arasındaki ilişki

Doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollu numunelerin geneline bakıldığında, doğrusal olmayan takım yollu numunelerin sertlik değerlerinin doğrusal takım yollu olanlara göre bir miktar daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, doğrusal takım yollu numunelerde ısı girdisi nedeniyle oluşan deformasyonun daha fazla olduğunu göstermektedir. Şekil 7.19'de doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollu numunelerden N3 ve S3'ün sertlik değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 7.19. S3 ve N3 numunelerinin sertlik değerlerinin karşılaştırılması

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, 4 mm kalınlığındaki AA 1050 alüminyum levhalar, sürtünme karıştırma kaynağı ile doğrusal ve doğrusal olmayan takım yolları kullanılarak, farklı devir ve ilerleme hızlarında birleştirilerek, kaynak parametrelerinin birleşebilirliğe, mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çalışma sonrasında aşağıda belirtilen bulgular elde edilmiştir.

- 1) Birleştirilecek olan levhalar özel bir bağlama kalıbı ile alın altına gelecek şekilde bağlanarak, sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan takım yollu kaynaklı birleştirme sonrasında levhalarda herhangi bir çarpılma ve deformasyon oluşmamıştır.
- 2) Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan takım yollu birleştirmelerde sabit devir sayısında ilerleme arttıkça, kaynak dikişindeki soğan halkaları şeklinde oluşan yüzey pürüzlülüğü artmış, sabit ilerlemede devir arttıkça kaynak dikişindeki soğan halkaları şeklinde oluşan yüzey pürüzlülüğü azalmıştır.
- 3) SKK yapılmış parçaların kaynak yönüne dik kesitlerinde mikroyapı incelemesi sonucu üç farklı bölge tespit edilmiştir. Bunlar A: ısının tesiri altındaki bölge (ITAB), B: termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB) ve C: dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB) olarak tamamen mikroyapı karakteristiğine bağlı olarak adlandırılmıştır. Bu bölgelerin genişlikleri kaynak parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Tüm bölgeler sıcaklıktan etkilenmekte olup, DKB'de yeniden kristalleşme ile tane yapıları daha düzgündür ve soğan halkaları vardır, TEB'de yeniden kristalleşme yoktur ve tane boyutları daha büyüktür, ITAB ısıdan etkilenmektedir fakat bu bölgede deformasyon yoktur.

4) Çekme testi sonrası numuneler incelendiğinde kopmanın kaynak bölgesi dışarısında bir yerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bu bölge ITAB'a karşılık gelmektedir. Çünkü dinamik olarak yeniden kristalleşen kaynak metalinin akma ve çekme dayanım değerleri, termo-mekanik olarak etkilenen ITAB bölgesinden daha yüksektir.

5) Doğrusal takım yollu birleştirmelerde;

- a. Devir sayısı sabitken ilerleme hızının artmasıyla ve ilerleme hızı sabitken devir sayısının artmasıyla kaynaklı parçaların çekme dayanımlarının ve sertliğinin arttığı görülmüştür. Bunun nedeni; sabit devir sayısında artan ilerleme hızı ile malzemeye giren ısı miktarının azalması, sabit ilerleme hızında artan devir sayısı ile malzemenin yeterli plastikliğe ve viskoziteye ulaşarak homojen bir yapı oluşturmasıdır. En yüksek çekme dayanımı ve sertlik değeri 1100 dev/dak devir sayısı ve 170 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir.
- b. Devir sayısının artmasına bağlı olarak ara bölgede oluşan karışım tabakaları arasındaki mesafelerin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum yüksek dönme sonucu, birim zamanda ekstürize edilen malzeme miktarının azalması ile ilişkilendirilmektedir.
- c. Kaynak hızının artmasına bağlı olarak deformasyon yönlenmeleri artmaktadır.

6) Doğrusal olmayan takım yollu birleştirmelerde;

- a. Düşük ilerleme hızlarında çekme dayanımının yüksek çıktığı, ilerleme hızı sabitken devir sayısının artmasıyla kaynaklı parçaların çekme dayanımlarının arttığı görülmüştür. Bunun nedeni; yüksek devirde plastikleşen malzemenin düşük ilerleme hızında karıştırıcı uç yardımı ile tam yoğun bir karışımın olması ve ayrıca düşük ilerleme, plastik malzemeye dövme pekleşmesi gibi işlem yaptığından

mukavemet artışına neden olur. En yüksek çekme dayanımı 1100 dev/dak devir sayısı ve 100 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. Sertlik değerinin ise devir sayısının artması ile genel olarak arttığı görülmektedir. Ancak en yüksek sertlik değeri 900 dev/dak devir sayısı ve 120 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir.

- b. Devir sayısının artmasına bağlı olarak ara bölgede oluşan karışım tabakaları arasındaki mesafelerin azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum yüksek dönme sonucu, birim zamanda ekstürize edilen malzeme miktarının azalması ile ilişkilendirilmektedir.
 - c. Artan ilerleme hızıyla kaynak çekirdeğindeki kaynak metali yönlenmesinin arttığı, ancak düşük kaynak ilerleme hızında kaynak metali yönlenmesinin fazla belirgin olmadığı tespit edilmiştir.
- 7) Doğrusal yollu takım ile yapılan birleştirmelerde ilerleme hızı arttıkça mukavemet değerleri artmakta, doğrusal olmayan takım yolu ile yapılan birleştirmelerde ilerleme hızı arttıkça mukavemet değerleri düşmektedir. Bunun nedeni, doğrusal olmayan birleştirmelerde kullanılan takım yoluna bağlı olarak tam yoğun karışımın düşük ilerleme hızlarında gerçekleşmesindendir.
 - 8) Doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollu numunelerin mekanik ve metalografik test sonuçları karşılaştırıldığında; doğrusal olmayan takım yollu numunelerin çekme dayanımlarının ve sertlik değerlerinin, doğrusal takım yollu numunelerin çekme dayanımlarından ve sertlik değerlerinden yüksek olduğu tespit edilmiştir.
 - 9) Kaynaklı birleştirmelerde kaynak dikiş uzunluğunun mukavemet açısından kısa tutulması gerekir ve uzun kaynak dikişleri pek tercih edilmez. Kaynak dikiş uzunluğunun artırılmasının zorunlu olduğu hallerde yapılacak birleştirmenin nasıl bir mukavemet özelliği göstereceği açısından bu çalışma yapılmıştır. Çalışma sonucunda doğrusal olmayan

takım yollu birleştirmelerin mukavemet özelliklerinin daha iyi çıktığı görülmüştür. Bu durumun, doğrusal olmayan takım yollu birleştirmelerde karıştırıcı ucun malzemede meydana getirdiği gerilmelerden kaynaklandığı değerlendirilmektedir.

8.2. neriler

- 1) Doğrusal olmayan takım yollu birleştirmelerde, değişik yarıçaplarda takım yolu kullanılmasının mukavemet değerlerine olan etkisi araştırılabilir.
- 2) Doğrusal olmayan takım yollu birleştirmelerde, karıştırıcı uca gelen gerilmeler ve kalıntı gerilimlerin tespit edilerek, bunların mukavemet değerleri üzerindeki etkisi araştırılabilir.
- 3) Sıcaklık lmleri yapılarak doğrusal ve doğrusal olmayan takım yollu birleştirmelere ait sıcaklık farklılıkları ve bu sıcaklık farklarının etkileri araştırılabilir.
- 4) Farklı malzemelerin SKK yöntemi ile birleştirilebilirliği araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Şık, A., “Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen alüminyum levhaların eğme ve yorulma özelliklerinin incelenmesi”, **SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 9 (2): 12-17 (2005).
2. Sarsılmaz, F., Özdemir, N., “SKK yöntemiyle birleştirilen alüminyum alaşımlarında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi”, **Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Teknik-Online Dergi**, 7 (2): 106-120 (2008).
3. Çam, G., “Sürtünme karıştırma kaynağındaki gelişmeler”, **Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi**, Kocaeli, 47-63 (2003).
4. Şık, A., Kayabaş, Ö., “Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyumun kaynağında kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi”, **Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi**, 11 (12): 30-43 (2003).
5. Çam, G., “Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK): al-alışımları için geliştirilmiş yeni bir kaynak teknolojisi”, **Mühendis ve Makine**, 46 (541): 30-39 (2005).
6. Özsoy, M., Kaluç, E., “Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının esasları”, **Mühendis ve Makine**, 43 (513): 19-26 (2002).
7. İnternet : Tekçi, E., “Alüminyum Alaşımlarının Genel Özellikleri” <http://www.gencmuhendis.org> (2008).
8. Doğan, S., “AA 5754-H22 Alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, **Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, 11-13, 7-11, 64-68 (2006).
9. Hüseyinoğlu, M., “7075 Alüminyum alaşımının freze ile işlenmesinde minimum soğutma sıvısı kullanmanın performans karakteristiklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 7-11 (2008).
10. Devlet Planlama Teşkilatı, “Sekizinci beş yıllık kalkınma planı demir dışı metaller sanayi özel ihtisas komisyon raporu”, **DPT:2537, Ankara**, 4-7, 7-10 (2000).
11. Binal, A., “AA2024-T3 Alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında işlem parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, **Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, 3-8, 11-12, 46, 40-41, 61-62, 67-68, 71-76 (2006).

12. Toktaş, A., “Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin AA 6063 alüminyum alaşımına uygulanması ve kaynak parametrelerinin malzeme iç yapısı ile mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi”, Doktora Tezi, **Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Balıkesir, 17-19 (2006).
13. Büyükaslan, S., “Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiş alüminyum alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi**, Elazığ, 6-7, 7-8, 35-36 (2006).
14. Taban, E., “5XXX serisi alüminyum alaşımlarının TIG, MIG ve sürtünen eleman ile birleştirme kaynaklı bağlantılarının mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 28-29, 30-31 (2004).
15. Anık, S., “Kaynak Kabiliyeti”, Kaynak Tekniği El Kitabı, **Gedik Holding**, İstanbul, 15-17, 75-80, 80-81, 84-85, 138-144, 147-148, 190-193, 124-130, 188 (1991).
16. Sarsılmaz, F., “Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Üniversitesi**, Elazığ, 25-26, 30-31, 34-35, 37-38 (2008).
17. Kurşun, T., “Alüminyum ve alaşımlarının MIG kaynağı”, **Makine Magazin**, 111 (2006).
18. İnternet : Milli Eğitim Bakanlığı MEGEP, “Çelik Olmayan Metallerin Kaynağı”, www.meb.gov.tr (2006).
19. Kıratlı, N., Yetgin, S., H., İnci, M., “Gazaltı kaynak yöntemleri ile birleştirilen 6351 alüminyum alaşımın metalurjik özelliklerinin incelenmesi”, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 11 : 165-178 (2006).
20. İnternet : Kaluç, E., “Plazma ile Kaynak ve Kesme”, www.mmo.org.tr (1993).
21. Güleç, E., Uysal, M., İ., “Değişik kalınlıklı lazer kaynaklı Al-numunelerinin kırılma davranışlarının incelenmesi”, Bitirme Projesi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi**, İzmir, 9-11 (2007).
22. Şahin, M., Akata, H., E., Özel, K., “Soğuk şekil verilmiş alüminyum malzemelerin sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilmesi üzerine deneysel bir çalışma”, **Mühendis ve Makine**, 48 (573): 24-31 (2007).

23. Kurt, A., Boz, M., Özdemir, M., "Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi", **Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi**, 19 (2): 191-197 (2004).
24. Güçlüer, S., "Sürtünme karıştırma kaynağı yöntemiyle alın kaynağı yapılmış Al-5086 H32 levhaların mekanik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Mustafa Kemal Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Hatay, 12-15 (2007).
25. Sayer, S., "AA 6063 (AlMgSiO.5) tipi alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak değişkenlerinin, bağlantının dayanımı ve mikroyapı özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılması", Doktora Tezi, **Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 3-6, 11-15 (2007).
26. Mert, Ş., Kaluç, E., "Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler", **Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi**, Kocaeli, 103-115 (2003).
27. Sarsılmaz, F., Özdemir, N., Özel, S., "Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilen AA6061/AA7075 çiftinde karıştırıcı uç omuz genişliğinin mekanik özellikler üzerine etkisi" **Selçuk Üni. Teknik-Online Dergi**, 7 (1): 51-60 (2008).
28. Külekçi, M. K., Şık, A., "Sürtünme karıştırma kaynağı ile alüminyum alaşımı levhalarının birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri", **Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi**, Kocaeli, 77-87 (2003).
29. Kurt, A., Boz, M., Özdemir, M., "Alüminyum malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında kaynak hızının birleşebilirliğe etkisi", **Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi**, Kocaeli, 89-99 (2003).
30. Boz, M., Kurt, A., "The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process", **Materials and Design**, 25: 343-347 (2004).
31. Ataoğlu, H., Mısıkoğlu, S., Çam, G., "Sürtünme karıştırma kaynaklı bir Al-alaşımının iç yapı ve mekanik karakterizasyonu", **Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi**, Kocaeli, 65-75 (2003).
32. Çakır, M., Kurt, A., Ateş, H., "Toz metal al malzemelerin sürtünme karıştırma kaynağında devir sayısının kaynaklanabilirliğe etkisi", **Mühendis ve Makina**, 49 (580): 3-8 (2008).
33. Özdemir, N., Büyükarıslan, S., Sarsılmaz, F., "Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA 1030 alaşımında karıştırıcı uç, devir

sayısı ve ilerleme hızının mekanik davranışlar üzerine etkisi”, **Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi**, 19 (4): 575-582 (2007).

34. Sarsılmaz, F., Özdemir, N., “AA1050/AA6061 alüminyum alaşım çiftinin sürtünme karıştırma kaynağında karıştırıcı uç profillerinin mekanik özellikler üzerine etkisi”, **Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları**, 61-65 (2008).
35. Taban, E., Kaluç, E., “EN AW-5083- H321 alüminyum alaşımının MIG, TIG ve sürtünen eleman ile birleştirme (FSW) kaynaklı bağlantılarının mekanik ve mikroyapısal özellikleri”, **Mühendis ve Makina**, 46 (541): 40-51 (2005).
36. Haşçalık, A., Çaydaş, U., Ünal, E., Karaca, F., “AA 5251 alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilirliğine uç geometrisinin etkisi”, **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 4: 1-7 (2007).
37. Babu, S., Elangovan, K., Balasubramanian, V., Balasubramanian, M., “Optimizing friction stir welding parameters to maximize tensile strength of AA 2219 aluminum alloy joints”, **Met. Mater. Int.**, 15 (2): 321-330 (2009).
38. Okuyucu, H., Kurt, A., Arcaklıoğlu, E., “Artificial neural network application to the friction stir welding of aluminum plates”, **Materials and Design**, 28: 78-84 (2007).
39. Özdemir, M., “Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile alüminyum malzemelerin kaynaklanabilirliği”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 55-64 (2003).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : AĞCA, Ender
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 06.03.1981 Espiye
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (505) 725 30 92
 e-mail : enderagca@hotmail.com.

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet tarihi

Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Resim ve Konstrüksiyon Öğretmenliği	2002
Lise	Çok Programlı Astsubay Hazırlama Okulu	1998

İş Deneyimi Yıl

Yer

Görev

2002-2010	K. K. Astsb. MYO K.İğİ	Mak. Öğt. Elm.
-----------	------------------------	----------------

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Futbol, Bilgisayar teknolojileri, Gezi