

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**AA5754 VE AA6061 ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Hasan YILMAZ

HAZİRAN 2011
TRABZON

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSDİĞİ ANABİLİM DALI

**AA5754 VE AA6061 ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Mak. Müh. Hasan YILMAZ

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“MAKİNE YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14.06.2011
Tezin Savunma Tarihi : 29.06.2011

Tez Danışmanı :Yrd. Doç. Dr. Tefik KÜÇÜKÖMEROĞLU

Trabzon 2011

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Hasan YILMAZ tarafından hazırlanan

**AA5754 VE AA6061 ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK
YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 14/06/2011 gün ve 1409 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından 29/06/2011 tarihinde yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Mustafa ALTUNBAŞ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Yasin ALEMDAĞ

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Sürtünme Karıştırma Kaynağı, klasik kaynak yöntemleri ile olan belirgin farkları ile dikkat çekmektedir. Bu kaynak yöntemi, ortaya çıkması ile beraber kaynak dünyasında yeni bir çığır açmıştır. Türkiye’de de yeni yeni uygulanmaya başlanmış bir kaynak yöntemidir. Kaynak işlemi, ağırlıklı olarak mekanik bir karışıma dayandığından ergitme kaynaklarında rastlanan yüksek sıcaklık, dolgu metali ve koruyucu gaz gibi etkenlerden kaynaklanan olumsuzluklar bu kaynak yönteminde oluşmamaktadır. Özellikle çağımızda stratejik bir öneme sahip ve kaynak edilmesi zor olan alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile mekanik özelliklerinde belirgin kayıp yaşanmadan kolayca kaynak edilebilmesi bu kaynak yönteminin önemini daha da gözler önüne sermektedir. Yürütülen bu çalışmada farklı alüminyum alaşım çiftlerinin kaynak edilebilirliği ve kaynak parametrelerinin etkileri üzerine çalışılmıştır.

AA57754 ve AA6061 alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin incelenmesi adlı bu güncel çalışmayı öneren, çalışmalarım sırasında sürekli olarak beni yönlendiren ve deneysel çalışmalarımın her safhasında bizzat yakından takip ederek yardımını ve ilgisini esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU’na, sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Laboratuvar çalışmalarımda tüm olanakları kullanmamı sağlayan, bilgi ve tecrübesini benden esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Genççağa PÜRÇEK hocama ayrıca teşekkürlerimi sunarım. Mikroyapı çalışmalarımda bana her konuda yardımcı olan Araş. Gör. Fatih ERDEMİR’e mekanik testlerimi uygulamamda yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Onur SARAY’a ve Sn. Faruk ÜNKER’e, takım tezgâhları laboratuvarında görevli teknisyen arkadaşlara yardımlarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca yüksek lisans öğrenimim süresince benden desteğini esirgemeyen daire başkanım Sayın Mehmet Selçuk ÇEKİÇ’e ve her zaman yanımda olarak bana destek olan aileme teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarımın her safhasında beraber hareket ettiğim, zor anlarımda benden yardımını esirgemeyen Öğr. Gör. Semih AKTARER’e ayrıca teşekkür ederim.

Hasan YILMAZ

Trabzon 2011

TEZ BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “AA5754 ve AA6061 Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım *Yrd. Doç. Dr. Teyfik KÜÇÜKÖMEROĞLU*'nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, deneyleri ilgili laboratuarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 14/06/2011

Hasan YILMAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar (ÇİZELGELER) DİZİNİ	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı.....	2
1.2.1. SKK Tanımı ve Kaynağın Faydaları.....	2
1.2.2. SKK Terminolojisi.....	5
1.2.2.1. Yöntem İsmi.....	5
1.2.2.2. Takım Terminolojisi.....	6
1.2.2.3. Yöntem Parametreleri.....	7
1.2.2.4. Kaynak Bölgesi Sınıflandırması.....	8
1.2.2.5. Mikroyapısal Sınıflandırma.....	8
1.2.2.6. Kaynak Kalitesi.....	10
1.2.3. İşlem Parametreleri.....	13
1.2.3.1. Takım Geometrisi.....	14
1.2.3.2. Kaynak Parametreleri.....	16
1.2.3.3. Bağlantı Dizaynı.....	17
1.2.4. Kaynak Sonunda Oluşan İç Yapıların Metalürjik İncelemesi.....	18
1.3. Alüminyum ve Alaşımları.....	19
1.3.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	22
1.3.2. Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler.....	23
1.3.3. 5XXX Serisi Alaşımlar.....	25

1.3.4.	6XXX Serisi Alaşım lar.....	25
1.4.	Alüminyum Alaşım lar İçin SKK'nın Önemi.....	26
1.4.1.	Katı Çözelti Sertleşmesi Yapılmış Al-Alaşım larında SKK'nın Etkisi.....	27
1.4.2.	Yaş landırma Sertleşmesi Yapılmış Al-Alaşım larında SKK'nın Etkisi.....	28
1.4.3.	Uygulamadaki Önemli Noktalar.....	29
1.5.	Literatür Taraması.....	31
1.6.	Uygulamada Farklı Malzemelerin Bir Arada Kullanılma Gerekçesi.....	39
1.7.	Çalışmanın Amacı.....	41
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	42
2.1.	Deney Düzen eği.....	42
2.1.1.	Ana Tezgah.....	43
2.1.2.	Hidrolik Tabla.....	43
2.2.	Karış tırıcı Uç (Takım).....	44
2.3.	Deney Malzemeleri.....	47
2.4.	Kaynak Parametreleri.....	48
2.5.	Kaynak Sıcaklık Ölçümü.....	50
2.6.	Kaynağın Uygulanması.....	50
2.7.	Kaynak Yapısının İncelenmesi.....	51
2.7.1.	Çekme Deneyleri.....	52
2.7.2.	Sertlik Ölçümleri.....	53
2.7.3.	Eğme Deneyleri.....	54
2.7.4.	Metalografik İncelemeler.....	55
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	56
3.1.	Kaynak Sıcaklığının Etkileri.....	56
3.2.	Isıl İş lem İncelemeleri.....	59
3.3.	Makroyapı İncelemeleri.....	62
3.4.	Sertlik İncelemeleri.....	68
3.5.	Çekme Deneyi İncelemeleri.....	72
3.6.	Eğme Deneyi İncelemeleri.....	78
3.7.	Mikroyapı İncelemeleri.....	80
3.8.	Kaynaklı Bölgenin Kimyasal Analizi.....	90
4.	SONUÇLAR.....	93

5.	ÖNERİLER.....	95
6.	KAYNAKLAR.....	96
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

AA5754 VE AA6061 ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ

Hasan YILMAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Tefik KÜÇÜKÖMEROĞLU

2011,99 Sayfa

Bu çalışmada AA5754-H22 ile AA6061-T6 alüminyum alaşımları sürtünme karıştırma kaynak yöntemi (SKK) ile farklı parametreler altında birleştirilerek, kullanılan parametrelerin etkinliğini belirlemek amaçlanmıştır. İki farklı takım dönme hızı, üç farklı takım ilerleme hızı ve üç farklı takım baskı kuvveti belirlenerek toplam 18 adet deney yapılmıştır. Birleştirilen numunelere çekme, eğme ve mikrosertlik testleri uygulanmış, görsel ve mikroyapısal olarak kaynak yapıları incelenmiştir. Gerçekleştirilen kaynak işlemleri difüzyonsuz yapıda oluşan mekanik birleşmeler şeklinde oluşmaktadır. Yapılan incelemeler sonunda başarısız bir kaynak yapısı ile karşılaşılmamıştır.

Yapılan değerlendirmeler sonucunda birleştirilen malzemelerin kaynak yapısının özelliklerine etki eden en önemli parametrelerin sırası ile takım baskı kuvveti, takım ilerleme hızı ve takım devir sayısına bağlı olarak karıştırma şiddetinin olduğu tespit edilmiştir. Kabul edilebilir birleşmelerin gerçekleştirilebilmesi için uygulanması gereken takım baskı kuvvetinin en az 6 kN değerinde olması gereklidir.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme Karıştırma Kaynağı, AA5754-H22, AA6061-T6, Karıştırma Şiddeti, Takım Baskı Kuvveti

Master Thesis

SUMMARY

THE INVESTIGATION OF THE WELDABILITY OF
AA5754 AND AA6061 ALLOYS BY FRICTION STIR WELDING

Hasan YILMAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural And Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Assistant Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU
2011, 99 Pages

In this study the aim was to determine the parameter's effects in friction stir welding of AA5754-H22 and AA6061-T6 aluminium alloys by using different parameters. In this process two different tool spindle speed, three different tool advance speed and three different tool press force parameters were determined and then eighteen different experiments were carried out. The joined samples were investigated by the methods of tensile test, bending test, micro hardness, micro and macro structure observation. The welding processes performed from in the shape of mechanical joints emerging in the diffusion free structure. After all investigations no failed welding structure has been observed.

As a result, the most important parameter which affects the welding more is the tool press force. The tool advance speed and stirring intensity come after respectively. In order to have acceptable joints, the tool press force to be applied should be at least 6 kN.

Key Words: Friction Stir Welding, AA5754-H22, AA6061-T6, Stirring Intensity, Tool Press Force

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin adımları.....	2
Şekil 1.2. Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi.....	3
Şekil 1.3. Robotik kola sahip, bilgisayar kontrollü SKK düzeneği.....	4
Şekil 1.4. Çeşitli malzemelere uygulanan SKK'nın sonunda oluşan kaynak bölgeleri.	9
Şekil 1.5. SKK'da hacimsel boşluk ve hataların tipik görüntüsü.....	11
Şekil 1.6. AA5083 alaşımında oluşan kök boşluğu.....	12
Şekil 1.7. AA2014'ün kaynağındaki zayıf bağlanmış bölge.....	12
Şekil 1.8. Dağlanmış ve dağlanmamış durumda 6.4 mm kalınlığında AA2014 alaşımındaki birleşme bölgesindeki kalıntılar.....	13
Şekil 1.9. SKK takımının şematik çizimi.....	14
Şekil 1.10. TWI tarafından geliştirilen Whorl ve Triflute takımları.....	15
Şekil 1.11. Takım omuzlarına açılmış çeşitli kanallar.....	15
Şekil 1.12. SKK için birleşme konfigürasyonları.....	17
Şekil 1.13. SKK sonrası birleştirilen numunelerde oluşan kaynak bölgeleri.....	18
Şekil 1.14. Alüminyumda alaşım elementlerinin genel bileşimleri.....	22
Şekil 1.15. A356/AA6061 SKK sonrası kaynak boyunca alınan numunelerin dayanımları.....	34
Şekil 1.16. Roket ve füze uygulamalarında kullanılan alüminyum alaşımları.....	39
Şekil 2.1. Sürtünme karıştırma kaynak düzeneğinin görüntüsü.....	42
Şekil 2.2. Hidrolik yüklemeli tablanın görüntüsü.....	43
Şekil 2.3. Karıştırıcı takıma ait teknik çizim.....	45
Şekil 2.4. Karıştırıcı takımın yandan ve üstten görünümü.....	45
Şekil 2.5. Karıştırıcı takım malzemesine uygulanan ısıl işlem adımları.....	46
Şekil 2.6. Karıştırıcı takım malzemesine ait menevişleme diyagramı.....	47
Şekil 2.7. Numune numaralarına ait kodlama gösterimi.....	49
Şekil 2.8. SKK'nın uygulanış şekli.....	50
Şekil 2.9. İnceleme amacı ile kaynaklı plakalardan çıkarılan numunelerin çıkarım planı.....	51

Şekil 2.10.	Çekme numunelerinin hazırlanışı.....	52
Şekil 2.11.	Kaynak boyunca çıkarılan çekme numunelerinin ölçüleri.....	53
Şekil 2.12.	Kaynak enine çıkarılan çekme numunelerinin ölçüleri.....	53
Şekil 2.13.	Kaynak bölgesinde sertlik alınan noktaların gösterimi.....	53
Şekil 2.14.	Kaynak kökleri için uygulanan eğme deneyi metodu.....	54
Şekil 3.1.	221 numunesine ait sıcaklık değişim grafiği.....	56
Şekil 3.2.	Yapılan tüm deneylere ait sıcaklık- takım ilerleme hızı grafiği.....	57
Şekil 3.3.	Yapılan tüm deneylere ait sıcaklık- takım baskı kuvveti grafiği.....	58
Şekil 3.4.	AA5754 ve AA6061 alaşımlarına uygulanan ısıl işlem.....	59
Şekil 3.5.	Uygulanan ısıl işlemin AA5754 ve AA6061'in sertliğine etkisi.....	60
Şekil 3.6.	Uygulanan ısıl işlemin AA5754 ve AA6061'in çekme mukavemeti ve sünekliğine etkisi.....	61
Şekil 3.7.	1xx numunelere ait kaynak yüzey görüntüleri	63
Şekil 3.8.	2xx numunelere ait kaynak yüzey görüntüleri.....	64
Şekil 3.9.	112 numaralı numuneye ait alt yüzey görüntüsü.....	65
Şekil 3.10.	Numunelerin kaynak kesitlerine ait makro görüntüler.....	66
Şekil 3.11.	Kaynaklı numunelerin mikrosertlik ölçüm gösterimi.....	69
Şekil 3.12.	7,41 dev/mm değeri ile en en yüksek karıştırma şiddetine sahip 21x numunelerinin farklı takım baskı kuvvetleri altında oluşan sertlik grafiği... 69	
Şekil 3.13.	2,96 dev/mm değeri ile en düşük karıştırma şiddetine sahip 13x numunelerinin farklı takım baskı kuvvetleri altında oluşan sertlik grafiği... 70	
Şekil 3.14.	Sertlik ölçümleriyle belirlenen bölgeler.....	72
Şekil 3.15.	Enine çıkarılan numunelerin çekme dayanımı- takım ilerleme hız grafiği... 74	
Şekil 3.16.	Enine çıkarılan numunelerin karıştırma şiddetleri ve çekme dayanımı- takım baskı kuvvet grafiği.....	74
Şekil 3.17.	Kaynak boyuna çıkarılan çekme numunelerinin kopma resimleri.....	76
Şekil 3.18.	122 ve 232 numunelerinden tel erezyonla çıkarılan boyuna kaynak numuneleri.....	76
Şekil 3.19.	2xx numaralı numunelere ait çekme deneyi sonrası kopma şekilleri.....	77
Şekil 3.20.	113 numaralı numunenin eğme deneyi sonrası yan görünümü.....	78
Şekil 3.21.	113 numaralı numunenin eğme deneyi sonrası kaynak dikişinin ve kaynak tabanının görünümü.....	79

Şekil 3.22.	131 numaralı numunenin eğme deneyi sonrası kaynak dikişinin ve kaynak tabanının görünümü.....	79
Şekil 3.23.	212 numaralı numenin kaynak bölgesinin SEM görüntüleri.....	81
Şekil 3.24.	131 numaralı numenin kaynak bölgesinin SEM görüntüleri.....	83
Şekil 3.25.	211 numaralı numuneye ait optik mikroskop görüntüleri.....	86
Şekil 3.26.	232 numaralı numuneye ait tane yapısı görüntüleri.....	87
Şekil 3.27.	132 numaralı numuneye ait tane yapısı görüntüleri.....	89
Şekil 3.28.	212 numaralı numuneye ait EDS analizi.....	91
Şekil 3.29.	131 numaralı numuneye ait EDS analizi.....	92

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. SKK'nın temel faydaları	4
Tablo 1.2. Alaşım elementlerinin alüminyumun mekanik özelliklerine etkisi	21
Tablo 1.3. Saf alüminyumun fiziksel özellikleri.....	21
Tablo 1.4. Alüminyum alaşımları için tanımlama sistemi.....	23
Tablo 1.5. Yaşlandırılmayan alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemler.....	24
Tablo 1.6. Yaşlandırılabilen alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemler.....	24
Tablo 1.7. Birbirinden farklı alaşımların ve metallerin SKK çalışmaları.....	32
Tablo 1.8. AA2024/AA7075 SKK dikişlerinin ve ana malzeme mukavemet değerleri....	35
Tablo 2.1. X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi.....	44
Tablo 2.2. X40CrMoV5-1 takım çeliğinin fiziksel özellikleri ve ısıt işlem tablosu.....	46
Tablo 2.3. AA5754-H22'nin (AISI) kimyasal ve mekanik özellikleri.....	48
Tablo 2.4. AA6061-T6'nın (AISI) kimyasal ve mekanik özellikleri.....	48
Tablo 2.5. Kaynak parametreleri.....	49
Tablo 3.1. Al-alaşımlarına uygulanan ısıt işlem sonucu ölçülen mekanik özellikler.....	60
Tablo 3.2. AA5754 ve AA6061'in çekme deneyleri sonucu mekanik özellikleri.....	72
Tablo 3.3. Çekme numunelerinin mekanik özellikleri.....	73

SEMBOLLER DİZİNİ

AA	: Alüminyum alaşımı
AFSW	: Otojen sürtünme karıştırma kaynağı
AISI	: Amerikan demir ve çelik enstitüsü
AWS	: Amerikan kaynak topluluğu
ASME	: Amerikan makine mühendisleri birliği
DKB	: Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge
EDS	: Enerji dağılım spektrometresi
EKT	: Eşzamanlı kurumsal teknolojiler
GDLS	: Genel dinamik kara sistemleri
HFSW (HSKK)	: Hibrit sürtünme karıştırma kaynağı
RSD-C	: Rockwell sertlik değeri
ITAB	: Isı tesiri altındaki bölge
İASA	: İleri amfibi saldırı araçları
KD	: Kaynak dikişi
MIG	: Metal inert gazaltı kaynağı
MAG	: Metal aktif gazaltı kaynağı
MMK	: Metal matrisli kompozit malzeme
NDT	: Tahribatsız muayene
SEM	: Tarayıcı elektron mikroskobu
SKD 61	: Sıcak iş takım çeliği
SKK	: Sürtünme karıştırma kaynağı
T	: Sıcaklık
TM	: Temel malzeme
TEB	: Termomekanik etki altındaki bölge
TIG	: Tungsten elektrodlu gazaltı kaynağı
TSE	: Türk standartları enstitüsü
TWI	: İngiliz kaynak enstitüsü
XRD	: X ışını difraksiyonu
VSD	: Vickers sertlik değeri

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Kaynak, şekil verme kabiliyeti düşük olan malzemelerden karmaşık şekilli parçaların üretimini sağlayan bir imalat yöntemidir. Bu durumlarda, ürün çok parçalı üretildikten sonra uygun bir kaynak yöntemi ile bu parçaların birleştirilmesi suretiyle üretim gerçekleştirilir. Ayrıca kaynak, genel olarak diğer üretim yöntemlerine alternatif olmayıp tamamlayıcı bir prosestir. Dolayısıyla kaynak edilebilirlik, yeni geliştirilen malzemelerin uygulama alanlarının genişlemesinde en önemli faktörlerden biridir. Gelişen teknoloji ile birlikte günümüzde birçok endüstri kolunda tekparça olarak üretimi mümkün olmayan veya ekonomik olmayan karmaşık şekilli parçalara duyulan gereksinim artmıştır. Bu tip parçalara örnek olarak uçak veya hızlı tren gibi yakıt tasarrufunun önemli olduğu sistemlerde kullanılan petek paneller verilebilir. Günümüzde uçaklarda kullanılan titanyum alaşımı petek panellerin üretimi, difüzyon kaynağı ve süperplastik şekillendirme kombinasyonu ile yapılmaktadır. Bu üretim yöntemi, alüminyum alaşımlarında uygulanmadığı için Al-alaşımli petek panellerin üretimi bu yöntem ile mümkün olamamıştır. Bu uygulamaya alternatif olarak Al-alaşımı veya Ti-alaşımı petek panellerin üretiminde sürtünme karıştırma kaynağı yöntemi (SKK) de kullanılabilir. Yeni kaynak yöntemlerinin geliştirilmesi ve kaynağı güç malzemelere uygulanması üretim hatlarının çehresini değiştirmekte ve yeni üretim yaklaşımlarını beraberinde getirmektedir [1].

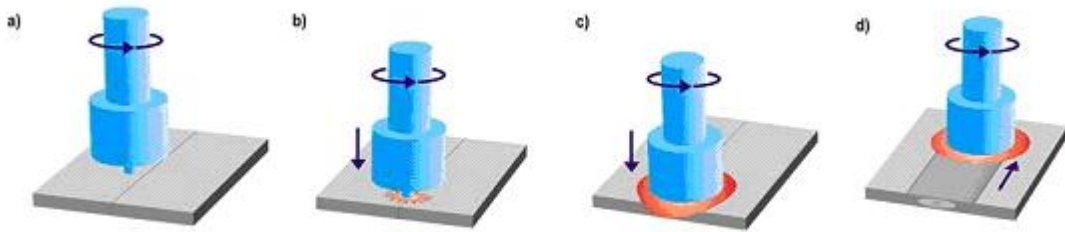
Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemelerin kaynak edilebilirliği konusunda son yıllarda kaydedilen gelişmeler kaynak teknolojisinin önemini artırmıştır. Ark kaynağı gibi klasik kaynak yöntemleri ile kaynağı mümkün olmayan veya kaynağında güçlükler yaşanan Al-alaşımları, Mg-alaşımları, Cu-alaşımları ve paslanmaz çelikler gibi malzemelerin kaynağı, günümüzde lazer kaynağı ve son yıllarda geliştirilen bir katı-hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir [1].

Bu çalışmada AA5754-H22 ile AA6061-T6 Al-alaşımlarının SKK yöntemi ile birleştirilip farklı kaynak parametrelerinin kaynak yapısına etkileri araştırılmıştır. SKK sonucu ortaya çıkan kaynak bölgesindeki metalürjik içyapı ve bu içyapının birleşmenin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

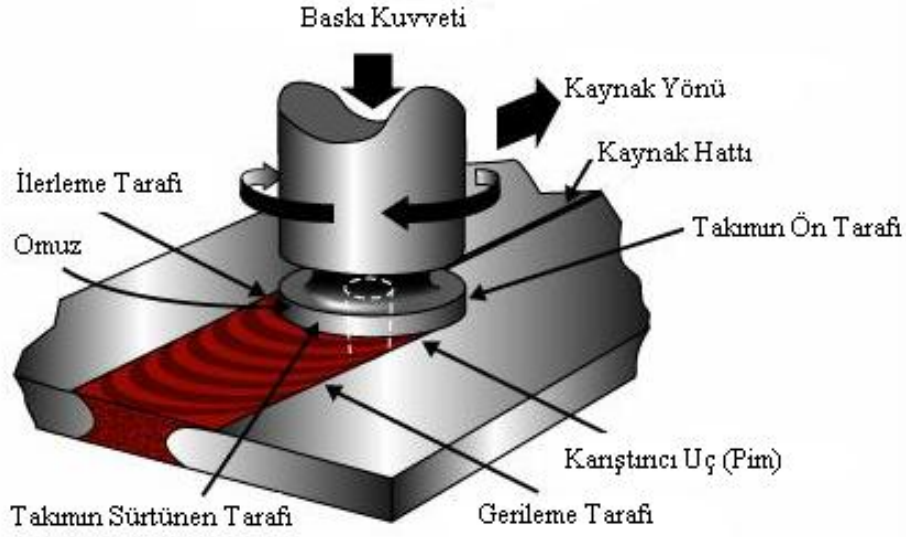
1.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

1.2.1. SKK Tanımı ve Kaynağın Faydaları

SKK katı hal birleştirme tekniği olarak 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsünde (TWI) keşfedilmiştir ve ilk olarak alüminyum alaşımlarında uygulanmıştır [2,3]. SKK yöntemi son derece basittir. Özel olarak dizayn edilmiş pim ve omuza sahip dönel bir takım, birbiriyle temas haldeki plakaların birleşme çizgisi boyunca dönerek ilerlemesi için saçların ya da plakaların birleşik kenarlarına daldırılır. Takım, iki ana fonksiyonu sağlamak için çalışır. Bunlar: (a) iş parçasını ısıtmak ve (b) malzemelerin birleşimini sağlanması için karıştırmaktır. Isınma, takım ve iş parçası arasındaki sürtünme ve iş parçasındaki plastik deformasyon ile sağlanır. Açığa çıkan ısı, omuz altında ve pim etrafındaki malzemeyi yumuşatır. Yumuşayarak şekillendirilebilirliği artan malzemeler, takımın dönerek karıştırma ve ilerleme hareketlerinin etkisiyle pimin her iki tarafındaki malzemenin karışarak birleşmesini sağlar. Gerçekleşen bu sürecin sonucunda ergime olmaksızın karışan ve soğuyarak sertlik ve mukavemeti aratan malzemeler katı hal kaynak yöntemi ile birleştirilmiş olur. Bu birleştirme işlemi, Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Sürtünme karıştırma kaynağı işleminin adımları [4]. a) Takımın dönerek hareketi b) Takımın birleşecek plakalar arasına dalması c) Takım omzunun plakalara teması sonucu sürtünme ve ısının oluşması d) Takımın birleşme çizgisi boyunca ilerleyerek birleşmenin oluşması



Şekil 1.2. Sürtünme karıştırma kaynağının şematik gösterimi [5].

Şekil 1.2’de SKK işlemi esnasında tanımlanan bölgeler verilmiştir. Buna göre, takımın çeşitli geometrik özellikleri nedeni ile pimin etrafındaki malzeme hareketi oldukça karmaşık olabilir [6]. SKK işlemi sırasında malzeme, yüksek sıcaklıkta yoğun plastik deformasyona uğrar, sonunda da kaliteli, eş eksenli yeniden kristalleşmiş taneler oluşur [7,8]. Sürtünme karıştırma kaynaklarında oluşan mikro yapı, üstün mekanik özellikler sağlar. SKK ile yapılan kaynaklı birleştirmelerden elde edilen kaynak kalitesi, malzeme cinsine göre farklılık göstermemektedir [9]. Diğer kaynak yöntemlerinde oluşan düzensizlikler, çatlaklar, form bozuklukları ve boşluklar bu yöntem ile fark edilir derecede azalmaktadır.

Günümüzde, ileri teknolojilerin uygulandığı gelişmiş makine elamanlarının kaynaklı birleştirilmelerinde, faz dönüşümleri ve plastik deformasyon istenmeyen bir durumdur. Bu olumsuzlukları gidermek, ancak malzemelerin mekanik ve metalürjik özelliklerini etkilemeyecek kadar düşük sıcaklıklarda yapılan birleştirme işlemleri ile mümkündür [10]. SKK yönteminin diğer ergitme esaslı kaynak yöntemlerinden en belirgin farkı; kaynak edilen parçaların ağızlarının kaynak sırasında ergimemeleri, yani katı fazda bulunmalarındır [11]. SKK’nın temel faydaları Tablo 1.1’de özetlenmiştir.

Tablo 1.1. SKK'nın temel faydaları [12].

Metalürjik Avantajlar	Ekolojik Avantajlar	Enerji Avantajları
İşlemin katı fazda olması	Koruyucu gazın olmaması	Otomasyona yatkınlık
İş parçasında oluşan düşük distorsiyon	Yüzey temizliği istememesi	Ağırlığı azaltılarak özellikleri geliştirilmiş malzemeler kullanılır
Boyutsal kararlılık ve işlemin tekrarlanabilirliği	Talaş atıklarının olmaması	Bir lazer kaynağı için enerjinin sadece %2,5'lük kısmı yeterlidir
Alaşım elementlerinde kayıpların olmaması	Yüzey temizliği için kullanılan çözücülerin olmaması	Hafif uçak, otomotiv ve gemi uygulamalarında düşük yakıt tüketimi
Birleşme alanında mükemmel metalürjik özellikler	Kablo, keçe ya da diğer gazlar gibi tüketilen malzemelerde tasarruflu olması	
Kaliteli mikro yapı		
Yapıda iç gerilme oluşumunu azaltır		
Birleştiricilerin (perçin, cıvata) sahip olduğu birden fazla parçanın olmaması		

SKK, son on yılın metal birleştirme işlemi için en önemli gelişmesi olarak sayılır. Enerji verimliliği, çevre dostluğu ve çok yönlü bir yöntem olması nedeni ile “yeşil teknoloji” olarak da adlandırılır. Klasik kaynak yöntemleri ile karşılaştırıldığında SKK'da oldukça az enerji tüketilmektedir. Bu yöntemde ne koruyucu gaz, ne de akışkan kullanılmamaktadır. Böylece işlem, çevre ile dost bir yöntem haline gelmektedir. Kaynak hiçbir şekilde bir dolgu metali içermez ve bu nedenle her alüminyum alaşımı, rahatlıkla kaynak edilebilir. İstenildiği takdirde farklı alüminyum alaşımlar aynı kolaylıkla birleştirilebilir [13,14]. Şekil 1.3'te günümüzde uygulanan bir SKK işlemi görülmektedir.



Şekil 1.3. Robotik kola sahip, bilgisayar kontrollü SKK düzeneği [15].

SKK, alın kaynağı, bindirme kaynağı, T alın kaynağı ve köşe kaynağı gibi farklı kaynak yöntemlerinde de uygulanabilir [16].

Yöntem üzerine yapılan araştırmalar devam etmekle birlikte, günümüzde ağırlıklı alüminyum ve Al-alaşımının yanı sıra bakır ve Cu-alaşimleri, titanyum ve Ti-alaşimleri, magnezyum ve Mg-alaşimleri, orta karbonlu çelikler, nikel ve Ni-alaşimleri, çinko alaşimleri, kurşun alaşimleri, metal matrisli kompozitler ve bazı tür paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılır. Bu yöntemler aynı zamanda az alaşımlı çelik ile paslanmaz çelikler ya da alüminyum gibi farklı metallerin kaynağında ve bazı tür termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde de kullanılmaktadır [12].

1.2.2. SKK Terminolojisi

Bu yeni kaynak teknolojisinin ortaya çıkmasıyla beraber yöntemin tanımlanmasında ve uygulanmasında ortaya çıkan adlandırmalarda birçok çelişki ve karmaşa ortaya çıkmıştır. Bu potansiyel problem, söz konusu kaynak yönteminin yaygın olarak kullanılmaya başlanmasıyla fark edilmiştir. SKK üzerindeki çalışmalarda ortak terminolojinin kullanılması amacıyla TWI tarafından temel terminoloji yayınlanmıştır. Daha sonra Sürtünme Karıştırma Kaynağı Lisans Birliği Üyelerinin çeşitli çalışmaları ile uzlaşılan bir terminolojiyi ortaya çıkarılmıştır [17].

1.2.2.1. Yöntem İsmi

Sürtünme karıştırma kaynağı “dönen ve ilerleyen bir takımın iş parçalarının arasına dalarak bölgesel bir plastikleştirme ve birleşme yüzeyi boyunca hareket etmesiyle iş parçaları arasında bir katı hal birleşmesine neden olan, iki veya daha fazla iş parçasının birleşmesini sağlayan bir “metot” olarak tanımlanır. Sürtünme karıştırma kaynağı ismi, orijinal patentindeki ilk alıntıdan yöntemin mucitleri ve TWI tarafından seçilmiştir. Bu isim, yöntemin esasını yakalayan doğru tanım olarak tespit edilmiştir. Kullanılan bu ismi, yaygınlaştığından beri değiştirmek neredeyse imkânsız hale gelmiştir. Bu isim, diğer kaynak yöntemleri ile karmaşaya neden olmadığı için de önerilir. Yöntemin açıklayıcı dili sadece İngilizce olarak benimsenmelidir. Bu yöntemin sırasıyla Alman ve Fransız literatüründe yaygın olarak “Reibrührschweissen” ve “Soudage par friction malaxage”

olarak isimlendirildiği de bilinir. Bu eşdeğer terimler İngilizce dilinde olmayan terimler olarak kabul edilir [17].

Otojen Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Autogenous Friction Stir Welding, ASKK) ve Hibrid Sürtünme Karıştırma Kaynağı (Hybrid Friction Stir Welding ,HSKK) gibi terimler de ortaya çıkmıştır. Birincisi klasik SKK ile aynıdır. İkincisi ergitme kaynağının onarımı için SKK kullanımını ifade eder. Özel bir terim olarak HSKK'nın kullanımı bazı zaman kaçınılmazdır. Fakat böyle terimler mümkün olduğu kadar az kullanılmalıdır. Böyle durumlarda yöntemin değiştirilmiş tanımı açıkça ifade edilmelidir. Bazı patent uygulamalarında “sürtünme karıştırma kaynağı” teriminin kullanımından sakınmak için oldukça çaba harcanmıştır. Fakat genel eğilim “sürtünme karıştırma kaynağı” teriminin kullanılmasıdır. Yaygın olarak kullanılan ikinci bir isme örnek olarak “sürtünme karıştırma işlemi” ve “sürtünme karıştırma nokta kaynağı” kabul edilmiştir. Fakat sürtünme karıştırma ilkelerini askıya almak için bu kaynak ismi ileride süreç değişkenleri tanımlanarak korunmalıdır [17].

1.2.2.2. Takım Terminolojisi

SKK takımı, yöntemin en belirleyici unsurudur. Makine mili ve parçanın arasındaki dönen elemanların hepsi “takım” olarak adlandırılır. Sabit omuzlu takımların geliştirilmesi ile daha açıklayıcı bir tanıma ihtiyaç duyulmuştur ki bu durumda omuzun esasen hiç ısı üretmediği anlamı çıkmaktadır. Bu yüzden, “takım”, parçayla temas ederek sürtünme yoluyla ısı üretmeye tasarlanmış sistemdeki döner parça olarak tanımlanmalıdır [17].

Takım, tek parça halinde ya da birkaç parçadan üretilebilir. Kaynak işlemi esnasında parça yüzeyinin altındaki takımın gömüldüğü bölge “prob” olarak adlandırılır. “Pim” terimi de yaygınca kullanılır. Aslında, söz konusu parça her zaman pim şeklinde olmadığından, “prob” daha kesin ve bu sebeple daha çok tercih edilen bir tanımdır. Bu kısım, parça yüzeyinin doğrudan üstünde ya da biraz içine geçmiş olan “omuz”dan daha küçük bir çaptadır. “Prob” terimi dişli, yivli, çark ve fırça gibi başka tanımlayıcı terimlerle de çoğaltılabilir [17].

SKK'nın silindirik olmayan takımın kullanıldığı bazı uygulamalarında, takımın ön ve arka kenarı ya da yüzeyini belirlemek gereklidir. Takımın kanat kısmına benzediği yerde, iyi yapılandırılmış ”ön kenar” ve “arka kenar” terimlerinin kullanılması konusunda güçlü bir tartışma vardır. Silindirik takımlarda, açıkça kenar yoktur; bu yüzden “ön yüz” ve “arka

yüz” terimleri tercih edilebilir. Takıma bazı durumlarda küçük bir açı verilebildiği için omuzun bir kısmı parçanın daha derinine sokulabilir. Omuzun parçanın içine giren kısmına “topuk” denir ve parça yüzeyinin altında kalan omuz giriminin en fazla olduğu derinlik de “topuk batma derinliği” olarak tanımlanır. Takım eğiminin açısı “eğim açısı” ya da kabul görmüş olan AWS (Amerika Kaynak Topluluğu) terminolojisinde “hareket açısı” olarak adlandırılır. Bazı durumlarda, takım yana doğru eğim verir ve bu durumda AWS terimi olan “çalışma açısı” da kabul edilebilmesine rağmen açı, “yan eğim açısı” olarak tanımlanmalıdır. Diş, kıvrım, oluk, yassı vb. gibi takım üzerindeki özelliklerin başka alanlarda yaygın kullanımında iyi yapılandırılmış isimleri vardır. Bu nedenle karmaşa oluşmaması için zorunlu bir neden yoksa ortak terimler kullanılmalıdır [17].

Günümüzde sıklıkla yeni takım tasarımları ortaya çıkmaktadır. Örneğin, “bobin takım” terimi sıkça kullanılmaktadır ve bu takım 2 omuz ile 1 prob’un olduğu takım olarak adlandırılır. Bu takımın, hiçbir belirgin baskı kuvveti gerektirmemesi gibi bir avantajı da vardır. Ayrıca “öz tepkili takım” terimi de yaygınca kullanılır [17].

1.2.2.3. Yöntem Parametreleri

“Kaynak hızı” terimi, “ilerleme hızı” ve “ilerleme oranı” terimlerine göre daha çok tercih edilir. Bu terim özellikle ergitme kaynağında yaygınca kullanılır. Anlamı nettir ve SKK’da oluşan sonuçları hemen anlaşılır. “Takım devir sayısı” ya da “takım dönme hızı” terimi de takım dönüşünü açıklamak için tercih edilen terim olarak kullanılmalıdır. Dönmenin yönü parçanın yukarisından ya saat yönünde ya da saatin ters yönünde izleme yaparken gözlenen durumdur. “Saat yönü tersi” terimi ABD’de kabul edilmektedir.

Kuvvetler SKK teknolojisinin önemli bir parçasıdır. Takım dönme eksenine paralel uygulanan kuvvet (Z doğrultusu) “takım baskı kuvveti” ve kaynak yönüne paralel uygulanan kuvvet (X doğrultusu) “takım ilerleme kuvveti”dir. Genellikle, ortaya çıkan yan bir kuvvet vardır ve bunun doğru açılarda hareket yönüyle olan birleşeni (Y doğrultusu) “yan kuvvet” olarak adlandırılır. Bu terimlerin anlamları kesin olarak kabul edilir [17].

1.2.2.4. Kaynak Bölgesi Sınıflandırması

Kaynağın farklı kısımlarını açıklamak için kullanılan terminoloji sıralamasından dolayı büyük bir karmaşa ortaya çıkmaktadır. Üstten görünüşte, önemi tam olarak belirlenmemiş olsa da kaynak yöntemi doğası gereği asimetriktir. Takımın bölgesel yönünün geçiş yönüyle aynı olduğu kaynak kısmına “ilerleme tarafı” adı verilir. Aynı şekilde yönlerin zıt olduğu bölgeye ve omuzun bölgesel hareketinin geçiş yönüne karşı olduğu bölgeye de “gerileme tarafı” adı verilir. Bu terminoloji, aslen benzeri izafi hareketlerin olduğu sürtünme yüzeyleri için zaten oluşturulmuştur. Terminoloji seçimi, benzer bir hareketin başka bir örneği olan helikopter pervanesinin hareketini anlatmak için bu terimlerin kullanıldığı havacılık sanayisinde oluşturulmuş olan bir terminolojiye dayanabilir. İlerleyen ve gerileyen terimleri büyük ölçüde nettir ve iyi yapılandırılmıştır. Farklı yerlerde kullanılan “kesme kenar” ve “akış kenarı” terimlerinden, açıklayıcı olmadıkları için vazgeçilmelidir [17].

SKK asimetrik bir yöntem olduğu için ilerleme ve gerileme bölgelerinin farklı bir şekilde ortaya çıkması sıkça gözlenmektedir. İlerleyen ve gerileyen kısımlar makrograflarda her zaman açık bir şekilde belirtilmelidir. TWI yıllar önce şöyle bir karar oluşturdu: “Geçiş bölgeleri her zaman kaynağın başlangıcına bakacak şekilde hazırlanır”. Takım dönme yönü TWI’ya göre saat yönünde olduğundan, ilerleme tarafı neredeyse her zaman makrografların sağ el tarafındadır. Ayrıca parça yüzeyindeki takımın toplam bölgesi “takım omuz izi” olarak tanımlanır [17].

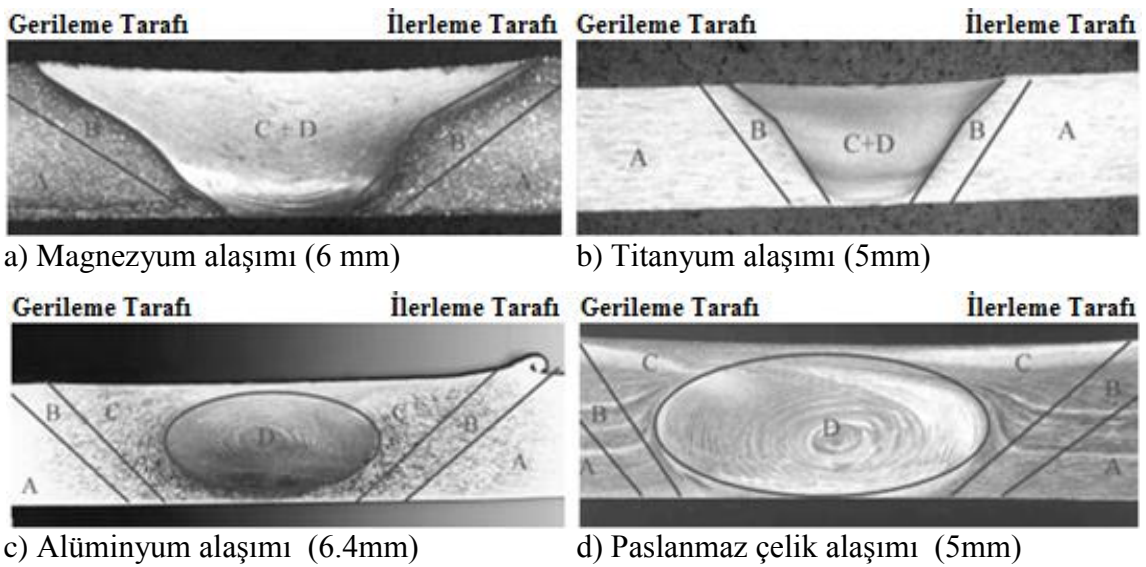
1.2.2.5. Mikroyapısal Sınıflandırma

Geleneksel ergitme kaynaklarında mikroyapısal bölgeler, genellikle ergitmeye uğramış (ergitme bölgesi) ve ergitmeye uğramamış bölgeler (ısı tesiri altındaki bölge ITAB) olarak kolayca ayrılabilir. ITAB kendi içinde kaba taneli ve ince taneli bölgeler olarak tekrar ayrılabilir. Çelik gibi malzemelerde kritik altı ITAB, kritik arası ITAB ve süperkritik ITAB tanımlanır. Bu durumda, bölgeleri ayıran sınırlara “kristalografik değişim sınırı” denir ve bu sebeple tanım daha nesnel bir hal alır [17].

Sürtünme karıştırma kaynaklarını sınıflandırmada bir ikilem oluşur. Yakın gelecekte sürtünme karıştırma yöntemi büyük bir çoğunlukla Al-alışımların egemenliğinde olacaktır. Alüminyumun başka malzemelere göre nadiren benzer olan ve optik olarak görülebilen

mikroyapısal bölgeleri vardır. Yine de, sınıflandırma sisteminin tüm malzemelere uyabilmesi gerekir. Mevcut durumda, alüminyuma özel bir durum olarak yaklaşılır [17].

Kaynak, Şekil 1.4/a ve 1.4/b de gösterildiği gibi 3 ana bölgeye ayrılır. “A” bölgesi kaynağın ısısından ya da deformasyonundan etkilenmeyen ana malzemedir. “B” bölgesi sadece ısıdan etkilenir ve hiçbir büyük plastik deformasyon görülmez (fakat küçük bir ölçüde deformasyon olabilir). Bu bölge “ITAB” olarak bilinir ve ergitme terminolojisinde kullanılan terminolojiyle açık bir paralelliği vardır. “C” bölgesi hem ısıdan hem de deformasyondan etkilenir ve termomekanik etki altındaki bölge olarak adlandırılır (TEB). Bu bölge ilerleme tarafında kaynak boyunca ITAB’dan, gerileme taraftaki ITAB’a kadar uzanır. Asgari olarak, bu bölge üst yüzeydeki omzun genişliğine ve kökte pim çapına karşılık gelir. Alüminyumda ve genellikle yeniden kristalleşmenin başlamasının kolay olmadığı diğer malzemelerde, bu bölge tamamen kristalleşmeyebilir. Bu durumda, yeniden kristalleşmiş yapı kaynak merkezi bölgesi içindedir, (D). Örnekler Şekil 1.4/c ve 1.4/d’de gösterilmiştir. Yeniden kristalleşmenin tam mekanizması hakkındaki tartışma devam etmektedir, fakat bu, mikroyapısal sınıflandırmayla alakalı değildir. Bu bölgeye normalde “dikiş” denir. Bu terimin bilimsel kökeni eksik olsa da neredeyse tüm dünyada kullanılır. Bu yüzden “dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB)” gibi daha fazla bilimsel terim kullanılabilir. “Karıştırılmış bölge” sıkça dikiş için kullanılır, ama TEB’in bütünü karıştırma hareketine maruz kaldığı için bu terim teknik olarak doğru değildir ve kullanımı da bu yüzden tercih edilmemelidir [17].



Şekil 1.4. Çeşitli malzemelere uygulanan SKK'nın sonunda oluşan kaynak bölgeleri [17].

1.2.2.6. Kaynak Kalitesi

- Noksan, kusur ve hata tanımı

Noksan, kusur ya da hata gibi terminoloji arasında genelde karmaşa vardır. Bu yüzden ASME B31-1 tarafından verilen tanımlar benimsenmiştir. ASME, “noksan”ı kalite özelliklerinin beklenen durumdan uzaklaşması açısından ve “kusur”u da NDT tarafından tespit edilebilen bir noksan olarak tanımlıyor. “Hata” ise kabul edilemeyen bir boyutta, biçimde, doğrultu konumunda ya da özelliklerindeki kusur olarak tanımlanır [17].

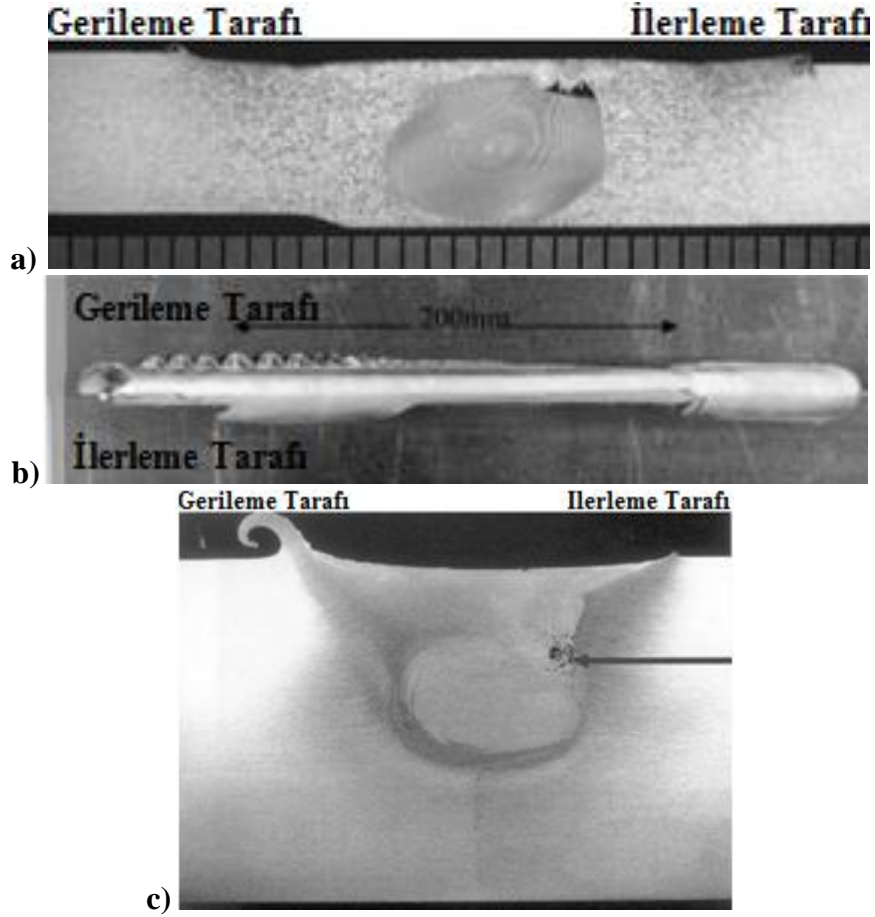
Farklı yapılar, farklı kaynak ortamlarında işlediğinden, verilmiş bir ölçüdeki kusurun bir uygulamada hoş görülebilir olabilmesi dışında olmaması ve bu yüzden hata olarak yeniden sınıflandırılması mümkündür. Eğer bir kusur, kod gerekliliğine kıyasla hata olarak sınıflandırılırsa yine de sonradan “kırık mekanik analizi” kullanımıyla orta halli bir kusur olarak yeniden sınıflandırılabilir [17].

- Hacimsel kusurlar

Sürtünme karıştırma kaynaklarındaki hacimsel kusurlar (yani malzeme eksikliği) genelde “boşluk” olarak açıklanır. Ergitme kaynaklarındaki klasik boşluk gaz baloncuklarından ya da katılma sırasındaki büzüşmeden kaynaklanır ve bu iki durum da SKK’da görülmez. “Hacimsel kusurlar” terimi teknik olarak belki daha doğrudur, ama “boşluk” sürtünme karıştırma ve başka yöntemler için yaygın bir kullanımda olup kullanımı kabul edilebilir olarak görülmüştür [17].

SKK da görülebilen böylesi hacimsel kusurlar yetersiz malzeme akışından kaynaklanır ve bunlar boyut olarak büyük yüzey kırıklı özelliklerden, sadece metalografik bir bölümdeki mikroskop aracılığıyla tespit edilebilen çok küçük boşluklara kadar çeşitlilik gösterebilir. Bu küçük boşluklar bazen kümeli bazen de tek haldedir [17].

Tipik boşluk örnekleri Şekil 1.5’te gösterilmektedir. Şekil 1.5/b, ayrıca gerileme tarafında üretilen çapak gibi diğer kusurlar için iyi bir örnektir. Bu şekil aynı zamanda çıkış boşluğunu çevreleyen kısmı ya da tamamen şekillenmiş bir halka olan takım omuz izini de gösterir. Bu durumun kendisi bir noksan değildir ama kaynak kalitesi için genelde yararlı bir rehberdir [17].



Şekil 1.5. SKK’da hacimsel boşluk ve hataların tipik görüntüsü [17]. a) 6.4mm AA2014 kaynağının yetersiz takım baskı kuvveti nedeniyle ilerleme tarafında ortaya çıkan kusur, birleştirmedeki düzensiz çatı profili düşük baskı kuvvetinin belirtisidir b) Kaynak esnasında yetersiz takım baskı kuvvetinin uygulandığı AA2014’de ilerleme boyunca oluşan boşluk c) 50mm AA7050-T7451 alaşımının ilerleme tarafındaki mikro boşluk

- Noksan, kusur ve hata tanımı

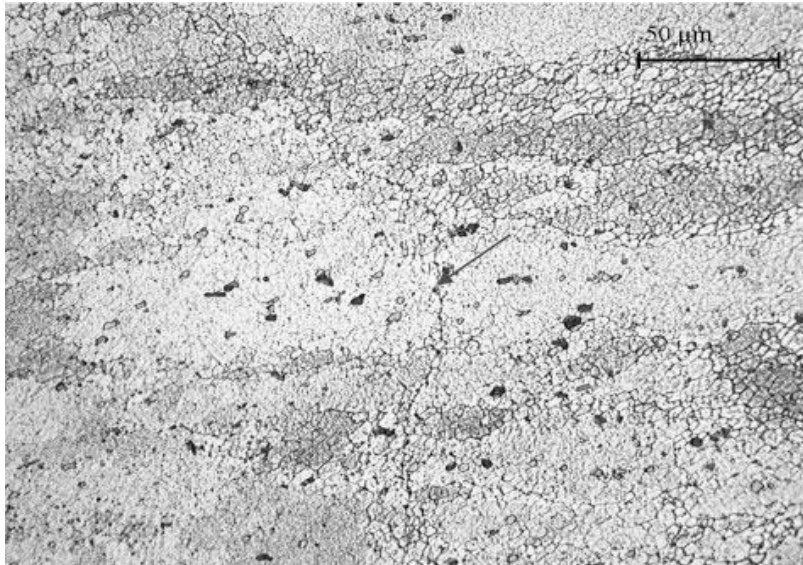
SKK’da orijinal birleşme çizgisi genelde takip edilebilir. Bu birleşme çizgisinin farklı kısımları (birleşme çizgisi kalıntısı olarak adlandırılmalıdır) farklı şekildeki kusurlarla ilişkilendirilebilir [17].

Birleşme çizgisi kalıntısıyla ilişkilendirilen en ciddi kusurlar kaynak kökünde yer alanlardır. En uç durum normal olarak yetersiz pim uzunluğu nedeniyle yapışma eksikliğidir. Kaynaktaki kusurlar, takım pozisyonu/kuvvet’inin düşük kontrolünden, saç kalınlığındaki bölgesel çeşitliliklerden, ya da sıklıkla takım yatağının sağladığı büyük ısı girdisinin neden olduğu bölgesel soğumadan meydana gelebilir. Şekil 1.6, kaynak kökünde oluşan kusur için bir örnek oluşturmaktadır [17].



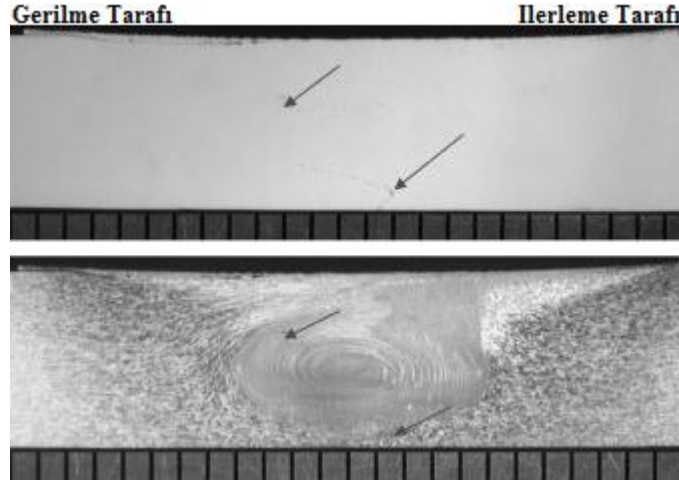
Şekil 1.6. AA5083 alaşımında oluşan kök boşluğu [17].

Kaynakta, bağlanmadan dolayı zarar vermeyecek şekilde tespit edilmesi çok zor olabilen zayıfça birleşmiş bölgelerin birçok örneği vardır. Özellikle ABD’de ortaya çıkan ilk terminolojide, böyle yapılar “karşılıklı bağlanma” (kissing bond) olarak adlandırılmıştır. Bu bölgeler, kaynak kusurlarının sonunda olabilir ve her zaman bağlantı çizgisi kalıntısının izini takip ederler. Metalografik kesitlerde zayıfça birleşmiş bölgeleri görmek mümkün olabilir. Tipik bir örneği Şekil 1.7’de gösterilmektedir [17].



Şekil 1.7. AA2014’ün kaynağındaki zayıf bağlanmış bölge [17].

Birleşme çizgisi genelde doğru olmasa da, bazen noksan olarak düşünülür. Birleşme çizgisi, kaynak işlemi esnasında fazlaca deforme olduğundan artık doğrusal değildir. Önemli miktardaki metalden metale birleşme, oksit tanecikler arasında olur. Birleşme çizgisi kalıntısı betimsel, kesin ve nettir. Tipik örnekler Şekil 1.8’de gösterilmiştir [17].



Şekil 1.8. Dağlanmış ve dağlanmamış durumda 6.4 mm kalınlığında AA2014 alaşımındaki birleşme bölgesindeki kalıntılar [17].

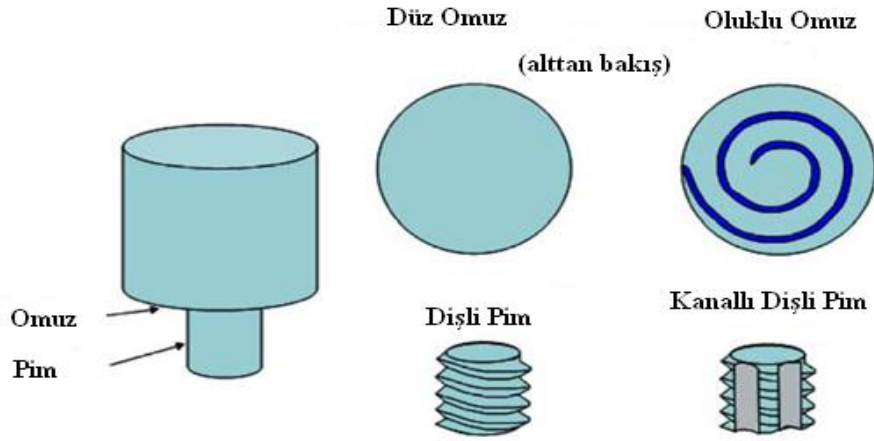
Kökteki kusurlar ve noksanlar pek çok mekanizmadan kaynaklanmaktadır. Kökeni üzerine kesin emin olabilmek genelde zor olduğundan, ilk başlarda bütün bu özelliklerin “kök kusurları” olarak sınıflandırılması önerilmiştir. Bununla birlikte, “eksik kök girimi” terimini kullanmak için güçlü bir fikir tabanı vardır. “Yüzeysel hata” teriminin geniş bir anlamı vardır ve kabul edilebilir [17].

1.2.3. İşlem Parametreleri

SKK karmaşık malzeme hareketi ve plastik deformasyon içerir. Kaynak parametreleri, takım geometrisi ve birleşme tasarımı, malzemenin mikroyapısal özelliklerini geliştirerek malzeme akış şekli ve sıcaklık dağılımını ciddi şekilde etkilemektedir. Bu bölümde, takım geometrisi, kaynak parametreleri kaynak tasarımı gibi SKK işlemini etkileyen birkaç önemli faktöre değinilmiştir.






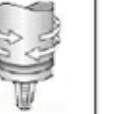
1.2.3.1. Takım Geometrisi

SKK işleminde takımın iki ana işlevi vardır. İlk olarak takım, omuzu ile kaynak yüzeyi arasında sürtünmeden kaynaklanan ısı ile kaynak bölgesini, gerekli karıştırmayı yapabilmek için uygun sıcaklığa ulaşmasını sağlamak, ikincisi de takım pimi ve pim profili vasıtası ile kaynak yüzeylerini hamurumsu kıvama getirerek birbiri arasında gerekli karışımı sağlamaktır. Takım geometrisi tüm parametreler arasında en etkin olanıdır. Takım geometrisi malzeme akışında kritik bir rol oynar. Bir SKK takımı, bir omuz ve Şekil 1.9'da gösterildiği gibi bir pim içerir.



Şekil 1.9. SKK takımının şematik çizimi [12].

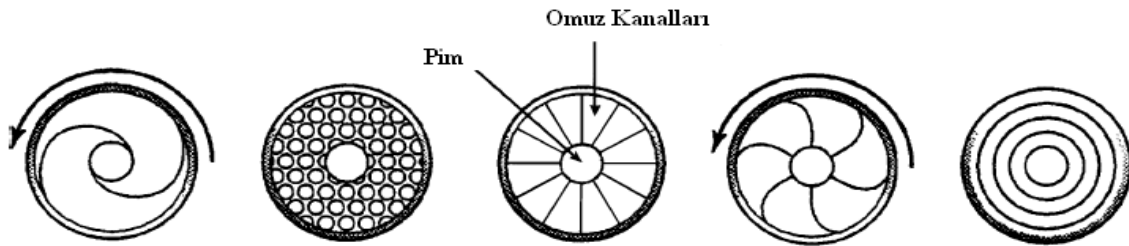
Daha önce de belirtildiği gibi takımın öncelikli iki fonksiyonu vardır: (a) sınırlandırılmış ısınma ve (b) malzeme akışı. Takım, malzemeye daldıktan sonra oluşan ilk ısınma, öncelikle pim ve iş parçası arasındaki sürtünmeden kaynaklanır. Bazı ilave ısınmalar da malzemenin deformasyonundan kaynaklanır. Omuz, iş parçasına değene kadar takım daldırılır. Omuz ile iş parçasındaki sürtünme, ısınmanın en yüksek olduğu değer olarak belirir. Isınmada pimin ve omuzun oransal şekli önemlidir ve diğer tasarım özellikleri kritik değildir. Omuz, ayrıca malzemenin ısınmış hacminin dışarı çıkmayı engeller. Takımın ikinci fonksiyonu karıştırma ve malzemenin yer değiştirmesidir. Takım tasarımında genellikle bir içbükey omuz ve vida dişli silindirik saplamalar kullanılır. Artan deneyimle ve malzeme akışındaki bazı iyileştirme anlayışı ile takım geometrisi önemli ölçüde gelişmiştir. Malzeme akışını değiştirmek için karıştırma işlem yükünü azaltma gibi uygulamalarda iyileştirmeler yapılmıştır. Örnek olarak TWI tarafından geliştirilen takımlar Şekil 1.10'da gösterilmiştir [12].

Takım	Cylindrical	Whorl™	MX triflute™	Flared triflute™	A-skew™	Re-stir™
Tasarımlar						
Takım Pim Şekli	Vidalı Silindirik	Vidalı Konik	Üç yivli vidalı Konik	Genişleyerek Sonlanan yivli Tri-Flute	Eğim verilmiş Vidalı silindirik	Vidalı Konik
Silindirik pim hacminin Pim hacmine oranı	1	0.4	0.3	0.3	1	0.4
Süpürme hacminin Pim hacmine oranı	1.1	1.8	2.6	2.6	Pim açısına bağlıdır	1.8
Ters dönme hareketi	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Hayır	Evet
Uygulamalar	Alın kaynağı: Başarısız bindirme kaynağı	Düşük kaynak torklu alın kaynağı	Çok daha az kaynak torklu alın kaynağı	Çok ince üst plakanın bindirme kaynağı	Çok ince üst plakanın bindirme kaynağı	Kaynakta en az asimetrik özellik istendiğinde

Şekil 1.10. TWI tarafından geliştirilen Whorl ve Triflute takımları [12].

Takımın omuz tasarımı, iş parçası ile en iyi temas sağlayacak ve karıştırıcı takım ucu ile parçayı en iyi şekilde sıkıştırabilecek bir şekilde yapılmalıdır. Bu geniş yüzey çıkıntısı iş parçası ile öyle temas etmeli ki, karıştırma sonucu hamurumsu hale gelen ve dışarıya doğru çıkmak isteyen metalin kaçışını önleyebilsin. Malzeme kaçışını önlemek amacıyla omuza spiral veya eş merkezli dairesel kanallar açılabilir. Eş merkezli dairesel kanallar sayesinde, karıştırıcı takım iş parçası üzerinde daha rahat hareket eder. Bu kanallar, kaynak metali üzerinde sürekli birbirini takip eden yarım ay sekileri (soğan halkaları) meydana getirirler [18].

Ayrıca TWI'da tasarlanan çeşitli omuz profilleri farklı malzemeler ve farklı durumlarda uyumludur (Şekil 1.11). Bu omuz profilleri plastize olmuş malzemenin özelliklerini tekrar kazanarak takım omuzu ve iş parçası arasında birleşimi geliştirir.



Şekil 1.11. Takım omuzlarına açılmış çeşitli kanallar [12].

Thomas vd. [19], “Whorl” pimlerinin geleneksel silindirik pimlere karşı üstünlüğünü belirleyen asıl etkenin dönme esnasında süpürülmüş hacmin pimin hacmine oranı olduğunu belirtmiştir. Diğer deyişle “dinamik hacmin”, “statik hacme” oranıdır ve yeterli akış miktarını sağlaması açısından önemlidir. Genelde benzer kaynak çapları ve pim uzunlukları için bu oran 1,1:1’dir. Geleneksel silindirik pimler için 1,8:1 ve “Triflute” pimleri için 2,6:1’dir (25mm kalınlığındaki plakaların kaynağında).

SKK’da kullanılan takımlar işlem esnasında ergimemeli ve aşınmamalıdır. Özel bir diş formuna sahip bu karıştırıcı takım, birleştirme esnasında deforme olmamalı ve diş formu bozulmamalıdır. Dolayısıyla karıştırıcı takım, yüksek sıcaklıklarda iyi dinamik ve statik özelliklere sahip, aşınmaya dayanıklı, en az 62 RSD-C sertliğinde çelik malzemelerden yapılmalıdır [18].

1.2.3.2. Kaynak Parametreleri

SKK için iki parametre çok önemlidir: saat yönü veya tersinde takım dönme hızı (n , dev/dak) ve kaynak çizgisi boyunca takım ilerleme hızı (v , mm/dak). Takımın dönüşü, dönen pimin etrafındaki malzemenin hareket etmesi ve karışması ile sonuçlanır ve takımın ilerlemesi, karışmış olan malzemenin, pimin önünden arkaya doğru yer değiştirmesi ile oluşur. Böylece kaynak işlemi sona ermiş olur. Yüksek sürtünme ısı ve malzemenin aşırı karışımı nedeni ile takımların yüksek devir sayısı yüksek sıcaklıkları doğurur [12].

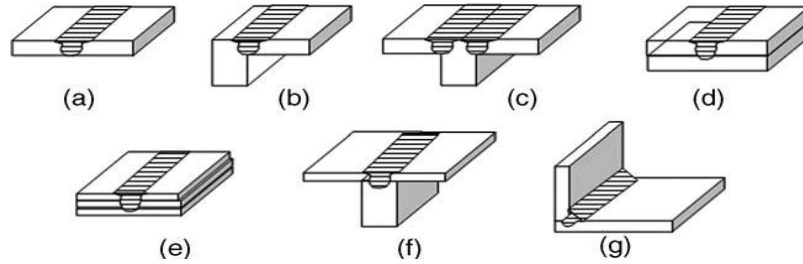
Buna ilaveten takımın dönme hızı ve ilerleme hızından başka önemli bir işlem parametresi de takımın dönme açısı ya da iş parçası yüzeyine göre olan takım eğimidir. Uygun bir dönme eğimi, takım omzunun dişli pim yardımı ile karışmış malzemeyi desteklemesini sağlar ve pimin önünde arkasına doğru malzemenin etkin bir şekilde hareketini sağlar. Bundan başka pimin iş parçasının içine olan girişi (hedef derinliği), pürüzsüz takım omuzlu kaynağın ortaya çıkması için önemlidir. Pimin hedef derinliği pim yüksekliği ile ilgilidir. Hedef derinliği çok sığ ise, takımın omzu iş parçası yüzeyine değemez. Dönerek ilerleyen omuz, karışan malzemeyi pimin arkasından önüne doğru etkin bir şekilde taşıyamaz. Böylece birleşme bölgelerinde yüzey yarıkları oluşur. Hedef derinliği çok fazla olursa, takım omzunun iş parçasına dalması ile aşırı ve ani ısınma oluşur. Bu durumda kaynak yapısı içbükey şeklinde oluşur. [12].

Soğutma veya ön ısıtma, bazı özel SKK işlemleri için ayrıca önemli olabilir. Çelik ve titanyum gibi yüksek ergime noktasına sahip ya da bakır gibi yüksek ısıl iletkenliğe sahip

bazı malzemeler için sürtünmeden ve karıştırmadan doğan ısı, takım etrafındaki malzemeyi yumuşak ve plastize etmek için yeterli olmayabilir. Bu durumda sürekli-kusursuz kaynağı üretmek zorlaşır. Bu takdirde yeniden ısıtma veya dış kaynak tarafından ısı ilavesi malzemenin akışkan olmasına ve işlem çerçevesinin yükselmesine yardımcı olur. Öte yandan alüminyum ve magnezyum gibi düşük ergime noktasına sahip malzemeler için soğutma işlemi, soğuk deformasyon yöntemi ile mukavemeti artırılmış malzemelerin yeniden kristalleşen tanelerinin aşırı büyümesini ve yaşlandırma sertleşmesi uygulanmış malzemelerin karıştırılmış bölgenin içinde ve çevresindeki çökelti büyümesindeki çözünmeyi azaltır [12].

1.2.3.3. Bağlantı Dizayını

SKK için en elverişli birleşim konfigürasyonu alın ve bindirme birleşimidir. Şekil 1.12’de birleştirme konfigürasyonları gösterilmiştir.



Şekil 1.12. SKK için birleşme konfigürasyonları [12]. (a) alın birleştirme (b) kenar birleştirme (c) T alın birleşim (d) üst üste koyarak birleştirme (e) çoklu üst üste koyarak birleştirme (f) T üste koyarak birleştirme (g) dolgu birleştirme

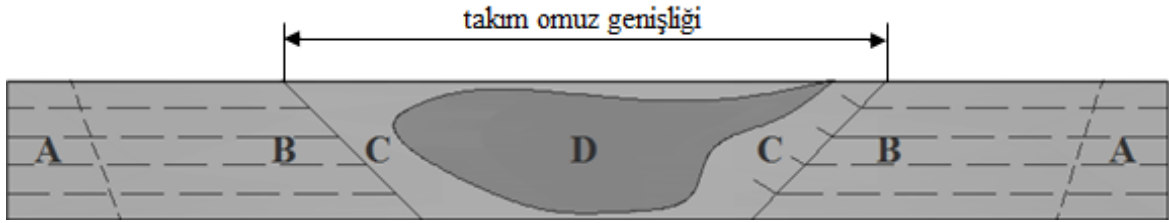
Aynı kalınlıkta iki plaka ya da saç, destek plaka üzerine yerleştirilir ve bitişik kaynak yüzeylerinin farklı kuvvetlere maruz kalmasından önlemek için sıkıca kenetlendirilir. Takımın birleştirilecek malzemelere ilk dalışı sırasında oluşan kuvvetler oldukça fazladır ve birleştirme konfigürasyonlarındaki plakaların ayrılmamasını emniyete almak için fazladan özen gerekmektedir. Dönen bir takım birleştirme çizgisine daldırılır ve takımın omzu levhanın yüzeyi ile sıkı bir ilişkiye girdiği zaman çizgi boyunca ilerler. Böylece bitişik çizgi boyunca kaynak yapılmış olur. Öte yandan basit bir bindirme kaynağı için, üst üste bindirilmiş iki plaka ya da saç, destek plakasını engeller. Dönel takım üst plakaya

dikey olarak daldırılır ve sonra alt plakaya ve istenilen doğrultuda ilerletilir ve iki plaka birleştirilmiş olur (Şek 1.12/d). Diğer birçok konfigürasyonlar alın ve bindirme kombinasyonları ile üretilebilir. [12].

SKK ile yapılan alın ve bindirme kaynağı için özel hazırlık gerektiğini belirtmek gerekir. Plakaların yüzey temizliği önemlidir ve yüzey temizliğinin ardından iki metal plaka bindirme alın birleştirme yöntemi ile kolayca birleştirilebilir [12].

1.2.4. Kaynak Sonunda Oluşan İç Yapıların Metalürjik İncelemesi

SKK yönteminin bir katı hal kaynağı olması nedeniyle ergitme kaynaklarından farklı olarak kaynak sonunda oluşan içyapı Şekil 1.13’de verilmiştir [20].



Şekil 1.13. SKK sonrası birleştirilen numunelerde oluşan kaynak bölgeleri [20]. A: Temel malzeme (TM), B: Isı tesiri altındaki bölge (ITAB), C: Termomekanik olarak etkilenmiş bölge (TEB), D: Kaynak dikişi (KD)

A BÖLGESİ: Kaynak işlemlerinden etkilenmeyen bölgedir (TM). Bu bölge kaynaklı bölgeden uzak, deforme olmamış, mikro yapısı ve mekanik özellikleri değişmemiş olan malzeme bölgesidir.

B BÖLGESİ: ITAB. Artık kaynak gerilmeleri ve ısı değişimleri gibi etkilerle özellikler değişebilir. Yaşlanmış veya mekanik yaşlandırılmış alaşımlarda bu bölgede sertlik kaybı beklenmelidir. Bununla birlikte, bu alanda plastik deformasyon oluşmaz.

C BÖLGESİ: Plastik deformasyon gözlenir. Termomekanik olarak etkilenme söz konusudur (TEB). Malzemenin alüminyum olması durumunda bu bölgede yeniden kristalleşme olmaksızın önemli plastik şekil değişimi sağlamak mümkündür. Yeniden kristalleşmiş bölge ve deforme olmuş TEB arasında genellikle net bir sınır vardır. Bununla birlikte, diğer metaller üzerindeki

çalışmalar da göstermiştir ki, alüminyum diğer metallerden farklı bir davranış sergilemektedir. Çünkü alüminyumda, yeniden kristalleşme olmaksızın yüksek sıcaklıkta aşırı deformasyon meydana gelebilmektedir.

D BÖLGESİ: Al-alaşımlarında TEB içerisindeki yeniden kristalleşmiş bölgeye DKB denir. Takım omzunun hemen altındaki alan, tane yapısının farklılığından dolayı, ayrı kategoride verilmesi önerilmiştir. Buradaki mikroyapı, omuzun malzeme ile sürtünmesiyle, malzemenin soğuma süresiyle ilişkilidir. Bu bölge, TEB'nin bir alt bölgesi olarak ayrı irdelenmesinde fayda vardır [20].

1.3. Alüminyum ve Alaşımları

Alüminyum, diğer yaygın olarak kullanılan metaller olan demir, kurşun ve kalay gibi doğada bileşikler halinde bulunur. Alüminyum, yeryüzünde oksijen ve silisyumdan sonra en çok bulunan üçüncü element olmasına rağmen, endüstriyel çapta üretimi 1886 yılında elektroliz yönteminin kullanılmaya başlanması ile gerçekleşmiştir. Bu, günümüzde halen kullanılan yöntem olduğundan, 1886 yılı alüminyum endüstrisinin başlangıç yılı olarak kabul edilir. 1886 yılında Werner Von Siemens'in dinamoyu keşfi ve 1892 yılında K.J.Bayer'in, boksitten alümina eldesini sağlayan Bayer prosesini bulması ile alüminyumun endüstriyel çapta üretimi çok kolaylaşmış ve bu en yeni metal, demir ve çelikten sonra dünyada en çok kullanılan ikinci metal olmuştur [21].

Dünyamızda en fazla bulunan metallerden olmasına karşılık, saf halde bulunmadığından geç keşfedilen bir metaldir. Bu nedenle "genç metal" diye adlandırılır. Geç keşfedilmesine rağmen alüminyum, hafiflik, kolay şekillenme, alaşımlandırma, ısıl işlem tatbiki ile yüksek dayanıklılık kazanma, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği ve yüzeyinin çeşitli şekillerde kaplanması ile renklendirilebilme özelliğinden dolayı kısa zamanda birçok endüstrinin vazgeçilmez metali olmuş, demir ve çelikten sonra en çok kullanılan metal haline gelmiştir. Alüminyum kullanımı son 25 yıl içinde ise hızlı bir tempoda yaygınlaşmıştır. Alaşımlandırıldığında yoğunluğundaki küçük artışlara karşın, dayanıklılığında önemli artış olur. Saf alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 9 MPa iken alaşımlandırıldığında bu değer 700 MPa'ya kadar çıkar. Yoğunluğu çeliğin ve bakırın 1/3'ü kadardır. Kolaylıkla dövülebilir, işlenebilir ve dökülebilir. Çok üstün korozyon özelliklerine sahip olması, üzerinde oluşan oksit tabakasının koruyucu olmasındandır.

Dayanıklılığının ağırlığına oranla çok yüksek olması en önemli özelliğidir. 660 °C'da erir, 2056 °C'da kaynar [21,22].

Alüminyumun en önemli özellikleri arasında; mukavemetine oranla özgül ağırlığının düşük olması, iyi elektriksel ve ısıl iletkenliğinin yanında yüksek ısı ve ışık yansımaları, sıcak ve soğuk sekilendirilebilme kolaylığı, sünek ve yumuşak olması ve bazı alaşımlarının çökelme yoluyla sertleştirilebilmesi özellikleri sayılabilir. Bugün bütün dünyada alüminyum ve alaşımları, büyük ticari değeri olan ve büyük miktarlarda üretilen malzeme grubu haline gelmiştir. Alüminyumun uzay, uçak, taşımacılık, inşaat ve otomotiv sanayinde önemli rol oynaması, tüm dünya ülkelerinde “stratejik” bir metal olarak görülmesine neden olmuştur [23].

Alüminyum ulaşım sektöründe, taşıt araçlarının üretiminde de kullanılan en önemli malzemelerden birisidir. Alüminyum kullanımının yaklaşık % 25'i taşıt araçlarının üretimine aittir. Taşıt araçları ne kadar hafif olursa, hareket etmeleri için daha az enerjiye gerek duyulur. Günümüzde bir otomobilde 50 kg alüminyum kullanılmaktadır. Bu sayede, yaklaşık 100 kg demir, çelik ve bakır malzeme tasarrufu yapılmaktadır. Yapılan hesaplar ve deneyimler sonucunda, alüminyum kullanılan bir otomobilin, yeterince alüminyum kullanılmamış bir otomobile kıyasla, ekonomik ömrü boyunca 1500 litre daha az yakıt harcadığı anlaşılmıştır. Bu durumun gerek sürücülerin akaryakıt masraflarına sağlayacağı ekonomi ve çevre sağlığı açısından, gerekse atmosfere yayılan atık ekzoz gazının düşürülmesi yönünden çok büyük faydası bulunmaktadır. Otobüs ve tren gibi sık hareket eden ve duran araçlarda, aracın hafif olması daha da fazla önem kazanmaktadır [21].

Bir uçağın ağırlıkça ortalama %70'i alüminyumdan oluşmaktadır. Alüminyum, alaşımlarının hafifliğinin yanı sıra sağlamlığı ile de havacılık sektörünün gelişmesine büyük katkı sağlamıştır. Alüminyum-lityum alaşımları ile uçakların %15 hafiflemesi mümkündür. Alüminyum hava, su, tuzlu su, petro-kimyasal ve birçok kimyasal sistem ortamlarında yüksek korozyon dirençleri gösterir. Deniz araçlarında alüminyum süper yapı sistemleri ile ağırlık merkezi daha aşağıya çekilmekte, böylece araçların dengesi artırılmakta ve araçların toplam hacimleri artırılabilir [24].

Birincil alüminyumun kalitesi, elde edildiği cevherin kalitesi ve elektroliz prosesinin işletme şartları ile yakından ilgilidir. Alüminyum ekstrüzyon ve yassı-ürünlerin hammaddesi olan alüminyum ingotların %99,5- 99,7 alüminyum saflığında olması önerilir. Bu malzemeye gerekli elementler (silisyum, magnezyum, bakır, çinko vb.) ilave edilerek, istenilen alaşım hazırlanır. Tüm alüminyum ürünlerde istenilen mekanik özelliklerin temini

ancak uygun alaşım ve ısıl işlem şartlarının sağlanması ile mümkündür [21]. Tablo 1.2’de alaşım elementlerinin alüminyumun mekanik özelliklerine etkisi, Tablo 1.3’de ise saf alüminyumun fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.2. Alaşım elementlerinin alüminyumun mekanik özelliklerine etkisi [22].

	Fe	Si	Mg	Mn	Cu	Zn	Ti	Cr	Ni	Li	Zr	V	Sn	B	Bi	Pb
Yoğunluk	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+
Akışkanlık	-	+	+	-	-	o	-	o	o	o	o	o	o	o	o	o
Sertleşme	+	+	+	++	+++	+++	+	+	o	o	o	o	-	o	o	-
Mukavemet	+	+	+	+	++	+++	++	o	+	o	o	o	+	+	o	o
Elekt. İletkenliği	+	--	--	---	--	-	--	--	-	--	--	--	o	+++	o	o
Korozyon mukavemeti	-	+	+++	++	-	-	o	o	o	o	o	o	-	o	-	-
Isıl genişleme katsayısı	o	-	-	-	-	+	-	-	-	o	-	-	o	o	o	o

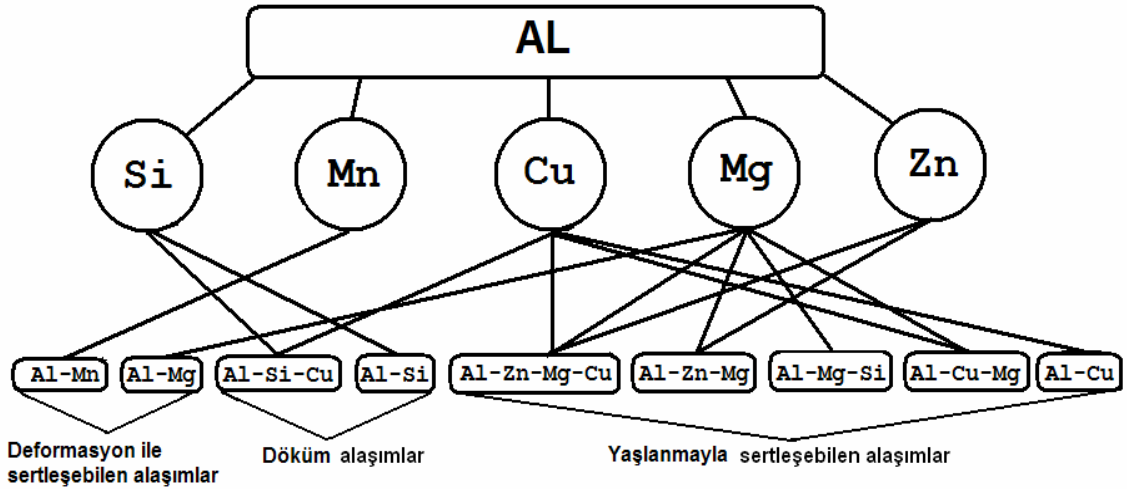
++: çok iyi +:iyi -: olumsuz --: çok kötü o: etkisiz

Tablo 1.3. Saf alüminyumun fiziksel özellikleri [25].

Kimyasal sembol	Al
Atom numarası	13
Atom Ağırlığı	26.98
Kafes Yapısı	KYM
Yoğunluğu (20°C)	2.6989
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,a.	0.55 cal/cm.s.°C
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150-300°C
Özgül ısısı	0,224 cal/g (100°C)

1.3.1. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları temel üretim yöntemlerine göre, dövme ve döküm alaşımları olmak üzere ikiye ayrılır. Alüminyuma ilave edilen metale göre; dört rakamdan oluşan bir sınıflandırma kullanılmaktadır. Bu sınıflandırmalarda, sistemindeki birinci rakam, alüminyuma ilave edilen esas metali gösterir (Tablo 1.4). 2xxx serisinden 7xxx ana grubuna kadar her grup, en büyük alaşım elementine göre adlandırılmaktadır. Dövme alaşımlarında esas üretim yöntemiyle kütük (ingot) olarak dökülen alaşım, plastik şekil verme yöntemleriyle ürün haline getirilir. Döküm alaşımlarında ise, sıvı halde her türlü bileşim ve özellik ayarı yapılmış olan alaşımın, doğrudan ürün kalıbına dökümü yapılır. Dövme ve döküm alaşımları da element bileşimlerine göre alt sınıflara ayrılmaktadır (Şekil 1.14) [26].



Şekil 1.14. Alüminyumda alaşım elementlerinin genel bileşimleri [26].

Döküm alaşımları genellikle kum döküm, pres döküm ve sabit kalıp yöntemleri kullanılarak üretilirler. Bu alaşımlar son derece yüksek fiziksel özellikler gösterir ve işlenmeye elverişlidirler. Döküm alaşımlar kaynak edilebilirler. Isıl işlem, çok yaygın olarak dövme alüminyum alaşımlarına uygulanmakla birlikte döküm alaşımlarının bir kısmına da başarıyla uygulanabilmektedir. Bu özelliklerin yanında mukavemet ve korozyon özellikleri iyidir. Bu nedenle döküm alaşımlarının kimyasal bileşimleri dövme alaşımlarından farklı olup silisyum, % 5-12 oranı ile en önemli alaşım elementidir [26].

Tablo 1.4'te çeşitli alüminyum serileri, ısıl işlem durumları ve oluşturdukları alaşım grupları verilmiştir. Genellikle dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması alaşım elementlerinin katkılarına göre yapılırken, aynı zamanda ısıl işlem uygulanabilirliği (yaşlandırma) açısından da bu alaşımlar ele alınmaktadır [26].

Tablo 1.4. Alüminyum alaşımları için tanımlama sistemi [26,27].

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

1.3.2. Al Alaşımlarına Uygulanan Isıl İşlemler

Dövme alüminyum alaşımlarına çökeltme sertleşmesi (yaşlandırma) uygulanır. Çökeltme reaksiyonunun tam olarak gerçekleştirilmesi için gerekli olan ilk koşul, aşırı doymuş katı bir eriyik oluşturmaktır. Bu amaçla alaşıma çözeltiye alma ısıl işlemi olarak adlandırılan bir ısıl işlem uygulanır. Bu işlemin amacı, alaşımdaki sertleştirme elementlerinin katı eriyik içinde maksimum miktarda yer almasını sağlamaktır. Katı eriyikte çökelti oluşturmak için asıl gereken şey, azalan sıcaklıkla beraber katının eriyebilirliğinin azalmasıdır. Bu şekilde katı eriyik, aşırı doymuş katı eriyik olarak yarı kararlı duruma geçmektedir [28]. Yaşlandırılmayan ve yaşlandırılabilen Al-alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler ve açıklamaları Tablo 1.5 ve 1.6'da verilmiştir.

Tablo 1.5. Yaşlandırılmayan alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler [27,28,29].

Sembol	Açıklama
F	Üretim-ürünlerde hiçbir özel ısı kontrol veya sertleşme koşulları kullanılmayan şekillendirme sistemi.
O	Tavlama- uygulanan tavlama, en düşük mukavemet koşullarını, süneklik ve boyutsal kararlılığı sağlamak için kullanılır.
H	Deformasyon sertleşmesi- soğuk şekillendirme ile üretilen ürünlere uygulanır. Şekil değiştirme sertleşmesini, mukavemeti bir miktar düşüren ek ısı işlem uygulanmasını takip eder. H'yı genelde iki veya daha çok sayı takip eder.
W	Çözeltiyeye alma (çökelti sertleşmesi) ısı işlemi-kararlı olmayan alaşımlara yalnızca çözeltiyeye alma tavlamasından sonra oda sıcaklığında kendiliğinden yaşlanmayı sağlayan tav uygulanır.
T	Isıl İşlem- F, O,H'dan daha kararlı tav sağlamak içindir. Ürünlere tav uygulanması bazen sabit sertlik derecesi sağlamak için şekil değiştirme sertleşmesiyle birlikte uygulanır.

H harfinden sonraki ilk rakam temel işlemi tanımlamaktadır.

- H1 : Sadece soğuk deformasyon
- H2 : Soğuk deformasyon ve yapay yeniden kristalleştirme
- H3 : Soğuk deformasyon ve yapı dengelemesi
- H4 : Soğuk deformasyon ve parlatma ve boyama

H harfinden sonraki ikinci harf, soğuk deformasyon oranını tanımlamaktadır.

- Hx2 : Dörtte bir
- Hx4 : Yarım Sert
- Hx6 : Üç-çeyrek sert
- Hx8 : Tam sert
- Hx9 : Çok sert

Tablo 1.6. Yaşlandırılabilen alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler [27,28,29].

Sembol	Açıklama
T1	Ekstrüzyon gibi yüksek sıcaklıkta şekil verilmiş parçalar soğutulduktan sonraki doğal yaşlandırma
T2	Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve ardından doğal yaşlandırma
T3	Çözeltiyeye alma ısı işlemi, soğuk şekillendirme ve doğal yaşlandırma
T4	Çözeltiyeye alma ısı işlemi ve doğal yaşlandırma
T5	Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra yapay yaşlandırma
T6	Çözeltiyeye alma ısı işlemi ve yapay yaşlandırma
T7	Çözeltiyeye alma ısı işlemi ve stabilizasyon (aşırı yaşlandırma)
T8	Çözeltiyeye alma ısı işlemi soğuk şekillendirme ve yapay yaşlandırma
T9	Çözeltiyeye alma ısı işlemi, yapay yaşlandırma ve soğuk deformasyon
T10	Yüksek sıcaklıkta şekil verme soğutmasından sonra soğuk deformasyon ve sonra yapay yaşlandırma

1.3.3. 5XXX Serisi Alaşımlar

Bu alaşımlar ısııl işleme tabi tutulamayan seri olup 124-352 N/mm²'lik çekme mukavemetine sahiptir. Bunlar alüminyum/magnezyum alaşımlarıdır (toplam magnezyum oranı %0,2'den %6,2'ye kadardır) ve ısııl işleme tabi tutulamayan alaşımlar içinde en yüksek mukavemete sahiptir. Bu alaşımlar; kolay kaynak edilebilirliği nedeni ile gemi yapımı, taşımacılık, basınçlı kaplar, köprüler ve binalar gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar [30].

Deniz suyu korozyonuna da dirençli olan Al-Mg alaşımları, yüksek korozyon dirençleri ve kolay şekillendirilme istenen, mekanik özelliklerin fazla önemli olmadığı atmosfer etkilerine açık olan yapı elemanları gibi yerlerde de tercih edilirler. Bu alaşımlar levha, band, boru, çubuk, tel ve profil olarak biçimlendirilerek kullanılırlar [31].

1.3.4. 6XXX Serisi Alaşımlar

Bu seri, alaşımları magnezyum (Mg) ve silisyum (Si) ihtiva ederler (toplam magnezyum ve silisyum oranı yaklaşık %1'dir). Mg₂Si intermetalik bileşikleri, çökelti sertleştirilmesi ile dayanım artışı sağlar. 124-221 N/mm²'lik çekme mukavemetine sahiptir. Kaynaklı üretimde geniş çapta kullanılırlar. Çoğunlukla ekstrüzyon ürünü ve farklı yapı bileşenlerini birleştirmek için kullanılırlar. Alüminyuma magnezyum ve silisyum eklemekle silisyum tavlama çözünerek magnezyum silikat bileşimi oluşturur. AlMgSi alaşımları içinde en yaygın kullanılanlar 6060, 6061 6063 ve AlMgSi alaşımlarıdır. AA6061 alaşımı yüksek mukavemetin, işlenebilirliğin ve kaynak kabiliyetinin istendiği durumlarda kullanılır. Uçak iniş merdivenleri gibi elemanlarda uygulama alanı vardır. 20°C'daki yoğunluğu 2.70 gr/cm³'tür. Çıplak ve kaplı alaşım olarak kullanılır. 260–510 °C arasında sıcak çalışabilir. Tam tavlama 413°C'da yapılır. Bu sıcaklıkta 2-3 saat bekletildikten sonra, saate 10°C'da hızla fırında soğutulur. AA6061-T6 alaşımının çekme mukavemeti 290 MPa'dır. Bu seri otomotiv sektöründe genel amaçlı yapı elemanı olarak kullanılır. Bu alaşımlar doğal olarak çatlama duyarlılığı nedeni ile (ek kaynak metali kullanılmadan) kaynak edilememelidir. Ark kaynağı yöntemi süresince uygun miktarda ek kaynak metali kullanmak, esas metalin ıslanmasını sağlar ve bu sayede sıcak çatlama problemi önlenmiş olur. Bu alaşımlar uygulama ve çalışma isteklerine bağlı olarak 4xxx ve 5xxx ek kaynak metallerinin her ikisi ile de kaynak edilirler [30].

1.4. Alüminyum Alaşımlar İçin SKK'nın Önemi

Alüminyum ve alaşımlarının geleneksel ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde yaşanan problemler, araştırmacıları yeni birleştirme yöntemleri geliştirmeye yönlendirmiştir. Ergitme kaynak yöntemleri ile Al-alaşımlarının (özellikle yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış olan Al-alaşımlarının) kaynağında aşırı derecede çatlak ve porozite (boşluk) oluşumu gibi problemlerden mevcuttur. Bu problemlerden çatlak oluşumunun nedeni, Al-alaşımlarının katılaştırma sıcaklık aralıklarının geniş olması ve ısıl genleşme katsayılarının yüksek olmasıdır. Ark kaynağındaki yüksek ısı girdisi, özellikle yüksek mukavemetli Al-alaşımlarında ısı tesiri altındaki bölge (ITAB)' de tane sınırlarında düşük ergitme sıcaklıklı fazların oluşumuna ve dolayısıyla bu bölgede tane sınırlarında katılaştırma esnasında çatlamaya yol açabilir. İkinci problem olan kaynak dikişinde porozite oluşumunun nedeni ise; alüminyumun sıvı halde hidrojen çözünürlüğünün katı haldekenden çok daha yüksek olmasıdır. Vakum ortamında yapılan elektron kaynağı yöntemi porozite açısından en avantajlı ergitme (sıvı hal) kaynak yöntemidir. Fakat yüksek sıcaklıkların söz konusu olduğu elektron kaynağında, vakum ortamında yapıldığı için düşük buharlaşma sıcaklığına sahip alaşım elementleri içeren alüminyum alaşımlarında kaynak dikişinde alaşım elementi kaybı, dolayısıyla mukavemet düşüşü söz konusu olabilmektedir [30].

Yaşlandırma sertleşmesine tabi tutulmuş Al-alaşımlarının ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde karşılaşılan bir başka problem, kaynak dikişinde sertleştirici çökeltilerin çözünmesi ile ITAB' da aşırı yaşlanma sonucu sertlik ve mukavemetin düşmesidir [9]. Bu durum kaynak bölgesinde mekanik uyumsuzluğa sebep olmaktadır. Bazı alüminyum alaşımlar zor kaynaklanabilir ve yüzeydeki oksitlenmenin ana problem olması nedeni ile yüzey koruması pahalı bir işlemdir [12]. Belirtilen sebeplerden dolayı, bu malzemelerin birleştirilmesinde katı-hal kaynak yöntemleri (sürtünme ve sürtünme karıştırma kaynağı) büyük avantajlar sağlamaktadır [32]. Yöntemin birçok malzeme için uygun olmasına karşın, en önemli uygulama alanı alüminyum ve Al-alaşımlarının kaynaklı birleştirilmesidir. Al-alaşımları, bu yöntemde oldukça iyi mekanik özelliklerde birleştirilebilmektedir [33]. SKK yöntemi tüm pozisyonlarda rahatlıkla uygulanabilmektedir [34]. Alüminyum malzemeler için yapılan çalışmalarda, plaka kalınlığının 1 – 75 mm arasında uygun birleştirme yapılabildiği görülmüştür [10].

TWI'da alüminyum ve Al-alaşımları için SKK yöntemi ile oluşturulacak birleştirmeler üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışma sonuçlarında gerek yaşlandırma sertleşmesi yapılmış, gerekse yaşlandırma sertleşmesi yapılamayan (1xxx ve 5xxx serileri gibi) Al-alaşımlarında başarılı ve güvenli kaynak bağlantılarının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir [35]. Ayrıca bakır alaşımları, kurşun, titanyum alaşımları ve magnezyum alaşımları, metal matrisli alüminyum kompozitlerde de bu yöntemin uygulanmasına başlanmıştır [10].

SKK yöntemi, günümüzde yaygın olarak Boeing, Airbus, General Dynamics, Alcoa gibi firmalarda kullanılmaktadır. Ayrıca ülkemizde de FNSSNUROL zırhlı araçlar fabrikasında, 5XXX ve 7XXX alaşımlarının çeşitli kalınlık ve boyutlardaki plakaların kaynaklarında başarıyla uygulanmaktadır [36].

SKK yöntemi, geleneksel kaynak yöntemlerinin ergime bölgesinden meydana gelen problemlerini ortadan kaldırmasına rağmen, yaşlandırılabilir (çökeltme sertleşmesi gösteren) alüminyum alaşımları için TEB ve ITAB bölgelerindeki kaynak ısı çevrimi süresince sertleştirici çökelti partiküllerinin büyümesi ve çözünmesinden dolayı kaynağın mekanik özelliklerinde bir düşüş gözlenir. Ancak, takım ilerleme hızının artırılması ve pim ve omuz çapının küçük seçilmesi ile mekanik özelliklerin etkilendiği bölgelerin küçültülmesi suretiyle muhtemel mukavemet düşüşlerinin azaltılması da mümkündür. Kaynak ısı çevriminden dolayı aşırı yaşlanmanın sebep olduğu TEB ve ITAB bölgelerindeki mukavemet kaybını azaltmak için diğer bir yol da kaynak edilmiş numunelere kaynak sonrası yeniden ısı işlem uygulamak olabilir [20].

1.4.1. Katı Çözelti Sertleşmesi Yapılmış Al-Alaşımlarında SKK'nın Etkisi

Katı çözelti sertleşmesi yapılmış 5XXX serisi Al-alaşımları, kaynak dikişinde mukavemetlendirici partiküllerinin çözeltilmeye alınmaması ve ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB) aşırı yaşlanma olmamasından dolayı SKK yapıldıklarında kaynak bölgesinde düşük mukavemet kaybı gösterirler. Örneğin, SKK yapılmış 5083-0 Al-alaşımının kaynak bölgesinde sertlikte önemli bir değişim gözlenmemiştir ve birleştirmeler, tavlanmış ana malzemeninki ile kıyaslanabilir mukavemet göstermiştir [37].

SKK yönteminde kaynak parametresi olarak adlandırılan takım dönme hızı/takım ilerleme hızı (n/v) oranının (karıştırma şiddeti) kaynak performansını etkileyen önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir. Fakat 4 mm kalınlıktaki 5083-0 Al-alaşımı için bu

parametre penceresinin oldukça geniş olduğu ve bu yöntem ile elde edilen kaynakların esas malzeme ile karşılaştırılabilir çekme mukavemeti sergiledikleri tespit edilmiştir [38].

3,9 mm kalınlıktaki AA5454-0 Al-alışımında da bu metot ile elde edilen kaynaklarda sertlik ve mukavemet kaybı gözlenmemiş ve ana malzemeninkine benzer çekme özellikleri gözlenmiştir [39]. Von Strombeck v.d, farklı kalınlıklardaki saçların kaynağında tungsten inert gaz ark (TİG) kaynağının, SKK'dan daha iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Aynı alışım, temperlenmiş (H32) durumda SKK yapıldığında önemli oranda mukavemet kaybı gözlenmiştir. Benzer şekilde, 3 mm kalınlığındaki AA5005-H14 Al-alışımında SKK sonucu kaynak bölgesinde önemli oranda sertlik kaybı ve mukavemet düşüşü kaydedilmiştir. %75 düzeyinde bir kaynak mukavemet verimi (joint efficiency) elde edilebilmiştir [40]. Bu sonuçlar, temperlemenin kaynak performansını önemli oranda etkilediğini, dolayısıyla yüksek mukavemetli alışımlarda kaynak bölgesinde mukavemet kaybının daha yüksek olduğunu göstermektedir.

1.4.2. Yaşlandırma Sertleşmesi Yapılmış Al-Alışımında SKK'nın Etkisi

Kaynak bölgesindeki mukavemet kaybı, bu bölgede mevcut dislokasyonların azalması ve mukavemetlendirici çökeltilerin kaybindan dolayı yaşlandırma sertleşmesi yapılmış Al-alışımlarda daha yüksektir. Fakat, SKK yapılmış AA024-T3 Al-alışımının kaynak dikişinde mukavemetlendirici çökeltilerin çözünmesi sonucu malzemenin yumuşamasına rağmen ince taneli bir mikroyapı oluşmasından dolayı çok az bir sertlik düşüşü gözlenmiştir [41]. Sertlik, bu alışımın kaynak bölgesinde mukavemetlendirici çökelti partiküllerinin irileşerek sertleştirici etkilerin yok olduğu kaynak dikişi dışındaki aşırı yaşlanma bölgesinde en düşüktür. Bu kaynak işleminde simetrik olmayan bir kaynak dikişi elde edildiği için kaynak dikişinin her iki tarafındaki sertliğin minimum olduğu bölgeler kaynak dikişine eşit mesafede değildir. Ayrıca, kaynak dikişinin her iki tarafında kaynak merkezinden, 15 mm mesafede, yapay yaşlandırma sonucu Al_2CuMg fazının çökmesiyle sertliğin maksimum olduğu bölgeler mevcuttur. Yüksek takım dönme ve takım ilerleme hızı kullanıldığında kaynak bölgesinde sertlik düşüşü daha az olmaktadır. Bunun sebebi, yüksek hızda yapılan kaynaklardaki yüksek soğuma hızlarından dolayı mukavemetlendirici partiküllerin kısmen tekrar çökmesidir [7].

Bıallas vd. [41], düşük takım ilerleme hızı kullanılarak yapılan birleştirmelerde kaynak bölgesinde sertlik düşüşünün daha yüksek olduğunu deneysel olarak

gözlemlenmişlerdir. Bu kaynaklarda, sertlik, kaynak dikişinde ITAB'dan biraz yüksektir ve minimum sertlik termomekanik olarak etkilenen bölge civarındaki ITAB' dadır [41].

Yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış Al-Mg-Si alaşımının (AA6061) kaynak dikişinde SKK esnasında mukavemetlendirici fazların çözünmesi ile mukavemet kaybı olur [37,40,42]. 6XXX serisi alaşımlarda temel sertleştirici faz “ β ” (Mg_5Si_6) fazıdır. Bu faz ısıtma sırasında sıcaklık 200-250 °C'ın üzerine çıktığında kolayca çözünür. Soğutma esnasında, kaynak dikişinde değil ITAB' da “ β ” fazı, $Mg_{1,7}Si$ gibi daha az sertleştirici özelliğe sahip fazlar halinde çöker. Bundan dolayı, bu alaşımın kaynak bölgesinde önemli oranda sertlik kaybı gözlenir. Muhtemelen sertleştirici çökelti partiküllerinin büyümesi sonucu minimum sertlik kaynak dikişine yakın ITAB'dadır [40,42]. Bununla beraber ITAB'daki bu sertlik kaybı TIG kaynağından çok daha düşüktür. Bunun sebebi SKK'da soğumanın daha hızlı olması sebebiyle aşırı yaşlanmanın daha az olmasıdır. Elektron kaynağında minimum sertlik, kaynak dikişinde iken, TIG kaynağında olduğu gibi minimum sertlik SKK'da da ITAB' daki aşırı yaşlanma bölgesindedir. Ayrıca, SKK dikişindeki sertlik TIG kaynaklarının kaynak dikişinde elde edilen sertlik değerinden çok daha yüksektir. Bu yöntemde elde edilen kaynak dikişinde sertliğin yüksek olması, sertleştirici partiküllerin çökmesi, Mg ve Si atomlarının katı çözelti sertleşmesi ve kaynak dikişinde tane rafinasyonu oluşumu nedeni ile sürtünme karıştırma kaynaklı Al-alaşımlarında sürpriz değildir [42].

1.4.3. Uygulamadaki Önemli Noktalar

2XXX ve 7XXX serileri gibi dayanımı yüksek Al-alaşımların gövde, dümen ve kanat gibi havacılık sektörü yapılarında sıkça kullanıldığı iyi bilinmektedir. Ne yazık ki, böyle yüksek dayanımlı Al-alaşımların kaynama sırasında sıcak çatlak oluşmasından dolayı geleneksel erime kaynağı yöntemiyle birleştirilmesi zordur. Bu yüzden eskiden beri havacılık sektörü yapılarının birleşiminin büyük bir kısmı perçinleme yoluyla yapılır. Bu da yüksek yapım karmaşasına ve yüksek maliyete neden olur. SKK'nın ortaya çıkışı, sistem yüzeyindeki maliyet birikimlerinde gerekli olan hafif tertibatları üretmeye yönelik geleneksel yaklaşımları değiştirmek için bir fırsat sağlamıştır [12].

Eclipse Aviation, hava taşıtındaki toplam 500 adet lastik parçaları ve yapısını kaynatmak için SKK'ı adapte ederek hava sanayisinde devrim yarattı. Diğer dikkate değer

uygulamaları Boeing firması, delta roket tankları ve C17 içyapıları için SKK'yı kullanarak gerçekleştirmiştir. Hava sanayisinin ortak çabaları ticari örgütlenmede millerce hatasız SKK üretmiştir [12].

Yüksek dayanımlı Al-alaşım, yüksek balistik ve statik gücün bir birleşiminden dolayı zırh olarak kullanılmaktadır. Örneğin İngiltere'de, AA7017-4.5Zn-2Mg alaşım yapısına dayalı olan bir "Def Stan 95-22 Class 1" alüminyum alaşım zırhı 1970'lerin başından beri savunma bakanlığı tarafından kullanılmaktadır. Böyle bir zırh alaşımı eskiden beri MIG kaynağı ile Al-Mg dolgu malzemesi kullanılarak kaynatılmıştır. Fakat MIG kaynaklarıyla ilişkilendirilen önemli sorunlar şunlardır:

- a) Kaynak tabanında başlayan gerilim korozyonu
- b) ITAB'ın çözeltiye alınan ve doğal yaşlanan bölgesinde oluşan katman kalkması oluşması
- c) Düşük erime noktalı tane sınırı zarının sıvılaşması [12].

Yeni katı haldeki SKK işleminin ortaya çıkmasıyla, ABD'deki bir savunma araştırma kuruluşu 1995 yılında SKK'nın alüminyum zırhlarda uygulanabilirliğinin araştırılması için bir program başlattı. Pullanma korozyonu ve "gerilim korozyonu çatlaması" üzerine yapılan daha önceki araştırmalar, kaynak kalitesi açısından SKK'nın MIG'e göre olan avantajlarını doğruladı. Daha ayrıntılı olarak araştırmalar, nitelik doğrulaması amacıyla gerçek kaynak tasarımlarının üzerine kaynağın hızını ve birleşecek saçın kalınlığını arttırmak için tekniklerin uygulanması üzerine odaklanmıştır [43].

Amerika'da AA2519-T87 zırhı, ileri amfibi saldırı araçlarında (İASA) ana yapısal alaşım olarak kullanılmaktadır. Bu zırhın, yüksek balistik koruma özelliği ile diğer alışılagelmiş olarak kullanılan Al-alaşımına (AA5083-H131) oranla statik direnci daha fazladır. İASA, ABD Deniz Kuvvetlerinde zırhlı personel taşıma alanında geliştirilmektedir. Kaynak edilmiş alüminyumun yapısı İASA'ya yüksek hızda tam donanımlı 18 adet askeri, karada veya denizde birliklerine ulaştırmasına imkân sağlamaktadır. Hâlihazırda MIG ve TIG kaynak yöntemleri İASA'nın gövde yapısının imalatında kullanılan öncelikli kaynak yöntemidir. Bununla birlikte bu gazaltı kaynaklar AA2519 alaşımının alın kaynağında düşük süneklik gösterirler. Bunun sonucu olarak bu kaynaklar savaş araçları için gerekli olan balistik şok testlerini geçememektedirler. Böylece savunma araçlarında kullanılmak için gerekli çok basit kaynak dizaynları gerçekleştirilememektedir. Ayrıca bu kaynak yöntemleri daha karmaşık ve beraberinde yüksek üretim maliyetlerine yol açmıştır.

SKK'nın katı hal işlemleri olması dolayısıyla diğer tipik ark kaynak yöntemlerine kıyasla AA5083, AA6061 ve AA2219 gibi diğer Al-alaşımalarında daha üstün mekanik özellikler doğurduğunu göstermiştir. Bu sebeple son birkaç yıldır Amerika'da "Genel Dinamik Kara Sistemleri"nde (GDLS) ve "Eşzamanlı Kurumsal Teknolojileri"nde (EKT) [44] AA2519-T87'nin SKK'sında çalışmalar yapılmıştır. Bu durum, bir inç kalınlıkta düz-alın kaynağı ve 1-2 inç kalınlıkta 90 derecelik köşe kaynağının SKK yöntemi ile başarılı bir şekilde yapılabildiğini göstermiştir [44]. AA2519-T87'nin SKK'sında 389 MPa gibi bir çekme mukavemeti ve yaklaşık %14 oranında süneklik elde edilebileceğini göstermiştir. Bu durum TIG kaynağına oranla çekme mukavemetinde 124 MPa artış ve %300 oranında süneklik artışını sağladığını göstermektedir. Bununla birlikte Colligan vd., [44] alın ve 90 derecelik köşe kaynaklarında kaynak panellerinin balistik şok testlerini gerekli çarpma değerinin %30 fazla olmasına rağmen 12 inçten az bir çatlakla geçebildiklerini ispat etmişlerdir. Hali hazırda zırh yapımında kullanılan Al-alaşımaların SKK'sını daha uygun hale getirebilmek için iyileştirmeler yapılmaktadır [12].

Sanayideki üretim işlemleri ve kullanılmakta olan malzemeler dikkate alındığında çeşitli uygulamalar için farklı malzemelerin bir arada kullanılma ihtiyacının bulunduğu belirlenmiştir. Günümüzde çeşitli sanayi uygulamaları incelendiğinde, kullanılan malzemeler özgül mukavemetleri açısından değerlendirilip kullanılmakta olduğu ve bu uygulamalarda alüminyum alaşımlarının bir adım öne çıktığı görülmektedir. Diğer taraftan ticari olarak geliştirilen çeşitli alüminyum alaşımlarının birbirlerine göre farklı üstünlüklere sahip oldukları bilinmektedir. Ancak kullanılmakta olan alaşımların hiç biri kullanılacakları uygulama için gerekli koşulları tek başlarına karşılayacak yeterlilikte değildirler. Dolayısıyla çeşitli uygulamalarda farklı alaşımların bir arada kullanılma ihtiyacı ile oldukça sık karşılaşılmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada farklı iki alüminyum alaşımının birlikte kullanılma ihtiyacı dikkate alınarak, bu malzemelerin kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliği üzerine bir çalışma yapmanın bilim dünyası ve ülke sanayisi için yararlı olacağı kanısına varılmıştır.

1.5. Literatür Taraması

Başlangıçta alüminyum ve Al-alaşımlarının ergitme kaynağına alternatif olarak 1991 yılında TWI Kaynak Enstitüsü tarafından geliştirilen sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, yeni bir katı hal kaynak tekniği uygulamasıdır. O tarihten günümüze kadar geçen süreçte,

başta alüminyum alaşımları olmak üzere farklı tiplerdeki metalleri kapsayan çalışmalar, yöntemin gelişimine paralel olarak devam etmektedir. Son on altı yıl içerisinde, özellikle Al-alaşımların SKK yoluyla birleştirilmesinde karmaşık mikro yapısal değişimlerin belirlenmesi ve mekanik davranışların araştırılması amacıyla, günümüzde de halen devam eden birçok bilimsel çalışma yapılmıştır. Konuyla ilgili çalışmalardan seçilen bazı önemli araştırmalar aşağıda özetlenmiştir.

SKK, birbirinden farklı alaşım ve metallerin birleştirilmesi için kullanılabilen yeni bir kaynak teknolojisi olarak da tanımlanır. Birbirinden farklı alüminyum ve bakır alaşımlarının, ya da Al-alaşımlarını başka metallere sürtünme karıştırma ile kaynatılması için pek çok çalışma yapılmıştır [12]. Tablo 1.7, farklı Al-alaşımlarının birbirleri ile yapılmış sürtünme karıştırma kaynağı çalışmalarını ve kullanılan parametreleri özetler.

Tablo 1.7. Birbirinden farklı alaşımların ve metallerin SKK çalışmaları [12].

Malzemeler	Plaka kalınlığı (mm)	Takım dönme hızı (dev/dak)	İlerleme hızı (mm/dak)
AA2024—AA6061	6,0	400-1200	60
AA6061—AA2024	12,7	637	133
AA2024—AA1100	0,65	650	60
AA5052—AA2017	5,3	1000,1250	60
AA7075—AA2017	5,3	1000,1250	60
7x1Al (Sc) —7x5Al (Sc)	5,3	1000	60
AA7075—AA2017	3,0	1250	60
AA7075—AA1100	3,0	1250	60
AA5083—AA6082	5,0	-	170-500
AA2024—D357	-	-	-
AA6061—D356	4,0	1600	87-267
AA2024—AA7075	25,4	150-200	76-127
%20 Al ₂ O ₃ /6061—%10 Sic/A339	6,5	800	60
%20 Al ₂ O ₃ /AA2014—AA2024	4	1120	120

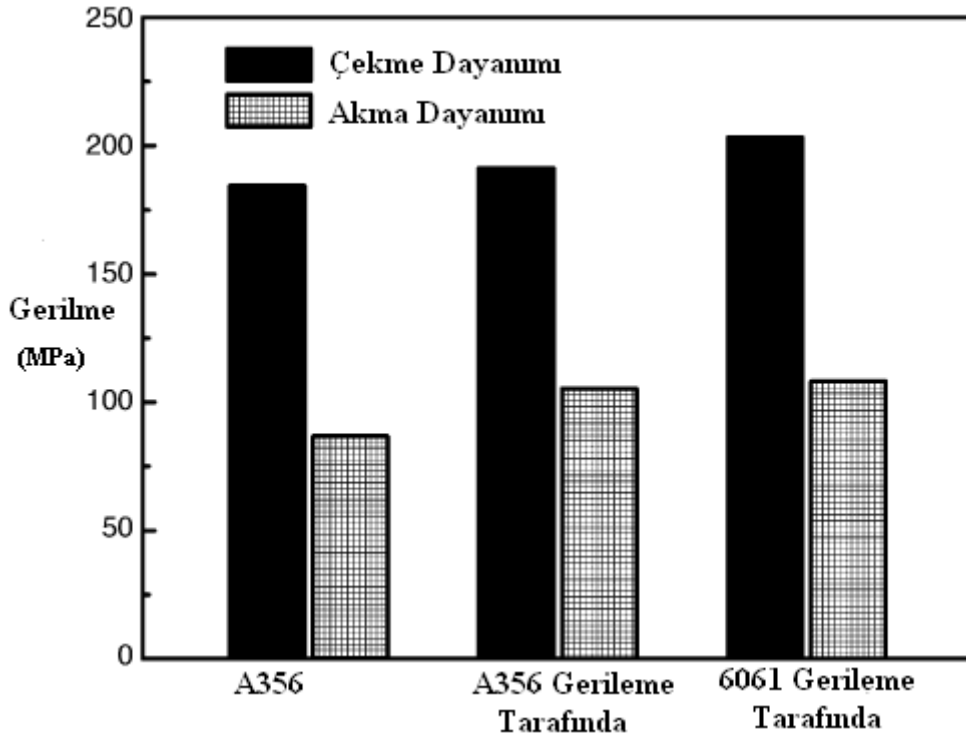
Bu çalışmaların pek çoğu malzeme akışının izlenmesi amacı ile yapılmıştır ve bu sistemlerde hiçbir uygun SKK parametresi ve takım geometrisi belirlenmemiştir. Sonuçta, genelde kaynamamış bir çatlak, büyük açık (boş) bölge ve saçların kökünde oksit kalıntıları olarak kaynak yapıları oluşmuştur. Çok sert bir alüminyum alaşım çok yumuşak bir Al-alaşım ile karıştırılırsa, kaynak etkinliğinin azaldığı gözlemlenmiştir [12].

AA5083'den AA6082'ye ve AA2024'den AA7075'e kadar olan SKK parametreleri göstermiştir ki daha iyi kaynaklar üretebilmek için düşük dayanıklılıktaki malzemeler ilerleme tarafına yerleştirilmelidir [12,14]. Fakat Lederich vd, [12] daha yüksek dayanıklılıktaki AA2024'ün kaynağın ilerleyen kısmına yerleştirildiğinde D357'nin ilerleme tarafına yerleştirildiğinden daha iyi özellikli kaynaklarının elde edildiğini göstermişlerdir. AA2024/D357 SKK uygulamasına rağmen, ilerleme tarafındaki AA2024 ile gerileme tarafındaki D357 arasında çok az nüfuziyet oluşmuştur. Bu durum "soğuk kaynama"nın belirgin bir özelliğidir. Bu durumda, AA2024/D357'nin SKK işlemi sonucu kaynak yapısı düşük dayanıklılık ve zayıf süneklik göstermiştir.

J. A. Wert [12], AA2024 60x240x4mm ölçülerinde Al-alaşımı ile 36x240x4mm ölçülerindeki %20 Al₂O₃ partikül takviyeli AA2014 MMK levhalara SKK küt alın kaynağını uygulamıştır. Sonuçta AA2024 Al-alaşımı ve AA2014 % 20 Al₂O₃ partikül takviyeli MMK malzemenin SKK yöntemi ile birleştirilmesinde mikro yapılarında her bir malzemenin en dar tabakasının 0.1 mm civarında olduğunu, böylece malzemenin orjinal şeklini muhafaza ettiğini, sert malzemenin takımın ilerleme yönünde olursa daha kolay malzeme taşınımı olacağını ve bunun da iki metal arasındaki sertliği etkileyeceğini, yapılan kaynaklarda ötektik erimenin olduğunu (505-577 °C), sıvı fazın TEB' de tane sınırları filmlerinde oluştuğunu, partikül şeritlerinin ve liflerinin kırılma bölgelerinin olduğunu ve bunun ötektik erimeden kaynaklanabilmiş olacağını ortaya koymuştur.

A356/AA6061 ve AA2024/AA7075 üzerine yapılmış yakın tarihli iki çalışma SKK yöntemi ile birbirinden farklı alaşımların birleşmesi uygulamalarında olumlu sonuçlar sunmaktadır [12]. Lee vd. [12], birbirinden farklı A356 ve AA6061 alaşımlarının 1600 dev/dak takım devir hızında 87–267 mm/dak değerindeki takım ilerleme hızlarında ve 3 derecelik bir takım eğim açısındaki bir SKK işlemini gerçekleştirdiler. A356/AA6061'in SKK ile birleştirilmesini hatasız bir şekilde yapıldığını göstermiş oldular. Metalografik incelemeler ve nitelik değerlendirmeleri aşağıdaki önemli gözlemleri ortaya çıkardı. Öncelikle, kaynak çekirdeğinin içyapısı temel olarak gerileme tarafındaki malzemece kontrol edilmiştir. A356 gerileme bölgesindeyken, Si parçacıkları kaynak merkezine saçılmışlardır. AA6061'in gerileme tarafında olması durumunda, AA6061'in kaynak merkezindeki içyapısı düzgün ve eşeksiz "kristalleşmiş tane" görünümünü vermiştir. İkinci olarak, çökeltinin çözülmesi ve irileşmesinden dolayı karışma bölgesinin sertliği AA6061 ana metalinden daha düşük ve Si parçacıklarının dağılımından dolayı A356 temel metalinden daha yüksektir. Üçüncü olarak, SKK'nın baskı yükü A356 ana metalinkiyle

aynı olmuş ve kaynama şartlarını dikkate almaksızın A356 ana metalinde çatlak oluşmuştur. Yalnızca dikiş bölgesinin boyunca alınan çekme örnekleri kullanılarak test edildiğinde, A356/AA6061 birleşiminin kaynak bölgesi mukavemeti, A356 ana malzemenin mukavemetinden daha yüksek olmuştur (Şekil. 14). Birleştirme bölgesinin en yüksek mukavemeti AA6061'in gerileme tarafına yerleştirildiğinde edinilmiştir. Fakat bu mukavemet değeri, birleştirme bölgesindeki çökeltinin çözülmesi ve irileşmesinden dolayı AA6061 ana metalinkinden daha düşük olmuştur [12].



Şekil 1.15. A356/AA6061 SKK sonrası kaynak boyunca alınan numunelerin dayanımları [12].

Yakın zamanda, Baumann vd. [12], AA2024/AA7075 ikili alaşımının SKK özelliklerini değerlendirmiştir. 25.4 mm kalınlığındaki plakalar 150–200 dev/dak takım dönme hızında ve 76,2–127 mm/dak takım ilerleme hızı parametrelerinde başarıyla birleştirilerek hatasız kaynak yapılarını oluşturmuşlardır. AA2024/AA7075 SKK bağlantılarının ve ana malzemelerin gerilme özellikleri Tablo 1.8'de özetlenmiştir.

Tablo 1.8. AA2024/AA7075 SKK dikişlerinin ve ana malzemelerin mukavemet değerleri [12].

Alaşım	Takım Dönme Hızı (dev/dak)	Takım İlerleme Hızı (mm/dak)	Malzemenin Konumu	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Kaynak Verimi (%)
AA2024-T351				348,9	488,2	17,5	
AA7075-T351				422,0	509,5	10,8	
AA7050-T451				470,2	533,7	13,5	
SKK AA7050	150	114,3	Başta	265,5	388,2	5,6	72,7
			Sonda	270,3	394,4	5,0	73,9
SKK AA2024—AA7075	150	114,3	Başta	262,0	391,6	6,7	80,2
			Sonda	257,9	388,9	6,7	79,7
SKK AA2024—AA7075	200	76,2	Başta	246,2	371,6	5,7	76,1
			Sonda	251,7	379,2	5,6	77,7
	200	101,6	Başta	268,2	391,9	5,3	79,2
			Sonda	262,7	391,2	5,9	79,1
	200	127	Başta	278,7	397,8	5,8	81,5
			Sonda	277,2	405,1	5,6	81,9

AA2024/AA7075 SKK bağlantılarının dayanımı, AA2024 ana malzemenin %76-80'i kadardır. Aşırı yaşlanmış, ısıdan etkilenen bölgelerde (ITAB) her zaman çatlak oluşmuştur. AA2024/AA7075 SKK bağlantılarındaki sünekliğin azalması, düşük dirençli ITAB'lardaki bölgesel deformasyona dayandırılmıştır. Tablo 1.8, AA2024/AA7075 SKK bağlantılarının direnci ve sünekliği AA7075 SKK bağlantılarınıninkilerle kıyaslanabilir nitelikte olduğunu göstermektedir. Dahası Baumann vd. [12], AA2024/AA7075 alaşımlarının SKK ile birleştirilmelerinde elde edilen bağlantının aynı koşullardaki yorulma ömrünün ($K_t=1.5$, $R=0.06$) ana malzemenin yorulma ömrüne yakın değerlere sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Cederqvist ve Reynolds [45], alüminyum malzemelerin, bindirme bağlantılarının SKK'sını etkileyen faktörleri incelemişlerdir. SKK katı hal birleştirme işlemi olup, bindirme kaynağında kullanılmak üzere sürtünme kaynağının geliştirilmesi tekniğinden faydalanmak ve yeni uygulamalar bulunmasına imkân sağlamak için çalışma yapmışlardır. SKK ve bindirme kaynakları üzerinde metalografik incelemeler ve mekaniklik özelliklerinin de dâhil edildiği bir araştırma yapmışlardır. Havacılık endüstrisinde sıklıkla kullanılan AA2024-T3 ve AA7075-T6 alaşımlarını birleştirmişlerdir. Kaynak parametrelerine takım ilerleme hızı, takım devir sayısı ve takım ölçüleri dâhil edilmiştir. Metalografik kesitlerin değerlendirilmesini ve kopma noktalarının incelemesini yapmışlardır. Yapılan çalışma ile tüm kaynaklarda kritik ara safha yüzlerinin mevcut

olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte ikinci bir kaynak pasosu eklenerek bu ara yüzlerin giderildiği sonucuna varmışlardır. SKK ile yapılan bindirme kaynağının, mukavemet olarak diğer kaynakların (punta ve perçin kaynağı) yerini ileride alabileceği bu çalışma ile ortaya koyulmuşlardır.

Chao v.d [46], 9,5 mm kalınlığında AA2024-T3 ve AA7075-T7351 iki farklı Al-alaşımını SKK küt alın kaynağı ile birleştirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, SKK işleminin karışım bölgesindeki akma gerilmesini azalttığını, her iki Al-alaşımının yüksek karıştırma şiddetlerinde akma gerilmesinin daha fazla olduğunu açıklamışlardır.

Barcellona vd. [47], 100x100x3 mm³ ölçülerinde AA2024-T6 ve AA7075-T6 iki farklı Al-alaşımını SKK küt alın formda birleştirmişlerdir. Sonuçta, karışım bölgesinde yeniden kristalleşme olayının meydana geldiğini, alaşımların mekanik özelliklerinde homojen olmayan bir azalma olduğu ve bilhassa malzemenin mikro sertlik değerlerinde azalma olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca kaynak sonrası ısıl işlemlerin malzemelerin mekanik özelliklerini ve mukavemetini arttırabileceğini fakat bu işlemlerin Al-alaşımına uygulanmasının zor olduğunu bu bakımdan hatalardan sakınılması için ısıl işlem esnasında doğru izleme ve kontrol faaliyetlerinin uygulanması gerektiğini belirtmişlerdir.

S.A.Khadir ve T.Shibayanagi [48] tarafından 3 mm kalınlığında AA2024-T3 Al-alaşımı ile AA7075-T6 Al alaşımına SKK uygulanmıştır. Kullanılan takım malzemesi SKD 61, takımın omuz çapı 12 mm ve vida dişli karıştırıcı uç çapı 4 mm'dir. Sonuç olarak, AA2024-T3 Al-alaşımının AA-7075-T6 Al-alaşımına SKK ile birleştirilmesinde takım ilerleme hızının artmasıyla boşluklar ve katmanlı birleşme (kissingbond) oluşumu artma eğilimindedir. Özellikle AA2024-T3 Al-alaşımının gerileme yönünde olduğunda bu durum daha bariz bir şekilde ortaya çıkmaktadır. En düşük sertlik ITAB' tadır ve takım ilerleme hızının artmasıyla bu değer artmaktadır. Çekme deneylerinde kaynaklar, AA2024-T3 Al-alaşımının ITAB kısmından kırılmışlardır. Maksimum çekme mukavemeti AA 2024-T3 Al-alaşımı takımın ilerleme yönünde bulunduğu 100 mm/dak takım ilerleme hızı ve 1200 dev/dak takım dönme hızında 423 MPa olarak elde edildiği belirtmişlerdir. [48].

Dickerson vd. [49], 150x60x3 mm³ ölçülerinde AA6082-T6 ve AA2024-T3 farklı Al-alaşımını 600dev/dak devir sayısı ve 200mm/dak takım ilerleme hızında SKK yaparak takımın ısı akışını incelemişlerdir. Takım malzemesi, takım çeliğinden ayarlanabilir olarak 18 mm çapında omuz ve M5 vida dişli karıştırıcı uç kullanmışlardır.

Sonuçta; SKK esnasında kullanılan takımın malzemeye giren ısı miktarını yaklaşık % 10 azalttığını belirtmişlerdir.

Cavaliere vd. [50], AA2024/AA7075 Al-alaşım çiftini SKK yöntemiyle birleştirerek mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir. Kaynaklı bağlantılara sırasıyla çekme ve yorulma testleri uygulanmıştır. Yorulma testleri $R = 0,1$ sabit 54 yük ve yaklaşık 75 Hz yük frekansı altında gerçekleştirilerek, S/N yorulma dayanım eğrileri çıkartılmıştır. SKK işlemi sonunda oluşan mikro yapı karakteristikleri, optik ve elektron mikroskoplarında belirlenmeye çalışılmıştır. Yorulma testleri asıl malzemelerde yaklaşık 10^7 çevrimden büyük çıkması gerekirken farklı bu iki tip alaşımın yorulma ömrünün yaklaşık 10^6 çevrimde 44 MPa'lık bir gerilme ile sonuçlandığı belirlenmiştir.

Cavaliere ve Panella [51], AA2024/AA7075 Al-alaşım çiftini, SKK yöntemiyle birleştirerek karıştırıcı takımın konumunu kaynak bölgesinden 0,5 - 1,0 - 1,5 mm uzağa paralel olacak şekilde yönlendirerek bu alaşım çiftlerini sabit devir ve ilerleme hızı altında birleştirmişlerdir. Farklı takım uzaklıklarının çekme ve yorulma karakteristiklerinde kademeli oranda düşüşe yol açtığı ve bağlantılarda yorulma kırığı gelişimini artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan kaynakların kaynak merkezinden uzaklaşmasıyla mikrosertlik değerlerinde düşüşe yol açtığı sonucuna varmışlardır.

Chen ve Nakata [52], farklı özelliklerdeki 3mm'lik şerit döküm Al-Si ve Mg-Al-Zn Al-alaşımına SKK yöntemiyle bindirme kaynağı uygulamışlardır. Kaynak sonunda numunelerin SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Çalışma sonunda, yüksek ısı girdisi sağlayan düşük takım ilerleme hızı şartlarında mikroyapının daha düzenli bölgelerden oluştuğu görülmüştür. Yüksek takım ilerleme hızlarında birleşme bölgesinde çatlak ve gözeneklerin oluştuğu, kararsız mikroyapıların gerilme testleri üzerinde olumsuz etki gösterdiğini tespit edilmiştir. Ayrıca XRD (X ışını difraksiyonu) analizleriyle, ara bölgede oluşan faz yapıları tespit etmişlerdir.

Srinivasan vd. [53], AA6056/7075 Al-alaşım çiftlerinin, SKK yöntemi ile birleştirilmesinde gerilmeli korozyon davranışlarını incelemişlerdir. 900 dev/dak ve 250 mm/dak kaynak parametreleri kullanarak birleştirdikleri bağlantıları, % 3,5 NaCl çözeltisine maruz bırakarak mekanik ve mikroyapı karakteristiklerini normal koşullar altındaki değerlerle karşılaştırmışlardır. Korozyona tabi tutulmayan numunelerin düşük hızlardaki çekme testlerinde kırılmaların, daha düşük mekanik özelliklere sahip AA6061'in TEB bölgesinde meydana geldiğini, korozyonlu numunelerde ise AA7075 tarafında kırılmaların görüldüğünü çalışmalarında vurgulamışlardır.

Shigematsu vd. [54], AA5083 ve AA6061 Al-alaşım çiftlerini hem birbirleriyle hem de kendileriyle SKK yöntemiyle birleştirerek mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemiştir. Çekme testi sonuçlarında benzer olan kaynakların, benzer olmayan çiftlerle birleştirilenlere göre daha yüksek gerilme değerlerine ulaştığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca mikrosertlik sonuçları, malzemelerin ısı işlem karakteristikleriyle doğrudan ilişkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Maeda vd. [55], gerçekleştirdikleri kaynak dikişlerindeki hata şekillerine takım ilerleme ve dönme hızlarının etkileri çalışmasında, 5mm kalınlıklı AA5083-0 ve AA6061-T651 plakayı SKD 61'den yapılmış takım kullanarak SKK yöntemi ile birleştirmişlerdir. Takım ucu helisel vida profilli olup 3 derecelik eğimle kullanılmıştır. Takım ölçüleri sırasıyla omuz ölçüleri 15mm, uç çapı 6mm, uç boyu 4,8 mm olarak seçilmiştir. Dönme hızları 1200 ile 1400 dev/dak, ilerleme hızları 120 ile 300 mm/dak olarak seçilmiştir. Sıcaklık ölçümleri kaynağın kökünde ve yüzeyinde ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümleri yardımıyla sıcaklık dağılım haritaları elde edilmiştir. AA6061 ilerleme bölgesinde iken 1800 dev/dak ve 120 mm/dak parametrelerinde kusursuz kaynak gerçekleştirilmişlerdir. AA5083 alaşımının ilerleme bölgesinde iken kaynak hataları oluşmuştur. 1800 dev/dak ve 120 mm/dak parametrelerinde hazırlanan termal haritalar göstermiştir ki izotermal çizgiler AA6061'in ilerleme bölgesinde genişlemektedir.

D.R.Akula [55], AA2024 ve AA7075 alüminyum levhalarını 800-1300 dev/dak takım devir sayısı aralığında, 54-193 mm/dak takım ilerleme hızları aralığında başarılı bir şekilde SKK yöntemi ile birleştirmiştir. Kaynak yapısını uzama, gerilme ve mikro sertlikleri optik mikroskop ve tarayıcı elektron mikroskobu ile inceledi. AA2024 alaşımı için en iyi kaynak parametresinin 1045 dev/dak takım dönme hızında ve 146 mm/dak takım ilerleme hızında olduğunu belirledi. AA7075 alaşımı için en uygun kaynak parametresinin 840 dev/dak takım dönme hızında ve 193 mm/dak takım ilerleme hızında olduğunu belirledi. Alın kaynakta ise en başarılı kaynak parametrelerini, 675 dev/dak ve 146 mm/dak olarak belirledi.

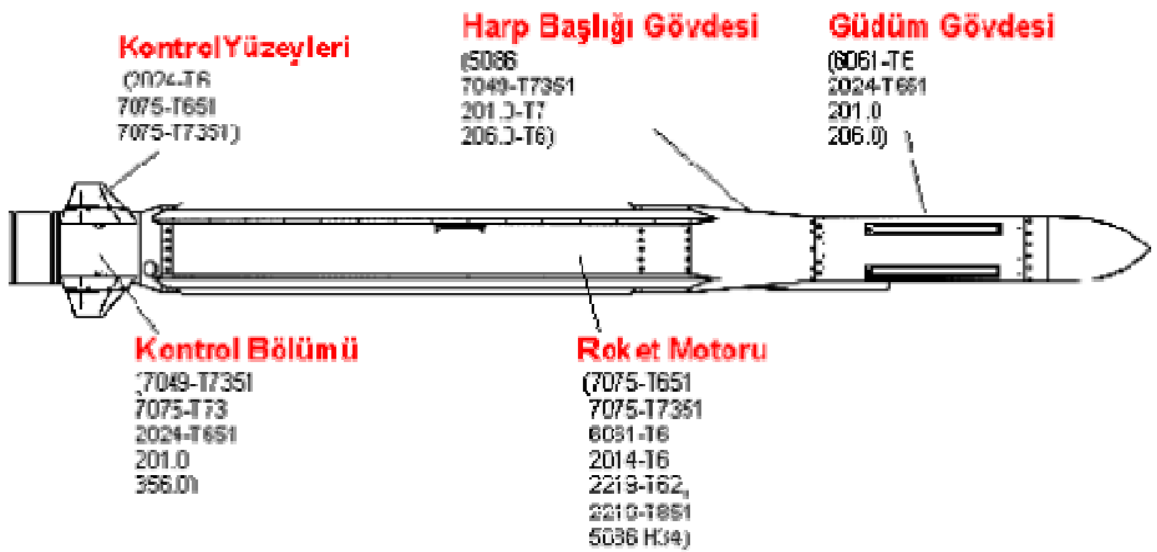
Literatürde sertlik ve mukavemet değerleri arasında belirgin fark olan Al-alaşımının sürünme karıştırma kaynağında kaynak etkinliğinde azalma olduğu için mukavemet değerleri birbirine yakın fakat birbirinden çok farklı bir yöntemlerle mukavemetleri arttırılmış alüminyum alaşım çiftinin kaynak kabiliyetinin incelenmesi uygun görülmüştür. Bu nedenle SKK yöntemi ile birleştirilebilirliğinin incelenmesi için

belirtilen koşulları sağlayan AA5754-H22 ile AA6061-T6 alaşımlarının seçilmesine karar verilmiştir.

Çalışmada kullanılacak olan AA5754 ile AA6061 alüminyum alaşımlarının birbirleri ile SKK yöntemi ile birleştirilebilirliği daha önce yeterince incelenmemiş ve bu konuda yeterli araştırmaya rastlanılmamıştır. AA6061 Al-alaşımlarının geleneksel ergitme kaynak yöntemlerinde birleştirilmesinin problemlili olduğu literatür çalışmalarında vurgulanmıştır. AA6061 alaşımlarının yaşlandırma ile sertleştirilmiş olması nedeniyle geleneksel ergitmeli kaynak yöntemlerle birleştirilmesinde maruz kalınan yüksek sıcaklığın etkisiyle, ısıl işlem özellikleri değişmektedir. Kaynak bölgelerinde tane irileşmesi ve akabinde süneklikte düşüş olmakta ve bunun sonucunda çatlama olasılığı artmaktadır. Bu durum bir katı hal kaynak yöntemi olan SKK yönteminde çok daha az miktarda olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı AA6061 Al-alaşımının ona benzer mukavemet değerlerine sahip AA5754 alaşımı ile SKK işlemi uygulayıp kaynak dikişindeki mukavemet düşüşünü daha da az düzeye indirgeneceği düşünülmüştür.

1.6. Uygulamada Farklı Malzemelerin Bir Arada Kullanılma Gerekçesi

Günümüzde farklı Al-alaşımlarının SKK yöntemi ile kaynak edilmesi uygulamalarına Şekil 1.16'da görülmekte olan roket ve füze uygulaması güzel bir örnek teşkil etmektedir.



Şekil 1.16. Roket ve füze uygulamalarında kullanılan alüminyum alaşımları [56].

Söz konusu şekil günümüzde roketlerde kullanılan metalik malzemelerin ve Al-alaşımlarının türlerini genel olarak göstermektedir. Roketlerin farklı bölgelerinde farklı alaşımlar kullanıldığından birbiri ile bağlantıları kaçınılmaz olacaktır. Bununla beraber havacılık sektöründe uygulanan birleştirmeler perçin ağırlıklı olmaktadır. Bu nedenle bu alaşımların katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan SKK ile birleştirilmeleri diğer kaynak ve birleştirme yöntemlerine oranla daha uygun olacaktır.

Yapılacak çalışmada ise AA5754-H22 alaşımı ile AA6061-T6 alaşımının birleştirilebilirliği incelenecektir. Bu iki alaşımın başarılı bir şekilde birleştirilmeleri durumunda sanayi ve imalat sektöründe aşağıda belirtilen şekilde fayda sağlayacağı ve kullanım alanlarının oluşabileceği düşünülmüştür.

AA5754 alaşımını ele alırsak, bu alaşım korozyona karşı direnç özelliği ile ön plana çıkmaktadır. Bu nedenle Türkiye pazarında otomotiv sektöründe ve denizcilik sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. AA6061 alaşımı ise savunma sanayinde, gemi inşaatı ve havacılık sektöründe kullanılmaktadır. Bu alüminyum çiftinin mekanik özelliklerinin birbirine yakın olmasının sonucu yapılacak olan çalışmalar, uygulamada bu alüminyum çiftinin denizcilik ve otomotiv sektöründe birleştirilerek beraber kullanılabileceğini sonucunu karşımıza çıkarmaktadır.

Denizcilik sektöründe AA5754 alaşımı yat ve gövdelerin deniz suyu ile temas eden dış saçı ve güverte saçı, AA6061 alaşımı ise korozyon etkilerinin nispeten daha az tesir ettiği deniz aracının iç bölümünde bulunan saçlarda kullanılabilir. Bu durumda farklı özellikteki saçların SKK yöntemi ile başarılı bir şekilde birleştirilebileceği düşünülmüştür.

Otomotiv sektörü ele alındığında AA5754 alaşımının daha yoğun olarak kullanıldığı görmekteyiz. Bu durumun başlıca sebebi taşıtın ağırlığının azaltılarak özgül mukavemetinin korunması düşüncesinden kaynaklanmaktadır. AA5754 alaşımı korozyon direnci özelliğinden dolayı araçların kaporta saçlarında ve gittikçe artan oranda diğer kısımlarında da kullanılmaktadır. AA6061 alaşımının maliyetlerinin AA5754 alaşımının altına düşmesi durumunda bu sektörde değişen koşullara bağlı olarak AA6061 alaşımını araçların iç kısımlarında kullanarak çeşitli iyileştirmeler yapılabilir. Böylece milli servete katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Bu sebeple araçların dış saçları AA5754, şase saçlarında da AA6061 alaşımları kullanılması ile bu iki alaşımın birleştirilmesi ihtiyacı doğacaktır. SKK ve sürtünme karıştırma nokta kaynak yöntemleri bu ihtiyaçların karşısında geçerli bir çözüm olarak düşünülmektedir.

1.7. Çalışmanın Amacı

Yapılacak olan çalışmada sanayi ve imalat sektöründe çok yaygın olarak kullanılan AA5754 ve AA6061 alaşım çiftlerinin birbirlerine yakın mekanik özellikleri olduğu belirlenmiştir. Mekanik özellikleri birbirlerine yakın olan bu malzemelerin farklı özelliklere sahip olmaları nedeniyle çeşitli uygulamalar için birlikte kullanılma ihtiyacı duyulabileceği anlaşılmaktadır. Bu sebepten en yaygın katı hal kaynak yöntemi olan SKK yöntemi ile birleştirilmelerinin en uygun olacağı düşünülmektedir. Literatürde bu alaşım çiftlerinin birleştirilebilirliği ile ilgili tatminkâr çalışmalara ulaşılamamıştır. Birleştirme sonucunda ortaya çıkan yapının mekanik ve metalürjik özelliklerinin incelenerek SKK işleminin belirlenen Al-alaşım çiftlerinde başarı oranını ve bu alaşımlar için uygulanacak kaynak yönteminde kullanılması gereken en uygun parametreleri belirlemek amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçların alaşım çiftlerinin birleştirilmesi ihtiyacında uygulamada sanayi ve üretim sektörüne ışık tutması hedeflenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada deney malzemesi olarak AA5754-H22 ile AA6061-T6 Al-alaşımı plakalar kullanılmıştır. Literatür taramalarında bu iki alaşımın SKK davranışları incelenerek kaynak için en uygun parametre aralığı belirlenmiş olup deney düzeneğinin bu parametrelere karşılık gelen değerleri tespit edilerek yapılan ön deneyler sonucu kullanılacak kaynak parametreleri belirlenmiştir.

2.1. Deney Düzeneği

Şekil 2.1’de görüldüğü üzere SKK işlemi için kullanılan deney düzeneği, dikey freze tezgâhı ve hidrolik yüklemeli numune bağlama tablasından oluşmaktadır.



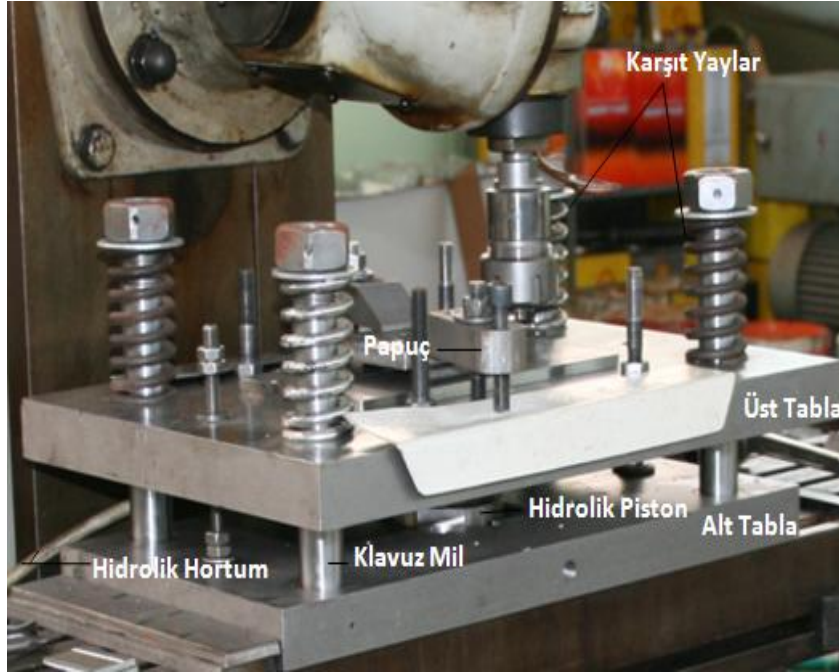
Şekil 2.1. Sürtünme karıştırma kaynak düzeneğinin görüntüsü

2.1.1. Ana Tezgâh

SKK deneylerini gerçekleştirmek için KTÜ Makine Mühendisliği Bölümü takım tezgâhları laboratuvarında bulunan STANKOIMPORT marka universal dikey freze tezgâhı kullanılmıştır. Freze tezgâhı, 7,5 kW gücünde olup, 50-1600 dev/dak devir sayısı aralığında ve 35-1020 mm/dak ilerleme hızı aralığında çalışabilmektedir. Birleştirme için kullanılan takım, bu tezgâhın takım tutucusuna özel pens ile bağlanmıştır. Tezgâh tablası üzerine takım baskı kuvvetini uygulamak ve kontrol etmek amacıyla hazırlanmış hidrolik üniteli deney tablası bulunmaktadır. Kullanılan freze tezgâhı ile SKK'nın takım dönme hızı ve takım ilerleme hızları kontrol edilebilmektedir.

2.1.2. Hidrolik Tabla

SKK esnasında takım baskı kuvveti parametresini uygulamak ve kontrol etmek amacı ile oluşturulmuştur. Yüzeyleri taşlanmış iki adet tabla, dört köşesine yerleştirilen dört adet klavuz mil, tablaların aralarında 1,5 kW gücünde, değişken basınçlı yük kontrol üniteli hidrolik pompa ünitesi ile bağlantılı hidrolik bir piston ve üst tablanın köşelerinde uygulanan yükü eşit olarak karşılaması için dört adet yaydan oluşmaktadır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Hidrolik yüklemeli tablanın görüntüsü

Hidrolik sistem takım ile iş parçası arasındaki baskı kuvvetini SKK işlemi boyunca uygulayıp sabit tutmak amacı ile hazırlanıp kalibre edilmiştir. Kaynak edilecek plakalar üst tabla üzerinde bulunan bağlama pabuçları ile sabitlenir.

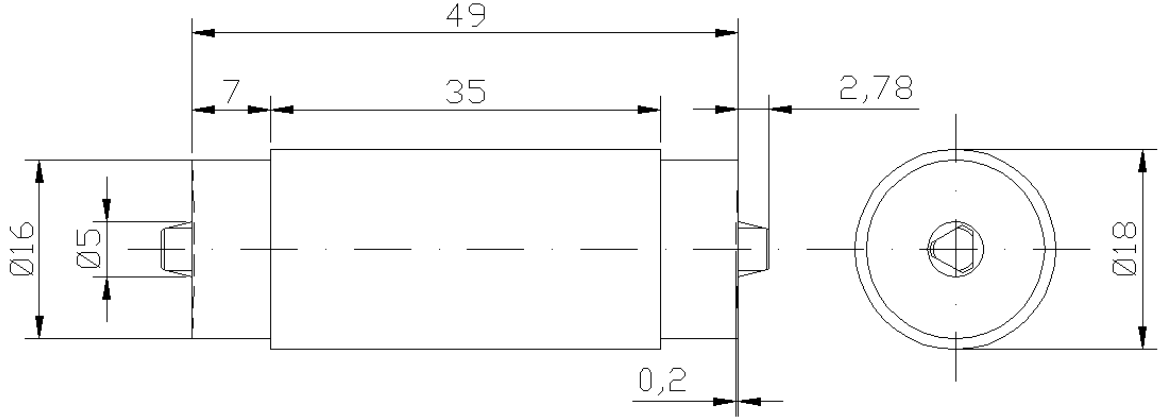
2.2. Karıştırıcı Uç (Takım)

SKK uygulamalarında kullanılacak takımın malzemesi olarak erişilecek sıcaklık mertebesi ve oluşacak olan sürtünme dikkate alınarak beklenen sıcaklıktan daha yüksek sıcaklık seviyelerinde menevişlenen sıcak iş takım çeliği belirlenmiştir. Bu çelikler arasında erişilen mukavemet ve tokluk değerleri dikkate alındığında X40CrMoV5-1 (1.2344) sıcak iş takım çeliğinin en uygun çelik olacağı düşünülmüştür. Kullanılacak olan bu çelik, yüksek sıcaklıkta sertliğini, ısı iletkenliğini, tokluğunu ve aşınma direncini kaybetmeyen, su ile soğutulabilen ve nitrasyon yapılabilen, tane sınırlarında karbür çökeltisi olmayan, ince taneli mikro yapıya sahip, düşük P ve S alaşımı içeren bir sıcak iş takım çeliğidir. Belirtilen sıcak iş takım çeliğine ait kimyasal bileşim oranları Tablo 2.1’de sunulmuştur.

Tablo 2.1. X40CrMoV5-1 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi [57].

Kimyasal Bileşim (%)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,42	1,20	0,50	0,025	0,005	5,50	1,50	1,15

Karıştırıcı uç profilini belirlemek amacı ile literatür taraması yapılmıştır. Al-alaşımlar için yapılan SKK çalışmalarında en verimli birleştirmelerin vida profilli ve üçgen geometrili takım uçlarında oluşturulduğu tespit edilmiştir. SKK esnasında vida profile sahip karıştırıcı uç, malzemeyi aşağıya doğru ekstrüze etmekte, üçgen geometriye sahip karıştırıcı uç ise malzemeyi geriye doğru ekstrüze etmektedir. Bunun neticesinde ise hem üçgen geometrili hem de vida profilli uç kullanılması kararlaştırılmıştır. Takım pim geometrisi üçgen piramit şeklinde olup, üzerine M5 vida açılmıştır. SKK ile birleştirmeleri yapılacak plakaların kalınlığı 3 mm olduğu için takımın pim uzunluğu 2,78 mm takım omuz çapı 16 mm, pim çapı 4,5 mm olarak imal edilmiştir (Şekil 2.3, 2.4).



Şekil 2.3. Karıştırıcı takıma ait teknik çizim



Şekil 2.4. Karıştırıcı takımın yandan ve üstten görünümü

Karıştırıcı takımın ucuna şekil verildikten sonra takımın mukavemet ve sertliğini artırmak için ısıl işlem uygulanmıştır. Isıl işlem esnasında takım yüzeyinde tufal oluşumunu ve yüzeyden karbon kaybını önlemek amacı ile takım, elektroliz yöntemi ile 3μ kalınlığında bakır ile kaplandı. Daha sonra Şekil 2.5'te belirtilen su verme sertleştirme ve tekrarlı menevişleme işlemi adımlar uygulanarak takım Şekil 2.6'da belirtilen sertlik ve tokluk değerlerine ulaştırılmıştır. Karıştırıcı takıma ait fiziksel özellikler ve ısıl işlem tablosu Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. X40CrMoV5-1 takım çeliğinin fiziksel özellikleri ve ısı işleme tablosu [57].

Fiziksel Özellikleri :Özgül ağırlığı : 20 °C'de 7,80 kg/dm³Isıl genişmesi : 20 °C'den°C'ye kadar, 10⁻⁶ m/(mK)

Isıl iletkenliği : 20 °C'de 25,0 W/(m.K)

100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
11,5	12,0	12,2	12,5	12,9

Isıl İşlemi :

Yumuşatma tavlaması : 750 - 800 °C

Tavlama sonrası sertlik : En fazla 205 HB

Gerilim giderme tavlaması : 600 - 650 °C

Sıcak şekil verme : 1100 - 900 °C

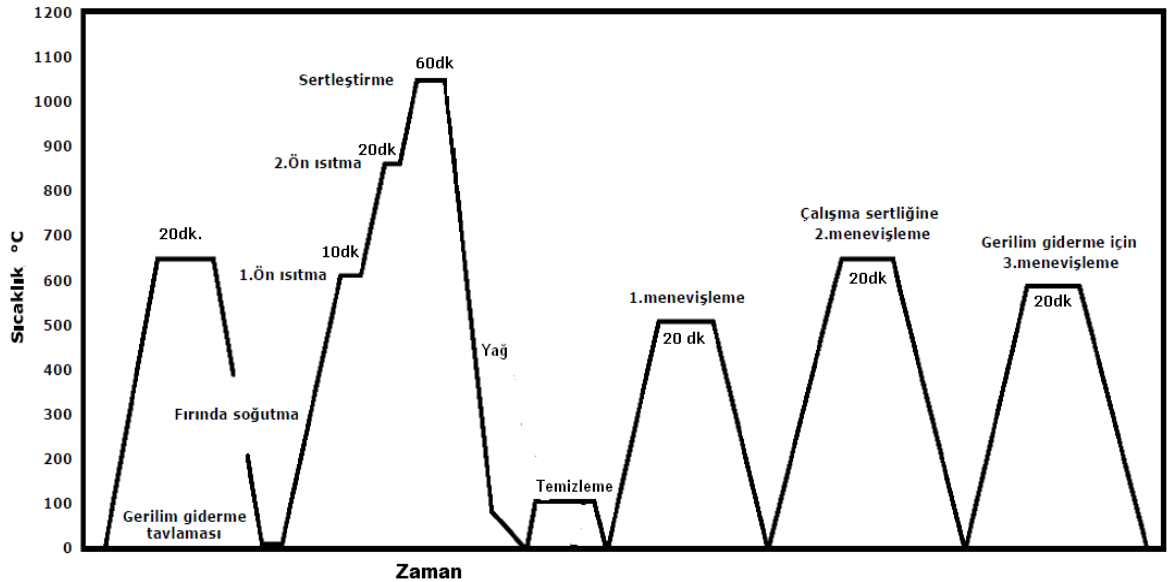
Sertleştirme : 1020 - 1080 °C

Sertleştirme ortamı : Yağ, Sıcak banyo (500 - 550 °C), Hava

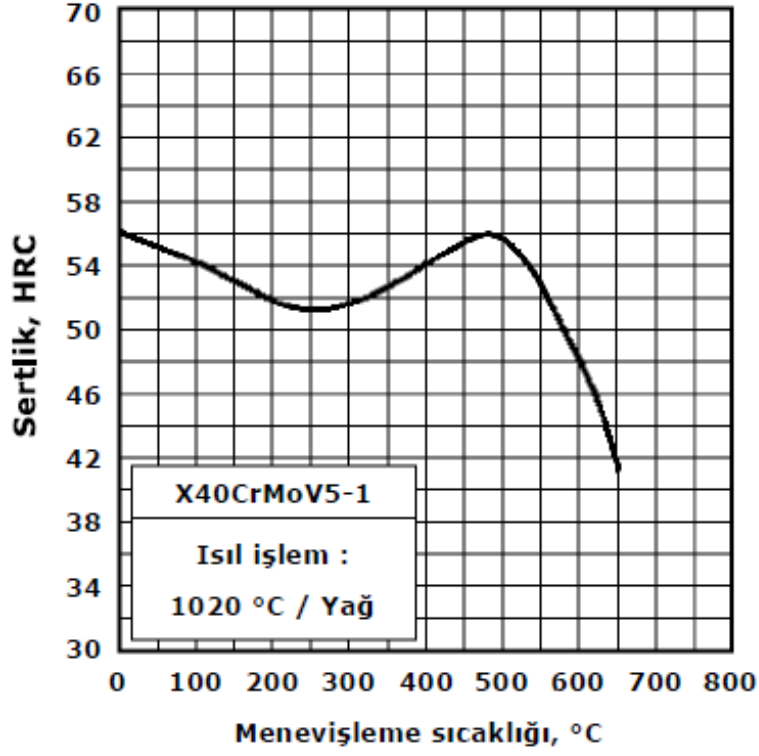
Sertleştirme sonrası sertlik : 52 - 56 HRC Yağ, Sıcak banyo
50 - 54 HRC Hava

Menevişleme sonrası sertlik :

400 °C	500 °C	550 °C	600 °C
54 HRC	55 HRC	54 HRC	50 HRC



Şekil 2.5. Karıştırıcı takım malzemesine uygulanan ısı işleme adımları [57].



Şekil 2.6. Karıştırıcı takım malzemesine ait menevişleme diyagramı [57].

2.3. Deney Malzemeleri

SKK işleminde kullanılacak olan AA5754-H22 ile AA6061-T6 Al-alaşımının belirlenmesinde en önemli etken, bu alaşımların birbirlerinden farklı biçimde imal edilmiş olmaları, çekme dayanımı ve sertliklerinin birbirine yakın olması ve ayrıca AA6061-T6 Al-alaşımının SKK nedeniyle oluşacak aşırı yaşlandırma etkisini azaltma düşüncesidir. Alaşımlar Ankara OSTİM organize sanayi bölgesinden temin edilmiştir. Saç olarak temin edilen bu alaşımların kalınlıkları 3 mm'dir. Saçlar, kaynak işlemine hazır hale gelebilmesi için (195x135) mm ebatlarında plakalara ayrılmış ve kenarlarında bulunan çapaklar temizlenmiştir. Tablo 2.3 ve 2.4'te tedarikçi firmadan alınan AA5754-H22 ve AA6061-T6 alaşımlarına ait kimyasal bileşim oranları ve mekanik özellikler verilmiştir.

Tablo 2.3. AA5754-H22'nin (AISI) kimyasal ve mekanik özellikleri [21].

Kimyasal bileşim (%)							
Malzeme	Si	Fe	Cu	Mn	Ti	Mg	Al
% oran	0,15	0,32	0,01	0,16	0,02	3,16	96,08
Mekanik Özellikler							
Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (VSD)	Elastisite Modülü (GPa)	Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı (°C)		
175	243	13,1	80	60,87	320		

Tablo 2.4. AA6061-T6'nın (AISI) kimyasal ve mekanik özellikleri [21,26].

Kimyasal bileşim (%)												
Malzeme	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al
% oran	0,54	0,21	0,24	0,07	0,98	0,1	0,005	0,1	0,012	0,014	0,014	97,67
Mekanik Özellikler												
Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (VSD)	Elastisite Modülü (E) (GPa)	Çözeltiyeye Alma Sıcaklığı (°C)	Etkin Yaşlanma Sıcaklığı (°C)						
220	242	12,1	96	55,55	525±15	160						

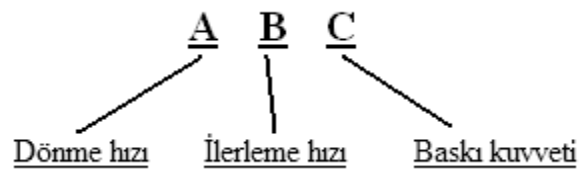
2.4. Kaynak Parametreleri

SKK işleminde kullanılacak kaynak parametrelerini belirlemek amacı ile ilk olarak literatür taraması yapılmıştır. Yapılan taramalarda AA5754-H22 ve AA6061-T6 için yapılan SKK uygulamalarında en başarılı verilerin elde edildiği takım dönme hızı ve takım ilerleme hız aralığı belirlenmiştir. Literatür taramalarında takım baskı kuvveti ile ilgili bir çalışmaya rastlanmadığı için baskı kuvvet aralığını belirlemek amacı ile yine ön deneyler yapılmıştır. Yapılan ön deneylerin ışığında 4 kN'luk baskı kuvveti uygulandığında pimin malzeme içine yeterli miktarda dalamadığı, takım omzunun Al-plakalarla kavuşmadığı ve bu nedenle kaynak için yeterli şartların oluşmadığı gözlemlenmiştir. Daha sonra baskı kuvveti kademeli olarak artırılmış ve son olarak 12 kN'luk takım baskı kuvveti uygulanmıştır. Bu kuvvet altında yapılan deneyde ise, aşırı yük altında takımın ilerleme sırasında plakaların içine daldığı, aşırı miktarda ondülelerin oluştuğu ve topuk batma derinliğinin artmasıyla pimin alt tablaya temas ettiği gözlemlenmiş olup, bu çalışmaların neticesinde Tablo 2.5'de belirtilen kaynak parametreleri belirlenmiştir.

Tablo 2.5. Kaynak parametreleri

Numune No	Takım Dönme Hızı (dev/dak)	Takım İlerleme Hızı (mm/dak)	Takım Baskı Kuvveti (kN)	Karıştırma Şiddeti (dev/mm)
111	800	135	6	5,93
112			8	
113			10	
121		210	6	3,81
122			8	
123			10	
131		270	6	2,96
132			8	
133			10	
211	1000	135	6	7,41
212			8	
213			10	
221		210	6	4,76
222			8	
223			10	
231		270	6	3,70
232			8	
233			10	

Tablo 2.5'te görüldüğü üzere 18 adet parametre belirlenmiştir. Bu sayıdaki kaynak parametrelerinin birbiri ile karışmasını önlemek ve yapılacak olan yorumlarda kolaylık sağlamak için kodlama yoluna gidilmiştir. Takım dönme hızına ait iki adet, takım ilerleme hızı ve baskı kuvvetine ait üçer adet kaynak parametreleri vardır. Bu parametreler her bir ana parametre altında küçükten büyüğe doğru sıralanarak Şekil 2.7'de belirtilen üç basamaklı bir kodlama standardı geliştirilmiştir.



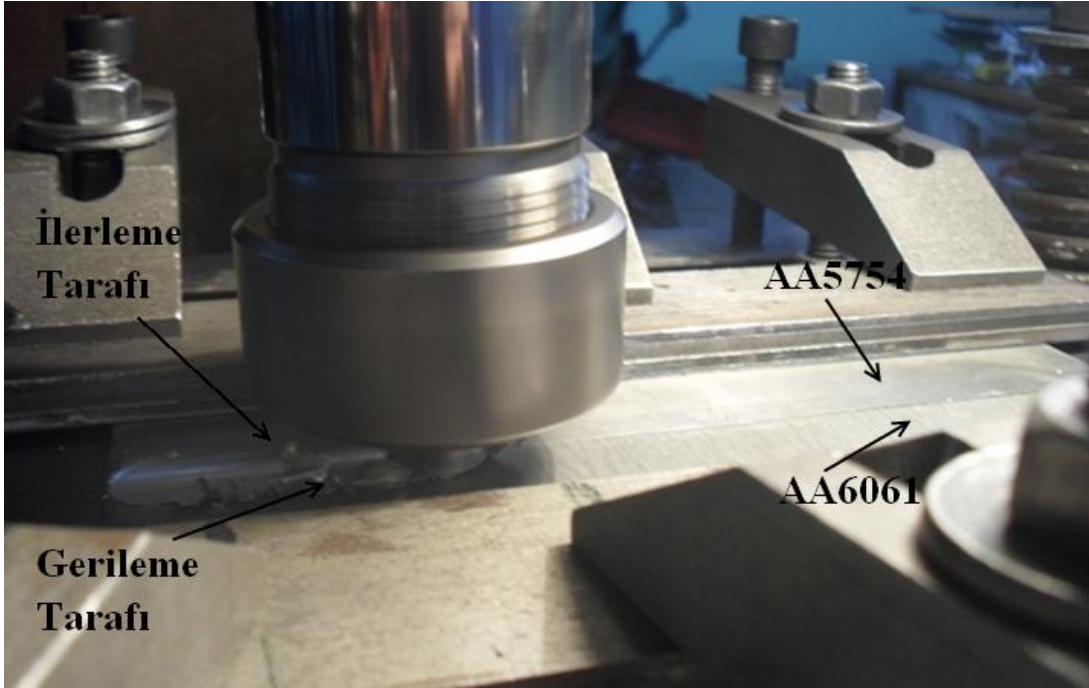
Şekil 2.7. Numune numaralarına ait kodlama gösterimi

Parametrelerin belirlenmesinin akabinde deney düzeneği hazır hale getirilmiş, AA6061 plakalarına termoelemanlar yerleştirilmiş, freze tezgâhını dönüş yönü saat yönüne ayarlanmış, takım ilerleme yönüne AA5754 plakalarının konumlandırılması kararlaştırılmış ve plakalar uzun kenarları alın alına temas edecek biçimde tablanın pabuçları ile hidrolik tablaya sabitlenerek kaynak işlemlerine geçilmiştir.

2.5. Kaynak Sıcaklık Ölçümü

SKK esnasında ortaya çıkan sıcaklığı belirlemek amacı ile termoeleman çiftleri kullanılmıştır. AA6061-T6 plakasına termoeleman kablolarının geçebilmesi için kanal açılmış ve kanalın ucuna ortaya çıkan sıcaklığı ölçmek amacı ile delik açılarak termoeleman kablo ucu yerleştirilmiştir. Maksimum kaynak sıcaklığını ölçebilmek için termoeleman deliği kanalın en ucuna açılmıştır. Kaynak sonunda termoelemanlar tarafından ölçülen sıcaklıklar bilgisayar ile kayıt altına alınmıştır.

2.6. Kaynağın Uygulanması

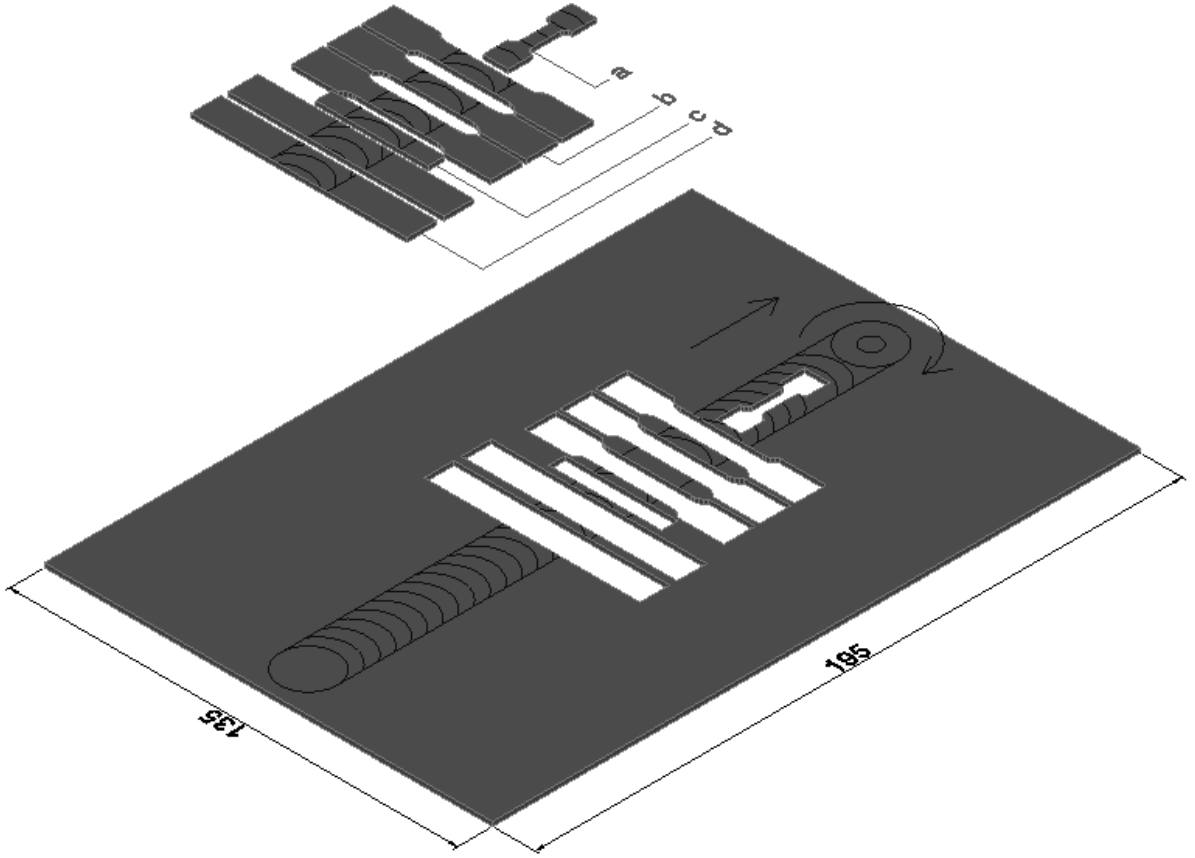


Şekil 2.8. SKK'nın uygulanış şekli

Şekil 2.8’de belirtilen biçimde plakalar, alın altına bitleştirilerek pabuçlar ile sabitlendi. Sonra takım dönme hızı ve takım ilerleme hızı parametreleri freze tezgâhına girildi. Tezgâh kafasına 3° takım eğim açısı verildi. Takımın dönüş yönü saat yönü olarak ayarlandı. Tezgâh çalıştırıldı. Hidrolik yükleme ünitesinden takım baskı kuvveti girildi. Takımın plakalar arasına girmesi ve takım omzunun plakalar ile temasının ardından takım ilerlemeye başladı ve kaynak işlemi başladı. Takım termoeleman ucundan geçerken maksimum sıcaklık okundu. Takımın plakanın sonuna gelmesi ile beraber takım baskı kuvveti geri çekildi, takım plakalardan ayrıldı ve kaynak sona erdi.

2.7. Kaynak Yapısının İncelenmesi

SKK sonrasında kaynayan plakaların öncelikle görsel muayenesi yapılarak kaynak dikişleri incelenmiştir. Daha sonra plakalardan numuneler çıkarılmıştır (Şekil 2.9).

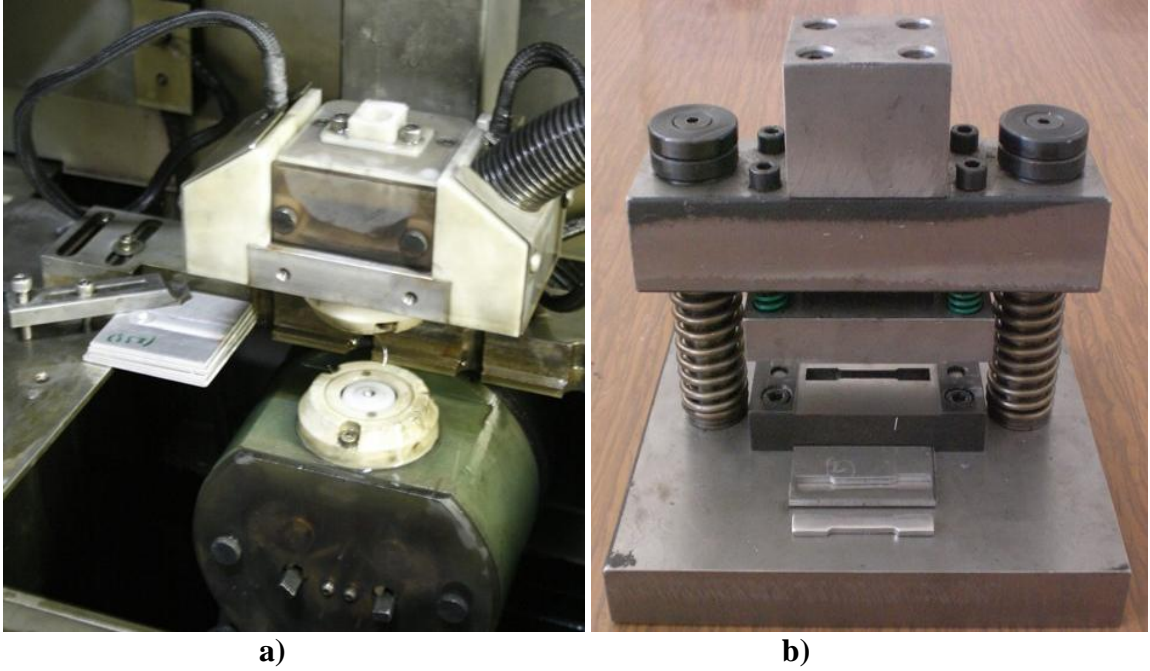


Şekil 2.9. İnceleme amacı ile kaynaklı plakalardan çıkarılan numunelerin çıkarım planı
 (a) boyuna çekme numunesi (b) enine çekme numuneleri (c) metalografi numunesi (d) eğme numuneleri

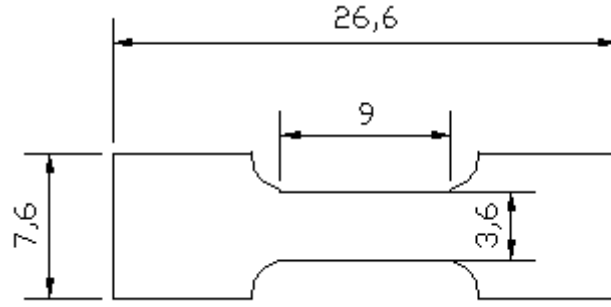
Kaynak işleminin sonunda oluşan takım çıkış deliğinden 40mm uzaklıktan numuneler çıkarılmaya başlanmıştır. Numuneler çıkarıldıktan sonra kenarlarındaki çapaklar temizlenerek incelemeye hazır hale getirilmiştir.

2.7.1. Çekme Deneyleri

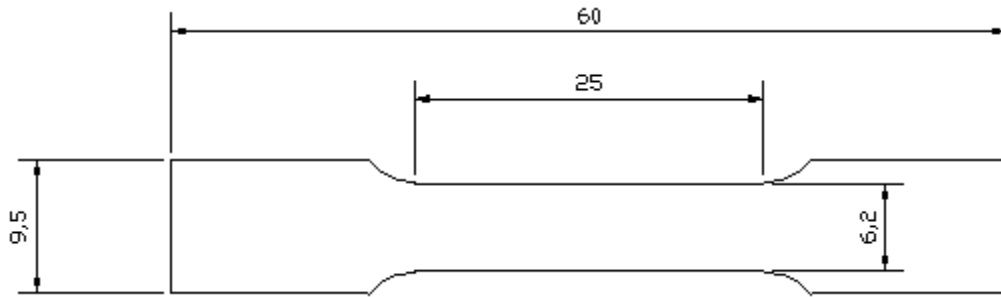
Kaynağın mekanik özelliklerini belirlemek üzere boyuna ve enine çekme numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 2.9/a-b). Kaynak boyu yönünde çıkarılan çekme numuneleri KTÜ Makine Mühendisliği bölümü malzeme bilimleri laboratuvarında bulunan tel erezyon kesme makinesinde hazırlanmıştır (Şekil 2.10/a). Kaynak eni yönünde çıkarılan numuneler ise, yine malzeme bilimleri laboratuvarında bulunan TREBEL marka çekme makinesinden tahrikli kesme kalıbından çıkarılmıştır (Şekil 2.10/b). Kaynak boyunca çıkarılan çekme numunelerinin ölçüleri Şekil 2.11’de, kaynak enine çıkarılan çekme numunelerinin ölçüleri de Şekil 2.12’de verilmiştir. TS-138 standartlarına uygun şekilde çıkarılan numuneler mekanik deneyler laboratuvarında bulunan INSTRON marka çekme cihazıyla çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Çekme deneyi oda sıcaklığında 0,01 mm/s deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.10. Çekme numunelerinin hazırlanışı a) Tel erezyon makinesi, b) Numune kesme kalıbı



Şekil 2.11. Kaynak boyunca çıkarılan çekme numunelerinin ölçüleri



Şekil 2.12. Kaynak enine çıkarılan çekme numunelerinin ölçüleri

2.7.2. Sertlik Ölçümleri

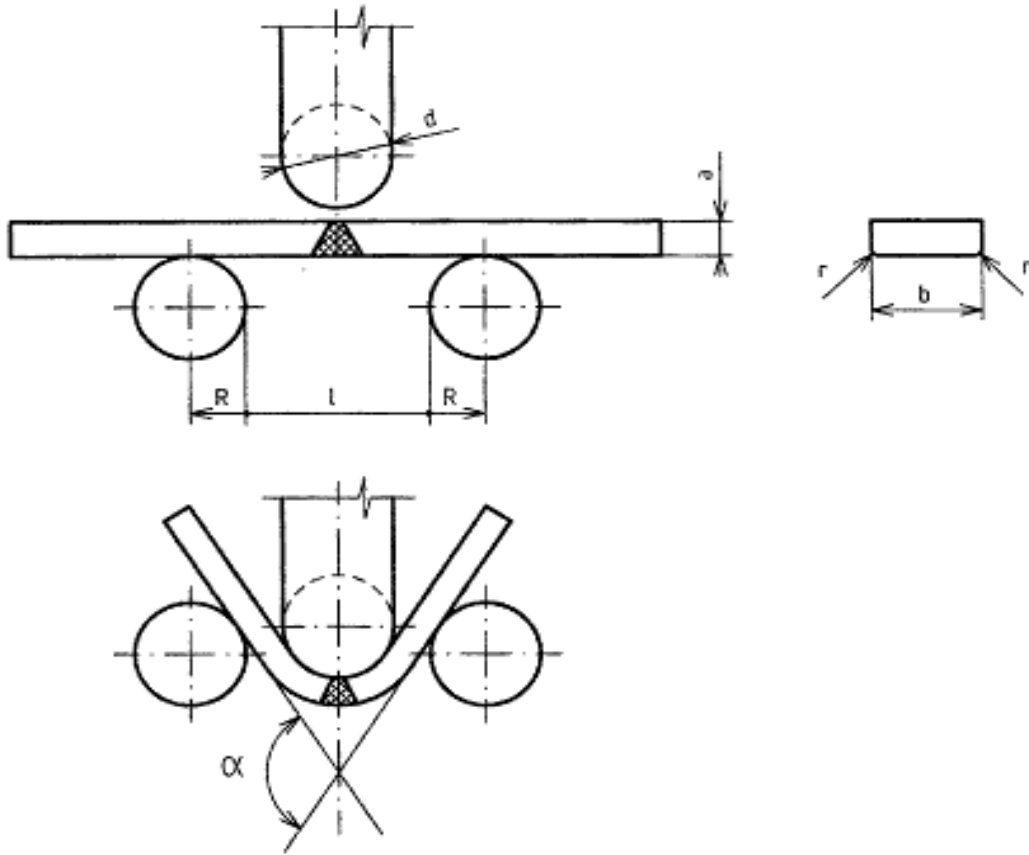
Mikrosertlik ölçümleri için KTÜ Makine Mühendisliği bölümü malzeme bilimleri laboratuvarında bulunan STRUERS marka sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri bakalite alınmış numunelerin kaynak yüzeylerinin 1,5 mm altından kaynak yönüne dik doğrultuda merkezden ileri ve geriye doğru ölçülmüştür. Ölçümler merkezden 4 mm uzaklığa kadar 0,5 mm aralıklarla, 4 mm den 12 mm mesafeye kadar ise 1 mm aralıklarla Şekil 2.13’de gösterildiği gibi yapılmıştır . Mikrosertlik ölçümleri; Vickers ucu ile 2 kg yük altında 10 s süre uygulanarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.13. Kaynak bölgesinde sertlik alınan noktaların gösterimi

2.7.3. Eğme Deneyleri

Eğme deneyi kaynak birleşiminin şekil değiştirme kabiliyetini belirlemek için yapılmıştır. Deney, KTÜ Makine Mühendisliği bölümü malzeme bilimleri laboratuvarında bulunan TREBEL marka üniversal çekme makinesi kullanılarak yapılmıştır. Deneyler TS282 EN 910 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Standarda göre mandrel çapı $d = 2a$ alınmıştır. Gerçekleştirilen deney numunelerinden hazırlanan eğme deneyi numuneleri Şekil 2.14'de gösterildiği gibi kaynak dikişine göre düz ve ters olarak ayrı ayrı uygulanmıştır.



Şekil 2.14. Kaynak kökleri için uygulanan eğme deneyi metodu (TS 282).

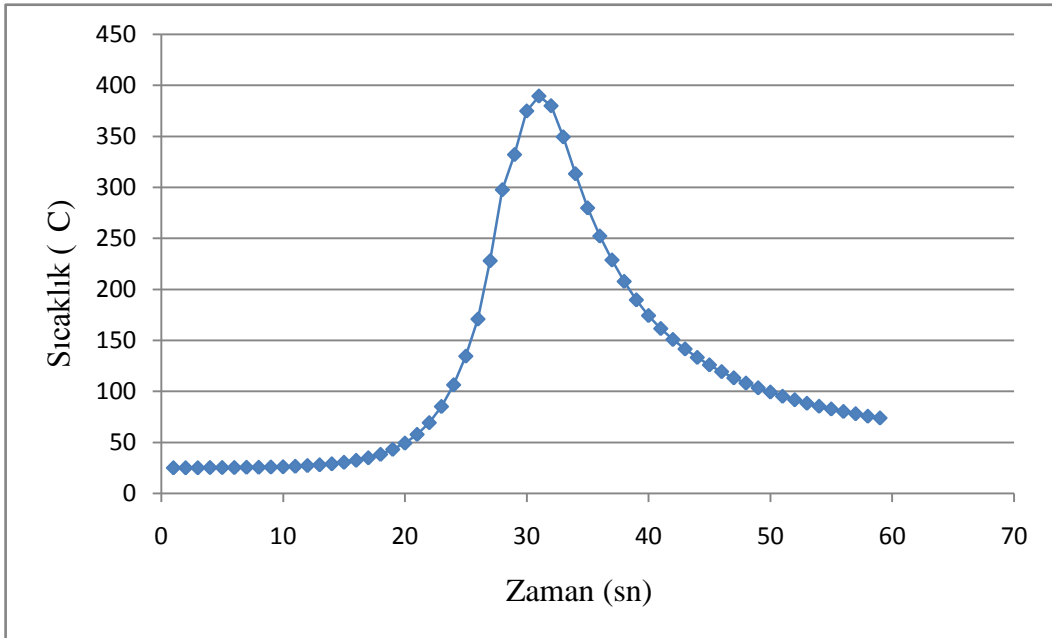
2.7.4. Metalografik İncelemeler

Şekil 2.9/c'de gösterilen biçimde birleştirme bölgesinden çıkarılan numuneler soğuk bakalite alınmış ve sonrasında kalından inceye doğru sulu ortamda zımparalanmıştır. Yüzeyi parlatmak için numuneler önce 1 μ ve sonra 0,3 μ 'luk alümina süspansiyon ile BUEHLER marka dönen disk üzerinde parlatılmıştır. Parlatma işleminden sonra genel yapıyı gözlemleyebilmek için 2ml HCl, 3ml HF, 5ml HNO₃ ve 190ml su içeren Keller ayracında 45 sn süreyle dağlanmıştır. Dağlanan numunelerin makro yapıları LEICA marka mikroskopta, mikro görüntüleri elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. Daha sonra aynı numuneler tane yapılarını incelemek amacı ile 100ml su, 4gr KMnO₄ ve 1gr NaOH içeren Weck's ayırıcı ile 15 sn süre ile dağlanarak tane yapıları belirlenmiştir.

3. BULGULAR VE İRDELEME

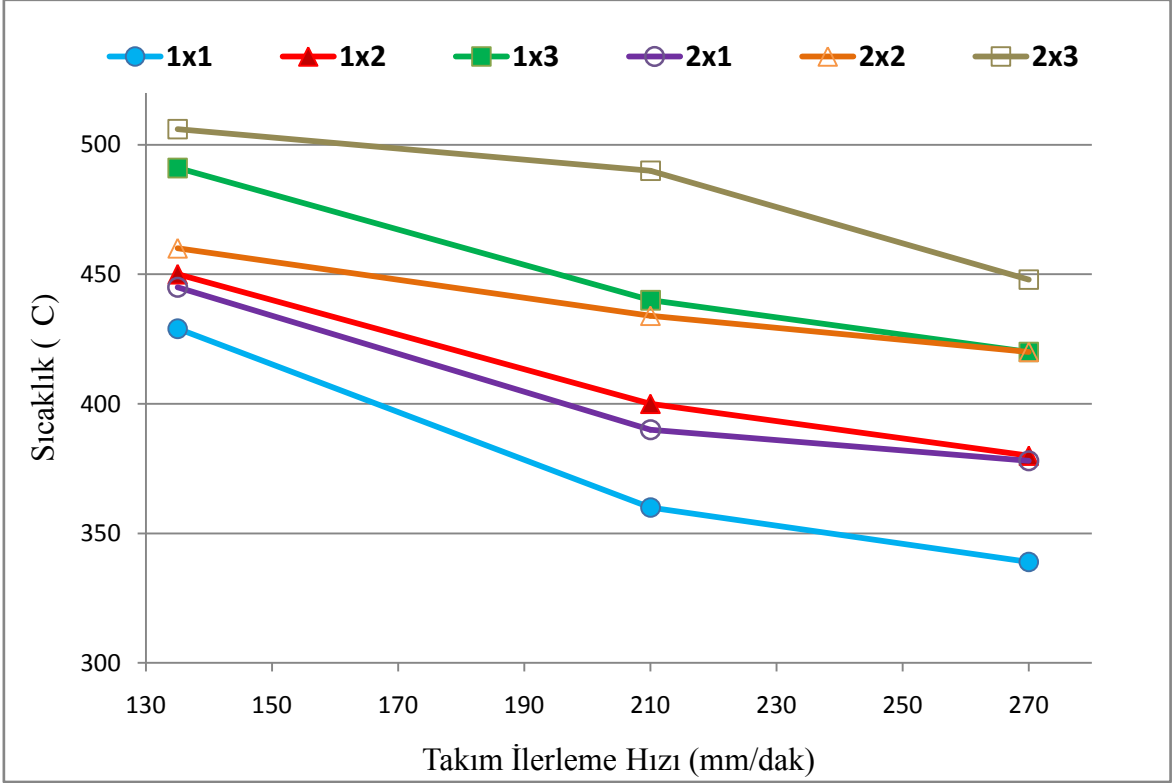
3.1. Kaynak Sıcaklığının Etkileri

Al-alaşımlarının SKK deneylerinde en sağlıklı sonuçları almak amacı ile termoeleman çiftini AA6061-T6 alaışımının kaynak yüzeyine yaklaştıracılabilecek en yakın noktaya sabitleyerek sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Sıcaklıklar K tipi termoeleman ile ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerin sonunda ise erişilen en yüksek sıcaklık değerlerinin 339°C ile 506°C arasında olduğu belirlenmiştir. Ölçülen sıcaklık eğrilerinin değişim karakteristiği birbirleri ile benzerdir. Ölçülen sıcaklıklar, kaynak esnasında takımın termoelemanına yaklaşmasıyla hızla artmakta ve zirve değerine ulaştıktan sonra ise daha yavaş bir hızda azalmaktadır. Bu değişimi gösteren tipik bir eğri Şekil 3.1’de verilmiştir. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan termoelemanlar, (karışma bölgesindeki sıcaklık değerini tam olarak algılayabilmek için) parçaların ara yüzeyinde takım yolu üzerine yerleştirilmiş durumda olmalarından dolayı bazı deneylerde takım tarafından hasara uğramıştır.



Şekil 3.1. 221 numunesine ait sıcaklık değişim grafiği

Gerçekleştirilen tüm deneylerde ölçülen en yüksek sıcaklık değerleri belirlenerek bu değerler yardımı ile Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilen grafikler hazırlanmıştır. Bu grafiklere göre takım ilerleme hızı arttıkça erişilen sıcaklık mertebesi azalmakta, (Şekil3.2), takım baskı kuvvetinin artması ile erişilen sıcaklık mertebesinin de artmakta olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.3).

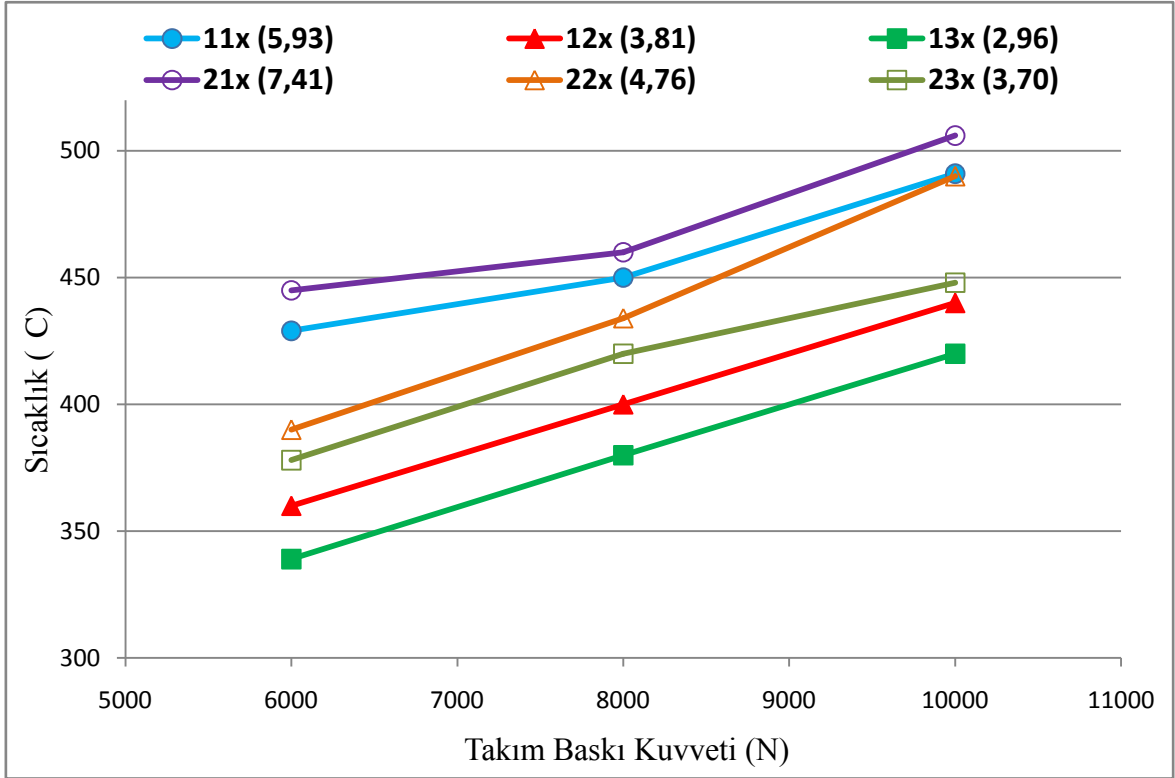


Şekil 3.2. Yapılan tüm deneylere ait sıcaklık- takım ilerleme hızı grafiği

Şekil 3.2, sabit devir sayısı ve sabit takım baskı kuvveti altında yapılan deneylerde ilerleme hızı arttıkça kaynak sıcaklıklarında düşüş olduğunu göstermektedir. Bu durumun nedeni, takım ilerleme hızının artması ile deneyler esnasında oluşan sürtünme ile açığa çıkan ısının numunelere aktarılması için geçen sürenin daha kısa olmasından dolayı ısı girdisinin de azalmasıdır.

Gözlemlenen en yüksek sıcaklık değeri, takım dönme hızı ve takım baskı kuvvetinin maksimum olduğu, takım ilerleme hızının da minimum olduğu 213 numunesinde ölçülmüştür. Bu durumun iki ana nedeni vardır. Birincisi, takım dönme hızının takım ilerleme hızına oranını (n/v) belirten “karıştırma şiddeti”dir. Bu şiddet, ilerleme başına takım dönme miktarını ifade eder ve bu oran arttıkça erişilen sıcaklık da artmaktadır. İkinci

etken ise takım baskı kuvvetidir. Bu kuvvetin artması ile takım omuzu ile iş parçasının yüzeyleri arasındaki sürtünme miktarının artmasına ve dolayısıyla erişilen sıcaklık seviyesinin de yükselmesine neden olmaktadır [1,12]. Kaynak işlemi esnasında erişilen sıcaklık seviyesinin artması, birleştirilmekte olan malzemelerin mukavemet değerinin azalmasına yol açmakta, bu da sabit değerde tutularak uygulanan baskı kuvvetinin etkisiyle takımın topuk batma derinliğinin artmasına ve takım piminin kaynak bölgesinin daha derinlerine nüfuz etmesine neden olacağı düşünülmektedir [1,12,45].



Şekil 3.3. Yapılan tüm deneylere ait sıcaklık- takım baskı kuvveti grafiği

Şekil 3.3'te parantez içerisinde numunelerin karıştırma şiddetleri verilmiştir. Bu şekilde açıkça görülmektedir ki takım baskı kuvveti arttıkça sürtünme de arttığından ulaşılan maksimum sıcaklık değerleri de artmaktadır. Karıştırma şiddetinin 7,41 dev/mm olduğu 21x numuneleri en yüksek sıcaklık değerlerine sahiptir. Ölçülen maksimum sıcaklık değeri 506°C ile karıştırma şiddetinin en fazla ve takım baskı kuvvetinin 10kN değeri ile en yüksek değerde olduğu 213 numunesinde tespit edilmiştir. Takım baskı kuvveti ve karıştırma şiddetinin azalması ile ölçülen sıcaklıklarda da azalma görülmüştür. Yine karıştırma şiddetinin 2,96 dev/mm olduğu 13x numuneleri en düşük sıcaklık

değerlerine sahiptir. Ölçülen minimum sıcaklık değeri 339°C ile karıştırma şiddetinin en az ve takım baskı kuvvetinin 6 kN değeri ile en düşük değerde olduğu 131 numunesinde tespit edilmiştir.

3.2. Isıl İşlem İncelemeleri

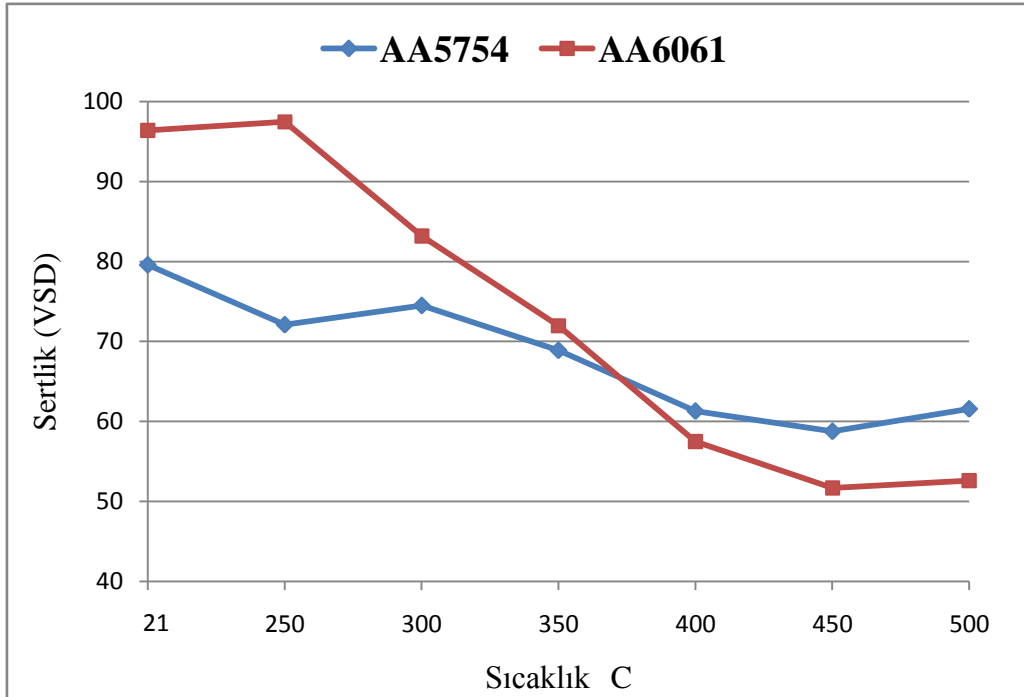
Al-alaşımına SKK işlemi uygulanırken 506°C'a kadar erişilen sıcaklık değerlerine ulaşılmaktadır. Ulaşılan bu sıcaklık değerlerinin soğuk deformasyon ile mukavemeti arttırılmış AA5754-H22 ve yaşlandırma ile mukavemeti arttırılmış AA6061-T6 alaşımının özelliklerine ne gibi etki yaptığını tespit etmek gereklidir. Bu amaçla söz konusu alaşımlardan hazırlanan numuneler 250°C'dan 50°C'lık adımlarla 500°C'a kadar ısıtılarak, bu sıcaklıklarda kaynak işlemi esnasında oluşan ısınmayı temsil etmesi amacıyla, kısa süreli menevişleme işleme tabi tutulmuşlardır. Tavlama fırınında tüm alaşımlar, sıcaklığı 50°C'lık adımlarla artırılıp ve erişilen sıcaklık mertebesinde 4'er dakikada tutulmuşlardır (Şekil 3.4). Her bir sıcaklık seviyesinden alınan numuneler suda soğutulmuştur. Gerçekleştirilen bu işlem sonucunda elde edilen numunelerin mekanik özellikleri belirlenerek Tablo 3.1'de sunulmuştur.



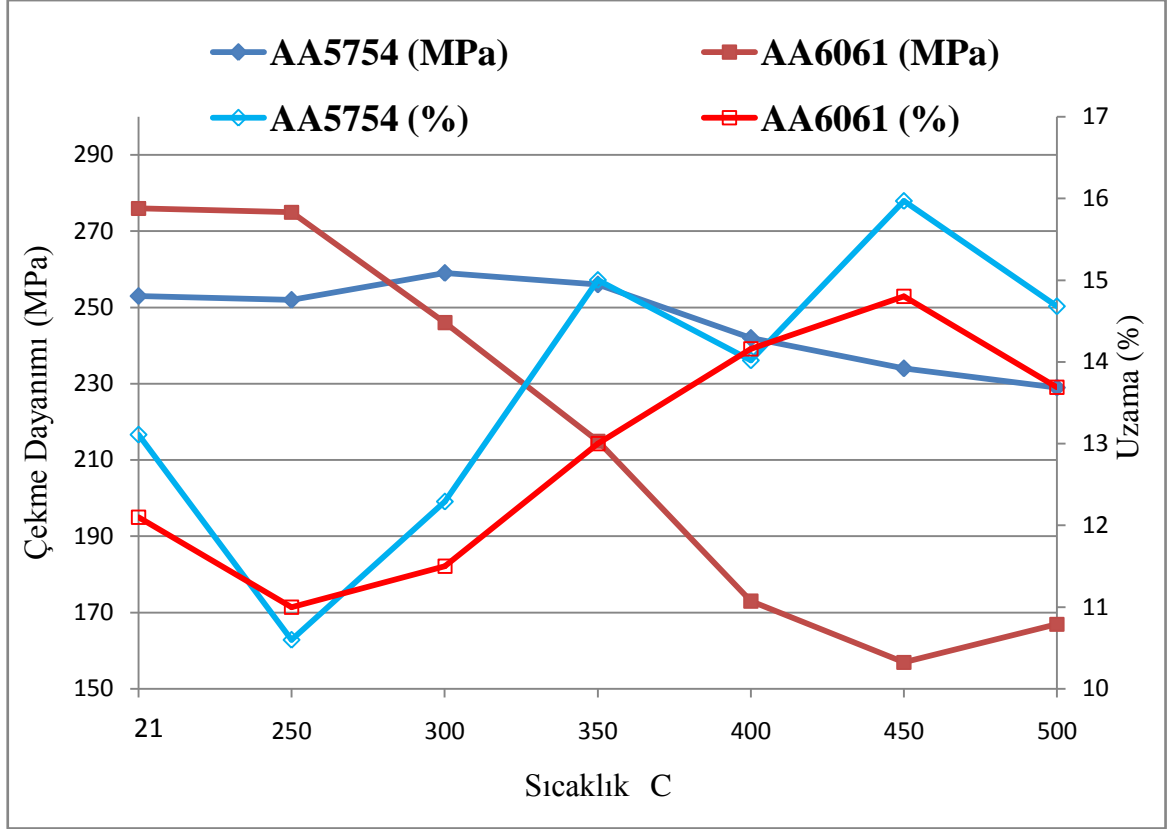
Şekil 3.4. AA5754 ve AA6061 alaşımlarına uygulanan ısıl işlem

Tablo 3.1. Al-alaşımlarına uygulanan ısıtım işlem sonucu ölçülen mekanik özellikler

AA5754-H22							
Sıcaklık(°C)	21	250	300	350	400	450	500
Sertlik (VSD)	80	72	75	69	61	59	62
Çekme Dayanımı (MPa)	253	252	259	256	242	234	229
AA6061-T6							
Sıcaklık(°C)	21	250	300	350	400	450	500
Sertlik (VSD)	96	98	83	72	58	58	53
Çekme Dayanımı (MPa)	276	275	246	215	173	157	167



Şekil 3.5. Uygulanan ısıtım işlemi AA5754 ve AA6061'in sertliğine etkisi



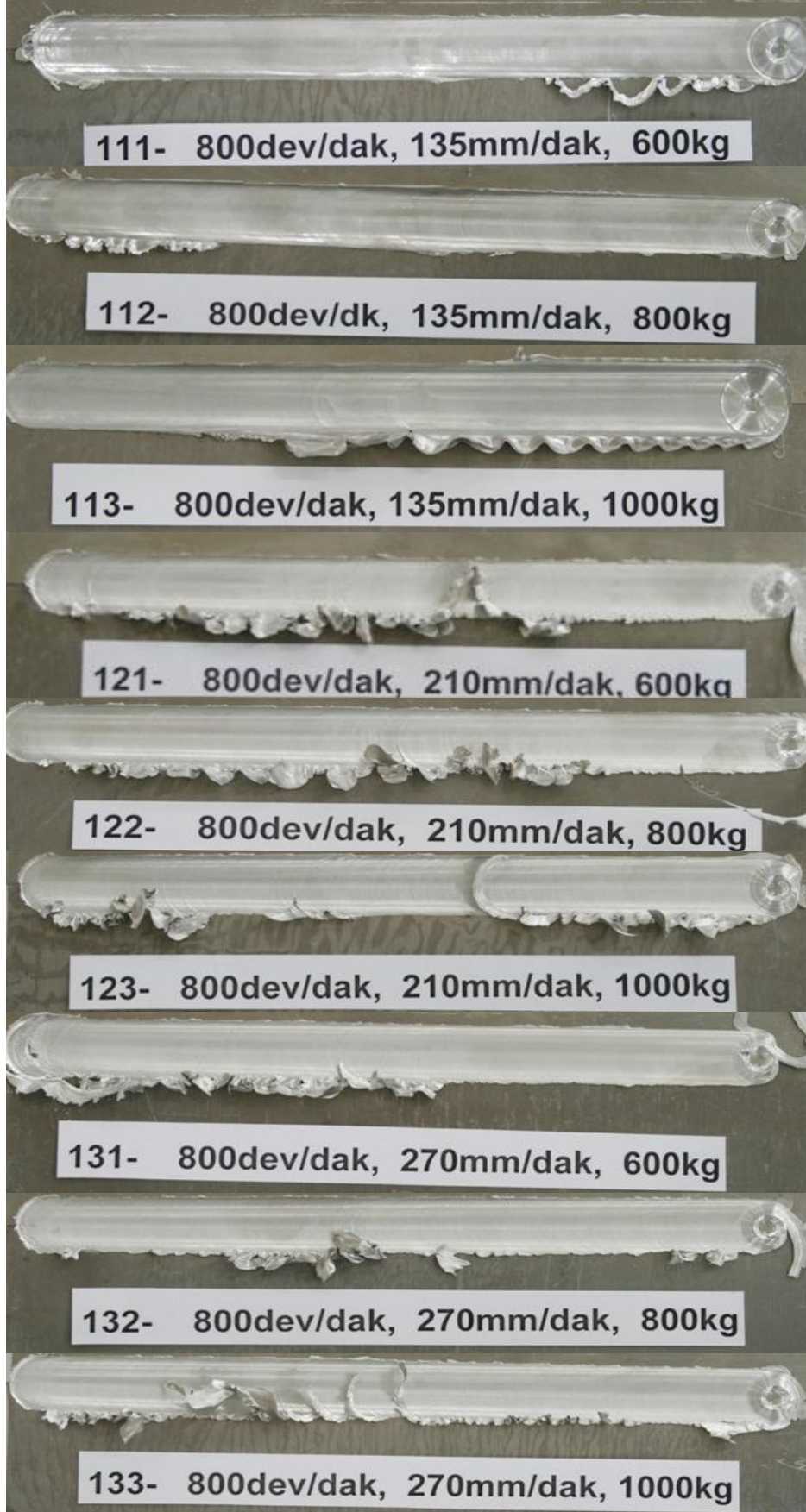
Şekil 3.6. Uygulanan ısı işlemin AA5754 ve AA6061'in çekme mukavemeti ve sünekliliğine etkisi

Alaşımına uygulanan ısı işlemler sonunda oluşan Şekil 3.5 ve 3.6 grafikleri incelendiğinde alaşımların sertlik ve çekme dayanımlarının benzer eğilim göstermiş oldukları belirlenmiştir. AA6061 alaşımının mukavemet değerlerinde görülen düşüş, AA5754 alaşımına oranla daha fazla olmuştur. Bu sonuca göre uygulanan ısı işleminin, yaşlandırma sertleşmesi uygulanmış AA6061'in aşırı yaşlanması sonucu mukavemet değerlerindeki düşüş miktarına, soğuk deforme edilmiş AA5754 alaşımının yeniden kristalleşmesi sonucu mukavemetindeki düşüş miktarına oranla daha fazla etki ettiğini görülmektedir. AA6061 alaşımının 250°C'a kadar mukavemet değerlerinde bir değişim olmamıştır. Fakat 250°C sıcaklık değerinden sonra kafes yapısı içerisindeki çökelmiş "β" çökeltileri sıcaklığın etkisi ile "α" matrisinden yavaş yavaş ayrılarak kendi aralarında birleşip ikincil "β" fazını oluştururlar. Bunun sonucunda yapı giderek yumuşar ve aşırı yaşlanma görülür. AA6061'in aşırı yaşlanma etkisi 450°C ye kadar sürmüş olup, bu sıcaklıktan sonra "α" matrisi içinde kalan "β" çökeltileri kalmayıp tamamen kendi fazlarını oluşturduğu grafiklerden anlaşılmaktadır.

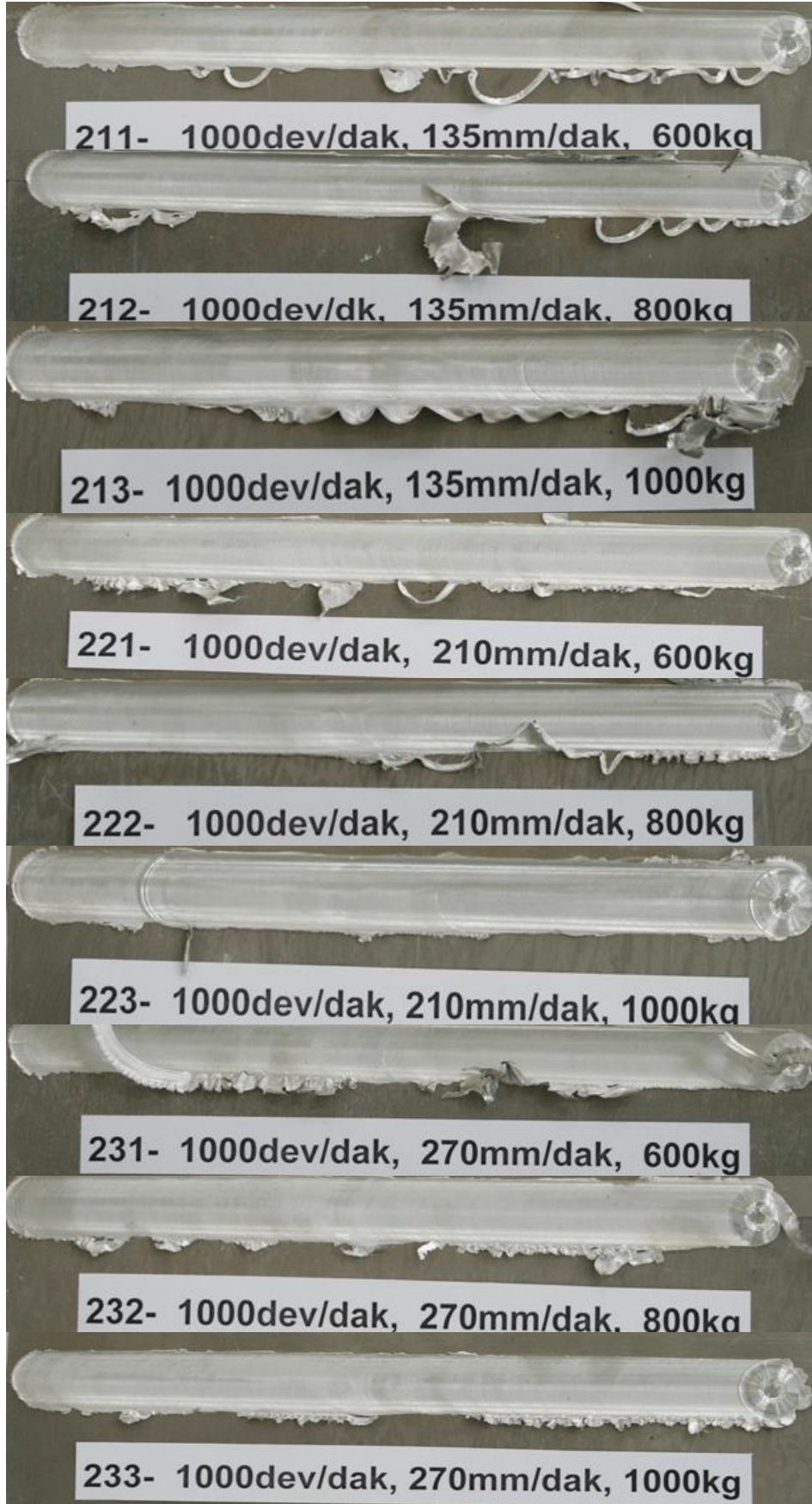
3.3. Makroyapı İncelemeleri

SKK işlemleri yapıldıktan sonra birleşen numunelerin kaynak yüzeyleri gözle ve stereo mikroskopla muayene edilmiştir. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de birleştirilmiş numunelerin yüzey görüntüleri görülmektedir. Şekil 3.9, birleştirilmiş numunelerden birinin alt yüzey görüntüsünü ve termoeleman için açılmış olan kanalı göstermektedir. Şekil 3.10’da ise kaynak bölgelerinin kesitlerine ait makro görüntüler verilmiştir.

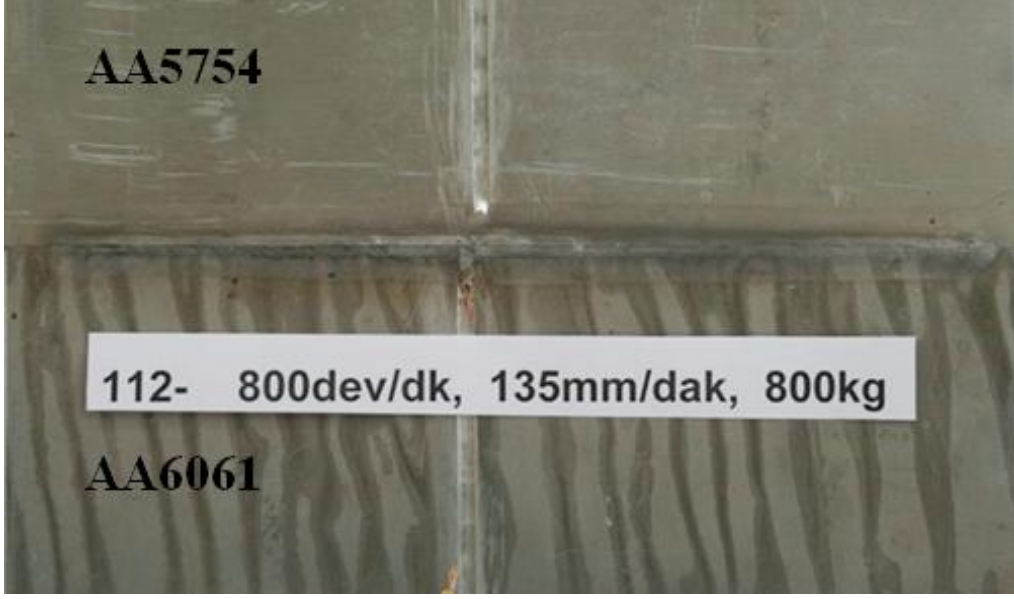
Şekil 3.7 ve 3.8’de yüzey görünüşleri incelendiğinde tüm birleştirmelerin başarılı olduğu ve kaynak dikişlerinde makro ölçekli herhangi bir hataya, kusura rastlanılmadığı tespit edilmiştir. Oluşan tüm kaynak yapılarında kaynak dikişlerinin kenarlarında çapak ve ondüleler oluşmuştur. Bu oluşumların nedeni, kullanılan Al-alaşımlarının sünek ve şekil değiştirme kabiliyetlerinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Söz konusu ondüle oluşumu takım omzunun kaynak esnasında dönerken çapakları kenarlara doğru sıyırmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek takım baskı kuvvetlerinin uygulandığı birleştirmelerde takımın topuk batma derinliği artmakta, bu da kaynak dikişi kenarlarında ondüle oluşumunu daha fazla arttırmaktadır. Bu oluşum özellikle 10 kN takım baskı kuvveti ve 135 mm/dak takım ilerleme hızlarının uygulandığı 113 ve 213 numunelerinde daha da belirgindir (Şekil 3.7, Şekil 3.8)



Şekil 3.7. 1xx numunelere ait kaynak yüzey görüntüleri

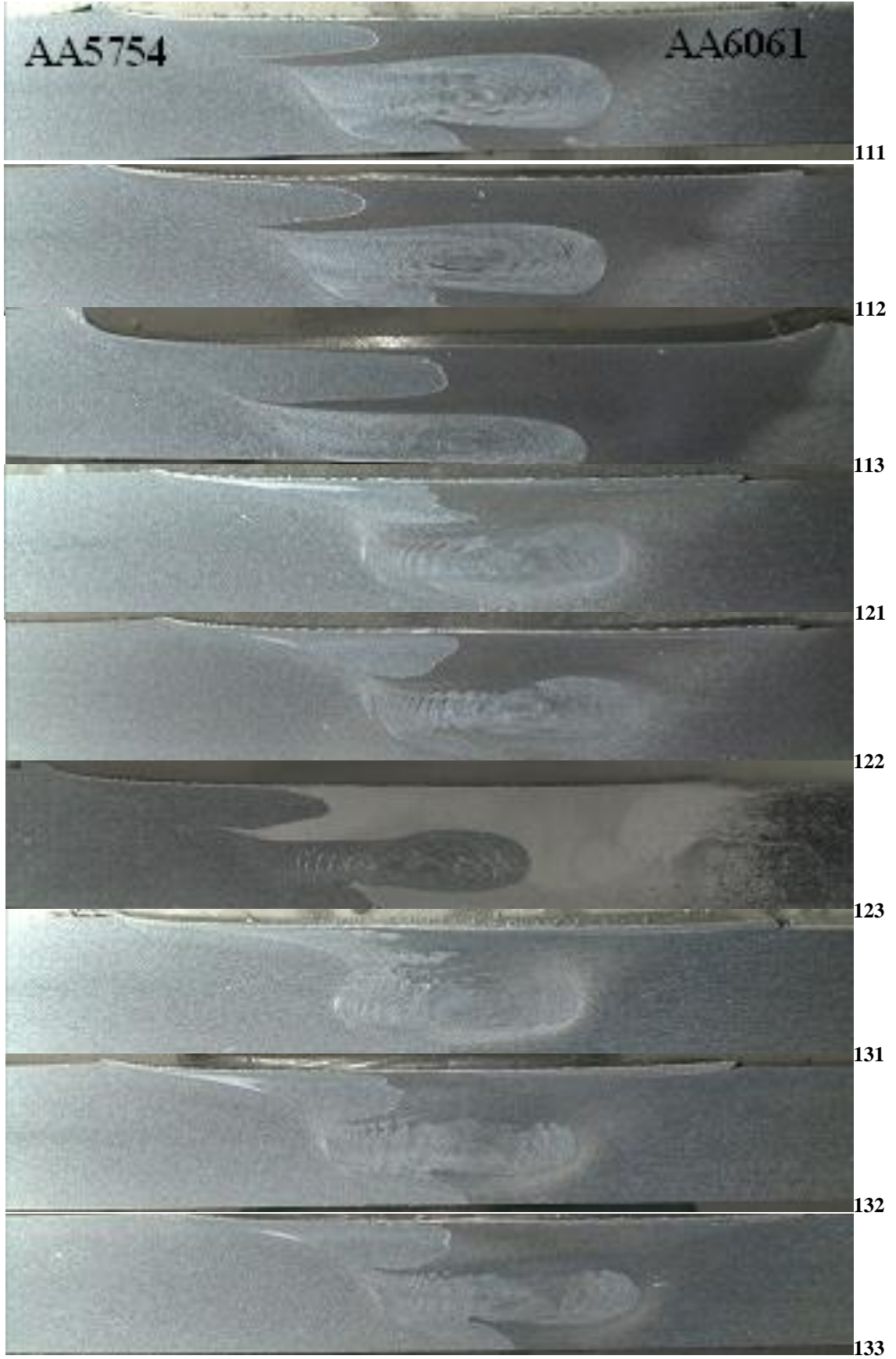


Şekil 3.8. 2xx numunelere ait kaynak yüzey görüntüleri



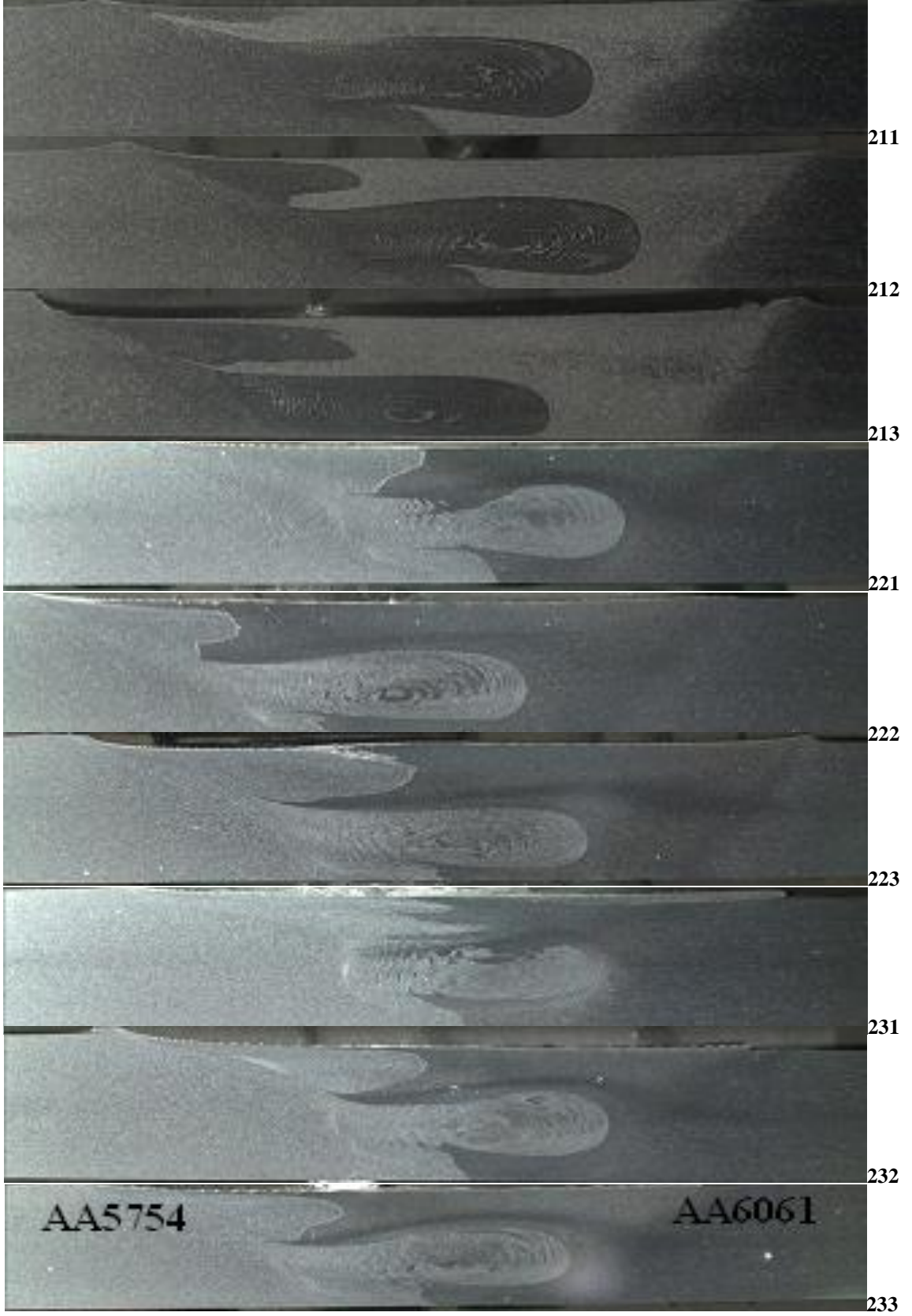
Şekil 3.9. 112 numaralı numuneye ait alt yüzey görüntüsü

SKK sonunda oluşan kaynak dikişlerinin birleşme bölgelerine ait içyapıların genel görünümünü belirlemek amacı ile Şekil 2.9/c'de belirtilen şekilde elde edilen tüm metalografi numuneleri standart numune hazırlama işlemlerine tabi tutulduktan sonra her iki alaşım için de uygun olan Keller ayracı ile dağlanarak Stereo mikroskopta incelenmiştir. Bu incelemelerden elde edilen içyapı fotoğrafları Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Numunelerin kaynak kesitlerine ait makro görüntüler

Şekil 3.10'un devamı



Şekil 3.10'da verilen makro görüntülerinde kaynak bölgelerinin içyapılarında bu çözünürlükte fark edilebilen herhangi bir hataya rastlanılmamıştır. Uygulanan kaynak parametreleriyle gerçekleştirilen birleştirmelerde ortaya çıkan içyapıların birbirine benzer oldukları görülmüştür.

Kaynak merkezinde ilerleme tarafındaki AA5754 alaşımının gerileme tarafındaki AA6061 alaşımına doğru balona benzer bir girinti oluşmuştur. Bu girinti, AA5754 alaşımı ağırlıklı gibi gözükmekle beraber soğan halkaları yapısına benzer dağılımda AA6061 alaşımının AA5754 alaşımının içine karıştığı açıkça görülmektedir. Bu durum, uygulanan SKK yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirmenin difüzyonsuz şekilde ve karışımın mekanik karakterli olan katı hal kaynak yöntemiyle gerçekleştiğini göstermektedir.

Ayrıca takım ilerleme hızı arttıkça kaynak merkezinde belirginlik azalmakta, soğan halkaları belirsizleşmekte ve daha az homojen bir yapı görülmektedir. Bununla beraber takım ilerlemesinin 135 mm/dak olduğu hızlarda takım baskı kuvveti arttıkça takımın topuk batma derinliği artarak karıştırıcı uç, kaynağın dibine kadar nüfuz etmiş, kaynak kalınlığı azalmış ve takım kaynak yapısını ezmiştir. İlerleme hızının 210 mm/dak ve 270mm/dak olduğu hızlarda ise takımın kaynak yapısını belirgin biçimde ezmediği görülmüştür.

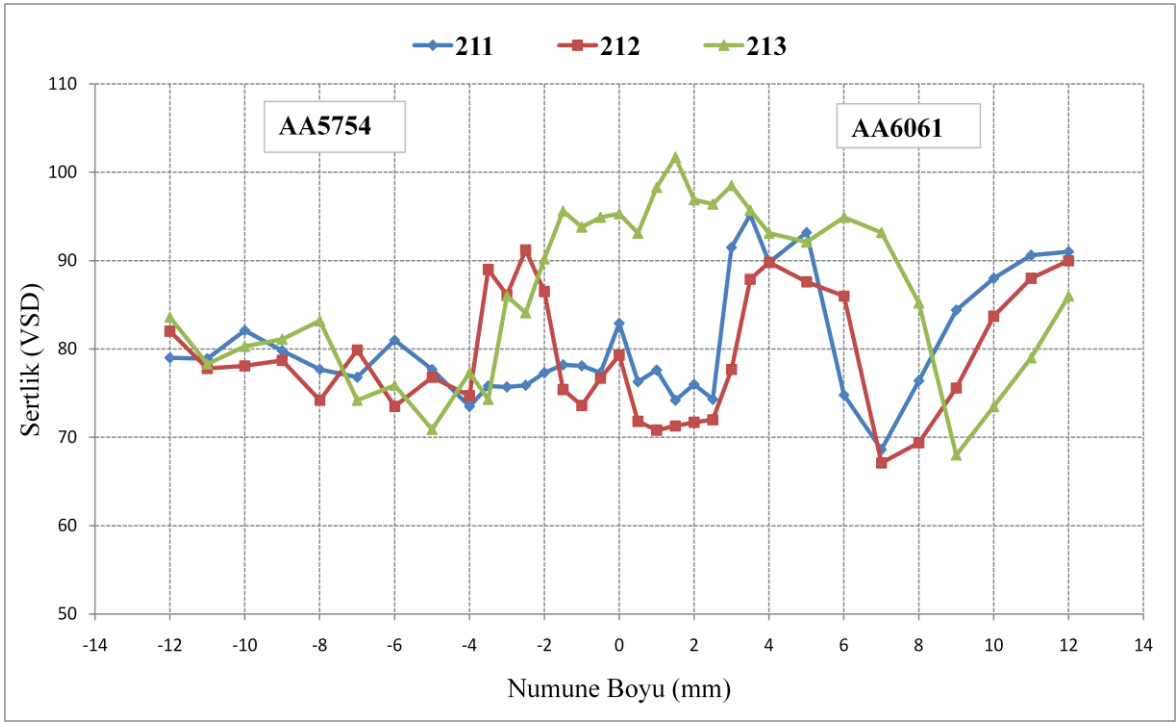
3.4. Sertlik İncelemeleri

Gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde kullanılan alaşımların kaynak işlemi öncesindeki sertlik değerleri malzemelerin yüzeylerinden ve içyapılarından ayrı ayrı ölçüldü ve elde edilen sertlik değerlerinin bir birlerine yakın değerlere sahip oldukları belirlendi. Söz konusu sertliklerin ortalama değerleri, AA5754-H22 alaşımında 80 VSD, AA6061-T6 alaşımında ise 96 VSD olarak ölçülmüştür. Ölçülen sertlik değerleri arasındaki bu fark, alaşımların kimyasal bileşim farklılığından ve mukavemet arttırma yöntemlerinin farklılığından kaynaklanmaktadır. Bu malzemelerden, soğuk deformasyonla mukavemeti arttırılan AA5754-H22 alaşımı % 25 oranda soğuk deforme edilmiş durumda olup, bu durumdaki yeniden kristalleşme sıcaklığı yaklaşık olarak 320°C mertebesindedir [21,28]. AA6061-T6 alaşımı ise yaşlandırma işlemine tabi tutulmuş durumda olup, yaşlandırma sıcaklığı 160°C'ta gerçekleştirilmiştir [21,26,28]. Birleştirilen kaynak numunelerinin kaynak dikişi bölgesine dik doğrultuda hazırlanan numuneler üzerinde Şekil 3.11'de görülmekte olduğu gibi kaynak merkezinden (birleşme ara yüzeyi) başlayarak

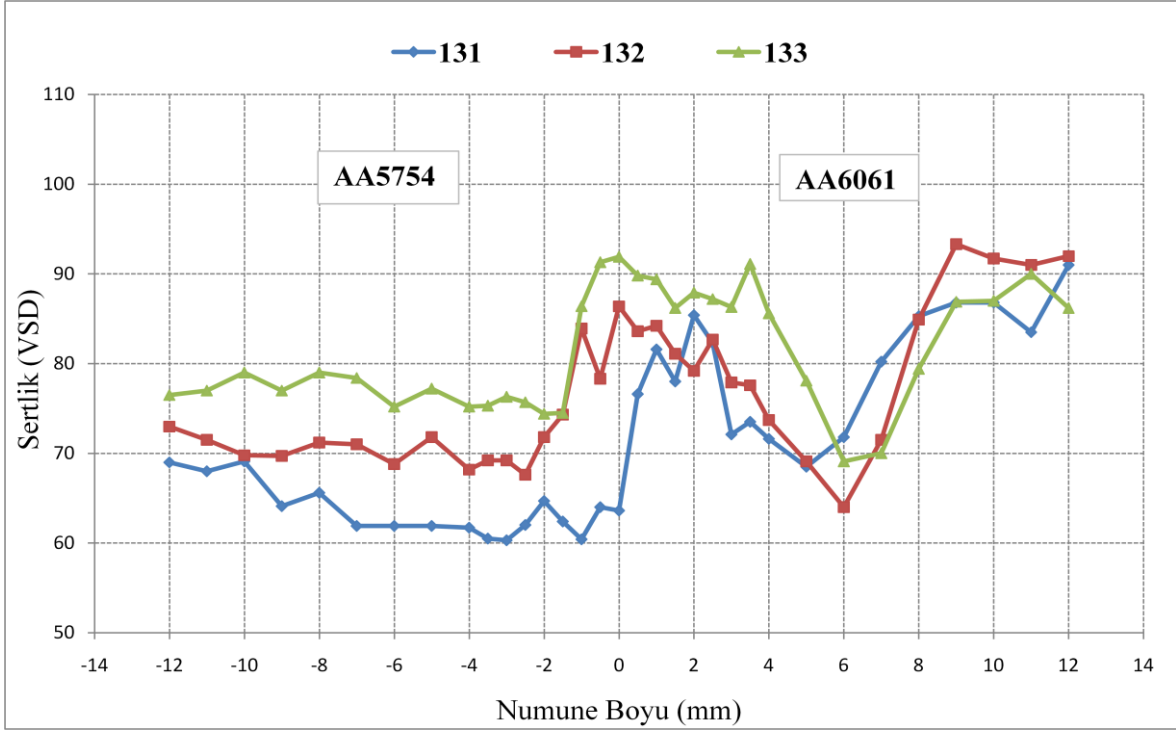
6061 ve 5754 yönlerinde simetrik adımlarla ölçümler alınarak sertlik profil değerleri belirlenmiştir. Gerçekleştirilen ölçümler toplu olarak Şekil 3.12 ve 3.13'deki karşılaştırmalı grafiklerle sunulmuştur.



Şekil 3.11. Kaynaklı numunelerin mikrosertlik ölçüm gösterimi



Şekil 3.12. 7,41 dev/mm değeri ile en en yüksek karıştırma şiddetine sahip 21x numunelerinin farklı takım baskı kuvvetleri altında oluşan sertlik grafiği



Şekil 3.13. 2,96 dev/mm değeri ile en düşük karıştırma şiddetine sahip 13x numunelerinin farklı takım baskı kuvvetleri altında oluşan sertlik grafiği

Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 incelendiğinde AA6061 alaşımının ana malzeme sertlik değerinin AA5754 alaşımının ana malzeme sertlik değerinden yüksek olduğu görülmektedir. Kaynak sırasında ortaya çıkan sıcaklık değerleri soğuk deforme edilmiş olan AA5754 alaşımının yeniden kristalleşme sıcaklığı bölgesinden ($\approx 320^{\circ}\text{C}$) ve çökeltme sertleşmesi uygulanan AA6061 alaşımının etkin yaşlandırma sıcaklığından (160°C) da yüksektir. Dolayısıyla kaynak işlemi esnasında erişilen sıcaklık mertebesinin sertlik değerine etkisi AA5754 alaşımından önce yaşlandırılma sıcaklığı 160°C olan AA6061 alaşımının sertliğine öncelikli olarak daha fazla etkide bulunmuştur. Bu sonucun nedeni, birleştirme işlemleri sırasında erişilen sıcaklık değerlerinin yaklaşık 350°C ila 500°C arasında elde edilmesi ile AA6061 alaşımının öncelikli olarak aşırı yaşlandırılmasına neden olmasıdır. Bu sıcaklık değerlerine maruz kalan AA6061 alaşımının kafes yapısı içerisinde kalan çökelti, ana fazdan ayrılıp “ β ” fazını oluşturarak alaşımın aşırı yaşlanmasına ve dolayısıyla mukavemet ve sertlik değerlerinde de düşüşe yol açmaktadır.

Bununla beraber ortaya çıkan kaynak bölgesinin sıcaklık değerleri ile AA5754 alaşımının yeniden kristalleşme sıcaklık bölgesinin üst sınırlarına erişmektedir. Ortaya çıkan sıcaklığın etkime süresi soğuk deforme edilmiş AA5754 alaşımının yeniden

kristalleşmesi için tam olarak yeterli olamadığından ve AA5754-H22 alaşımının soğuk deforme miktarının %25 değerine sahip olmasından dolayı kaynakta erişilen sıcaklık nedeniyle sertlik düşüşü sınırlı ölçüde olmaktadır. İki tarafta da en fazla sertlik düşüşünün görüldüğü aralıklar ise kaynağın ısı tesiri altındaki bölgesinde (ITAB) belirlenmiştir.

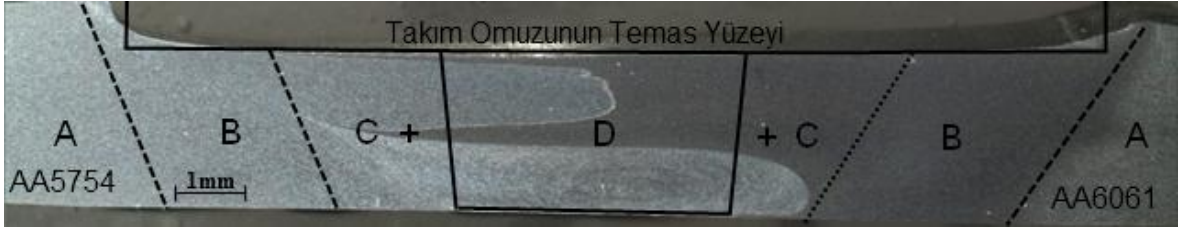
Kaynak merkezine yaklaşıldıkça her iki tarafta da sertlik değerlerinde belirgin bir artış görülmekte ve birleşme bölgesinin merkezinde tepe değerine ulaşmaktadır. Buradaki etkin mekanizma karıştırma etkisiyle meydana gelen aşırı plastik deformasyon ve devamındaki yeniden kristalleşme etkisidir. Karıştırma ve deformasyon etkisi ile karışan malzemeler yeniden kristalleştirme işlemine maruz kalmaları sonucu tane boyutları büyük oranda incelmekte, bu durum Hall-Petch bağıntısıyla uyumlu bir şekilde sertlik ve mukavemet değerlerinin artırmasına yol açmaktadır. Kaynak merkezinde ölçülen sertlik değerlerini, ana malzemelerin birbiri arasında karışma oranı ile yukarıda açıklanan deformasyon ve yeniden kristalleşme mekanizmaları belirlemektedir. Birleşme bölgesinde ölçülen sertlik değerlerinden AA6061 alaşımının sertliğindeki düşüşün, AA5754 alaşımının sertlik değerindeki en düşük değere oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu durum SKK sonunda oluşan sertlik değerlerinin birleştirilen her iki alaşımın birbirleriyle uyumlu olmaları nedeniyle, SKK sonrası birleşme bölgelerinde elde edilen mekanik özellikler arasında büyük fark oluşturmadığını göstermektedir.

Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen veriler kullanılarak çizilen sertlik grafiklerine bakıldığında, uygulanan kaynak parametrelerine bağlı olarak meydana gelen karıştırma etkisi ve erişilen sıcaklık mertebesi sonucunda, takım baskı kuvvetinin malzemenin sertlik değerlerini direkt etkilediği söylenebilir. Takım baskı kuvvetinin artmasıyla beraber genel sertlik değerlerinde de artış gözlenmiştir. Nedeni, takım baskı kuvveti arttırıldıkça ortaya çıkan sıcaklık arttığından alaşımların mukavemetleri azalarak karışabilmeler için daha hamurumsu kıvama (düşük sertlik ve mukavemet) gelmekte ve karıştırma daha homojen olabilmektedir. Kaynaklı numunelerin AA6061 tarafındaki ITAB bölgelerinde ölçülen sertlik değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Bu sonuç, plastik deformasyonun bu bölgede ihmal edilebilir mertebede olmasının yanında, oluşan sıcaklık farklarının malzemedeki çok belirgin olmayan yaşlanma etkilerinden dolayı kaynaklanmaktadır.

İlerleme başına dönme miktarı olarak tanımlanan “karıştırma şiddeti” de direkt olarak kaynak parametrelerini belirtmekte olduğundan, kaynak bölgesinin sertlik değerinde oldukça etkili olmuştur. Söz konusu grafiklere (Şekil 3.12-3.13) bakıldığında en yüksek

sertlik değerlerinin 7,41 dev/mm'lik karıştırma şiddeti değeri ile 21x numunelerinde elde edilmiştir. Karıştırma şiddetinin 2,96 dev/mm değeri ile en düşük olduğu 13x numunelerinde ise en düşük sertlik değerleri ölçülmüştür. Bu numunelerde belirlenen sertlik değerleri esas olarak takım baskı kuvvetinden etkilenmektedir.

Elde edilen sertlik ve sıcaklık değerleri doğrultusunda Şekil 3.14'de görülen çeşitli bölgelerin tanımlanması gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde belirlenen içyapı bölgeleri literatürde verilen bölgelerin tanımları ile de örtüşmektedir [12,17,20].



Şekil 3.14. Sertlik ölçümleriyle belirlenen bölgeler A: Ana malzeme B: Isıdan etkilenen bölge (ITAB) C: Termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB) D: Karışma bölgesi, dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB).

3.5. Çekme Deneyi İncelemeleri

AA5754 ve AA6061 alaşımlarının kaynak öncesi ve sonrası mekanik davranışını belirlemek amacı ile numuneler çıkarılarak çekme deneyine tabi tutuldular. İlk olarak referans olması için piyasadan temin edilen AA5754-H22 ve AA6061-T6 ana alaşımları çekme deneyine tabi tutuldu. Gerçekleştirilen deneyler sonunda bu iki ana alaşım ile ilgili oluşan mekanik özellikler Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2. AA5754 ve AA6061'in çekme deneyleri sonucu mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler					
	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Elastisite Modülü (GPa)	Kırılma Enerjisi (J)
AA5754-H22	175	243	13,6	60,87	12,372
AA6061-T6	217	242	12,1	66,21	10,598

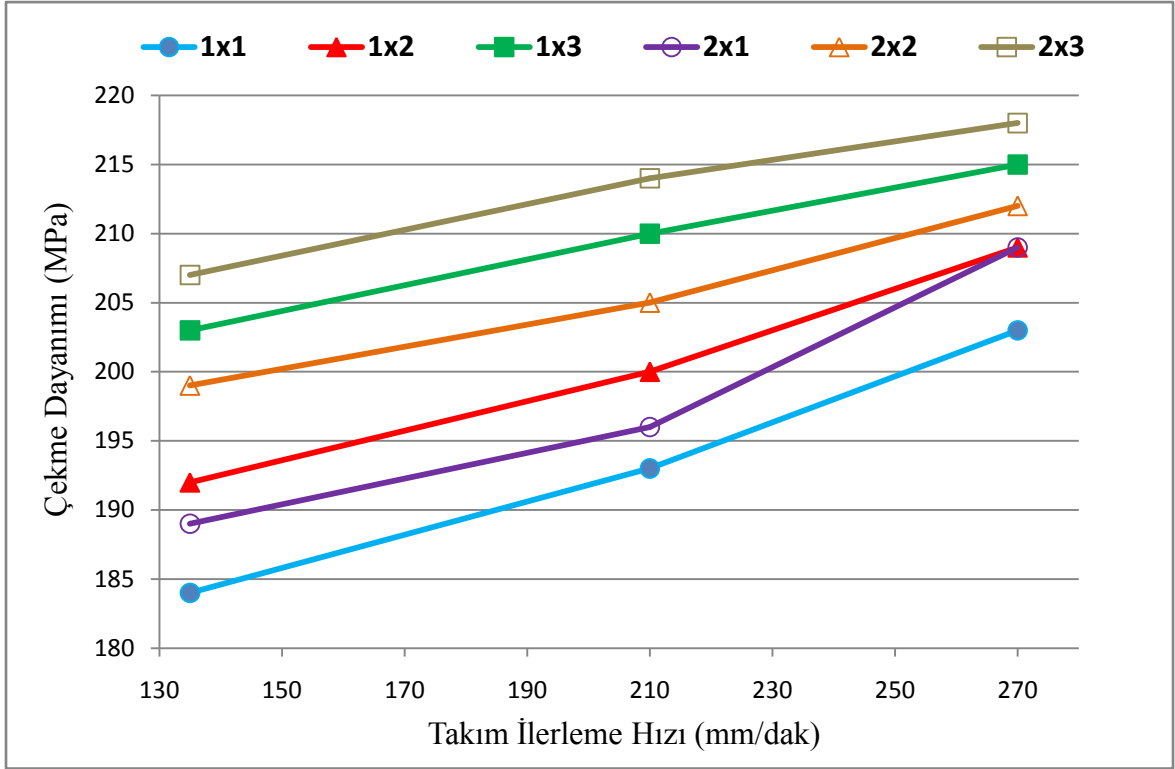
Kaynak boyuna ve enine çıkarılan çekme numuneleri (Şekil 2.9/a-b) çekme testlerine tabi tutulmuş ve ortaya çıkan değerlerin ortalaması alınarak aşağıdaki Tablo 3.3 oluşturulmuştur.

Tablo 3.3. Çekme numunelerinin mekanik özellikleri

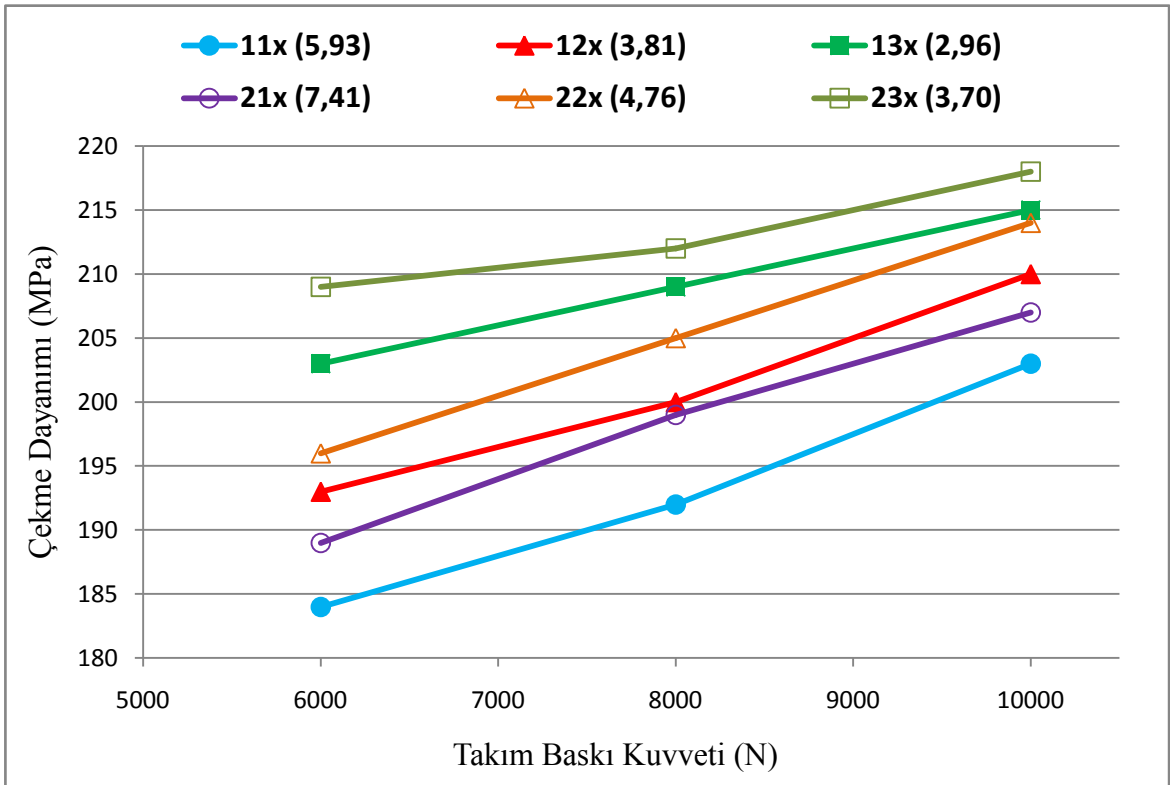
Numune No	Karıştırma Şiddeti (dev/mm)	Erişilen Sıcaklık (°C)	Çekme Dayanımı (MPa)		Uzama (%)		Kırılma Enerjisi(J)
			Enine	Boyuna	Enine	Boyuna	Enine
111	5,93	429	184	333	5,31	35,2	2,901
112	5,93	424	192	331	7,84	31,8	3,940
113	5,93	484	203	368	12,69	34,0	8,194
121	3,81	319	193	302	5,60	33,7	3,554
122	3,81	332	200	299	9,22	30,9	6,643
123	3,81	409	210	285	8,19	34,6	5,660
131	2,96	339	203	291	7,13	19,2	5,269
132	2,96	330	209	320	7,21	33,6	5,252
133	2,96	376	215	293	7,25	33,8	5,272
211	7,41	411	189	302	8,30	36,1	4,297
212	7,41	438	199	242	9,32	30,4	4,125
213	7,41	399	207	268	11,91	28,2	7,121
221	4,76	390	196	279	7,16	37,9	3,875
222	4,76	434	205	226	7,47	32,9	4,412
223	4,76	418	214	233	8,65	27,5	6,598
231	3,70	378	209	177	7,39	36,6	4,954
232	3,70	366	212	336	7,18	35,5	5,016
233	3,70	448	218	378	7,50	35,5	5,637

Tablo ve grafiklerdeki bulgular değerlendirildiğinde, birleştirilen AA5754 ve AA6061 alaşımların SKK sonrası elde edilen çekme dayanımlarının ana malzemelerin kaynak öncesi mukavemetlerine oranı, yaklaşık % 85±5 değerinde elde edilmiştir. Numunelerin tokluk değerleri ve kopma uzamalarında ise ana malzemenin yaklaşık % 64 değerine kadar düşüş gerçekleşmiştir. Kopma uzamalarında görülen düşüş, takım baskı kuvvetinin maksimum olduğu 10kN değerinde en az düzeydedir ve ana malzemenin uzama değerlerine yakındır.

Kaynak enine çıkarılan numunelerin maksimum çekme dayanımlarını kendi aralarında karşılaştırmak amacı ile Şekil 3.15 ve Şekil 3.16 hazırlanmıştır.



Şekil 3.15. Enine çıkarılan numunelerin çekme dayanımı- takım ilerleme hız grafiği



Şekil 3.16. Enine çıkarılan numunelerin karıştırma şiddetleri ve çekme dayanımı- takım baskı kuvvet grafiği

Şekil 3.15 ve 3.16, kaynaklı numunelerin takım ilerleme hızları ve takım baskı kuvvetleri arttıkça, çekme dayanımlarının da arttığını göstermektedir. En yüksek çekme dayanımı 214 MPa ile 223 numunesinin ve en düşük çekme dayanımı ise 184 MPa değeri ile 111 numunesinde görülmüştür.

Oluşan sonuçlar değerlendirildiğinde kaynaklı yapının mukavemet değerlerinde en etkin parametrenin takım baskı kuvvetinin olduğu görülmektedir. Bunun nedenlerinden ilki, artan baskı kuvvetiyle beraber kaynak sıcaklığının artması ve buna bağlı olarak malzemelerin birbirleri ile daha kolay ve daha homojen karışabilmesidir. İkinci neden, takım baskı kuvvetinin artması ile kaynağın gerilme altında yapılması, deformasyon şiddetinin artması ve buna bağlı olarak daha ince taneli bir yapının oluşarak kaynak mukavemetinin artmasıdır [4]. Üçüncü neden de artan takım baskı kuvveti ile beraber karıştırıcı ucun malzemenin daha da dibine ulaşmasıyla, daha fazla kalınlık boyunca kaynağın yapılabilmesidir.

Kaynağın dayanımına etki eden ikinci parametre ise takım ilerleme hızıdır. Şekil 3.15'i incelendiğinde takım ilerleme hızının arttıkça dayanımın da arttığı görülmektedir. Aynı takım dönme hızı ve baskı kuvveti altındaki kaynaklarda ilerleme hızı arttıkça erişilen sıcaklık seviyesi azalacağından ısıdan etkilenen bölgede oluşacak olan daralma sonucunda kaynak dikişinde elde edilecek mukavemet değerinde artış sağlanmaktadır. İlerleme hızlarının 270 mm/dak ile en hızlı olduğu değerlerde çekme dayanımları en yüksek çıkmıştır. Bu durumun nedeni, artan ilerleme hızları ile takım kaynak dikişi bölgesindeki birim uzunluk başına daha kısa sürede etkiyeceğinden oluşacak sıcaklığın kaynak bölgesine etkisi azalmakta ve dolayısıyla birleşme bölgesinin dayanımı artmaktadır. Takım omzunun meydana getirdiği sıcaklık etkisi hızlı ilerleme nedeniyle birleştirilmekte olan parçaların ITAB genişliğinin daralmasına ve AA6061 alaşımının ITAB'de oluşacak olan aşırı yaşlanmanın ve AA5754 alaşımında mevcut olan soğuk deformasyonun etkisinin azalmasına neden olmaktadır.

Dayanıma etkileyen diğer parametre ise takım dönme hızına bağlı karıştırma şiddetidir (n/v). Şekil 3.16'da parantez içerisinde numunelere ait karıştırma şiddetleri verilmiştir. Şekil 3.15 ve 3.16 grafiğinin oluşmasında en önemli faktör takım baskı kuvveti ve takım ilerleme hızı olduğundan en yüksek çekme dayanımları en yüksek karıştırma şiddetlerinde ya da en düşük dayanımlar en düşük karıştırma şiddetlerinde oluşmuştur diyemeyiz. Bununla beraber Şekil 3.16'da aynı ilerleme hızı ve aynı takım baskı kuvveti

altındaki kaynaklarda karıştırma şiddeti yüksek olan kaynağın çekme dayanımları daha yüksek çıktığı görülmektedir.

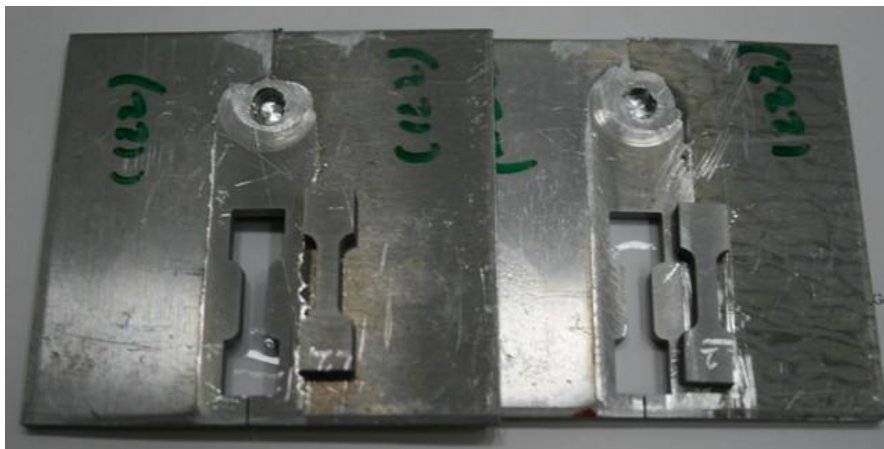
Kaynak boyunca çıkarılan numunelerin çekme deneyi sonunda kopma görüntüleri Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17. Kaynak boyunca çıkarılan çekme numunelerinin kopma resimleri

Çekme deneyi sonunda kopan numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde numunelerin kopma yüzeylerinin koni-çanak tipi şeklinde kopmakta olduğu görülmektedir. Kopma yarı-sünek karakterli gerçekleşmiştir. Numuneler çoğunlukla kaynağın AA6061 tarafındaki ITAB bölgesinden kopmakta olduğu belirlenmiştir. Bu durumun nedeni mikrosertlik incelemesinde daha önce belirtildiği gibi oluşan kaynak sıcaklığının AA5754’ün yeniden kristalleşmesine oranla AA6061’in aşırı yaşlanmasına daha fazla etki etmesinden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple dayanımları birbirine yakın olan bu alaşımların kaynağında mukavemeti belirleyici olan alaşımın AA6061 olduğunu söylenebilir.

SKK’nın kaynak yapısını nasıl etkilediğini öğrendikten sonra sadece kaynak dikişinin yapısını ve dayanımını incelemek amacı ile Şekil 3.18’deki gibi kaynak boyunca numuneler çıkarılarak çekme deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.18. 122 ve 232 numunelerinden tel erezyonla çıkarılan boyuna kaynak numuneleri

Tablo 3.3'te kaynak boyunca çıkarılan numunelere ait değerleri incelendiğinde kaynak yapısının çekme dayanımlarının hem AA5754, hem de AA6061 alaşımlarının dayanımlarından oldukça yüksek çıktığı görülmüştür. Bu durum, karıştırıcı ucun iki alaşımı birbiri ile karıştırırken deforme etmesiyle oluşan ince taneli yapıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Hall-Petch bağıntısına göre tane boyutunun azalması ile malzemenin mukavemeti artacağından oluşan ince taneli yapı kaynak mukavemetinin artmasında başlıca etkindir. Ölçülen en yüksek dayanım değerleri takım baskı kuvvetinin en yüksek değer olduğu 10 kN'da olmuştur. Oluşan yüksek mukavemet değerlerinin diğer bir sebebi de karıştırıcı ucun geometrisidir. Seçilen vidalı ve üçgen geometrili uç sayesinde alaşımlar birbiri arasında çok daha sağlıklı ve homojen bir biçimde karışmıştır.

Tablo 3.3 incelendiğinde kaynak dikişinin kopma uzama miktarının ana malzemelerinkine oranla daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durumun nedenini kaynak esnasında oluşan deformasyon etkisiyle meydana gelen ısının tane içindeki dislokasyonların düzene girmelerini sağlayarak malzemenin sünekliğini ve tokluğunun artırmasına yol açabileceği düşünülmektedir. Şekil 3.19, kaynak dikişi bölgesinden boyuna doğrultuda hazırlanan çekme numunelerini göstermektedir.



Şekil 3.19. 2xx numaralı numunelere ait çekme deneyi sonrası kopma şekilleri

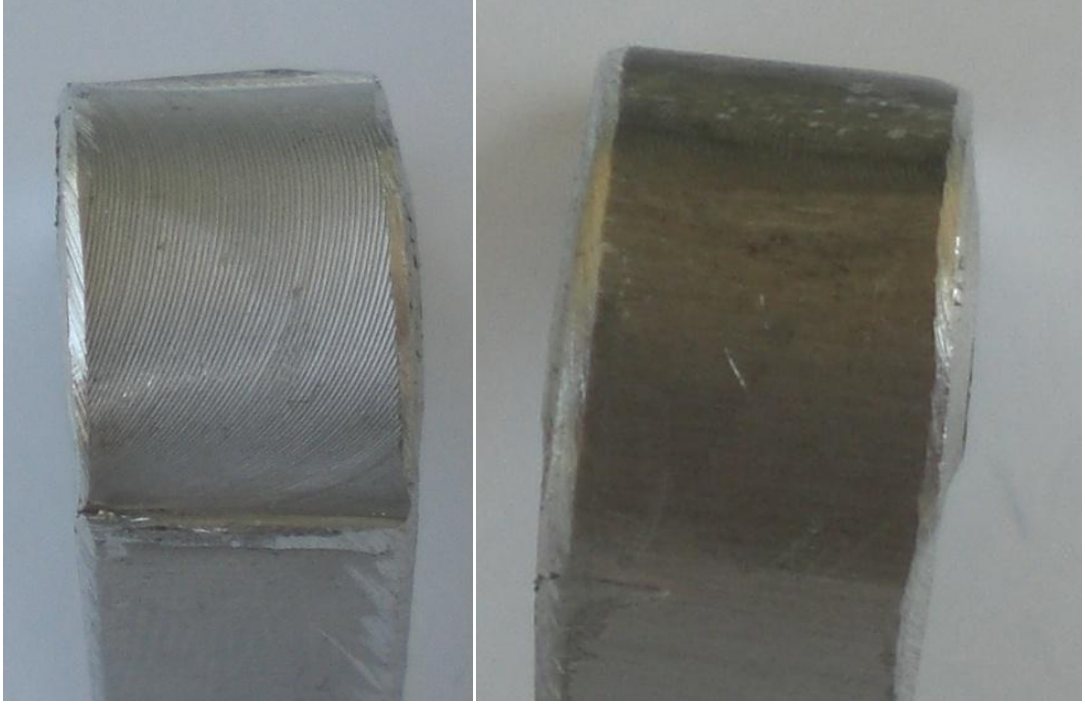
3.6. Eğme Deneyi İncelemeleri

TS282 EN 910 standardına göre hazırlanmış deney numuneleri kaynak dikişlerinin kök bölgelerinin dışarı ve içeri gelecek şekilde mandren yardımı ile eğerek gerçekleştirilmiştir. Eğilmiş numunelere yan taraftan bakıldığında (Şekil 3.20) çatlama belirtisi gözlemlenmemiştir.

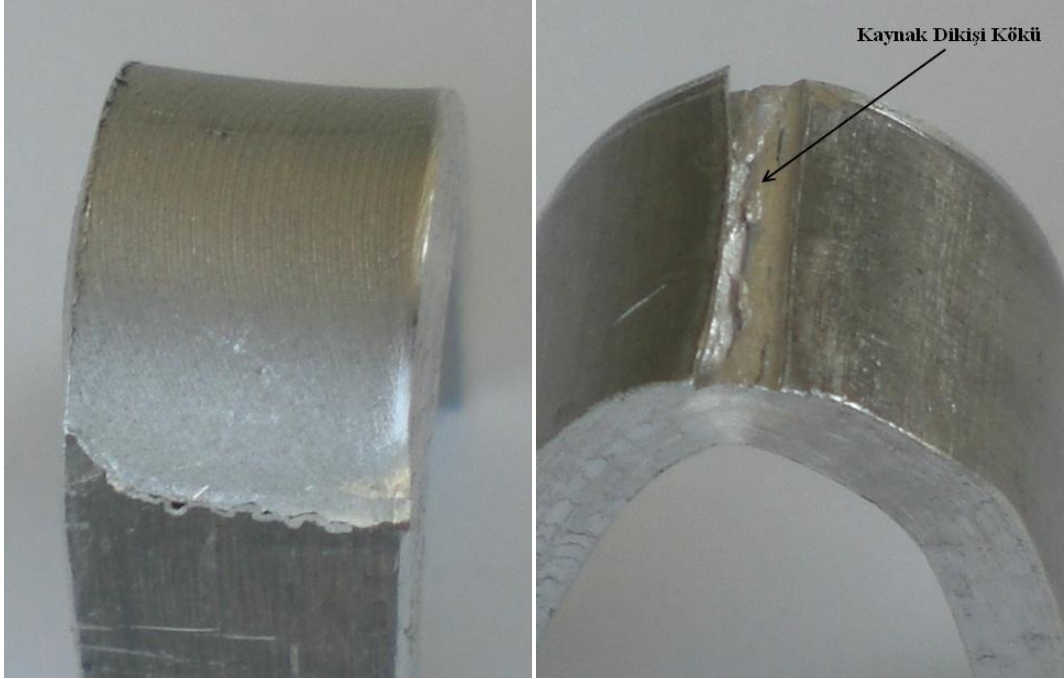


Şekil 3.20. 113 numaralı numunenin eğme deneyi sonrası yan görünümü

Kök bölgesinin içeri, kaynak bölgesinin dışarı gelecek biçimde yapılan deneylerin hiçbirinde kaynak bölgesinde çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir (Şekil 3.21, 3.22). Bu sonuç, SKK'nın başarılı bir şekilde yapıldığını ve uygun parametrelerin seçildiğini göstermektedir. Kök bölgesi dışarı gelecek biçimde yapılan deneylerde ise sadece 113 ve 213 numunelerinde çatlamlar görülmemiştir (Şekil 3.22) . Söz konusu durum, takım ilerleme hızının en düşük ve 10 kN yük altında takımın birleştirilen parçaları ezmesi ile takım piminin parçaların tüm kesiti boyunca dalarak alt destek tablasına kadar erişip parçalar arasında Şekil 3.10'dan görüldüğü gibi çentik oluşumunu önlemesi sayesinde meydana gelir. Dolayısıyla, SKK uygulamalarında kaynak kök bölgesinin eğilme gerilmelerine maruz kalması durumlarında takım pimi boyunun uygulanan baskı kuvvetine göre belirlenerek kullanılması zorunluluğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.21. 113 numaralı numunenin eğme deneyi sonrası kaynak dikişinin ve kaynak tabanının görünümü



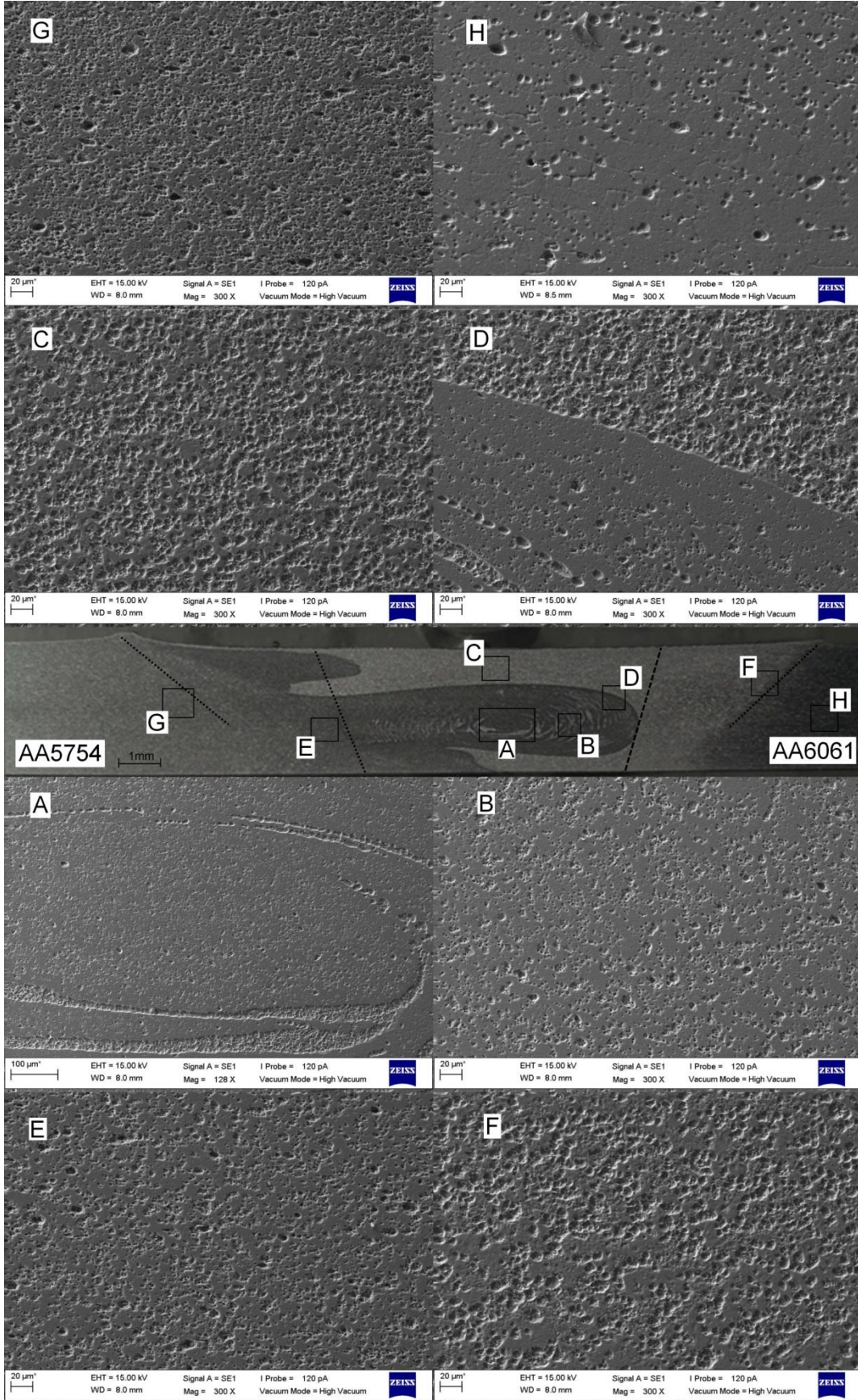
Şekil 3.22. 131 numaralı numunenin eğme deneyi sonrası kaynak dikişinin ve kaynak tabanının görünümü

3.7. Mikroyapı İncelemeleri

AA5754 ile AA6061 alaşımlarının SKK işlemleri sonrası oluşan mikroyapılarını gözlemek amacıyla kaynak bölgesinden alınan metalografi numuneleri zımparalanıp ve parlatıldıktan sonra Keller ayırıcı ile dağlanmıştır. Daha sonra oluşan içyapılar ZEISS marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir.

Şekil 3.23 ve Şekil 3.24'te 212 ve 131 numaralı numunelerin birleşme bölgelerinin içyapılarına ait taramalı elektron mikroskop (SEM) ayrıntılı görüntüleri (mikroyapılar), makro ölçekte çekilmiş olan içyapı görüntüsünün etrafına aynı büyütme oranına sahip içyapı görüntüleri olarak verilmiştir. Bu görüntülerden 212 numaralı numune 8 kN yük altında 1000 dev/dak takım dönme hızı 135 mm/dak takım ilerleme hız parametreleri altında yapılan birleşme sonucu oluşmuştur. Karıştırma şiddeti, en yüksek değer olan 7,41 dev/mm ve ölçülen en yüksek sıcaklık 438°C'dir. Şekil 3.23'te 212 numunesinden sekiz adet SEM görüntüsünün alındığı görülmektedir. Bunlardan A,B,C ve D görüntüleri kaynak bölgesinden, E ve F görüntüleri ITAB bölgesinden, G ve H bölgeleri de ana malzemelerden alınmıştır.

Şekil 3.24'te SEM görüntüleri verilen 131 numaralı numune ise 6 kN yük altında 800 dev/dak takım dönme hızı ve 270 mm/dak takım ilerleme hız parametreleri altında yapılan birleştirme sonucu oluşturulmuştur. Karıştırma şiddeti, en düşük değer olan 2,96 dev/mm ve ölçülen en yüksek sıcaklık 339°C'dir. Şekil 3.24'te karıştırma bölgesinin sekiz farklı noktasından (şekil üzerinde belirtilmiş durumda) farklı çözünürlüğe sahip olan görüntüler verilmiştir.

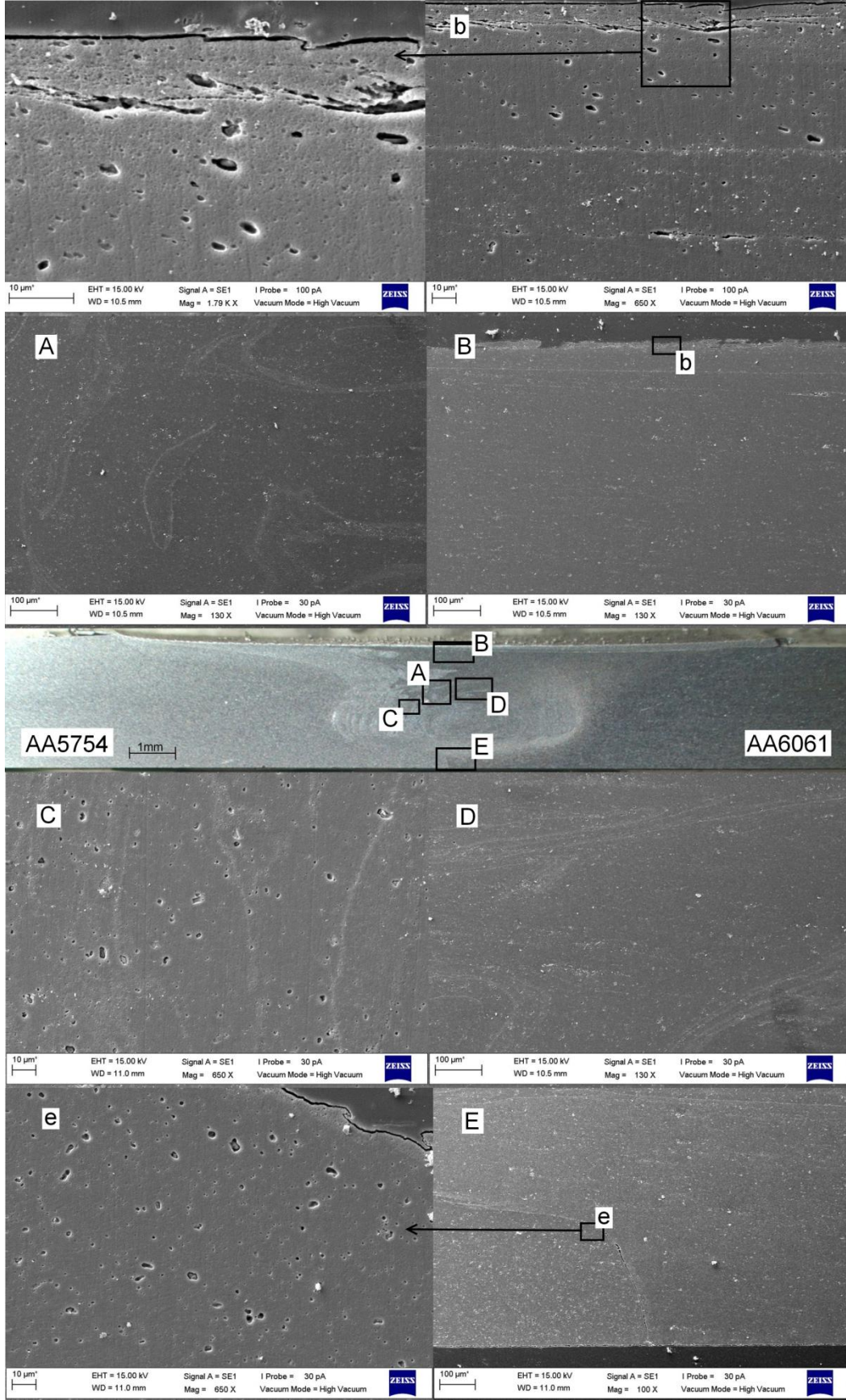


Şekil 3.23. 212 numaralı numenin kaynak bölgesinin SEM görüntüleri

Şekil 3.23'te bulunan G ve H görüntüleri AA5754 ile AA6061'in ana malzemelerine ait bilgiler vermektedir. Bu görüntüler incelendiğinde iki malzemede de çeşitli büyüklükte mikro gözenekler belirlenmiştir. Bu gözenekler malzemelerin üretim aşamasında oluşmuş ve birleştirme sonrasında da mevcudiyetlerini sürdüren gaz ve çekme boşluklarıdır.

Şekil 3.23'e ait A görüntüsü karıştırma bölgesinin merkezinden alınmıştır. Bu görüntüde karıştırma sonucunda AA5754 alaşımının içine dağılmış olan AA6061 alaşımını görebilmekteyiz. B görüntüsü karıştırma bölgesinin AA6061 tarafına doğru uzanmış tarafından alınmıştır. Bu görüntüde oluşan plastik deformasyon sonrasında çekme boşluklarının azaldığı görülebilmektedir. C görüntüsü karıştırma bölgesinin üzerinde AA6061 alaşımına ait görüntüdür. D görüntüsünde karıştırma bölgesinde AA5754 ile AA6061 arasındaki sınır rahatça görülebilmektedir. Bu görüntü uygulanan birleştirme işleminin difüzyonsuz olduğunu ve karışımın mekanik biçimde olduğunu göstermektedir. E görüntüsü AA5754 tarafına ait ITAB bölgesinden, F görüntüsü ise AA6061 tarafına ait ITAB bölgesinden alınmış görüntülerdir.

212 numunesinde kaynak sırasında oluşan sıcaklık değeri karıştırma şiddetinin etkisi ile yüksek oranda çıkmış ve bu sıcaklık, numunenin kaynak merkezinden daha uzak noktalara nüfuz etmiştir. Bu nedenle 212 numaralı numunenin ITAB bölgesi genişlemiştir.



Şekil 3.24. 131 numaralı numenin kaynak bölgesinin SEM görüntüleri

Şekil 3.24'te görülen 131 numaralı numunenin birleştirme işlemi 6 kN yük altında, karıştırma şiddeti en düşük değer olan 2,96 dev/mm ile uygulanmıştır. Kaynak sırasında ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 339 °C'dır.

Karıştırma bölgesinden alınan A, C ve D görüntülerinde birleştirme sonucu oluşan soğan halkaları görülmektedir. B ve aynı bölgeden alınan büyütülmüş b görüntülerinde takım omzunun numunenin üstüne sıvamış olduğu AA6061 alaşımı görülebilmektedir. Bu yapı incelendiğinde yüksek oranda deforme olmuş AA6061 yapısı görülebilmektedir. Oluşan aşırı plastik deformasyon sonucu numunede başta var olan gözenekler yönelerek belli bir düzene girmişlerdir. Ayrıca kaynak bölgelerinin yüzeyinde oluşan bu tabakaların AA6061 alaşımı olduğu yapısal görünümünden anlaşılmaktadır. Bu durum AA6061 alaşımının kaynak esnasında gerileme tarafında olması nedeniyle takım omzunun sıvama etkisi sonucunda birleşme bölgesinin yüzeyine sıvanmış olduğu düşünülmektedir.

131 numunesinin karıştırma şiddeti ve oluşan en yüksek sıcaklık değerinin düşük oranda olmaları nedeni ile ITAB ve karışma bölgesi 212 numunesi kadar geniş olmamıştır.

Numuneye ait E ve e görüntülerinde yetersiz takım baskı kuvveti nedeniyle karıştırma bölgesi dibinde bulunan birleşmemiş ayırık bölge görülebilmektedir. Şekil 3.23'te de karışmamış bölge bulunmaktadır. Çatlak şeklinde görünen bu kısım karıştırıcı ucun malzeme kalınlığından yaklaşık 0,2 mm daha kısa olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle karıştırıcı uç kaynak esnasında malzemenin dibine kadar nüfuz edememiştir.

Takım ucundaki bu tasarım, SKK işlemi esnasında uygulanan baskı kuvveti nedeni ile karıştırıcı ucun, numunelerin yerleştirildiği alt tabakaya zarar vermemesi amacı ile düşünülmüştür. Bununla birlikte takım baskı kuvvetinin 8 kN olduğu 212 numunesinde (Şekil 3.23) bu birleşmemiş olarak kalan bölgenin oluşumu daha az miktarda meydana geldiği görülmektedir. Çekme deneyleri sırasında numunelerin ITAB bölgesinden kopması, numune kalınlığının %5 civarına karşılık gelen boyutta böyle bir çatlağın oluşmasına rağmen bu çatlağın numunelerin çekme dayanımlarını düşürmediğini göstermektedir.

Şekil 3.23 ve 3.24'te içyapılara bakıldığında yapılan birleşme bölgelerinde homojen olmamakla beraber iyi bir karışımın meydana gelmiş olduğu ve karışmış durumdaki alaşımların (AA5754 ve AA6061) aralarında mekanik bir karışımın gerçekleşmiş durumda olduğu görülmektedir. Kaynak dikişlerinde hiçbir hata, boşluk veya kusur gözlemlenmemiştir. Seçilen parametrelerin ve özellikle kullanılan karıştırıcı uç profilinin

etkisiyle malzemelerin başarılı bir şekilde karıştırılabilmekte olduğu görülmektedir. Kaynak dikişi boyunca alınan numunelerin çekme dayanımların ve süneklik değerlerin (% kopma uzaması) ana malzemenin çok üzerinde değerlere sahip olması bu sonucu doğrulamaktadır. Bu etki literatürde belirtilmiş olan bulgular ile de örtüşmektedir [12,17,58].

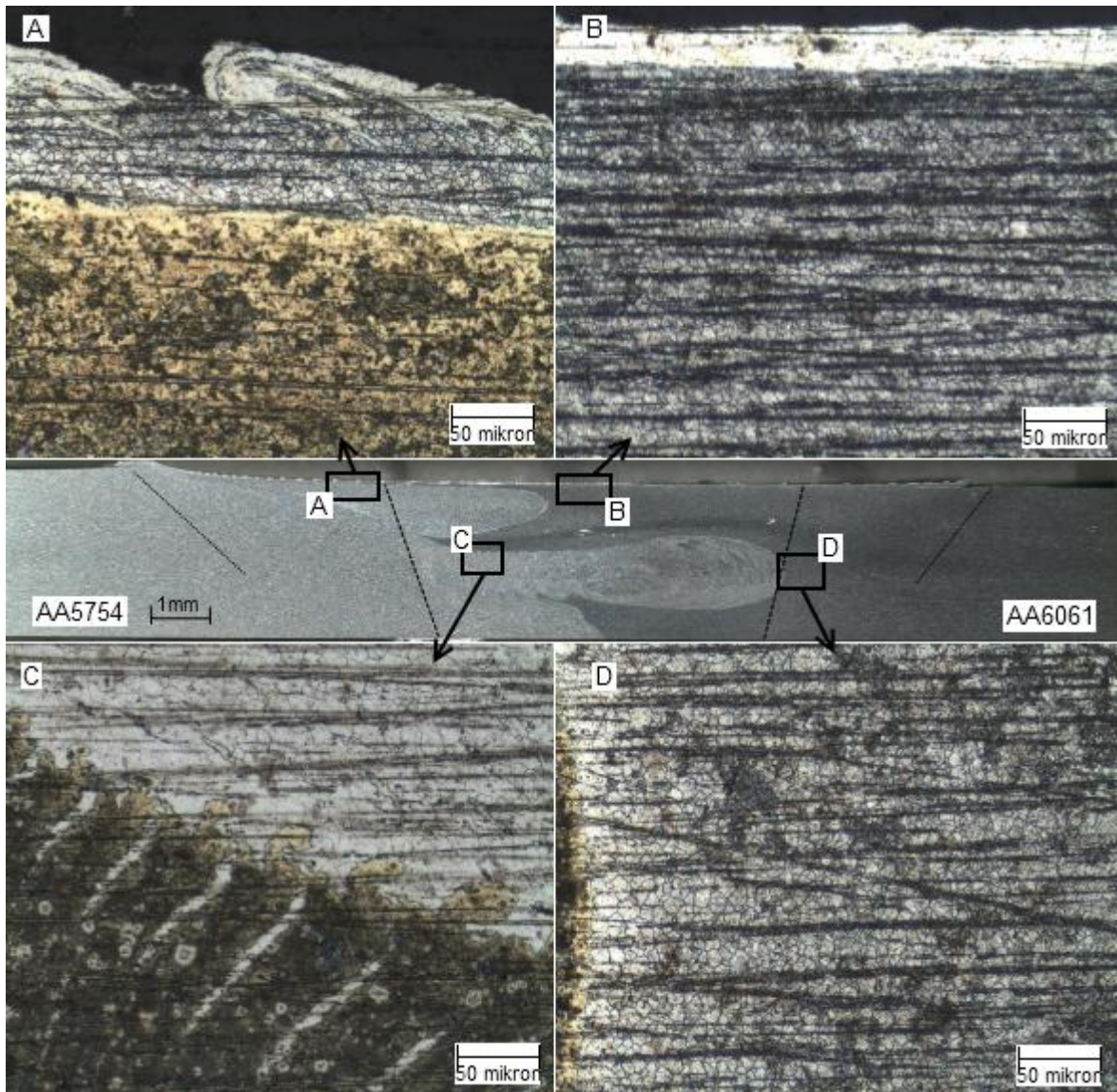
Numunelerin SEM görüntülerini inceledikten sonra deformasyon sonucu oluşan tane boyutlarını incelemek amacı ile optik mikroskop ile numunelere ait fotoğraflar çekilmiştir. Şekil 3.25'te 211 numaralı numuneye ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. 211 numaralı numune, 1000 dev/dak takım dönme hızı, 135 mm/dak takım ilerleme hızı ve 6kN yük altında yapılan birleşme sonucu oluşmuştur. Karışma şiddeti 7,41 dev/mm ve kaynak esnasında ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 411⁰C'dır.



Şekil 3.25. 211 numaralı numuneye ait optik mikroskop görüntüleri

Şekil 3.25, uygulanan birleşmeye ait genel görünümü vermektedir. Görüntüde oluşan soğan halkaları ve kaynak dibinde karışmamış bölge görülebilmektedir. A bölgesi incelendiğinde sıcaklığın ve deformasyonun etkisi ile yeniden kristalleşmiş tane yapısı görülmektedir. Bu bölgede karıştırıcı ucun oluşturduğu aşırı plastik deformasyon ve sürtünme ile ortaya çıkan sıcaklık etkisi sonucunda yapı yeniden kristalleşerek ince taneler meydana gelmiştir.

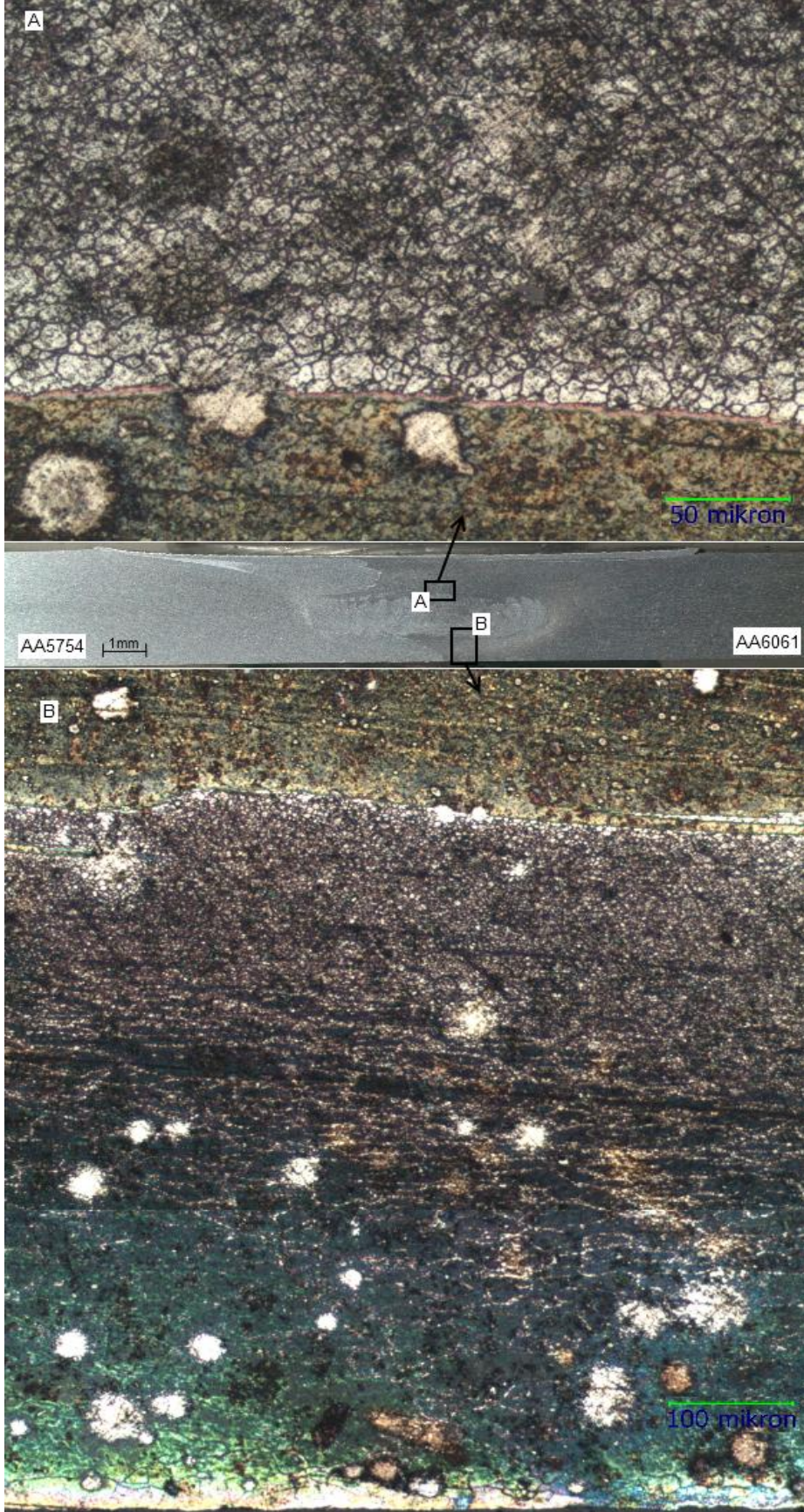
1000 dev/dak'lık takım dönme hızı ve 8 kN'luk baskı yükü kullanarak 3,70 dev/mm karıştırma etkisine sahip 232 numaralı numuneye ait içyapı görüntüleri Şekil 3.26'da verilmiştir.



Şekil 3.26. 232 numaralı numuneye ait tane yapısı görüntüleri

Şekil 3.26'da incelenen numunenin çeşitli bölgelerine ait ayrıntılı içyapılar görülmektedir. A ve D görüntüleri ITAB bölgesinden, C ve B görüntüleri karışma bölgelerinden alınmıştır. A görüntüsünde AA5754 alaşımının üzerine takım omuzu tarafından sıvanmış olan AA6061 alaşımı görülebilmektedir. Ayrıca sıcaklığın etkisi ile yeniden kristalleşmiş tane yapısı görülebilmektedir. B görüntüsü birleşmenin tepesine ait olup, yukarıya doğru daha ince taneli yapı görülmektedir. C görüntüsünde AA5754 alaşımının içine dağılmış soğan halkası şeklinde AA6061 alaşımı görülebilmektedir. Bu görüntü birleşme işleminin tamamen mekanik karakterli olduğunu göstermektedir. D görüntüsünde ise birleşme sırasında oluşan sıcaklığın etkileri daha belirgin olarak görülebilmektedir. 232 numaralı numuneye ait kaynak işlemi esnasında ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 366°C'dir. Kaynak esnasında oluşan bu sıcaklık kaynak merkezinden başlayarak etkisini göstermiştir. Bu nedenle D görüntüsünde ince taneli yapılarda karışma bölgesine yakın yerlerde sıcaklığın etkisi ile tane irileşmesi görülmüştür. Karışma bölgesinden uzaklaşıldıkça tane boyutu azalmaktadır. Bu duruma benzer yapıyı Şekil 3.27'de de görülebilmektedir.

Şekil 3.27 de 132 numaralı numuneye ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bu numunenin birleştirme işlemi 8 kN baskı kuvvetinde ve 1000 dev/dak takım dönme hızında gerçekleşmiştir. Karıştırma şiddeti 2,96 dev/mm ve birleştirme esnasında ölçülen en yüksek sıcaklık 330°C'dir.



Şekil 3.27. 132 numaralı numuneye ait tane yapısı görüntüleri

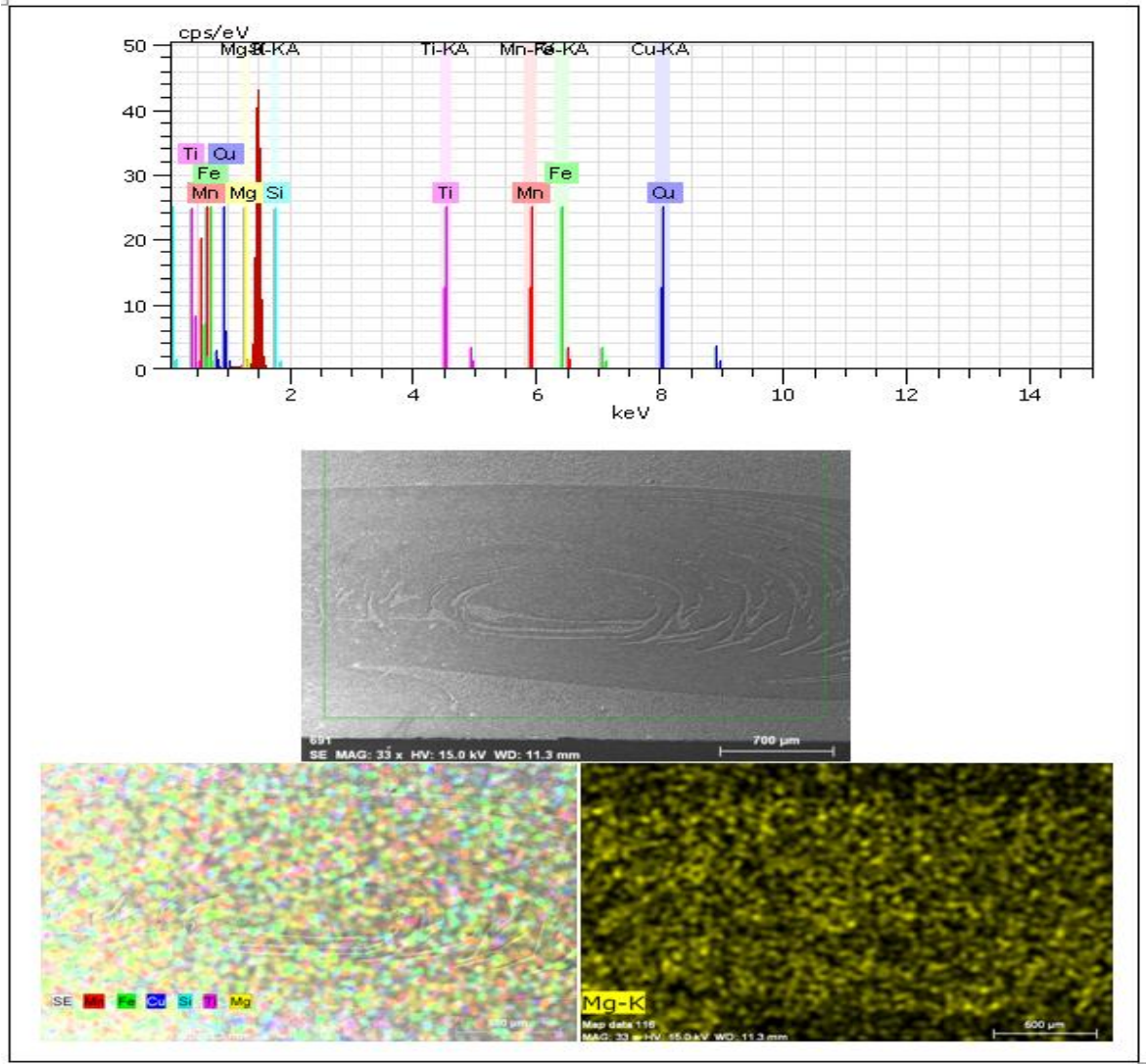
Şekil 3.27’de A görüntüsünde yeniden kristalleşmiş taneler görülmekte olup, kaynak merkezine yaklaşıldıkça oluşan sıcaklığın etkisi ile tane irileşmesi gözlemlenmiştir. B görüntüsünde ise kaynak merkezinden numenin altına kadar uzanan bölgenin tane yapısı verilmiştir. Buna göre numunenin en altından başlayarak, takımın karıştırıcı ucunun etki etmediği yerlerde tane yapısı bozulmamıştır. Yukarı doğru çıkıldıkça karıştırıcı ucun uyguladığı deformasyona bağlı olarak deformasyon yönünde uzamış taneler görülmektedir. Bu yönlenmiş tanelerin sınırlarında beyaz renkli yeniden kristalleşmiş ince taneler görülebilmektedir. Daha da yukarı çıkıldıkça yönlenmiş taneler, yerini tamamen yeniden kristalleşmiş tanelere bırakmıştır. Çekirdek bölgesine yakın bölgelerde ise yeniden kristalleşmiş tanelerin, sıcaklığın etkisi ile boyutu büyümüş ve tane irileşmesi görülmüştür. Karıştırma şiddetinin ve kaynak esnasında oluşan sıcaklığın nispeten daha düşük olması nedeni ile yönlenmiş taneler tamamen yeniden kristalleşmemiş ve tane irileşmesi çekirdek bölgesinin sınırlarında oluşmuştur.

3.8. Kaynaklı Bölgenin Kimyasal Analizi

SKK yöntemi ile birleştirilen alaşımların mikroyapı incelemelerinde kaynak bölgesinde farklı bölgelerin olduğu belirlenmiştir. Bu bölgelerde bulunan fazların tespitini yapmak, alaşımlara ait kimyasal özellikleri karşılaştırmak ve kaynak bölgelerini tanımlayabilmek amacı ile numuneler, taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla kimyasal olarak enerji dağılım spektrometresi (Energy Dispersive Spectroscopy-EDS) analizine tabi tutuldu. EDS analizleri, noktasal ve element dağılım haritaları çıkartılarak gerçekleştirildi.

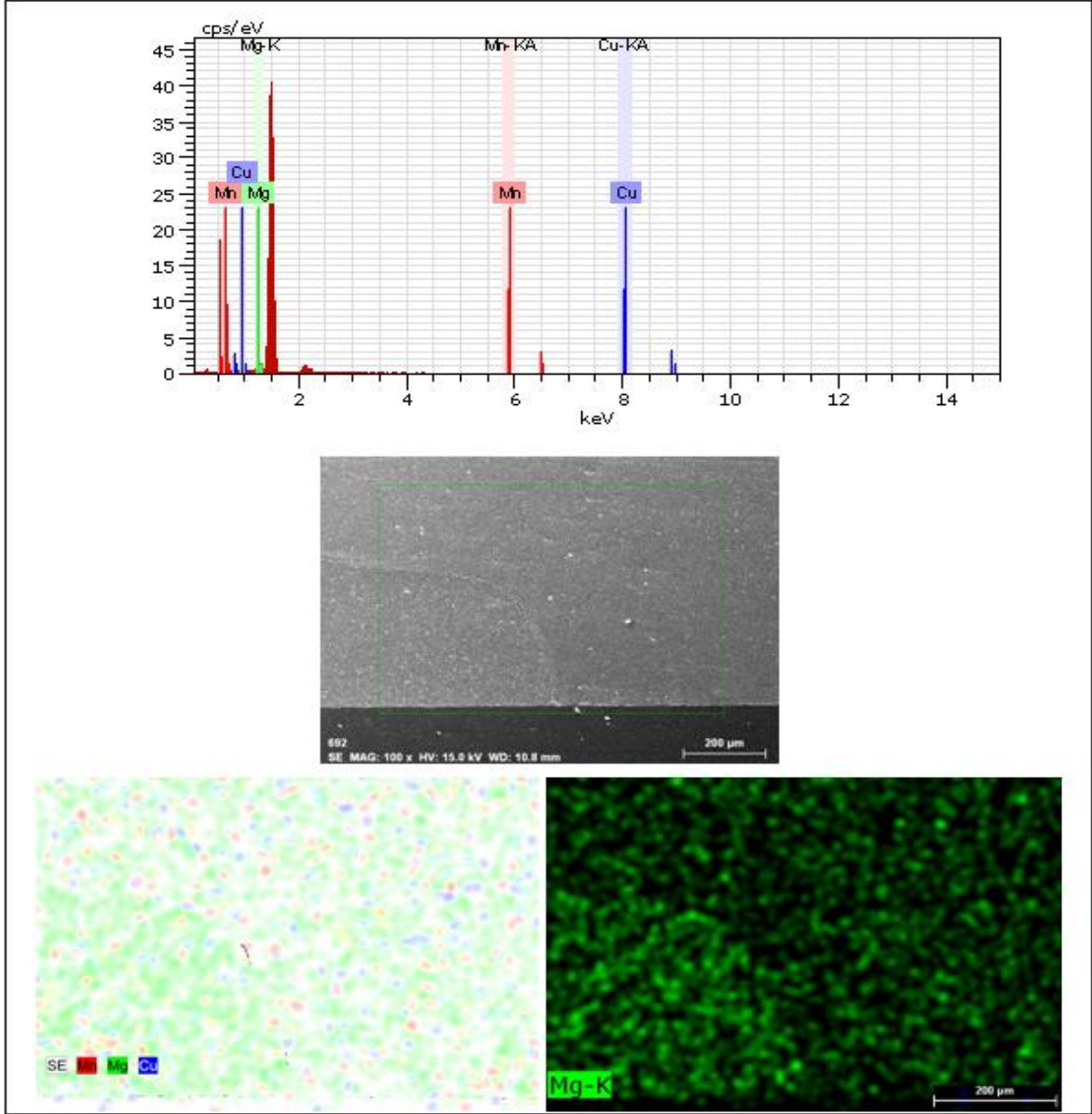
AA5754 ve AA6061 alaşımlarının kimyasal özellikleri birbirine çok benzemekle beraber bu iki alaşım arasındaki belirleyici fark Mg ağırlıklı fazdır. AA5754’te %3,16 oranında bulunan bu atom, AA6061’de %0,98 oranında bulunmaktadır. Bu nedenle EDS analizlerinde alaşımları ayırt etmek amacı ile Mg fazı esas alınmıştır.

Gerçekleştirilen kimyasal analizler Şekil 3.28 ve Şekil 3.29’da görülmektedir.



Şekil 3.28. 212 numaralı numuneye ait EDS analizi

Şekil 3.28’de 212 numaralı numunenin kaynak çekirdeğinin merkezi EDS analizine tutulmuş ve buradaki element dağılımı belirlenmiştir. Şekle göre AA5754 alaşımı kaynak çekirdeğinin merkezinde AA6061 alaşımına oranla daha fazla miktarda bulunduğu için bu bölge Mg’ca daha fazla oranda sarı renkte belirtilmiştir. Çekirdeğin içinde AA6061 dağılımları da görülebilmektedir. Kaynak çekirdeğinin etrafında ise AA6061 alaşımı daha yüksek oranda bulunduğu için Mg ağırlıklı fazı belirten sarı renk dağılımı daha az görülmektedir. Bu durum uygulanan birleştirme işleminde difüzyon veya kimyasal reaksiyonun olmadığını göstermektedir.



Şekil 3.29. 131 numaralı numuneye ait EDS analizi

Şekil 3.29’da ise, 131 numunesinin karışım oluşmamış kaynak dibindeki çatlak bölgesinden EDS analizi verilmiştir. Burada Mg ağırlıklı fazın dağılımından iki alaşımın ayırt etme sınırı belirgin bir şekilde görülmektedir.

Yapılan tüm çalışmaların üzerine EDS analizleri de eklendiğinde SKK işleminin bir katı hal kaynağı olduğu kesin bir biçimde söylenebilir. Analiz sonuçlarına bakınca bu katı hal kaynağında karışımın mekanik bir şekilde olduğunu, alaşımların kimyasal özelliklerinin değişmediğini, yapısal özelliklerinin düşük bir oranda değiştiğini, kaynak sırasında oluşan sıcaklığın etkisinin, fazların difüzyon ile birbirleri içerisinde çözünmeleri için yeterli olmadığı söylenebilir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, AA5754-H22 ile AA6061-T6 alaşımları birbirleri ile 800 dev/dak ve 1000 dev/dak dönme hızlarında, 135 mm/dak, 210 mm/dak ve 270 mm/dak ilerleme hızlarında, 6 kN, 8 kN ve 10 kN takım baskı kuvveti koşulları kullanılarak birleştirilmiştir. Tüm birleştirmeler helisel vidalı, üçgen-piramit profile sahip karıştırıcı uç ile gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler kullanılarak gerçekleştirilen deneylerden elde edilen numunelerin incelenmesinden çıkartılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. AA5754-H22 ve AA6061-T6 alaşımları, kullanılan kaynak parametreleri ile başarılı bir şekilde birleştirilebilmektedir.
2. Uygulanan kaynak işleminde numunelerin birleşme bölgelerinde ana malzeme, ITAB, TEB ve DKB olmak üzere dört ana bölge oluşmaktadır.
3. Kullanılan alaşımların SKK ile birleştirilebilmesi için en az 6 kN'luk takım baskı kuvveti gerekmektedir.
4. Kaynak sıcaklığının artışı kaynak bölgesindeki ITAB ve TEB bölgelerinin büyüklüğünü artırmakta ve sertlik değerlerini düşürmektedir.
5. Ortaya çıkan sıcaklık AA6061 alaşımını AA5754 alaşımından daha fazla etkilemiştir.
6. Kaynak işlemi sonucunda elde edilen birleştirmelerde en zayıf bölge AA6061 alaşımı tarafında oluşur.
7. Takım baskı kuvveti ve takım ilerleme hızları arttıkça kaynak dikiş bölgesinin sertlik ve mukavemet değerleri artar.
8. Gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde en mukavemetli birleştirme 1000 dev/dak, 270 mm/dak ve 10 kN parametreleri ile 233 numunesinde, en düşük mukavemetli birleştirme ise 800 dev/dak, 135 mm/dak ve 6 kN parametreleri ile 111 numunesinde oluşmaktadır.
9. SKK uygulamalarında birleştirmenin özelliklerini etkileyen parametreler önem sırası ile takım baskı kuvveti, takım ilerleme hızı ve karıştırma şiddetidir.
10. Numunelerin karıştırma bölgesi boyunca ölçülen mukavemet, kopma uzaması ve tokluk değerleri, ana alaşımların değerlerinden yüksek çıkmıştır.
11. Kaynak dikişi bölgelerinde oluşan şekil değişimlerinin tümü sünek karakterlidir.
12. Kaynak işlemiyle elde edilen birleşmelerde meydana gelen karışımlar, difüzyonsuz olup, mekanik şekilde meydana gelir.

13. Uygulanan söz konusu yöntem, kaynak dikişinin karışma ve termomekanik etkilenme bölgelerinde tane yapısının yeniden kristalleşmesine ve aşırı incelmesine neden olup bu bölgede mukavemet ve tokluk değerini artırır.

5. ÖNERİLER

SKK yönteminin alüminyum ve alaşımlarının birleştirilmelerinde alınan olumlu sonuçlar göz önüne alındığında diğer mühendislik alaşımların da bu kaynak yöntemi ile birleştirilebilirlikleri üzerine yapılacak çalışmalara ağırlık verilmelidir. Ayrıca yapılan çalışmada kaynak bölgesinin hem mukavemet değerlerinin, hem de süneklilik değerlerinin beraber iyileşerek arttığı belirlenmiştir. Bu durum göz önüne alındığında SKK yönteminin sadece birleştirme amacı ile değil, malzemenin yüzeyine de uygulanarak bu alaşımların yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi konulu çalışmalar gerçekleştirilebilir. Böylece farklı uygulamalarda yüzey özelliklerinin geliştirilmesi istenilen durumlarda bu işlem uygulanabilir. Diğer taraftan, sürtünme karıştırma kaynağı esnasında harcanan enerji ve yöntemin uygulanabilirliği dikkate alınıp toplam kaynak maliyeti, diğer kaynak yöntemleri ile karşılaştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

1. am G., Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulamalarındaki Son Gelişmeler, Kaynak Teknolojisi 6. Ulusal Kongre ve Sergisi, Kasım 2007, Ankara Bildiriler Kitabı 449: 35-36.
2. Thomas W.M., vd., G.B. Patent Application , Aralık 1991.
3. Dawes C. and Thomas W., TWI Bulletin, (1995) 124.
4. Lomolino S., vd., On the fatigue behaviour of the microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6005 aluminium alloy, International Journal Fatigue (2005) 305-316.
5. <http://www.frictionstirlink.com>. 9 Mayıs 2011
6. London B., vd., Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, (2001).
7. Rhodes C.G., vd., Scripta Mater., (1997) 355.
8. Benavides S., vd., Scripta Mater. 4,1 (1999) 809.
9. Külekçi M.K. ve Őık A., Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Alüminyum Alaşımı Levhaların Birleştirilmesi ve Elde Edilen Kaynaklı Bağlantıların Mekanik zellikleri, 2003 Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi: 70-75.
10. Thomas W.N. and Nicholas E.D., Friction Stir Welding for the Transportation Industries, Materials and Design, (1997) 269-273.
11. Kaluç E. ve Taban E., Sürtünen Eleman ile Kaynak (FSW) Yöntemi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası MMO, (2007) 14.
12. Mishra R.S. and Ma Z.Y., Friction Stir Welding and Processing, Mater. Sci. And Eng. R50, (2005) 1-78.
13. Murr L.E., vd., Mater. Res. Innovat. 2, (1998) 150.
14. Li Y., Murr L.E., McClure J.C., Mater. Sci. Eng. A 271, (1999) 213.
15. <http://www.twi.co.uk>. 9 Mayıs 2011
16. Dawes C.J. and Thomas W.M., Weld. J. , (1996) 41.

17. Threadgill P. L., Terminology in Friction Stir Welding, Sci. and Tec. of Weld. and Joining 12,4 (2007).
18. Nicholas E. D. and Kallee S. W., Friction Stir Welding-A Decade on, II World Asian Pasific Int. Congress., (2000) 45-50.
19. Thomas W.M., vd., Proceedings of the TMS 2001 Aluminium Automotive and Joining Sessions, (2001) 213.
20. Cabibbo, M., vd., TEM Analysis of A Friction Stir-Welded Butt Joint of Al-Si-Mg Alloys, Mater Chem. Phys., 41 8, (2003) 809-815.
21. <http://www.aykimaluminium.com>. 09 Mayıs 2011.
22. <http://www.seykoc.com.tr>. 09 Mayıs 2011.
23. Tülbentçi K., Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynağı, Bhler Yayınları, (1990) İst.
24. Gürleyik Y., Alüminyum ve Alaşımları-I, TMMOB Mühendis ve Makine Dergisi (1993) 401: 27-34.
25. Zeytin H. K., Alüminyum Alaşımları Otomotiv Endüstrisinde Uygulamaları ve Geleceği, Tübitak Marmara Araştırma Merkezi, (2000) 91.
26. Öksüz C., Yüksek Mukavemetli (2024, 6061, 7075) Alüminyum Alaşımlarının Jominy Yöntemi ile Su Verme Duyarlılığı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İst. (1996).
27. Binal A., AA2024-T3 Alüminyum Alaşımının Sürtünme Karıştırma Kaynağında İşlem Parametrelerinin Mikroyapı ve Mekanik zelliklerine Etkileri, Yük. Lisans Tezi, Osmangazi Üniv. Fen Bil. Ens. (2006)
28. Oysu M., 7075 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan MIG Kaynağının Mekanik zelliklere Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.. Fen Bilimleri Enstitüsü (1996).
29. zarpa C., Al 2024 ve Al 5754-H22 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı, Doktora Tezi, Sakarya Üniv. Fen Bilimleri Ens. (2005).
30. Anderson T., The Advancement of Al within the Welding Fabrication Industry and Product Design Applications, Svetsaren 3 (2000) 3-5.
31. Topbaş M.A., Endüstri Malzemeleri- Cilt1, (1993).
32. am G., Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlardaki Gelişmeler, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi (2003) Kocaeli: 47-62.

33. Boz M. and Kurt A., The Influence of Stirrer Geometry on Bonding and Mechanical Properties in Friction Stir Welding Process, Materials and Design 25 (2004) 343-347.
34. Kolligan K., Material Flow Behavior During Friction Stir Welding of Aluminium, Weld Res. Supply (1999) 229-237.
35. Çam G., Al-alaşımları için Geliştirilen Yeni Kaynak Yöntemleri, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi III. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı 3 (2001) 13.
36. Eren T., AA6063-T6 Borularının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi, Y. Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bil. Ens. (2005).
37. Karlsson v.d., Trends in Welding Research, Proc. Of the 1. Int. Conf., 14 6 1999: 574-579, Ca., USA.
38. Hashimoto T. vd., Proc. of the 1. Int. Symp. On Friction Stir Welding, 14-16 6 1999 Ca., USA.
39. Reynolds A.P. vd., Proc. of the 1. Int. Symp. On Friction Stir Welding, 14-16 6 1999 Ca., USA.
40. Von Strombeck A. v.d. Proc. of the 1. Int. Symp. On Friction Stir Welding, 14-16 6 1999 Ca., USA.
41. Biallas G. v.d., Proc. of the 1. Int. Symp. On Friction Stir Welding, 14-16 6 1999 Ca., USA.
42. Ataoğlu H., Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Alüminyum Alaşımların İç Yapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, M.K.Ü. Fen Bil. Ens. (2002).
43. Basset J.C. and Birley S.S., Proceedings of the Second Symp. on FSW, Haziran 2000, Gothenburg İsveç.
44. Colligan K.J. v.d., Adv. Mater. Process, (2002) 160: 39.
45. Cederqvist L. and Reynolds A.P., Factors Affecting the Properties of Friction Stir Welded Aluminium Lap Joints, Journal of Materials Processing Technology, (2000).
46. Chao Y.J. v.d, Effect of Friction Stir Welding on Dynamic Properties of AA2024-T3 and AA7075-T351, Welding Research Supplement (2001): 196-200.
47. Barcellona A. vd., On Microstructural Phenomena Occuring in Friction Stir Welding of Al. Al-Alloys, Journal of Materials Processing Tech., 144 (2006): 340-343.
48. Khodir S.A. and Shibayanagi T., Friction Stir Welding of Dissimilar AA2024 and AA7075 Al- Alloys, Materials Sci. And Eng. (2008) B148: 82-87.

49. Dickerson T. vd., Heat Flow into Friction Stir Welding Tools. 4. Int. Symp. on FSW, 14-16 5 (2003): 1-11 Utah, USA.
50. Cavaliere P. vd, Mechanical and Microstructural Behaviour of 2024-7075 Al-alloy Sheets Joined by FSW, Int. Journal of Machine Tools (2006) 46: 588-594.
51. Cavaliere P. and Panella P., Effect of Tool Position on the Fatigue Properties of Dissimilar 2024-7075 Sheets Joined by FSW, Journal of Materials Processing Tech. (2007).
52. Chen Y.C. and Nakata K., Friction Stir Lap Joining Al and Mg Alloys, Scripta Materialia (2008) 58: 433-436.
53. Srinivasan B. P. vd., Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Friction Stir Welded AA7075-AA6056 Dissimilar Joint, Materials Sci. And Eng. (2005) 392: 292-300.
54. Shigematsu I. vd, Joining of 5083 and 6061 Al-alloys by FSW, Journal of Mater. Sci. Letters (2003): 353-356.
55. Khaled T, An Outsider Looks at Friction Stir Welding, 6 (2005).
56. Kurtuluş M., Roket/Füze Uygulamalarında Alüminyumun Kullanımı ve Türkiye Altyapısından Beklentiler, II. Alüminyum Sempozyumu ve Sergisi 22-24 5 (2003), Seydişehir.
57. <http://www.ozct.com.tr>. 9 Mayıs 2011
58. Kaptan K., Sürtünme Karıştırma Kaynağı Birleştirmelerinde Farklı Karıştırıcı Uç Formlarının Birleştirme Kalitesine Etkilerinin İncelemesi, Yük. Lis. Tezi, Gazi Üniv. Fen Bil. Ens., (2008)

ÖZGEÇMİŞ

Hasan YILMAZ, 1980 yılı Giresun doğumludur. Orta ve lise öğrenimini Giresun Hamdi Bozbağ Anadolu Lisesinde tamamladı. 2005 yılı başında KTÜ Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Yaklaşık bir sene İstanbul'da doğalgaz sektöründe çalıştıktan sonra 2006 yılında Marmaris Aksaz Deniz Üs Komutanlığı'nda kısa dönem olarak askerliğini tamamladı. Askerlik görevinin ardından takım tezgâhlarına yan sanayi makineleri üretimi yapan bir firmada yaklaşık olarak bir sene çalıştı. Ardından 2007 yılında Giresun Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığında kontrol mühendisi olarak göreve başladı. 2008 yılında KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Giresun Üniversitesindeki görevine devam eden Hasan YILMAZ, Almanca ve iyi derecede İngilizce bilmektedir.