

AA2024-T3 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA İŞLEM PARAMETRELERİNİN
MİKROYAPI ve MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİLERİ

ALANUR BİNAL

Yüksek Lisans Tezi

Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2006

THE EFFECTS OF PROCESS PARAMETERS
ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES
IN FRICTION STIR WELDING OF AA2024-T3 ALUMINIUM ALLOY

ALANUR BİNAL

Master Of Science Thesis

Department Of Metallurgical Engineering

August 2006

AA2024-T3 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SÜRTÜNME
KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA İŞLEM PARAMETRELERİNİN
MİKROYAPI ve MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİLERİ

ALANUR BİNAL

Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Yrd. Doç. Dr. NEDRET AYDINBEYLİ

Ağustos 2006

ALANUR BİNAL' in YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “AA2024-T3 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA İŞLEM PARAMETRELERİNİN MİKROYAPI ve MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİLERİ” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye: Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ
(Danışman)

Üye: Prof. Dr. Orhan Şerif KOMAÇ

Üye: Prof. Dr. Doğan EROL

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖZET

Bu çalışmada sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilen AA2024-T3 alüminyum levhaların mikro yapı ve mekanik özellikleri işlem parametrelerine bağlı olarak incelenmiştir. Kaynak süresince karıştırıcı ucun devir sayısı ve kaynak ilerleme hızı değişken parametreler olarak alınmıştır. Karıştırıcı uç geometrisi ise sabit tutulmuştur. Bu amaçla dört farklı devir sayısı (160-315-400-630 dev/dk) ve dört farklı kaynak ilerleme hızı (25-50-100-125 mm/dk) kullanılmıştır. Kaynaklı birleştirmelere metalografik ve mekanik testler yapılarak işlem parametrelerinin etkileri araştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Sürtünme karıştırma kaynağı, mekanik özellikler, alüminyum alaşımlarının kaynağı.

ABSTRACT

In this study, microstructure and mechanical properties of AA2024-T3 aluminium sheets joined by friction stir welding were examined as dependence process parameters. During welding, rotational speed of the welding stir tool and welding speed were chosen as the variable parameters. Also geometry of welding stir tool were constant. For this purpose four different rotational speed (160-315-400-630 rpm) and four different welding speed (25-50-100-125 mm/min) were used. Influence of process parameters were investigated by metallographic and mechanical tests.

Keywords: Friction stir welding, mechanical properties, welding of aluminium alloys.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarım boyunca beni yönlendiren, her türlü imkanı sağlayan, zamanının büyük bir bölümünü çalışmalarına ayıran danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Nedret AYDINBEYLİ' ye; çalışmamın başından sonuna kadar yardımlarını esirgemeyen teknisyen Sayın Akif TUTGUN' a; ayrıca çalışmalarımızda kullanılan parçaların kesilmesi, kaynaklanması ve işlenmesi safhalarında yardımcı olan Eser Makine Ambalaj Gıda Sanayi ve Tic. Ltd. Şirketi' ne ve Türkiye Şeker Fab. AŞ. Eskişehir Makine Fab. Müdürlüğü' ne, manevi desteklerinden ötürü babam Adil Murat BİNAL, annem Şenay BİNAL ve kardeşim Gülfem BİNAL' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ TANITIMI	3
2.1. Alüminyumun Üretimi	4
2.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırma ve Temper Tasarımları	7
2.3. Alüminyumun Özellikleri	9
2.4. Çeşitli Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri	11
2.4.1. Alüminyum mangan alaşımları	11
2.4.2. Alüminyum magnezyum alaşımları	12
2.4.3. Alüminyum magnezyum silisyum alaşımları	12
2.4.4. Alüminyum silisyum döküm alaşımları	12
2.4.5. Alüminyum lityum döküm alaşımları	13
2.5 Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi	13
2.5.1. Alüminyum alaşımlarının yaşlandırılması	14
2.5.2. Alüminyum alaşımlarının tavlama	16
3. ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARININ KAYNAK KABİLİYETİ	19
3.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Gaz Kaynağı	25
3.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Örtülü Elektrot Kaynağı	27
3.3. Alüminyum ve Alaşımlarının MIG Kaynağı	28
3.4. Alüminyum ve Alaşımlarının TIG Kaynağı	32

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.5. Alüminyum ve Alaşımlarının Elektrik Direnç Kaynağı	34
3.6. Alüminyum ve Alaşımlarının Elektrocüruf Kaynağı	36
3.7. Alüminyum ve Alaşımlarının Elektrogaz Kaynağı	36
3.8. Alüminyum ve Alaşımlarının Plazma Kaynağı	37
3.9. Alüminyum ve Alaşımlarının Ultrasonik Kaynağı	38
3.10. Alüminyum ve Alaşımlarının Patlama Kaynağı	40
3.11. Alüminyum ve Alaşımlarının Elektron Işın Kaynağı	40
3.12. Alüminyum ve Alaşımlarının Difüzyon Kaynağı	44
3.13. Alüminyum ve Alaşımlarının Yakma Kaynağı	46
3.14. Alüminyum ve Alaşımlarının Lazer Işın Kaynağı	47
3.15. Alüminyum ve Alaşımlarının Manyetik Puls Kaynağı	49
3.16. Alüminyum ve Alaşımlarının Soğuk Basınç Kaynağı	51
3.17. Alüminyum ve Alaşımlarının Sürtünme Kaynağı	53
4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI	56
4.1. Kaynak Metalurjisi	57
4.2. Kaynak Parametreleri	61
4.2.1. Malzeme kalınlığı	61
4.2.2. Karıştırıcı uç malzemesi ve dizaynı	62
4.2.2.1. Üç yivli ve helezonik takımlar	63
4.2.2.2. Skew-Stir™ ve A-Skew™ serisi pimler (batıcı uçlar)	65
4.2.2.3. Trivex ve MX Trivex takımlar	67
4.2.3. Takım ilerleme hızı ve devir sayısı	67
4.2.4. Kaynak pozisyonu ve birleştirme geometrileri	69
4.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulandığı Malzemeler	71
4.3.1. Bakır alaşımları	71
4.3.2. Titanyum alaşımları	72
4.3.3. Çelikler	73
4.3.4. Magnezyum alaşımları	74

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.3.5. Metal matrisli kompozitler	74
4.3.6. Farklı alaşım ve metaller	75
4.3.7. Plastikler	75
4.4. Uygulama Alanları	76
4.4.1. Gemi inşası ve deniz endüstrisindeki uygulamalar	76
4.4.2. Uçak ve uzay endüstrisindeki uygulamalar	77
4.4.3. Otomotiv endüstrisindeki uygulamalar	79
4.4.4. Hızlı tren üretimindeki uygulamalar	80
4.4.5. Diğer uygulama alanları	81
4.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları	81
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	84
5.1. Deney Malzemeleri	84
5.1.1. Kaynak yapılacak malzeme	84
5.1.2. Karıştırıcı uç geometrisi ve malzemesi	85
5.2. Deneyde Kullanılan Tezgah	86
5.3. Deney İçin Seçilen Kaynak Parametreleri	86
5.4. Mekanik ve Metalografik Testler İçin Numunelerin Hazırlanması	87
5.4.1. Makroyapı ve mikroyapı incelemeleri	88
5.4.2. Mikrosertlik Ölçümleri.....	89
5.4.3. Çekme deneyleri	89
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	91
6.1. Görsel İnceleme Sonuçları	91
6.2. Makroyapı İnceleme Sonuçları	96
6.3. Mikroyapı İnceleme Sonuçları	98
6.4. Mikrosertlik Deney Sonuçları	101
6.5. Çekme Deney Sonuçları	122

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
7. ÖNERİLER	126
8. KAYNAKLAR DİZİNİ	127

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Birincil alüminyum üretiminin kademeleri: alümina, alüminyum eldesi	6
2.2 Al-Cu alaşımları denge diyagramı	13
2.3 Isıl işlemden tanecik çökmesinin şematik diyagramları (a), GP-1 bölgeleri; (b), GP-2 bölgeleri; (c), dörtgen CuAl ₂ fazı; (d), kübik CuAl ₂ fazı	15
3.1 Al ve alaşımlarının oksijen-asetilen ile kaynağında ağız hazırlık şekilleri. a) s < 1.5 mm, b) s = 1-3 mm, c) s = 3-12 mm, d) s > 8 mm, e) s > 12 mm	26
3.2 Alüminyum ve alaşımlarından kalın saçların oksijen-asetilen kaynağı	27
3.3 MIG yöntemindeki ark bölgesi	30
3.4 TIG kaynak yönteminde ark bölgesi	32
3.5 Yüksek güç plazma birleştirme kaynağı prensibi ve kaynak dikişinin alternatif kaynak yöntemleriyle karşılaştırılması a) Prensip (1 Plazma gazı, 2 Koruma gazı, 3 Ateşleme cihazı, 4 Ön direnç, 5 Sıvı metal, 6 Kaynak dikişi üstten görünüşü, 7 Kaynak dikişi enine kesiti, 8 Odaklama gazı) b) Plazma kaynağı dikişi ile elektron ışını ve MIG kaynağı dikişinin karşılaştırılması (1 Elektron ışını kaynağı, 2 Plazma kaynağı, 3 MIG kaynağı)	38
3.6 Ultrasonik kaynağın şematik olarak gösterilişi	39
3.7 Kaynak ısı mabının güç yoğunluğu	41
3.8 Elektron ışını ile kaynak makinesinin şematik yapısı 1-Katot, 2-Wehnelt silindiri, 3-Anod, 4-Ayar bobinleri, 5- Magnetik mercek, 6- Saptırma bobinleri, 7- Hava girişi, 8-Kaynak hücresi, 9- İş parçası, 10- Hareketli masa, 11- Vakum flanşı	41
3.9 TIG, plazma ve elektron ışını ile yapılan kaynaklarda erime bölgesi formunun karşılaştırılması	42
3.10 Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması a. Yüzey pürüzlerinin başlangıç teması b. Birinci aşama deformasyon ve sınır bağ düzeni c. İkinci aşama tane sınırı göçü ve gözeneklerin yok edilmesi d. Üçüncü aşama hacim difüzyonu ve gözeneklerin elimine edilmesi Birincil alüminyum üretiminin kademeleri: alümina, alüminyum eldesi	45
3.11 Manyetik puls kaynağının şematik gösterimi	50
3.12 Boru tipi parçaların bindirme kaynağında çeşitli manyetik puls kaynağı uygulamalarının şematik olarak gösterilmesi.(h: kaynak yapılacak parçalar arası mesafe)	51
3.13 Sürekli tahrikle sürtünme kaynağı	53

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.1 Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi	56
4.2 SKK' da kaynak dikişinde oluşan soğan halkaları	58
4.3 Kaynak bölgesinin mikroyapısının şematik olarak gösterilmesi	59
4.4 Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde batıcı pimin eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi	61
4.5 Çift taraftan sürtünme kaynağı yapılarak birleştirilmiş 75 mm kalınlığındaki 6082 Al alaşımı levhalar	61
4.6 Sürtünme kaynağı yapılmış 2m uzunluğunda 10mm kalınlığında A 6082 alaşımı	62
4.7 Helezonik takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri ve bir deniz kabuğu ile benzerliği	64
4.8 Yivli takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri	65
4.9 Helezonik ve üç yivli takımlarının omuz profilleri	65
4.10 A-Skew ucunun resmi	66
4.11 Skew-Stir metodunun çalışma prensibi	66
4.12 SKK' da kaynak hızı ile kaynak metali mikroyapıları arasındaki ilişki, a) 6.25 mm/dk, b) 10 mm/dk, c) 16 mm/dk, d) 20 mm/dk	68
4.13 Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanarak gerçekleştirilen birleştirmeler. a) küt alın birleştirme b) birleştirilmiş ek ve bindirme birleştirme c) bindirme d) çoklu bindirme e) iki pasolu T- köşe birleştirme f) tek pasolu T- köşe birleştirme g) dış köşe birleştirme h) iç köşe birleştirme	69
4.14 Sürtünme karıştırma bindirme kaynağının şematik gösterimi	70
4.15 Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin boru kaynaklarında uygulaması .	70
4.16 Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi	77
4.17 Space shuttle external tank projesi ve Marshall Space Flight Center laboratuvarlarındaki sürtünme karıştırma kaynak sistemlerinden görüntüler	78
4.18 Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen al-alaşımı prototip otomobil jantı	79
4.19 Japonya 'da sürtünme karıştırma kaynağının kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntem ile kaynağı yapılan Al-paneller	81

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.1 Deneyleerde kullanılan karıştırıcı ucun teknik resmi ve fotoğrafı	85
5.2 Karıştırıcı uca uygulanan ısııl işlemler	85
5.3 Kaynak edilecek parçanın freze tezgâhına bağlanış şekli	86
5.4 TS EN 288-3' e göre test numunelerinin kaynaklı levhadaki yeri	88
5.5 Mikro sertlik ölçümlerinin yapıldığı noktaların şematik gösterimi (1: taban, 2: merkez, 3:üst)	89
5.6 Kaynaklı malzemededen çıkartılan standart çekme deney numunesi şekli ve ölçüleri	90
6.1 Kaynak işlem parametrelerine bağılı olarak dikiş profilleri n:160 dev/dk, 1: V:25 mm/dk, 2: V:50 mm/dk, 3: V:100 mm/dk, 4: V:125 mm/dk	92
6.2 Kaynak işlem parametrelerine bağılı olarak dikiş profilleri n:315 dev/dk, 5: V:25 mm/dk, 6: V:50 mm/dk, 7: V:100 mm/dk, 8: V:125 mm/dk	93
6.3 Kaynak işlem parametrelerine bağılı olarak dikiş profilleri n:400 dev/dk, 9: V:25 mm/dk, 10: V:50 mm/dk, 11: V:100 mm/dk, 12: V:125 mm/dk	94
6.4 Kaynak işlem parametrelerine bağılı olarak dikiş profilleri n: 630 dev/dk, 13: V:25 mm/dk, 14: V:50 mm/dk, 15: V:100 mm/dk, 16: V:125 mm/dk ..	95
6.5 Kaynak çekirdek genişliğinin ölçüldüğü yer	96
6.6 n:160dev/dk için ilerleme hızı ile kaynak çekirdek genişliğinin değışimi ..	96
6.7 n:315dev/dk için ilerleme hızı ile kaynak çekirdek genişliğinin değışimi ..	96
6.8 n:400dev/dk için ilerleme hızı ile kaynak çekirdek genişliğinin değışimi ...	97
6.9 n:630dev/dk için ilerleme hızı ile kaynak çekirdek genişliğinin değışimi ..	97
6.10 Kaynak çekirdek bölgesi genişliklerinin V/n oranı ile değışimi a) V/n: 25/160 b) V/n: 125/160	98
6.11 SKK yapılmış deney numunelerin kesitindeki mikroyapı bölgeleri (a: esas metal, b: ısı etkili bölge, c: termomekanik etkilenen bölge ve d: çekirdek).....	98
6.12 15 nolu deney numunesine ait çekirdek bölgesinin mikroyapı fotoğrafı (X200, Keller)	99
6.13 15 nolu deney numunesine ait çekirdek ve TMEB' yi gösterir mikroyapı fotoğrafı (X200, Keller)	99
6.14 15 nolu deney numunesine ait IEB' nin mikroyapı fotoğrafı (X200, Keller)	100

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.15 Kaynaklı deney numunelerinin esas metal bölgesinin mikroyapı fotoğrafı (X200, Keller)	100
6.16 n: 160 dev/dk ve V:25 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	110
6.17 n: 160 dev/dk ve V:50 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	111
6.18 n:160 dev/dk ve V:100 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	111
6.19 n: 160 dev/dk ve V:125 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	112
6.20 n: 315 dev/dk ve V:25 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı.....	112
6.21 n: 315 dev/dk ve V:50 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	113
6.22 n: 315 dev/dk ve V:100 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	113
6.23 n: 315 dev/dk ve V:125 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	114
6.24 n: 400 dev/dk ve V:25 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	114
6.25 n: 400 dev/dk ve V:50 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	115
6.26 n: 400 dev/dk ve V:100 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	115
6.27 n: 400 dev/dk ve V:125 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	116
6.28 n: 630 dev/dk ve V:25 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	116
6.29 n: 630 dev/dk ve V:50 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	117
6.30 n: 630 dev/dk ve V:100 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı.....	117
6.31 n: 630 dev/dk ve V:125 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı	118

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
6.32	n:160dev/dk devir sayısında ilerleme hızındaki artışla sertliğin değişimi ...	118
6.33	n:315dev/dk devir sayısında ilerleme hızındaki artışla sertliğin değişimi ...	119
6.34	n:400dev/dk devir sayısında ilerleme hızındaki artışla sertliğin değişimi ...	119
6.35	n:630dev/dk devir sayısında ilerleme hızındaki artışla sertliğin değişimi ...	119
6.36	V:25mm/dk ilerleme hızında devir sayısındaki artışla sertliğin değişimi ...	120
6.37	V:50mm/dk ilerleme hızında devir sayısındaki artışla sertliğin değişimi ...	120
6.38	V:100mm/dk ilerleme hızında devir sayısındaki artışla sertliğin değişimi ..	120
6.39	V:125mm/dk ilerleme hızında devir sayısındaki artışla sertliğin değişimi ..	121
6.40	n:160 dev/dk. da ilerleme hızı ile çekme mukavemeti değişimi	123
6.41	n:315 dev/dk. da ilerleme hızı ile çekme mukavemeti değişimi	123
6.42	n:400 dev/dk. da ilerleme hızı ile çekme mukavemeti değişimi	123
6.43	n:630 dev/dk. da ilerleme hızı ile çekme mukavemeti değişimi	124
6.44	V:25 mm/dk. da devir sayısı ile çekme mukavemeti değişimi	124
6.45	V:50 mm/dk. da devir sayısı ile çekme mukavemeti değişimi	124
6.46	V:100 mm/dk. da devir sayısı ile çekme mukavemeti değişimi	125
6.47	V:125 mm/dk. da devir sayısı ile çekme mukavemeti değişimi	125

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Alüminyum ve alaşımlarında mukavemetlendirme mekanizmalarının etkileri	4
2.2 Saf alüminyumun bileşimi	6
2.3 Alüminyum alaşımları için tanımlama sistemi	7
2.4 Saf alüminyumun fiziksel özellikleri	10
3.1 Isıl işleme tabi tutulamayan şekillendirilmiş alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri ve kaynak edilebilirlikleri	20
3.2 Isıl işleme tabi tutulabilen şekillendirilmiş alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri ve kaynak edilebilirlikleri	20
3.3 Isıl işleme tabi tutulamayan döküm alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri ve kaynak edilebilirlikleri	21
3.4 Isıl işleme tabi tutulamayan döküm alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri ve kaynak edilebilirlikleri	21
3.5 Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının MIG kaynağı için önerilen bazı parametreler	31
3.6 Elektron ışın kaynağı yapılmış alüminyumun ile ana metal özelliklerinin karşılaştırılması	44
4.1 4mm ve 1.6 mm kalınlığındaki SKK kaynağı uygulanmış 2024Al-T3 plakalarda ana malzeme ve kaynaklı birleştirmeler için oda sıcaklığında boylamasına çekme özellikleri	68
5.1 Kaynak işleminde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi	84
5.2 Kaynak işleminde kullanılan malzemenin mekanik özellikleri	84
5.3 Kaynak işleminde kullanılan işlem parametreleri	87
6.1 Kaynaklı numunelerde ilerleme hızı/devir sayısı (V/n) oranı ile kaynak bölgesi genişliğinin değişimi	98
6.2 n: 160 dev/dk devir sayısı, V: 25 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	101
6.3 n: 160 dev/dk devir sayısı, V: 50 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	102
6.4 n: 160 dev/dk devir sayısı, V: 100 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	102
6.5 n: 160 dev/dk devir sayısı, V: 125 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	103

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
6.6 n: 315 dev/dk devir sayısı, V: 25 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	103
6.7 n: 315 dev/dk devir sayısı, V: 50 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	104
6.8 n: 315 dev/dk devir sayısı, V: 100 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	104
6.9 n: 315 dev/dk devir sayısı, V:125 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	105
6.10 n: 400 dev/dk devir sayısı, V: 25 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	105
6.11 n: 400 dev/dk devir sayısı, V: 50 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	106
6.12 n: 400 dev/dk devir sayısı, V:100 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	107
6.13 n: 400 dev/dk devir sayısı, V:125 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	107
6.14 n: 630 dev/dk devir sayısı, V: 25 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	108
6.15 n: 630 dev/dk devir sayısı, V: 50 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	108
6.16 n: 630 dev/dk devir sayısı, V: 100 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	109
6.17 n: 630 dev/dk devir sayısı, V: 125 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri	109
6.18 Kaynaklı numunelerin çekme deney sonuçları	122

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
n	Devir sayısı (dev/dk)
V	İlerleme hızı (mm/dk)
<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
AC	Alternatif akım
cm	Santimetre
DADK	Doğru akım düz kutup
DATK	Doğru akım ters kutup
DC	Doğru akım
dk	Dakika
et.al	Ve diğerleri
IEB	Isı etkili bölge
m	Metre
MIG	Metal Inert Gaz
mm	Milimetre
MPa	MegaPaskal
µm	Mikrometre
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
SKK	Sürtünme karıştırma kaynağı
TIG	Tungsten Inert Gaz
TMEB	Termomekanik etkilenen bölge
vd.	Ve diğerleri

1. GİRİŞ

1990' lı yılların başında geliştirilen ve bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) (friction stir welding), geleneksel ergitme kaynak işlemleriyle kaynağı güç olan veya mümkün olmayan özellikle yaşlandırma sertleştirmesine tabi tutulmuş Al-alışımlarının kaynağında başarıyla kullanılabilir (Ataoğlu vd., 2003).

Kaynak kabiliyeti, bir malzemenin yaygın olarak kullanılmasını etkileyen önemli özelliklerden biridir. Bir malzemenin kaynak konstrüksiyonuna uygun olması diğer bir deyişle bir malzemenin kaynak işleminin kolaylıkla ve ekonomik olarak yapılabilir olması o malzemenin yaygın olarak kullanılabilmesini sağlar. Bazı istisnaları hariç (7075 alaşımı gibi), ticari olarak ark kaynağı gibi ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilebilse de, Al alaşımları kaynak edilmesi güç malzemelerdir. Ergitme kaynak yöntemleri (ark, lazer ve elektron kaynağı) ve bir basınç kaynağı türü olan difüzyon kaynağı gibi bilinen kaynak yöntemleri ile Al alaşımlarının kaynaklarında çeşitli sorunlar bulunmaktadır. Bu sorunlar arasında, vakum ortamında yapılan elektron kaynağı hariç tüm diğer ergitme kaynaklarında porozite (gaz boşluğu) oluşumu, kaynak dikişi ve ısı etkili bölgede (IEB) çatlak oluşumu ve mukavemet düşüşü sayılabilir. Ticari olarak Ti alaşımlarına başarıyla uygulanan katı hal kaynak yöntemlerinden difüzyon kaynağı da yüzeylerindeki kararlı oksit tabakasından dolayı Al alaşımlarına ekonomik olarak uygulanamamaktadır (Çam, 2002).

Ergitme kaynak yöntemleri ile Al alaşımlarının (özellikle yaşlandırma sertleştirmesi yapılmış olan Al alaşımlarının) kaynağında aşırı derecede çatlak ve porozite oluşumu gibi problemler mevcuttur. Bu problemlerden çatlak oluşumunun nedeni, Al alaşımlarının katılma sıcaklık aralıklarının geniş olması ve ısıl genleşme katsayılarının yüksek olmasıdır. Ark kaynağındaki yüksek ısı girdisi, bu malzemelerin ısıl genleşmelerinin yüksek olması ve katılma sıcaklık aralıklarının geniş olması sonucu, özellikle çatlama daha duyarlı yaşlandırma sertleştirmesi yapılmış Al alaşımlarında kaynak dikişinde çatlak oluşumuna neden olur. Ayrıca, ark kaynağındaki yüksek ısı girdisi, özellikle yüksek mukavemetli Al alaşımlarında IEB' de tane

sınırlarında düşük ergime sıcaklıklı fazların oluşumuna ve dolayısıyla bu bölgede tane sınırlarında katılaşma esnasında çatlama yolu açabilir. İkinci problem olan kaynak dikişinde porozite oluşumunun nedeni ise; alüminyumun sıvı halde hidrojen çözünürlüğünün katı haldekinden çok daha yüksek olmasıdır. Vakum ortamında yapılan elektron huzmesi kaynağı yöntemi porozite açısından en avantajlı ergime (sıvı hal) kaynak yöntemidir. Fakat yüksek sıcaklıkların söz konusu olduğu elektron kaynağında, vakum ortamında yapıldığı için düşük buharlaşma sıcaklığına sahip alaşım elementleri içeren Al-alaşımalarında kaynak dikişinde alaşım elementi kaybı, dolayısıyla mukavemet düşüşü söz konusu olabilmektedir (Çam, 2002).

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminde, maliyet arttırıcı bir faktör olan elektrot ve koruyucu gaz kullanımı söz konusu değildir. İş kazalarına yol açabilecek ark oluşumu, radyasyon, toksik gaz çıkışı veya insan gözüne zararlı lazer ışını gibi olumsuz durumlar bu yöntemde mevcut olmadığı için temiz ve çevreci bir prosesdir. Ayrıca, toplam ısı girdisinin düşük olduğu bir katı hal kaynak yöntemi olduğundan ergitme kaynaklarında karşılaşılan çatlak ve porozite oluşumu söz konusu değildir. Al alaşımlarının tüm kaynak yöntemlerinde karşılaşılan kaynak bölgesindeki mukavemet kaybı bu yöntemde düşük ısı girdisinden dolayı daha düşük seviyededir (Çam, 2003b).

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ TANITIMI

Alüminyum metal sektöründe demir ve çelikten sonra ikinci sırayı almaktadır. 1989' da ABD' de 4.03 milyon ton alüminyum üretilmiştir. Alüminyum endüstrisindeki hızlı büyüme bu metalin eşsiz özellik kombinasyonuna atfedilmektedir. Bu özellikler alüminyumu çok yönlü yapı ve mühendislik malzemelerinden biri yapmaktadır. Alüminyum ağırlıkça hafiftir ve alaşımları yapı çeliklerinden daha fazla mukavemetlendirilmiştir. Alüminyum iyi elektriksel ve ısı iletkenliğin yanında yüksek ısı ve ışık yansımaları özelliklerine de sahiptir. Pek çok hizmet şartlarında korozyon direnci oldukça iyi ve zehirsizdir. Alüminyum dökülebilir ve pek çok şekle getirilebilir ve iyi yüzey kalitesi verir. Alüminyumun bu üstün özellikleriyle mühendislik malzemesi olarak büyük önem kazanması şaşırtıcı değildir (Smith, 2001).

Alüminyum 2.70 gcm^{-3} yoğunlukta veya diğer bir deyişle, çeliğin üçte biri yoğunluğuna sahip hafif bir metaldir. Çelikle karşılaştırıldığında, alüminyum nispeten düşük çekme dayanımına sahip olmakla beraber dayanımlarının ağırlıklarına oranları mükemmeldir (Askeland, 1998).

Avrupa Alüminyum Birliği alüminyum üreticileri için en büyük kullanım sektörünün taşımacılık olduğunu bildirmektedir. Burada özellikle otomobiller, hava taşıtları ve gemi sektörü en önemli kullanım alanlarıdır. Bunun yanında ambalaj sektörü, taşımacılık sektörünü büyük bir gelişme hızı ile takip etmektedir (Zeytin, 2000a).

Alüminyum mukavemet, güvenlik ve konfordan vazgeçmeden, boyutları küçültmeden bir otomobil dizayn edilmesinde kullanılacak en önemli konstrüksiyon malzemesidir. Alüminyum ve alaşımları otomobillerde genellikle döküm alaşımı olarak, hareket sistemi, motor ve vites gibi parçaların üretiminde kullanılırken, döküm alaşımları dışında levha, profil gibi değişik üretim teknikleri ile üretilmiş parçalar kasa ve soğutma sistemi gibi aksamlarda kullanılmaktadır (Zeytin, 2000a).

Alüminyum mukavemetlendirme mekanizmalarına da kolaylıkla tepki verir. Çizelge 2.1' de saf tavllanmış alüminyumun dayanımı, çeşitli tekniklerle

mukavemetlendirilmiş alaşımlarla karşılaştırılmıştır. Alüminyum alaşımları, saf alüminyumdan belki 30 kat daha dayanıklıdır.

Çizelge 2.1. Alüminyum ve alaşımlarında mukavemetlendirme mekanizmalarının etkileri (Askeland, 1998).

Malzeme	Çekme Day. (MPa)	Akma Day. (MPa)	% Uzama	(Alaşımın Akma Dayanımı) / (Saf Metalin Akma Dayanımı)
Saf tavllanmış Al (% 99.999 Al)	44.83	17.24	60	
Ticari Saf Al (Tavlanmış %99 Al)	89.67	34.48	45	2.0
Katı eriyik mukavemetlendirilmiş (%1.2 Mn)	110.34	41.38	35	2.4
%75 Soğuk Şekillendirilmiş saf Al	165.52	151.72	15	8.8
Dağılım mukavemetlendirilmiş (%5 Mg)	289.66	151.72	35	8.8
Yaşlandırılmış (%5.62 Zn % 2.5 Mg)	572.41	503.54	11	29.2

Diğer taraftan, alüminyum genellikle yorulma zorlanması altında yorulma dayanım sınırı göstermez ve bu nedenle kırılma oldukça düşük gerilmede oluşur. Ergime sıcaklığının düşük olmasından dolayı, alüminyumun yüksek sıcaklıklardaki performansı iyi değildir. Alüminyum düşük sertliğinden dolayı zayıf aşınma direncine sahiptir (Askeland, 1998).

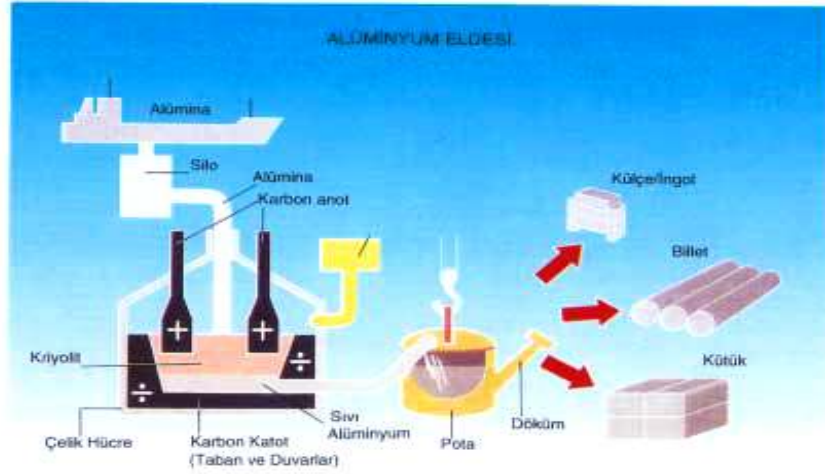
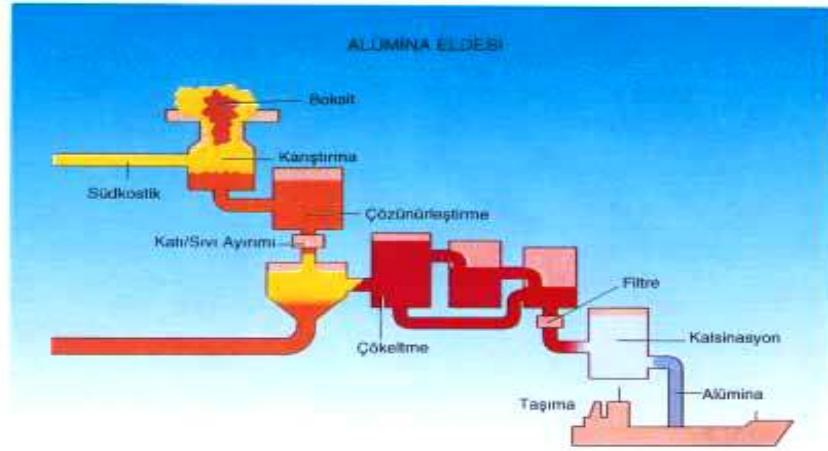
2.1. Alüminyumun Üretimi

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 (Zeytin, 2000b).

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. 1807 yılında laboratuvar düzeyinde üretilen alüminyum, 1908 yılında fabrikasyon olarak üretilmeye başlanmıştır. 1910 yılında dünya üretimi 17.000 ton iken, 1980'li yıllarda 16 milyon ton civarında gerçekleşmiştir (Zeytin, 2000b).

Alüminyumun oksijenle çok şiddetli yanma eğilimi nedeniyle redüksiyonunun karbonla yapılması mümkün değildir. Saf alüminyumun üretimi genel olarak iki kademedede yapılır: 1. Alüminyum oksidin elde edilmesi, 2. Metalik alüminyum üretimi için ergimiş metal elektrolizi ile oksitlerin redüksiyonu (Zeytin, 2000b).

Bunların dışında termo mekanik işlemler olmasına rağmen, bu yöntemler teknolojik öneme sahip değildir. Alüminyum üretimi önceki yüzyılın sonundan itibaren bilinmekte olup, üç ana kademedede yapılır. Şekil 2.1 'de birincil 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 aluminadan (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 (Zeytin, 2000b).



Şekil 2.1. Birincil alüminyum üretiminin kademeleri: alümina ve alüminyum eldesi (Zeytin, 2000b)

Saf alüminyum genellikle Çizelge 2.2' de gösterilen bileşimlerde bulunur. (Zeytin, 2000b)

Çizelge 2.2. Saf alüminyumun bileşimi (Zeytin, 2000b)

Saf Alüminyum:	
Fe	%0.0005-0.002
Cu	%0.0005-0.002
Si	%0.002-0.005
Zn	%0.0005-0.002
Mg	iz
Al	geri kalan

2.2. Alüminyum ve Alaşımlarının Sınıflandırma ve Temper Tasarımları

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 mikro yapı ve bileşimlere sahiptirler. Her ana grup içindeki alaşımlar, ısıl işlem yapılabilir ve yapılamaz alaşımlar olmak üzere iki alt gruba ayrılabilirler. Isıl işlem yapılabilir alaşımlar, yaşlandırma işlemi ile sertleştirilebilirken, ısıl işlem yapılamayan alaşımlar ise katı eriyik sertleşmesi, pekleşme ve dağılım (dispersiyon) sertleştirilmesi ile mukavemetlendirilirler (Askeland, 1998).

Dört basamaklı sayısal bir tasarım sistemi dövme alüminyum ve alüminyum alaşımlarını tanımlamak için kullanılır. Son iki basamak alüminyum alaşımını veya alüminyumun saflığını gösterir. İkinci basamak orijinal alaşımın modifikasyonunu veya empürite sınırlarını gösterir (Smith, 2001).

Döküm 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 empürite 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 (Smith, 2001). Alüminyum alaşımları Çizelge 2.3’ deki numara sistemi ile tanımlanmışlardır (Askeland, 1998).

Çizelge 2.3. Alüminyum alaşımları için tanımlama sistemi (Askeland, 1998)

Dövme alaşımlar	
1XXX Ticari saflıkta Al (>%99Al)	Yaşlandırılmaz
2XXX Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3XXX Al-Mn	Yaşlandırılmaz
4XXX Al-Si ve Al-Mg-S	Eğer magnezyum varsa yaşlandırılabilir
5XXX Al-Mg	Yaşlandırılmaz
6XXX Al-Mg-Si	Yaşlandırılabilir
7XXX Al-Mg-Zn	Yaşlandırılabilir

Çizelge 2.3. devam ediyor

Döküm alaşımlar	
1XX.X Ticari saflıkta Al	Yaşlandırılmaz
2XX.X Al-Cu	Yaşlandırılabilir
3XX.X Al-Si-Cu veya 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

Temper tasarımları; alaşım tasarımlarını takip eder ve önek (örneğin 3003-Q) ile ayrılır. Bir temel temperin alt bölümleri tekrar bir veya daha çok ilave basamaklarla (örneğin 3003-H14) takip edilir (Smith, 2001).

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 ısıl işlem uygulanmış (alt bölümler için aşağıya bakınız) (Smith, 2001).

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 tavllanmış.

H3x Düşük sıcaklıkta yapının yaşlanmasını önlemek için soğuk şekillendirilmiş ve dengelenmiş (Askeland, 1998).

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 (Smith, 2001).

2.3. Alüminyumun Özellikleri

Saf alüminyumun özellikleri Çizelge 2.4' de verilmiştir. Bu özellikler alüminyuma ilave elementlerin etkisi ile değiştirilebilir. Alüminyumun metal olarak özellikleri birçok durumda onun ideal ve ekonomik bir malzeme olmasını sağlar. Bu özellikler aşağıda belirtilmiştir (Zeytin, 2000b):

- Uygun mekanik özelliklerle birlikte düşük ağırlık,
- Koku ve kimyasallara karşı dayanım ve hijyenik koşullar,

- Yüksek ısı iletkenliği,
- Parlama ve alev almazlık,
- Manyetik nötrallite,
- Kolay şekillendirilebilme kabiliyeti,
- Çok farklı yöntemlerle yüzey işlemleri.

Çizelge 2.4. Saf alüminyumun fiziksel özellikleri (Zeytin, 2000b)

Kimyasal sembol	Al
Atom numarası	13
Atom Ağırlığı	26.98
Kafes Yapısı	KYM
Yoğunluğu (20°C)	2.6989 gr/cm ³
(660°C'de sıvı)	2.37 gr/cm ³
Elastik modül,E.	7.2 103kp/mm ²
Kayma modülü,G.	2.7 103kp/mm ²
Ergime sıcaklığı	660.24 °C
Ergime ısısı	94.6 cal/gr
Elektrik iletkenliği	37.74 m/Ohm.mm ²
Isı iletkenliği,λ.	0.55 cal/cm.s.°C

Ticari saflıkta alüminyum yaklaşık % 99,3' dan minimum % 99,7' ye değişir. Yüksek saflıkta alüminyum elektriksel iletken alaşımlar ve reflektör levhalar gibi uygulamalar için seçilir. Ticari saf alüminyum alaşımı olan 1100 alaşımını üretmek için, demir ve bakır ilaveli düşük saflıkta metal kullanılır. Bu alaşım şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirlikle beraber nispeten yumuşak ve sünektir. Tavlanmış %99,99 Al' un çekme dayanımı yaklaşık 44,815 MPa, akma dayanımı 10,342 MPa ve uzaması %50' dir (Smith, 2001).

Alüminyum soy olmayan metallerden olmasına rağmen, yüzeyinde çok ince fakat yoğun bir oksit tabakasının bulunması, onu kimyasal etkenlerden özellikle korozyona karşı çok iyi korumaktadır. Bu tabaka, alkaliler ve klordan kolayca etkilenmektedir. Saf alüminyum; kimyasal maddeler için depo ve alet, beslenme ve gıda maddeleri endüstrisinde, birahane aletleri, ev ve büyük mutfak aletleri imalatı ve paketlenme gayesi için çok uygundur. Çeşitli alüminyum alaşımları da, uygun ısı

işlemlerle atmosferik şartlara, deniz suyuna ve diğer agresif maddelere karşı dayanıklılık kazanır (Gürleyik, 1993).

Saf alüminyumda olduğu gibi, alüminyum alaşımları da, sıvı halde iken oldukça büyük miktarda hidrojeni çözebilir. Katı haldeki alüminyum çok az hidrojeni çözüdürürken, ergitme sıcaklığında, sıvı hale geçerken, hidrojen çözüdürme miktarı yaklaşık 19 kat artar. Bu durumun aksine, sıvı haldeki alüminyum katılaşıırken, aniden büyük miktarda ayrışan hidrojen gazı, metal içerisinde mekanik olarak tutularak bazı hasarlara neden olur (Gürleyik, 1993).

Şekil değiştirme kabiliyeti; saf alüminyumun, soğukta ve sıcakta şekil değiştirme kabiliyeti çok iyidir (Gürleyik, 1993).

Alüminyumun düşük mukavemet değerleri, diğer metallerle alaşımlandırma yapılarak oldukça yükseltilebilmektedir. Alüminyum için en önemli alaşım elamanları Cu, Mg, Si, Mn ve Zn' dur, diğer alaşım elamanları Ni, Co, Cr, Fe, Pb ve Ti ise pek mühim değildir. Bu elamanların çoğu Al_2Cu , Al_3Mg ve Mg_2Si gibi sert kimyasal bileşimler oluşturup, alüminyumu alaşımlandırarak mukavemet değerlerini yükseltirler ve ayrışma sertleşmesi yaparlar (Gürleyik, 1993).

2.4. Çeşitli Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri

Bu bölümde; Al-Mn, Al-Mg, Al-Mg-Si alaşımları ile Al-si döküm alaşımları ve Al-Li döküm alaşımlarının özelliklerine değinilmiştir.

2.4.1. Alüminyum mangan alaşımları

Ticari saf alüminyuma yaklaşık %1,2 Mn ilavesi (%6 Fe ve % 0,2 Si) orta düzeyde dayanımlı ısıl işlem uygulanamayan bir alüminyum alaşımı üretir. Mangan ilavesi alüminyumu katı eriyik mukavemetlenmesi ve ince bir dağılım çökmesi ile mukavemetlendirir. Dayanımda daha fazla artış %1' e kadar magnezyum ilavesi ile elde edilir. Bu alaşımlar genel amaçlar için kullanılır. Burada orta düzeyde dayanım ve iyi şekillendirilebilirlik gereklidir (Smith, 2001).

2.4.2 Alüminyum magnezyum alaşımları

İkili alüminyum magnezyum alaşımları ısıtıl işlem 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 çökeltme sertleşmesi göstermezler. Buna karşın magnezyum katı eriyik mukavemetlenmesi ile alüminyumu 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 (Smith, 2001).

2.4.3 Alüminyum magnezyum silisyum alaşımları

Alüminyumda magnezyum (% 0,6-1,2) ve silisyumun (% 0,4-1,3) kombinasyonu dövme, ısıtıl işlem uygulanabilir 6XXX serileri için temel oluşturur. Çoğu durumda, magnezyum ve silisyum, kombine olarak metaller arası Mg₂Si bileşiğinin kararsız fazlarını oluşturmak için gerekli olandan fazla silisyum kullanılabilir. Magnezyum ve krom, çoğu 6XXX serisi alaşımlarına yükseltmiş dayanım ve tane boyutu kontrolü için ilave edilir. Bakır da bu alaşımın dayanımını yükseltir ancak % 0,5' den fazla bulunursa korozyona direncini azaltır (Smith, 2001).

2.4.4 Alüminyum silisyum döküm alaşımları

Ana alaşım elementi olarak silisyum içeren alüminyum döküm alaşımları, üstün döküm özelliklerinden dolayı en önemli ticari döküm alaşımlarıdır. Alüminyum-silisyum alaşımları eriyik durumda nispeten yüksek akıcılık, katılaşma sırasında ise mükemmel akıcılığa sahiptirler ve nispeten sıcak yırtılmadan bağımsızdır. Silisyum saf alüminyumun korozyon direncini azaltmaz, orta asidik ortamlar gibi bazı durumlarda korozyon direncini artırır. İkili Al-Si alaşımları ısıtıl işlem uygulanabilir

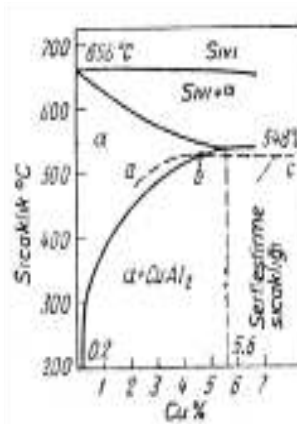
olarak düşünülmez çünkü sadece küçük bir miktar silisyum (maksimum %1,65) alüminyumda çözünebilir ve silisyum katı eriyikten çökelmez, çok az sertleşmeye neden olur (Smith, 2001).

2.4.5. Alüminyum lityum döküm alaşımları

Alüminyum lityum alaşımları 1980' li yıllarda öncelikle uzay ve uçak yapılarının ağırlığını azaltmak için üretilmiştir. Bunlar aynı zamanda soğuk uygulamalar için örneğin sıvı oksijen ve uzay araçları için, hidrojen yakıt tankları için araştırılmıştır. Bununla beraber Al-Li alaşımlarının maliyeti, lityumun yüksek bedeli ve işlem için özel ekipmanlar gerektirmesinden dolayı geleneksel alüminyum alaşımlarından üç-beş kat fazladır. Bu nedenle bu alaşımların uygulanması ağırlığın öncelikli olduğu yerlerde sınırlandırılmıştır. İkili Al-Li alaşımları düşük süneklik ve kırılma tokluğuna sahip olma eğiliminde oldukları için alüminyum-lityum alaşımları, mukavetlenme için daha ince ve daha homojen çözeltiler sağlamak amacıyla bakır veya bakır ve magnezyum içerirler (Smith, 2001).

2.5. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemi

Bileşenlerin çoğunun Al içinde eriyebilirlik kabiliyeti sıcaklıkla azalır (Şekil 2.2). Bu, alaşımlara yaşlanma ile mukavemetlenme olanağını verir. (Oğuz, 1990)



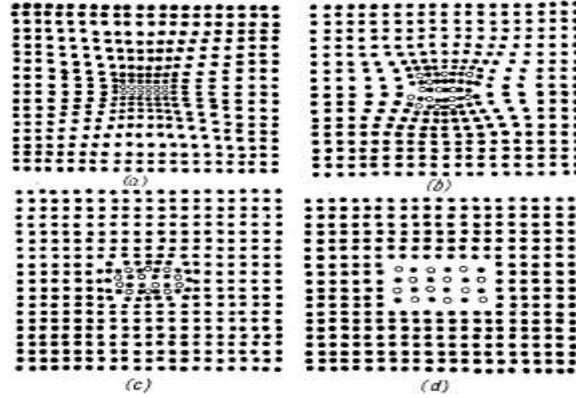
Şekil 2.2. Al-Cu alaşımları denge diyagramı (Oğuz, 1990).

2.5.1. Alüminyum alaşımlarının yaşlandırılması

Bu işlem, metaller arası fazların tümünün ya da çoğunun Al içinde eridiği bir sıcaklığa ısıtmak; bu sıcaklıkta tutmak ve aşırı doymuş bir katı eriyik elde etmek ve hızlı soğutmadan ibarettir. Örneğin Al-Cu sisteminin alaşımları (Şekil 2.2) için sertleştirme sıcaklığı abc çizgisiyle saptanmış olup bu çizgi, % 5.6 dan az Cu içeren alaşımlar için maksimum eriyebilme çizgisinin üstünden geçer. % 5.6 ya kadar bakır içeren alaşımları sertleştirilmesi için ısıtıldıklarında, $CuAl_2$ fazı tamamen erir, ve ardından yapılan hızlı soğutulmada sadece aşırı doymuş α katı eriyiği mevcut olur ve alaşımda bulunan kadar bakır içerir. Metallerarası fazları eritmek için gerekli sertleştirme sıcaklığında tutma süresi, alaşımın içyapısal durumu, ısıtma fırınının tipi ve sertleştirilecek parçanın kalınlığına bağlıdır. 0.5 mm den 150 mm kalınlığa kadar saçlar, levhalar, çubuk ve bantlar, nitrat banyosunda ısıtıldıklarında 10 ila 80 dakika; bugün yaygın olarak kullanılan cebri hava cereyanlı elektrik fırınlarında ısıtıldıklarında da 30-210 dakika tutulur. Döküm parçalar, sertleştirme sıcaklığında daha uzun süre (2-15 saat) bekletilir. Böylece, kabaca çökelmiş metallerarası fazlar erimiş olur. Sertleştirmede, şekillendirilmiş (haddelenmiş, çekilmiş, dövülmüş...) alaşımlar soğuk suya, döküm parçalar da $50-100^{\circ}C$ a ısıtılmış suya daldırılırlar; suyu ısıtmaktan amaç, çarpılmayı ve çatlak oluşumunu önlemektir. Hızlı soğumadan sonra alaşımlar düşük çekme mukavemeti ve akma sınırına, ama yüksek süneklığe sahip olurlar. (Oğuz, 1990)

Hızlı soğumayı yaşlandırma işlemi takip eder. Bunda alaşım birkaç gün oda sıcaklığında (doğal yaşlandırma) veya 10 ila 24 saat yüksek sıcaklıklarda (yapay yaşlandırma) tutulur. Yaşlandırma süreci sırasında aşırı doymuş katı eriyik ayrışır. Bu da alaşımı mukavemetlendirir. Kafesinde bakır atomlarının bir uniform düzende bulunduğu katı eriyiğin ayrışması, yaşlandırma sıcaklığı ve süresine bağlı birkaç aşamada gerçekleşir. Doğal ($20^{\circ}C$ de) veya alçak yapay ($100-150^{\circ}C$ nin altında) yaşlandırma sıcaklıklarında bakır atomları, α katı eriyiğinin kristal kafesi içinde sadece fevkalade kısa mesafelerde hareket ederler ve Guinier-Preston bölgeleri (GP-I) adı verilen iki boyutlu levhaya benzer oluşum ya da diskler halinde (100) düzlemleri içinde toplanırlar (Şekil 2.3, a). GP-I bölgeleri her kristalin sınırları içinde az çok uniform

olarak dağılmışlardır (Şekil 2.3,a). GP-1 bölgelerinde bakır içeriği CuAl_2 dekinden (% 54) daha azdır. (Oğuz, 1990)



Şekil 2.3: Isıl işlemden sonra tanecik çökmesinin şematik diyagramları (a), GP-1 bölgeleri; (b), GP-2 bölgeleri; (c), dörtgen CuAl_2 fazı; (d), kübik CuAl_2 fazı (Oğuz, 1990)

Uzun süre 100°C ' de veya birkaç saat 150°C ' de tutma, geniş boyutlu Guinier-Preston bölgelerinin oluşmasına götürür; bunlardaki içyapı düzeni α katı eriyiğinkinden farklıdır (Şekil 2.3, b). Bu bölgelerdeki bakır içeriği CuAl_2 dekinde tekabül eder. Bu bölgeler bilindiği üzere GP-2 bölgeleri diye adlandırılır. Difüzyon yayınma süreçleri ve dolayısıyla, iç-yapısal dönüşüm süreçleri ve de mukavemet artışının kendisi, yaşlandırma sıcaklığının artışıyla daha hızlı bir tempoda meydana gelir (Oğuz, 1990).

Doğal yaşlanmada, sadece GP-1 bölgeleri oluşur. Yapay yaşlandırmada içyapısal değişmelerin sırası $\text{GP-1} \rightarrow \text{GP-2} \rightarrow \text{Ø}' \rightarrow \text{Ø}$ (CuAl_2) şeklinde gösterilebilir. Ancak bu, bir oluşumun derhal öbürüne dönüştüğü anlamına gelmez. Müteakip oluşum veya faz, ilkinin erimesinden sonra meydana çıkabilir (Oğuz, 1990).

Bu Al-Cu alaşımlarındaki aşırı doymuş katı eriyik ayrışması genel prensibi, başka alaşımlarda da geçerlidir. Tek fark, çeşitli alaşımlarda farklı bileşim ve bölgelerin içyapısı ile oluşan farklı fazlardadır (Oğuz, 1990).

Sertleştirme ve yaşlandırmada mukavemet artışının derecesi, pekiştirici fazların tabiatına ve bunların taneciklerinin miktar ve dağılımına bağlı olur. Maksimum pekiştirici kuvvetlendirici etki, α katı eriyiklerinkinden farklı bir çapraşık içyapı ve bileşimi haiz olan $MgZn_2$, Mg_2Si ve S fazı ($Al_2Cu Mg$) dendir (Oğuz, 1990).

Alansal yaşlanmadan sonra alaşımlar bilindiği üzere artmış bir akma sınırı, daha yüksek bir süneklik, iyi korozyon mukavemeti ve gevrek kırılmaya direnç kazanırlar. Bunun nedeni, alaşımın şekil değiştirmesinde, dislokasyonların ilk şekil değiştirmelere fazla direnç göstermeyen bölgeleri kat etmeleridir. GP-1 veya GP-2 bölgeleri arasında bir yüzey arasının olmayışı, iyi korozyon mukavemetini sağlar (Oğuz, 1990).

Faz yaşlanmasından sonra süneklik, tokluk, gevrek kırılmaya ve gerilme korozyonuna mukavemet düşer. Bu durumda, alaşımın şekil değiştirmesinde dislokasyonlar, stabil olmayan fazların taneciklerinin çevresinden geçer ve çok sayıda dislokasyon düğümü ve çeşitli kümeler oluştururlar. Bunun sonucunda başlangıç şekil değiştirmelerine mukavemet artar ve süneklik azalır (Oğuz, 1990).

Alüminyumun Mn, Cr, Ni, Zr, Ti ve diğer metallerle bazı alaşımları sıcak ve bazen de soğuk işleme maruz olup bunların yeniden kristalleşme sıcaklığı, sıcak çalışma veya sertleştirme için bilindiği üzere tayin edilmiş ısıtma sıcaklığından yüksektir. Dolayısıyla bu alaşımlar, sertleştirilip yaşlandırıldıktan sonra, yeniden kristalleşmemiş (poligonlaşmış) içyapı ve yüksek dislokasyon yoğunluğunu muhafaza ederler, yeniden kristalleşmiş içyapıya göre mukavemeti hayli yüksektir. Bu olgu, içyapısal güçlendirme olarak bilinir (Oğuz, 1990).

2.5.2 Alüminyum alaşımlarının tavllanması

Uygulanan tavlama türleri şunlardır: (1) homojenleştirme; (2) yeniden kristalleşme; (3) sertleştirme ve yaşlandırmadan sonra yumuşatma. (Oğuz, 1990)

Homojenleştirme tavlaması ingotlara, haddelenmeden önce, dendritik segregasyonu yok etmek için uygulanır. Bu tür segregasyonların sonucu olarak homojen olmayan bir katı eriyik elde edilir. Homojenleştirmede katı eriyik kristalleri

homojen olarak dağılır ve metallerearası birleşikler erir. Müteakip soğuma sırasında metallerearası birleşikler ince sekonder girmeler halinde çökelirler (Oğuz, 1990).

Sonuç olarak, dökme alaşımın sünekliği artar. Bu da sıcak çalışma sırasında incelme oranının ve şekil değiştirme hızının artırılmasına olanak sağlar. Homojenleştirme, tavllanmış saçlarda ince taneli bir içyapının oluşturulmasını teşvik eder ve gerilme korozyonu eğilimini azaltır. Homojenleştirme sıcaklığı 450 ila 520°C arasında, tutma süresi de 4 ila 40 saattir. Alaşımlar havada veya fırınla birlikte soğutulur (Oğuz, 1990).

Yeniden kristalleşme tavlama, işlenmiş alaşımı, primer yeniden kristalleşmenin tamamlandığı sıcaklığın üstünde bir sıcaklığa ısıtmaktan ibarettir. Alaşımı yumuşatmak ve ince tane elde etmek için uygulanır. % 50 ila 75 incelme derecesine işlenmiş Al alaşımlarının çoğunda yeniden kristalleşmenin başladığı sıcaklık, 290 ile 400°C arasındadır. Alaşımın bileşimine göre, yeniden kristalleşme tavlama sıcaklığı 350 ila 500°C, tutma süresi de 0.5 ila 2 saattir. Isıl işlem kabul etmeyen alaşımların yeniden kristalleşme tavlamasından sonra, soğuma temposu isteğe göre düzenlenebilir. Isıl işleme tabi tutulabilen alaşımlarda soğutma hızı, 200- 250°C' a kadar, 30°C/saat 'ı aşmayacaktır. Tavlama, soğuk çalışmada ya da sıcak ve soğuk çalışma işlemlerinde bir ara işlemi olarak uygulanır (Oğuz, 1990). Çok saf alüminyumda olduğu gibi, AlMn alaşım tiplerinin ısıl işlemi sırasında, iri tanelerin oluşmaması için dikkat edilmelidir. Genelde şekil değiştirme derecesi, sıcaklık ve tavlama süresine uygun tane iriliği oluşmaktadır (Gürleyik, 1993).

Sertleştirilme ve yaşlandırılma işlemlerine tabi tutulmuş alaşımların yumuşatılmaları için tavlama 350-450°C' de, 1 ila 2 saat süreyle uygulanır. Bu sıcaklıklarda aşırı doymuş katı eriyik tamamen ayrışır ve kuvvetlendirici fazlar ayrılıp toplanırlar. Soğuma hızı 30°C/saat' ı geçmeyecektir. Tavlandıktan sonra alaşım düşük çekme mukavemeti, ılımlı süneklik ve yüksek gerilme korozyonu direncine sahip olur (Oğuz, 1990).

Alüminyum alaşımlarına gerilim giderme işlemi de yapılmaktadır. 200°C sıcaklığa kadar ısıtma sırasında içyapıda hiçbir değişiklik olmaz. Yalnız, iç gerilmeler azalacağından, malzeme özelliklerine önemli derecede etki yapabilir (Gürleyik, 1993).

3. ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARININ KAYNAK KABİLİYETİ

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 (Oerlikon, 2006).

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 (Oerlikon, 2006).

Şekillendirilmiş olanlar ile (plaka, levha, ekstrüzyon, dövme, çubuk, bar ve darbeli ekstrüzyon), olabildiğince iyi kumlanmış kokil dökümler kaynak edilebilir. Alışılmalı kalıp dökümleri kaynak edildiğinde iç gazlar sebebiyle kaynak ve kaynağa bitişik esas metalde aşırı gözenek meydana gelir. Bununla beraber vakum altında kalıp döküm kaynak yapıldığında mükemmel sonuç verir. Toz metalürjisi ile imal edilen parçalarda da kaynak esnasında iç gazdan dolayı gözenek oluşabilir (Senyen, 2001).

Bir alüminyum alaşımının kaynak edilebilirliğinin tayininde şekillendirilmiş alaşım bileşimi alaşımın biçiminden çok daha fazla önemlidir. Şekillendirilmiş esas alaşımların fiziki özellikleri ve nispi kaynak edilebilirlik dereceleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2 de verilmiştir. Yaygın döküm alaşımları için benzer veriler Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4 de sıralanmıştır (Senyen, 2001).

Çizelge 3.1. Isıl işleme tabi tutulamayan dövme alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri ve kaynak edilebilirlikleri (Senyen, 2001).

Esas Alaşım	Yaklaşık Ergime Aralığı °C	25°C' da Isıl İletkenlik W/m.K	Elektrik İletkenliği (a) % IACS	Kaynak edilebilirlik (b)				
				Gaz	Toz Ark	Asal Gaz Ark	Direnç	Basınç
1060	646-657	234	62	A	A	A	B	A
1100	643-657	222	59	A	A	A	A	A
1350	646-657	234	62	A	A	A	B	A
3003	643-654	193	50	A	A	A	A	A
3004	629-654	163	42	B	A	A	A	B
5005	632-654	200	52	A	A	A	A	A
5050	624-652	193	50	A	A	A	A	A
5052	607-649	138	35	A	A	A	A	B
5652								
5083	574-638	117	29	C	C	A	A	C
5086	585-641	125	31	C	C	A	A	B
5154	593-643	125	32	C	C	A	A	B
5254								
5454	602-646	134	34	B	B	A	A	B
5456	568-638	117	29	C	C	A	A	C

a)20°C'da eşdeğer hacim
b) Kaynak edilebilirlik derecesi: A, Kolayca kaynak edilebilir; B, Çoğu uygulamalarda kaynak edilebilir, ancak özel teknik veya ilave metal alaşımı gerektirir; C, Sınırlı kaynak edilebilir.

Çizelge 3.2. Isıl işleme tabi tutulabilen dövme alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri ve kaynak edilebilirlikleri (Senyen, 2001).

Esas Alaşım	Yaklaşık Ergime Aralığı °C	25°C' da Isıl İletkenlik W/m.K	Elektrik İletkenliği (a) % IACS	Kaynak edilebilirlik (b)				
				Gaz	Toz Ark	Asal Gaz Ark	Direnç	Basınç
2014	507-593	154	40	X	C	B	B	C
2024	502-638	121	30	X	C	C	B	C
2090	560-643	88	17	X	X	B	B	C
2219	543-643	121	30	X	C	A	B	C
2618	549-638	161	37	X	C	B	B	C
6009	560-649	167	44	C	C	B	B	B
6013	579-649	150	38	C	C	B	A	B
6061	582-652	167	43	A	A	A	A	B
6063	616-654	200	53	A	A	A	A	B
6101	621-654	218	57	A	A	A	A	B
6262	582-652	172	44	C	C	B	A	B
6351	596-652	176	46	A	A	A	A	B
6951	616-654	198	52	A	A	A	A	A
7005	607-646			X	X	A	A	B
7039	577-638	154	34	X	X	A	A	B
7075	477-635	130	33	X	X	C	B	C
7079	482-638	125	32	X	X	C	B	C
7178	477-629	125	31	X	X	C	B	C

a)20°C'da eşdeğer hacim
b) Kaynak edilebilirlik derecesi: A, Kolayca kaynak edilebilir; B, Çoğu uygulamalarda kaynak edilebilir, ancak özel teknik veya ilave metal alaşımı gerektirir; C, Sınırlı kaynak edilebilir; X, Tavsiye edilmeyen metot.

Çizelge 3.3. Isıl işleme tabi tutulamayan döküm alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri ve kaynak edilebilirlikleri (Senyen, 2001).

Esas Alaşım	Yaklaşık Ergime Aralığı °C	25°C' da Isıl İletkenlik W/m.K	Elektrik İletkenliği (a) % IACS	Kaynak edilebilirlik (b)				
				Gaz	Toz Ark	Asal Gaz Ark	Direnç	Basınç
Kum döküm								
208.0	521-632	121	31	C	C	B	B	X
443.0	577-632	1746	37	A	A	A	A	X
511.0	588-638	141	36	X	X	A	A	X
512.0	588-632	146	38	X	X	B	B	X
514.0	599-638	137	35	X	X	A	A	X
535.0	549-632	99	23	X	X	A	A	X
710.0	599-649	137	35	C	C	B	B	X
712.0	599-638	159	40	C	C	A	B	X
Kokil döküm								
208.0	521-632	121	31	C	C	B	B	X
238.0	510-599	104	25	C	C	B	S	X
443.0	577-632	146	37	A	A	A	A	X
A444.0	577-632	159	41	A	A	A	A	X
513.0	582-638	133	34	X	X	A	A	X
711.0	599-643	159	40	B	B	A	A	X
Kalıp döküm								
360.0	571-588	146	37	C	X	C	B	X
380.0	521-588	108	27	C	X	C	B	X
413.0	577-588	154	39	C	X	C	B	X
518.0	538-621	99	24	X	X	C	B	X
a)20°C'da eşdeğer hacim b) Kaynak edilebilirlik derecesi: A, Kolayca kaynak edilebilir; B, Çoğu uygulamalarda kaynak edilebilir, ancak özel teknik veya ilave metal alaşımı gerektirir; C, Sınırlı kaynak edilebilir; X, Tavsiye edilmeyen metot.								

Çizelge 3.4. Isıl işleme tabi tutulabilen döküm alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri ve kaynak edilebilirlikleri (Senyen, 2001).

Esas Alaşım	Yaklaşık Ergime Aralığı °C	25°C' da Isıl İletkenlik W/m.K	Elektrik İletkenliği (a) % IACS	Kaynak edilebilirlik (b)				
				Gaz	Toz Ark	Asal Gaz Ark	Direnç	Basınç
Sadece kum döküm								
A201.0	571-649	121	30	C	C	B	B	X
240.0	516-604	95	23	X	X	C	B	X
A242.0	527-638	146	38	X	X	B	B	X
295.0	521-643	141	35	C	C	B	B	X
520.0	449-599	87	21	C	C	B	C	X
Sadece kokil döküm								
332.0	521-582	104	26	X	X	B	B	X
333.0	521-588	117	29	X	X	B	B	X
336.0	538-571	117	29	C	C	B	B	X
354.0	538-599	125	32	C	C	B	B	X
Kum ve kokil döküm								
222.0	521-627	130	33	X	X	B	B	X
242.0	527-638	133	34	X	X	C	B	X
319.0	521-604	112	27	C	C	B	B	X
355.0	549-621	150	39	B	B	B	B	X
C355.0	549-621	146	39	B	B	B	B	X
356.0	560-616	150	41	A	A	A	A	X

Çizelge 3.4. devam ediyor

A356.0	560-610	150	40	A	A	A	A	X
A357.0	554-610	159	40	B	B	A	A	X
359.0	566-599	137	35	B	B	A	A	X
a)20°C'da eşdeğer hacim b) Kaynak edilebilirlik derecesi: A, Kolayca kaynak edilebilir; B, Çoğu uygulamalarda kaynak edilebilir, ancak özel teknik veya ilave metal alaşımı gerektirir; C, Sınırlı kaynak edilebilir; X, Tavsiye edilmeyen metot.								

Dövme alaşımlar arasında gaz korumalı ark süreçleriyle en büyük kolaylıkla kaynak edilebilenler, ısıl işleme tabi tutulamayan 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileridir. 6xxx serilerindeki ısıl işleme tabi tutulamayanlar da kolayca kaynak edilebilirler. 4xxx ile yüksek mukavemetli serilerinin ve ısıl işlem görebilen 2xxx serilerinin alaşımları da arka kaynak edilebilirlerse de özel tekniklerin uygulanması gerekebilir ve biraz düşük süneklik elde edilebilir. Yüksek mukavemetli, ısıl işlem görebilen 7xxx serilerinden 7075, 7079 ve 7178 alaşımları kaynak edilebilir ama bunların ısı etkili bölgeleri (IEB) gevrek olur; dolayısıyla da bunlara kaynak yapılması tavsiye edilmez. Buna karşılık 7005 ve 7039 alaşımları kaynak için özel olarak geliştirilmiş olup bunların kaynak kabiliyetleri iyidir (Oğuz, 1990).

Alüminyumun oksijene karşı kuvvetli bir ilgisi olup havaya maruz kaldığında hemen oksitlenir. Isıl işlemler ve nemli depolama şartları oksit kalınlığını artıracaktır. Tabii oksit, asal gaz kaynak arkları veya tozlar vasıtasıyla giderilebilecek inceliktedir. Bununla beraber daha kalın oksit, mekanik veya kimyasal araçlarla kaynak öncesi giderilmelidir (Senyen, 2001).

Alüminyum oksit, esas metal alaşımının ergime sıcaklığından çok daha yüksek olan 2050°C civarında (yaklaşık olarak alüminyum alaşımının kendi ergime sıcaklığının 3 katı sıcaklıkta) ergir. Kaynak sırasında esas metalin oksitten çok daha önce ergiyeceği aşikardır. Isıl işleme tabi tutulamayan alüminyum alaşımlarının kaynağında tabii oksitler asal gaz ark vasıtasıyla parçalanabilir. Bununla beraber, ısıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları belli bir ısıl işlem için yüksek sıcaklığa çıkarıldığından ısıl işlem uygulanamayan alaşımlarda bulunandan daha kalın bir oksit tabakası biçimlenecektir. Oksit giderilmediğinde veya yeri değiştirildiğinde yetersiz ergimeye sebep olacaktır. Oksiti gidermek için klorür ve florür ihtiva eden tozların

kullanıldığı bazı birleştirme işlemlerinde kullanım sırasında korozyon problemi ihtimalinden kaçınmak için birleştirme işleminden sonra bu tozlardan birleştirme yeri arındırılmalıdır. Bu konu, toz kullanılmaksızın oksidi giderebilen asal gaz ark kaynak işlemlerinin kullanımını geniş ölçüde ön plana çıkarır. Alüminyum oksit, bir elektriksel yalıtkandır. Yeterince kalın olduğunda, anodik kaplamalarda olduğu gibi ark başlatmayı önleyebilir. Bu durumda, oksit azalması sadece kaynak yapılacak yerde değil aynı zamanda şase bağlantısının yapıldığı yerde de gereklidir. (Senyen, 2001).

Ergimiş alüminyumda hidrojen çok hızlı çözünür. Buna karşılık, hidrojen katı alüminyum içinde hemen hemen hiç çözünmez. Bu da alüminyum kaynağında gözeneğin birinci sebebi olarak tanımlanır. Yüksek sıcaklıklarda kaynak banyosu çok miktarda hidrojen soğrulmasına müsaade eder ve katılaşma esnasında hidrojen çözünürlüğü çok miktarda azalır. Etkili çözünebilirlik sınırını aşan hidrojen, katılaştıran kaynaktan kaçamadığında gözenek oluşturur (Senyen, 2001).

Sağlam kaynakların yapılabilmesi için esas metal ve ilave metal üzerindeki yağlayıcı, yüzeydeki nem veya hidrojen ihtiva eden oksit, bir su soğutmalı üfleç nozülü içinde nem yoğuşması veya su sızıntısı, koruyucu gaz içerisindeki nem uzaklaştırılmalıdır. Alüminyum-magnezyum alaşımları (5xxx serisi), hidrojen ihtiva eden oksit oluşumu yönünden en hassas olan alaşımlardır. Makaralara sarılmış haldeki çıplak tel elektrot, kuru ve ısıtılmış bir bölgede ambarlanmalıdır. Nem, hidrojen ihtiva eden oksitten toz özlü elektrotlarda yapıldığı gibi ısıtılarak uzaklaştırılmaz (Senyen, 2001).

Alüminyumun ısıl iletkenliği, çeliğin altı katı civarındadır. Alüminyum alaşımlarının ergime sıcaklığı demir esaslı alaşımların ergime sıcaklığının altında olmasına rağmen özgül ısısının yüksek olması sebebiyle alüminyumun kaynağı için daha yüksek ısı girdisi gerekir. Buna rağmen bir kaynak düşük hızla yapılıyorsa, ısı arkın önünde ilerleyebilir, kaynak parametrelerinin devamlı ayarı gerekir (Senyen, 2001).

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynağı esnasında, gerek ısı iletkenliği ve buna bağlı olarak ısı girdisinin, gerekse alüminyumda sıvı halden katı hale geçme

sırasında hacim kaybının çeliğe göre daha fazla olması sebebiyle doğal olarak çarpılma daha çok olur. Çarpılmanın azaltılması için yapılacak çalışmalar tasarım sırasında kaynak ağızlarının tespitiyle başlayıp atölye çalışmalarıyla devam eder (Senyen, 2001).

Sıcak çatlama, birçok halde alüminyum kaynak metalinde görülen bir kusur olup başta alaşımın buna eğilimi olmak üzere çekme (büzülme) gerilimi, kaynak sırasında birleşme yerinin tespit edilmesi gibi nedenlerden ileri gelir. Normal olarak sıcak çatlak saf alüminyum veya ötektik bileşimde kaynak metalinde olmaz (Oğuz, 1990).

Her türlü yabancı maddenin kaynak yapılacak yüzeyden kaldırılması ile kaynak esnasında; ısı, üfleme gibi sebeplerle tekrar geri dönme ihtimalini ortadan kaldıracak kadar uzağa götürülmesi gereklidir. Temizlik, hemen kaynak öncesi dikkatli bir şekilde yapılmalı ve kaynak boyunca temizlik konusunda aynı özen gösterilmelidir. Temizlik, ortam şartları (ısı, nem, havadaki parçacık miktarı v.b.) göz önüne alınarak belirli aralıklarla tekrarlanmalıdır. Kullanılabilecek üç çeşit temizleme metodu; Mekanik temizleme, çözücü ile temizleme ve kimyasal aşındırma ile temizlemedir. Zaman zaman bu metotlar birlikte kullanılabilir (Senyen, 2001).

Mekanik temizleme özellikle yüzeydeki oksidin ve yüzeye yapışan metal buharlarının giderilmesi için kullanılır. Yüzeyde yağ, gres gibi kirleticiler bulunduğu ikinci (çözücü ile temizleme) metotla birlikte kullanılması tavsiye edilir. Fırçalama, eğeleme, planyalama, taşlama, zımparalama veya çelik yünle ovalama alüminyum için kullanılabilecek mekanik temizleme metotlarıdır (Senyen, 2001).

Çözücü ile temizleme metodu, metal yüzeyi düzgün ve kirleticiler yüzeye fazla yapışmadığında yağ, gres, kir ve gevşek, parçacıkların giderilmesi için kullanılır (Senyen, 2001).

Kimyasal temizlemenin, gerek temizleme ve gerekse kendi başına yeterli yönünden diğer metotlarla karşılaştırıldığında çok daha iyi sonuç verdiği görülür. Ancak gözeneğe sebep olabilecek hidrojen ihtiva eden herhangi bir oksitten kaçınmak için yeterince kurutmaya dikkat edilmelidir. Bu amaçla durulama sonrası parçaların

40°C sıcaklıktaki su banyosuna daldırılması, ilk bakışta masraflı bir işlem gibi görünse de önleyeceği problemler yönünden iyi bir uygulamadır (Senyen, 2001).

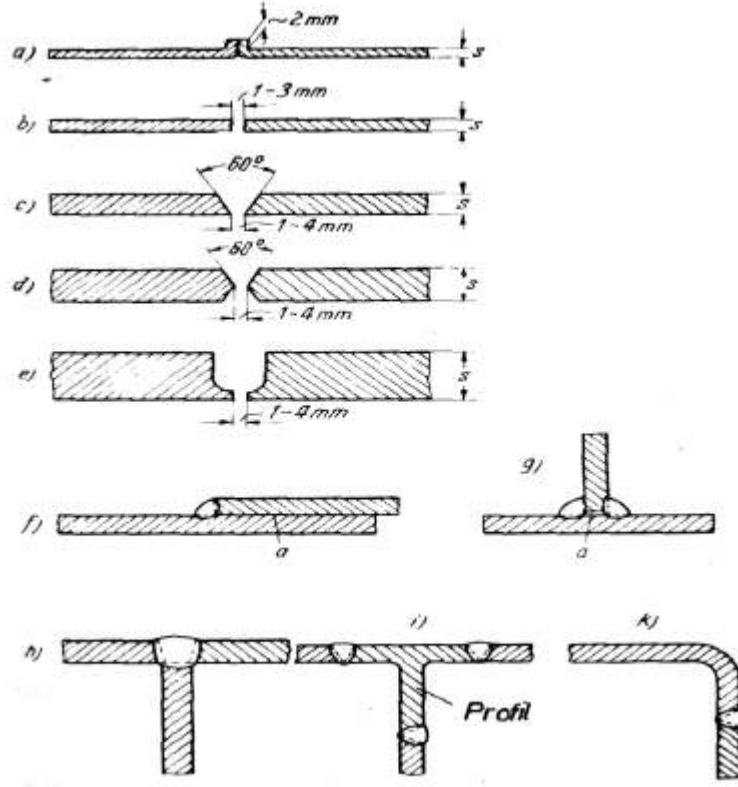
3.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Gaz Kaynağı

Basit ekipmana ve düşük maliyete sahip olması nedeniyle, bazen saf alüminyum ve bazı alüminyum alaşımlarını kaynak yapmak için gaz (oksi-asetilen) kaynağı kullanılmaktadır (Oerlikon, 2006).

Gaz ergitme kaynağı her tür hafif metale uygulanabilir; bunda oksii-asetilen alevi en iyi sonucu verendir. Bununla birlikte hidrojen-oksijen alevi, havagazı oksijeninki gibi, daha düşük alev sıcaklığına haiz olmasıyla, 1 mm' den az kalınlıkta saçlarda saçların delinme tehlikesini azaltır. Ancak H-O alevi, Al-Mg gibi alaşımlarda gözeneğe yol açar, magnezyum alaşımlarında da ergime akışını engelleyen kuvvetli bir oksitlenme oluşturur. Oksii-asetilen alevinin bir başka avantajı da, çok hassas ayarlanabilme kabiliyetidir (Oğuz, 1990).

6 mm ve daha kalın Al levhaların oksii-asetilen kaynağında tam nüfuziyeti sağlamakla çatlamaya karşı önlem olarak ön ısıtma avantajlı olmaktadır. Ön ısıtma sıcaklığı 150- 200°C arasında olup daha yüksek sıcaklıklar, ararılan niteliklerin kaybına ve gereksiz yere genişlemiş bir IEB' ye yol açar (Oğuz, 1990).

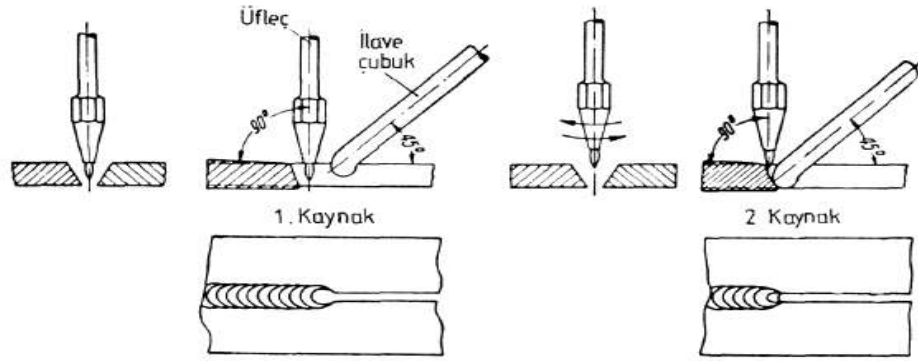
Çeşitli kalınlıklara göre ağız hazırlıkları, Şekil 3.1 'de gösterilmiştir. Hafif metallerin oksii-asetilen kaynağında mümkün olduğu kadar küt alın şekillerine yer verilmelidir (Oğuz, 1990).



Şekil 3.1. Al ve alaşımlarının oksii-asetilen ile kaynağında ağız hazırlık şekilleri. a) $s < 1.5$ mm, b) $s = 1-3$ mm, c) $s = 3-12$ mm, d) $s > 8$ mm, e) $s > 12$ mm (Oğuz'dan, 1990).

Oksii-asetilen alevinin göreceli olarak düşük ısı yoğunluğu ve alüminyumun yüksek ısı iletkenliği kaynak hızını düşürür ve büyük çekmelere neden olur ki bu kaynaklı birleştirmede gerilimler ve deformasyon oluşturur. Isı etkili bölge çok geniştir, soğuk şekil değiştirme veya yaşlandırarak sertleştirilen iş parçalarında ana metal yumuşar ve mekanik mukavemetini kaybeder. Gaz kaynağı için gereken dekapan kaynak ağzının iki yüzeyine ve ilave metale fırça ile uygulanır (Oerlikon, 2006).

Kalın saçlarda kökte emniyetli bir kaynak elde etmek için Griesheim yöntemi adı verilen sola kaynak süreci (Şekil 3.2) önerilir. Hafif salıntı ile ilerletilen üfleç bu yöntemde saçın üst yüzeyine dik tutulur, kaynak teli bu yüzeyle 45° yapar. Kaynak işlemi birbirini sürekli olarak tekrarlayan iki çalışma aşamasıyla olur. Birinci aşamada üfleç kaynak ağzının içinde tutulur, bu suretle ağız daire şeklinde genişler; kaynak teli bu sırada alev alanı içinde sıcak tutulur. Bundan sonra gelen ikinci aşamada üfleç biraz yukarı çekilir ve kaynak teli ergime banyosuna batırılır ve ergitilir (Oğuz, 1990).



Şekil 3.2. Alüminyum ve alaşımlarından kalın saçların oksii-asetilen kaynağı (Oğuz, 1990).

3.2 Alüminyum ve Alaşımlarının Örtülü Elektrot Kaynağı

Bu yöntemle bütün alüminyum türleriyle ısıtım yoluyla sertleşmeyen alaşımları kaynak etmek mümkündür. Yapısal sertleşmeli alaşımlar arasında Al-Si-Mg ve Al-Mg-Si tipi alaşımlar uygun şekilde örtülü elektrotla birleştirilebilirler; ancak dikişe yakın bölgelerde mekanik karakteristikler düşer. Çinko ve magnezyumlu alaşımlar, kaynaktan sonra, herhangi bir işlemi gerektirmeden, mekanik karakteristiklerinin az çok tümüne yeniden sahip olurlar (Oğuz, 1990).

Alüminyumun bu metal-ark kaynağında dikkate alınacak önemli etkenler nem, ön ısıtım, dekapan ve elektrotla iş parçasının temizliğidir. Elektrot örtüsünde nemin varlığı, gözenekliliğin başlıca nedenidir. Sağlam kaynaklar elde etmek için elektrotların kuru, temiz depolanma olanakları bulunacaktır. İş parçasının ön ısıtılması, özellikle kalın parçalarda, gereklidir. Elektrotu kaplayan örtü (dekapan) çok inatçı olup bunun dikiş içinde sıkışıp kalmaması için oldukça beceri gerekir. Kaynaktan sonra bu dekapanın (cürufun) temizlenmesinde gösterilecek özen de önemlidir (Oğuz, 1990).

Alüminyum üzerinde kaynaklı birleştirmelerin tasarımında önemli husus, ani kesit ve kaynak yönü değişmelerinden kaçınmaktır. Bunu sağlamak için bazen birleşecek parçalar arasına ara parçalar koymak kolaylık sağlayabilir. Aynı bağlamda, takviye plakaları, kesitleri düzenli olarak azalacak şekilde kesilirler (Oğuz, 1990).

Alüminyum parçaların 200° C' a ön ısıtılması istenir ve levha kaynağında bu işlem gereklidir. Ön ısıtma, oksii-asetilen üfleci ya da elektriksel dirençle yapılabilir; bu sonuncusu için, küçük parçalarda, bir tungsten elektrot, kaynak pensesinin ucuna gümüşle lehimlenir. Topraklama mengenesi iş parçasına bağlandıktan sonra tungsten elektrottan parçaya intikal edecek akım, onu ısıtacaktır. Yöntem, büyük parçalara uygulanmaz. Genellikle 5 mm' ye kadar saçlar ön ısıtılmaz. Dökümler, kural olarak ön ısıtılır (Oğuz, 1990).

Alüminyumun örtülü çubuk elektrotla kaynağında arkın tutuşturulması, çelikte olanıkinden farklıdır. Hem Al elektrot hem de ana metal az çok derhal ergiyip katılaştıklarından, elektrot yapışması bir sorun olabilmektedir. Bundan kaçınmak için ark, elektrotu ana metalin yüzeyi üzerinde bir fırçalama hareketi yaparak tutuşturulur (Oğuz, 1990).

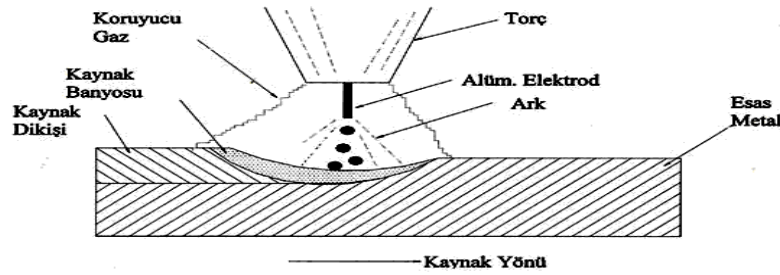
3.3. Alüminyum ve Alaşımlarının MIG Kaynağı

Günümüzde alüminyum konstrüksiyonunda en çok kullanılan kaynak metodu, ergiyen elektrodla bir koruyucu gaz veya gaz karışımı atmosferi altında yapılan MIG (Metal İnerit Gaz) kaynak tekniğidir. Ergiyen elektrod ile yapılan MIG gaz altı kaynağı çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. MIG kaynak yöntemi diğer kaynak yöntemlerine göre, mekanize edilebilme, daha hızlı çalışma, robot kullanma imkanı, 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 bir çok avantajlar sağlamaktadır (Kurşun, 2006). MIG yönteminin bir karakteristiği olan enerjinin verimli kullanılışı, çoğu kez ön ısıtmayı gereksiz kılar. Dolayısıyla süreç kalın Al kesitlerinin kaynağında geniş ölçüde uygulanır (Oğuz, 1990). Bu teknik her kalınlıktaki alüminyum ve alaşımları için uygulanabilir olmasına rağmen genellikle 3 mm'den daha kalın alüminyum ve alaşımlarının kaynağında tercih edilen bir kaynak yöntemidir. Çünkü MIG kaynağında kaynak hızı ve ergime gücü diğer gazaltı kaynak yöntemi olan TIG (tungsten inert gaz) kaynağına göre daha yüksek olduğu için çok ince levhalar ancak darbeleri akım yöntemi uygulanarak kaynak yapılır (Kurşun, 2006).

Alüminyum ve alaşımları 550–660 °C arasındaki sıcaklık aralığında ergimelerine rağmen ısı iletkenliklerinin çok yüksek olması nedeni ile kaynak için gerekli ısı girdisi eş kalınlıktaki çeliğin kaynağından daha fazla olmak zorundadır. Alüminyum ve alaşımlarının ısı genleşme katsayılarının büyük olması, kaynak bölgesinde ısınma ve soğuma sonucu oluşan sıcaklık farkları şiddetli gerilmeler ve büyük çaplı çarpılmaların olmasına neden olur. Alüminyum üzerinde hava ile teması sonucunda oluşan refrakter alüminyum oksit tabakası, alüminyum ve alaşımlarının kaynağını büyük çapta güçleştirir. Doğru akım, ters kutuplama (elektrot pozitif kutupta) ile yapılan kaynakta, banyo üzerinde yüzen oksit tabakası parçalanır ve ancak bu kutuplama ile kaynak gerçekleştirilebilir. Alüminyum ve alaşımlarının MIG kaynağında, malzemenin kalınlığı göz önüne alınmaksızın sprey ark ile kaynak yapmak daima tercih edilir. Sprey 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 görünümlü ve yetersiz ergimeden dolayı tam kaynamamış bölgeler meydana gelir. Kaynak dikişi düz veya dar zikzaklarla çekilmelidir. Geniş zikzaklar kaynak dikişinin aşırı oksitlenmesine neden olduğundan kullanılmamalıdır. 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 parçalara 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 ısı 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 çözeltiyeye alma tavı uygulanır ve kaynak sonrası tekrar ısıl işlem uygulanarak sertleştirilir (Kurşun, 2006).

MIG kaynak yönteminin uygulanması çok basittir. Toprak kablosunu iş parçasına veya kaynak masasına bağlayarak ve üfleç 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 arandılan kaynak yöntemi haline gelmiştir. MIG yöntemindeki ark bölgesi şematik olarak Şekil 3.3’de gösterilmiştir (Kurşun, 2006).



Şekil 3.3. MIG yöntemindeki ark bölgesi (Kurşun, 2006).

Bu yöntemde kaynak arki Şekil 3.3’de de görüldüğü gibi iş parçası ile aynı zamanda ilave metal olan, tükenen tel elektrot arasında oluşur. Alüminyumun MIG kaynağı doğru akım, ters kutuplama (elektrot pozitif kutupta) ile yapılır. Bu kutuplama spreyl damla geçişi olarak adlandırılır ve asal gaz atmosferi (Ar veya He veya Ar/He karışımı) altında korunur. MIG kaynak yöntemi kalın çaplı tel elektrot kullanarak daha kararlı hale getirilebilir. Tel elektrodun düzgün olarak kaynak bölgesine iletilebilmesi için teflon spiral kullanılmalı, kılavuzlar ve tel sürme makaralarının yuvaları U biçimli olmalı, kontak meme daha uzun olmalı ve iç çap toleransının daha fazla olması gerekir.

Çeliklere nazaran alüminyum malzemeleri kaynak yaparken, bu malzemeye özgü bazı özellikler dikkate alınmalıdır. Alüminyum malzemeler, çeliklere göre daha yüksek ısı 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 önlenebilir.

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 (Kurşun, 2006).

Ayrıca alüminyum ve alüminyum alaşımlarının MIG kaynağı için önerilen bazı parametreler Çizelge 3.5' de görülmektedir.

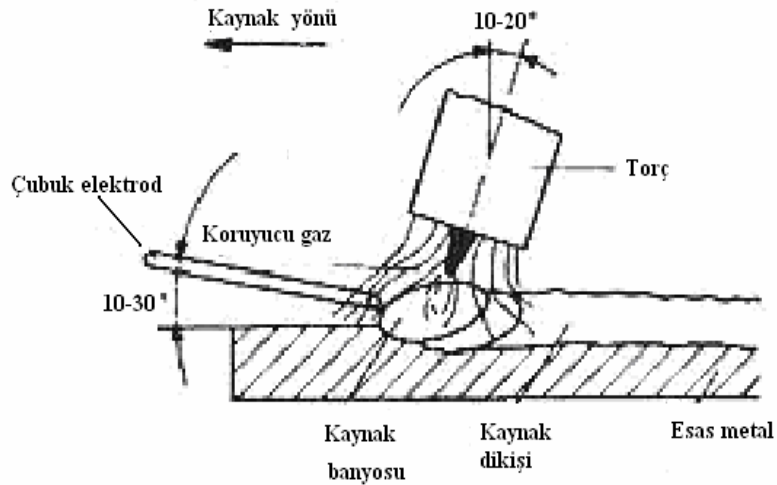
Çizelge 3.5. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının MIG kaynağı için önerilen bazı parametreler (Kurşun, 2006).

Malzeme Kalınlığı (mm)	Ağız Türü	Ağız Aralığı (mm)	Kök Alın Yüksekliği (mm)	Paso sayısı	Kaynak Gerilimi (V)	Kaynak Akımı (A)	Tel İlerleme Hızı (m/dak)	Tel Çapı (mm)	Koruyucu Gaz (lt/dak)
4	I-Alın	0	-	1	23	180	3.2	1.2	12
5	I-Alın	0	-	1	25	200	4.3	1.6	18
5	V-Alın (70°)	0	1.5	1	22	160	5.6	1.6	18
6	I-Alın	0	-	1	26	230	7.1	1.6	18
6	V-Alın (70°)	0	1.5	1	22	170	6.0	1.6	18
8	V-Alın (70°)	0	1.5	2	26	220	6.8	1.6	18
10	V-Alın (60°)	0	2	3	26	220	6.2	1.6	20
					24	200	6.0	1.6	20
					26	230	7.2	1.6	20
12	V-Alın (60°)	0	1.5	3	26	240	13.7	1.2	23
					26	220	12.2	1.2	23
					28	250	15.6	1.2	23
12	V-Alın (60°)	0	1.5	2	27	260	3.6	2.4	25
					27	280	3.9	2.4	25

3.4. Alüminyum ve Alaşımlarının TIG Kaynağı

TIG sembolü, Tungsten Inert Gas kelimelerinin baş harflerinin alınmasıyla oluşturulmuştur (Anık, 1996). TIG kaynak yöntemi; ergitme esaslı buna karşın dolgu oranı düşük bir kaynak yöntemi olmasına karşın ısı girdisi yerel olduğundan ısı iletimi yüksek olan alüminyum ve alaşımlarının kaynağında çarpılmaları en aza indirdiği için tercih edilen bir gazaltı kaynak yöntemidir (Kaluç ve Taban, 2006).

Bu yöntemde kaynak için gerekli olan ısı enerjisi, bir tungsten elektrod ve iş parçası arasında oluşturulan elektrik arkı tarafından sağlanmakta ve kaynak bölgesi de havanın olumsuz etkilerinden elektrod ile merkezlenmiş konumda bulunan bir nozülünden gönderilen bir koruyucu gaz (He veya Ar veya He+ Ar karışımları) ile korunmaktadır (Şekil 3.4) (Kaluç ve Taban, 2006).



Şekil 3.4. TIG kaynak yönteminde ark bölgesi (Kaluç ve Taban, 2006)

TIG kaynağında, doğru ya da alternatif akım kullanılabilir. Fakat alüminyum ve magnezyum alaşımlarının kaynağında alternatif akım kullanılması gerekir (Anık, 1996).

Dövme alüminyum ve alüminyum alaşımlarını kaynak kabiliyetlerine göre şöyle sıralamak mümkündür: çok saf ve saf alüminyum, Al-Mn alaşımları, Al-Mg-Mn alaşımları, Al-Mg alaşımları, Al-Mg-Si alaşımları, Al-Cu-Mg alaşımları, Al-Cu-Ni alaşımları (Anık, 1982).

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 (Anık, 1996).

Alüminyumun TIG kaynağı DADK (doğru akım düz kutup (elektrod —)), DATK (doğru akım ters kutup (elekt. +)) veya alternatif akım (AA) ile yapılabilir. Genellikle DATK çok ince saçlar için, DADK göreceli kalın kesitler ve otomatik üfleç ilerlemesi ve kontrolleri için, AA da ince saç ve hafif levhalar için kullanılır (Oğuz, 1990).

DADK'ta akım, elektrottan iş parçasına gider; ark ısısı yoğunlaşması % 70 iş parçasında, % 30 elektrotta olur. Bu yoğunlaşmanın etkileri, daha küçük elektrotlarla daha yüksek akım şiddetleri kullanma olanağı; ark ısısının ana metal içine dar ve derin nüfuziyeti; kaynak hızının dakikada 12.5 cm ile 36 m arasında olabilmesi şeklinde belirir. Ark stabil olur (Oğuz, 1990).

Ark ve/veya gazın hiçbir temizleme etkisi olmaz; bununla birlikte DADK' la helyum kullanarak memnuniyet verici kaynaklar yapılabilir (akım şiddeti azami 600 A). Otomatik DADK TIG kaynağında bazen argon kullanılır (Oğuz, 1990).

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 (Oerlikon, 2006).

TIG kaynağı ile 1 ila 4 mm arasındaki kalınlıklardaki malzemelerin tek pasolu alın kaynağı veya tek pasolu köşe kaynağı; 12 mm'ye kadar et kalınlığına sahip malzemelerin çift operatör ile aynı anda yukarıdan aşağıya kaynağı yapılabilmektedir. Daha fazla kesit kalınlıklarının TIG yöntemi ile kaynak yapılması, MIG yöntemine kıyasla düşük ısı yoğunluğu nedeniyle ekonomik değildir. Çünkü düşük kaynak hızına sahiptir ve çok pasolu kaynaklarda çok büyük ısı etkili bölge yaratır. TIG

kaynağının çok iyi boşluk doldurma kabiliyeti ve gözenek oluşma riskinin daha düşük olması nedeniyle özellikle kaynağın arkasından kapatma pasosu yapılamayan kalın kesitli malzemelerde, kök pasoların kaynağında kullanılır (ör; boru hattı kaynaklarında), kaynaklı birleştirmedeki diğer pasolar MIG kaynak yöntemi ile yapılır (Oerlikon, 2006).

3.5 Alüminyum ve Alaşımlarının Elektrik Direnç Kaynağı

Direnç kaynağı; iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda basıncın uygulanmasıyla yapılan bir kaynak yöntemidir. Malzemedan geçen elektrik akımının doğurduğu ısının dışında, herhangi bir ısı uygulanmamaktadır. Isı, kaynak edilecek kısımlarda oluşur ve basınç kaynak makinesindeki elektrotlar ya da çeneler aracılığıyla uygulanır (Anık, 1996).

Elektrik direnç kaynağı için gerekli alçak gerilim ve yüksek akım şiddetindeki elektrik gücü, kaynak transformatörlerinden, basınç ise hidrolik ya da mekanik donanımlarla sağlanır (Anık, 1996).

Bazı alüminyum alaşımlarının direnç kaynağı diğerlerine göre daha kolaydır. Genelde diğer kaynak prosesleri ile kaynaklanabilen döküm alaşımları direnç kaynağı ile de kaynaklanabilir. Sürekli döküm ve kum döküm alaşımları başarıyla nokta kaynağı yapılabilirken kalıp dökümlerin bu metotla birleştirilmeleri zordur. Döküm alaşımları kendi kendileriyle, diğer döküm alaşımlarıyla ve dövme alaşımlarla nokta kaynağı ile kaynaklanabilirler (Welding Handbook, 1996).

Bir alüminyum alaşımının temperi onun kaynaklanabilirliğini etkiler. Tavlanmış durumdaki alüminyum alaşımlarının direnç kaynağı derin çentikler, distorsiyon ve artan uç ilerlemesi yüzünden işlem sertleşmesi ve çözültüye alma ısıl işlemi uygulananlardan zordur. Elektrot ömrü ve kaynak tutarlılığı daha sert temperler kaynaklandığında düzelir (Welding Handbook, 1996).

Nokta kaynağı elektrotlar tarafından bir arada tutulan iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdikleri dirençten elde edilen ısı ile parçaların

bölgesel olarak ergitilip basınç altında birleştirilmeleridir. Kaynak dikişinin boyut ve şekli elektrotların boyut ve şekline bağlıdır (Anık, 1996).

Alüminyum ve alüminyum alaşımları yüksek termal ve elektrik iletkenliğe sahiplerdir. Nokta ve dikiş kaynağı yapabilmek için yüksek kaynak akımı değeri ve nispeten kısa kaynak süresi gereklidir. Alüminyum nokta kaynağında teçhizat seçimini etkileyen bir diğer faktör ise kaynak sıcaklığında malzemenin hızla yumuşamasıdır (Welding Handbook, 1970).

Alüminyum levha yapıların imalinde nokta kaynağı pratik bir birleştirme metodudur. Sürekli döküm ve kum döküm alaşımlarda olduğu kadar tüm dövme alaşımlarda da kullanılabilir (Welding Handbook, 1996).

Alüminyumun nokta kaynağı için gerekli olan prosedürler ve ekipman çelikler için kullanılanlarla aynıdır. Bununla beraber, alüminyum alaşımlarının yüksek termal ve elektrik iletkenliği teçhizat ve kaynak planında bazı değişiklikler yapılmasını gerektirir (Welding Handbook, 1996).

Alüminyum AC (alternatif akım) ve DC (doğru akım) kullanılarak kaynaklanabilir. Yüksek kaynak akımı alüminyumun yüksek elektrik iletkenliği yüzünden gereklidir. Sonuç olarak, çelikle aynı kalınlıkta bir malzeme kaynaklandığında gerekli olan birincil enerji miktarı çelik için gerekli olandan daha yüksektir. En yüksek kalite için sürekli veya kesintili DC güç üreten makineler tercih edilmelidir (Welding Handbook, 1996).

Genelde tabaka ayrımı eğilimi daha az ve kaynak mukavemeti sabitliği daha iyi olduğu için yüksek mukavemetli 2024 ve 7075 alaşımlarının kaynağı daha kolaydır. Bununla beraber çatlama ve poroziteye karşı düşük mukavemetli alaşımlara nazaran daha fazla eğilim gösterirler. Gerçekte kaynak metalindeki çekme çatlakları neredeyse tamamen bakır ve çinko bazlı alaşımlar (2024 ve 7075 gibi) ile sınırlıdır (Welding Handbook, 1972).

3.6. Alüminyum ve Alaşımlarının Elektrocüruf Kaynağı

Bu yöntemde kaynak yapılacak bölge, bir döküm kalıbı içine alınır. Ergitilerek dökülen sıvı metal, hem enerji taşıyıcı hem de ilave metal görevi yapar; bu sayede birleşme yüzeyleri gerekli kaynak sıcaklığına ulaşır. Dökülecek malzeme, ergitme ocaklarında veya alümino-termik reaksiyon yardımıyla ergitilir (Anık ve Vural, 1993a).

Elektrocüruf kaynağı taşıyıcı çubuklarda ve uygun duvar kalınlığındaki kazan ve tanklarda alüminyumun kaynağı için kullanılır (Welding Handbook, 1972).

Elektrocüruf prosesi ile yapılan kaynaklarda porozite yoktur ve tam bir ergime sağlanır. Halojen esaslı flaks kaynak süresince ergimiş metalden empüriteleri (özellikle Al_2O_3) temizleyen sürekli bir hareket üretir (Welding Handbook, 1972).

Kaynak; elektrocüruf kaynağında tipik olan dendiritik tane büyümesine sahiptir. Bununla beraber artan soğuma hızı sebebiyle taneler küçüktür (Welding Handbook, 1972).

3.7. Alüminyum ve Alaşımlarının Elektrogaz Kaynağı

Elektrogaz kaynağında elektrocüruf kaynağında olduğu gibi, ergimiş metal banyosu hareketli (kayar) kalıplar (pabuçlar) tarafından yerinde tutulur. Elektrocürufda birleşme yerinin kenarları ve elektrot metali yüksek sıcaklığa getirilmiş bir elektriksel iletken cürufun teması ile ergirken, elektrogazda bu ergime (çeliklerde) CO_2 koruması altında, elektrotla banyo arasında tutuşan ark tarafından sağlanır (Oğuz, 1990).

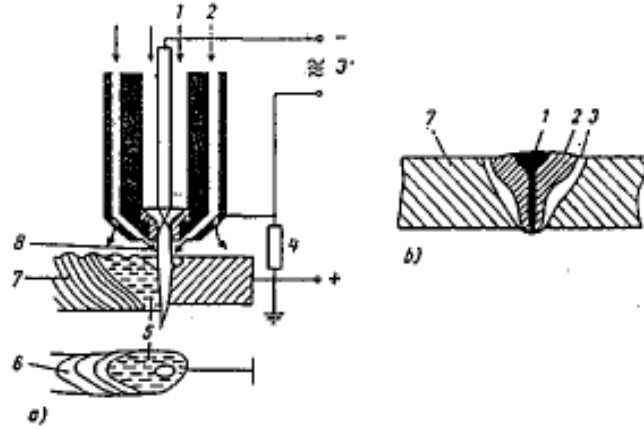
Elektrogaz yönteminin alüminyuma uygulanmasında ilk ve en önemli sorun yukarıda sözü edilen pabuçlar olmuştur. Elektrogaz kaynağının alüminyuma uygulanması, pabuçların katılaştığı alüminyum üzerindeki kısmen sürükleyici etkisiyle kaynakta meydana gelen yırtılma nedeniyle uzun süre mümkün olamamıştır. Ancak bu engelin üstesinden gelinmiş olup 45 mm kalınlıkta 5083-O alüminyum levha üzerinde

1200 mm uzunlukta kaynaklar, 5356, 5556 ve 5183 ilave metal elektrotlarla gerçekleştirilmiştir (Oğuz, 1990).

3.8 Alüminyum ve Alaşımlarının Plazma Kaynağı

Bu kaynak metodunda direk kısa arklı bir plazma üflecinde sıkıştırılmış ve enerji yoğunluğu büyük bir plazma elde edilir. Şekil 3.5' de prensip şeması verilen plazma üflecinde çift gaz kullanılmaktadır. (İçten) verilen gaz, plazma gazı adını alır. Plazma gazı olarak asal gaz, genellikle argon kullanılır. İkinci gaz koruma gazı olup, daha dıştan iş parçası ile üfleç arasına, plazmayı çepeçevre sarar şekilde verilir. Bu gaz genelde Argon ve moleküler bir gaz (H_2 veya N_2) karışımıdır. Burada şekilde görüldüğü gibi plazma iş parçasını bir çivi gibi delip geçer. Kaynak yerinde ergiyen malzeme (kaynak banyosu) plazma ilerledikçe plazmanın arkasında yüzey gerilimi nedeniyle kolayca katılaştır ve böylece belirli kalınlıklarda (2.5-8.0 mm arası) parçaları hiç dolgu malzemesi kullanmadan, tek pasoda kaynatmak mümkün olur (Karadeniz, 1990).

Plazma kaynağına alternatif olabilecek kaynak yöntemi MIG kaynağı olabilir. Şekil 3.5'de elektron ışını, MIG ve plazma kaynağı dikişleri karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Görüldüğü gibi MIG kaynağına göre, plazma kaynağında malzeme daha dar bir bölgede ergimeye uğramaktadır. Bu da gerek kaynakta sarf olunan enerji, gerekse kaynatılan malzemelere kaynak esnasında yapılan olumsuz etki yönünden avantajlıdır (Karadeniz, 1990).



Şekli 3.5. Yüksek güç plazma birleştirme kaynağı prensibi ve kaynak dikişinin alternatif kaynak yöntemleriyle karşılaştırılması a) Prensip (1 Plazma gazı, 2 Koruma gazı, 3 Ateşleme cihazı, 4 Ön direnç, 5 Sıvı metal, 6 Kaynak dikişi üstten görünüşü, 7 Kaynak dikişi enine kesiti, 8 Odaklama gazı) b) Plazma kaynağı dikişi ile elektron ışını ve MIG kaynağı dikişinin karşılaştırılması (1 Elektron ışını kaynağı, 2 Plazma kaynağı, 3 MIG kaynağı) (Karadeniz, 1990)

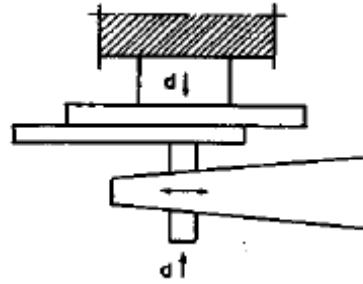
Plazma arkı, metallerin, metal olmayan malzemelerin ve kombinasyonlarının birleştirme ve doldurma kaynağında kullanılır. Plazma ark kaynağı ile alaşımsız, hafif ve yüksek alaşımlı çelikler, nikel ve nikel alaşımları, zirkonyum, bakır ve bakır alaşımları, alüminyum ve alüminyum alaşımları birleştirilebilir (Kaluç, 1993).

Plazma ark kaynağı ark boyutunun su soğutmalı nozül tarafından sınırlandırılması dışında gaz tungsten ark kaynağına benzer. Kaynaktan önce yüzey temizleme gereklidir. Nüfuziyet derinliğinin yüksek oluşu ve yüksek kaynak hızları plazma ark kaynağının gaz tungsten ark kaynağına üstün yönleridir. Kaynak öncesi ana metalin temizlenmesi, temiz dolgu teli ve kaynağın yeterli inert gaz ile korunması kaynak porozitesinin minimuma indirilmesi için gereklidir. 5XXX serisi ve Al-Li alaşımları için tüm kaynak yüzeylerinde inert gaz koruması gerekir (Welding Handbook, 1996).

3.9. Alüminyum ve Alaşımlarının Ultrasonik Kaynağı

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

3.6). Sonotrot tarafından oluşturulan ultrasonik titreşimler, yüzeye paralel olarak üstteki parçaya iletilir ve temas yüzeylerinde yani alt ve üst kaynak yerinde bağıl bir harekete neden olur. Ultrasonik dikiş kaynağında bindirilen saclar dönen tekerlek şeklindeki sonotrotlar tarafından senkronize çalıştırılan altlık makaralarına bastırılır. Tekerlek şeklindeki sonotrotların levha titreşimleri üstteki iş parçasına iletilir (Anık, 1996).



Şekil 3.6. Ultrasonik kaynağın şematik olarak gösterilişi (Anık, 1996).

Ultrasonik kaynak yöntemi alüminyum ve alaşımları, bakır ve alaşımları, plastik malzemeler, cam ve beton gibi malzemenin kaynağında kullanılmaktadır. Ayrıca, alüminyum ile seramik ya da camın kaynağı gibi farklı malzemelerin birleştirilmesinde başarı ile uygulanmaktadır (Anık, 1996).

İş parçalarına düşük kenetlenme basıncı altında bir arada tutulduklarında yüksek frekanslı, düşük genlikli titreşimli hareketin bölgesel uygulanması ile yapılmaktadır. Proses folyo ve levha şeklindeki alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde ve de ince tellerin levha veya folyolara birleştirilmesinde kullanılır (Welding Handbook, 1996).

Tüm alüminyum alaşımları ultrasonik kaynakla kaynaklanabilir fakat kaynaklanabilirliğin derecesi alaşım ve temper durumuna göre değişir. Alüminyum alaşımları diğer metallerle bu proses ile birleştirilebilir (Welding Handbook, 1996).

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 (Welding Handbook, 1996).

3.10. Alüminyum ve Alaşımlarının Patlama Kaynağı

Prensip bakımından soğuk basınç kaynağına benzer. Her iki yöntemde de dikey bir basınç kuvveti, teğetsel bir yükleme ile kombine şekilde etki eder. Bu, yüzeydeki oksit tabakasının yırtılmasına ve yüzeyin büyümesine neden olur (Anık, 1996).

Gerekli yüksek basınç, işlem gören parçalardan patlayıcı madde ile yüklü birinin patlaması ile diğerine karşı 2° ile 25° lik bir açı altında ve 100 ile 1000 m/sn hıza kadar hızlanması koşuluyla ortaya çıkar. Bu sırada çarpma basıncı 10 ile 100 k bar a kadar çıkar (Anık, 1996).

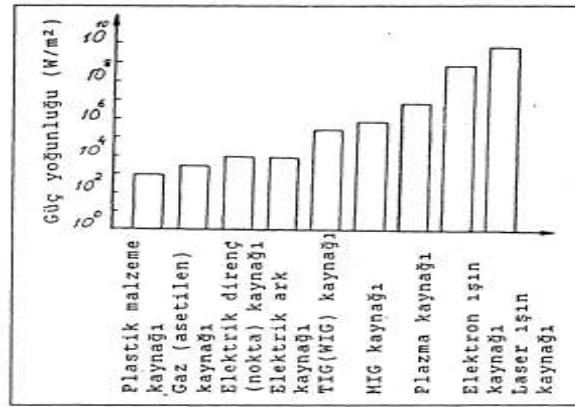
Temizlenen yüzeyler bir kaç mm gibi yeterli bir aralık bırakılarak karşı karşıya (üst üste) getirilir. Aralıklar dalgalı metal şeritler ya da tellerle sağlanır. Bunlar sonra birlikte kaynak edilir. Birleştirilecek tabakaların üst yüzeyine ince bir koruyucu plastik tabakası ve bunun üzerine de patlayıcı madde yerleştirilir. Patlayıcı tutuşturulunca yüksek basınç ve hızla (1200 ile 7000 m/sn) patlama olur ve üstteki sac alttakine kaynak edilir (Anık, 1996).

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 (Welding Handbook, 1996).

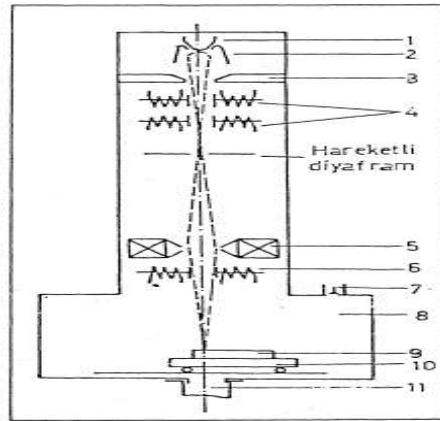
3.11. Alüminyum ve Alaşımlarının Elektron Işın Kaynağı

Elektron ışını ile sağlanan ısının ya da gücün yoğunluğu, klasik kaynak yöntemlerinden yüksektir. Elektron ışınlarının güç yoğunluğu, yaklaşık 108 W/cm^2 dir.

Bu güç yoğunluğu ile tabancadan 1 m uzaklıklara kadar çalışma mümkündür (Anık, 1996). Isı membaı olarak elektron ışınının en önemli üstünlüğü, Şekil 3.7' den de görülebileceği gibi gaz alevi ve elektrik arkına karşılık, kaynak yerinde 10.000 misli daha yüksek bir ısı konsantrasyonunun elde edilmesidir (Anık ve Vural, 1993b). Elektrik ark kaynağında yüzeye bırakılan ısı, yarım daire şeklinde bir bölgeye yayılırken, elektron ışının yüksek ısı yoğunluğu nedeniyle parçanın derinliklerine giren kanal şeklinde bir ısı dağılımı ortaya çıkar. Elektron ışını ile kaynak makinesinin yapısı, şematik olarak Şekil 3.8' de görülmektedir (Anık ve Vural, 1993b).



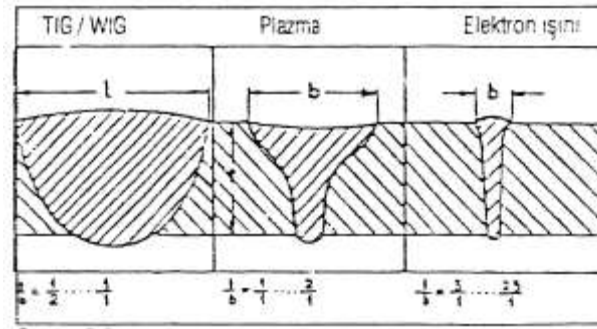
Şekil 3.7. Kaynak ısı membaının güç yoğunluğu (Anık ve Vural, 1993b)



Şekil 3.8. Elektron ışını ile kaynak makinesinin şematik yapısı 1-Katot, 2-Wehnelt silindiri, 3-Anod, 4-Ayar bobinleri, 5- Magnetik mercek, 6- Saptırma bobinleri, 7- Hava girişi, 8-Kaynak hücresi, 9- İş parçası, 10- Hareketli masa, 11- Vakum flanşı (Anık ve Vural, 1993b).

Arkın, plazma taneciklerinin enerjisi, yalnızca iş parçasının yüzeyinde bıraktığı ve bununla birlikte iç bölgelerin ısıtılmasında her yönden gelişen bir ısı dağılımına ayrıldığı için yarım daire şeklinde bir erime bölgesi oluşur. Elektron bombardımanı altında, kaynak yerinin kuvvetli bir şekilde ısınmasıyla etkili olan yüksek buhar basma, eriyikte, elektronların enerjisini bırakmadan önce, iş parçasının derinliklerine kadar nüfuz edebildikleri bir kanalın oluşumunu sağlar (Anık ve Vural, 1993b).

Oluşan ergime bölgesinin derinliğinin, ortalama genişliğe oranı: 25/1' e kadar olan bir kamanın şekline sahiptir (Şekil 3.9) (Anık ve Vural, 1993b).



Şekil 3.9. TIG, plazma ve elektron ışını ile yapılan kaynaklarda erime bölgesi formunun karşılaştırılması (Anık ve Vural, 1993b).

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

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

Diğer yöntemlerde olduğu gibi, elektron ışını ile kaynakta kaynak yerinin kimyasal olarak saflığını bozacak hiçbir işlem oluşmaz. Bu nedenle kaynak metalinin bileşimi esas metalinkiyle aynıdır ve bir homojenlik sağlanmış olur (Anık, 1996).

Elektron ışını ile yapılan bağlantının metalurjik özellikleri üzerinde aşağıdaki faktörlerin etkisi vardır:

- a) Çok hızlı ısınma ve soğuma çevrimi,
- b) Metal, ergime bölgesinde kısmen buhar haline geçer,
- c) Ergimiş banyoda gaz absorpsiyonu ya da etkisi yoktur (oksidasyon gibi).

Elektron ışını ile kaynakta yüksek ısı konsantrasyonu nedeniyle, yüksek ergime noktalı malzemelerin (tungsten gibi) kaynağı kolayca yapılabilir. Hızlı soğuma nedeniyle ergimiş metalde tane irileşmesi önlenmiş olur. Fakat bu durum, dönüşmeyle sertleşen malzemelerde sertleşmeye neden olur.

Elektron ışını ile kaynakta derin bir giriş elde edilebildiğinden T-birleştirmelerde yatay levha tarafından kaynak yapmak mümkündür (Anık, 1996).

Birçok alüminyum alaşımı elektron ışını ile kaynaklanabilir, 2XXX, 6XXX ve 7XXX gibi bazı ısıl işlem görebilen alaşımlarda çatlama görülebilir. Dolgu metali ilavesi kaynak çatlağını önleyebilir.

Alüminyum alaşımları düşük ya da yüksek voltajlı elektron ışın kaynağı teçhizatları ile kaynaklanabilir. Elektron ışın kaynağı makineleri 60 tan 175 kV' a ve 100 KW değerlerine kadar bulunmaktadır. Teçhizat seçimi ve prosedür alaşıma, malzeme kalınlığına, birleştirme geometrisine ve servis şartlarına bağlıdır (Welding Handbook, 1996).

Alaşım elementlerinin kaybı genellikle akma mukavemetinde önemli bir azalmayla sonuçlanmaz fakat bu her uygulama için belirlenmelidir. Isıl işleme tabi tutulamayan alüminyum alaşımlarının (1XXX, 3XXX ve 5XXX) elektron ışın kaynağı tüm gaz tungsten ark kaynaklarının özelliklerine eşit ya da daha iyidir ve birleşmenin

akma mukavemeti verimliliği % 100 dür. Bazı alüminyum alaşımlarının elektron ışın kaynağının tipik özellikleri Çizelge 3.6' da verilmiştir (Welding Handbook, 1996).

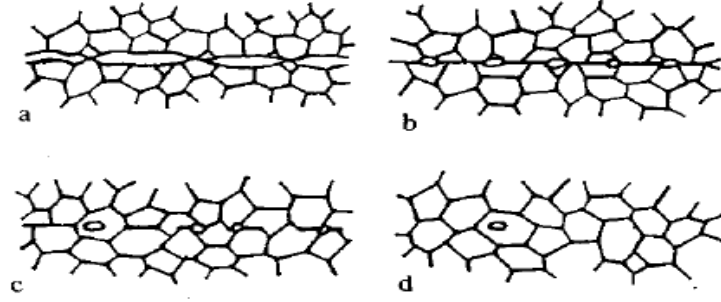
Çizelge 3.6. Elektron ışın kaynağı yapılmış alüminyumun ile ana metal özelliklerinin karşılaştırılması (Welding Handbook, 1996)

Ana Metal	Numune	Ortalama Çekme Mukavemeti	Ortalama Akma Mukavemeti
		MPa	MPa
<u>Isıl işlem görmeyen alaşımlar</u>			
5083-O	BM	290	145
	AW	261	149
	AW	252	145
5456-H321	BM	317	228
	AW	310	265
2219-T87	BM	476	379
	AW	317	228
6061-T6	BM	310	276
	AW	238	199
	AW	210	154
7039-T64	BM	418	356
	AW	298	256
	WHT	309	305
7039-O	BM	228	113
	AW	227	116
7075-T6	BM	524	462
	AW	348	299
	WHT	483	416

BM: ana malzeme, AW: kaynaklanmış numune, WHT: Isıl işlem uygulanıp kaynaklandıktan sonra yeniden ısıl işlem uygulanmış numune

3.12 Alüminyum ve Alaşımlarının Difüzyon Kaynağı

Difüzyon kaynak mekanizması ile ilgili günümüze kadar birçok model sunulmakla beraber genelde üç aşamalı mekanizma kabul görmüştür. Bu üç aşamalı mekanizma Şekil 3.10 'da gösterilmiştir (Kurt, 1997).



Şekil 3.10. Difüzyon kaynağının üç aşamalı mekanizması a. Yüzey pürüzlerinin başlangıç teması b. Birinci aşama deformasyon ve sınır bağ düzeni c. İkinci aşama tane sınırı göçü ve gözeneklerin yok edilmesi d. Üçüncü aşama hacim difüzyonu ve gözeneklerin elimine edilişi (Kurt, 1997).

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

Üçüncü aşama, birleşmenin ve birleştirilecek parçalar arasındaki atomik bağın tamamlandığı aşamadır. İkinci aşama sonunda tane sınırlarından yok edilemeyen tane içine taşınan gözenekler bu aşamada hacim difüzyonu ile büyük oranda yok edilir. Yok edilemeyen gözenek miktarının oranı kaynak sıcaklığı ile ilişkilidir (Kurt, 1997).

Difüzyon kaynağı sıcaklık, basınç, yüzey pürüzlülüğü, kaynak atmosferi ve zamanın tesiri altındadır (Kurt, 1997). Kaynak genellikle, düşük basınç, yüksek sıcaklık ve diğer katı faz kaynak yöntemlerine göre daha uzun sürede yapılır. Yöntemi etkileyen

bu üç ana değişkenin yanında, birleştirilecek parçaların yüzey temizliği, metalürjik etkenler ve bir ara tabakanın kullanılmasının da göz önünde tutulması gereklidir (Anık, 1996).

Katı hal birleştirme tekniklerinden biri olan difüzyon kaynağı bu özellikleri sağlamanın yanı sıra ergime sıcaklıkları farklı metallerin ve metal/metal olmayan malzemelerin (metal/seramik gibi) birleştirilmelerini mümkün kılan bir birleştirme tekniğidir. Ayrıca birleşme alanının zamandan bağımsızlığı ayrı bir avantajdır. Kaynak için uygun şartlar sağlandığında birleşme bölgesinin mukavemeti malzemenin mukavemetine yakın değer vermektedir (Kurt, 1997).

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 (Welding Handbook, 1996).

3.13 Alüminyum ve Alaşımlarının Yakma Kaynağı

Yakma alın kaynağında kaynak edilecek parçalar, çeneler aracılığıyla sıkıştırılır. Bu çeneler kaynak makinesinin sekonderiyle bağlantılı olup kaynak akımının sürekliliğini sağlarlar. Kaynak işlemi aşağıdaki şekilde yapılır (Anık):

- Parçalar birbiri ile temas etmeden, çeneler arasına sıkıştırılır.
- Transformatöre, dolayısıyla parçalara akım uygulanır.
- Hareketli tabla yavaş yavaş hareket eder.
- Tabla hareketinin devamıyla parçalar birbiriyle temas eder ve sekonder elektrik devresi kapanır.
- Parçaların temas noktalarında kıvılcımlar çıkarak ergitme başlar. Böylece parçaların alınları kaynak sıcaklığına ulaşır.
- Tablanın ani hareketiyle birbirlerine temas eden alınlarda kaynama oluşur.

Tüm alüminyum alaşımları yakma kaynak prosesi ile birleştirilebilir. Bu proses özellikle benzer kesitli iki parçanın alın ve köşe birleştirmelerinin yapılması için tasarlanmıştır. Yakma kaynağı alüminyumla bakırın birleştirilmesinde kullanılabilir (Welding Handbook, 1996). Alüminyum alaşımı çubuk ve borular, bakır çubuk ve borular ile yakma kaynağı ile birleştirilebilirler (Metals Handbook, 1971).

Alüminyum alaşımlarının yakma kaynağında kullanılan kaynak makineleri çeliklerin yakma kaynağında kullanılanlara göre daha büyük transformatör kapasitesi gerektirir (Metals Handbook, 1971).

Yakma kaynaklı birleştirmelerden iyi mekanik özellikler elde edilir ve bağlantı verimliliğinin en az % 80 i kolayca elde edilebilir. Alaşımın sert temperlerinde mukavemet genellikle yüksektir. Yakma, kaynağından sonraki ısıl işlem birleşme verimliliğinde önemsiz bir artış sağlayabilir (Welding Handbook, 1996).

3.14 Alüminyum ve Alaşımlarının Lazer Işın Kaynağı

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

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

Enerji göndermenin ve zamana bağlı kumandanın basitliği nedeniyle hemen hemen bütün malzemelerin birbirleriyle kaynak edilebilmeleri, iyi bir şekilde otomatize edilebilir oluşu, iş parçasının üzerine hiçbir kuvvetin etkisinin olmayışı, atmosferde

çalışma olanağı oluşu, hiçbir takım aşınması olmayışı, büyük çalışma aralıkları olanağının varlığı, ısının etkisi altındaki bölgelerin darlığı ve zor ulaşılan yerlerde kaynak yapma olanağı lazer kaynağının üstünlükleridir (Amık, 1996).

Alüminyum alaşımlarının kaynağında toplam ısı girdisinin azalması yararlı etki yapmaktadır. Neredeyse tüm endüstriyel alüminyum alaşımları çökelme sertleşmesi ya da deformasyon sertleşmesi ile sertleştirilmektedir. Ark kaynağı süresince, IEB (ısı etkili bölge) da ulaşılan sıcaklık; çökelme sertleşmeli alaşımlarda bölgesel aşırı yaşlanma veya deformasyon sertleşmeli alaşımlarda bölgesel yumuşama olması için yeterlidir. Bu aşırı yaşlanmanın veya yumuşamanın etkisiyle ana metal özelliklerine kıyasla IEB' in mekanik özelliklerinin bozulmasına sebep olur. Bu bozulma önemli olabilir. Ark kaynağı uygulanmış yüksek mukavemetli 2XXX serisi alaşımlarda mekanik özelliklerin % 50 ye kadar düşüşü sık görülür (Welding Handbook, 1996).

Ark kaynağıyla kıyaslandığında lazer ışın kaynağında görülen daha dar kaynak ve IEB daha az yaşlanmış ya da yumuşamış metal hacmiyle sonuçlanır. Bu aynı kalınlıktaki ark kaynağına göre lazer ışın kaynağının enine çekme testlerinde daha yüksek akma ve çekme mukavemeti göstermesiyle sonuçlanır. IEB' nin çok dar oluşu da bir dezavantajdır, mekanik özelliklerdeki uyumsuzluk (yani, kuvvetli ana metale kıyasla daha zayıf IEB) aşırı şekilde bölgeseldir. Sonuç olarak, lazer ışın kaynağının enine çekme testi tipik olarak kaynak veya IEB de sünekliğin olmamasından değil ama tüm deformasyonların IEB de meydana gelmesinden dolayı düşük uzama gösterir. Bu; parçalar lazer ışın kaynağı ile birleştirildiğinde problem olur. Kopma IEB da meydana gelir. Lazer ışın kaynağının darbe ve yorulma özelliklerinde deformasyonun bölgeselleşmesi zıt bir etkiye sebep olur (Welding Handbook, 1996).

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

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

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

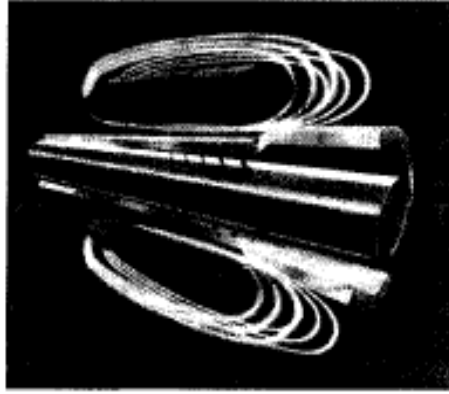
Bu zorluklar alüminyumun diğer yapısal malzemelere göre lazer ışını ile kaynaklanmasını zorlaştırır. Bu zorluklara rağmen uzay endüstrisinde birçok uygulamada 2XXX ve 6XXX serisi alaşımlar başarıyla kaynaklanmaktadır. Otomotiv endüstrisinde de ince 2XXX ve 5XXX alaşım serisi levhalar başarıyla kaynaklanmaktadır. Alüminyum alaşımlarının lazer ışın kaynağı uygulamaları daha fazla ekipman ve proses gelişimi gerektirmesine rağmen lazer ışın kaynağının alüminyum alaşımları için kullanımı giderek artmaktadır (Welding Handbook, 1996).

3.15. Alüminyum ve Alaşımlarının Manyetik Puls Kaynağı

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

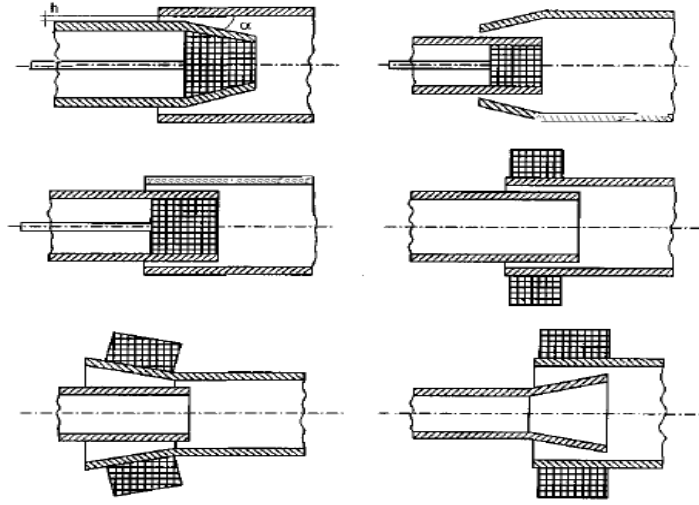
Bu yöntemde, paralel veya aralarında belli bir açı olan iki metal sac sargı arasına yerleştirilmektedir (Şekil 3.11). Sargıdan yüksek akım geçirilerek iki manyetik alan oluşturulmaktadır. İki manyetik alanın birbirini itme kuvvetinden dolayı saclar uygulanan akımın karesi ile orantılı yüksek bir hızda birbirlerine çarpmaktadır. Yüksek hızdaki bu çarpma dolayısıyla plastik deformasyona uğrayan saclar kaynak olmaktadır. Bu yöntem ile iki parçanın kaynak edilebilmesi için, iki parçanın iletken olması ve yüksek hızda birbirine çarpması ve bu çarpma esnasında iki yüzeyin atomik temasının

sağlanması gerekmektedir. Bu kaynak yönteminde elde edilen çarpma hızı, manyetik basınca, hızlandırılan malzemenin kütleğine, malzeme özelliklerine ve kaynak yapılacak parçalar arasındaki mesafeye bağlıdır.



Şekil 3.11. Manyetik puls kaynağının şematik gösterimi (Çam, 2001)

Bu yöntem ile boru tipi parçaların bindirme kaynağını yapmak mümkün olup, şu anda birleştirilebilen boru geometrileri silindirik, eliptik ve kare kesitlidir. Şekil 3.12 bu yöntemin farklı uygulamalarını şematik olarak göstermektedir. Bu yöntemin en önemli avantajı, diğer kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri mümkün olmayan Al-alaşımı parçaların birbiri ile veya diğer malzemelerden imal edilmiş parçalar ile kaynak edilebilmesidir. Elde edilen kaynak kalitesi oldukça yüksek olup, bu yöntemle elde edilen kaynaklarda kaynak bölgesi kesitinin daha büyük olmasından dolayı hasar kaynak bölgesi dışında olmaktadır. Bu kaynak metodu ile birleştirilmesi mümkün malzeme kombinasyonlarına örnek olarak Al-Al, Al-Mg, Al-paslanmaz çelik, Al-çelik, Al-pirinç ve Al-Cu verilebilir. Bu kombinasyonlara ilaveten diğer bazı malzeme kombinasyonlarında da bu yöntem kullanılabilir. Bu yöntem ile birleştirilen parçalarda, patlamalı kaynaktakine benzer bir kaynak bölgesi elde edilmektedir (Çam, 2001).



Şekil 3.12. Boru tipi parçaların bindirme kaynağında çeşitli manyetik puls kaynağı uygulamalarının şematik olarak gösterilmesi. (h: kaynak yapılacak parçalar arası mesafe) (Çam, 2001).

Bu metodun diğer geleneksel kaynak yöntemlerine olan üstünlükleri şunlardır: i) kaynak hızı oldukça yüksektir, ii) kaynak edilen malzemelerin ısıdan etkilenmesi dolayısıyla mekanik özelliklerdeki kayıp minimumdur, iii) patlamalı kaynaktaki basınç seviyeleri bu yöntemde oldukça hafif ve küçük ekipman ile elde edilebilmektedir, iv) minimum yüzey hazırlama ve ilave tel kullanılmadan farklı malzemeleri kaynak yapmak mümkündür, ve v) temiz ve çevreci bir kaynak metodudur.

3.16 Alüminyum ve Alaşımlarının Soğuk Basınç Kaynağı

Soğuk basınç kaynağı oda sıcaklığında ya da hafif sıcaklık uygulayarak basınç altında katı halde parçaları birbirine birleştirmektir. Parçaların en düşük yeniden kristalleşme sıcaklığı, en yüksek sınır sıcaklık olarak alınır. Metallerin yüzeyi çevre koşullarında her zaman yağ, oksit, sülfür ya da gaz gibi bir tabaka ile kaplandığından, bu tabakanın kaynak işleminden önce temizlenmesi gerekir ve kaynak sırasında uygulanan basınçla şekil değiştirmelidir (Anık, 1996).

Soğuk kaynak ısı girdisi olmadan gerçekleşir. Kaynaklanacak iki parçaya önemli miktarda plastik deformasyonla sonuçlanan bir dış basınç uygulanır. Soğuk

kaynak için temel gereksinim metallere en az birinin sünekliğinin yüksek olması ve soğuk işlem sertleşmesinin önemli derecede olmamasıdır. Tüm alın ve bindirme birleştirmeler soğuk kaynakla kaynaklanabilir (Welding Handbook, 1996).

Yöntemin önemli değişkenleri, işlem öncesi yüzey hazırlama, deformasyon, kaynaklanacak malzeme veya malzeme çiftlerinin özellikleri ve basınçtır. Kaynak öncesi yüzey işlemleri çok önemlidir. Yaygın olarak kullanılan yöntem, metal yüzeylerinin yağdan temizlenmesi ve tel fırça ile fırçalanmasıdır. Bu mekanik yöntem olup ayrıca ısı ve kimyasal işlemler de vardır (Ünal ve Altan, 1989).

Sayılanlar arasında deformasyon en önemli kaynak parametresidir. Her bir metalin soğuk basınç kaynağında bağ oluşumu için minimum bir deformasyon-yüzey yayılması veya redüksiyon değeri bulunmaktadır. Al-Al birleştirmelerinde bu eşik deformasyon değeri %40-%55-60 kabul edilmekte, alüminyumun kaynak öncesi gördüğü işlem, kalınlık, birleştirmenin şekli ve yüzey hazırlanmasında bu eşik değerini doğrudan etkilemektedir (Ünal ve Altan, 1989).

Isıdan etkili bölge olmadığı için alın birleştirme kaynak ana malzemeyle aynı ya da yakın derecede sağlamdır. Birçok alüminyum alaşımı çatlak hassasiyetleri yüzünden ark kaynağı ile kaynaklanamazken soğuk kaynak ile başarıyla kaynaklanabilir. Örneğin alın kaynaklı 2024 ve 7075 alaşımları başarıyla soğuk kaynak yapılabilir fakat bindirme kaynağı yapılamaz (Welding Handbook, 1996).

Alın ve köşe birleştirmeler tel, çubuk, boru ve basit ekstrüzyon şekillerindeki alüminyum malzemelere yapılabilirken; bindirme birleştirmelerin kaynağı levha malzemelere yapılabilir. Bindirme birleştirmelerin kaynağında kaynak bölgesinde kalınlıkta yaklaşık %70 azalma gerektirir ve sadece düşük mukavemetli 1XXX ve 3XXX serisi alaşımlar için pratiktir. Bu kaynak iyi kayma mukavemeti sağlar fakat eğme tipi bir yüklemeye maruz kalındığında iyi bir performans göstermez (Welding Handbook, 1996).

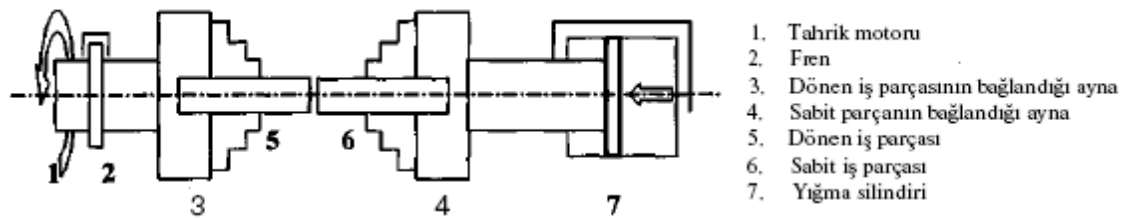
3.17. Alüminyum ve Alaşımlarının Sürtünme Kaynağı

Sürtünme kaynak yöntemi, özellikle malzeme ve enerji tasarrufu sağlaması bakımından 1950 yılından sonra kendisine özel kaynak yöntemleri içerisinde yer bulmuştur. Sürtünme kaynağı, dışarıdan hiçbir mekanik enerji veya ısı kullanılmadan parçaların sürtünmeden oluşan mekanik enerjiyi, termal enerjiye dönüştürmesiyle parçaların birleştirilmesi olarak tanımlanabilir. Sürtünme kaynağında parametrelerin belirlenmesi büyük önem kazanmaktadır. Bu kaynak türündeki en önemli parametreler; sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığma süresi, yığma basıncı ve devir sayısı olarak sayılabilir. Parçalar kaynak edilirken birleştirilecek parçaların yüzeylerinin de yağ ve oksitten arındırılması kaynak yapılırken olumlu bir işlem olacaktır.

Sürtünme kaynak yöntemi genel olarak;

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

Klasik (Sürekli Tahrikli) sürtünme kaynağında (Şekil 3.13); birleştirilecek parçalardan biri eksenel yönde döndürülürken diğeri ise aksel yönden hareketli olarak dönen parçaya belirli bir süre bastırılmaktadır. Sürtünen yüzeylerde yeterli sıcaklığa erişilince dönme işlemi ani olarak durdurulurken basınç artırılmakta ve yumuşak malzeme bu yüksek basınç altında soğumaya bırakılmaktadır. Açıklamadan da anlaşılacağı gibi basınç iki kademeli olarak uygulanmaktadır. Basıncın birinci kademesine "Isınma veya Sürtünme Basıncı" ve ikinci kademesine de "Yığma veya Dövme Basıncı" denir (Akata vd., 2003).



Şekil 3.13. Sürekli tahrikle sürtünme kaynağı (Akata vd., 2003).

Volanlı (Atalet) sürtünme kaynağında; bir volandaki kinetik enerjiden yararlanır. Volan, işlemde önce belli bir devir sayısına getirilerek tahrik motoru devreden çıkarılır. Birleştirilecek parçaların birbirine bastırılmasıyla sürtünen yüzeyler ısınır ve kaynak edilir. Volan ise gittikçe artan bir şekilde yavaşlar ve durur. Ancak bundan sonra basınç ve sıcaklık azalmaya başlar ve moment ile devir sayısı birlikte sifira erişir. Boy kısalması ise eriştiği değerde kalır. Burada dövme zamanı yoktur. Bu nedenle volanlı sürtünme kaynağı işlemi daha kısa zamanda gerçekleşmektedir (Akata vd., 2003).

Birçok metelsel malzeme ve kombinasyonunun sürtünme kaynağı için, uygulamalar ve deneylerden elde edilmiş verileri mevcuttur. Sürtünme kaynağının özelliği, ergitme kaynağı yöntemlerinin uygulanamadığı malzeme ve malzeme kombinasyonlarında da başarıyla kullanılmasıdır. Diğer kaynak yöntemleri için kaynağa uygunluğu belirleyen kriterler, sürtünme kaynağı için her zaman kullanılamaz. Bunun nedeni, birleştirme sıcaklığının düşük, kaynak süresinin kısa ve birleştirmenin bir kuvvet altında yapılmasıdır. Buna örnek olarak çeliğin (alaşımli veya alaşimsız) alüminyum ve bakır ile, toz metalürjisi ile üretilen parçaların ve seramiklerin (Al_2O_3 , ZrO_2) alüminyum ile, sert ve ağır metallerin diğer metallerle sürtünme kaynağı gösterilebilir (Anık ve Vural, 1993a).

Çatlak hassasiyeti yüzünden ark kaynağı ile kaynaklanamayan 7XXX serisi alaşımlar da dahil olmak üzere neredeyse tüm alüminyum alaşımları sürtünme kaynağı ile kaynaklanabilir. Sürtünme ısı ile yumuşayan metal kaynak bölgesinden uzaklaştırılır ve yüksek mukavemetli ısıl işlem görebilen alüminyum alaşımlarında bile birleşmenin mukavemeti esas metalinkine yaklaşır. Kontak yüzeyindeki alüminyum oksit kırılır ve birleşmeden uzaklaşır. Kaynak öncesi temizleme diğer kaynak proseslerinde olduğu kadar kritik değildir (Welding Handbook, 1996).

Tüm malzeme kombinasyonları için mümkün olmamasına rağmen alüminyum alaşımları birçok başka metal ile sürtünme kaynağı ile kolayca birleştirilebilir. Elektrik endüstrisinde kullanılan alüminyumun bakır alaşımları ile kaynağı ve boru sistemleri ve

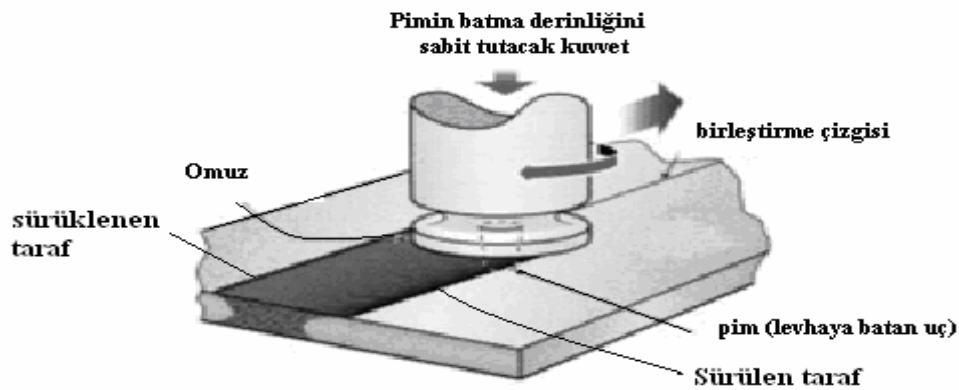
basınçlı kapların geçiş bağlantılarında kullanılan alüminyumun paslanmaz çeliklerle kaynağı en yaygın iki kaynak kombinasyonudur (Welding Handbook, 1996).

4. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, sürtünme kaynağından türetilmiştir. Kaynak edilen parçalar ergimezler bu yüzden yöntem katı faz kaynağı olarak adlandırılır. Bu kaynak yöntemi alın altına sabitlenmiş iki levhaya yüksek devirde dönen omuzlu bir pimin daldırılarak kaynak yapılmak istenen uzunluk boyunca belirli bir hızda ilerletilmesinden ibarettir (Özsoy ve Kaluç, 2002).

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin Al-alaşımalarında kullanılabilirliği üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır (Çam, 2003a; Şık ve Kayabaş, 2003). Bu araştırma sonuçları göstermektedir ki, bu yöntem gerek yaşlandırma sertleştirme yapılmış gerekse yaşlandırma sertleştirme yapılamayan (lxxx ve 5xxx serileri gibi ısıl işleme duyarlı olmayan) Al-alaşımalarında başarı ile 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 (Çam, 2001).

Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi Şekil 4.1' de verilmiştir. Yöntem, 1970'li yıllarda İngiltere'de The Welding Institute adlı kurumda geliştirilip 1990'lı yıllarda patentlenmiştir. Bu katı hal kaynak yönteminde birleştirme, sürtünme ile açığa çıkan ısının hamur kıvamına getirdiği malzemenin plastik akışı sayesinde gerçekleşmektedir (Çam, 2003b).



Şekil 4.1. Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi (Çam, 2005).

Kaynak edilecek parçalar öncelikle sabit bir yüzey üzerine yerleştirilir. Yöntemin uygulama aşaması iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Tablanın, dolayısıyla parçaların hareketi söz konusu olabileceği gibi, takımın dönme ve ilerleme hareketi yapması olanağı da vardır. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde kullanılan takımın hızı oldukça yüksektir ve iki metal alaşım arasında bağ oluşturmak yani kaynak yapmak için gerekli ısı, bu yüksek hız sırasında sürtünmeden dolayı oluşur ve takımın uç kısmı karıştırma görevini görürken, omuz kısmı baskı uygular, böylece kaynaklı birleştirme ortaya çıkar. Yöntemde değişik tasarımlarda, tükenmeyen ve yüksek sıcaklıklarda üstün özelliklere sahip malzemelerden üretilen takımlar kullanılır. Esas olarak, karıştırıcı uç denilen takımın uç kısmı, alın yüzeyleri birbirine dayandırılan (bitişik hale getirilen) iş parçalarının içine daldırılır ve takım dönerken sürtünmeden dolayı ısı oluşur. Bu ısı, takım ucunun daldırıldığı yerde ve iş parçası ile takımın omuz kısmının arasında kalan ara yüzeyde, plastik şekil değiştirmeye yatkın yumuşak bir bölge oluşturur. Takımın omuz kısmı, iş parçasının üst kısmından belirli bir baskı uygulayarak ek bir sürtünme oluşturur ve kaynak bölgesinden plastik şekil değiştiren malzemenin uzaklaşmasını önler. Dönme hareketi yapan takım ile metal ara yüzeyi arasında oluşan kuvvet, sıcaklığın yükselmesi ile uygulanan kesme gerilmesinin altına düşer. Böylece plastik şekil değiştirmiş malzeme, dönen takımın ön tarafından arka tarafına doğru sürüklenmek suretiyle itilerek sıkıştırılır. Böylece iki parça malzemesi karışarak birleşmiş olur. Takım, birleşme çizgisi boyunca durmaksızın kaynak işlemini gerçekleştirerek hareket eder (Mert ve Kaluç, 2003).

4.1. Kaynak Metalurjisi

SKK kaynak bağlantılarında oluşan kaynak bölgesinde tipik bir soğan halkaları biçimine rastlanmaktadır ve kaynak metalinin biçimi çok değişken olarak oluşmaktadır. Bu biçim kaynak edilen alaşım türüne, kaynak işlem parametrelerine bağlıdır (Özsoy ve Kaluç, 2002).

Sürtünme karıştırma kaynağının yatay kesitine bakıldığında göze çarpan ilk oluşumlardan biri muhtemelen soğan halkalarıdır. SKK' da kaynak dikişinde oluşan soğan halkaları Şekil 4.2' de verilmiştir. Bu girdap desenlerinin aletin dönme düzlemine

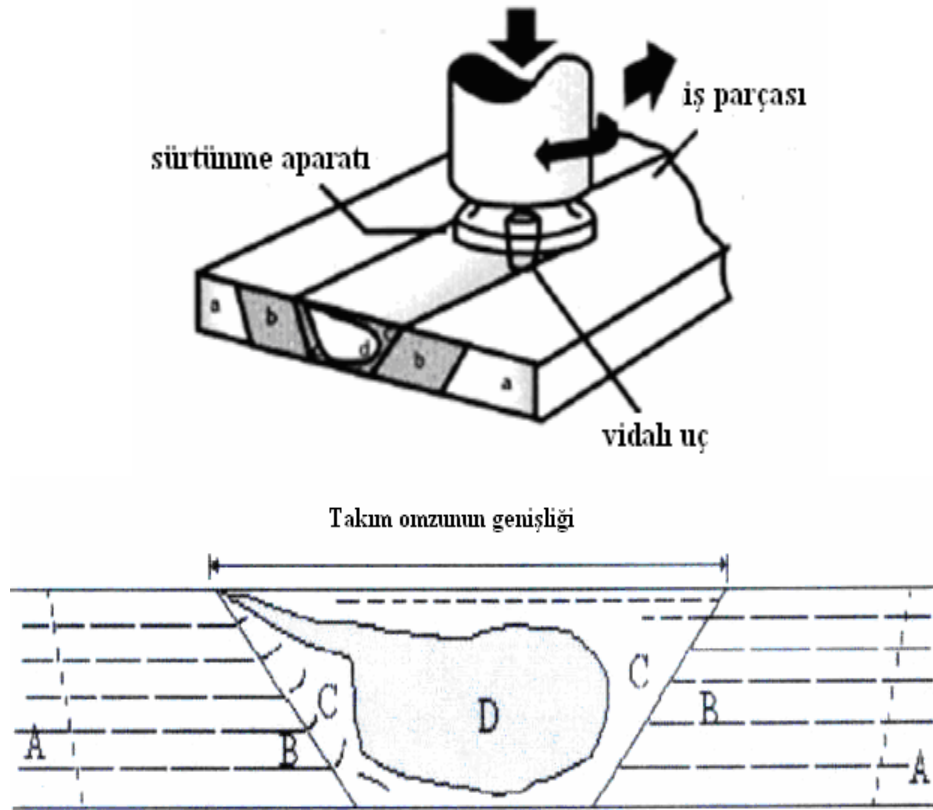
90⁰'lik düzlemde olduğunu anlamak oldukça güçtür. Soğan halkalarının varlığına dair bazı mekanizmalar ortaya atılmıştır. Biallas ve diğerleri ısı etkili bölgenin soğuk duvarlarından malzeme akışının yansımaları yüzünden soğan halkalarının oluştuğunu açıklamışlardır (Krishnan, 2002). Threadgill ise soğan halkalarının oluşumunun aletin bir devirdeki ileri hareketi ile ilgili olduğunu savunmuştur (Krishnan, 2002).



Şekil 4.2. SKK' da kaynak dikişinde oluşan soğan halkaları (Krishnan, 2002).

Yüzeyde ki yarım dairelerin duruşu, aletin dönmesi ve ileri doğru hareketi sırasında kaynak için gerekli ısıyı sağlayıp, sıcak metali iterken kısa bir süre yüzeyde beklemiş gibi görünür. Bu yöntemin sürekli oluşu, yarım daire halkalarının devamlılığını sağlar. İki halka arasındaki mesafe, aletin bir dönme sırasında aldığı yola eşittir. Sürtünme karıştırma kaynak yöntemindeki oluşum Colligan ve Reynolds tarafından ekstrüzyon yöntemindeki oluşuma benzetilir (Mert ve Kaluç, 2003). Aletin her bir dönmesi sırasında malzeme yarım daire halka parçaları şeklinde aletin arkasına ve yan taraflara doğru itilir. Üste yakın kısımlarda karışma daha fazladır. Tüm bu sonuçlar, araştırmacıları, buradaki işlemin bir ekstrüzyon işlemi olduğu fikrine yönlendirir (Mert ve Kaluç, 2003).

Bu kaynak yönteminde kaynak bölgesi dört farklı bölgeden (Şekil 4.3) oluşmaktadır (Külekçi ve Şık, 2003b);



- A:** Kaynaktan etkilenmeyen ana malzeme
B: Isı etkili bölge (IEB)
C: Alüminyum alaşımlarında bulunan yeniden kristalleşmemiş bölge
D: Alüminyum alaşımlarında bulunan yeniden kristalleşen kaynak çekirdeği
C+D: Termo mekanik olarak etkilenen bölge

Şekil 4.3. Kaynak bölgesinin mikroyapısının şematik olarak gösterilmesi (Bradley and Jones, 2000)

Ana malzeme veya ısıdan etkilenmeyen malzeme her ne kadar kaynak bölgesinden uzaksa da prosesin termal çevriminden etkilenir. Fakat bu mikroyapısal ya da mekanik özellikleri etkilemez (Bradley and Jones, 2000).

Isı etkili bölge kaynak merkezine yakındır ve termal çevrim mikroyapısını ve/veya mekanik özelliklerini değiştirir. Termomekanik etkilenen bölgeden farklı olarak bu bölge plastik deformasyona uğramaz ve ısı etkili bölgenin özelliklerindeki değişiklikler diğer termal proseslerde gözlenenlerle kıyaslanabilir.

Termomekanik etkilenen bölge hem plastik deformasyonun hem de termal etkinin sonucudur. Alüminyumda yüksek sıcaklıkta yeniden kristalleşme meydana gelmeden önemli plastik deformasyon oluşumu mümkündür. Bu konuda çalışan araştırmacıların çoğu Termomekanik etkilenen bölgenin bir bölümünde dinamik olarak yeniden kristalleşen kısmın (kaynak çekirdeği) kalan bölümde ise plastik deformasyona uğramış fakat yeniden kristalleşmemiş kısmın olduğunu belirtmektedirler. Sürtünme karıştırma kaynak tekniği ile kaynaklanmış diğer malzemelerde tipik olarak kaynak çekirdeği bulunmaz, Termomekanik etkilenen bölge tamamen yeniden kristalleşmiş olarak görülür (Bradley and Jones, 2000).

Kaynak metalinin şekli alaşıma, proses şartlarına ve omuz çapına bağlıdır. Kaynak metalindeki tane boyutu ana malzemeninkinden önemli ölçüde küçüktür. Bu çeşitli mekanik özellikler açısından (eğer çatlak başlangıcı ve büyümesi bu bölgede meydana geliyorsa yorulma mukavemeti de dahil olmak üzere) yararlıdır.

Termomekanik etkilenen bölgenin yeniden kristalleşmeyen kısmı kaynak metalindeki tanelerden farklı olarak plastik deformasyona ve termal etkiye uğramış tanelerden oluşur. Taneler ana malzemeninkine benzer boyutlardadır (Bradley and Jones, 2000).

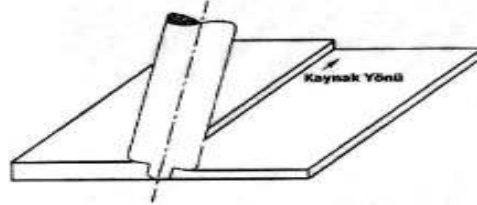
Isı etkili bölge proses parametrelerinden etkilenir, tek pasolu kaynak için Şekil 4.3'de gösterildiği gibi ikizkenar yamuk şeklindedir. En geniş kısım iş parçası ve takım omzu arasındaki sürtünme ile üretilen ısı yüzünden takım omzunun altında yer alır. Isı etkili bölgenin uzunluğu mikroyapısal ölçümler ve sertlik ölçümleriyle belirlenebilir. 0,8 Tm'e kadar olan sıcaklıklar pim yakınında ve takım omzunun altında meydana gelir, fakat alüminyumun yüksek termal iletkenliği takım omzundan uzakta da mikroyapısal ve mekanik değişimlere sebep olabilecek sıcaklıkları sağlar. Threadgill' e göre yaşlandırılabilen ve deformasyon sertleşmesi uygulanabilen alaşımlarda ısı etkili bölgede sertlik aşırı yaşlanma ve/veya dislokasyon yoğunluğundaki azalma yüzünden düşmektedir (Bradley and Jones, 2000).

4.2. Kaynak Parametrelerinin Etkileri

SKK' da etkin olan parametreler; malzeme kalınlığı, karıştırıcı uç malzemesi ve dizaynı, takım ilerleme hızı ve takım devir sayısı, kaynak pozisyonu ve birleştirme geometrileridir.

4.2.1. Malzeme kalınlığı

Bu kaynak yöntemi ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirme işlemi pimin eğik konumda levhalara daldırılması ile yapılabilmektedir (Şekil 4.4). Ayrıca çift taraftan kaynak yaparak kalın parçalarında birleştirilmeleri mümkündür. Bu şekilde, 75mm kalınlığındaki 6082 Al-alaşımı levhalar çift taraftan kaynak edilerek başarı ile birleştirilmiştir (Şekil 4.5) (Çam, 2002).



Şekil 4.4. Sürtünen eleman ile kaynak yönteminde batıcı pimin eğik konumda daldırılması ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirilmesi (Özsoy ve Kaluç, 2002).



Şekil 4.5. Çift taraftan sürtünme kaynağı yapılarak birleştirilmiş 75 mm kalınlığındaki 6082 Al alaşımı levhalar (Özsoy ve Kaluç, 2002).

Bu kaynak yöntemi, büyük uzunluktaki kaynakların ergime olmaksızın yapılmasını sağlamaktadır (Şekil 4.6). Bu ergitme kaynakları ile karşılaştırıldığında önemli bazı metalürjik avantajlar sağlar. İlk olarak; ergime olmaması katılma çatlaklarının giderilmesini sağlar. İkinci olarak ergitme kaynağı ile bir araya

getirilemeyen farklı ve uyumsuz alaşımlar başarıyla birleştirilebilir. Üçüncü olarak, karıştırma ve dövme hareketi ergime kaynağı ile elde edilebilenden daha iyi özelliklere sahip ince taneli yapı üretir. Ve son olarak; düşük kaynama noktasına sahip alaşım elementleri buharlaşma yoluyla kaybolmazlar. Diğer avantajları; düşük distorsiyon, kenar hazırlanmasına ihtiyaç duyulmaması, porozite olmaması, koruyucu gaz ve dolgu metali gibi kaynak sırasında kullanılan malzemelere ihtiyaç duyulmaması ve oksit tabakasına tolerans gösterilebilir olmasıdır (Mathers, 2002).



Şekil 4.6. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış 2 m uzunluğunda, 10 mm kalınlığında A 6082 alaşımı (Mathers, 2002)

4.2.2. Karıştırıcı uç malzemesi ve dizaynı

Yöntemde, yüksek sıcaklıklarda aşınma direncine sahip malzemelerden üretilen, değişik tasarımlardaki, tükenmeyen döner takımlar kullanılır. Örneğin, Amerikan Deniz Kuvvetleri'nde ani saldırı ve hücum amaçlı ileri amfibik (hem karada hem suda hareket edebilen) aracın kaynak bağlantılarında H13 (X40CrMoV51) takım çeliğinden tek parça takımlar ve karıştırıcı uç kısmın malzeme olarak sıcakta yüksek mukavemete sahip olan MP159 malzemesinden ve omuz kısmı ise H13 takım çeliğinden imal edilmiş ve iki parçalı olan takımlar kullanılmıştır. Bu konudaki gelişmeler hızla devam etmektedir ve geliştirilen takım malzemeleri ile ilgili bilgilere ulaşmak oldukça zordur (Mert ve Kaluç, 2003).

Bu kaynak yöntemi geliştirildiğinde ilk kullanılan batıcı uçlar; yüzeyine helisel dış 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 (Çam, 2003b).

Kaynağı zor veya daha kalın malzemelerde, plastik şekil değiştiren kısmın, karıştırıcı uç kısmı etrafındaki akışı, göz önünde tutulması gereken önemli bir noktadır. Eğer, oldukça geniş çapta karıştırıcı uç kısımlar gerekli ise çok geniş hacimli malzeme hareketi olacaktır. Takımlar, plastik şekil değiştirebilen malzemenin, karıştırıcı uç kısmı etrafındaki akışını 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.

Mikser tip içi boş karıştırıcı uç kısma sahip takım, plastik şekil değiştiren malzemenin, karıştırıcı uç kısmın içinden geçmesine olanak sağlar. Benzer çaptaki dolu takımlar ile karşılaştırıldığında, daha az miktarda malzeme yer değiştirir (Mert ve Kaluç, 2003).

4.2.2.1. Üç yivli ve helezonik takımlar

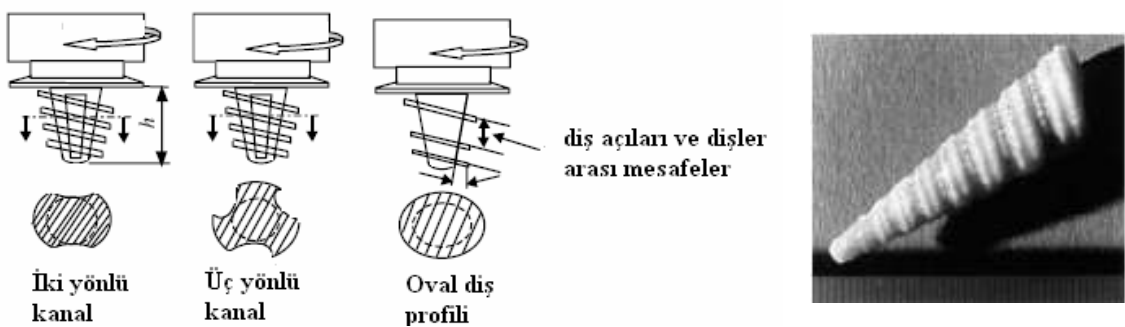
Son yıllarda, TWI tarafından üç oluklu veya üç yivli (MX Triflute) ve helezonik (Whorl) takımlar geliştirilmiştir. Bu yöntemde kullanılan takım genel olarak omuz ve karıştırıcı uç kısım olmak üzere iki önemli bölümü içerir. Takımın omuz kısmı, plastik şekil değiştiren kaynak bölgesinin diğer bir deyişle 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.

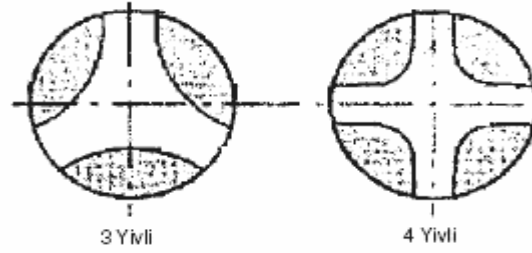
1 mm ila 50 mm arasındaki kalınlıklara sahip alüminyum alaşımlı levhalar, bir pasoda, sürtünme karıştırma kaynak yöntemi sayesinde başarıyla kaynak edilir. MX üç yivli takım kullanılarak, 6 mm'den 50 mm'ye kadar olan kalınlıklardaki malzemelerin tek pasoda kaynaklarını yapmak oldukça iyi sonuçlar verir.

Esas itibarıyla, her iki takımında 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 (Mert ve Kaluç, 2003).

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde kullanılan takımların karıştırıcı uçları dairesel etkiler 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 4.7' de helezonik takımların, Şekil 4.8' de ise yivli takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri görülmektedir (Mert ve Kaluç, 2003).



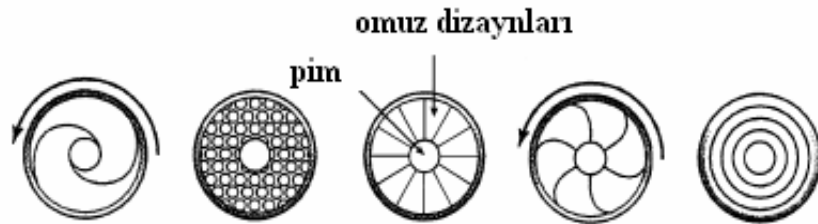
Şekil 4.7. Helezonik takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri ve bir deniz kabuğu ile benzerliği (Mert ve Kaluç, 2003).



Şekil 4.8. Yivli takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri (Mert ve Kaluç, 2003)

Üç yivli takımlarla yapılan bindirme kaynağında uç; daha geniş kaynak bölgesi sağlamak ve kaynak yapılan ara yüzeylerde daha büyük levha kalınlıklarından dolayı oluşabilecek problemleri önlemek amacıyla daha farklı dizayn edilmiştir. Bindirme kaynağında pim yüzeyi kaynak ara yüzeyine zorunlu olarak diktir ve alttaki levhaya yeteri kadar nüfuz edebilmesi ana amaçtır. Kaynak ara yüzeyinin üst yüzeyden mesafesi ve ucun girintilerinin kaynağın kenarıyla kesiştiği açı çok önemlidir. Bu özellik, yorulma ile doğrudan bağlantılıdır (Çam, 2003b).

Yeni jenerasyon helezonik ve üç yivli takımlarının omuzları (shoulder) da özel profillere sahiptir (Şekil 4.9). Omuz profilleri, omuz ile iş parçası arasında daha iyi bir temas yüzeyi sağlamak amacıyla kullanılır. Sürtünme teması ile akan malzemenin kaynak bölgesinden ayrılması önlenmektedir (Çam, 2003b).

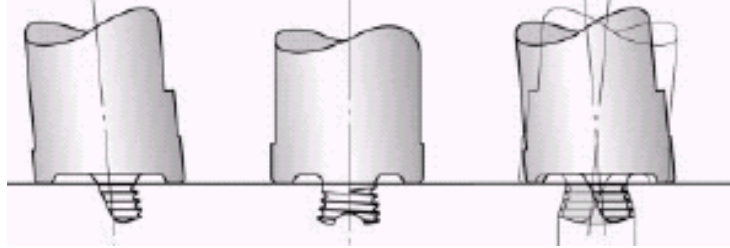


Şekil 4.9. Helezonik ve üç yivli takımlarının omuz profilleri (Çam, 2003b)

4.2.2.2. Skew-Stir™ ve A-Skew™ serisi pimler (baticı uçlar)

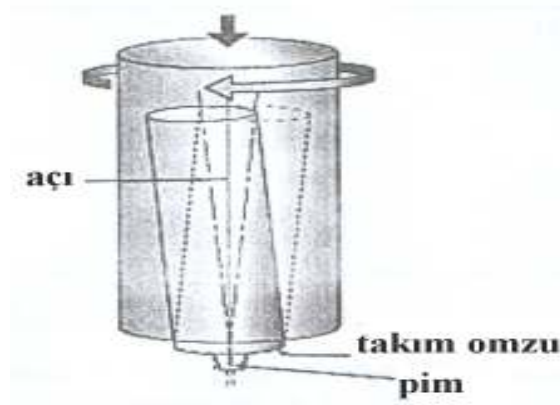
SKK için geliştirilen Skew-Stir™ biçimi pimler Şekil 4.10' de gösterildiği gibi makine miline biraz eğik olarak verilen takım eksenine geleneksel metottan farklıdır

(Thomas, et al., 2003). Skew-Stir™ serisi pimler, dinamik süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki oranı pimin eğik hareketi ile artırabilmektedirler. Bu oran, boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktördür (Çam, 2003b).



Şekil 4.10. A-Skew ucunun resmi (Thomas, et al., 2003)

Şekil 4.11' de görüleceği üzere, omuz yüzeyi, eğik takım eksenine belirli bir eğim oluşturmaktadır. Omuz yüzeyi, 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 (Çam, 2003b).



Şekil 4.11. Skew-Stir metodunun çalışma prensibi (Çam, 2003b)

4.2.2.3. Trivex ve MX Trivex takımlar

İngiliz Kaynak Enstitüsü 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(Mert ve Kaluç, 2003).

4.2.3. Takım ilerleme hızı ve takım devir sayısı

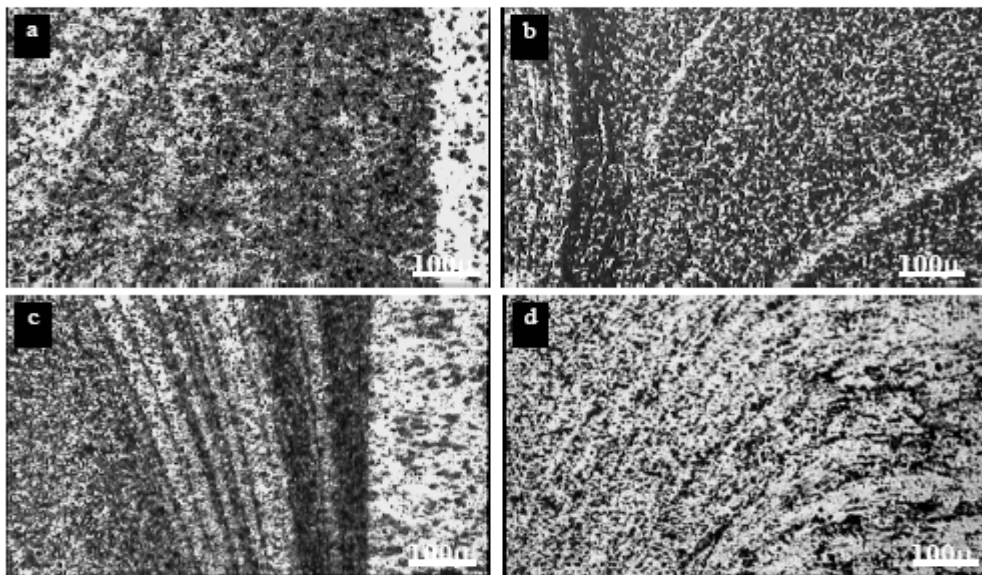
Sürtünme karıştırma kaynağında iki parametre çok önemlidir. Bunlar saat yönünde veya saat yönünün tersi yönde takımın devir sayısı (n , dev/dk) ve kaynak hattı boyunca takımın ilerleme hızıdır (V , mm/dk). Takımın dönmesi dönen pim etrafındaki malzemenin karışmasına sebep olur, takımın dönmesi karışan malzemeyi pimin önünden arkasına taşır ve kaynak prosesi sonlanır (Mishra, 2005). Yüksek kaynak hızlarında asıl problem yeterli birleşmenin olmadığı soğuk kaynaktan kaçınmanın sağlanmasıdır (Ericsson and Sandström, 2003). Takımın yüksek devir sayılarında sürtünmenin fazla olması sebebiyle yüksek ısılar üretilir ve malzemenin daha kuvvetli karışmasına sebep olur (Mishra, 2005).

Biallas ve diğerleri SKK uygulanmış 2024A1-T3 alaşımında kaynak parametrelerinin çekme özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çekme özellikleri Çizelge 4.1' de özetlenmiştir. Çizelge 4.1'den de açıkça görülebileceği gibi takımın sabit bir ilerleme hızı/devir sayısı oranında akma ve nihai çekme gerilmeleri takımın artan devir sayısıyla artmakta ve süneklik iyileşmektedir. Ayrıca Çizelge 4.1 ince plakaların kalın plakalara göre daha yüksek mukavemet ve birleşme verimliliğine sahip olduklarını göstermektedir (Mishra, 2005).

Çizelge 4.1. 4mm ve 1.6 mm kalınlığındaki SKK kaynağı uygulanmış 2024Al-T3 plakalarda ana malzeme ve kaynaklı birleştirmeler için oda sıcaklığında boylamasına çekme özellikleri(Mishra, 2005)

Malzeme	Devir sayısı n, (dev/dk)	İlerleme hızı V, (mm/dk)	Akma Muk. (MPa)	Nihai çek. Muk. (MPa)	% Uzama	Nihai Çek. Muk. _{SKK} / Nihai Çek. Muk. _{Ana Malz.}
Ana malz. 4mm			424	497	14.9	
SKK-4mm	800	80	279	408	6.6	0,82
SKK-4mm	100	100	296	423	8.1	0,85
SKK-4mm	1250	125	304	432	7.6	0,87
Ana malz. 1.6mm			325	472	21.0	
SKK-1.6mm	1200	120	301	424	6.3	0,90
SKK-1.6mm	1800	180	315	434	6.9	0,92
SKK-1.6mm	2400	240	325	461	11.0	0,98

Sürtünme karıştırma kaynağında takım ilerleme hızı (kaynaklama hızı); ısı girdisi miktarını etkileyen önemli bir parametre olduğundan takım ilerleme hızına bağlı olarak hem mikro yapı 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. Kurt vd. 800 dev/dk kaynak hızında 6.25 mm/dk, 10 mm/dk, 16 mm/dk ve 20 mm/dk ilerleme hızları kullanarak kaynak metalindeki yönlenmeyi incelemişlerdir. Şekil 4.12' den de görülebileceği gibi kaynak ilerleme hızı 20 mm/dk' ya ulaştığında yönlenme daha homojen bir dağılım göstermektedir (Kurt vd., 2003).

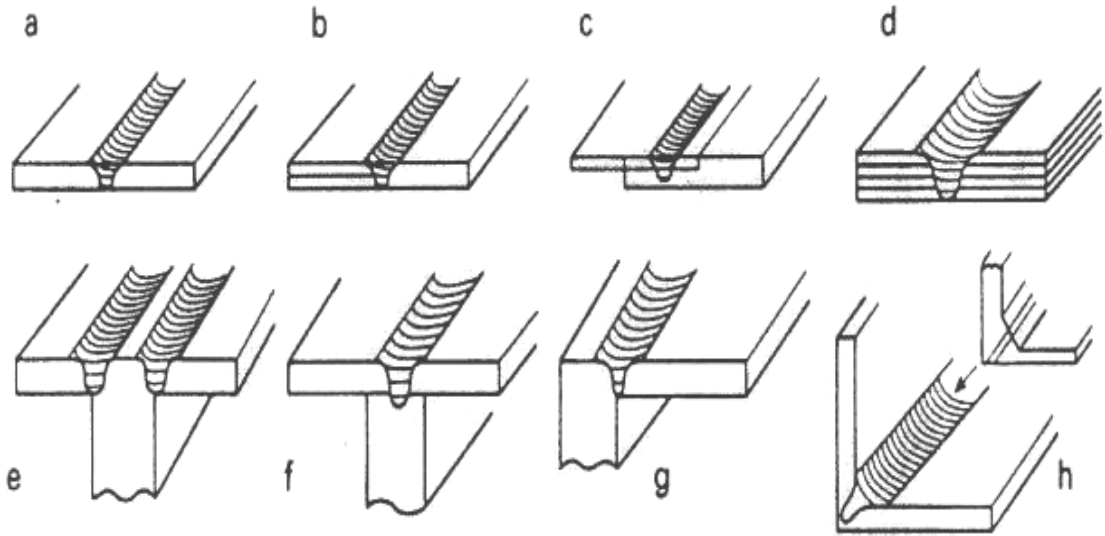


Şekil 4.12. SKK' da kaynak hızı ile kaynak metali mikroyapıları arasındaki ilişki, a) 6.25 mm/dk, b) 10 mm/dk, c) 16 mm/dk, d) 20 mm/dk (Kurt vd., 2003).

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 (Kurt vd., 2003).

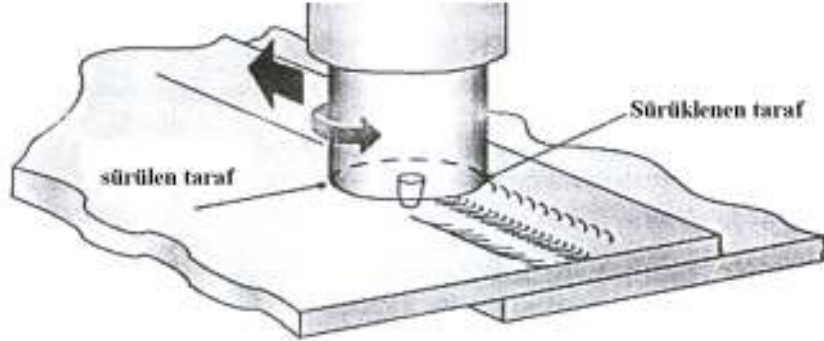
4.2.4 Kaynak pozisyonu ve birleştirme geometrileri

Sürtünen karıştırma kaynağında uygulanabilir birleştirme türleri; küt alın, bindirme, T-köşe, dış ve iç köşe, boyuna ve çevresel birleştirmelerdir (Şekil 4.13). Ayrıca bu yöntem yerçekiminin etkisi olmadığından tüm pozisyonlarda rahatlıkla uygulanabilir (Özsoy ve Kaluç, 2002).

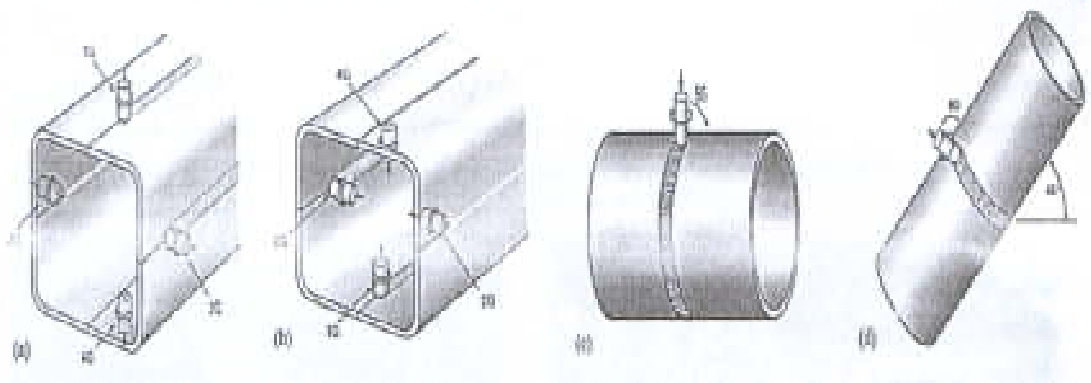


Şekil 4.13. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminde gerçekleştirilen birleştirmeler. a) küt alın birleştirme b) birleştirilmiş ek ve bindirme birleştirme c) bindirme d) çoklu bindirme e) iki pasolu T- köşe birleştirme f) tek pasolu T- köşe birleştirme g) dış köşe birleştirme h) iç köşe birleştirme (Özsoy ve Kaluç’ dan, 2002).

Bu kaynak yöntemi ile düz ve çeşitli profillerdeki sac ve levhaların alın ve bindirme kaynağı yapılabilmektedir. Şekil 4.14 sürtünme karıştırma bindirme kaynağının yapılışını şematik olarak göstermektedir. Al-alışımı veya mukavemeti düşük diğer malzemelerden T ve L profillerin üretiminde ve boru bağlantı kaynaklarında da bu yöntem kullanılabilir (Şekil 4.15)(Çam, 2003b).



Şekil 4.14. Sürtünme karıştırma bindirme kaynağının şematik gösterimi(Çam, 2003b)



Şekil 4.15. Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin boru kaynaklarında uygulaması (Çam, 2003b)

Belirli bir pim yüzey geometrisi kullanılarak yapılan sürtünme karıştırma kaynağında elde edilen birleştirme karakteristiklerini belirleyen üç faktör vardır. Bunlar sırasıyla pimin devir sayısı, pimin ilerleme hızı ve pimin batma derinliğidir. Bunlardan ilk ikisi rahatlıkla kontrol edilebilmektedir. Fakat, pimin batma derinliği kritik bir faktör olup, kontrol edilmesi güçtür (Çam, 2003a).

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde birleştirilecek levha kalınlığı değiştiğinde, sürtünme aparatı boyutu da değişmektedir. Tek taraflı alın kaynaklarında aparatın malzeme içerisinde kalan uç kısmının uzunluğu (h), kaynak edilecek levhaların kalınlığına yakındır ($h-0,1$). Çift taraflı alın kaynaklarında ise uç kısmının uzunluğu (h)

malzeme kalınlığının (t) yaklaşık yarısı kadar alınmaktadır. Malzeme kalınlığına göre aparatın h değerinin değişmesi gerekmektedir (Küleççi ve Şık, 2003a).

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, yavaş 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 çekilmeye başlar. Bu sırada karıştırıcı uç kısmı 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 (Mert ve Kaluç, 2003). Batıcı uçlar takım çeliği veya yüksek hız çeliklerinden imal edilmektedir(Çam, 2005).

4.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Uygulandığı Malzemeler

SKK; Al alaşımları, Cu alaşımları, Ti alaşımları, Mg alaşımları, çelikler, metal matrisli kompozitler, farklı alaşım ve metaller, plastiklerin kaynağında kullanılmaktadır.

4.3.1. 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 (Mishra, 2005).

Takım malzemesi ve takım geometrisi, kalın bakır levhaların SKK yapılabilirlikleri üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bakırın SKK' da birleşme kalitesi üzerinde kaynak parametreleri önemli etkiye sahiptir (Mishra, 2005) .

Mikro yapısal bölgeler üzerine farklı sonuçlar elde edilmiştir. Andersson and Andrews ve Hautala and Tiainen saf bakır birleştirmelerin kaynağında üç mikroyapısal bölgenin varlığını bildirmişlerdir (Mishra, 2005). Bunlar; ince yeniden kristalleşmiş tanelerden oluşan çekirdek bölgesi, deforme olmuş geniş tanelerden oluşan termomekanik etkilenen bölge ve ana metaldeki tanelerden daha büyük eş eksenli tanelerden oluşan ısı etkisinde kalan bölgedir. Lee ve Jung ise bakır kaynaklarında belirgin bir Termomekanik etkilenen bölgenin olmadığını bildirmişlerdir (Lee and Jung, 2002).

SKK yapılmış bakır alaşımlarının çekme mukavemetleri ana malzeme ile benzer değerler vermektedir (Mishra, 2005).

SKK ile tungsten ark kaynağı ile yapılan birleştirmelerde elde edilen bazı özellikler benzerdir. Örneğin çözünmüş gaz (H_2 ve O_2) miktarları her ikisinde de benzer olmasına rağmen gaz tungsten ark kaynağında koruyucu gaz (helyum) kullanılırken SKK' da koruyucu gaz kullanılmamaktadır. SKK yapılmış bakır malzeme termal kararlılığı ile bakırın ve gaz tungsten ark kaynağı yapılmış bakırın termal kararlılığı benzerdir (Mishra, 2005).

4.3.2. Titanyum alaşımları

Her ne kadar birçok titanyum alaşımları gaz tungsten ark kaynağı gibi geleneksel ergitme prosesleri ile kaynak yapılabilse de kaynak sonrası ısıl işlem gerektirebilmektedir. Bu ilave işlem üretim maliyetini arttırmaktadır. Bir katı hal kaynak prosesi olan SKK' nın kaynak sonrası ısıl işleme olan ihtiyacı ortadan

kaldırması beklenmektedir. Ne yazık ki titanyum alaşımlarının SKK ile ilgili bilgiler şu an için yetersizdir (Mishra, 2005).

Juhas ve diğerleri ve Lienert ve diğerleri SKK' nın Ti-6Al-4V' un özelliklerine ve mikroyapısal gelişimine etkilerini incelemiştir (Mishra, 2005). Bu çalışmalarında kusursuz Ti-6Al-4V SKK' lı birleşmeler elde etmişlerdir. Alaşımlarında tipik olarak görülen termo mekanik etkilenen bölgenin olmadığını gözlemlemiştir. Yine de Ramirez ve Juhas çok dar (~30 µm) bir termomekanik olarak etkilenmiş bölge gözlemlemiştir (Mishra, 2005).

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 (Mishra, 2005).

4.3.3. Çelikler

Ergitme kaynağı proseslerine göre SKK' da ki düşük ısı girdisinin IEB' da daha az metalurjik değişiklik yapması ve kalın kesitli birleşmelerin kaynağında çok önemli olan çeliklerdeki distorsiyon ve kalıntı gerilmeyi minimize etmesi beklenmektedir. Ayrıca çeliklerdeki hidrojen çatlağı problemi ile, SKK prosesinin katı hal kaynağı oluşu sebebiyle karşılaşmaz. Ek olarak katı hal SKK prosesinde, kaynakla ortaya çıkan kokulu gazlar da oluşmaz. Bu avantajlar SKK' nı çeliğin birleştirilmesinde birçok uygulama için avantajlı hale getirmektedir (Mishra, 2005).

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 1000⁰C ve üzerindeki sıcaklıklarda iyi aşınma direnci ve tokluk göstermesi önemlidir (Mishra, 2005).

4.3.4. Magnezyum alaşımları

Magnezyum alaşımları genellikle düşük Şekil alabilirliğe sahiptir. Levha magnezyum alaşımları AZ31 gibi bazı dövme alaşımları hariç ticari olarak döküm veya basınçlı döküm yoluyla üretilirler. Kaynaktaki porozite oluşumu yönünden bu döküm magnezyum alaşımlarının kaynağı genellikle zordur. Ayrıca magnezyum alaşımlarının nispeten büyük olan genleşme katsayıları kaynakta büyük deformasyon/distorsiyona sebep olur (Mishra, 2005).

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. Dökülmüş magnezyum alaşımlarında ise kaba α -Mg fazı ve β Al₁₂Mg₁₇ intermetalik bileşiği SKK dan sonra kaybolmaktadır (Mishra, 2005).

Karıştırma bölgesinin sertliği genellikle bu bölgedeki ince tane yapısı yüzünden ana metalden daha serttir. Dövme magnezyum alaşımları AZ31B-H24 ve AZ61' de çekme değerlerinde azalma gözlenirken AZ91 gibi döküm magnezyum alaşımlarında çekme değerlerinde iyileşme vardır (Mishra, 2005).

4.3.5. 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 yapılabilir. Yinede çubuk ya da boru Şeklinde nispeten basit geometrili parçalarla sınırlıdır (Mishra, 2005).

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. Kompozit iş parçasının kaynaktan önce etkin olarak ısıtılması (kompozitlerin yüksek sıcaklıklardaki akış özelliklerinden dolayı) aşınma direncinin azaltılmasına katkı sağlar (Mishra, 2005).

4.3.6. Farklı alaşım ve metaller

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 (Mishra, 2005).

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. Alüminyum/ çelik SKK birleştirmelerinde alüminyum ve demir arasında çelik parçalar ve intermetalikler bulunmuştur (Mishra, 2005).

4.3.7. 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

sebepl olur ve takım birleşme hattı boyunca hareket eder. Malzeme takım etrafında hareket ederken kaynak bölgesinde karışır (Strand, 2003).

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 (Strand, 2003).

Kaynaklı parça soğurken tüm kaynak boyunca uniform soğuma hızının yükseltilmesi çok önemlidir. Eğer dışarıdaki malzeme içeridekine göre daha hızlı soğursa katı bir kabuk oluşur. İçerdeki tabakalar daha geç soğuduğu için malzeme büzülür ve kabuktan ayrılır (Strand, 2003).

4.4. 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 (Çam, 2005).

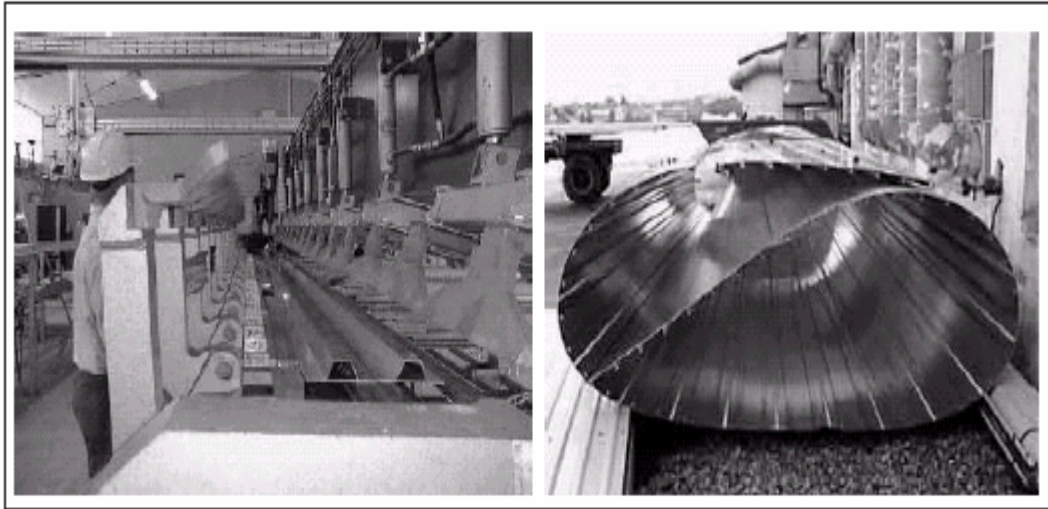
Ayrıca taşımacılık endüstrisinde, demiryolu vagon ve karoserlerinde ve mal taşıyan gemilerin tanklarında, yakıt tankları ve uzay araçlarının ince kaplamalarında gemi inşaatında kullanılan yakıt depolama tanklarında kullanılmaktadır. (Thomas and Nicholas, 1997)

4.4.1. Gemi inşası ve deniz endüstrisindeki uygulamalar

Ticari uygulamalar için yöntem adaptasyonu olan ilk endüstriyel sektörlerden ikisi gemi inşaatı ve deniz endüstrisidir. Bu yöntem aşağıdaki uygulamalar için uygundur; güverte, kenar, bölme ve döşeme panelleri, alüminyum ekstrüzyonları, tekne elemanları, helikopter platformu, iç kısımdaki yenecek ve yatacak yerler, deniz üssü yapılar, gemi direkleri, soğuk hava tesisleri (Özsoy ve Kaluç, 2002). Sürtünme karıştırma kaynağı ince güverte malzemelerinin kaynağında tercih edilmektedir (Freman and Green, 2000).

Sürtünme karıştırma kaynağının kullanıldığı ilk ticari uygulama, balıkçı gemilerinin derin dondurucularının oluklu alüminyum panelleridir. Bu kaynak yöntemindeki minimum distorsiyon ve yüksek verimlilik, teknik ve ekonomik yönden sert panel üretiminde bu prosesi cazip kılmaktadır. Bu yöntem ile, Japonya'da alüminyum petek paneller ve deniz suyunun korozyon etkisine dayanıklı panellerin üretimleri yapılmaktadır (Çam, 2003a).

Yüksek hız feribotlarında kullanılan standart boydaki alüminyum ekstrüzyon panelleri sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmektedir. Ergitme kaynaklarına kıyasla ısı girdisinin düşük olması panellerdeki distorsiyonun ve kalıntı gerilmelerin minimum düzeyde olmasını sağlamaktadır. Norveç' te bulunan Hydro Marine Aluminum firmasında son üç yılda 70 kilometre uzunluğunda alüminyum ekstrüzyon paneli sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir (Şekil 4.16) (Çam, 2003b).



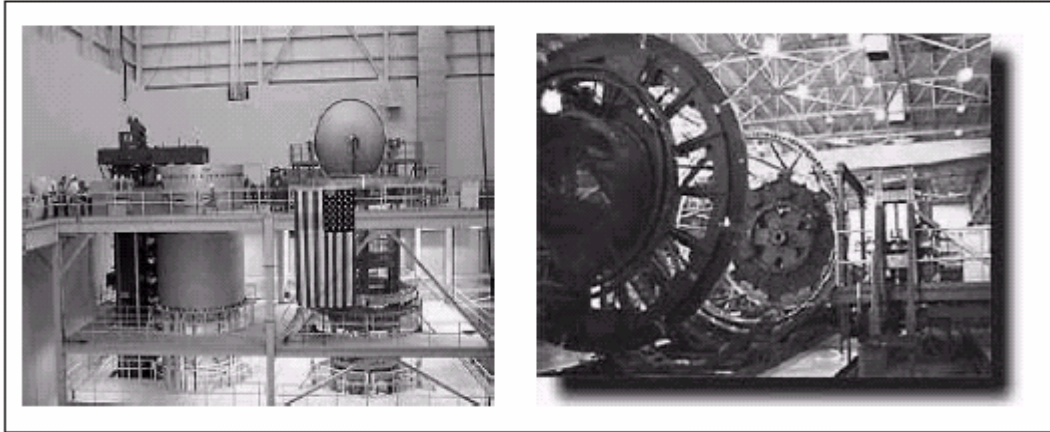
Şekil 4.16. Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi (Çam, 2005).

4.4.2. Uçak ve uzay endüstrisindeki uygulamalar

Yöntem uçak ve uzay endüstrisinde kanatlar, uçak gövdeleri, kuyruk takımı, taşıtlar için yakıt tanklarının soğutma ünitesi, uçuş yakıt tankları, askeri uçaklar için

dıştaki atım tankları, askeri ve araştırma roketleri, hatalı MIG kaynaklarının tamirinde kullanılmaktadır (Külekçi ve Şık, 2003b).

1993 yılında NASA, Lockheed Martin Laboratuvarlarından, Space Shuttle External Tank projesinde (uzay mekiklerinin yakıt tanklarında) AA 2219 alüminyum alaşımı yerine kullanılmak üzere daha yüksek mukavemetli, düşük yoğunluk ve hafiflikte bir malzeme geliştirilmesi için talepte bulunmuştur. Bunun üzerine Al-Li 2195 olarak bilinen çok daha hafif yeni bir alüminyum alaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu alaşım sayesinde External Tank projesinin (yakıt tankı) ağırlığı yaklaşık 3500 kg azaltılmıştır. Yeni düşük ağırlıklı Al-Li 2195 alaşımının ergitme kaynağı çok zor olmakta ve kaynak bölgesinin mukavemeti göz ardı edilemeyecek kadar düşmektedir. Dolayısıyla, bu uygulama için mukavemet düşüşünün daha düşük seviyede olduğu bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı ideal bir birleştirme yöntemidir. Günümüzde, Al-Li 2195 alaşımından üretilen uzay mekiklerinin yakıt tanklarının son kubbe kısımlarının kaynağında bu yöntem başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Şekil 4.17) (Çam, 2003b).



Şekil 4.17. Space shuttle external tank projesi ve Marshall Space Flight Center laboratuvarlarındaki sürtünme karıştırma kaynak sistemlerinden görüntüler (Çam, 2005).

Sürtünme karıştırma kaynağı yolcu uçakları gibi hafif alüminyum iskeletli yapılarda büyük potansiyel arz etmektedir. Boeing Şirketi, ince alın, bindirme ve T birleştirmeleri ile çeşitli havacılık ve uzay uygulamalarında kullanılacak kalın alın

kaynaklarında bu yöntemi kullanma çalışmalarına son zamanlarda büyük hız vermiştir. Şu ana kadar, uçakların iniş takımlarının kapaklarında ve bazı savaş uçaklarının kaportasında ince T birleştirmelerinde (sandviç montaj) sürtünme karıştırma kaynağı uygulanmış ve test uçuşları başarı ile sonuçlanmıştır (Çam, 2003a).

4.4.3. Otomotiv endüstrisindeki uygulamalar

Ulaşım sektöründe alüminyum ekstrüzyonlarının birleştirilmesinde vidalama, perçinleme, yapıştırma, bağlama ve kaynak gibi birçok birleştirme metodu kullanılmaktadır. Bunlardan kaynak metodu ürünün yüksek mukavemetli olması istendiği durumlarda kullanılır (Çam, 2003b).

Sürtünme karıştırma kaynağının otomotiv sektöründe ilk uygulamalarından biri Hydro Marine Aluminium (Norveç) firması tarafından prototip otomobil jantlarının iki parçasının birleştirilmesidir (Şekil 4.18). Bu sektörde ilk uygulamalardan bir diğeri de, kaynaklarının bazıları sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılmış olan prototip bir motor tezgahıdır (beşiğidir) (Çam, 2003a; Çam, 2003b).



Şekil 4.18. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen Al-alışımı prototip otomobil jantı (Çam, 2003b).

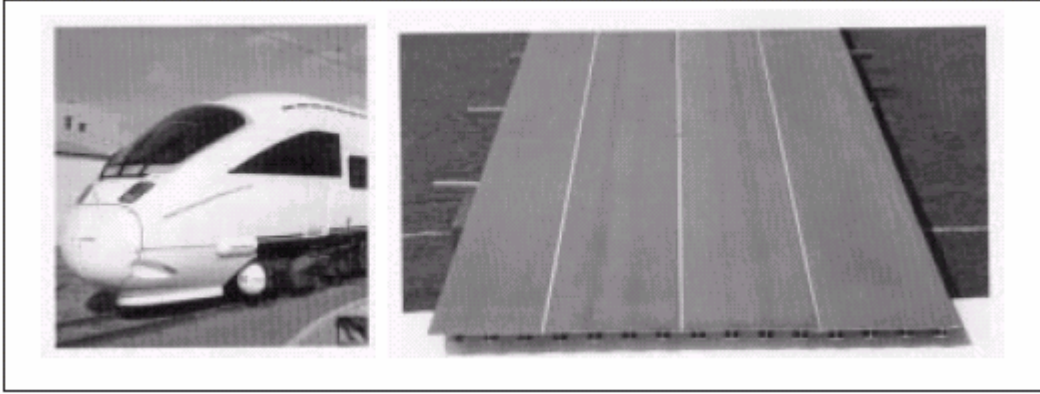
Halen, otomotiv endüstrisindeki yüksek üretim oranları, rekabetçi üretim ortamları ve düşük maliyet gereksinimleri geleneksel olan diğer birleştirme tekniklerinin uygulanmasına neden olmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı otomotiv parçalarında, alüminyum birleştirmelerde kayda değer bir potansiyel artışı sağlamakla

beraber otomotiv sektöründe kullanılabilirliği sınırlıdır. Otomotiv endüstrisindeki yoğun üretim nedeniyle, bu yeni teknolojiyi uygulamaya geçirmek için bir hayli zamana ihtiyaç duyulması beklenmektedir. Kaynak teknolojisindeki gelişme hızlandığında artırılmış üretim için büyük potansiyel, özel parçaların büyük oranda üretiminin sağlanması sonucunda açığa çıkacaktır. Yüksek kalite ve yükseltilmiş kaynak mukavemeti, ağırlık azaltımını mümkün hale getirecektir. Özellikle, Mg-alaşımlarının otomotiv sektöründe bu yeni kaynak teknolojisi sayesinde kullanımı ile ağırlıktan tasarruf daha da artırılabilir (Şık ve Kayabaş, 2003; Çam, 2003b).

4.4.4. Hızlı tren üretimindeki uygulamalar

Demiryolu endüstrisinde; SKK yüksek hızlı trenler, tren yolunun mevcut yokuşlu yerleri, tramvaylar, demiryolu tankerleri, vagonlar ve konteynır gruplarında kullanılmaktadır (Küleççi ve Şık, 2003b).

Modern yolcu treni vagonlarının imalatında, alüminyum ekstrüzyonlardan üretilen petek paneller daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu panellerde, uzun Al-ekstrüzyonlar aralarına sıklık artırıcı destekler yerleştirilerek birleştirilmektedir. Bu sayede, hem çarpışmalarda emniyet hem de bükme kuvvetlerine dayanım artırılmaktadır. Klasik ergitme kaynağı, özellikle yüksek mukavemetli Al-alaşımlarında IEB 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-alaşımı petek paneller kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 4.19) (Çam, 2003a).



Şekil 4.19. Japonya 'da sürtünme karıştırma kaynağının kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntem ile kaynağı yapılan Al-paneller (Çam, 2005).

4.4.5. Diğer uygulama alanları

İnşaat Endüstrisinde; alüminyum köprüler, alüminyum, kurşun veya titanyumdan yapılmış ön cephe panelleri, cam çerçeveleri, alüminyum nakil boruları, güç fabrikaları kimya endüstrisi için alüminyum reaktörler, sıcaklık değişimcileri ve hava şartlandırıcıları ile boru üretiminde kullanılmaktadır (Özsoy ve Kaluç, 2002).

Diğer uygulama alanları ise; buzdolabı panelleri, pişirme ekipmanları ve mutfaklar, beyaz eşyalar, gaz tankları ve gaz merdivenleri, motor ve şasi kızakları, hidroform olan tüplerin bağlanan parçaları, kamyon gövdesi, mobil vinçler, zırhlı taşıtlar, yakıt tankları, karavanlar, otobüs ve hava taşımacılığı taşıtları, motosiklet ve bisiklet yapıları, asansörler, alüminyum arabaların tamiri, magnezyum ve magnezyum/alüminyum eklemleridir (Külekcı ve Şık, 2003b).

4.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantaj ve Dezavantajları

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

1. Ergitme kaynağı zor olan 2XXX ve 7XXX serisi Al-Alaşımları ve Al-Li alaşımları kaynak edilebilir.
2. Kaynak esnasındaki toplam ısı girdisi düşüktür, dolayısıyla mekanik özelliklerdeki kayıp minimumdur.
3. Özellikle ince levhalarda büzülme, distorsiyon ve kalıntı gerilmeler çok düşüktür.
4. Kaynak öncesi yüzey hazırlama aşırı kritik değildir, yüzeyde ince oksit filmleri tolere edilebilir.
5. Katı hal kaynağı olduğu için çatlak ve porozite oluşumu gibi ergitme kaynaklarında karşılaşılan problemler söz konusu değildir.
6. Kaynak sonrası kaynak yüzeyi talaş alınmış gibi düzgündür ve yüzey işleme gerektirmez.
7. Alın ve bindirme kaynağı yapılabilir.
8. Aynı karıştırıcı uç ile tipik olarak 1000 m kaynak yapılabilir.
9. Yöntemin doğası gereği ark, kıvılcım, gaz ve toz söz konusu olmadığından çok temiz ve çevreci bir kaynak yöntemidir.
10. Enerji verimliliği yüksek bir kaynak yöntemidir.
11. Otomasyona ve robotik uygulamaya çok uygundur (Çam, 2005).
12. Kaynak bölgesinde mukavemet nispeten yüksektir (yüksek kaynak performansı).
13. İlave tel ve koruyucu gaza ihtiyaç duyulmaz.
14. Hassas kaynak ağzı hazırlığına gerek yoktur.
15. Çeşitli metaller ve alüminyumların (Al-ekstrüzyon ve Al-döküm) bir çok pozisyonda birleştirilebilmesi mümkündür (Çam, 2003a).
16. Yatırım maliyeti lazer ve elektron kaynağı cihazlarından düşüktür (Çam, 2002).
17. Katı faz kaynağı oluşu alaşımın metalurjik özelliklerini saklamasına olanak tanır.
18. Kaynaktan hemen sonra oksit tabakasının kaldırılmasına gerek yoktur.

Yöntemin dezavantajları ise:

1. Kaynaklanacak parçaların çok sıkı tespit edilmesi şarttır.
2. Tek parçalı karıştırıcı uç kullanıldığında kaynak sonunda delik kalır.
3. Özellikle kalın levhaların kaynağı için çok güçlü tezgahlara ihtiyaç vardır (Çam, 2005).

4. Sağlam bir destekleyici gerektirir.
5. Kaynaklama hızı malzeme cinsi ve levha kalınlığına bağı olarak 50-1000 mm/dk arasındadır. Bu değerler, perçinleme gibi mukavemetsiz birleştirme yöntemlerine göre oldukça düşük, benzer mukavemetli ark kaynağı ile eş değerdir. Pim dizaynındaki hızlı gelişmeler ile kaynak hızının daha da artırılması beklenmektedir (Çam, 2003a).
6. İş parçaları tablaya bağılandığından dolayı ekipmanların taşınması zordur.
7. Her kaynak sonunda takımın piminin girdiğı delik kapatılmalıdır(Özsoy ve Kaluç, 2002).

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada AA 2024-T3 alüminyum alaşımından levhalar sürtünme karıştırma kaynağı ile kaynak edilerek, kaynak parametrelerinin birleşebilirliğe, mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Alüminyum alaşımı levhalara farklı devirler ve ilerleme hızları uygulanarak tek taraflı alın kaynağı gerçekleştirilmiştir. Bu birleştirme işleminde kullanılan malzeme, cihaz ve işlemin nasıl yapıldığı, deney numunelerinin hazırlanışı ve mekanik özellikler ile mikro yapıların nasıl incelendiği bu bölümde açıklanmıştır.

5.1. Deney Malzemeleri

Bu bölümde, kaynak edilecek malzeme ve karıştırıcı uç tanıtılmaktadır.

5.1.1. Kaynak yapılacak esas malzeme

Bu çalışmada 4,35 mm kalınlığındaki AA 2024-T3 alüminyum alaşımı levhalar kullanılmış olup, kimyasal bileşimi Spectrolab M-5 cihazında belirlenmiştir. Çizelge 5.1' de malzemenin kimyasal bileşimi ve Çizelge 5.2' de malzemenin mekanik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.1 . Kaynak işleminde kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi

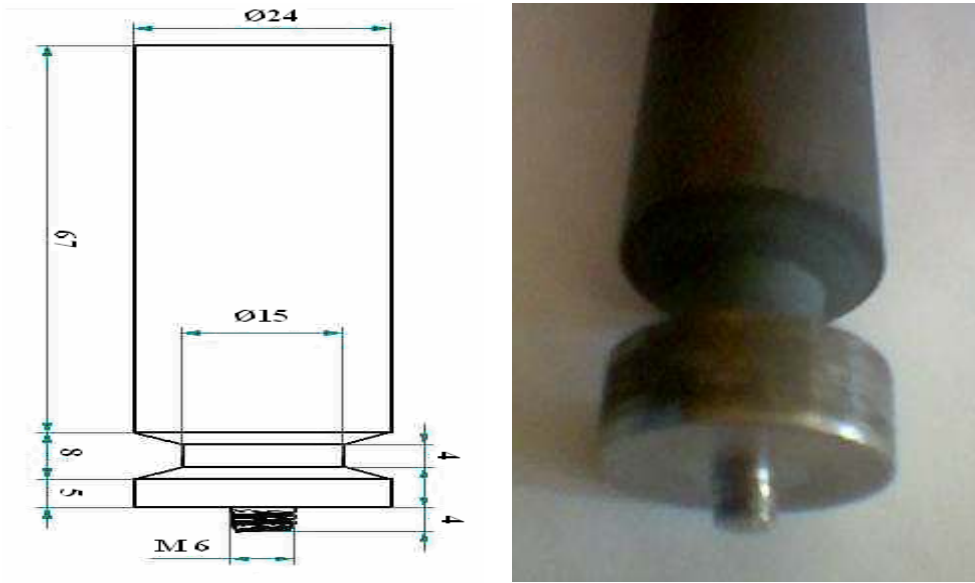
Element	Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Ti	Zn	Ni	Al
%	0,294	4,43	1,47	0,452	0,344	0,062	0,166	0,018	kalan

Çizelge 5.2. Kaynak işleminde kullanılan malzemenin mekanik özellikleri

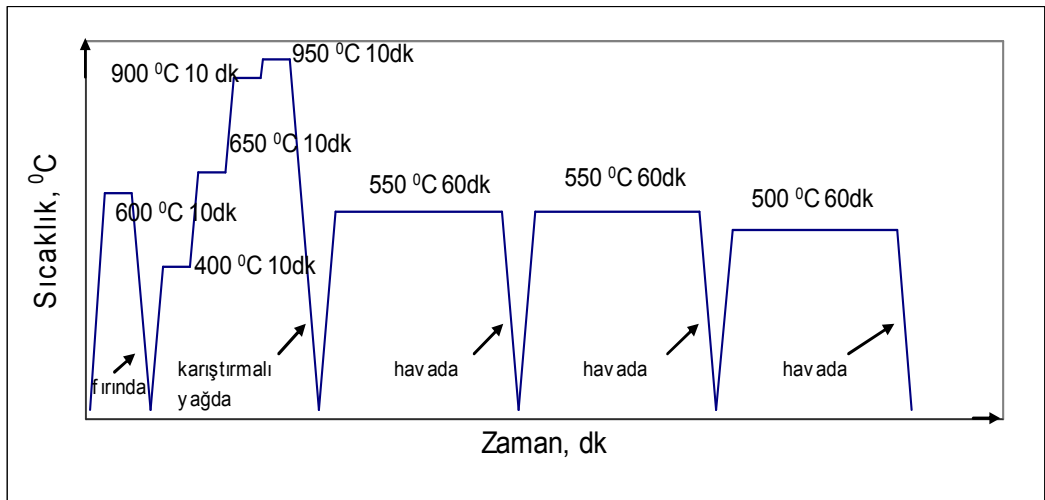
Akma mukavemeti (MPa)	Çekme mukavemeti (MPa)	% uzama	Sertlik (HV)
345	483	%18	137

5.1.2. Karıştırıcı uç geometrisi ve malzemesi

Karıştırıcı uç (pim) malzemesi 2344 sıcak iş takım çeliğinden Şekil 5.1' de gösterilen ölçülerde imal edilmiştir. İstenilen ölçülere getirilen pim ucuna M6 paftası ile diş açılmıştır. Hazırlanan karıştırıcı uca (pim) Şekil 5.2' de gösterilen zaman-sıcaklık diyagramındaki ısı işlemler uygulanmıştır. Isıl işlem sonucunda karıştırıcı ucun sertlik değeri 55 R_C olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.1. Deneylerde kullanılan karıştırıcı ucun teknik resmi ve fotoğrafı



Şekil 5.2. Karıştırıcı uca uygulanan ısı işlemler

5.2. Deneyde Kullanılan Tezgah

Sürtünme karıştırma kaynak işlemi, maksimum 1600 dev/dk devir sayısına sahip 10 Kw gücündeki yarı otomatik freze tezgahında gerçekleştirilmiştir. Kaynak yapılacak parçalar orijinal levhadan, uzun kenarı hadde doğrultusunda olmak üzere 210 mm uzunluğunda, 90 mm eninde kesilerek frezenin tablası üzerinde alın altına bağlama pabuçlarıyla tespit edilmiş ve kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3' de kaynak edilecek parçaların freze tezgahına bağlanması gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Kaynak edilecek parçanın freze tezgahına bağlanış şekli

5.3. Deney İçin Seçilen Kaynak Parametreleri

Sürtünme karıştırma kaynak işleminde alüminyum alaşımı malzemeye kaynak işlemi öncesinde herhangi bir yüzey ve ısıl işlem yapılmamış, levhalara kaynak ağzı açılmamıştır. Kaynağa tabi tutulacak levhalar, uzun kenarları temas edecek şekilde freze tezgahı tablasına bağlama pabuçları yardımıyla bağlanmıştır. 2344 sıcak iş takım çeliğinden yapılan 24 mm omuz çaplı karıştırıcı uç frezenin düşey miline monte edilerek Çizelge 5.3' de verilen kaynak parametreleri kullanılarak levhalar tek taraflı kaynak edilmiştir.

Çizelge 5.3 . Kaynak işleminde kullanılan işlem parametreleri

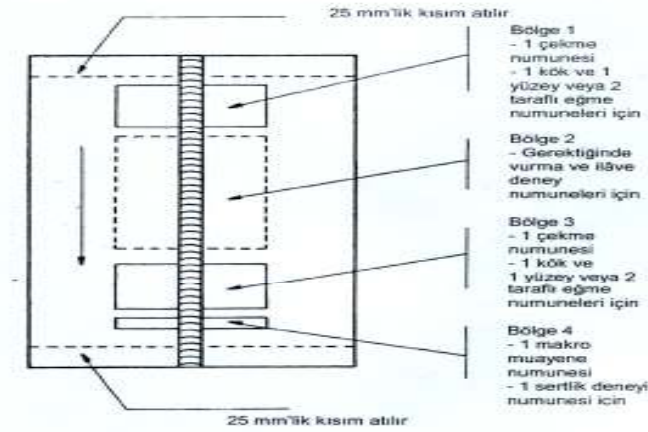
Devir Sayısı, n (dev/ dk)	Numune No	İlerleme Hızı, V (mm/dk)
160	1	25
	2	50
	3	100
	4	125
315	5	25
	6	50
	7	100
	8	125
400	9	25
	10	50
	11	100
	12	125
630	13	25
	14	50
	15	100
	16	125

SKK kaynak işleminde, frezenin bağlama pabucuna alın altına yerleştirilen kaynak parçalarının ek yerinin merkezine 4 mm çapında matkap ucuyla delik açılmıştır. Bu işlemin amacı, karıştırıcı ucun dişli kısmının kaynak edilecek malzemeye kolay bir şekilde dalmasını sağlamaktır. Karıştırıcı ucun omuz kısmı (faturalı yüzeyi) kaynak edilecek parçalar ile temas edinceye kadar düşey yönde ilerleme sağlanmıştır. Karıştırıcı ucun yatay yöndeki ilerleme hareketine başlamasından önce her bir kaynak işleminde yeterli ısı girdisinin sağlanması için karıştırıcı ucun omuz kısmı ile parçalar arasında 1 dakikalık sürtünme uygulanmıştır. Daha sonra karıştırıcı uca Çizelge 5.3 deki parametrelere uygun olarak ilerleme hızı uygulanmıştır. Kaynak edilecek levha ile temasa geçen karıştırıcı ucun omuz kısmının yüzeyden bir miktar içeriye dalması sebebiyle karıştırıcının dişli ucunun freze tablasına temas etmemesi için 4,35 mm. kalınlığındaki deney numunelerinde 4mm uzunluğunda karıştırıcı ucu kullanılmıştır.

5.4. Metalografik ve Mekanik Testler İçin Numunelerin Hazırlanması

Kaynak işlemlerinden sonra numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Her bir numunenin kaynak yüzey görüntüleri fotoğraf ile görüntülenmiştir. Görsel muayeneden geçen levhalardan, yapılacak deney planına göre TS EN 288-3 standardına

uygun deney numuneleri şerit testerede soğutma sıvısı kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 5.4). Kaynaklı levhaların başlangıç ve bitiminden itibaren 25 mm' lik kısımları kesilerek atılmıştır. Bunun sebebi kaynağın başlangıç ve bitiminde oluşabilecek hatalı bölgeleri kullanmamaktır.



Şekil 5.4. TS EN 288-3' e göre test numunelerinin kaynaklı levhadaki yeri

Bu çalışmada deney planına göre makro ve 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 yapısının ve kritik sertlik değerlerinin belirlenmesidir.

5.4.1. Makroyapı ve mikroyapı incelemeleri

Makroyapı ve mikroyapı incelemeleri için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi MMF Makine Mühendisliği laboratuvarındaki Nikon Aclipse L 150 marka görüntü analizörü kullanılmıştır. Yapı incelemeleri için kaynaklı parçaların 4.35mm kalınlığındaki kesiti aynı laboratuvardaki Struers Tegra-Pol-21 cihazında, 1000 meş kademesine kadar zımparalama ve 3µm' luk pasta ile parlatılarak hazırlanmıştır. Dağlama işlemi için keller ayracı (95 ml su, 1 ml HF, 1.5 ml HCL, 2,5 ml HNO₃) kullanılmıştır

5.4.2. Mikrosertlik Ölçümleri

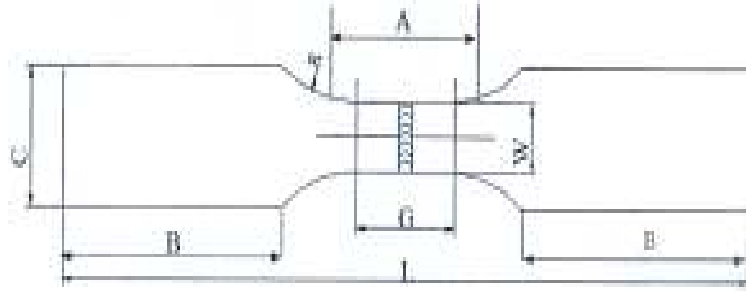
Kaynaklı parçaların sertlik ölçümleri için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi MMF Makine Mühendisliği Bölümü Laboratuvarındaki Future-Tech FM-700 marka ve model mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri için kaynaklı parçanın 4,35 mm kalınlığındaki yüzeylerine makro ve mikroyapı incelemelerinde belirtilen zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri uygulanmıştır. Sertlik ölçümünde 100 gr yük ve 10 sn süre kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri kaynak doğrultusuna dik kesitin ekseninde ve eksenin 1 mm üst ve alt doğrultusunda 2 mm aralıklarla yapılmıştır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Mikrosertlik ölçümlerinin yapıldığı noktaların şematik gösterimi (1: taban, 2: merkez, 3: üst)

5.4.3. Çekme deneyleri

Çekme deneyleri Şekil 5.5’de verilen standart çekme numuneleri kullanılarak, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Metalurji Enstitüsü Laboratuvarında bulunan 250 KN kapasiteli Shimadzu marka çekme cihazında 1mm/dk çekme hızı kullanılarak yapılmıştır. Numuneler kaynak numunesinden kaynak dikişine dik yönde soğutma sıvısı kullanılarak kesilmiş ve Şekil 5.6’ da gösterilen ölçülerde freze tezgahında hazırlanmıştır. Her deney parametresi için iki çekme numunesi test edilerek değerler alınmıştır.



Standart Deney Parçası	(mm)
G: Ölçü uzunluğu	40 ± 1
W: Genişlik	12
T: Kalınlık	4,35
R: Yuvarlama yarıçapı, min.	10
L: toplam uzunluk, min	180
A: Gövde uzunluğu, min	84
B: Kavrama uzunluğu	38
C: Kavrama genişliği (yaklaşık)	18

Şekil 5.6. Kaynaklı malzemedен çıkartılan standart çekme deney numunesi şekli ve ölçüleri

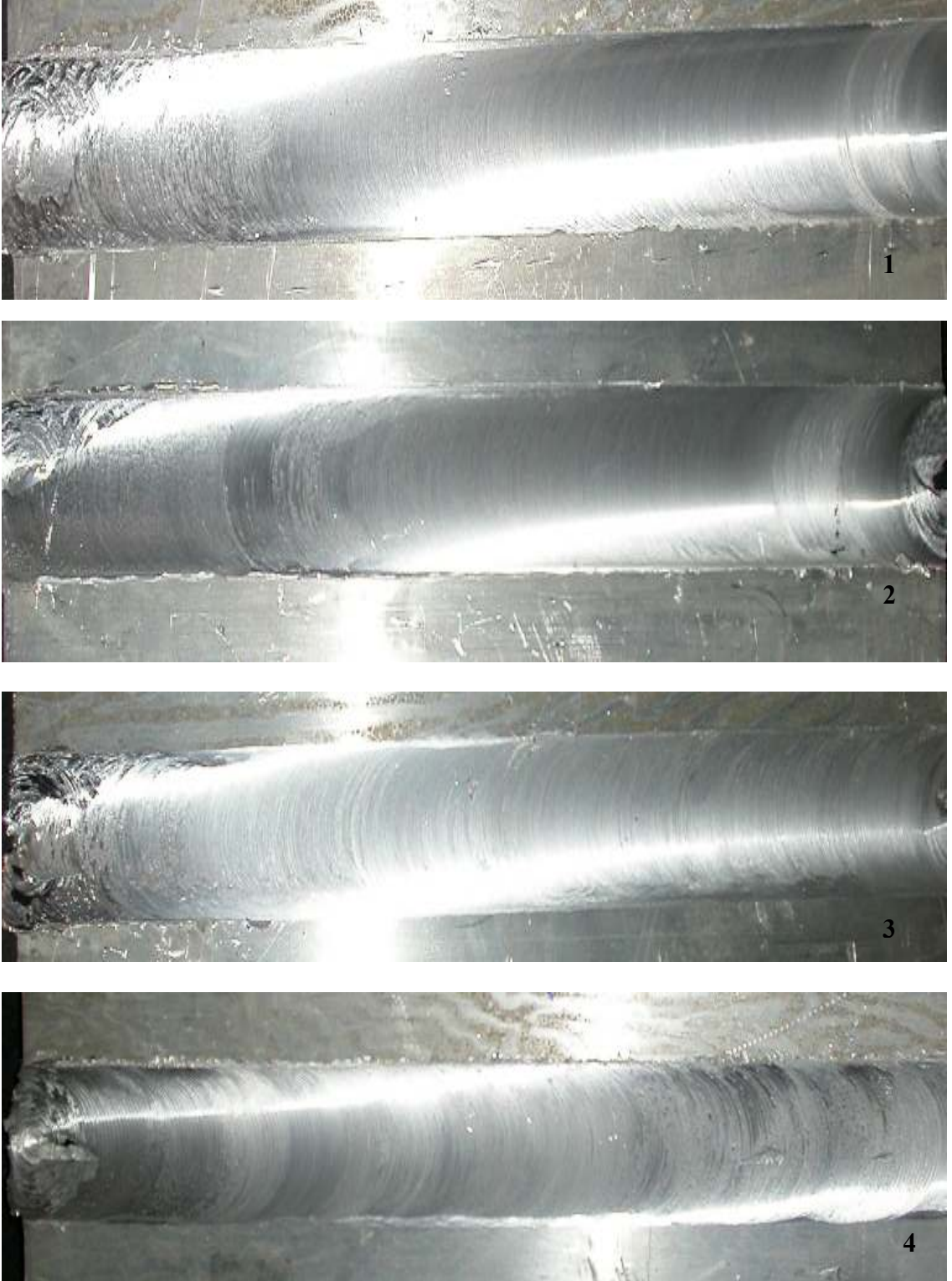
6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Deney sonuçları, görsel, makroyapı, mikroyapı, incelemeleri ve mekanik testler yapılarak incelenmiştir.

6.1. Görsel inceleme sonuçları

Kaynaklanmış numunelerin çıplak gözle yapılan incelemelerinde; SKK ile elde edilen kaynak yüzeylerinin temizleme veya herhangi bir kaynak sonrası işlem gerektirmeyecek şekilde düzgün olduğu ve yüzey pürüzlülüğü yönünden, ergitme kaynak yöntemleri ile elde edilenlerden oldukça üstün oldukları görülmüştür.

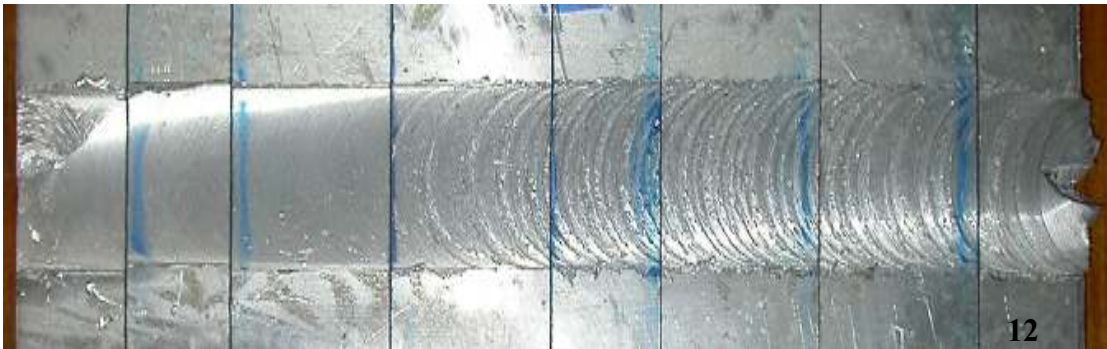
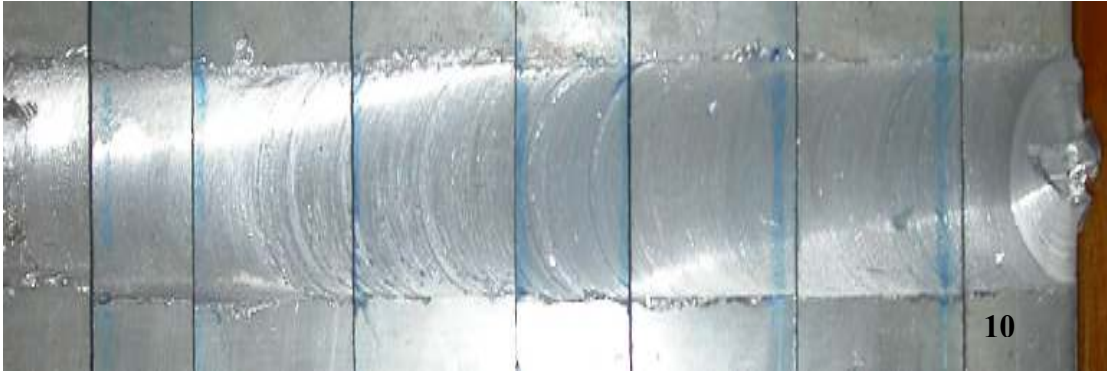
Aynı devir sayısında ilerleme hızının artmasıyla ve aynı ilerleme hızında devir sayısının artmasıyla kaynak dikişindeki soğan halkaları şeklinde oluşan yüzey pürüzlülüğünün arttığı gözlenmiştir (Şekil 6.1-6.4). Soğan halkalarındaki pürüzlülüğün artmasının sebebi, ısı girdisinin fazla olması nedeniyle sürüklenen metal kütlesinin artmasıdır.



Şekil 6.1. Kaynak işlem parametrelerine bağlı olarak dikiş profilleri n:160 dev/dk, 1: V:25 mm/dk, 2: V:50 mm/dk, 3: V:100 mm/dk, 4: V:125 mm/dk



Şekil 6.2. Kaynak işlem parametrelerine bağlı olarak dikiş profilleri n:315 dev/dk, 5: V:25 mm/dk, 6: V:50 mm/dk, 7: V:100 mm/dk, 8: V:125 mm/dk



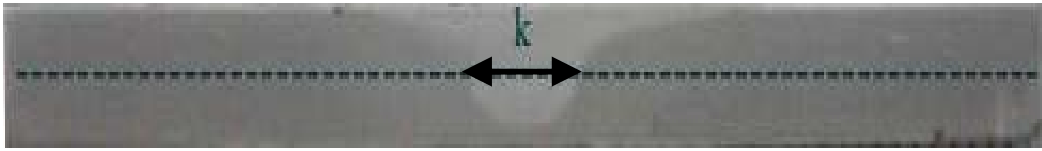
Şekil 6.3. Kaynak işlem parametrelerine bağlı olarak dikiş profilleri n:400 dev/dk, 9: V:25 mm/dk, 10: V:50 mm/dk, 11: V:100 mm/dk, 12: V:125 mm/dk



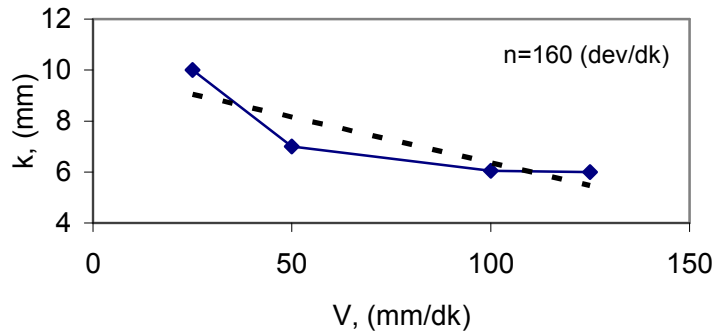
Şekil 6.4. Kaynak işlem parametrelerine bağlı olarak dikiş profilleri n: 630 dev/dk, 13: V:25 mm/dk, 14: V:50 mm/dk, 15: V:100 mm/dk, 16: V:125 mm/dk

6.2. Makroyapı inceleme sonuçları

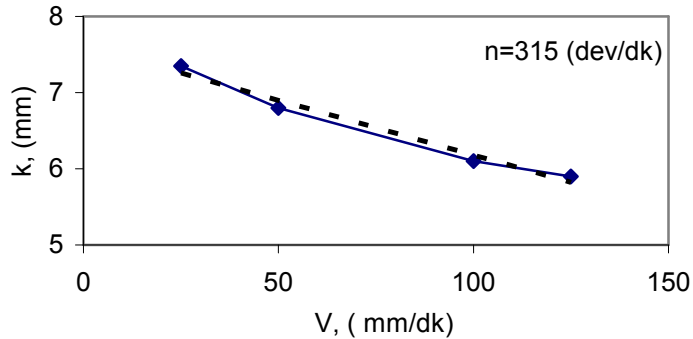
Kaynaklı numunelerin çekirdek bölgelerinin genişlikleri (k), kaynaklı kesitin ekseninde ölçülmüştür (Şekil 6.5). Şekil 6.6-6.9 da sabit devir sayıları için çekirdek genişliğinin ilerleme hızıyla değişimi gösterilmektedir. Şekillerden de görülebileceği gibi sabit bir devir sayısı için, artan ilerleme hızıyla birlikte karıştırma süresi azaldığından çekirdek bölgesinin genişliği de azalmaktadır.



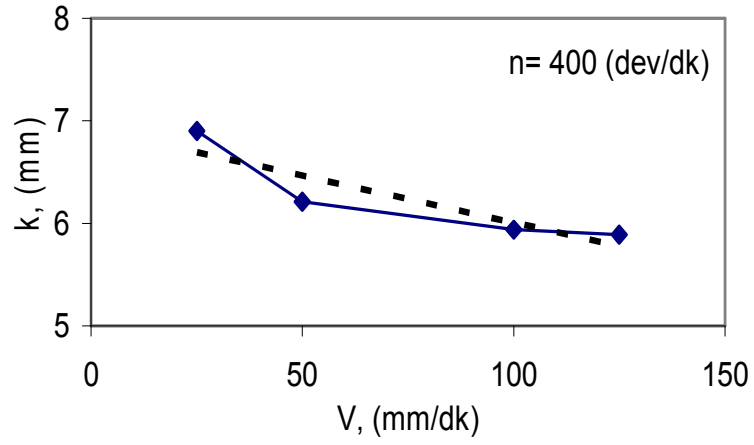
Şekil 6.5. Kaynak çekirdek genişliğinin ölçüldüğü yer



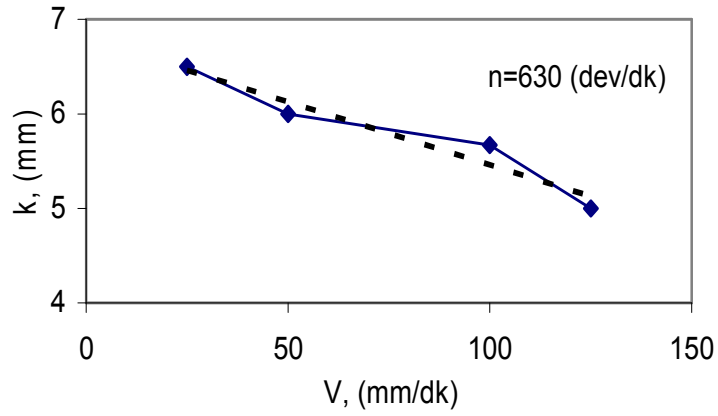
Şekil 6.6. n:160dev/dk için ilerleme hızı ile kaynak çekirdek genişliğinin değişimi



Şekil 6.7. n:315dev/dk için ilerleme hızı ile kaynak çekirdek genişliğinin değişimi



Şekil 6.8. n:400dev/dk için ilerleme hızı ile kaynak çekirdek genişliğinin değişimi

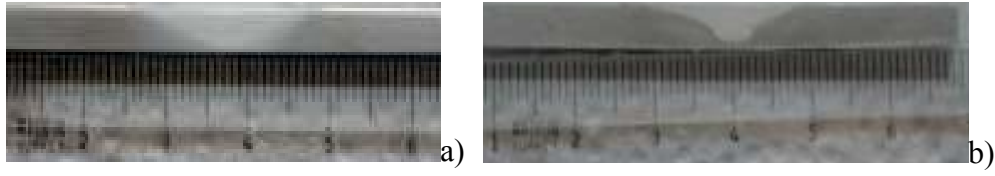


Şekil 6.9. n:630dev/dk için ilerleme hızı ile kaynak çekirdek genişliğinin değişimi

Numunelerin ilerleme hızı / devir sayısı (V/n) oranları ise Çizelge 6.1 de verilmiştir. Şekil 6.10 da 25/160 ve 125/160 V/n oranına sahip numunelerin kaynak çekirdek bölgesi genişlikleri gösterilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi artan V/n oranıyla kaynak çekirdek bölgesi genişliği de azalmaktadır. Bunun sebebi V/n oranının artmasıyla kaynak metalindeki karışmanın ve ısı girdisinin daha az olmasıdır. Malzeme akışının kolay olması büyük bir kaynak çekirdek bölgesi oluşturmaktadır. Elde edilen sonuçlar Gharacheh et.al.'un (2006) bulgularıyla uyusmaktadır.

Çizelge 6.1. Kaynaklı numunelerde ilerleme hızı/devir sayısı (V/n) oranı ile kaynak bölgesi genişliğinin değişimi

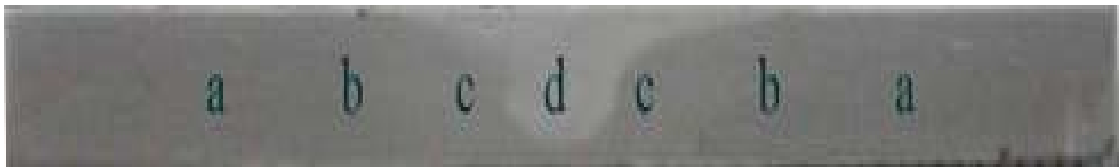
Numune	Devir sayısı , n (dev/dk)	İlerleme hızı , V (mm/dk)	V/n	k (mm)	Numune	Devir sayısı , n (dev/dk)	İlerleme hızı , V (mm/dk)	V/n	k (mm)
1	160	25	0,156	10	9	400	25	0,062	6,9
2	160	50	0,312	7	10	400	50	0,125	6,21
3	160	100	0,625	6,05	11	400	100	0,25	5,94
4	160	125	0,781	6	12	400	125	0,312	5,89
5	315	25	0,079	7,35	13	630	25	0,039	6,5
6	315	50	0,158	6,8	14	630	50	0,079	6
7	315	100	0,317	6,1	15	630	100	0,158	5,67
8	315	125	0,396	5,9	16	630	125	0,198	5



Şekil 6.10. Kaynak çekirdek bölgesi genişliklerinin V/n oranı ile değişimi a) V/n: 25/160 b) V/n: 125/160

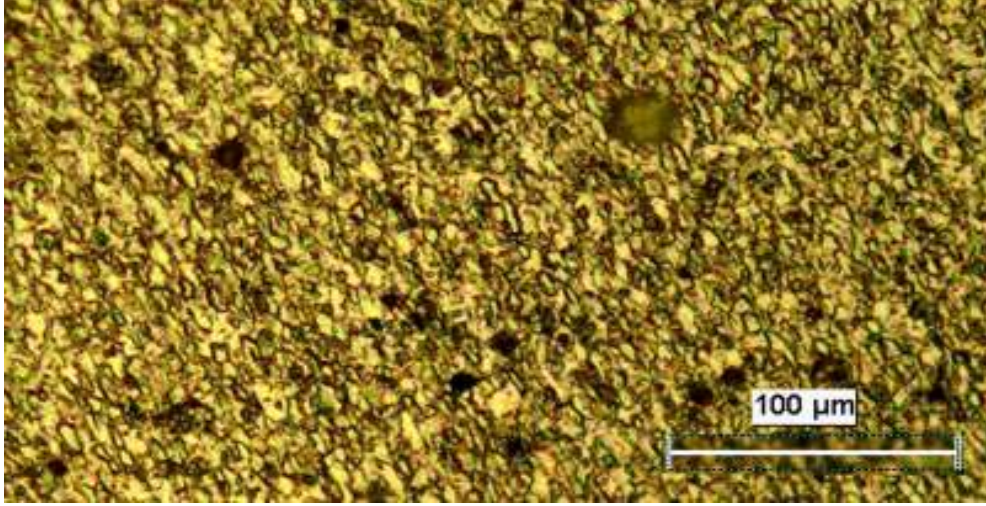
6.3. Mikroyapı inceleme sonuçları

SKK yapılmış parçaların kaynak yönüne dik kesitlerinde mikroyapı incelemesi sonucu dört farklı bölge tespit edilmiştir. Şekil 6.11' de gösterildiği gibi bu bölgeler esas metalden kaynak merkezine doğru sırayla; esas metal (a), ısı etkili bölge (b), termomekanik etkilenen bölge (c) ve çekirdek (d)' dir.



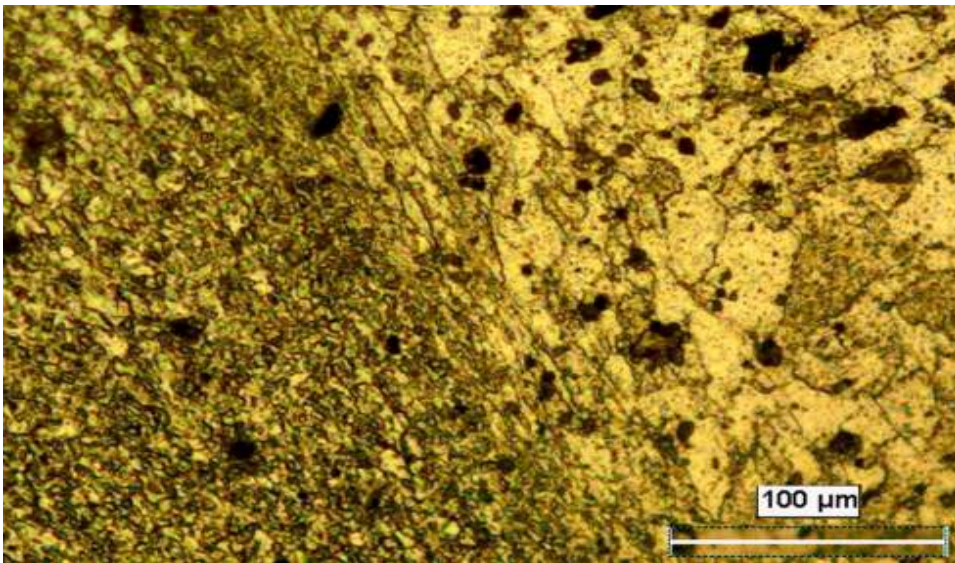
Şekil 6.11. SKK yapılmış deney numunelerinin kesitindeki mikroyapı bölgeleri (a: esas metal, b: ısı etkili bölge, c: termomekanik etkilenen bölge ve d: çekirdek).

Çekirdek bölgesi, tam yeniden kristalleşmiş ince tanelerden (ortalama tane büyüklüğü 5,5 μm) oluşmuştur ve TMEB tarafından çevrenmiştir (Şekil 6.12).



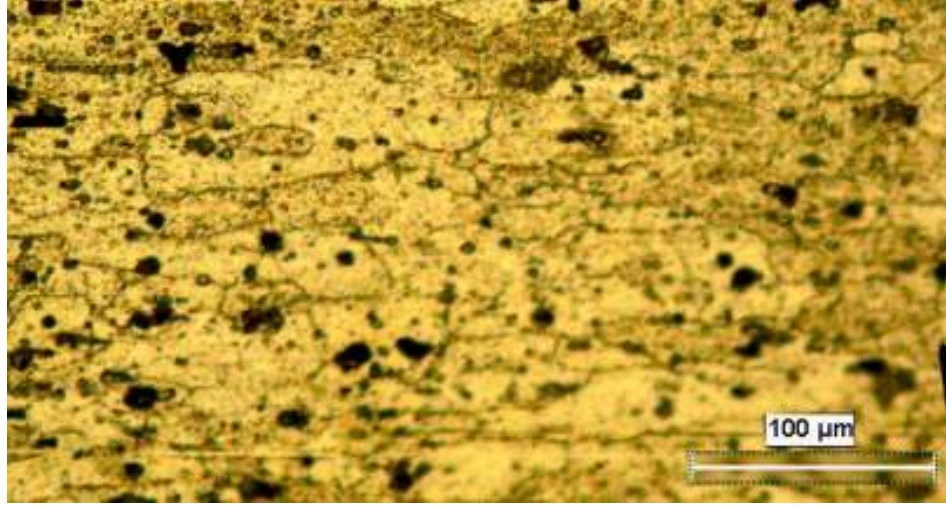
Şekil 6.12. 15 nolu deney numunesine ait çekirdek bölgesinin mikroyapı fotoğrafı (X200, Keller)

TMEB' de, başlangıçtaki taneler plastik deformasyon etkisiyle deforme olmuş ve (dönmüş ve uzamış) ortalama boyutu 27,6 μm olan kaba taneli yapıya dönüşmüştür (Şekil 6.13). Deformasyon etkisiyle, ince taneli tamamen yeniden kristalleşmiş çekirdek bölgesine kıyasla dislokasyon yoğunluğu bu bölgede artmaktadır.



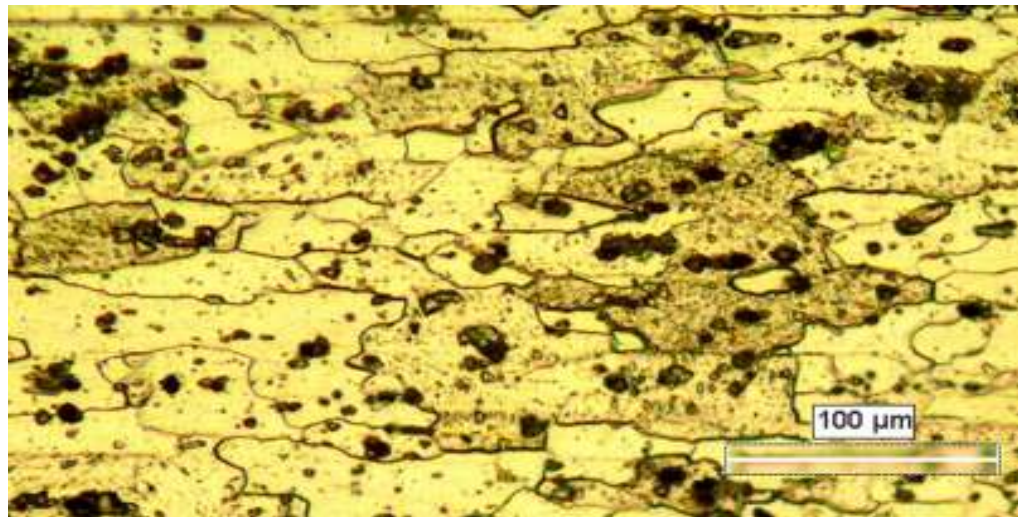
Şekil 6.13. 15 nolu deney numunesine ait çekirdek ve TMEB' yi gösterir mikroyapı fotoğrafı (X200, Keller)

Kaynak merkezinden daha uzakta ise ısı etkili bölge (IEB) gelir ki; tane boyutunun kaynaktan çok fazla etkilenmediği, sadece ısı etkisiyle çökelti boyutunun esas metal bölgesindeki (~4,05µm) daha büyük olduğu (~4,55µm) görülmüştür (Şekil 6.14).



Şekil 6.14. 15 nolu deney numunesine ait IEB' nin mikroyapı fotoğrafı (X200, Keller)

Şekil 6.15 de, kaynak işlemine tabi tutulmuş parçada esas metal bölgesinin mikroyapı fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 6.15. Kaynaklı deney numunelerinin esas metal bölgesinin mikroyapı fotoğrafı (X200, Keller).

Alüminyum alaşımlarına yapılan SKK' da sürüklenen ve sürülen taraflardaki TMEB yapılarının birbirinden farklı olduğu, örneğin çekirdek ile TMEB arasında sürüklenen tarafta kesin sınır olmadığını belirten çalışmalar olmasına rağmen yapılan bu çalışmada her iki bölgede de benzer mikroyapılar görülmüştür.

6.4. Mikrosertlik deney sonuçları

Yüzeyleri hazırlanan numuneler üzerinde 100gr. deney yükü kullanılarak mikrosertlik taraması yapılmıştır. Taramalar mümkün olduğu kadar eşit aralıklarla (Şekil 5.5) üç eksen doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

Farklı devir sayısı ve kaynaklama hızlarında kaynaklanan numunelerin kaynak merkezinden ana metale doğru sertlik ölçümleri alınarak, çekirdek ile esas metal arasındaki sertlik değerleri çizelge 6.2-6.17' de ve bu değerlerin grafikleri de Şekil 6.16-6.31' de verilmiştir. Her bir şekilde o numunenin çekilmiş makro yapı fotoğrafı da yer almaktadır. Şekil 6.32-6.35 sabit devir sayısı için farklı ilerleme hızlarındaki sertlik dağılımını; Şekil 6.36-6.39 ise sabit ilerleme hızında artan devir sayılarındaki sertlik dağılımını göstermektedir.

Çizelge 6.2. n: 160 dev/dk devir sayısı, V: 25 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-20			-19	136,3
-18			-17	129,7
-16		143,4	-15	136,3
-14	138,7	131,9	-13	127,5
-12	125,7	122,6	-11	120,2
-10	118,8	110,6	-9	101,7
-8	106,5	89,5	-7	85,8
-6	91,5	99,4	-5	88,8
-4	94,4	102,6	-3	94,9
-2	94,4	94,7	-1	99,7
0	98	100,8	1	92,8
2	99,9	101,3	3	101,1
4	93,8	99,9	5	97,3
6	97,7	109,7	7	90
8	100,9	94,9	9	99,8

Çizelge 6.2 devam ediyor

10	112,9	87,9	11	111,3
12	125,5	107,8	13	122,7
14	136,3	121,8	15	129,3
16	147,6	131,1	17	133,6
18		136,1	19	

Çizelge 6.3. n: 160 dev/dk devir sayısı, V: 50 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-16	135,5	137,9	-15	132,1
-14	135,1	138,7	-13	124,8
-12	138,1	137,1	-11	124,5
-10	132,5	125,4	-9	123,6
-8	122,1	102,7	-7	120,3
-6	115,3	97,8	-5	109,2
-4	105,8	102,9	-3	96,2
-2	100	94,8	-1	100,3
0	99	97,5	1	92,1
2	95,5	101	3	95,6
4	103,6	95,1	5	101,2
6	112,2	95,1	7	92,9
8	126,3	111,8	9	110,6
10	133,1	129,9	11	125,7
12	135,2	133,1	13	132,2
14	142,7	133,4	15	136,9
16		131,4	17	

Çizelge 6.4. n: 160 dev/dk devir sayısı, V: 100 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-20		140,4	-21	
-18	133,8	130	-19	
-16	128,8	134,4	-17	
-14	131,3	124,1	-15	138,2
-12	141,2	131,7	-13	129,9
-10	138,1	134,3	-11	139,8
-8	139,3	136	-9	127,1
-6	129,1	112,4	-7	112,8
-4	118,6	109,2	-5	103,8
-2	110,7	103,3	-3	102,5
0	98,2	104,5	-1	101
2	99,2	109,5	1	104,9

Çizelge 6.4 devam ediyor

4	122,6	101,8	3	118,7
6	130,1	99,5	5	125,8
8	135,1	107,3	7	127,7
10	142	121,6	9	127,3
12	136,2	136,3	11	126,8
14	147,3	140	13	126,5
16		139,5	15	121

Çizelge 6.5. n: 160 dev/dk devir sayısı, V: 125 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV2	HV3
-18	142,3		
-16	145,7		139,7
-14	138,1	136,3	138,7
-12	135	137,5	121,2
-10	131,8	122,8	134,4
-8	124,9	115,7	118
-6	117,9	111,8	101,4
-4	112,9	102,6	104,1
-2	106,3	106,4	106,4
0	101,9	117,2	106
2	108,1	111,8	106,9
4	117,5	103,6	105,2
6	123,3	111,7	104,9
8	137,8	117,5	106,9
10	131,8	120,2	117,1
12	147,9	131,5	131
14	141,9	136,3	137,8
16	130,1	133,4	128,8
18	138,4	135,6	130,5

Çizelge 6.6 n: 315 dev/dk devir sayısı, V: 25 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-22			-23	140,1
-20	137,2	139,5	-21	134,5
-18	134,9	138,1	-19	124,7
-16	124	129,5	-17	117,3
-14	117,5	115,9	-15	109,5
-12	112,6	105,8	-13	107,9
-10	99,4	90,6	-11	93,2
-8	96,4	93,8	-9	91,5
-6	89,7	102,3	-7	94,3

Çizelge 6.6 devam ediyor

-4	93,6	106,3	-5	97,1
-2	101,7	105,4	-3	99,9
0	97,8	104,5	-1	105,8
2	104	106,2	1	102,5
4	94,6	107	3	101
6	96,3	117	5	92,2
8	90,7	100,9	7	87,4
10	89,9	89,2	9	98
12	112	101,7	11	108,8
14	119,1	119,3	13	111,2
16	133,3	123,2	15	125,5
18	130	131,2	17	127,9
20	141,4	134	19	133,8

Çizelge 6.7 n: 315 dev/dk devir sayısı, V: 50 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-20	144,4		-19	132,4
-18	134,9	146,6	-17	129,4
-16	134,5	139,4	-15	124,4
-14	129,7	131	-13	111
-12	114,7	120,1	-11	106,8
-10	103,6	110,8	-9	91,2
-8	93	96,6	-7	92,8
-6	101,2	98,1	-5	98,2
-4	96,9	112,2	-3	101,8
-2	102,7	111,1	-1	107,4
0	100,4	114,6	1	104,7
2	100,1	123,6	3	101,8
4	99,5	109,6	5	100,6
6	101,6	102,5	7	102,6
8	105	95,6	9	102,9
10	121,2	106,7	11	112,4
12	117	129,2	13	123,7
14	140,6	141,9	15	128,9
16	137,2	140,1	17	130,7

Çizelge 6.8. n: 315 dev/dk devir sayısı, V: 100 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-18	139,2		-19	131,8
-16	143,9	142,1	-17	131,4
-14	138,4	142,8	-15	126,9

Çizelge 6.8 devam ediyor

-12	132	128,5	-13	134,8
-10	132,7	122,2	-11	132,4
-8	118,7	109,4	-9	111,2
-6	119,3	108	-7	106,8
-4	119,4	104,8	-5	105,2
-2	103,3	119,4	-3	103,5
0	109,4	116,4	-1	110,2
2	104,2	115,4	1	105,9
4	110,6	108,3	3	103,5
6	116,1	107	5	115,3
8	128,2	116,8	7	130,2
10	137,8	133,1	9	129,4
12	146,1	138,5	11	127
14	141	128,2	13	119,8
16		133,3	15	126,7

Çizelge 6.9. n: 315 dev/dk devir sayısı, V: 125 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-18	135,3	130,5	-19	
-16	118,9	121	-17	
-14	116,4	126,2	-15	
-12	123,8	130,5	-13	132,6
-10	130,8	141	-11	126,1
-8	128,5	128,5	-9	134,3
-6	116,8	107,4	-7	118,1
-4	107,6	107	-5	103,8
-2	106,6	112,1	-3	105,9
0	109	107,6	-1	108,8
2	107,1	109,5	1	111,6
4	114,5	106	3	104,6
6	120,6	107,4	5	113,3
8	125,4	111	7	114,1
10	122,5	121,7	9	121,6
12	133,6	134,5	11	127,8
14	137,3	125,7	13	131,3
16		131,2	15	

Çizelge 6.10. n: 400 dev/dk devir sayısı, V: 25 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-20		143,7	-21	
-18	141,4	141,8	-19	133,8

Çizelge 6.10 devam ediyor

-16	135,2	133,7	-17	128,5
-14	126,8	124,7	-15	124,2
-12	121,7	117,7	-13	113,6
-10	106,4	100,9	-11	107,3
-8	101	87,5	-9	99,5
-6	94,3	94,2	-7	90,9
-4	98,2	109	-5	90,1
-2	96,3	103	-3	95
0	97,4	109,5	-1	99,9
2	92,8	108,7	1	99,8
4	98	102,2	3	99,6
6	93,2	101,6	5	94,6
8	95,1	92,5	7	89,2
10	101,8	87,8	9	92,1
12	105,3	104,1	11	101,1
14	117,3	115,5	13	106,3
16	125,4	121,4	15	124,3
18	132	126,8	17	124,2
20	140,1	131,8	19	130,3
22		142,1	21	133,9

Çizelge 6.11. n: 400 dev/dk devir sayısı, V: 50 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-18	144,7	145,5	-19	146,4
-16	132,6	137,8	-17	139,2
-14	134,5	128,1	-15	126
-12	116	117,2	-13	118,6
-10	116	102,3	-11	108,4
-8	103,3	107,8	-9	110,6
-6	100,5	107,1	-7	100,1
-4	97,4	105,8	-5	93,8
-2	105,1	112,1	-3	102
0	106,5	113,2	-1	107,5
2	102,9	113,6	1	108,1
4	103,7	107,3	3	97,7
6	109	101	5	104,7
8	112,9	99,4	7	108,3
10	125,5	114,7	9	118
12	138,8	126,7	11	121,8
14	134,9	140,4	13	131,9
16	149,2	141	15	133,9

Çizelge 6.12. n: 400 dev/dk devir sayısı, V: 100 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-16	140,4	138,3	-17	
-14	132,9	135,1	-15	142
-12	129,9	128	-13	129,7
-10	118,2	106,9	-11	127
-8	113,8	107,6	-9	112,7
-6	116,5	110,3	-7	107
-4	116,1	116,2	-5	110,4
-2	124,6	126,5	-3	105
0	110,8	124,9	-1	124,5
2	110,4	121	1	119,9
4	108,7	114,7	3	111,8
6	105,8	115,1	5	113,6
8	119,7	109,5	7	105,5
10	121,2	110,9	9	114,2
12	129	120,4	11	119,1
14	133,9	134,7	13	122,9
16	141	131,5	15	129,6
18	140,5	136	17	132,7
20		137,2	19	

Çizelge 6.13. n: 400 dev/dk devir sayısı, V: 125 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-20	132,8		-21	
-18	120,3		-19	124,5
-16	130,3		-17	110,7
-14	134,4	135,7	-15	124,2
-12	130,9	129,2	-13	122
-10	131,3	119,3	-11	121,9
-8	120,3	106,6	-9	111
-6	112,4	106,9	-7	101,5
-4	111,4	123,3	-5	101,5
-2	110,6	118,7	-3	104,1
0	108,6	127,1	-1	118
2	110,4	123,2	1	110,3
4	106	116,9	3	111,3
6	105,9	110	5	103,1
8	113,3	109,1	7	104,6
10	125,6	114,5	9	119,3
12	128,7	123,7	11	125,1
14	133,1	138,9	13	126,4
16	136,7		15	121

Çizelge 6.13 devam ediyor

18			17	118,9
20			19	114,5
22			21	113,9
24			23	123,7

Çizelge 6.14. n: 630 dev/dk devir sayısı, V: 25 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-20	145,8	142,5	-19	
-18	142,3	139,9	-17	138,1
-16	133,8	136,5	-15	132
-14	126,2	126,5	-13	128,8
-12	111,7	103,6	-11	109,8
-10	99,1	97,3	-9	98,5
-8	88,3	94,1	-7	92,6
-6	94,8	102,9	-5	91,9
-4	96,8	120,9	-3	95
-2	107,1	120,3	-1	101,8
0	100	117,6	1	102,8
2	95,2	103,6	3	103,1
4	99,5	105	5	97,3
6	98,3	98,9	7	92,4
8	102	96,5	9	92,7
10	108,5	107,7	11	97,6
12	118	114,2	13	110,9
14	127,7	133,4	15	125
16	140,5	132,5	17	123,6
18	143,2	133,4	19	137,6
20		138,9	21	
22		146,9	23	

Çizelge 6.15. n: 630 dev/dk devir sayısı, V: 50 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-20			-19	137,5
-18		134	-17	116,4
-16		111,6	-15	128,5
-14		134,6	-13	126,7
-12	144,3	129,4	-11	130,6
-10	139,8	126,9	-9	127,7
-8	127,5	130,7	-7	119,3
-6	119,8	109,4	-5	111,8

Çizelge 6.15 devam ediyor

-4	112,1	97,9	-3	106,2
-2	102	101,8	-1	108,8
0	103,3	119	1	107,5
2	94,9	117,1	3	103,3
4	115,4	101,9	5	110,9
6	113,3	104,9	7	107,2
8	119,5	111,8	9	113,6
10	129,8	112,3	11	128,3
12	131,4	124,4	13	133,9
14	147,6	136,4	15	133,5
16	141,9	138,3	17	139,6

Çizelge 6.16. n: 630 dev/dk devir sayısı, V: 100 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

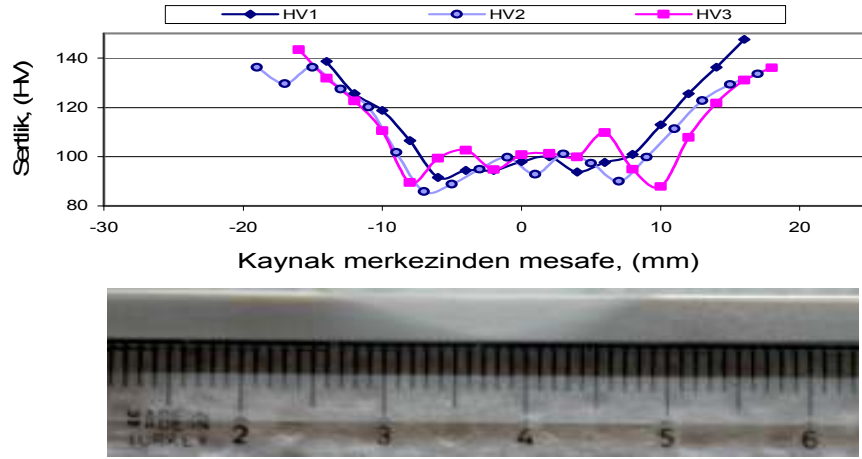
Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-14		132,4	-15	
-12	133,6	131,5	-13	
-10	130,5	134,5	-11	135,9
-8	130,4	117,5	-9	123,4
-6	120,7	105,9	-7	116,4
-4	109,2	122,5	-5	98,4
-2	108,3	126,2	-3	108,2
0	116,8	129,7	-1	118,9
2	113,4	131,7	1	131,7
4	121,7	126,3	3	133,2
6	118,8	117,7	5	110
8	123,6	111,4	7	114
10	133,7	113,6	9	122,3
12	137,9	133,2	11	129,2
14	142,3	134,4	13	145
16	134,1	135,2	15	134,9

Çizelge 6.17. n: 630 dev/dk devir sayısı, V: 125 mm/dk ilerleme hızında kaynak edilen numunenin kaynak kesitinde ölçülen sertlik değerleri

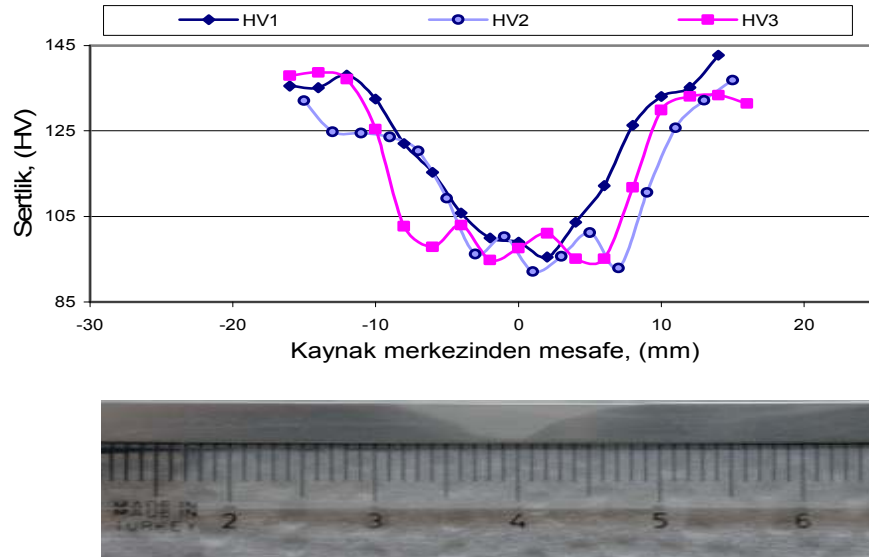
Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV1	HV3	Kaynak merkezinden mesafe, (mm)	HV2
-22			-21	138
-20			-20	130
-18		154,9	-18	130,3
-16	140,9	133,2	-17	132,4
-14	135,1	147,2	-15	122,8
-12	149,7	148,4	-12	131,9
-10	139,8	151,9	-10	132,2

Çizelge 6.17 devam ediyor

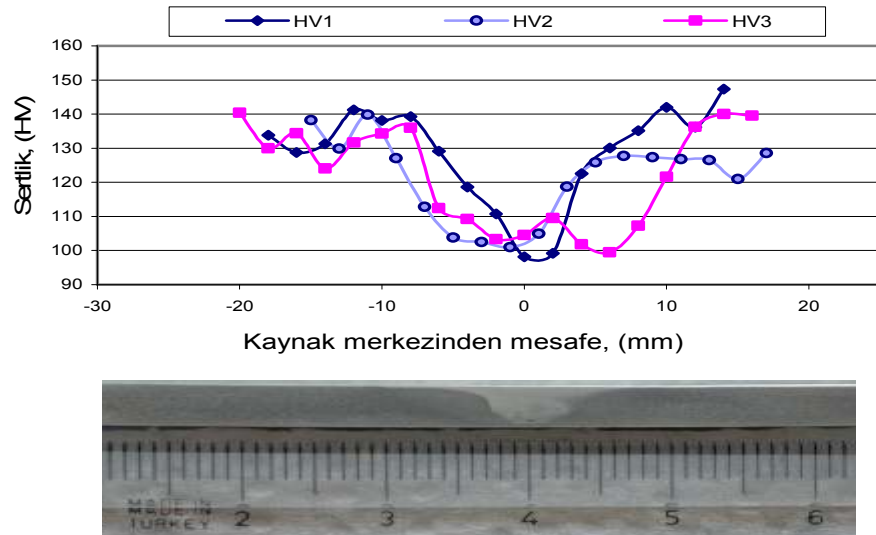
-8	149,2	138,8	-8	121,9
-6	129,9	129,5	-6	128,7
-4	130,7	127,8	-4	109,4
-2	116	122,9	-2	124,7
0	128,8	125,5	0	130,6
2	141,1	120,1	2	132,5
4	139	115,3	4	142,8
6	123,4	115,6	6	123,8
8	115,1	128,4	8	137,7
10	126,3	123,7	10	127,6
12	141,2	138,6	12	145,1
14	133,1	138,4	14	138,2
16	123,9	138,8	17	114,3
18	131,9	122,2	19	118,5
20	138,7	142	20	131



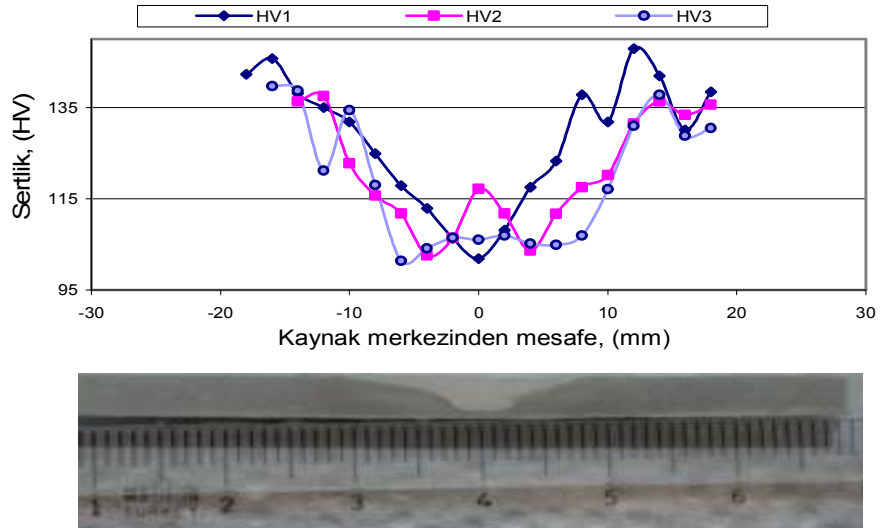
Şekil 6.16 n: 160 dev/dk ve V:25 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



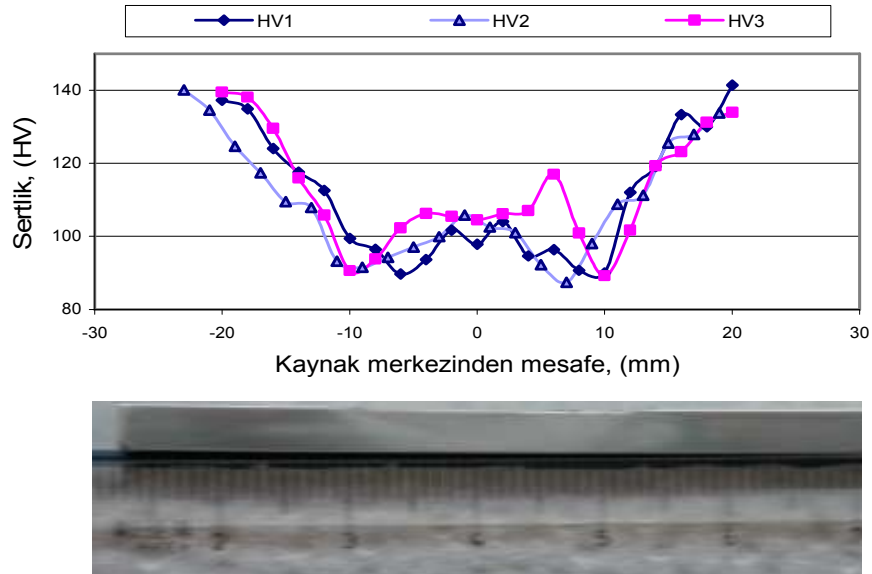
Şekil 6.17 n: 160 dev/dk ve V:50 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



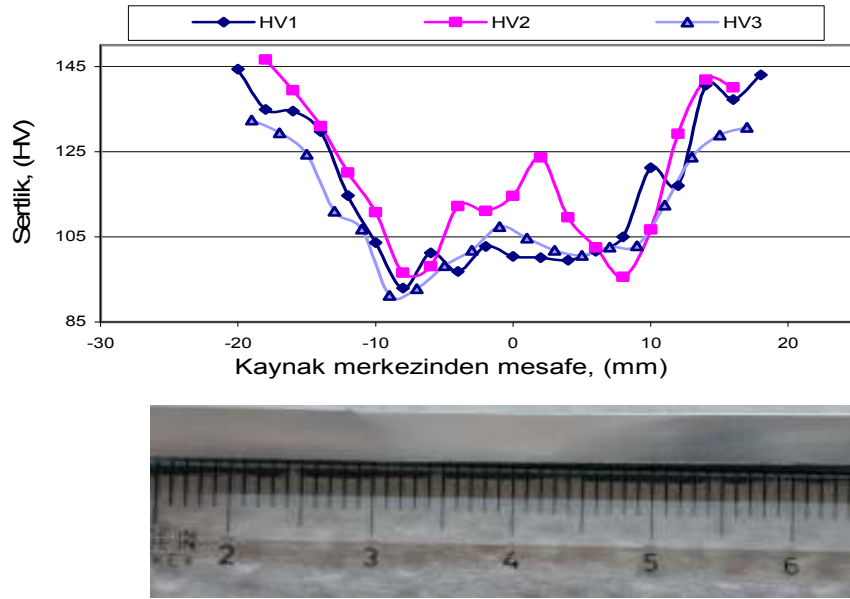
Şekil 6.18 n:160 dev/dk ve V:100 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



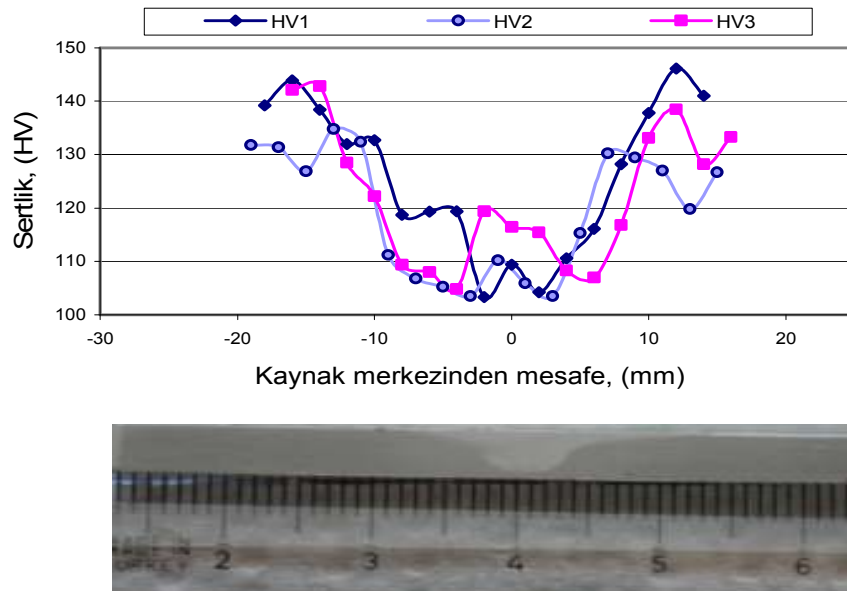
Şekil 6.19 n: 160 dev/dk ve V:125 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



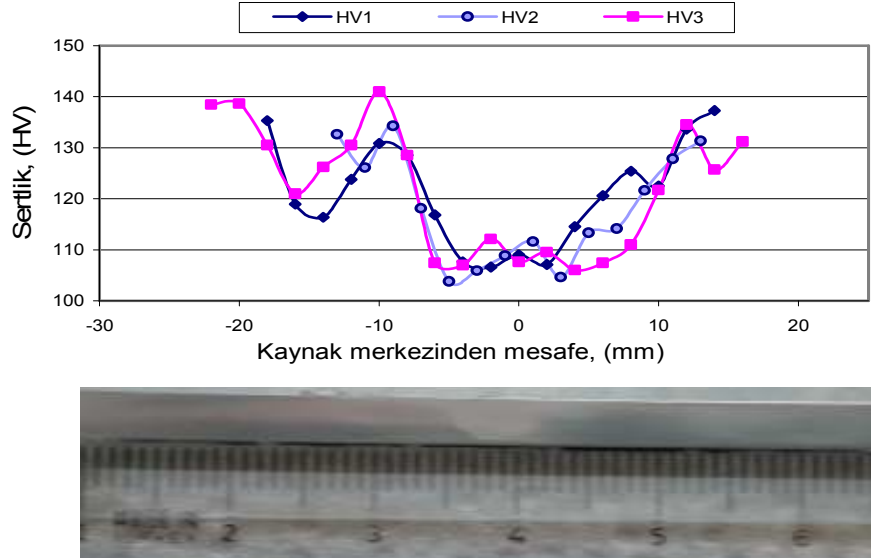
Şekil 6.20 n: 315 dev/dk ve V:25 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



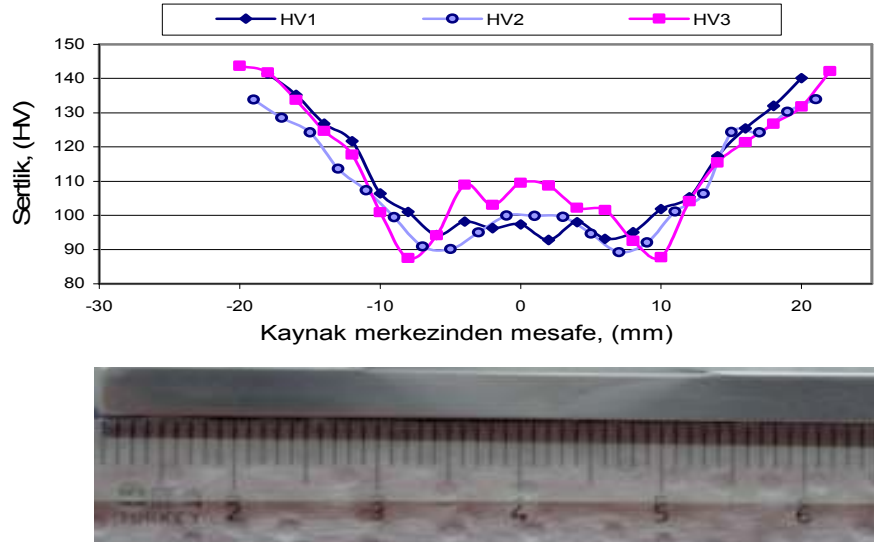
Şekil 6.21 n: 315 dev/dk ve V:50 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



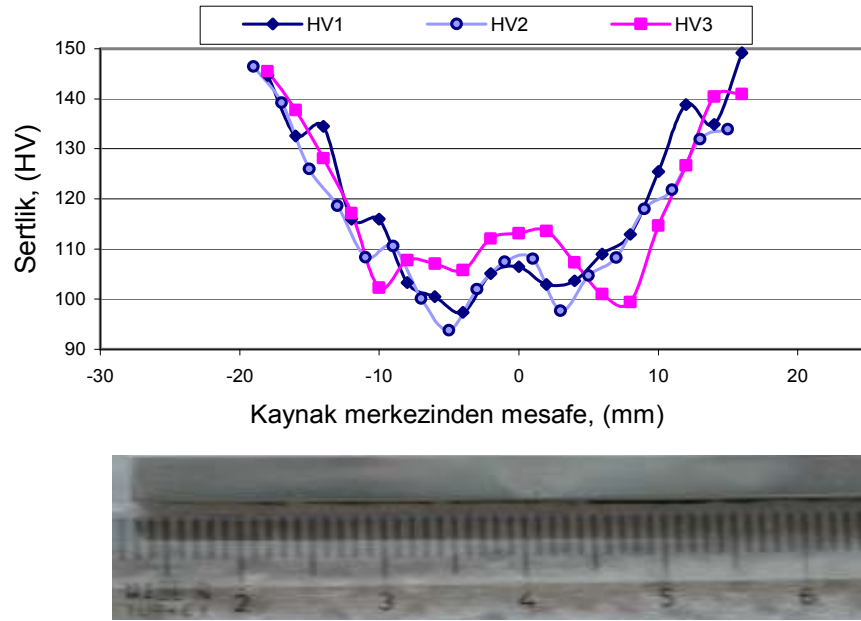
Şekil 6.22 n: 315 dev/dk ve V:100 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



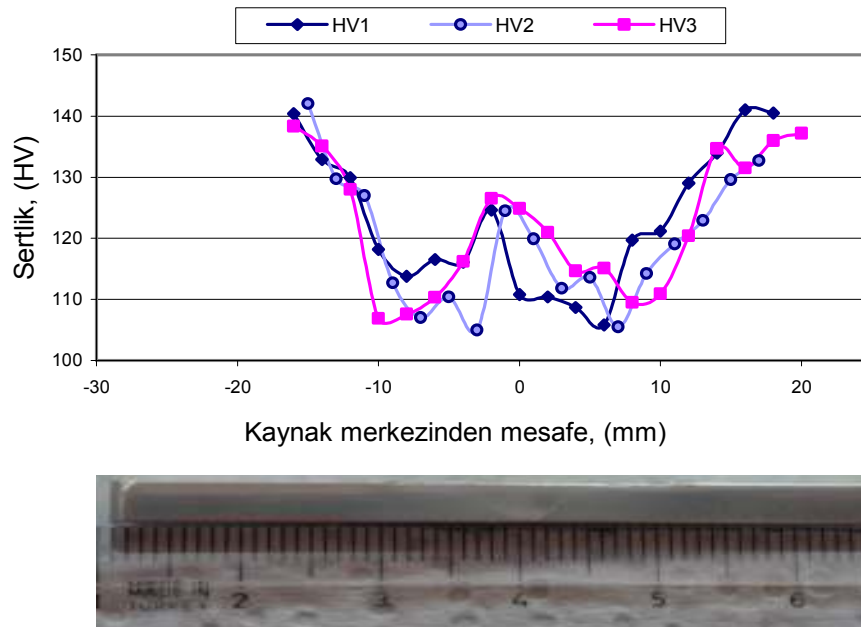
Şekil 6.23 n: 315 dev/dk ve V:125 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



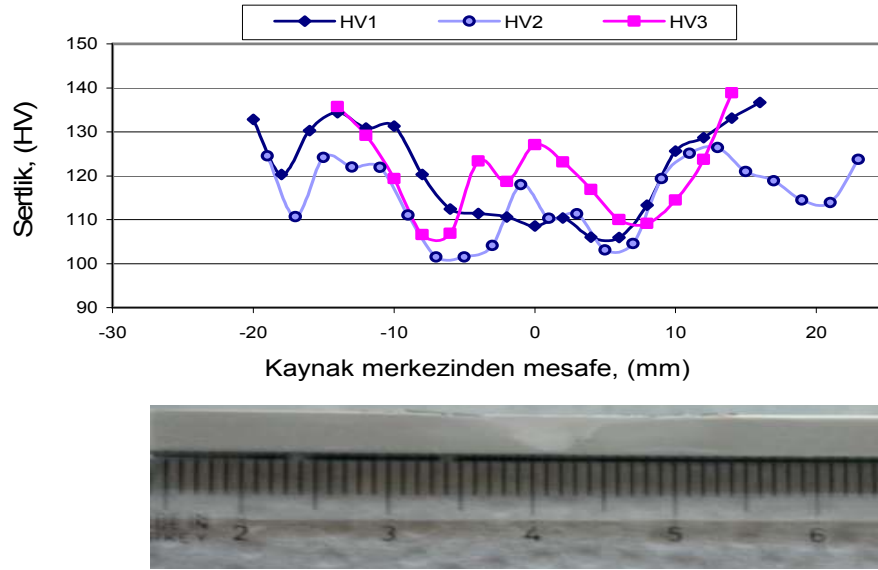
Şekil 6.24 n: 400 dev/dk ve V:25 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



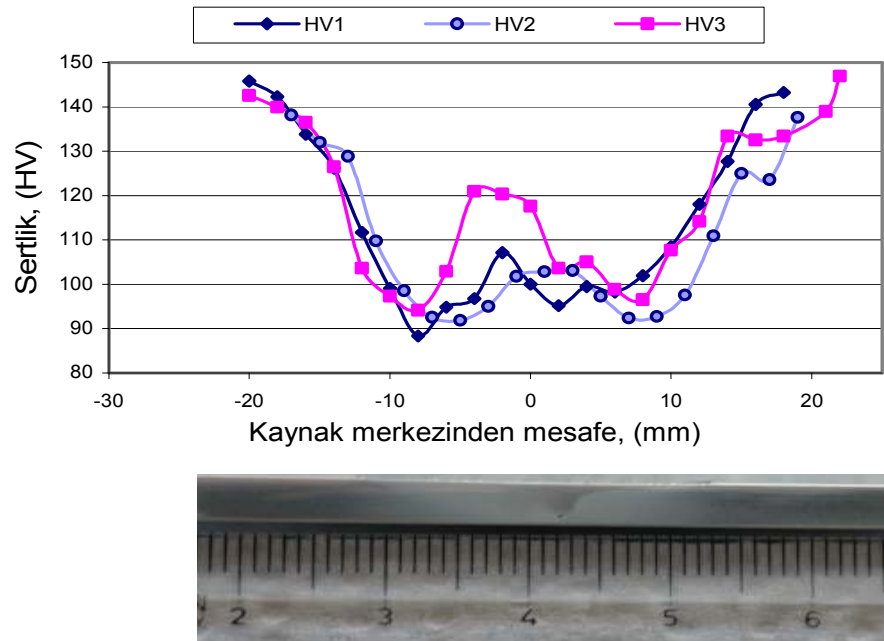
Şekil 6.25 n: 400 dev/dk ve V:50 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



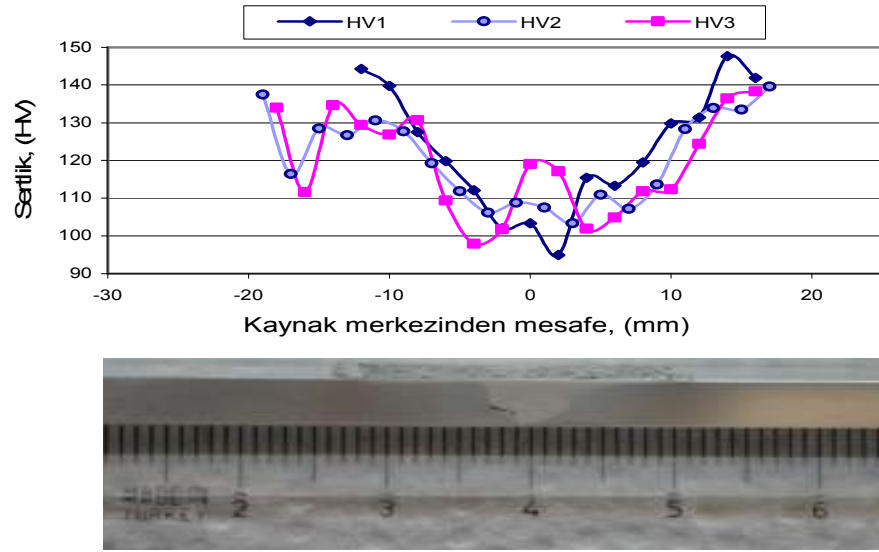
Şekil 6.26 n: 400 dev/dk ve V:100 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



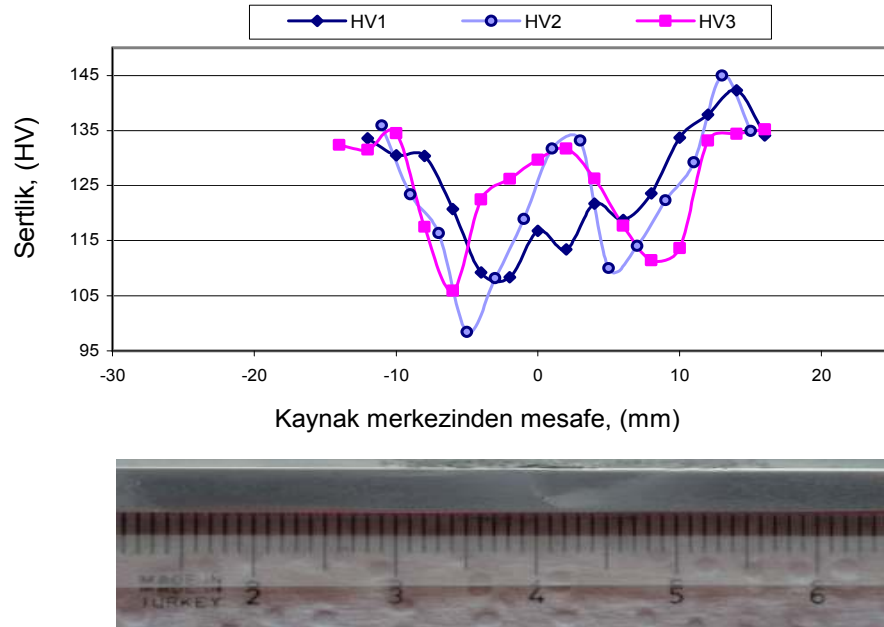
Şekil 6.27 n: 400 dev/dk ve V:125 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



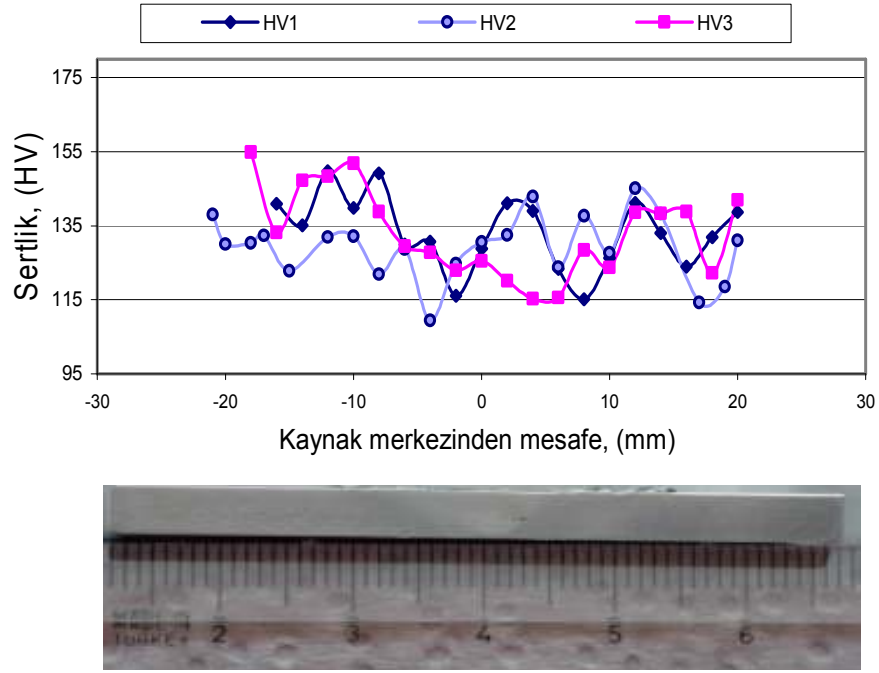
Şekil 6.28 n: 630 dev/dk ve V:25 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



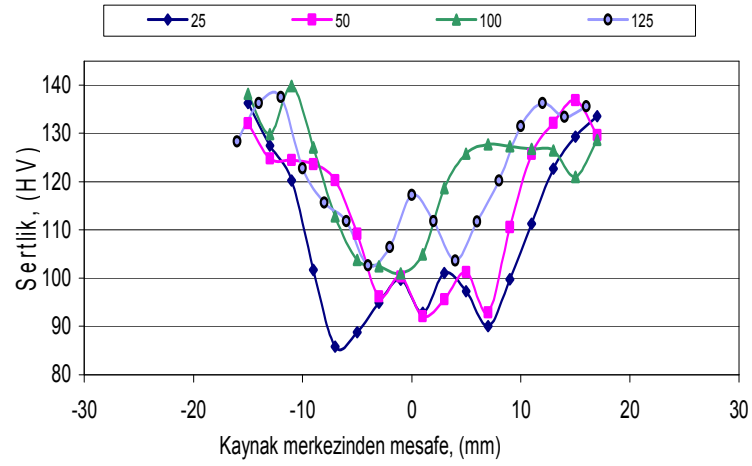
Şekil 6.29 n: 630 dev/dk ve V:50 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



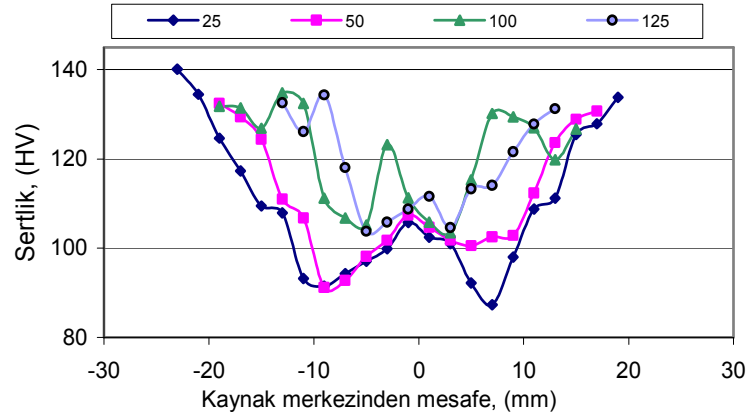
Şekil 6.30 n: 630 dev/dk ve V:100 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



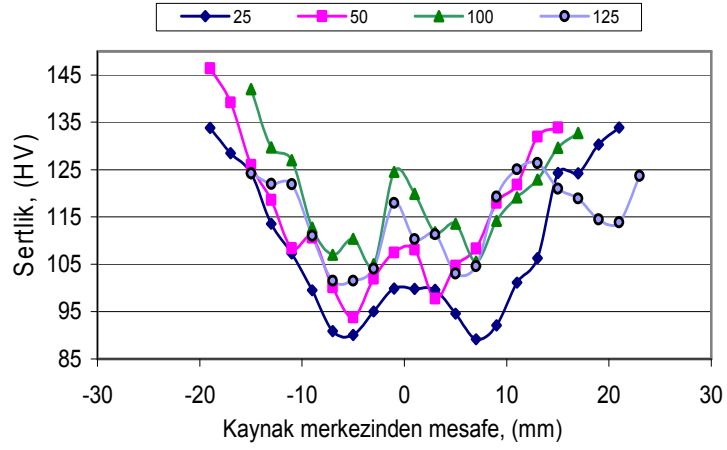
Şekil 6.31 n: 630 dev/dk ve V:125 mm/dk kaynak parametresinde kaynaklanan numunenin sertlik dağılımı ve makro yapı fotoğrafı



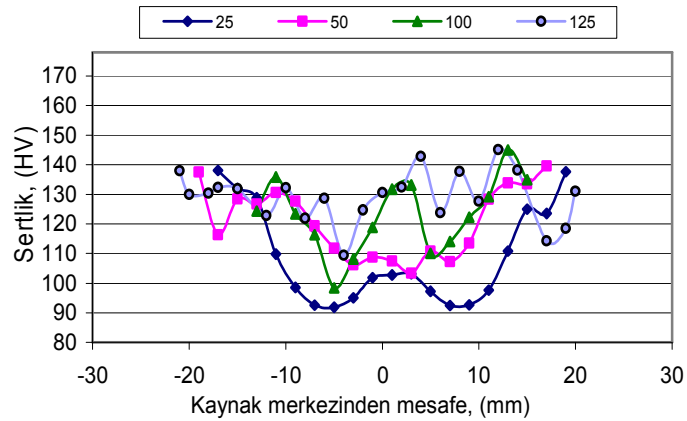
Şekil 6.32 n:160dev/dk devir sayısında ilerleme hızındaki artışla sertliğin değişimi



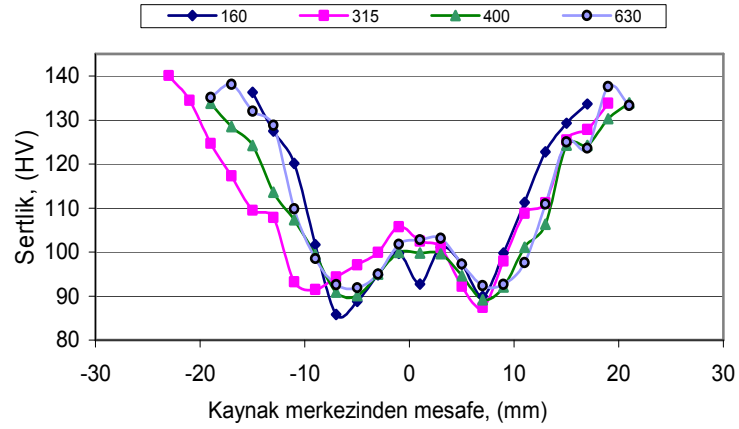
Şekil 6.33 n:315dev/dk devir sayısında ilerleme hızındaki artışla sertliğin değişimi



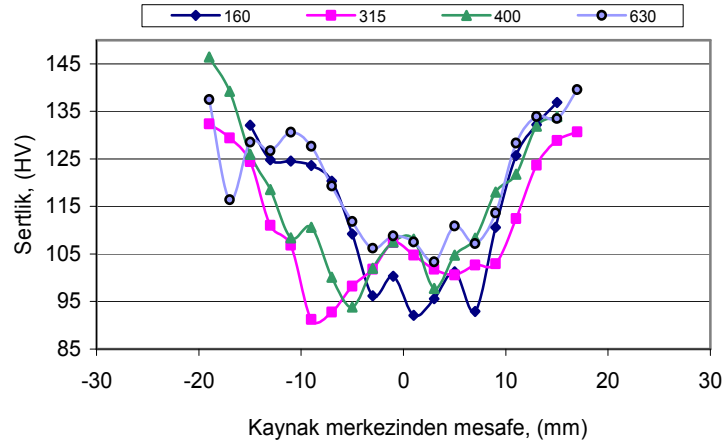
Şekil 6.34 n:400dev/dk devir sayısında ilerleme hızındaki artışla sertliğin değişimi



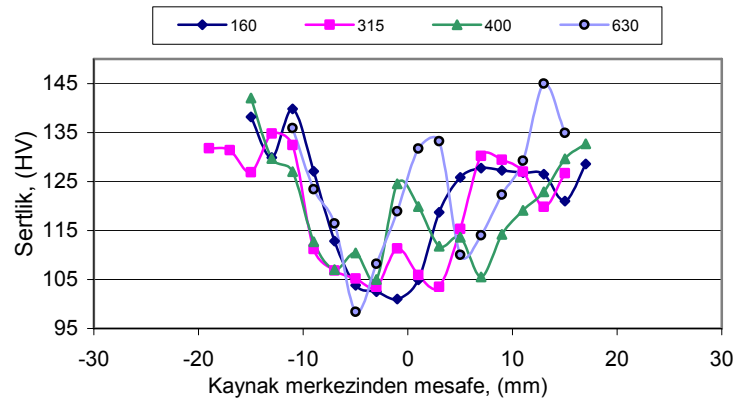
Şekil 6.35 n:630dev/dk devir sayısında ilerleme hızındaki artışla sertliğin değişimi



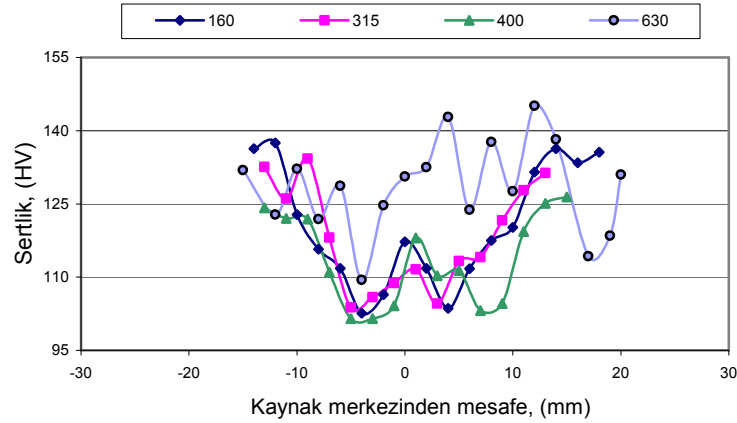
Şekil 6.36 V:25mm/dk ilerleme hızında devir sayısındaki artışla sertliğin değişimi



Şekil 6.37 V:50mm/dk ilerleme hızında devir sayısındaki artışla sertliğin değişimi



Şekil 6.38 V:100mm/dk ilerleme hızında devir sayısındaki artışla sertliğin değişimi



Şekil 6.39 V:125mm/dk ilerleme hızında devir sayısındaki artışla sertliğin değişimi

Kaynak merkezinden itibaren sertlikte ilk olarak küçük bir düşüş gözlenirken daha sonra esas metale doğru sertliğin tekrar arttığı görülmüştür. Genel olarak numunelerde kaynak merkezinden yaklaşık 6mm' lik bölgede sertliğin yüksek oluşunun bu bölgenin (TMEB) deformasyonunun en fazla olduğu bölge olmasından; dolayısıyla dislokasyon yoğunluğunun artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kaynak merkezinden esas metale doğru 12 mm. den sonra IEB' in sertlik değişimi kaynak merkezindeki kadar belirgin olmamaktadır. Esas metal sertliğine çok yakın değerler elde edilmektedir. IEB' deki sertlik değerlerinin esas metale göre biraz daha düşük çıkmasının nedeni, ısı etkisiyle başlangıçtaki çökelti boyutunun $4,05 \mu\text{m}$ ' den $4,55 \mu\text{m}$ ' ye büyümesidir.

Aynı devir sayısında kaynaklanan numunelerde ilerleme hızı artıkça sertliğin arttığı gözlenmektedir (Şekil 6.32-6.35). Bu yüksek kaynak hızlarında malzemeye giren ısı miktarının daha düşük olmasından ve böylece malzemenin daha hızlı soğumasından kaynaklanmaktadır.

Düşük kaynak hızı kullanılarak yapılan birleştirmelerde kaynak bölgesindeki sertlik düşüşünün ısı girdisinin fazla olmasından dolayı daha fazla olduğu görülmüştür. İlerleme hızı ve devir sayısının birlikte arttığı durumlarda kaynak bölgesindeki sertlik düşüşü daha az olmaktadır. Bunun sebebi yüksek hızla yapılan kaynaklardaki yüksek soğuma hızından dolayı mukavemetlendirici partiküllerin kısmen tekrar çökmesi olabilir.

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilmiş alüminyum alaşımlarında elde edilen kaynağın tipik özelliği, özellikle yaşlandırma sertleşmesi yapılmış alaşımlarda, kaynak bölgesinde sertlik ve mukavemetin düşük olmasıdır. Fakat kaynak bölgesindeki mukavemet kaybı tüm ergitme kaynak yöntemlerinde SKK yönteminden daha fazladır. 2024-T3 alüminyum alaşımının kaynak dikişinde mukavemetlendirici çökeltilerin çözünmesi sonucu malzeme yumuşar.

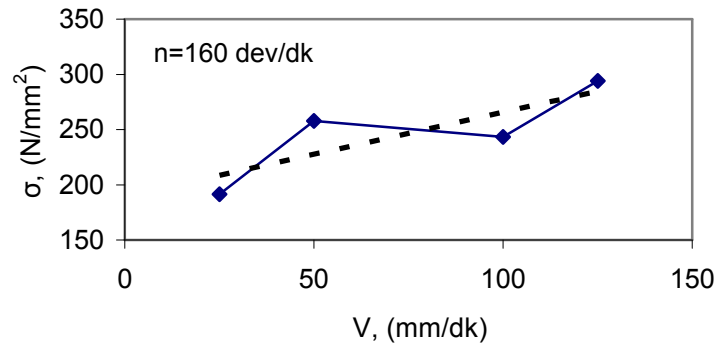
6.5.Çekme Deneyi Sonuçları

SKK ile alın altına birleştirilen levhaların çekme deneyindeki performansını belirlemek amacıyla esas malzeme de dahil her bir numuneden alınan ikişer adet çekme deney numunesi oda sıcaklığında 1 mm/dk çekme hızında çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Çekme deney sonuçları Çizelge 6.18’ de verilmiştir. Devir sayısı sabit tutularak ilerleme hızının değişmesiyle elde edilen kaynaklı bağlantının çekme mukavemeti değerleri Şekil 6.40-6.43 ve ilerleme hızı sabit tutularak devir sayısının değişimiyle elde edilen kaynaklı bağlantının çekme mukavemeti değerleri ise Şekil 6.44-6.47 de verilmiştir.

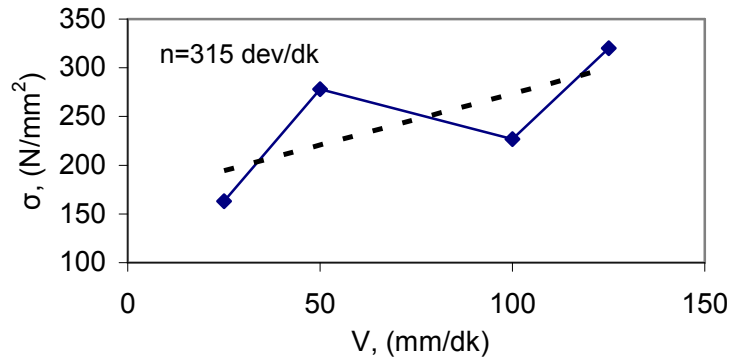
Çizelge 6.18. Kaynaklı numunelerin çekme deney sonuçları

Numune	Devir Sayısı, (dev/dk)	İlerleme Hızı, (mm/dk)	Ortalama Çekme Mukavemeti (N/mm ²)
1	160	25	191,571*
2		50	257,780
3		100	243,408
4		125	294,151
5	315	25	163,155
6		50	277,911
7		100	226,912
8		125	320,268
9	400	25	254,111
10		50	281,760
11		100	265,561
12		125	248,844
13	630	25	234,239
14		50	272,296
15		100	188,127
16		125	281,408

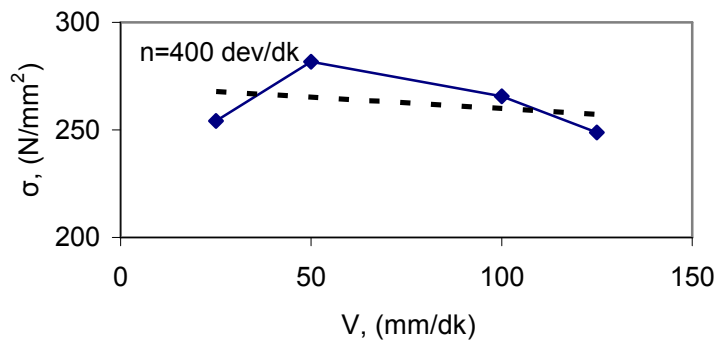
* : Akma sınırına gelmeden parçadaki çentik nedeniyle sonuç alınamadı



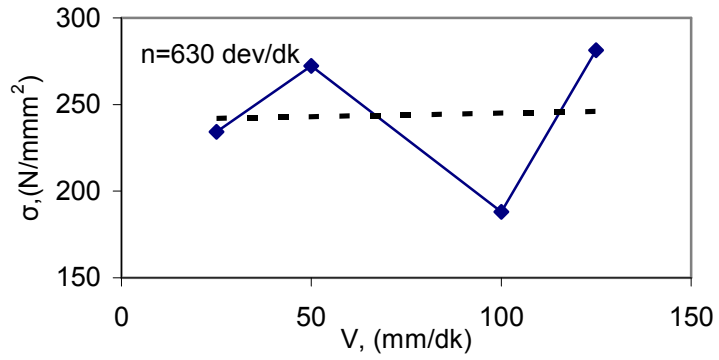
Şekil 6.40. n:160 dev/dk da ilerleme hızı ile çekme mukavemeti değişimi



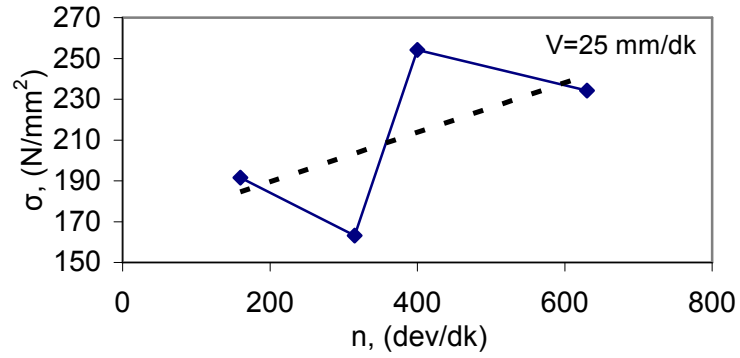
Şekil 6.41. n:315 dev/dk da ilerleme hızı ile çekme mukavemeti değişimi



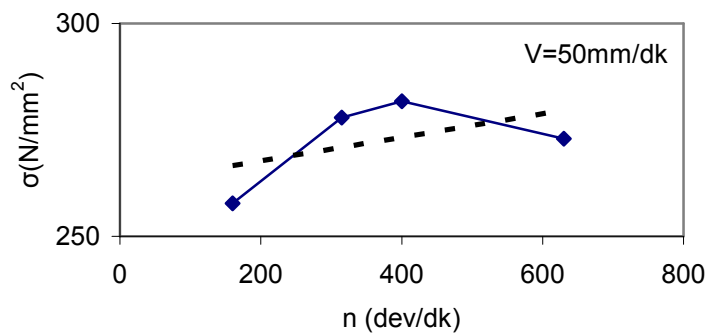
Şekil 6.42. n:400 dev/dk da ilerleme hızı ile çekme mukavemeti değişimi



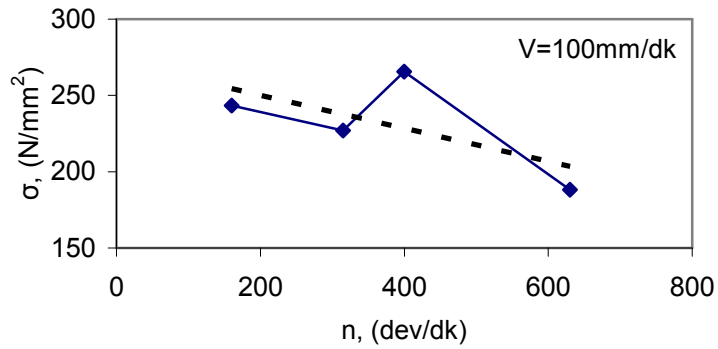
Şekil 6.43. n:630 dev/dk da ilerleme hızı ile çekme mukavemeti değişimi



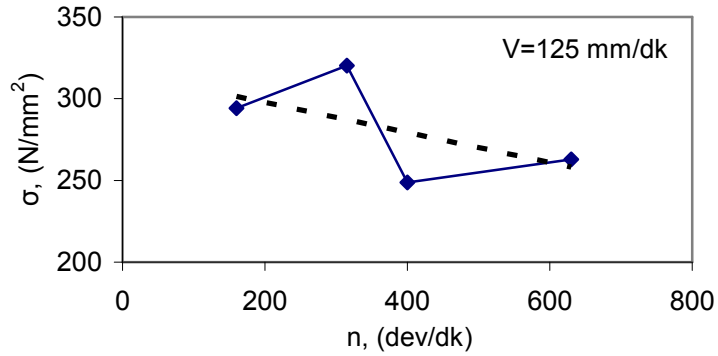
Şekil 6.44. V:25 mm/dk da devir sayısı ile çekme mukavemeti değişimi



Şekil 6.45. V:50 mm/dk da devir sayısı ile çekme mukavemeti değişimi



Şekil 6.46. V:100 mm/dk da devir sayısı ile çekme mukavemeti değişimi



Şekil 6.47 . V:125 mm/dk da devir sayısı ile çekme mukavemeti değişimi

Numunelerin geneline bakıldığında devir sayısı sabitken ilerleme hızının artmasıyla kaynaklı parçaların mukavemet değerlerinde artış gözlenmiştir. 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 düşüş gözlenmiştir. Sabit ilerleme hızında artan devir sayısı ile malzemeye giren ısı miktarı da artmakta bu da IEB'nin genişlemesine sebep olmaktadır. Bu ise malzemenin mukavemetinin düşmesine neden olmaktadır.

7. ÖNERİLER

Bu çalışmada tanıtılan sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi bir katı hal (basınç) kaynak yöntemi olup, Al alaşımları gibi ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmeleri güç malzemelerin kaynağında başarı ile uygulanabilir. Sürtünme karıştırma kaynağı, düz ve çeşitli profillerin ve levhaların alın ve bindirme kaynağında kullanılma potansiyeline sahiptir.

Mukavemetin kaynak bölgesinde esas malzemeden daha düşük olduğu durumda plastik şekil değişimi daha yumuşak olan kaynak bölgesinde oluşur. Bu fiziksel olay lokal şekil değiştirme olarak bilinir. Sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirmelerin kaynak dikişinin yumuşak olmasından dolayı çekme deneyinde yüksek uzama (iyi süneklik) beklenmesine rağmen, lazer ve elektron kaynağında olduğu gibi plastik akış sadece test edilen numunelerin merkezinde dar bir bölgede oluşmasından ve komşu esas malzeme tarafından sıkıştırılmasıyla (sıkıştırma etkisi) bu sünek dar bölge kırılma davranış gösterir. Yapısal uygulamalarda bu birleştirmelerin, mukavemet açısından uyumsuzluğu (kaynak dikişinde düşük mukavemete sahip oldukları) göz önünde bulundurulmalıdır. Sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirmelerin mekanik özellikleri kaynak sonrası ısıtma işlemi yapılarak geliştirilebilir ki bu, levhaların çözeltiye alma işleminden sonra kaynak yapılması ve kaynak sonrası yaşlandırma işlemi yapılması şeklinde uygulanmalıdır.

Kaynaklanacak malzeme kalınlıklarının yeterli olması durumunda, tek taraflı kaynak işlemi yerine çift taraflı kaynak işlemi yapılmasının, kaynaklı parçaların kesitinde oluşabilecek kaynak hatalarını minimuma indirebileceği düşünülmektedir. Bu da yapısal uygulamalarda kaynaklı bölge mukavemetinin artmasını sağlayacaktır.

Başka bir çalışmada, pim batma derinliği parametre olarak alınıp; deneyler yapılarak sonuçlar incelenebilir. Maliyet karşılaştırması yapmak ise bir başka çalışmanın konusu olabilir.

8. KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akata, E., Şahin, M. Ve İpekçi, M., 2003, Atık parçaların değerlendirilmesinde sürtünme kaynak yönteminin kullanılması üzerine bir çalışma, TMMOB Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 18-26.
- Anık, S. ve Vural, M., 1993a, Özel kaynak yöntemleri, İTÜ Makine Fakültesi, 11-129.
- Anık, S. ve Vural, M., 1993b, Elektron ışını ile kaynak, İTÜ Makine Fakültesi, 107s.
- Anık, S., 1982, Kaynak tekniği, İTÜ Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, 2.
- Anık, S., 1996, Makine mühendisliği el kitabı üretim ve tasarım, Kaynak Teknolojisi, A. Cerit (Der.), TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 2, 222s.
- Askeland, D.R., 1998, Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri, (Çev. M. Erdoğan), Nobel Yayın Dağıtım
- Ataoğlu, H., Mistikoğlu, S. ve Çam, G., 2003, sürtünme karıştırma kaynaklı bir Al-alaşımının iç yapı ve mekanik karakterizasyonu, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 22-32.
- Bradley, G.R and Jones M.N., 2000, Geometry and Microstructure of metal inert gas and friction stir welded Aluminium alloy 5383-H321, 86p.
- Çam, G., 2001, Al-alaşımaları için geliştirilen yeni kaynak yöntemleri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 3-13.
- Çam, G., 2002, Sürtünme karıştırma kaynağı ve uygulamaları, PAÜ Mühendislik Fakültesi 9. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 450-458.
- Çam, G., 2003a, Sürtünme karıştırma kaynağı ve uygulama alanları, 3. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 3, 113-124.
- Çam, G., 2003b, Sürtünme karıştırma kaynağı gelişmeler, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve sergisi Bildiriler Kitabı, 4-21.
- Çam, G., 2005, Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK): Al-alaşımaları için geliştirilmiş yeni bir kaynak teknolojisi, TMMOB Mühendis ve Makine Dergisi, 46, 541, 30-39.
- Ericsson, M. and Sandström, R., 2003, Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds and comparison with MIG and TIG, International Journal of Fatigue 25, 1379-1387.

- Freman, S. and Gren, J., 2000, Aluminium in the marine environment: an update, OCEANS 2000MTS/IEEE Conference and Exhibition, 3, 1591-1595.
- Gharacheh, M.A., Kokabi, A.H. and Daneshi, G.H., 2006, The influence of the ratio of “rotational speed/transverse speed” (ω/v) on mechanical properties of AZ31 frictional stir welds, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 5p.
- Gürleyik, Y., 1993, Alüminyum ve Alaşımları-I, TMMOB Mühendis ve Makine Dergisi, 401, 27-34.
- Kaluç, E. ve Taban, E., 2006, Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının TIG kaynağı, Makine Tek, 102.
- Kaluç, E., 1993, Plazma ile kaynak ve kesme, Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 185s.
- Karadeniz, S., 1990, Plazma tekniği, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 123s.
- Krishnan, K.N., 2002, On the formation of onion rings in friction stir welds, Material Science and Engineering, 246-251.
- Kurşun, T., 2006, Alüminyum ve alaşımlarının MIG kaynağı, Metal Makine Dergisi, 158.
- Kurt, A., 1997, Katı hal birleştirmeler için difüzyon kaynağı, TMMOB Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 42-54.
- Küleççi, M.K. ve Şık, A., 2003a, Sürtünme karıştırma kaynağı ile Alüminyum alaşımı levhaların birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 70-75.
- Küleççi, M.K. ve Şık, A., 2003a, Sürtünme karıştırma kaynağı ile Alüminyum alaşımı levhaların birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi Bildiriler Kitabı, 34-44.
- Lee, W.B. and Jung, S.B., 2004, The joint properties of copper by friction stir welding, Materials Letters, 58, 1041-1046.
- Mathers, G., 2002, The welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Limited.
- Metals Handbook, 1971, Vol:6 Welding and Brazzing.

- Mert, Ş. ve Kaluç, E., 2003, Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 103-115.
- Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., 2005, Friction stir welding, Materials Science and Engineering, 78p.
- Oerlikon, 2006, Alüminyum ve alaşımlarının kaynağı, Oerlikon.
- Oğuz, B., 1990, Demir dışı metallerin kaynağı, OERLIKON yayını
- Özsoy, M. ve Kaluç, E., 2002, Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının esasları, Mühendis ve Makine Dergisi, 13.
- Senyen, C., 2001, Alüminyum alaşımlarının kaynağında dikkat edilecek hususlar, TMMOB Kaynak Teknolojisi IV: Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 42-54.
- Smith, W.F., 2001, Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri demir dışı alaşımlar, (Çev. M. Erdoğan), Nobel Yayın Dağıtım, 2 ,602s.
- Strand, S., 2003, Joining plastics- can friction stir welding compete, Electrical Isulation Conference and Electirical Manufacturing&Coil Winding Technology Conferance, 321-326.
- Şık, A. ve Kayabaş, Ö., 2003, Sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan alüminyumun kaynağında kaynak bölgesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Gazi Üniversitesi Endüstriyel Sanatlar Eğitim Fakültesi Dergisi, 12, 30-43.
- Thomas, W.M., Johnson, K.I and Wiesner, C.S., 2003, Friction stir welding-recent developments in tool and process technologies, Advanced Engineering materials, 5, 7, 485-490.
- Thomas, W.M and Nicholas, E.D., 1997, friction stir welding for the transportation industries, Materials&Design, 18, 269-273.
- TS EN 288-3, 1997, Metalik malzemelerin kaynak prosedürlerinin şartnamesi ve onay-kısım 3: Çeliklerin ark kaynağı için kaynak prosedür deneyleri,TSE.
- Ünal, A. ve Altan, E., 1989, Alüminyumun soğuk basınç kaynağında işlem parametrelerinin kaynak dayancına etkileri, İTÜ Makine Fakültesi Malzeme ve İmal Usulleri Birimi II. Ulusal Kaynak Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 337-343.
- Welding Handbook, 1970, Section Two Welding Process: Gas, Arc and Resistance.
- Welding Handbook, 1972, Section Four Metals and Their Weldability.

Welding Handbook, 1996, Materials and Applications Part II, American Welding Society.

Zeytin, H.K., 2000a, Otomotiv endüstrisinde alüminyum kullanımı, 10. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı, 77-84

Zeytin, H.K., 2000b, Alüminyum alaşımları otomotiv endüstrisinde uygulamaları ve geleceği, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, 91s.

