

**EGE ÜNİVERSİTESİ – FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
(DOKTORA TEZİ)**

**AA 6063 (AlMgSi0.5) TİPİ ALÜMİNYUM
MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
KAYNAĞINDA KAYNAK DEĞİŞKENLERİNİN,
BAĞLANTININ DAYANIMI VE MİKROYAPI
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Makina Yüksek Mühendisi Sami SAYER

Makina Mühendisliği Bölümü

Anabilim Dalı : Konstrüksiyon ve İmalat

Bilim Dalı Kodu : 625.01.00

Sunuş Tarihi : 29 Haziran 2007

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Vural CEYHUN

Bornova / İZMİR

ÖZET

AA 6063 (AlMgSi0.5) TİPİ ALÜMİNYUM MALZEMELERİN SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞINDA KAYNAK DEĞİŞKENLERİNİN, BAĞLANTININ DAYANIMI VE MİKROYAPI ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Makina Yüksek Mühendisi Sami SAYER

Doktora Tezi, Makina Mühendisliği Bölümü

Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Vural CEYHUN

29 Haziran 2007 - 132 Sayfa

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), kaynak konstrüksiyonu güç olan malzemelerin birleştirilmesinde tercih edilen ve son on yılda endüstriyel uygulama alanı bulan yeni bir katı hal birleştirme yöntemidir. Kaynaklı birleştirmede ilave tele, koruyucu gaz veya toza, gereksinim duyulmamaktadır. Proses sırasında duman ve ışın oluşmaması, enerji tüketiminin diğer kaynak yöntemlerine göre daha düşük olması, sürtünme karıştırma kaynağını konvansiyonel ergitme kaynağına göre avantajlı kılmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek korozyon direnci, soğuk şekillendirilebilme ve ısıtıl işlem yapılabilme özelliklerine sahip AA 6063 (AlMgSi0.5) alüminyum alaşımı SKK yöntemi ile birleştirilmiştir. Araştırmada farklı kaynak parametrelerinin bağlantının dayanımı ve kaynak bölgesindeki mikro yapı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Kaynak parametresi olarak karıştırıcı ucun yapısı, dönme ve ilerleme hızları proses değişkenleri olarak belirlenmiştir. İki aşamada gerçekleştirilen bu çalışmanın ilk aşamasında, farklı dönme ve ilerleme hızlarının kaynaklı

birleştirmeye olan etkisi incelenmiştir. İkinci aşamada ise optimize edilen kaynak hızları ile karıştırıcı ucun yapısının kaynaklı birleştirmeye etkisi incelenmiştir. Optimize edilmiş kaynak parametreleri ile birleştirilen numunelerde çözelti sertleşmesi ve yaşlandırma yapıldığında, karıştırıcı ucun yapısının kaynak bağlantı mukavemetinde oldukça etkili olduğu görülmüştür.

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen plakalarda kaynak sonrasında herhangi bir çarpılma veya deformasyon oluşmamıştır. Ancak kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynak bölgesinde hem gözenekli hem de gözeneksiz mikroyapı oluşmuştur. Bu araştırmada kullanılan 5mm kalınlığındaki AA 6063 tipi alüminyum alaşımı için, en uygun karıştırıcı aparat dönme hızı 1600 dev/dak olarak belirlenmiştir.

Mikroyapı incelemelerinde, kaynak bölgesinde yeniden kristalleşmeden dolayı homojen ve küçük taneli yapı oluştuğu görülmüştür. Kaynaklı numunelerin çekme mukavemetinin, ana malzemenin (AA 6063) çekme mukavemetine oranı %78 olmuş ve çekme testi sonrasında numunelerin %94'ü ITAB bölgesinden kopmuştur.

Karıştırıcı uç üzerinde bulunan pim helis açısı çökelti sertleşmesi ve yaşlandırma sonrasında etkili olmuştur. Kaynaklı numunelerin çekme mukavemet değerleri, aynı şartlarda yaşlandırılan ana malzemenin (AA 6063) çekme mukavemet değerlerinden %18 daha fazla olmuştur.

Kısa süreli yorulma testinde düşük dönme hızı ile birleştirilen numuneler, orta ve yüksek dönme hızı ile birleştirilen numunelerden daha erken kırılmıştır. Numunelerin kırılma yüzeyleri SEM' de incelendiğinde, kaynak kökündeki yetersiz birleşme ve kaynak yüzeyindeki kaynak ilerleme izleri çentik etkisi yaparak numunelerin daha kısa sürede kırılmasına neden olduğu görülmüştür.

Anahtar sözcükler: AA 6063 Al alaşımı, sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak parametreleri

ABSTRACT**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF WELD
PARAMETERS ON THE STRENGTH AND
MICROSTRUCTURAL PROPERTIES OF FRICTION STIR
WELDED AA6063 (AlMgSi0.5) ALUMINUM ALLOYS**

MSc Sami SAYER

PhD. Thesis in Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Vural CEYHUN

June 29th 2007 - 132 pages

Friction stir welding is a recently developed solid state joining method mostly preferred for difficult to weld joints, which has gained wide acceptance during the last decade. Friction stir welding eliminates the need for additional wire, protective gas or powder, which are used in conventional welding methods. Among the major advantages of FSW over other fusion welding methods include lack of vapour formation and low energy consumption during the welding process.

In this study, Aluminum alloy AA (AlMgSi0.5), with high corrosion resistance, cold workability and heat treatability characteristics, is joined by FSW. Research is focused on the effect of different weld parameters on the strength and microstructure of the welded joint.

Among the weld parameters, structure of the rotating tool, rotation and welding speeds were selected as process variants. In the first stage of the this two-stage research, the effect of different rotation and welding speeds on the weld joint has been studied. In the second stage, the influence of optimized welding speeds in the first stage, and the structure of the rotating

VIII

tool on the weld joint has been examined. Applying precipitation hardening and aging to joints welded by optimized welding parameters, have revealed a strong dependence of the joint strength to the rotating tool structure.

No deformation or distortion has been observed in the plates after the welding procedure. However, depending on the weld parameters, both nonporous and porous microstructures have been obtained in the weld region. For 5 mm thick AA 6063 type aluminum used in this study, the optimum tool rotation speed has been found to be 1600 rev/min.

Microstructural examinations have revealed a fine grained, homogeneous structure in the weld zone due to recrystallization. The ratio of the ultimate tensile strengths of the welded specimens to the base metal (AA 6063) was found to be 78% and it has been observed that after the tensile testing 94% of the specimens were broken within the heat affective zone (HAZ).

Pin helical angle on the rotating tool had a profound effect after precipitation hardening and aging processes. The ultimate tensile strength values of the welded specimens, compared to those of the base metal (AA 6063) aged in the same conditions were found to be 18% higher.

In low cycle fatigue tests, specimens joined with low rotation speeds were fractured earlier compared to specimens joined with medium and high rotation speeds. The SEM examinations of the fracture surfaces have revealed that, inadequate joining at the weld root and weld propagation marks at the surface acted as notches during fatigue tests.

Keywords : AA 6063 Aluminium Alloy, Friction Stir Welding, Welding Parameters

TEŞEKKÜR

Katkıları ve yönlendirmeleri ile çalışmalarımnda çok yararlandığım ve her zaman destek ve yardımlarını benden hiç esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Vural CEYHUN hocama göstermiş olduğu yakın ilgi ve destekleri için teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın her aşamasında engin bilgi ve deneyimleri ile beni yönlendirerek araştırmamıza önemli bilimsel katkılar yapan Prof. Dr. Süleyman KARADENİZ hocama ve Yrd. Doç Dr. İbrahim Etem SAKLAÇOĞLU'na teşekkür ederim.

SEM ve Mikroyapı incelemeleri sırasında teknik imkan ve bilgilerini benden esirgemeyen ve sabırla yardımcı olan Dokuz Eylül Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Bölümünden Araştırma Görevlisi Metalurji Yük. Müh. Murat KUŞOĞLU'na ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Makina Mühendisliği Bölümünden Araştırma Görevlisi Makina Yük Müh. Kaan TOKSOY'a teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	V
ABSTRACT	VII
TEŞEKKÜR	IX
İÇİNDEKİLER	X
ŞEKİL DİZİNİ	XIII
TABLO DİZİNİ	XVIII
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIX
1.GİRİŞ.....	1
2.SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI.....	3
2.1.SKK’ nın Avantajları Ve Kısıtları.....	4
2.2.SKK İle Farklı Kaynak Alternatiflerinin.....	
Karşılaştırılması.....	6
2.3. SKK’da Karıştırıcı Aparat Tasarımının Etkisi.....	11
2.4. SKK’da Proses Parametrelerinin Etkisi.....	15
2.5. SKK’da Dinamik Karıştırma Yöntemlerinin Etkisi.....	18
2.6. SKK’da Oluşan Kalıntı Gerilimleri Ve Etkileri.....	20
2.7.Alüminyum Alaşımları Dışındaki Malzemelerin Ve.....	
Farklı İki Malzemenin SKK ile Birleştirilmesi.....	22
2.7.1.Bakır alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi.....	22
2.7.2.Titanyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi.....	23
2.7.3.Çelik alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi.....	24
2.7.4.Magnezyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi.....	26
2.7.5.Farklı alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi.....	27
2.8.Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulamaları.....	29

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
2.9.SKK'da Modelleme Çalışmaları.....	30
2.10.Al ₂ O ₃ Ve Isıl İşlemin SKK'na Etkisi.....	34
2.11.SKK'daki Yenilikler Ve Gelişmeler	35
3. MATERYAL VE METOD.....	36
3.1.AA 6063 Alüminyum Alaşımının Özellikleri.....	36
3.2.Sürtünme Karıştırma Kaynak Uygulaması.....	36
3.2.1.Kaynak Parametresi : Değişken Dönme Ve.....	
İlerleme Hızları.....	37
3.2.2.Kaynak Parametresi: Sağ – Sol Vidalı Pimlerin Etkisi	38
3.3.Kaynaklı Birleştirmelerin Mekanik Testleri.....	39
3.3.1.Çekme Testi.....	39
3.3.2.Eğme Testi.....	40
3.4. Mikro Sertlik Testi.....	41
3.5.Yorulma Testi.....	43
3.6.Makro Ve Mikro Yapının İncelenmesi.....	45
3.7.Çözelti Sertleştirilmesi Ve Yaşlandırma Testi.....	47
3.8.Kırılma Yüzeylerinin SEM'de İncelenmesi.....	48
4.DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	49
4.1.Kaynaklı Birleştirmelerin Mekanik Testleri.....	49
4.1.1.Çekme Testi.....	50
4.1.2.Eğme Testi.....	52
4.1.3.Mikro Sertlik Ölçümleri.....	52
4.2.Yorulma Testi.....	57
4.3.Kaynaklı Birleştirmelerde Makro Ve Mikro Yapı.....	62

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.4. Çözelti Sertleştirilmesi Ve Yaşlandırma.....	65
5. SONUÇLAR VE İRDELEMELER	74
6. ÖNERİLER.....	80
7. EKLER.....	83
7.1.Ana Malzemenin Mukavemet Ve Birim Şekil.....	
Değiştirme Grafiği.....	83
7.2.Kaynaklı Numunelerin Mukavemet Ve Birim Şekil.....	
Değiştirme Grafiği.....	84
7.2.1.Birinci Denemesi Sonrasında Kaynaklı Numunelerin...	
Mukavemet Ve Birim Şekil Değiştirme Grafikleri.....	84
7.2.2.İkinci Denemesi Sonrasında Kaynaklı Numunelerin....	
Mukavemet Ve Birim Şekil Değiştirme Grafikleri.....	89
7.3.Çökelti Sertleşmesi Ve T6 Yaşlandırma Sonrasında.....	
Kaynaklı Numunelerin Mukavemet Ve Birim Şekil.....	
Değiştirme Grafikleri.....	95
7.4.Birinci Denemesi Sonrasında Kaynaklı Numunelerin.....	
Makro Yapısı.....	99
7.5.İkinci Denemesi Sonrasında Kaynaklı Numunelerin.....	
Makro Yapısı Testleri.....	102
7.6.Çökelti Sertleşmesi Ve T6 Yaşlandırma Sonrasında.....	
Kaynaklı Numunelerin Makro Yapısı.....	105
8. KAYNAKLAR	106
ÖZGEÇMİŞ.....	111

ŞEKİL DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 :Sürtünme karıştırma kaynağı.....	2
Şekil 2.1 :Sürtünme karıştırma kaynağı proses aşamaları.....	4
Şekil 2.2:SKK ve MIG kaynağında boyca deformasyon.....	7
Şekil 2.3. :TIG kaynağının makro yapısı.....	8
Şekil 2.4. :SKK kaynağının makro yapısı.....	9
Şekil 2.5. : SKK ve MIG kaynağı yorulma testi.....	9
Şekil 2.6. : SKK ve MIG kaynağı mikro sertlik testi.....	10
Şekil 2.7. : Sürtünme karıştırma aparatı.....	11
Şekil 2.8. : Farklı karıştırıcı uç tasarımları T_F , T_{FC} , T_{FS}	13
Şekil 2.9.: Farklı omuz yapılarının SKK yüzey kalitesine etkisi..	14
Şekil 2.10 : Farklı omuz yapılarının mekanik mukavemete etkisi	14
Şekil 2.11 : Farklı dönme hatvesinde SKK ile birleştirilen.....	
AA2017 alüminyum alaşımının makro yapısı.....	16
Şekil 2.12. : Dönme hatvesinin mekanik özelliklere etkisi.....	16
Şekil 2.13 : Kaynak merkezinin farklı dönme ve ilerleme.....	
hızlarındaki tane yapısı.....	17
Şekil 2.14. : AA 2095 alüminyum alaşımının farklı.....	
kaynak parametrelerindeki mekanik mukavemeti.....	18
Şekil2.15:Sürtünme Karıştırma Kaynağında (a)“Whorl”.....	
ve (b) “Triflute” tipi pim uygulaması.....	19
Şekil 2.16. : Kalıntı gerilimlerinin kaynak kesitindeki dağılımı...	21
Şekil 2.17. : SKK ile birleştirilen X5CrNi18-10 paslanmaz.....	
çelik ve Al 6013 alaşımının makro görüntüsü.....	28

ŞEKİL DİZİNİ (devam)

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.18. : Dinamik Kristalleşme Bölgesinde Al, Fe,.....	
Cr ve Ni konsantrasyonu.....	28
Şekil2.19.: SKK’ nın farklı birleştirme yöntemleri.....	29
Şekil 2.20. :“T” Bindirme kaynağı.....	30
Şekil 2.21.: Geometrik model ve sınır şartları.....	31
Şekil 2.22. : AS bölgesindeki malzeme hareketi	32
Şekil 2.23.: RS bölgesindeki malzeme hareketi	32
Şekil 2.24. : Isıl işlem sonrasında AA 2219 serisi Al.....	
alaşımında kırılma bölgesi.....	34
Şekil 2.25. : AA 2219 serisi Al alaşımının ve farklı.....	
şartlardaki kaynaklı numunelerin mekanik özellikleri.....	34
Şekil 2.26.:Farklı yönde dönen tandem karıştırıcı uç uygulaması	35
Şekil 3.1. : Sürtünme karıştırma aparatı.....	37
Şekil 3.2. : Sürtünme karıştırma kaynak uygulaması.....	38
Şekil 3.3. : Farklı vidalı pim ile gerçekleştirilen SKK.....	
uygulaması.....	39
Şekil 3.4. : Çekme numunesi geometrisi.....	40
Şekil 3.5. : Çekme numuneleri ve çekme testi.....	40
Şekil 3.6. : Eğme testi numuneleri ve uygulaması.....	41
Şekil 3.7 : Sertlik ölçüm numuneleri.....	42
Şekil 3.8. : Yorulma numunelerinin geometrisi.....	44
Şekil 3.9. : SKK’da kaynak kesitinin makro yapısı.....	46
Şekil 3.10. : Elektrolitik dağlama düzeneği.....	46
Şekil 4.1. : Eğme numuneleri.....	52

ŞEKİL DİZİNİ (devam)

Hızı

Sayfa

Şekil 4.2.: Sabit ilerleme hızında birleştirilen kaynaklı.....	
numuneler (ilerleme hızı=100 mm/dak).....	53
Şekil 4.3.: Sabit ilerleme hızında birleştirilen kaynaklı.....	
numuneler (ilerleme hızı=200 mm/dak).....	54
Şekil 4.4.: Sabit ilerleme hızında birleştirilen kaynaklı.....	
numuneler (ilerleme hızı=400 mm/dak).....	54
Şekil 4.5. : Sabit dönme hızında birleştirilen kaynaklı.....	
numuneler (dönme hızı=900dev/dak).....	55
Şekil 4.6. :Sabit dönme hızında birleştirilen kaynaklı.....	
numuneler (dönme hızı=1600dev/dak).....	55
Şekil 4.7. : Sabit dönme hızında birleştirilen kaynaklı.....	
numuneler (dönme hızı=2800dev/dak).....	56
Şekil 4.8. : Kaynak kalınlığındaki ve kaynak kesitindeki.....	
sertik değişimi.....	56
Şekil4.9. :SKK ile birleştirilen numunelerin sabit dönme.....	
hızındaki yorulma test sonuçları (dönme hızı : 900dev/dak).....	57
Şekil 4.10. : SKK ile birleştirilen numunelerin sabit dönme.....	
hızındaki yorulma test sonuçları (dönme hızı : 1600dev/dak).....	58
Şekil 4.11. : SKK ile birleştirilen numunelerin sabit dönme.....	
hızındaki yorulma test sonuçları (dönme hızı : 2800dev/dak).....	58
Şekil 4.12. : SKK ile birleştirilen numunelerin sabit ilerleme....	
hızındaki yorulma test sonuçları (ilerleme hızı : 100 mm/dak)...	59
Şekil 4.13. : SKK ile birleştirilen numunelerin sabit ilerleme.....	
hızındaki yorulma test sonuçları (ilerleme hızı : 200 mm/dak)...	59

ŞEKİL DİZİNİ (devam)

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.14. : SKK ile birleştirilen numunelerin sabit ilerleme....	
hızındaki yorulma test sonuçları (ilerleme hızı : 400 mm/dak)...	60
Şekil 4.15: Yorulma kırılması kaynak yüzeyinde oluşan.....	
baskı izinden başlamıştır.....	61
Şekil 4.16.: Yorulma kırılmasının düzenli ilerleyişi ve.....	
sünek kırılmaya geçiş.....	61
Şekil 4.17. : Kaynak yönünde oluşan gözenekli yapı.....	62
Şekil 4.18. : Kaynak kesitinde oluşan gözenekli yapı.....	63
Şekil 4.19. : Farklı kaynak parametrelerde oluşan soğans yapı..	64
Şekil 4.20. : Kaynak kökünde birleşme yetersiz.....	64
Şekil 4.21. : SKK’ da kaynak kesitinde tane yapısının değişimi..	65
Şekil 4.22. : Kaynak bölgesinde zigzag oluşumu.....	66
Şekil 4.23 : Çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlandırması.....	
sonrasında makro ve mikro yapı değişimi.....	68
Şekil 4.24. : Ana malzeme ve kaynaklı numunelerin T6.....	
yaşlanma öncesinde ve sonrasındaki mekanik özellikleri.....	70
Şekil 4.25.: Çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlanması yapılan.....	
numunenin kırılma yüzeyi (X10).....	70
Şekil 4.26.: Çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlanması yapılan.....	
numunenin kırılma yüzeyi (X50).....	71
Şekil 4.27.: Çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlanması yapılan.....	
numunenin kırılma yüzeyi (X500).....	71
Şekil 4.28.: Çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlanması yapılan.....	
numunenin kırılma yüzeyi (X10).....	72

ŞEKİL DİZİNİ (devam)

Sayfa

Şekil 4.29. : Çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlanması yapılan.....	
numunenin kırılma yüzeyi (X100).....	72
Şekil 5.1. : Kaynak parametrelerine bağlı sıcaklık değişimi.....	74
Şekil 5.2. : T6 yaşlanma öncesinde ve sonrasındaki çekme.....	75
Şekil 5.3. : Yaşlanma öncesindeki ve sonrasındaki mikro.....	
yapıdaki değişim.....	77

TABLO DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. :SKK ve MIG kaynaklarının mekanik mukavemeti...	8
Tablo 2.2. :SKK’ da pim profilinin kaynak mukavemetine etkisi	12
Tablo 2.3. : Ti 6Al 4V alaşımının SKK sonrasındaki mekanik... özellikleri.....	24
Tablo 2.4. : Çelik alaşımının SKK sonrasındaki mekanik..... özellikleri.....	26
Tablo 3.1. : AA 6063 malzeme bileşenleri.....	36
Tablo 3.2. : Alüminyum alaşımlarında çözme tavlı süresi.....	47
Tablo 4.1. : Farklı kaynak parametrelerde ölçülen sıcaklık..... değerleri.....	49
Tablo 4.2. : Birinci aşama çekme testi sonuçları.....	50
Tablo 4.3. : İkinci aşama çekme testi sonuçları.....	51

SİMGE VE KISALTMALAR

SKK	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
ITAB	Isı Tesiri Altındaki Bölge
DYKB	Dinamik Yeniden Kristalleşen Bölge
TMEB	Termo-Mekanik Etkilenen Bölge
AS	Karıştırıcı Ucun Dönme ve İlerleme Yönü Aynı (Advancing Side)
RS	Karıştırıcı Ucun Dönme ve İlerleme Yönü Zıt (Retreating Side)
TIG	Tungsten Asal Gaz Kaynağı (Tungsten Inert Gas)
MIG	Metal Asal Gaz Kaynağı (Metal Inert Gas)
MAG	Metal Aktif Gaz Kaynağı (Metal Aktive Gas)
BM	Ana Malzeme (Base Material)

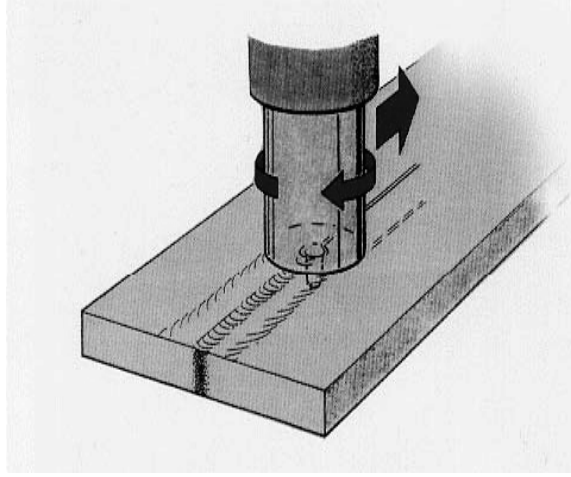
1. GİRİŞ

Bir katı hal birleştirme işlemi olan sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak konstrüksiyonu güç olan malzemelerin birleştirme işlemleri için kısa kaynak süresi, minimum yüzey hazırlama ve otomasyon kolaylığı gibi kendine özgü avantajlarından dolayı uygun bir kaynakla birleştirme yöntemidir. Yöntemin uygulanması sırasında duman ve ısı oluşmaması, koruyucu gaz, toz ve ilave tele gereksinim duyulmaması, birleştirilecek parçalarda kaynak ağzı hazırlığı gerekmemesi, tüm pozisyonlarda kaynak yapılabilmesi ve otomasyona yatkınlığı gibi özellikleri, sürtünme karıştırma kaynağını konvansiyonel ergitme kaynağına göre avantajlı kılmaktadır. Yöntem uçak, uzay, gemi, otomotiv sektöründe, gıda depolama elemanları ve radyoaktif atık madde taşıyıcılarının üretiminde kullanılan 2000, 5000, 6000, 7000 ve 8000 serisi Al-alışımlarının yanı sıra Cu-alışımlarının, Ti-alışımlarının ve bazı çelik alışımlarının birleştirilmesinde uygulama alanı bulmaktadır.

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), 1991 yılında İngiltere Kaynak Enstitüsü tarafından geliştirilmiş, geleneksel ergitmeli kaynak yöntemleri ile kaynağı güç olan özellikle yaşlanma sertleşmesine tabi tutulmuş alüminyum alışımlarının kaynağında başarı ile uygulanmıştır.

Sürtünme karıştırma kaynağı birleştirme prensibi oldukça basit olup, proses sırasında aşınmayan ve tükenmeyen bir karıştırıcı uç kullanılmaktadır. Karıştırıcı uç pim ve omuz olarak tanımlanan iki kısımdan oluşmaktadır. Yapılacak kaynak tipine göre pim özel olarak tasarlanmalıdır. Omuz ise pime göre çapca daha büyük ve

sürtünme karıştırma kaynağı için gerekli ısı girdisini proses sırasında sağlamaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı şematik olarak şekil 1.1.'de gösterilmiştir.



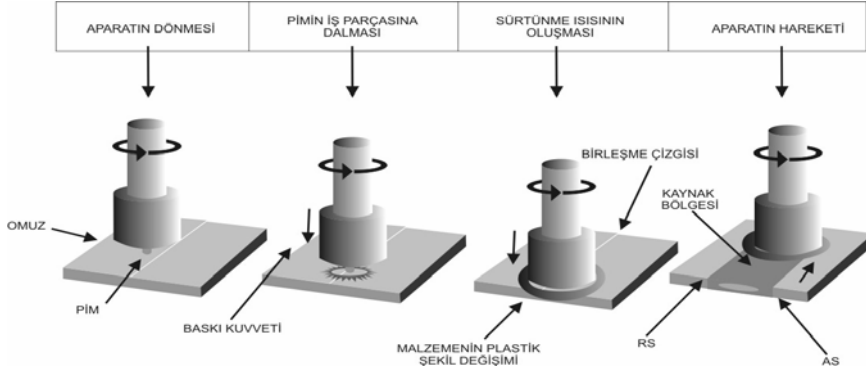
Şekil 1.1 : Sürtünme karıştırma kaynağı

Bu alanda 1991 yılından günümüze kadar farklı Al alaşımları üzerinde sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili araştırmalar yapılmıştır. Ancak AA 6063 tipi alüminyum alaşımında bu konuda bir araştırmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada AA 6063 tipi alüminyum alaşımı farklı kaynak parametreleri ve uçlarla birleştirilerek, bağlantının dayanımı ve mikro yapısı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2. SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

Sürtünme karıştırma kaynağında, karıştırıcı aparatın iş parçasına dalması ve sürtünmesi sonucunda bölgesel olarak ısı girdisi oluşmaktadır. Sürtünme karıştırma aparatı ile iş parçası arasında oluşan sürtünmeden dolayı kaynak bölgesindeki malzeme yumuşamakta ve plastik şekil değişimi gerçekleşmektedir. Karıştırıcı aparatın iki temel fonksiyonu vardır, birincisi karıştırıcı ucun iş parçasına sürtünmesi ile birleşme için gerekli ısı girdisinin sağlanması, ikincisi ise yumuşayan malzemenin birleştirme bölgesinde karıştırılarak plastik deformasyonunun sağlanmasıdır.

Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı iki farklı şekilde olabilir. Kaynakla birleştirilecek olan parçaların hareketi söz konusu olabileceği gibi, takımın dönme ve ilerleme hareketi de mümkün olabilir. Karıştırıcı uç kaynak yapılacak iş parçasına daldırılarak kaynak yapılacak uzunluk boyunca ilerletilir. Pim malzemeye temas ettiğinde sürtünme kaynağındaki duruma benzer durum oluşarak temas noktasında ısı, sürtünmenin etkisi ile hızla artar ve malzemenin plastik şekil değişimine neden olur. Karıştırılan malzeme, hidrostatik basınç altında soğuyarak katılaşıp ve birleşme olayı gerçekleşir. Sürtünme karıştırma proses aşamaları şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Sürtünme karıştırma kaynağı proses aşamaları

Sürtünme karıştırma kaynağında, kaynak kesiti farklı mikroyapıların oluşturduğu üç bölgeden oluşmaktadır. Bu bölgeler dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DYKB), termo-mekanik olarak etkilenen bölge (TMEB) ve sıvı hal kaynak yönteminde olduğu gibi ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) olarak adlandırılmaktadır.

2.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Avantajları Ve Kısıtları

Sürtünme karıştırma kaynağında ısı girdisinin düşük olması temel avantajlarından biridir. Yapılan araştırmalarda sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen malzemelerde, kaynak bölgesindeki maksimum sıcaklığın malzemenin erime sıcaklığının %20 altında olduğu görülmüştür (Benavides et. al,1999). İdeal kaynak için, karıştırıcı uç etrafında malzemenin plastik şekil değişimini ve akışını sağlayacak yeterli sıcaklığın oluşması gerekmektedir.

Malzemeden bağımsız olarak, sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan birleştirmelerde, konvansiyonel ve alternatif kaynaklı birleştirmelere göre birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağının avantajları, proses, enerji tüketimi, metalurjik ve çevresel etki olmak üzere dört ana grupta toplanmıştır.

Proses ;

- Kaynak bölgesinde yüzey temizliğine ve kaynak ağzı açılmasına gereksinim duyulmaması,
- İş parçasında deformasyon kaynaklı çarpılmaların ergitme kaynağına göre daha az olması,
- Boyutsal kararlılık ve tekrar edilebilme özelliği.

Enerji tüketimi ;

- Kaynak sırasında harcanan enerji girdisinin konvansiyonel kaynak yöntemlerine göre daha düşük olması,
- Tren, uçak, uzay aracı, otomotiv ve gemi inşaatında alüminyum gibi hafif metallerin SKK ile birleştirilmesiyle yakıt tüketiminin azalması.

Metalurjik ;

- Bir katı faz prosesi olması,
- Kaynak sonrasında alaşım elementlerinin korunması,
- Birleştirme bölgesinde yeniden kristalleşmeden dolayı ince taneli yapının oluşması,
- Metalurjik özelliklerin birleştirme bölgesinde çok iyi olması,

Çevresel etki ;

- Koruyucu gaz ve ilave kaynak meteline gereksinim duyulmaması,
- Kaynak öncesinde yağ çözücü solventlere gereksinim duyulmaması,
- Proses sırasında sağlığa zararlı gazların ortaya çıkmaması.

Sürtünme karıştırma kaynağının endüstriyel olarak farklı sektörlerde kullanım alanı bulmasına rağmen bazı sınırlamaları mevcuttur. Sürtünme karıştırma kaynağının dezavantajları şu şekilde özetlenebilir.

- Her kaynaklı birleştirme sonrasında pimin çıktığı delik kapatılmalıdır,
- İş parçasının ileri geri hareketini sağlayacak ekipmanlara gereksinim duyulmaktadır,
- Birleştirme bölgesinde %100 nufuziyet isteniyor ise, parçalar ters çevrilip arka taraftanda kaynatılmalıdır,
- İnce parçaların (<1,25mm) sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi etkili değildir.

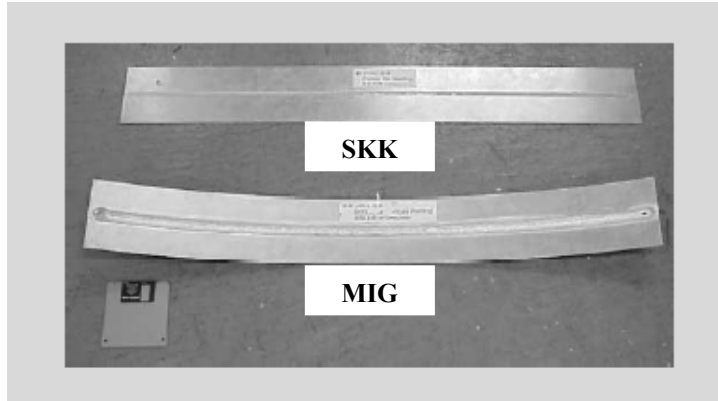
2.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Farklı Kaynak**Alternatiflerinin Karşılaştırılması**

Sürtünme karıştırma kaynağında ısı girdisinin konvansiyonel ergitme kaynağına göre daha düşük olması, kaynak bölgesindeki iç gerilimlerin düşük olmasına ve sonuç olarak birleştirilen parçaların daha az çarpılmasına ve deforme olmasına sebep olmaktadır.

SKK ile alüminyum alaşımlarında yaygın olarak kullanılan TIG, MAG ve MIG kaynakları bir çok araştırmacı tarafından hem proses hem de kaynak bölgesinin mikro yapısı ve mukavemeti açısından incelenmiştir.

AA 5058 ve AA 5059 (Alustar) alüminyum alaşımları SKK ve MIG kaynağı ile birleştirildikten sonra kaynak bölgesinin mekanik mukavemeti ve kaynak sonrasında oluşan deformasyon incelendiğinde aşağıda belirtilen bulgular elde edilmiştir.

Uzunluğu 1000 mm ve genişliği 100 mm olan AA 5058 alaşımı MIG ve SKK ile birleştirilmiştir. Kaynak sonrasında MIG ile birleştirilen parçalarda boyca 18.3 mm deformasyon oluşurken, SKK ile birleştirilen parçalardaki deformasyon sadece 0.7 mm olmuştur (şekil 2.2). Aynı çalışmada MIG kaynağında %73.9 kaynak verimine ulaşılırken, SKK kaynak verimi %91.5 olmuştur (Czechowski, 2005). 5083 ve 5089 Al alaşımlarının farklı kaynaklı birleştirmelerdeki mekanik özellikleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

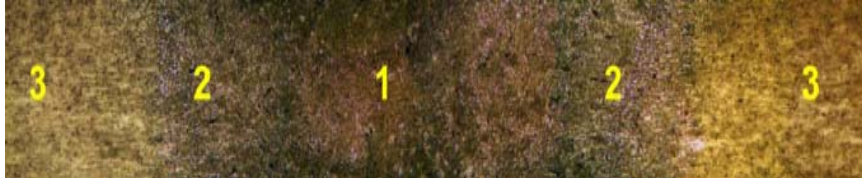


Şekil 2.2: SKK ve MIG kaynağında boyca deformasyon (Czechowski'den, 2005)

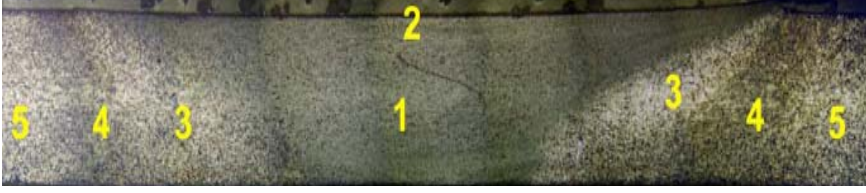
Malzeme / Kaynak Türü	Akma Mukavemeti (MPa)	Kopma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
AA 5083	270	346	19.7
AA 5083 / FSW	238.3	322.2	10.4
AA 5059	280	401	16.2
AA 5059 / FSW	278.4	367.3	12.7
AA 5059 / MIG	192.7	296.6	7.6

Tablo 2.1. : SKK ve MIG kaynaklarının mekanik mukavemeti
(Czechowski'den, 2005)

AA 2024-T3 Tipi alüminyum alaşımı konvansiyonel TIG kaynağı ve SKK ile birleştirilerek, kaynak bölgelerinin mikro yapıları araştırılmıştır. Yapılan incelemede, TIG ergitme kaynağında kaynak sırasındaki ısı girdisi SKK'na göre daha fazladır. Bundan dolayı TIG kaynağında ITAB bölgesinin SKK'na göre daha geniş ve kaynak kesitindeki tane yapısının daha iri olduğu gözlenmiştir (Squillace et al, 2004). TIG ve SKK' da oluşan kaynak bölgeleri şekil 2.3 ve 2.4'de gösterilmiştir.

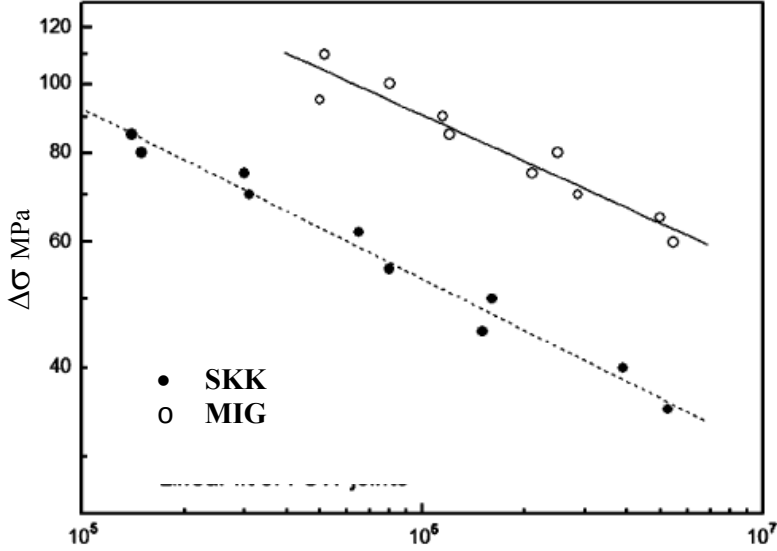


Şekil 2.3. : TIG kaynağının makro yapısı; (1) Kaynak Bölgesi, (2) ITAB,
(3) Ana Malzeme (Squillace'den, 2004)



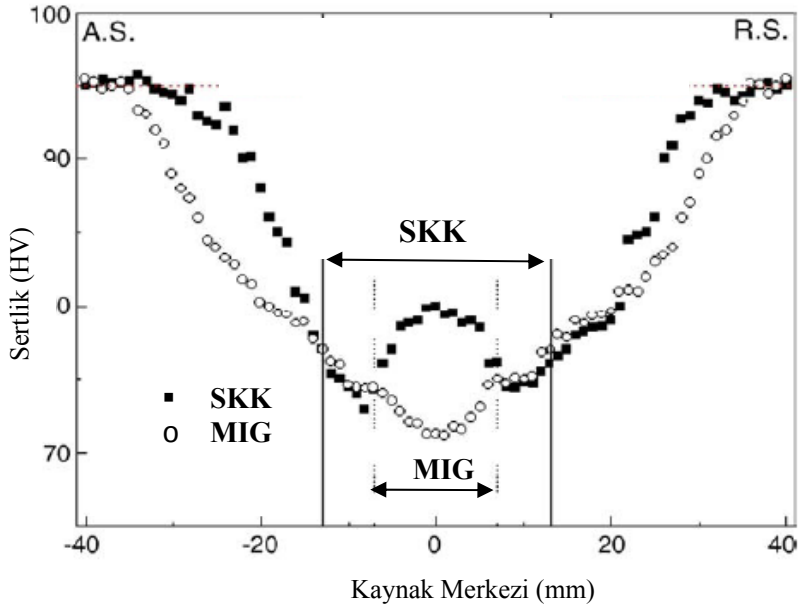
Şekil 2.4. : SKK kaynağının makro yapısı; (1) DYKB, (2) Malzeme akma sınırı, (3) TMEB, (4) ITAB, (5) Ana Malzeme (Squillace'den, 2004)

AA 5083 Alüminyum alaşımı SKK ve MIG kaynağı ile birleştirildikten sonra yorulma testine alınmıştır. Test sonrasındaki kırılmaların her iki kaynaklı birleştirmede kaynak merkezinde olduğu ve SKK ile birleştirilen numunelerin kaynak ömürlerinin MIG kaynağına göre 9-12 kat daha fazla olduğu görülmüştür (Zhao et al, 2005, 2006). Şekil 2.5.'de MIG ve SKK'nın yorulma test sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.5. : SKK ve MIG kaynağı yorulma testi (Zhao'dan, 2005, 2006).

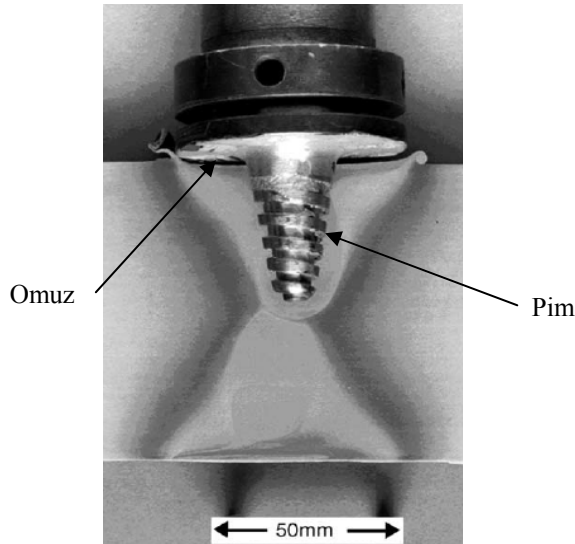
AA 5056 Alüminyum alaşımı SKK ve MIG kaynağı ile birleştirildikten sonra kaynak bölgesinin mikro sertliği incelenmiştir. Her iki kaynaklı numunede kaynak bölgesinin mikro sertliğinin ana malzemeye göre daha düşük olduğu görülmüştür (şekil 2.6). Ancak SKK'nın birleşme bölgesinde, plastik şekil değişiminden dolayı bölgesel olarak tane yapılarında yenide kırıstalleşme oluştuğundan dolayı SKK'da kaynak merkezinin mikro sertliği MIG kaynak merkezine göre daha fazladır (Zhao et al, 2005).



Şekil 2.6. : SKK ve MIG kaynağı mikro sertlik testi (Zhao'den, 2005)

2.3. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Karıştırıcı Aparat Tasarımının Etkisi

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak bölgesinin micro yapısına ve mekanik mukavemetine etki eden en önemli parametrelerden biri, karıştırıcı ucun yapısı ve tasarımıdır. Karıştırıcı uç omuz ve pim olarak adlandırılan iki kısımdan oluşmaktadır. Karıştırıcı aparatında omuz, SKK için gerekli olan ısı girdisinin bölgesel olarak oluşmasını sağlamaktadır. Karıştırıcı aparat pimi ise, ısı etkisi ile plastikleşen malzemenin kaynak bölgesinde karıştırılmasını ve birleştirilmesini sağlamaktadır. Kaynak tipine ve birleştirilecek olan malzemeye bağlı olarak bir çok karıştırıcı aparat geliştirilmiştir. Şekil 2.7’de İngiltere Kaynak Enstitüsü tarafından geliştirilen sürtünme karıştırma aparatı, 75mm kalınlığındaki AA 6082 alüminyum alaşımının SKK ile birleştirilmesinde kullanılmıştır. (Thomas et al,2001).



Şekil 2.7. : Sürtünme karıştırma aparatı (Thomas’dan, 2001)

Karıştırıcı uç pimi üzerindeki vida yapısının, SKK olan etkisi Peel ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada malzeme olarak 3mm alınlığındaki AA 5083 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Karıştırıcı uç omuz yapısı sabit tutularak, ince (M5x0.8) ve kaba (M6x1) dişli pimin kaynak mukavemetine etkisi incelenmiştir. Araştırma sonuçları; Düşük kaynak hızlarında ince dişli pim profilinin, yüksek kaynak hızlarında ise kaba dişli pim profilinin kaynaklı bölgenin mukavemetni artırdığı görülmüştür. Peel ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma tablo 2.2.'de gösterilmiştir. (Peel et al, 2003).

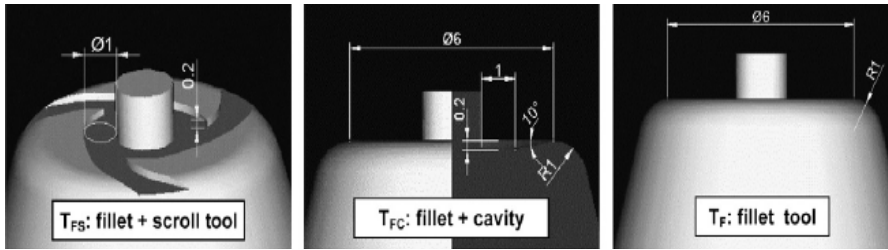
Omuz Çapı (mm)	Pim Profili	Kaynak Hızı (mm/dak)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kaynak Mukavemeti ¹ (%)
18	M5x0.8	100	304	67
18	M5x0.8	150	216	47
18	M5x0.8	200	186	41
18	M6x1.0	200	259	57

Tablo 2.2. : SKK'da pim profilinin kaynak mukavemetine etkisi (Peel'den, 2003)

Karıştırıcı ucu omuz ve pimi arasındaki oransal ilişki Deqing ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada 12 farklı pim ve omuz çapının sürtünme karıştırma kaynağına etkisi incelendiğinde, kaynak kalitesi açısından en iyi sonucun omuz çapı pim çapının üç katı olan kaynak değişkeninde elde edilmiştir (Deqing et al, 2004).

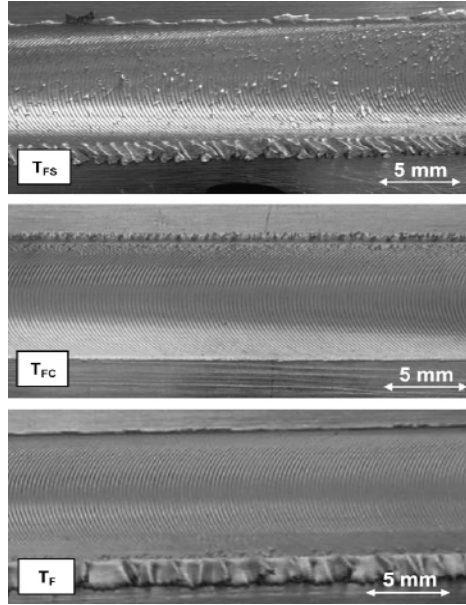
1) Kaynak Mukavemeti = SKK Çekme Mukavemeti / Ana Malzeme Çekme Mukavemeti

Scialpi ve arkadaşları ise, pim yapısını sabit tutarak üç farklı omuz tasarımının SKK' na olan etkisini araştırmıştır. Bu çalışmada pim yüzeyine herhangi bir vida profili açılmamış karıştırıcı aparatları kullanılarak, 1.5 mm kalınlığındaki AA 6082 tipi alüminyum alaşımı SKK ile birleştirilmiştir. Farklı omuz tasarımlarının kullanıldığı karıştırıcı uç yapıları Şekil 2.8.'de gösterilmiştir.

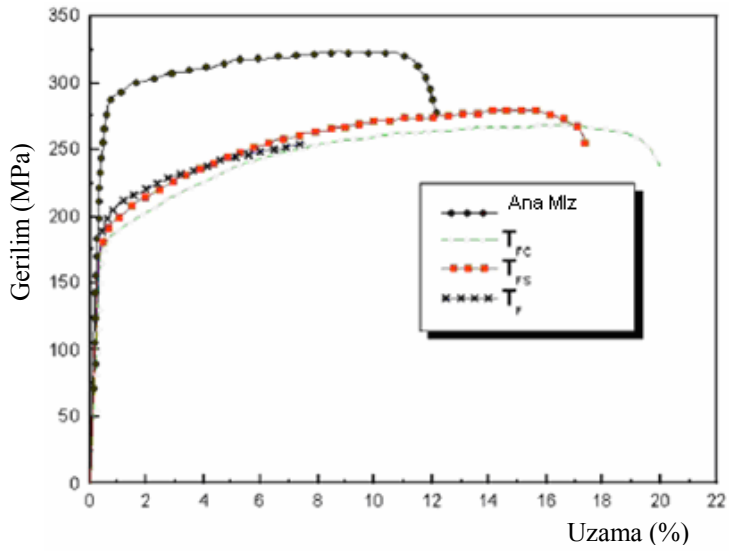


Şekil 2.8. : Farklı karıştırıcı uç tasarımları T_F , T_{FC} , T_{FS} (Scialpi'den, 2007)

Bu araştırmada kullanılan omuz yapılarının, farklı kaynak yüzey kalitelerinin oluşmasına neden olduğu görülmüştür. En iyi kaynak yüzeyi T_{FC} tipi karıştırıcı uçta elde edilmiştir (şekil 2.9). Maksimum çekme mukavemeti ise T_{FS} tipi karıştırıcı ile elde edilmiştir. T_{FS} tipi karıştırıcı kullanılarak 1810 dev/dak dönme hızında ve 460mm/dak ilerleme hızında gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmede %86.6 kaynak mukavemetine ulaşılmıştır (Scialpi et al, 2007). Şekil 2.10'da farklı omuz yapılarının mekanik mukavemete etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.9. : Farklı omuz yapılarının SKK yüzey kalitesine olan etkisi (Scialpi'den, 2007)



Şekil 2.10 : Farklı omuz yapılarının mekanik mukavemete etki (Scialpi'den, 2007)

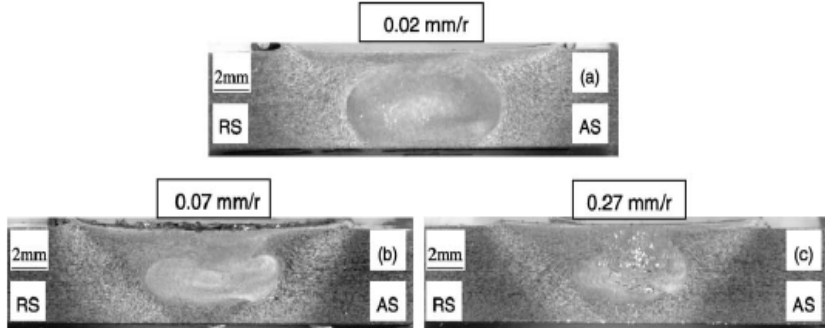
2.4. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Proses

Parametrelerinin Etkisi

Sürtünme karıştırma kaynağında, karıştırıcı uçun dönme ve ilerleme hızı kaynak bölgesindeki mikro yapının oluşumunda oldukça etkilidir. Karıştırıcı uçun dönme hızı artıkça sürtünme hızı artacağından kaynak bölgesindeki ısı girdisi de artacaktır. Aşırı ısı girdisi, birleştirme bölgesinde tane yapısının büyümesine ve kaynak mukavemetini olumsuz olarak etkilemektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilecek olan her malzemede maksimum kaynak mukavemeti ve proses verimini sağlamak için proses parametrelerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Kaynak parametrelerinin kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerine etkisi birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır.

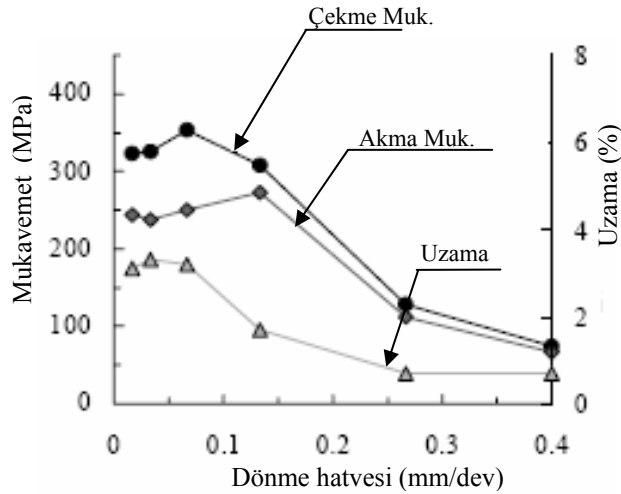
Kaynak parametrelerinin çekme mukavemetine ve kırılma bölgesine etkisi AA 2017 tipi alüminyum alaşımında araştırılmıştır. Bu çalışmada karıştırıcı uçun ilerleme hızının dönme hızına oranı, dönme hatvesi (mm/dev) olarak tanımlanmıştır.

Kaynaklı birleştirmelerin mikro yapı ve mekanik özellikleri dönme hatvesi baz alınarak değerlendirilmiştir. İnceleme sonucunda AA 2017 tipi alüminyum alaşımı için sağlam ve gözeneksiz bir SKK'nın, dönme hatvesinin 0.13mm/dak dan küçük kaynak parametrelerinde elde edildiği belirtilmiştir. Bu konudaki makro yapı incelemeleri şekil 2.11.'de gösterilmiştir (Liu et al,2003).



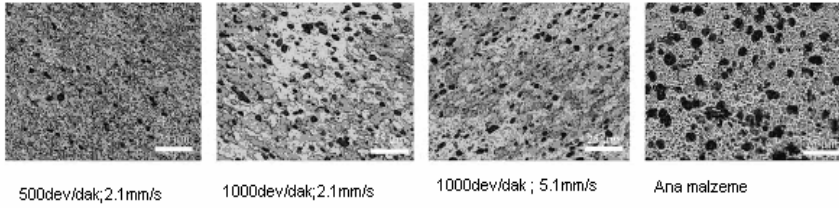
Şekil 2.11 : Farklı dönme hatvesinde SKK ile birleştirilen AA 2017 alüminyum alaşımının makro yapısı (Liu'den,2003).

Dönme hatvesi 0.02mm/dev dan küçük kaynaklı birleştirmelerde kopma ITAB bölgesinde oluşurken, dönme hatvesi arttıkça kopma bölgesinin kaynak merkezine yaklaştığı ve çekme mukavemetinin azaldığı görülmüştür. En yüksek kaynak mukavemeti %82 ile dönme hatvesi 0.07mm/dev de elde edilmiştir(Liu et al,2003). Dönme hatvesinin kaynağın mekanik özelliklerine etkisi şekil 2.12'de gösterilmiştir.



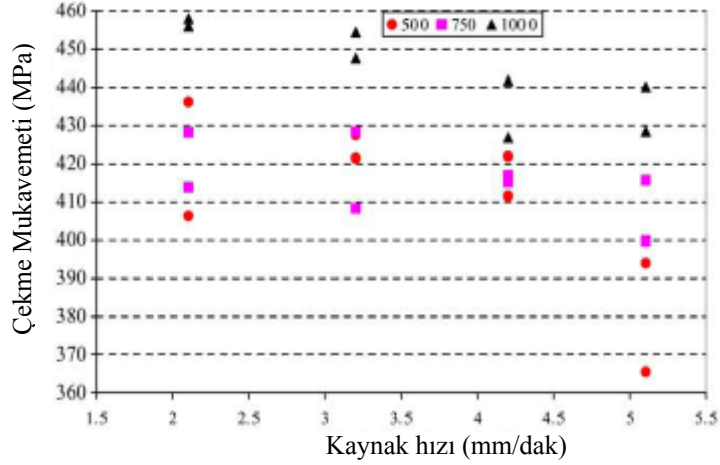
Şekil 2.12. : SKK ile birleştirilen AA 2017 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri (Liu'den,2003).

Kaynak parametrelerinin kaynak bölgesinin tane yapısına olan etkisi, karıştırıcı uçun farklı dönme ve ilerleme hızlarında AA 2095 Alüminyum alaşımı SKK ile birleştirilerek incelenmiştir. Yapılan araştırmada sabit ilerleme hızında dönme devri arttıkça tane yapısının irileştiği görülmüştür. Kaynak merkezinin farklı dönme ve ilerleme hızlarındaki tane yapısı ile ana malzemenin tane yapısı şekil 2.13’de gösterilmiştir (Moataz et al,2005).



Şekil 2.13 : Kaynak merkezinin farklı dönme ve ilerleme hızlarındaki tane yapısı (Moataz’dan,2005).

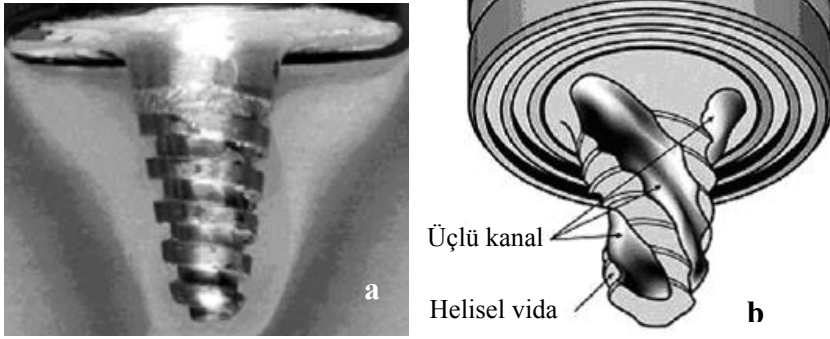
Aynı araştırmada 500, 750 ve 1000 dev/dak dönme hızlarında, kaynak ilerleme hızı arttıkça kaynaklı birleştirmenin mekanik mukavemetinin azaldığı görülmüştür. Farklı kaynak parametrelerinde birleştirilen AA 2095 alüminyum alaşımının çekme mukavemeti şekil 2.14’de gösterilmiştir (Moataz et al,2005).



Şekil 2.14. : AA 2095 alüminyum alaşımının farklı kaynak parametrelerindeki çekme mukavemeti (Moataz'den,2005).

2.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Dinamik Karıştırma Yöntemlerinin Etkisi

SKK ile yapılan birleştirmelerde kaynak bölgesindeki malzemenin karıştırılması ve yer değiştirmesi karıştırıcı aparat ucundaki pim ile sağlanmaktadır. Thomas et. al. tarafından “Whorl” ve “Triflute” olarak adlandırılan iki farklı pim ucu geliştirilmiştir. Pim uçlarında yapılan bu yenilik ile aynı kök çapındaki silindirik pime göre pim ucu ile malzeme arasındaki hacimsel yer değişimi “Whorl” tipi pimde %60 oranında artarken “Triflute” tipi pimde bu oran %70’e kadar çıkmıştır. Şekil 2.15’de (a)“Whorl” ve (b)“Triflute” tipi pim tasarımı gösterilmiştir (Mishra et al, 2005).



Şekil2.15:Sürtünme Karıştırma Kaynağında (a)“Whorl” ve(b) “Triflute” tipi pim uygulaması (Mishra’dan, 2005)

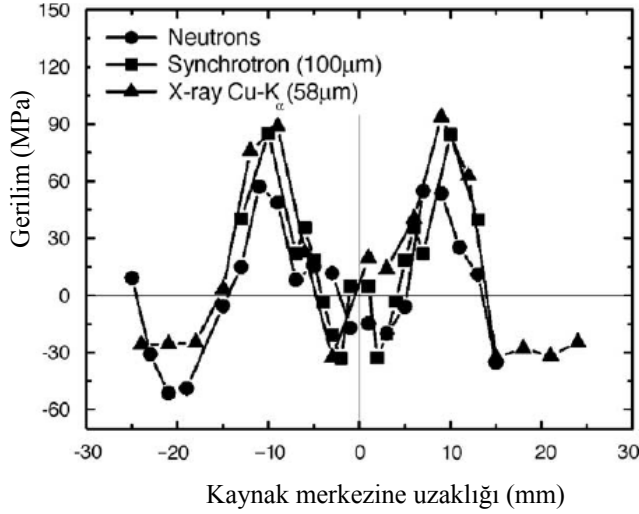
Pim üzerindeki kanal ve helisel yapı birleştirme bölgesinde plastikleşen malzemenin etkili olarak karışmasını ve kaynak yüzeyindeki malzemenin kaynak köküne doğru hareket ettirilmesini sağlamaktadır. Plastikleşen malzemenin birleşme bölgesindeki bu hareketi dinamik hacim değiştirme olarak tanımlanmaktadır. Konvansiyonel silindirik pimlerde bu malzeme hareketi daha durağandır. Bundan dolayı vidasız silindirik pimlerdeki malzeme hareketi statik hacim değişimi olarak adlandırılmaktadır.

Thomas et al tarafından geliştirilen pimlerdeki dinamik hacim değişiminin konvansiyonel silindirik pimlerdeki statik hacim değişimine oranı “Whorl” tipi pimde 1,8:1 “Triflute” tipi pimlerde ise 2.6:1 olduğu tesbit edilmiştir. Geliştirilen bu yeni tip pimler sayesinde birleştirme bölgesinde malzeme karışımı ve yer değişimi artarken baskı kuvveti azalmaktadır. Et kalınlığı 50 mm olan AA 6082 alüminyum alaşımı plakalar tek pasoda başarılı bir şekilde birleştirilmiştir.

2.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Oluşan Kalıntı Gerilimleri Ve Etkileri

Bir parçada kalıntı gerilimleri, üniform olmayan şekil değişimi, faz değişimleri ve parça kesitinde farklı soğuma hızları nedeniyle oluşur. Ergitme kaynağı ile yapılan birleştirmelerde kaynak kesitinde ısıtma/soğuma hızlarının farklı olması ve kaynak bölgesinde faz değişikliğinin gerçekleşmesi nedeniyle kompleks termik ve mekanik gerilmeler kalıntı gerilmelerini oluşturmaktadır. Oluşan kalıntı gerilmeleri ana malzemenin akma gerilimine yakın değerlere ulaşabilir. Sürtünme karıştırma kaynağı bir katı faz kaynağı olduğu için kaynak bölgesindeki ısı girdisi ergitme kaynağına göre daha düşüktür.

Sürtünme karıştırma kaynak prosesi sırasında kaynakla birleştirilecek olan plakalar rijit bir şekilde bağlanması gerekmektedir. Bu durum ısı girdisi sonrasında plakaların serbest olarak genişmesini engellediği için kaynak kesitinde kalıntı gerilimleri oluşturmaktadır. Ancak oluşan bu kalıntı gerilimleri ergitme kaynağı ile karşılaştırıldığında oldukça düşüktür. Sürtünme karıştırma kaynağı sırasında farklı metodlarla ölçülen kalıntı gerilimlerinin kaynak kesitindeki dağılımı şekil 2.16.'da gösterilmiştir (Mishra et al, 2005).



Şekil 2.16. : Kalıntı gerilimlerinin kaynak kesitindeki dağılımı (Mishra'den, 2005)

Sürtünme karıştırma kaynağında oluşan kalıntı gerilimleri ve etkisi birçok araştırmacı tarafından ele alınmıştır. Araştırma sonucunda elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir.

- Genel olarak bütün sürtünme karıştırma kaynağında oluşan kalıntı gerilimleri ergitme kaynağında oluşan kalıntı gerilimlerinden daha düşüktür.
- Kaynak kökünde ve kaynak yüzeyinde oluşan kalıntı gerilimleri bir birine yakındır.
- Omuz çapı, dönme ve ilerleme hızlarından bağımsız olarak, her zaman kaynak kesitinde oluşan σ_1 asal gerilimi σ_2 asal geriliminden daha büyük olduğu gözlenmiştir.

- Kalıntı gerilimlerinin kaynak kesiti boyunca “M” şeklinde değişim gösterdiği, maksimum kalıntı gerilmesinin ITAB bölgesinde çekme yönünde olduğu görülmüştür.
- Kaynak bölgesinde çekme yönünde oluşan kalıntı gerilimleri kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerini ve yorulma testi sonuçlarını olumsuz yönde etkilemektedir.

2.7. Alüminyum Alaşımları Dışındaki Malzemelerin Ve Farklı İki Malzemenin SKK İle Birleştirilmesi

Sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili ilk araştırmalar Al alaşımları üzerinde yoğunlaşmıştır. Al alaşımları dışında, Cu, Ti, Mg, Çelik alaşımları ve Termoplastik malzemelerin SKK ile birleştirilmesi konusundaki araştırmalar devam etmektedir. Bu konuda yapılan bazı araştırma sonuçları şu şekildedir.

2.7.1.Bakır alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi ;

Bakırın ısı iletim katsayısı büyük olduğu için, konvansiyonel ergitme kaynak teknikleri ile birleştirmek oldukça zordur. Sürtünme karıştırma kaynağının bir katı faz kaynağı olması bakır ve alaşımlarının bu yöntemle birleştirilmesini cazip hale gelmiştir. Saf bakır ve pirinç alaşımları (60/40) ile yapılan SKK araştırma sonuçları aşağıda belirtilmiştir.

- SKK yöntemi ile 1.5 – 50 mm kalınlığındaki bakır alaşımlı plakalar başarılı bir şekilde birleştirilmiştir.
- Karıştırıcı aparat geometrisi ve malzemesi kaynakla birleştirilecek olan plaka kalınlığına uygun olmalıdır. Yapılan araştırmalarda 3 mm plaka kalınlığına kadar

kariştırıcı aparat malzemesi olarak sıcak iş takım çeliğinin uygun olacağı, 10 mm üzerindeki et kalınlıklarında ise tungsten bazlı sinter metal malzemelerin kullanılmasının daha etkili olduğu belirtilmiştir (Mishra et al, 2005).

- Kaynak parametrelerinin kaynak kalitesini oldukça etkilediği görülmüştür. Sabit dönme hızında (500dev/dak) kaynak ilerleme hızı arttıa, kaynak bölgesindeki gözenek oluşumunun arttığı gözlenmiştir (Hautla et al, 2003).
- Kariştırıcı aparat omuz çapı kldkce kaynak mukavemetinin arttığı görülmüştür (Andersson et al, 1999).
- TIG ve SKK ile birleştirilen bakır alaşımlarında benzer mekanik özellikler elde edilmiştir. Her iki proses ile birleştirilen kaynaklı numunelerin elektriksel iletkenlik değerlerinde %5 oranında azal olmuştur (Andersson et al, 1999).

2.7.2. Titanyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi ;

Titanyum alaşımları konvansiyonel ergitme kaynak yöntemlerinden biri olan TIG gaz altı kaynağı ile birleştirilir. Ancak kaynaklı birleştirme sonrasında ısıl işleme gereksinim duyulmaktadır. Bu durum ilave proses ile birlikte kaynak maliyetini artırmaktadır. Katı faz kaynağı olan SKK'da kaynak sonrasında ısıl işleme gereksinim duyulmamaktadır. Sınırlı titanyum alaşımları SKK ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir. Bu konuda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Bir çok alaşımda SKK sonrasında oluşan TMEB'nin titanyum alaşımlarında oluşmadığı veya çok dar olduğu (30 μ m) görülmüştür (Lienert et al, 2001).
- Ergitme kaynağı ile birleştirilen titanyum alaşımlarında kaynak kesitinde sertlik ölçümleri yapıldığında ITAB bölgesinde görülen sertlik azalmasının (çukurunun), SKK'da oluşmadığı saptanmıştır (Park et al, 2004).
- Ti 6Al 4V alaşımı hatasız olarak SKK ile birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirme sonrasında malzemenin mekanik özellikleri tablo 2.3.'de belirtilmiştir (Juhas et al, 2001).

Malzeme	R _e (MPa)	R _m (MPa)	Uzama (%)	Kırılma Bölgesi
Ana Malzeme	897	957.7	12.7	
SKK Numune	912.9	1013.6	12.7	ITAB

Tablo 2.3. : Ti 6Al 4V alaşımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri (Juhas'den, 2001).

2.7.3. Çelik alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi ;

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak prosesi sırasında ısı girdisinin ergitme kaynağına göre daha düşük olması, ITAB'daki metalurjik değişimin, kaynak kesitindeki kalıntı gerilimlerinin ve çarpılmanın daha az olması neden olmaktadır. Ayrıca kaynak bölgesindeki düşük ısı girdisinin hidrojen çatlağının oluşumunu da engellenmesi beklenmektedir. Ağır sanayi ve gemi inşasında kullanılan kalın kesitli plakaların kaynakla birleştirilmesinde bu durum oldukça önemlidir. Bundan dolayı çeliklerin SKK ile

birleştirilmesi araştırmacıların ilgisini uyandırmıştır. Bu konuda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Bazı araştırmacılar SKK sırasında karıştırıcı uç ve kaynak bölgesini oksidasyondan korumak için argon gazı kullanmışlardır (Ramirez et al, 2003; Bricknell et al, 1991; Lienert et al 2003).
- Kızılötesi kamera ve ısı çiftleriyle yapılan sıcaklık ölçümlerinde, karıştırıcı uç sıcaklığının 1000 °C ‘nin üzerinde olduğı görölmüştür (Park et al, 2003).
- Proses öncesinde hem birleştirilecek plakaların hemde karıştırıcı ucun ön ısıtılması prosesi kolaylaştırmaktadır. HSLA-65 tipi çelik plakalar (kalınlık : 6,4mm) 300°C ön ısıtma yapılarak tek pasoda birleştirilmiştir (Johnson et al, 2003).
- SKK sonrasında kaynak yönüne dik alınan çekme numunelerinde, bazı çelik alaşımlarında ana malzemeye göre daha büyük akma ve maksimum çekme gerilimleri elde edilmiştir. Çekme testi sonuçları tablo 2.4.’de belirtilmiştir.

Malzeme	Çekme Numunesi	R _m (MPa)	R _e (MPa)	Uzama (%)	Referans
AISI 1010	Ana Mlz.	463	310	33.9	Posada'den, 2003
	SKK	476	331	22	Bricknell'den, 1991
304 L	Ana Mlz.	483	172	-	Johnson'den, 2003
	SKK	621	340	-	
HD -36	Ana Mlz.	579	428	-	Johnson'den, 2003
	SKK	624	566	-	
C - Mn	Ana Mlz.	248	204	9.5	Reynolds'den, 2003
	SKK	179	151	2.6	
	MIG	136	126	5.5	

Tablo 2.4. : Çelik alaşımlarının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

2.7.4. Magnezyum alaşımlarının SKK ile birleştirilmesi;

Magnezyum alaşımlarının düşük şekillendirilebilirlik özelliklerinden dolayı endüstriyel kullanımlarda parçalar döküm yöntemi ile üretilmektedir. Bu yöntemle üretilen Mg alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinde gözenek oluşmaktadır. Ayrıca malzemenin yüksek genleşme katsayısı kaynaklı birleştirme sonrasında parçaların çarpılmasına neden olmaktadır. SKK yukarıda belirtilen olumsuzlukların ortaya çıkmaması için iyi bir seçimdir (Nagasawa et al, 2000). Bu konuda yapılan araştırmalarda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

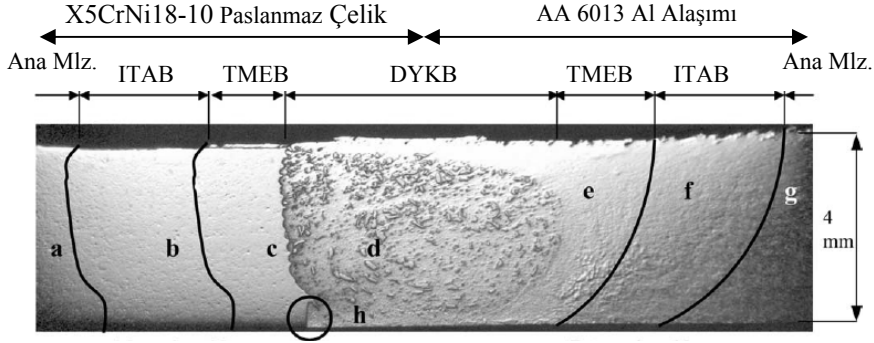
- Mg alaşımlarının SKK kalitesi karıştırıcı aparatın dönme ve ilerleme hızlarına çok duyarlıdır (Lienert et al, 1999).

- AZ91D tipi Mg alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı yüksek dönme (1250-1750 dev/dak) ve düşük ilerleme hızlarında (50 mm/dak) ve dar bir proses aralığında gerçekleştirilmiştir (Sterling et al, 2003).
- AZ31 tipi Mg alaşımında birleştirme bölgesinde ölçülen sıcaklıklar 460°C ye kadar çıkmıştır (Park et al, 2003).
- Dönme hızlarının artması ve ilerleme hızlarının azalması ile kaynak bölgesindeki ısı girdisi artmaktadır. Bu durum kaynak merkezinde tane yapısının büyümesine neden olmaktadır (Nakata et al, 2001).

2.7.5.Farklı alaşımların SKK ile birleştirilmesi ;

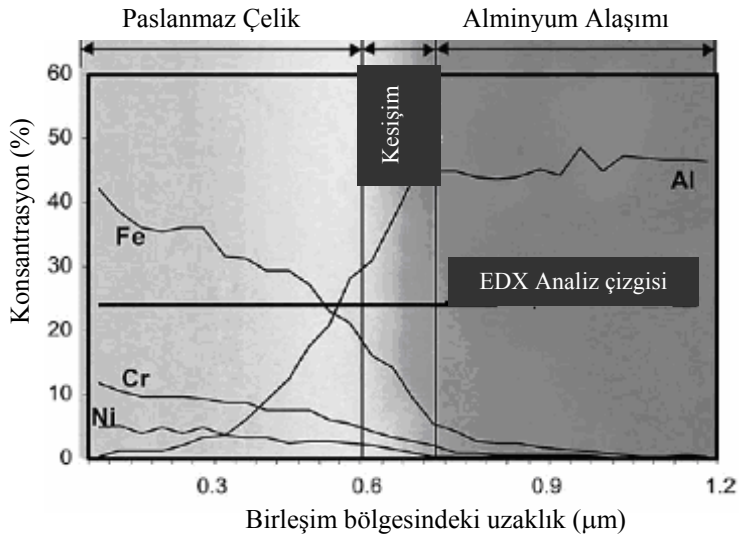
Ergime sıcaklıkları bir birinden oldukça farklı olan alüminyum ve paslanmaz çelik alaşımları SKK yöntemi ile birleştirilmiştir. Bu araştırma sonucunda şu gözlemler elde edilmiştir (Uzun et al, 2005).

- Al 6013 alaşımı ve X5CrNi18-10 paslanmaz çelik tek pasoda (kalınlık 4mm) başarılı bir şekilde birleştirilmiştir.
- Kaynaklı birleştirmenin yorulma dayanımı Al alaşımına göre %30 daha az olmuştur.
- Tek alaşımlı kaynakla birleştirmelerde 4 bölgeden oluşan kaynak kesiti, iki farklı alaşımda yedi bölgeden oluşmuştur. Şekil 2.17.'de kaynak kesitinin makro görüntüsü gösterilmiştir.



Şekil 2.17. : SKK ile birleştirilen X5CrNi18-10 paslanmaz çelik ve Al 6013 alaşımının makro görüntüsü (Uzun'den,2005).

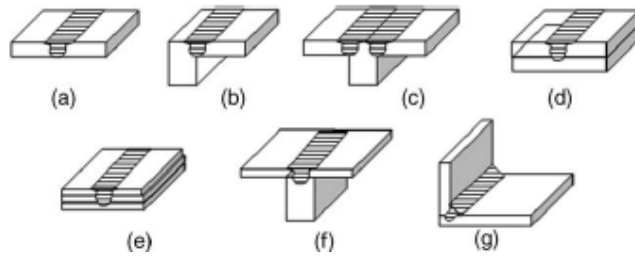
- Kaynaklı birleştirme sonrasında alaşım elementlerinin kaynak bölgesindeki konsantrasyonu EDX yöntemi ile analiz edildiğinde Al'nin çelik içerisine nüfuz ettiğini, ancak Fe, Cr ve Ni nüfuziyetinin yetersiz olduğu görülmüştür. Şekil 2.18.'de kaynak bölgesinde Al, Fe, Cr ve Ni konsantrasyonu gösterilmiştir (Uzun et al,2005).



Şekil 2.18. : Dinamik Kristalleşme Bölgesinde Al, Fe, Cr ve Ni konsantrasyonu (Uzun'dan,2005).

2.8. Sürtünme Karıştırma Kaynak Uygulamaları

Sürtünme karıştırma kaynağının en elverişli ve kolay uygulaması alın ve bindirme kaynağıdır. Kaynak öncesinde birleştirilecek olan sac veya levhaların bileştirme yüzeylerinin düz ve temiz olması SKK prosesi için yeterlidir. Alın ve bindirme kaynağı dışındaki uygulamalarda ise kaynak prosesinde kullanılacak özel bağlantı ve karıştırıcı uç donanımlarına gereksinim duyulabilir. Şekil 2.19’da SKK’ nın farklı uygulamaları sembolik olarak gösterilmiştir.

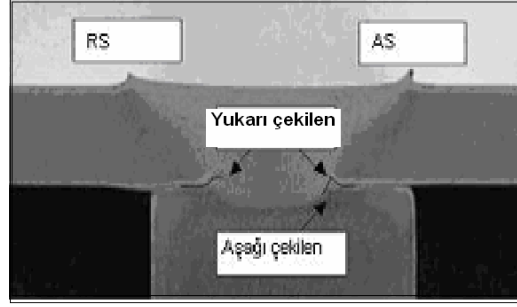


Şekil2.19.: SKK’ nın farklı birleştirme yöntemleri: (a) alın kaynağı, (b) dış köşe kaynağı, (c) “T” kaynağı, (d) bindirme kaynağı, (e) çok katlı bindirme kaynağı, (f) ”T” bindirme kaynağı, (g) iç köşe kaynağı (Mishra’ dan, 2005)

Ericson et. al. tarafından AA 6082 tipi Al alaşımı SKK yöntemi ile “T” kaynağı şeklinde birleştirilmiştir. Şekil 2.20.’de “T” Bindirme kaynağı gösterilmiştir. Yapılan araştırmada kaynaklı birleştirmenin mekanik özellikleri ve yorulma davranışı incelenmiştir. Bu araştırmada elde edilen bulgular aşağıda belirtilmiştir (Ericsson et. al., 2007).

- Kaynaklı birleştirmenin maksimum çekme mukavemetinin, ana malzemenin maksimum çekme mukavemetinin oranı %55’dir.

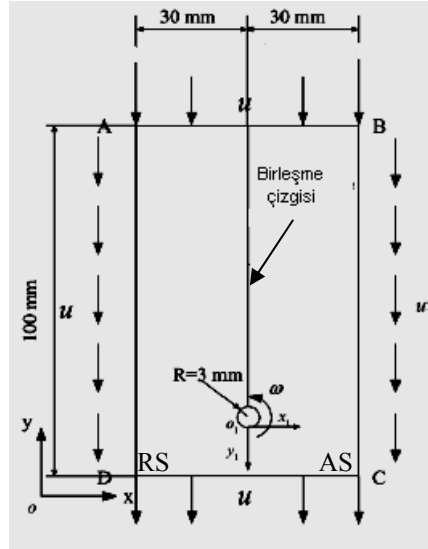
- “T” Bindirme kaynağının yorulma dayanımı alın kaynağına göre %20-%30 daha az olmuştur.
- İki farklı pim ucunun etkisi incelendiğinde en iyi sonucun konkav pim ucunda elde edildiği görülmüştür.



Şekil 2.20. : “T” Bindirme kaynağı (Ericsson’dan,2007).

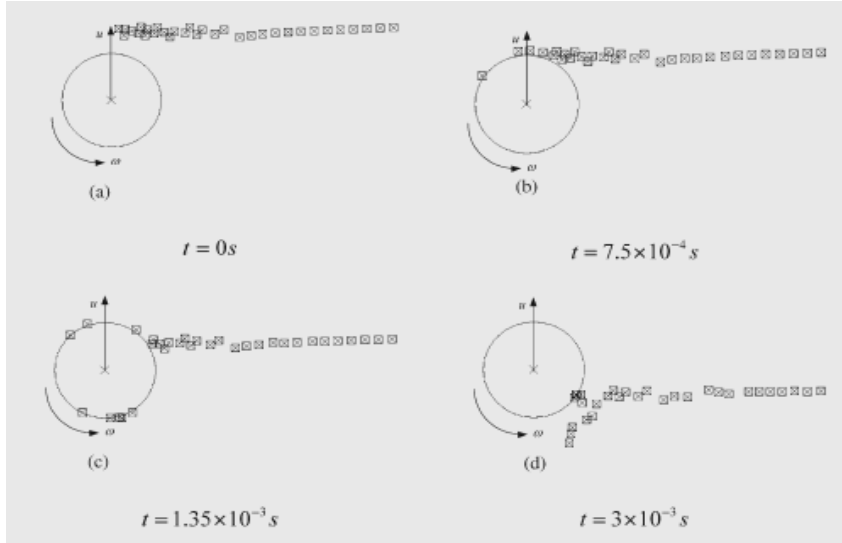
2.9. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Modelleme Çalışmaları

Sürtünme karıştırma kaynağında, birleştirme bölgesindeki sıcaklık artışı, malzeme hareketi ve kalıntı gerilimlerinin dağılımlarının netleştirilmesi SKK’nın mekanizmasının anlaşılmasını kolaylaştıracaktır. Bu konuda bir çok araştırmacı kaynak bölgesindeki sıcaklık dağılımı ve malzeme akışını incelemek üzere matematiksel model geliştirmiştir (Zhang et.al., 2005). ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) bazlı termo-mekanik FEM analizi ile proses parametrelerinin değişiminin, birleştirme bölgesinde malzemenin akışına, plastik şekil değişimine ve kalıntı gerilimlerine etkisini incelenmiştir. Bu çalışmada malzeme olarak Al alaşımları seçilmiş olup iki boyutlu model ve sınır şartları şekil 2.21.’de gösterilmiştir.

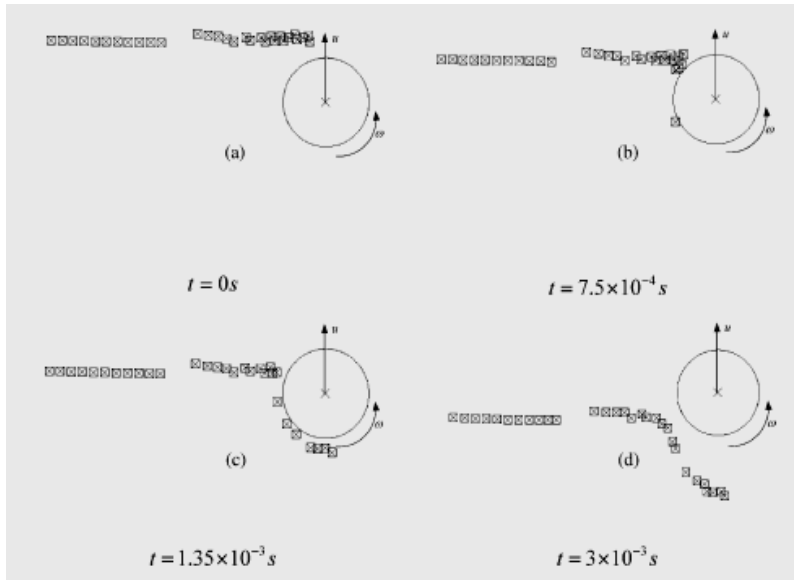


Şekil 2.21.: Geometrik model ve sınır şartları (Zhang'den.,2005).

FEM analizi sonucunda AS ve RS bölgelerindeki malzeme akışının farklı olduğu gözlenmiştir. AS bölgesinde malzemenin pimin dönme yörüngesine girerek etrafında dolaştığı, RS bölgesinde ise malzemenin pimin çevresinden uzaklaştığı görülmüştür. Bu konuda yapılan deneysel çalışmalar da model çalışmasını doğrulamaktadır (Chen et.al., 2003). Oluşturulan modelde ilk olarak sürtünme karıştırma aparatının ilerleme hızı 2 mm/s, dönme hızı ise 390 dev/dak seçilmiştir. Daha sonra ilerleme hızı iki katına çıkarıldığında AS ve RS bölgesindeki malzeme hareketinin karakterinde herhangi bir değişiklik olmamıştır. Şekil 2.22. ve 2.23'de AS ve RS bölgesindeki malzeme hareketi gösterilmiştir.



Şekil 2.22. : AS bölgesindeki malzeme hareketi $u=2\text{mm/s}$,
 $\omega=390\text{dev/dak}$ (Zhang'den,2005).



Şekil 2.23.: RS bölgesindeki malzeme hareketi $u=2\text{mm/s}$,
 $\omega=390\text{dev/dak}$ (Zhang'den,2005).

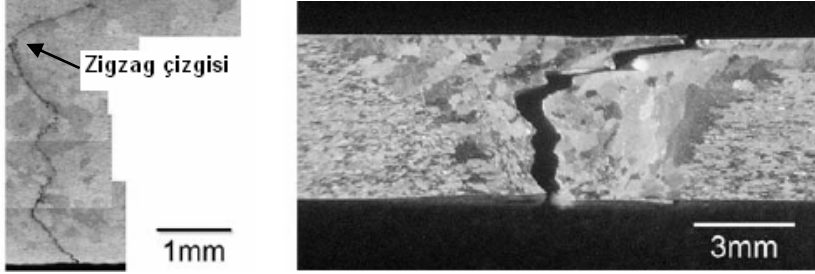
Bu çalışma sonucunda SKK mekanizması ve kalıntı gerilimlerinin dağılımı hakkında aşağıdaki bilgiler elde edilmiştir.

- AS Bölgesindeki malzeme pimin etrafındaki yumuşama bölgesinde pim ile birlikte hareket ettiği, RS bölgesinde ise malzemenin pimdten uzaklaştığı saptanmıştır.
- Pimin arka kısmında ($0^\circ < \theta < 30^\circ$ ve $330^\circ < \theta < 360^\circ$ bölgesinde) kalan malzemenin oldukça fazla deforme olduğu görülmüştür.
- Sürtünme karıştırma aparatının ilerleme hızı arttıkça kalıntı gerilimlerinin arttığı ve maksimum kalıntı geriliminin birleştirme çizgisine R+1~2mm uzaklıkta olduğu gözlenmiştir.

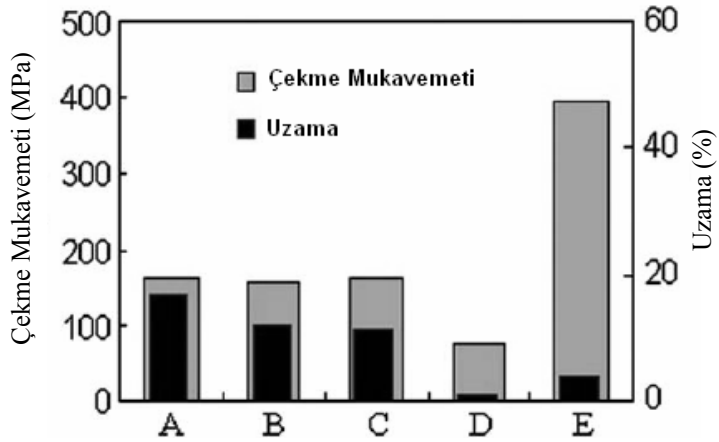
2.10. Al₂O₃ Ve Isıl İşlemin Sürtünme Karıştırma Kaynağına Etkisi

Sürtünme karıştırma kaynağı öncesinde birleştirme yüzeylerinin düz ve temiz olması plakaların kaynaklı birleştirmesi için yeterli görülmektedir. Ancak plaka yüzeyinde oluşan Al₂O₃ tabakası birleştirme sonrasında kaynak bölgesinde “zigzag çizgisi” olarak adlandırılan şekil oluşturmaktadır. Bazı araştırmacılar kaynak bölgesinde oluşan zigzag çizgisinin bağlantının dayanımına etkilerini incelediklerinde, kaynak bölgesindeki Al₂O₃ tabakasının kaynaklı birleştirmenin mekanik özelliklerini etkilemediğini, ancak kaynaklı birleştirme sonrasında yapılan ısıl işlemin bağlantının dayanımını olumsuz yönde etkilediğini gözlemişlerdir(Liu et. al., 2006, Sato et. al.,2005). Şekil 2.24.’de ısıl işlem sonrasında

AA 2219 serisi Al alaşımda kırılma bölgesinin zigzag çizgisinde olduğu, şekil 2.25.'de ise farklı şartlardaki kaynaklı birleştirmelerin mekanik özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 2.24. : Isıl işlem sonrasında AA 2219 serisi Al alaşımda kırılma bölgesi (Liu'den, 2006)



A: Ana malzeme

B: Kaynaklı numune (kaynak öncesinde Al_2O_3 tabakası temizlenmemiş)

C: Kaynaklı numune (kaynak öncesinde Al_2O_3 tabakası temizlenmiş)

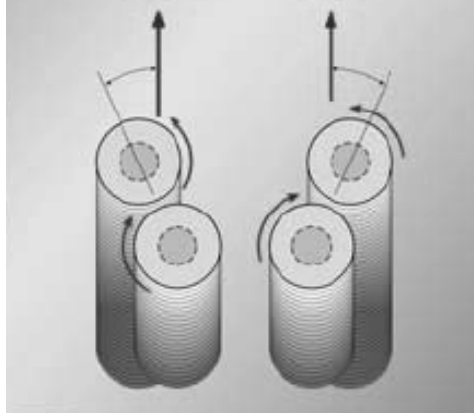
D: Isıl işlem yapılmış kaynaklı numune (kaynak öncesinde Al_2O_3 tabakası temizlenmemiş)

E: Isıl işlem yapılmış kaynaklı numune (kaynak öncesinde Al_2O_3 tabakası temizlenmiş)

Şekil 2.25. : AA 2219 serisi Al alaşımının ve farklı şartlardaki kaynaklı numunelerin mekanik özellikleri (Liu'den, 2006).

2.11. Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Yenilikler Ve Gelişmeler

Sürtünme karıştırma kaynağında, karıştırıcı ucun dönme yönüne bağlı olarak birleştirme bölgesindeki malzeme akışında, kalıntı gerilimlerde ve ısı dağılımında farklılıklar oluşmaktadır. Bu durum kaynak kesitinde asimetri oluşturmaktadır. Araştırmacılar birleştirme bölgesinde oluşan bu asimetriyi önlemek, yeniden kristalleşme bölgesini genişleterek bağlantının mekanik özelliklerini artırmayı amaçlamışlardır. Şekil 2.26.'da farklı yönde dönen tandem karıştırıcı uç uygulaması gösterilmiştir (Thomas et.al, 2005).



Şekil 2.26. : Farklı yönde dönen tandem karıştırıcı uç uygulaması (Thomas'den, 2005).

3. MATERYAL VE METOD

3.1. AA 6063 (AlMgSi0.5) Alüminyum Alaşımının Özellikleri

AA 6063 Alüminyum alaşımı, yüksek korozyon direnci, ısıtılma işleme uyumlu olması, kaynak edilebilme ve kolay soğuk şekillendirilme özelliklerinden dolayı taşımacılık sektörünün farklı alanlarında ve inşaat sektöründe dış cephe kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır.

Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan 5 mm kalınlığındaki alüminyum plakalar iki farklı partide temin edilmiştir. Plakaların elementar içeriği spektral analiz yöntemi ile belirlenmiş ve malzemenin AA 6063'e uygun olduğu görülmüştür. Tablo 3.1.'de malzeme bileşenleri verilmiştir.

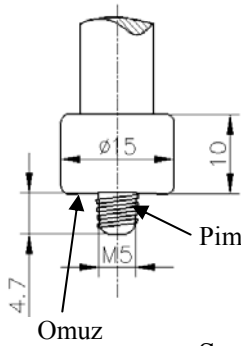
Mg	Si	Fe	Mn	Ti	Cu	Cr	Diğer	Al	
0.52	0.46	0.16	0.019	0.012	0.006	0.006	0.039	98.78	1. Parti
0.51	0.52	0.22	0.067	0.019	0.016	0.012	0.045	98.6	2. Parti

Tablo 3.1. : AA 6063 malzeme bileşenleri (% at)

3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynağı Uygulanması

Sürtünme karıştırma kaynağında, karıştırıcı aparatın iş parçasına dalması ve sürtünmesi sonucunda bölgesel olarak ısı girdisi oluşmaktadır. Sürtünme karıştırma aparatı ile iş parçası arasında oluşan sürtünmeden dolayı, kaynak bölgesindeki malzeme yumuşamakta ve plastik şekil değişimi gerçekleşmektedir. Karıştırıcı aparatın iki temel fonksiyonu vardır, birincisi iş

parçasının sürtünme ile ısıtılması, ikincisi yumuşayan malzemenin birleştirme bölgesinde karıştırılarak plastik deformasyonunun sağlanmasıdır. Bu çalışmada 150x275x5 mm ölçülerindeki plakaların kaynak prosesi sırasında sabit ve tekrarlanabilir şekilde bağlanabilmesi için özel bir kalıp yaptırılmıştır. Ayrıca denemelerde kullanılan karıştırıcı uç özel olarak tasarlanmış ve sıcak iş takım çeliğinden imal edilmiştir. Prototip olarak geliştirilen ilk karıştırıcı uç ile SKK'nın gerçekleştirildiği aparat şekil 3.1.'de gösterilmiştir.



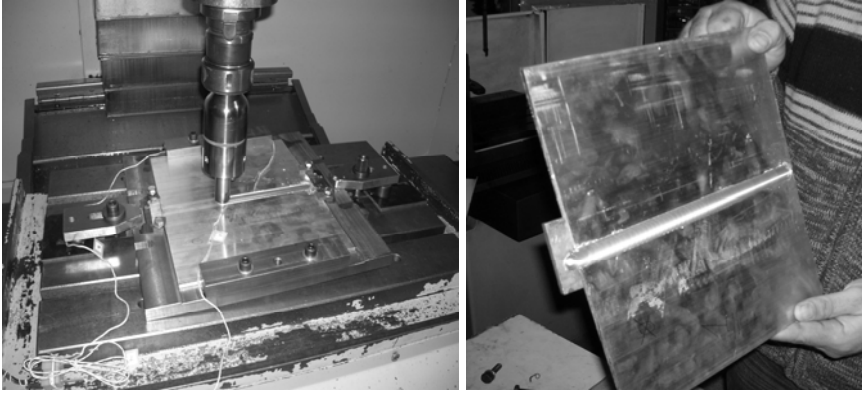
Şekil 3.1. : Sürtünme karıştırma aparatı

3.2.1. Kaynak Parametresi: Değişken Dönme Ve İlerleme Hızları

Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak değişkenleri dört farklı parametreden oluşmaktadır. Bu parametreler sırasıyla; karıştırıcı ucun yapısı, baskı kuvveti, dönme ve ilerleme hızıdır. Çalışmanın ilk aşamasında farklı dönme (900 dev/dak–2800 dev/dak) ve ilerleme hızları (100 mm/dak-400 mm/dak) daha geniş bir aralıkta ele alınarak dönme ve ilerleme hızlarının bağlantının dayanımına etkisi incelenmiştir. Üç farklı dönme

(900 dev/dak, 1600 dev/dak, 2800 dev/dak) ve üç farklı ilerleme (100 mm/dak, 200 mm/dak, 400 mm/dak) hızında, toplam 9 farklı kaynak parametresinde gerçekleştirilen sürtünme karıştırma kaynağı için 3 eksenli CNC tezgahı ve kalıpcı frezesi kullanılmıştır.

Denemeler sırasında dalma derinliği sabit tutularak, tek tip karıştırıcı uç kullanılmıştır. Kaynaklı birleştirme sırasında iş parçasında oluşan sıcaklık artışı, birleşme çizgisinden 10mm uzağa yerleştirilen “K” tipi ısı çift yardımı ile ölçülmüştür. Sürtünme karıştırma kaynak uygulaması şekil 3.2.’de gösterilmiştir.

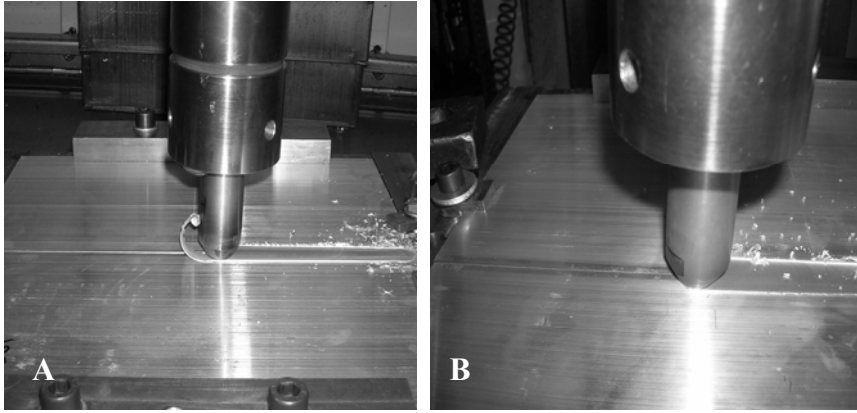


Şekil 3.3. : Sürtünme karıştırma kaynak uygulaması

3.2.2. Kaynak Parametresi : Sağ – Sol Vidalı Pimlerin Etkisi

Çalışmanın ikinci aşamasında, sağ ve sol vidalı pimler kullanılarak iki farklı ilerleme (100 mm/dak, 200 mm/dak) ve üç farklı dönme hızında (900 dev/dak, 1250 dev/dak, 1600 dev/dak), toplam 12 farklı kaynak parametresinde sürtünme karıştırma kaynağı gerçekleştirilmiştir. Kaynak prosesi sırasında sağ vidalı pim ile gerçekleştirilen birleştirmelerde sol vidalı pime göre daha

fazla çapak oluştuğu gözlenmiştir. Farklı vidalı pimler ile gerçekleştirilen sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması şekil 3.3’de gösterilmiştir.

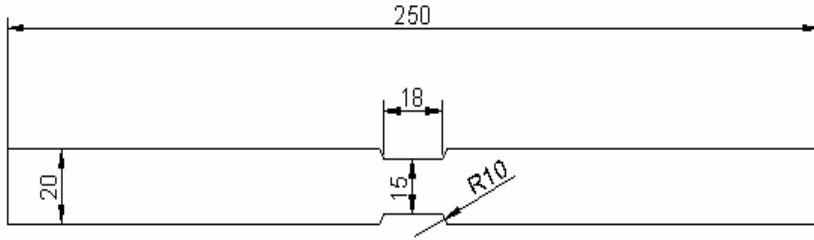


Şekil 3.3. : Farklı vidalı pim ile gerçekleştirilen SKK uygulaması,
Kaynak Parametreleri: Dönme hızı =1600dev/dak, İlerleme hızı = 200mm/dak,
 A : sağ vidalı pim, B : sol vidalı pim

3.3. Kaynaklı Birleştirmelerin Mekanik Testleri

3.3.1. Çekme Testi

Çekme deneyi, bir malzemenin yük taşıma yeteneği ile yükleme sırasındaki şekil değiştirme (uzama) davranışlarının belirlendiği bir ölçme yöntemidir. Bu çalışmada kaynak numuneler ile ana malzemenin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çekme testleri, çekme kapasitesi 100kN olan SHIMADZU AUTOGRAPH çekme cihazında 6 mm/dak hız ile gerçekleştirilmiştir. Kaynak yönüne dik olarak hazırlanan çekme numunelerinin gometrisi şekil 3.4.’de, çekme numuneleri ve testi ise şekil 3.5.’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. : Çekme numunesi geometrisi



Şekil 3.5. : Çekme numuneleri ve çekme testi

3.3.2. Eğme Testi

Kaynaklı birleştirmelerde, kaynak mukavemeti ve kalitesi yönünde hızlı ve pratik yorum yapabilmek için eğme testi yapılmaktadır. Konvansiyonel ergitme kaynağında kaynak kökü kaynak yüzeyine göre daha zayıf olduğu için eğme testleri kaynak kökü dışarı gelecek şekilde gerçekleştirilir. Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelerin kaynak kesitindeki sıcaklık artışı incelendiğinde, kaynak yüzeyinin kaynak köküne göre daha fazla ısındığı görülmüştür. Kaynak kesitinde oluşan bu sıcaklık

farkı tane yapısının oluşumunu ve sonuç olarak kaynak yüzeyinin kaynak köküne göre daha zayıf olmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı konvansiyonel ergitme kaynaklarının aksine sütünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelerde eğme testi kaynak yüzeyi dışı gelecek şekilde gerçekleştirilir.

Kaynak yönüne dik olarak hazırlanan eğme numuneleri (200x20 mm ölçülerinde), eksenler arası mesafesi 125 mm, basma silindir çapı 30 mm ve eğme hızı 1.3 mm/s olan eğme cihazında kaynak yüzeyi dışı gelecek şekilde 150° bükülmüştür. Eğme testi numuneleri ve uygulaması şekil 3.6.'da gösterilmiştir.



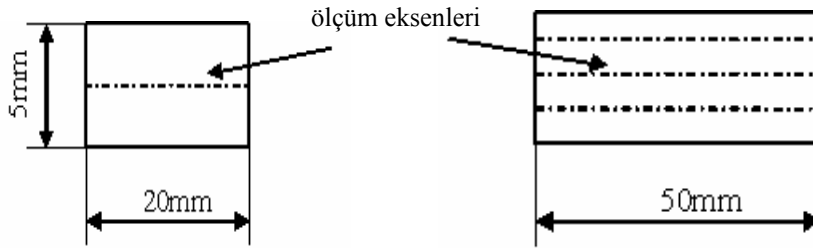
Şekil 3.6. : Eğme testi numuneleri ve uygulaması

3.4. Mikro Sertlik Testi

Sertlik bir malzemenin, kendisinden çok daha sert başka bir uç veya parçanın çizmesine, batmasına, genel olarak kalıcı şekil değiştirmesine karşı göstermiştir olduğu dirençtir. Malzeme yüzeyinde statik yükleme ile plastik deformasyon üreterek sertlik ölçülmesi, en yaygın ve hassasiyetle, sayısal sonuçları tekrarlanabilir bir şekilde ulaşılabilen sertlik ölçme yöntemlerinin temelini oluşturur. Geometrisi tarif edilen sert (genellikle elmas)

uçlara düşük yüklemelerle ($10^{-2}\text{N} - 2\text{N}$) üretilen çok küçük kalıcı izlerin değerlendirilmesiyle yapılan sertlik ölçme sistemleri mikrosertlik ölçümleri olarak tanımlanır.

Bu çalışmada, bölgeler arasındaki ve parça kalınlığındaki sertlik değişimini incelemek için iki farklı numune grubu üzerinde mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Birinci ölçümde, kaynak kesitinden 5x20 mm ölçülerinde alınan numunelerin orta ekseninde mikro sertlik ölçümleri yapılarak, bölgeler arasındaki sertlik değişimi incelenmiştir. Ölçümler Carl Zeiss Jena mikro sertlik ölçüm cihazında 10 s süre ile 80 g yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. İkinci ölçümde ise kaynak kesitinden 5x50 mm ölçülerinde alınan numunelerin, orta eksen ile üst ve alt yüzeylerinden 1 mm uzaklıkta mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Kaynak yönüne dik olarak alınan sertlik ölçüm numuneleri şekil 3.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Sertlik ölçüm numuneleri

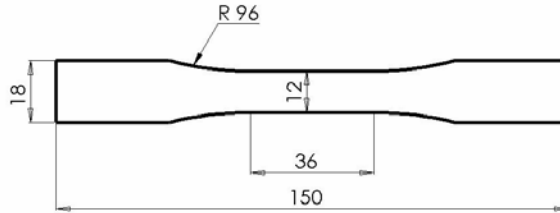
3.5. Yorulma Testi

Tekrarlı zorlamalar altında malzemenin mukavemeti azalır, çekme mukavemetinin çok altındaki gerilmeler kırılma oluşturabilir, buna neden yorulma olayıdır. Yorulma genellikle iç yapıda mevcut kusurlar civarında oluşan yerel gerilme yığılmalarından kaynaklanır. İç yapıda bulunan çatlak, çentik, boşluk, sert parçaçık ve ani kesit değişimleri civarındaki gerilmeler ortalama gerilmelerden daha büyüktür. Bu gerilmeler etkisinde yerel plastik şekil değiştirme meydana gelir. Diğer taraftan başlangıçta hiçbir bozukluk içermeyen yüzeyi parlatılmış üniform kesitli bir metalde elastik sınır altında da dislokasyonlar yerel olarak hareket ederek kayma bantları oluştururlar. Bu bantlar yüzeyde çıkıntı ve çöküntülerin doğmasına, dolayısıyla gerilme yığılmalarına neden olurlar. Bütün bu hallerde tekrarlı zorlamalar etkisinde oluşan tersinir olmayan plastik şekil değiştirme sonucu malzeme yerel olarak pekleşir, gevrekliği artar sonunda mikro çatlaklar oluşur. Bu mikro çatlaklar zamanla yayılarak ani yorulma kırılması oluşturur. Yorulma çatlakları genellikle yüzeyde başlar ve içeriye doğru yayılır.

Yorulma deneyi ile bir malzemenin belirli bir tekrar sayısı için güvenle dayanabileceği gerilme sınırı saptanır. Bunun için hazırlanan numunelere belirli büyüklükte tekrarlı gerilme uygulanır ve bu gerilme etkisinde kırılmanın olduğu “N” tekrar sayısı ölçülür. Değişik gerilme genlikleri ile bunlara karşı gelen “N” kırılma tekrar sayıları ile S-N eğrileri veya Wöhler eğrileri oluşturulur.

Yorulma deneylerinde genellikle gerilme genliği kontrol edilir ve deney süresince sabit tutulur. Ancak gerilmeler akma sınırını aşarsa önemli ölçüde plastik şekil değişimi meydana gelir. Çatlak oluşuktan sonra çok kısa sürede kırılma olayı gerçekleşir. Çatlak oluşumundan sonra, kırılma kısa sürede gerçekleştiği için yorulma çatlaklarının gelişimini gözlemek pek mümkün değildir. Kırılma tekrar sayısı (N) 10^3 'ün altında oluşan kırılmalar kısa süreli yorulma, üstündekiler ise uzun ömürlü yorulma olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışmada, farklı dönme ve ilerleme hızlarının yorulma dayanımına etkisini incelemek amacıyla kısa süreli yorulma deneyi yapılmıştır. Kaynaklı numuneler $\sigma_{ort}=80$ N/mm² çekme gerilimi ile yüklendikten sonra, çekme yönünde azalan gerilim genliğinde (sırasıyla $R_1=0.33$, $R_2=0.23$, $R_3=0.14$), parçalar kopana kadar yorulma testi uygulanmıştır. Instron 8501 servo-hidrolik test cihazında yapılan deneylerde çalışma frekansı 10 Hz ve çekme hızı ise 1 mm/dak olarak belirlenmiştir. Şekil 3.8.'de ASTM E 466' ya göre hazırlanan yorulma numunelerinin geometrisi gösterilmiştir.



Şekil 3.8. : Yorulma numunelerinin geometrisi

3.6. Makro Ve Mikro Yapının İncelenmesi

Sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelerde, kaynak bölgelerindeki makro ve mikro düzeydeki değişimi ve aynı zamanda da kaynak değişkenlerinin mikro yapıdaki etkilerini gözlemlemek amacıyla makro ve mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Kaynak yönüne dik olarak kaynak bölgesinden 24x10 mm ölçülerinde alınan numuneler polyester kalıba alındıktan sonra parlatılmıştır. Numuneler AlMgSi alaşımı için özel hazırlanmış çözeltilerde bekletildikten sonra ılık suda yıkanarak kimyasallardan arındırılmıştır. Polyestere alınan numuneler 1 nolu keller çözeltisi ile dağlandıktan sonra oluşan kaynak bölgeleri şekil 3.9.'da gösterilmiştir.

Makro Dağlama :

(Keller Çözeltisi 1)

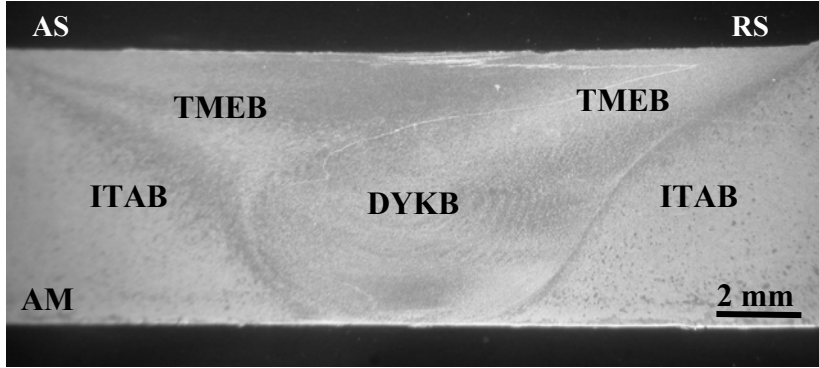
50ml H₂O,
15ml HCl (%32'lik),
25ml HNO₃(%65'lik),
10ml HF(%40'lık),
Bekleme süresi : 2 dak.

Mikro Dağlama :

(Keller Çözeltisi 2)

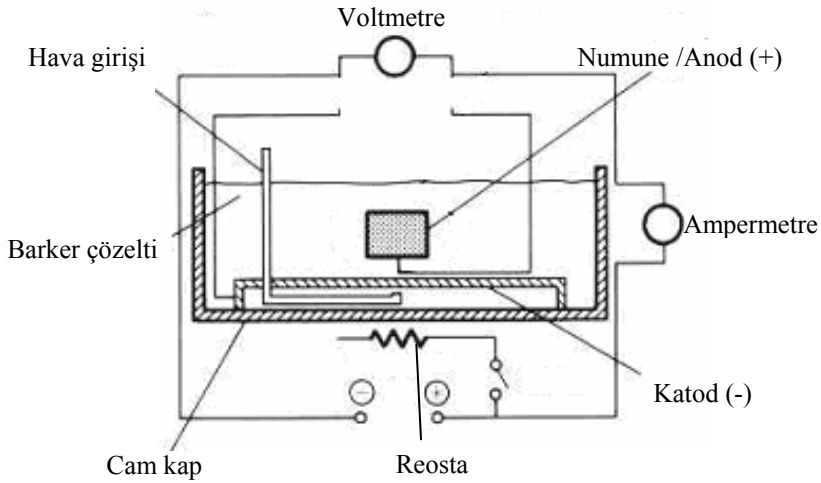
95ml H₂O,
1.5ml HCl (%32'lik),
2.5ml HNO₃(%65'lik),
1.0ml HF(%40'lık),
Bekleme süresi : 20 s





Şekil 3.9. : SKK'da kaynak kesitinin makro yapısı; AM : Ana Metal, ITAB : Isı Tesiri Altındaki Bölge, TMEB : Termo – Mekanik Etkilenen Bölge, DYKB : Dinamik Yeniden Kristalleşen Bölge (AS : Advancing Side, RS : Retreating Side)

Bu araştırmada kaynak geçiş bölgelerindeki tane büyüklüğünü ve DYKB bölgesindeki yeniden kristalleşmeyi gösterebilmek için, Barker çözeltisi [5ml HBF_4 (%35) + 200ml H_2O] ile 30V DC gerilim altında 1 dakika elektrolitik dağlama yapılmıştır. Şekil 3.10.'da elektrolitik dağlama düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 3.10. : Elektrolitik dağlama düzeneği

3.7. Çözelti Sertleştirilmesi ve Yaşlandırma Testi

Demir alaşımlarında olduğu gibi demir dışı metal alaşımlarında da yapı içerisindeki küçük ve sert ikinci faz parçacıkların homojen dağılımı ile malzemenin mukavemeti artırılmaktadır. Alüminyum alaşımlarına çökelme sertleştirilmesi ve yaşlandırma uygulanarak, malzeme içerisindeki ikinci faz parçacıkların homojen olarak dağılması sağlanır. Özellikle uzay, havacılık ve otomotiv sanayisinde kullanılan Al alaşımlarında çözelti sertleşmesi ve yaşlandırma malzeme mukavemetini artırmak için yaygın olarak uygulanmaktadır.

Çözelti sertleştirilmesi, alaşıma bağlı olarak ötektik sıcaklığın altındaki bir tavlama sıcaklığında ($T_K < 548^\circ\text{C}$) malzemenin belirli bir süre bekletilerek katı eriyik oluşturmastır. Bekleme süresi parça kalınlığına bağlıdır. Tablo 3.2.'de çözme tavlı süreleri verilmiştir.

Parça Kalınlığı (mm)	Tutma Süresi (dak)
>0.5 – 0.9	15
>0.9 – 1.5	20
>1.5 – 2.9	30
>2.9 – 6	50
>6 – 12	60
>12 – 60	150

Tablo 3.2. : Alüminyum alaşımlarında çözme tavlı süresi

Bu çalışmada, AA 6063 alaşımı ile sabit dönme (1600dev/dak) ve iki farklı ilerleme hızlarında (100mm/dak, 200mm/dak) sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen numunelere çözelti sertleşmesi ve yaşlandırma uygulanmıştır. Kaynak prosesi sırasında sağ ve sol helisli vidalı pim kullanılmıştır. Numuneler $T_0=535^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 50 dakika bekletildikten sonra $T_1=65^{\circ}\text{C}$ sıcaklığındaki suya daldırılarak su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numuneler $T_2=175^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 8 saat yaşlandırılmıştır.

3.8. Kırılma Yüzeylerinin SEM’de İncelenmesi

Çekme, yorulma ve yaşlandırma numunelerinin kırılma yüzeyi JSM–6060 JEOL tipi taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile 10x–1.000x büyütme aralığında incelenmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Kaynaklı Birleştirmelerin Mekanik Testleri

Kaynaklı birleştirme sırasında iş parçasında oluşan sıcaklık artışı farklı kaynak parametrelerde ölçülmüştür. Dönme yönüne bağlı olarak AS bölgesindeki sıcaklık artışının RS bölgesine göre %6 - %12 daha fazla olduğu görülmüştür. Farklı kaynak parametrelerde ölçülen sıcaklık değerleri tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Kaynak Parametreleri		Dönme Yönüne Bağlı Sıcaklık Ölçümleri	
İlerleme Hızı (mm/dak)	Dönme Hızı (dev/dak)	AS Bölgesi (°C)	RS Bölgesi (°C)
100	900	301	276
	1600	430	390
	2800	460	415
200	900	291	268
	1600	306	275
	2800	325	287
400	900	208	195
	1600	253	234
	2800	276	249

Tablo 4.1. : Farklı kaynak parametrelerde ölçülen sıcaklık değerleri

4.1.1. Çekme Testi

Bu araştırmanın birinci aşamasında, tek tip karıştırıcı uç kullanılarak 9 farklı kaynak parametresinde sürtünme karıştırma kaynağı gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise iki farklı karıştırıcı uç ile toplam 12 farklı kaynak parametresinde sürtünme karıştırma kaynağı yapılmıştır. Birinci aşamada gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin çekme test sonuçları tablo 4.2.'de gösterilmiştir.

Kaynak Parametreleri		Çekme Mukavemeti (MPa)	Birim Şekil Değişirme (%)	Kaynak ^{a)} Mukavemeti (%)	Kaynaklı ^{b)} Numune Kopma Bölgesi
100 mm/dak	900dev/dak	94,7	2,09	45	2 / 2 / 2
	1600dev/dak	143,9	3,67	68,2	1 / 1 / 1
	2800dev/dak	146,6	4,71	69,5	1 / 2 / 1
200 mm/dak	900dev/dak	101,7	1,32	48,2	2 / 2 / 2
	1600dev/dak	122,1	2,26	57,9	2 / 1 / 1
	2800dev/dak	129,1	2,28	61,2	1 / 2 / 2
400 mm/dak	900dev/dak	100,3	1,15	47,5	2 / 2 / 2
	1600dev/dak	106,4	1,47	50,4	2 / 2 / 2
	2800dev/dak	135,9	3,21	64,4	2 / 2 / 2
AA 6063		211	12,7	100	

Tablo 4.2. : Birinci aşama çekme testi sonuçları

a) Kaynak Mukavemeti = $\frac{\text{SKK Çekme Mukavemeti}}{\text{Ana Malzeme Çekme Mukavemeti}}$

b) 1 : AS Bölgesindeki ITAB

2 : DYKB

3 : RS Bölgesindeki ITAB

Kaynak mukavemeti ana malzemenin maksimum çekme mukavemetinin kaynaklı numunenin maksimum çekme mukavemetine oranı olarak tanımlanmıştır. Birinci aşamada %69.5 kaynak verimi elde edilirken, bu değer ikinci aşamada %78.3'e çıkmıştır. İkinci aşamada gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerin çekme testi sonuçları tablo 4.3.'de gösterilmiştir.

Kaynak Parametreleri			Çekme Mukavemeti (MPa)	Birim Şekil Değiştirme (%)	Kaynak ^{a)} Mukavemeti (%)	Kaynaklı ^{b)}
	İlerleme Hızı (mm/dak)	Dönme Hızı (dev/dak)				Numune Kopma Bölgesi
Sağ Vidalı Pim	100	900	145.75	8.3	75.7	1 / 1 / 1
		1250	146.88	7.6	76.3	1 / 1 / 1
		1600	142.49	9.3	74	1 / 1 / 1
	200	900	141.49	13.5	73.5	3 / 3 / 3
		1250	148.77	9.2	77.3	2 / 2 / 1
		1600	150.64	11.4	78.3	1 / 1 / 1
Sol Vidalı Pim	100	900	140.08	13.8	72.8	1 / 1 / 1
		1250	144.32	10.3	75	1 / 1 / 1
		1600	143.54	11.2	74.6	1 / 1 / 1
	200	900	150.43	12.7	78.1	3 / 3 / 3
		1250	143.57	9.5	74.6	3 / 3 / 3
		1600	150.17	10.2	78	3 / 3 / 1
AA 6063			192.52	8.6	100	

Tablo 4.3. : İkinci aşama çekme testi sonuçları

a) Kaynak Makavemeti = SKK Çekme Mukavemeti / Ana Malzeme Çekme Mukavemeti

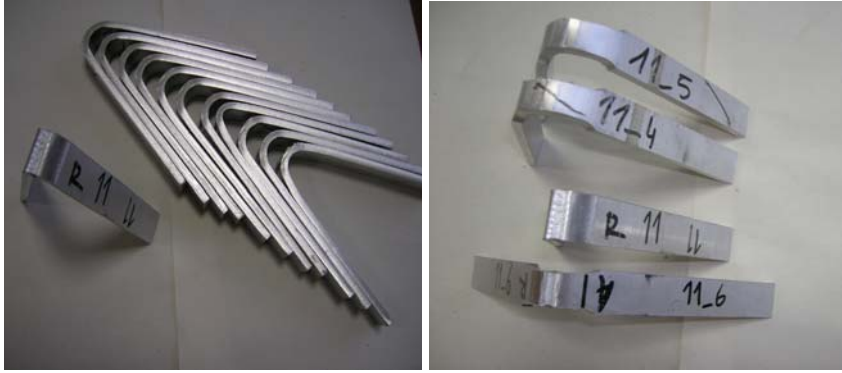
b) 1 : AS Bölgesindeki ITAB

2 : DYKB

3 : RS Bölgesindeki ITAB

4.1.2. Eğme Testi

İkinci aşamada oniki farklı kaynak parametresinde sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilen kaynaklı numunelere eğme testi yapılmıştır. Sol vidalı pim ile 1250 dev/dak dönme ve 200 mm/dak ilerleme hızında birleştirilen 11 nolu numune ilk denemede kaynak bölgesinden kırılmıştır. Daha sonra kaynak kökü dışı gelecek şekilde bükülen numunelerde herhangi bir kırılma olmamıştır. Şekil 4.1.'de eğme numuneleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1. : Eğme numuneleri

4.1.3. Mikro Sertlik Ölçümleri

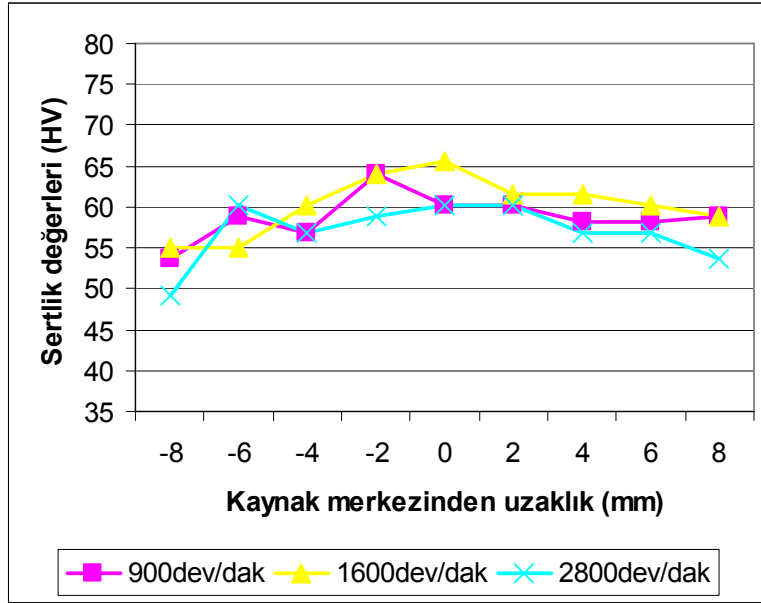
Farklı kaynak parametrelerde birleştirilen numunelerin mikro sertlik ölçümleri kaynak yönüne dik olarak yapılmıştır. Kaynak sırasında birleşme bölgesindeki malzemenin yumuşamasından dolayı ITAB ve birleşme çizgisi arasında genel olarak sertlik azalması olmuştur. Ana malzemenin ortalama sertliği 73 HV değerinde iken kaynak sonrasında ITAB bölgesinde 50 HV'ye

kadar sertlik değerlerinde düşüş olmuştur. Bütün kaynak parametrelerinde en fazla sertlik azalmasının ITAB bölgesinde olduğu görölmüştür.

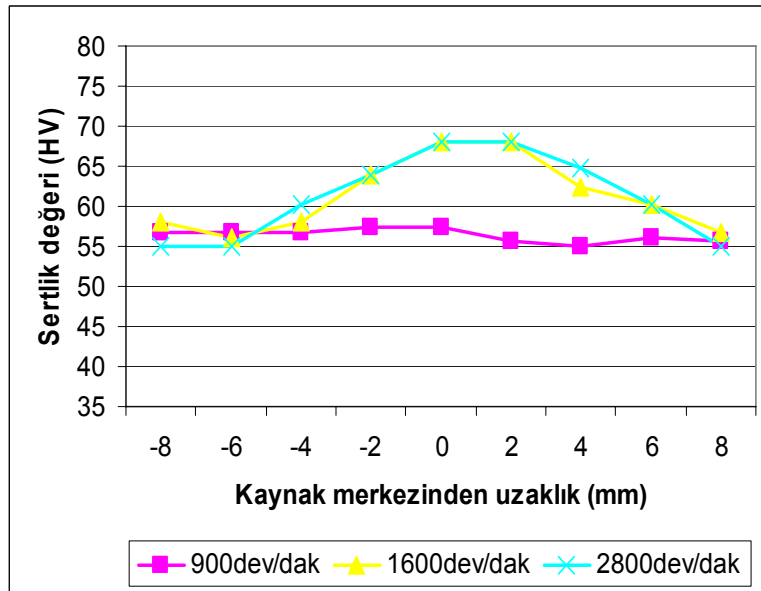
Kaynak parametrelerinin kaynak bölgesindeki sertlik değişimine olan etkisi incelenmiş ve aşağıda belirtilen bulgular elde edilmiştir.

Düşük dönme hızı ile birleştirilen numunelerde kaynak bölgesinde sertliğin fazla değişmediği, orta ve yüksek devirlerde ise kaynak merkezinde sertliğin yeniden kristalleşmeden dolayı ITAB bölgesine göre %15-%20 oranında arttığı görölmüştür. Farklı proses parametrelerinde birleştirilen kaynaklı numunelerin sertlik ölçümleri şekil 4.2.-4.7.'de gösterilmiştir. Kaynak kalınlığındaki ve kaynak kesitindeki sertlik değişimi, 1600 dev/dak ve 100 mm/dak ile birleştirilen kaynaklı numunede incelendiğinde kaynak kalınlığında sertlik değişiminin bölgeler arasında hemen hemen aynı olduğu gözlenmiştir.

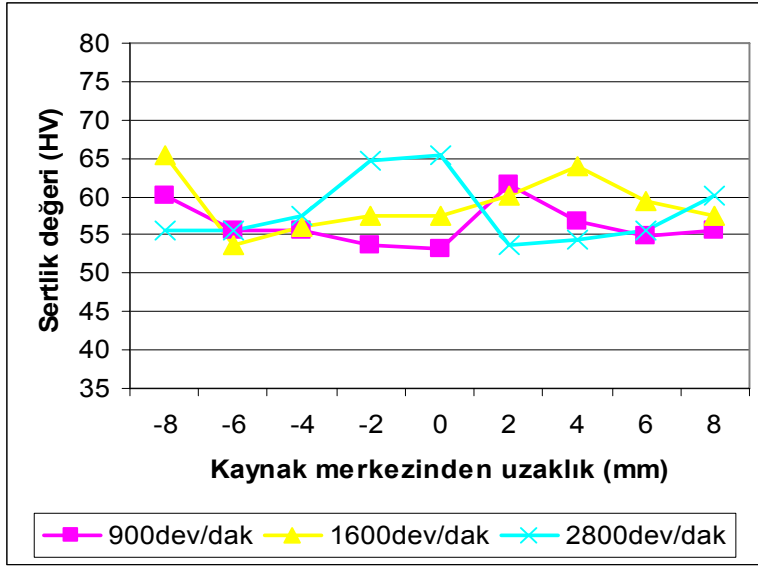
Aynı numunede ITAB ve TMEB geçişinde ise mikro yapı değişiminden dolayı sertlik azalması oluşmuştur. Şekil 4.8.'de kaynak kalınlığındaki ve kaynak kesitindeki sertlik değişimi gösterilmiştir.



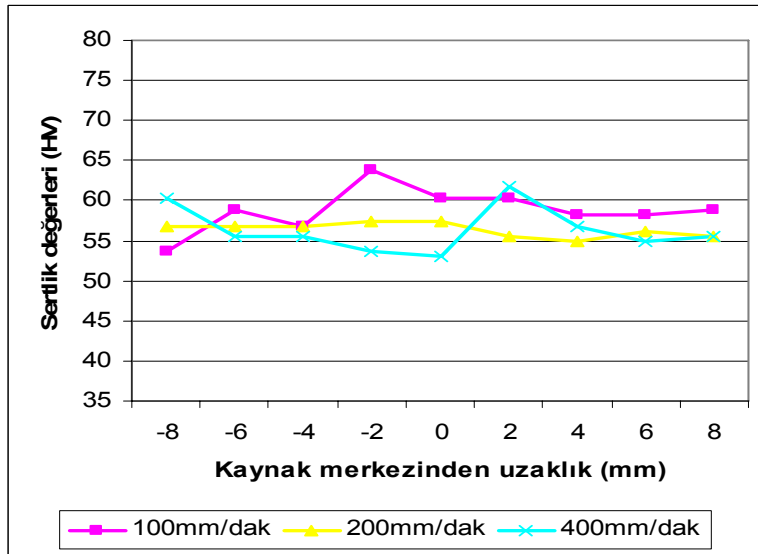
Şekil 4.2. : Sabit ilerleme hızında birleştirilen kaynaklı numuneler (ilerleme hızı=100 mm/dak)



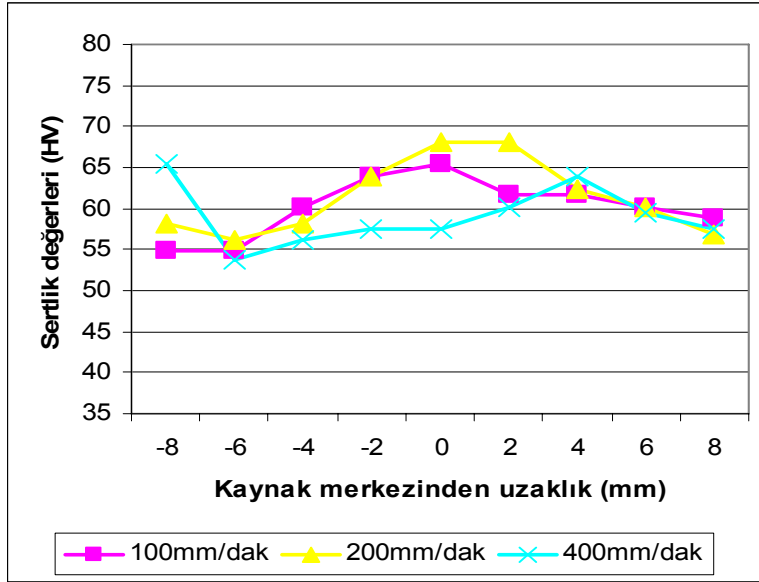
Şekil 4.3. : Sabit ilerleme hızında birleştirilen kaynaklı numuneler (ilerleme hızı=200 mm/dak)



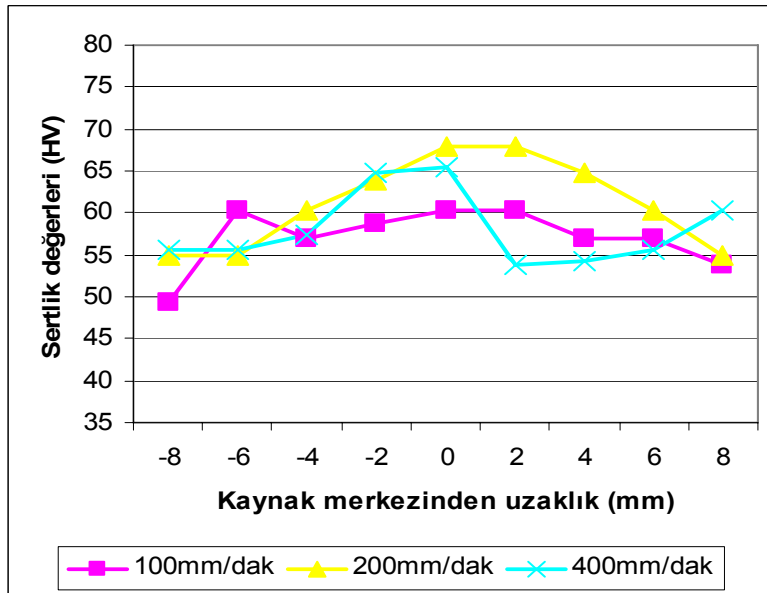
Şekil 4.4. : Sabit ilerleme hızında birleştirilen kaynaklı numuneler (ilerleme hızı=400 mm/dak)



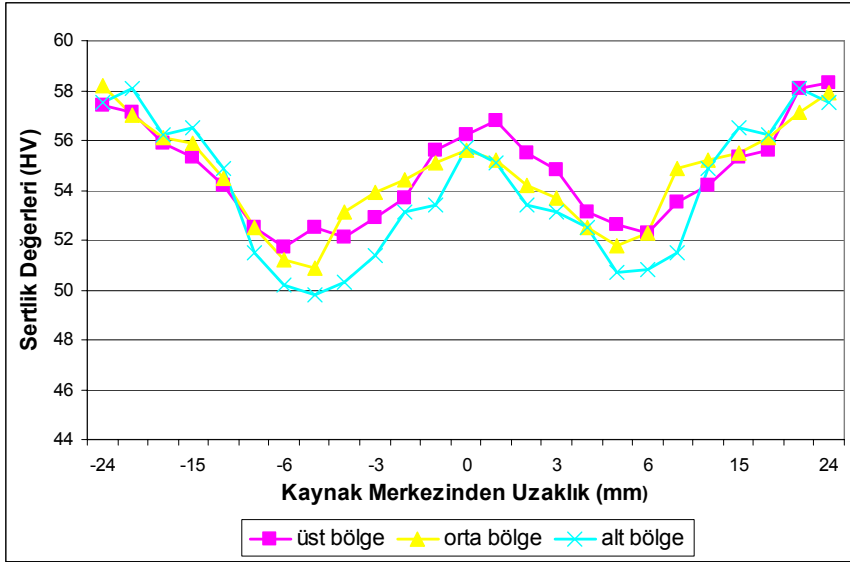
Şekil 4.5. : Sabit dönme hızında birleştirilen kaynaklı numuneler (dönme hızı=900dev/dak)



Şekil 4.6. : Sabit dönme hızında birleştirilen kaynaklı numuneler (dönme hızı=1600dev/dak)



Şekil 4.7. : Sabit dönme hızında birleştirilen kaynaklı numuneler (dönme hızı=2800dev/dak)



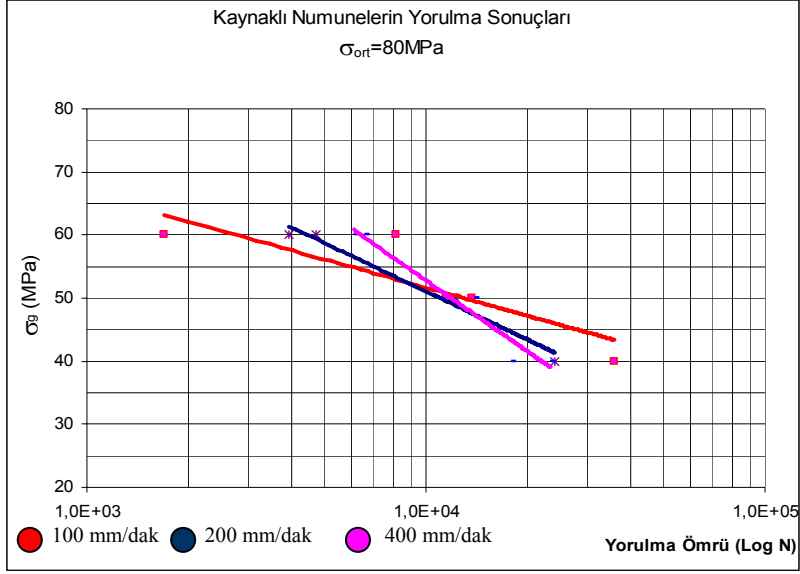
Şekil 4.8. : Kaynak kalınlığındaki ve kaynak kesitindeki sertik değişimi
Kaynak parametresi : 1600 dev/dak ve 100 mm/dak

4.2. Yorulma Testi

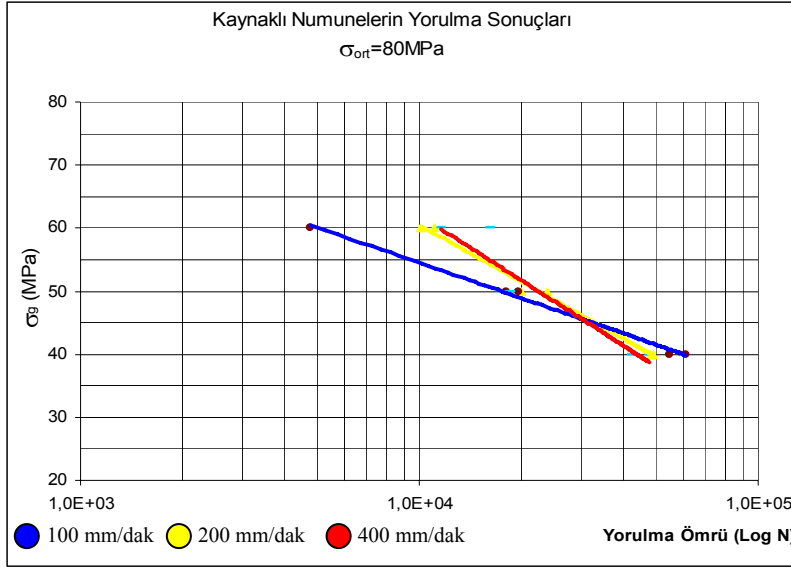
Kaynak parametrelerinin bağlantının dayanımına olan etkisini yorumlamak amacıyla yapılan kısa süreli yorulma testinde, numunelere akma sınırının üzerinde çekme gerilimi uygulanmıştır. Kaynaklı numuneler $\sigma_{ort}=80$ N/mm² çekme gerilimi ile yüklendikten sonra, çekme yönünde azalan gerilim genliğinde (sırasıyla $R_1=0.33$, $R_2=0.23$, $R_3=0.14$), parçalar kopana kadar yorulma testi uygulanmıştır.

Deney sonrasında numuneler incelendiğinde, yüksek dönme hızı ile sürtünme karıştırma kaynağı yapılan numunelerin düşük dönme hızı ile birleştirilen numunelere göre daha geç kırıldığı görülmüştür.

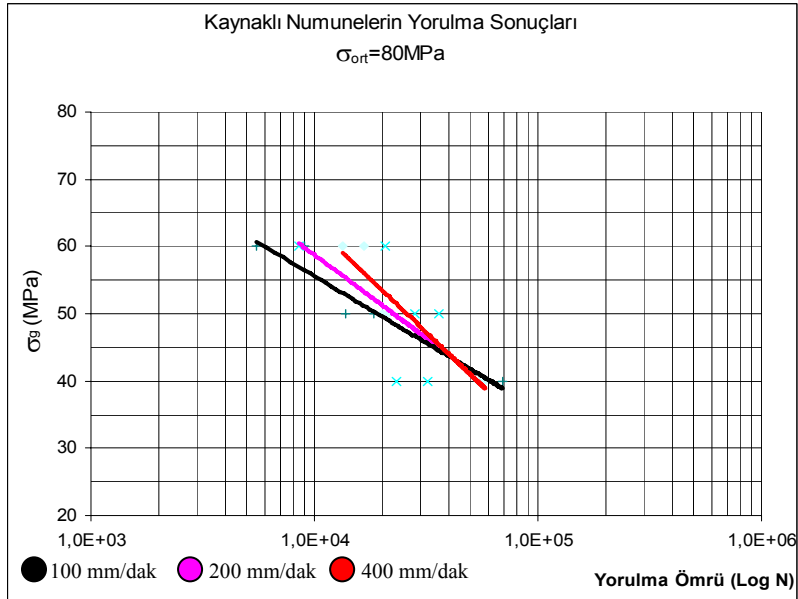
Kırılmaların tamamı kaynak merkezinde gerçekleşmiştir. Farklı kaynak parametrelerde birleştirilen numunelerin yorulma grafikleri şekil 4.9.-4.14.'de gösterilmiştir.



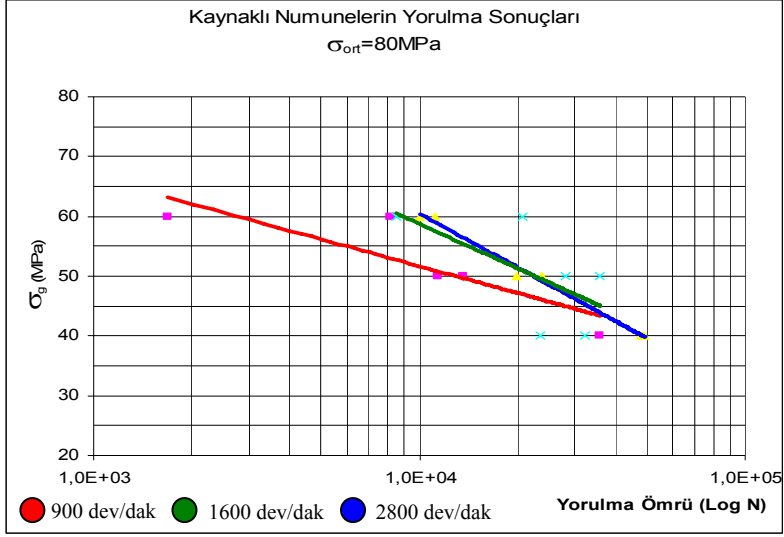
Şekil 4.9. : SKK ile birleştirilen numunelerin sabit dönme hızındaki yorulma test sonuçları (dönme hızı : 900dev/dak)



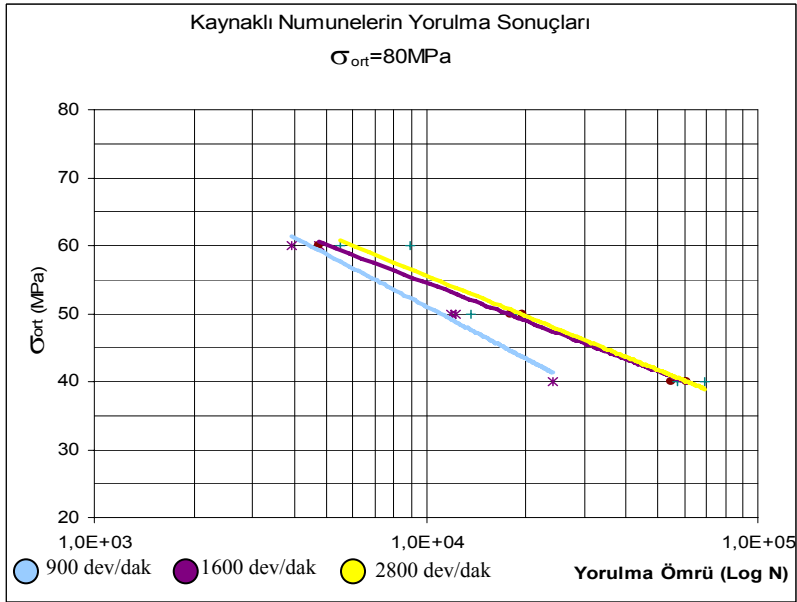
Şekil 4.10. : SKK ile birleştirilen numunelerin sabit dönme hızındaki yorulma test sonuçları (dönme hızı : 1600dev/dak)



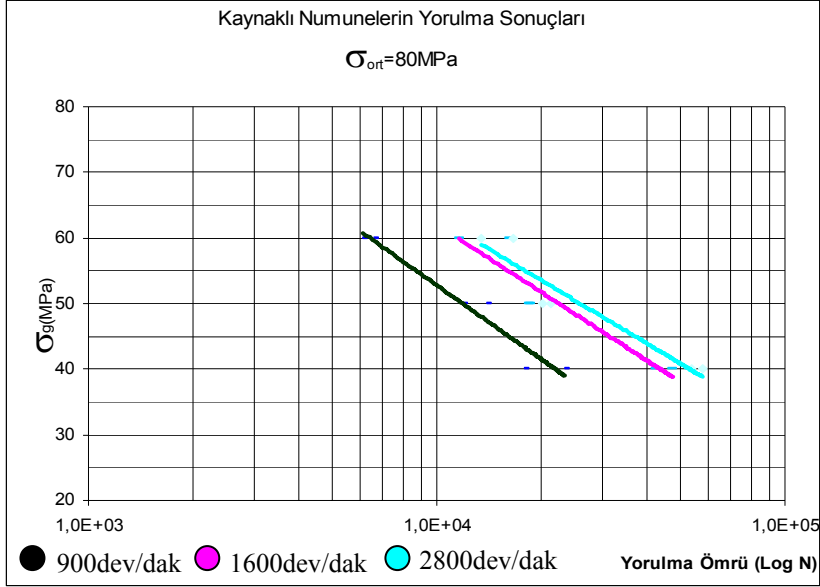
Şekil 4.11. : SKK ile birleştirilen numunelerin sabit dönme hızındaki yorulma test sonuçları (dönme hızı : 2800dev/dak)



Şekil 4.12. : SKK ile birleştirilen numunelerin sabit ilerleme hızındaki yorulma test sonuçları (ilerleme hızı : 100 mm/dak)

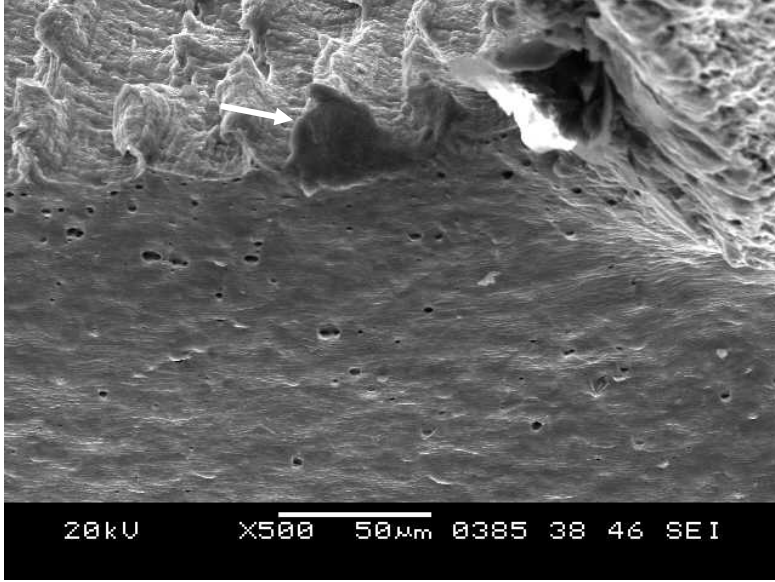


Şekil 4.13. : SKK ile birleştirilen numunelerin sabit ilerleme hızındaki yorulma test sonuçları (ilerleme hızı : 200 mm/dak)

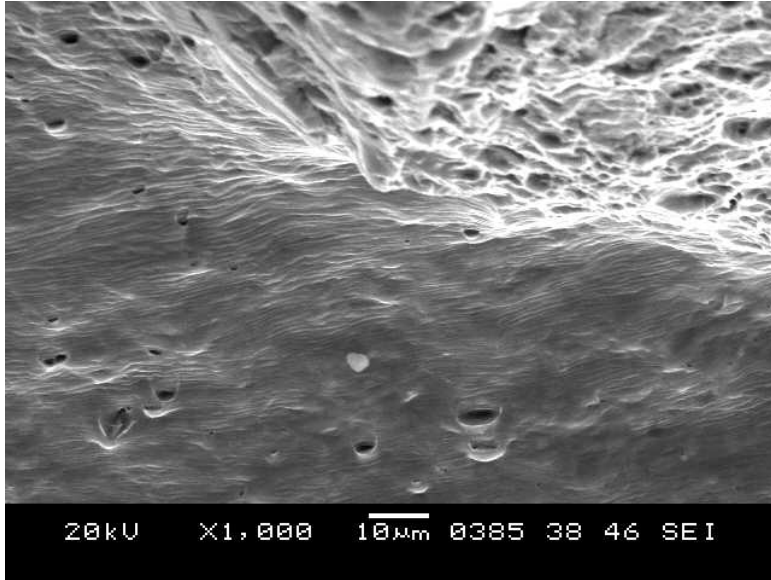


Şekil 4.14. : SKK ile birleştirilen numunelerin sabit ilerleme hızındaki yorulma test sonuçları (ilerleme hızı : 400 mm/dak)

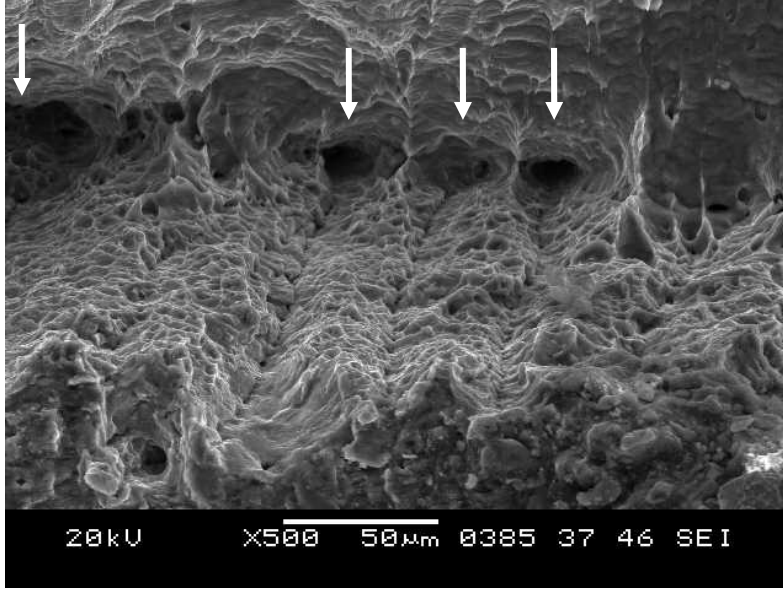
Yorulma numunelerinin kırılma yüzeyleri SEM’de incelendiğinde, kaynak kökündeki yetersiz kaynak nufuziyetinin ve/veya kaynak yüzeyindeki baskı izlerinin çentik etkisi yaparak kırılmanın başlamasına neden olduğu (şekil 4.15) görülmüştür. Düşük gerilme genliklerinde (40MPa) yorulma kırılmasının tane sınırlarında düzenli bir şekilde ilerlediği ve daha sonra parçanın sünek bir şekilde kırıldığı gözlenmiştir (şekil 4.16). Kaynak yönünde oluşan gözeneklerden dolayı, kırılma yüzeylerinde yarıklar oluşmuş (şekil 4.17) ve numune kısa sürede kırılmıştır.



Şekil 4.15:Yorulma kırılması kaynak yüzeyinde oluşan baskı izinden başlamıştır



Şekil 4.16.: Yorulma kırılmasının düzenli ilerleyişi ve sünek kırılmaya geçiş



Şekil 4.17. : Kaynak yönünde oluşan gözeneksi yapı

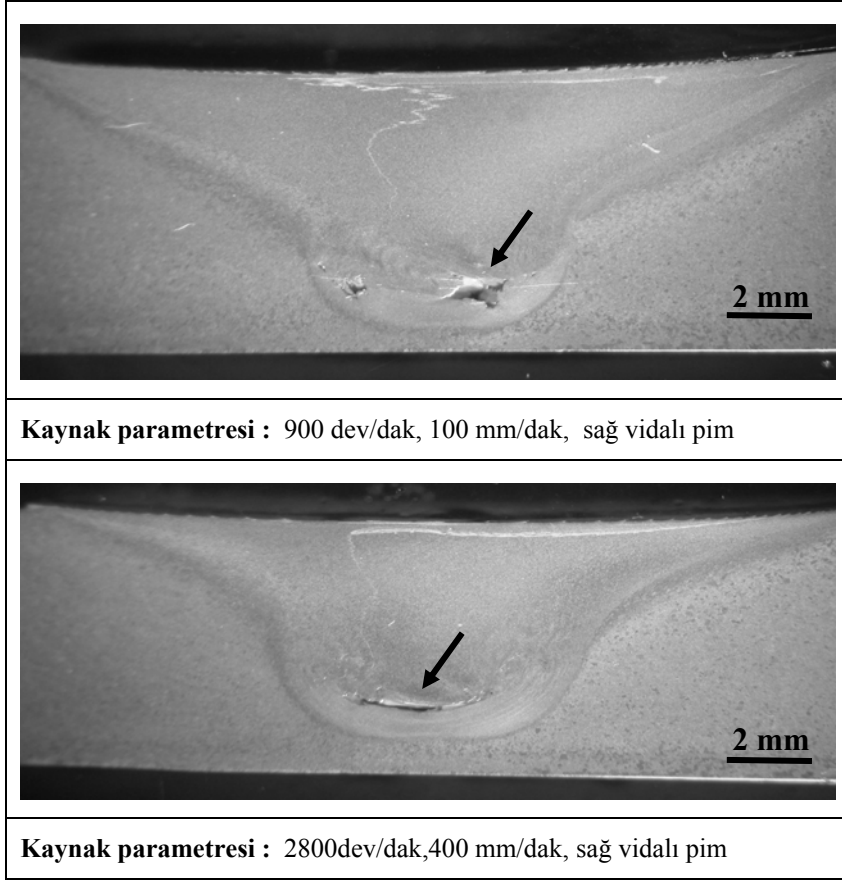
4.3. Kaynaklı Birleştirmelerde Makro Ve Mikro Yapı

İki aşamalı olarak yapılan kaynaklı birleştirmelerde numunelerin makro ve mikro yapıları incelendiğinde aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

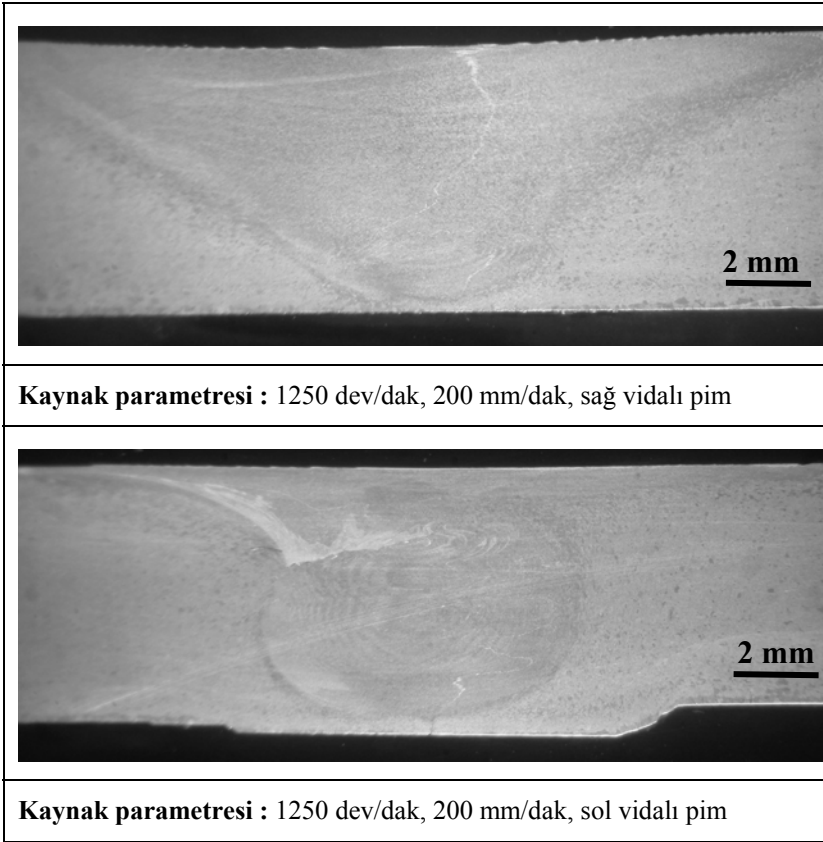
- Düşük dönme ve yüksek ilerleme hızlarında kaynak bölgesinde gözenekli yapı oluşmuştur.
- Kaynak parametrelerine bağlı olarak güçlü ve zayıf soğansı yapı oluşmuştur.
- Kaynak parametrelerine ve kullanılan karıştırıcı uç tasarımına bağlı olarak kaynak kökünde farklı boyutlarda birleşme hatası oluşmuştur.

- DYK bölgesinde yeniden kristalleşme ile tane yapısını küçüldüğü ve tanelerin dönme yönüne bağlı olarak yönlendiği gözlenmiştir.

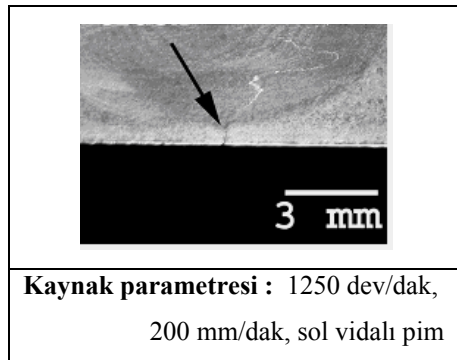
Kaynak kesitlerindeki makro ve mikro yapı ile ilgili gözlemler şekil 4.18.-4.21.'de gösterilmiştir.



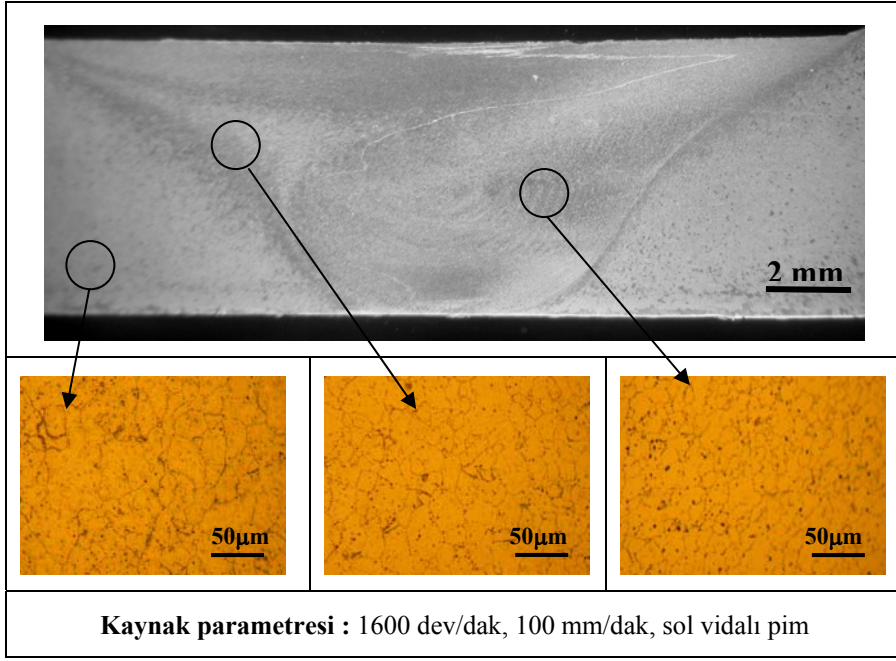
Şekil 4.18. : Kaynak kesitinde oluşan gözenekli yapı



Şekil 4.19. : Farklı kaynak parametrelerde oluşan soğansı yapı



Şekil 4.20. : Kaynak kökünde birleşme yetersiz

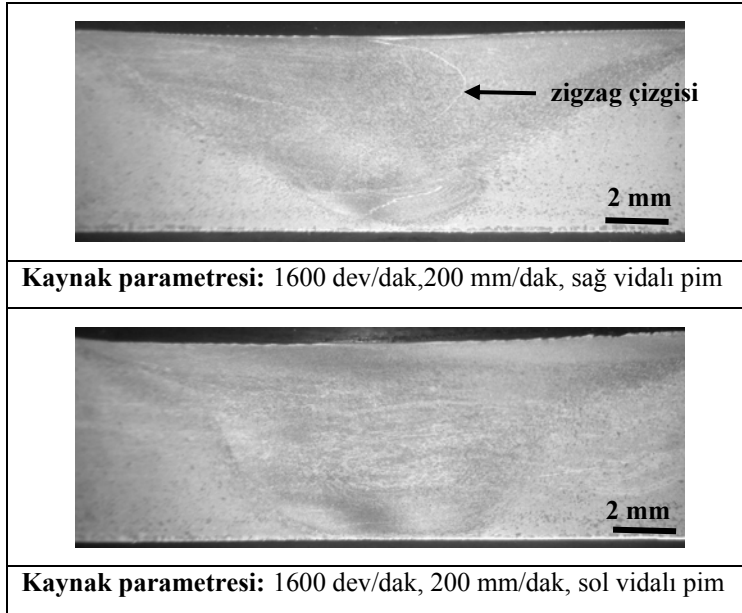


Şekil 4.21. : SKK' da kaynak kesitinde tane yapısının değişimi

4.4. Çözelti Sertleştirilmesi Ve Yaşlandırma

Birinci ve ikinci aşamada yapılan sürtünme karıştırma kaynağı sonuçları incelendiğinde 1600 dev/dak dönme hızı ile birleştirilen numunelerin, makro-mikro yapısının, çekme mukavemetinin ve kısa süreli yorulma test sonuçlarının, bu çalışmada belirlenen diğer kaynak parametrelerine göre daha iyi olduğu görülmüştür. Bu nedenle 1600 dev/dak dönme ve 100 mm/min ile 200 mm/min ilerleme hızlarında, sağ ve sol vidalı pim ile birleştirilen numunelerde çözelti sertleştirilmesi ve T6 yaşlandırması yapılmıştır.

Kaynak öncesinde plakaların birleştirme yüzeyleri alın altına gelecek şekilde tesviye edilmiştir. Kaynaklı birleştirme sonrasında sağ helisli vida ile birleştirilmiş olan numunelerin çoğunda malzemenin kaynak bölgesindeki hareketine bağlı olarak dinamik yeniden kristalleşme bölgesinde (DYKB) Al_2O_3 tabakası çizgisel bir hat oluşturmuştur. Daha önce yapılan araştırmalarda da rastlanan bu çizgisel yapı “zigzag çizgisi” olarak adlandırılmaktadır. Karıştırıcı uç dışında aynı kaynak parametreleri ile birleştirilen numunelerin kaynak bölgesi incelendiğinde, sağ vidalı pim ile birleştirilen numunelerde kesintisiz zigzag çizgisinin oluştuğu, sol vidalı pim ile birleştirilen numunede ise zigzag çizgisinin daha kısa ve kesintili olduğu veya hiç oluşmadığı görülmüştür. Şekil 4.22’de sağ ve sol vidalı pim ile birleştirilen numuneler karşılaştırılmış ve sağ vidalı pimde oluşan “zigzag çizgisi” gösterilmiştir.

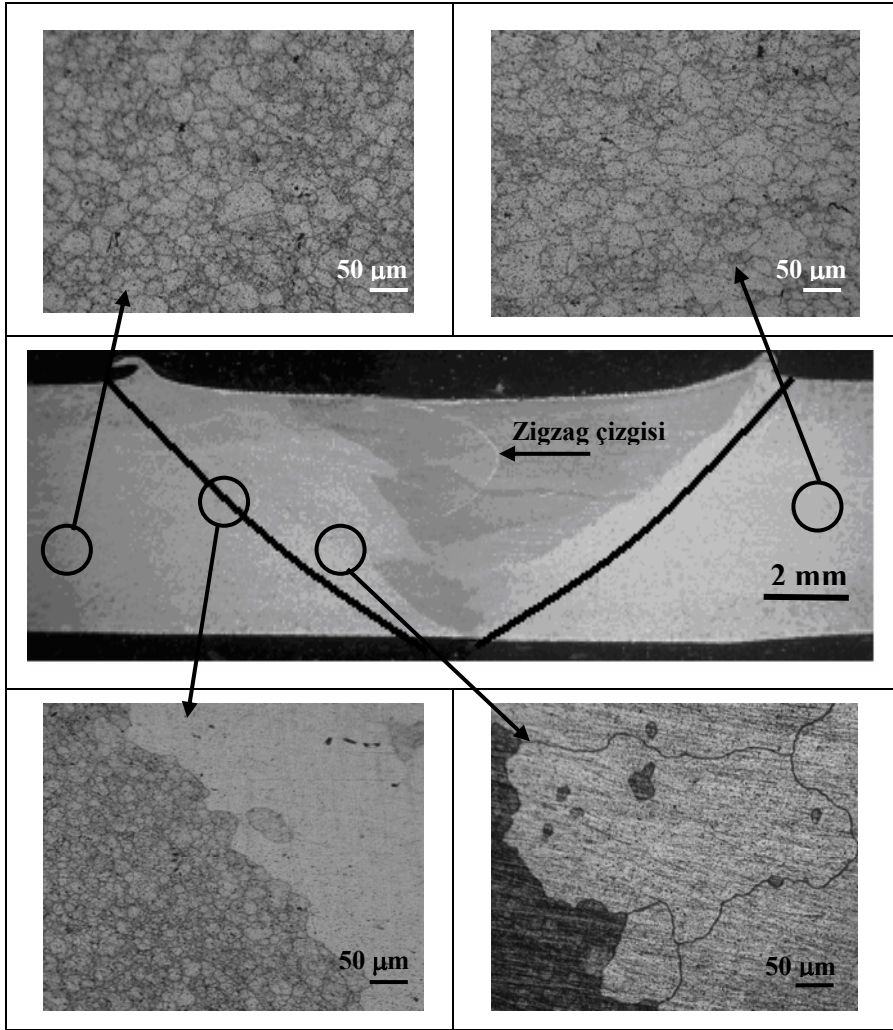


Şekil 4.22. : Kaynak bölgesinde zigzag oluşumu

Çözelti sertleşmesi ve T6 yaşlandırması yapılan numunelerde kaynak bölgesinin makro ve mikro yapısı incelendiğinde TMEB'deki tane yapılarının ana malzemenin tane yapısına göre daha küçük olduğu görülmüştür. Ancak kaynak merkezinde ise yaşlandırma sonrasında tanelerin birleşmesi ile daha büyük tane yapısının oluşmuştur. Şekil 4.23'de çözelti sertleşmesi ve yaşlanma sonrasında kaynak bölgesindeki makro ve mikro yapı değişimi birlikte gösterilmiştir.

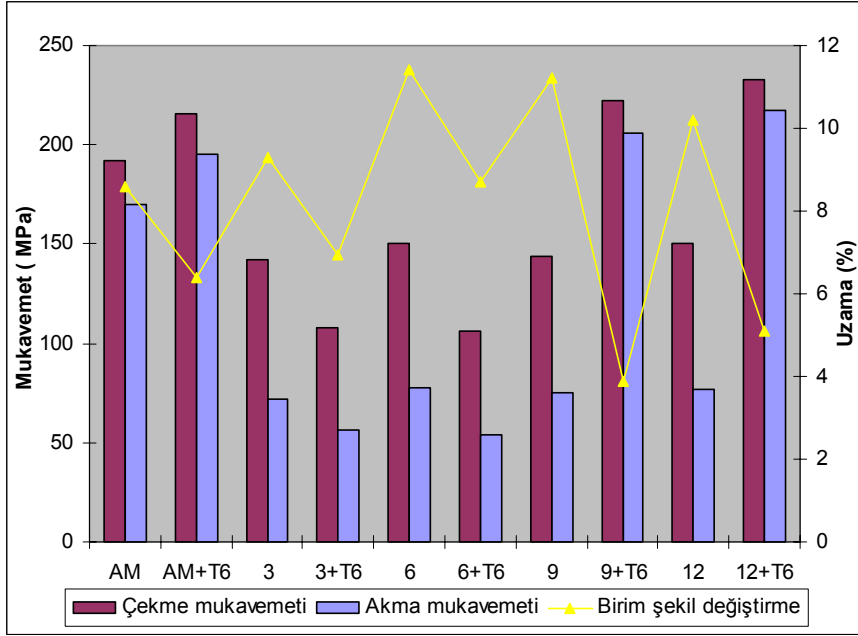
Kaynaklı birleştirme sonrasında yapılan çekme testlerinde zigzag çizgisinin bağlantının dayanımını etkilemediği, ancak kaynaklı birleştirmelere çözelti sertleşmesi ve T6 yaşlandırması uygulandığında kaynak bölgesinde oluşan zigzag çizgisinin etkili olduğu görülmüştür. Şekil 4.24'de AA 6063 ile 1600 dev/dak dönme hızında ve farklı ilerleme hızlarında, sağ ve sol vidalı pimler ile birleştirilen numunelerin mekanik özelliklerindeki değişim gösterilmiştir.

Çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlanması sonrasında sol vidalı pim ile birleştirilen numunelerin akma ve çekme mukavemet değerlerinin AA 6063' den de iyi olduğu görülmüştür. Çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlanması yapılan numunelerin kırılma yüzeyleri incelendiğinde, sağ vida ile birleştirilen numunelerin kırılma yüzeylerinde yarıklar oluşurken, sol vida ile birleştirilen numunelerde ise ilerleme yönüne bağlı olarak kademeli gevrek kırılma oluşmuştur. SEM incelemeleri şekil 4.25.-4.29'da gösterilmiştir.



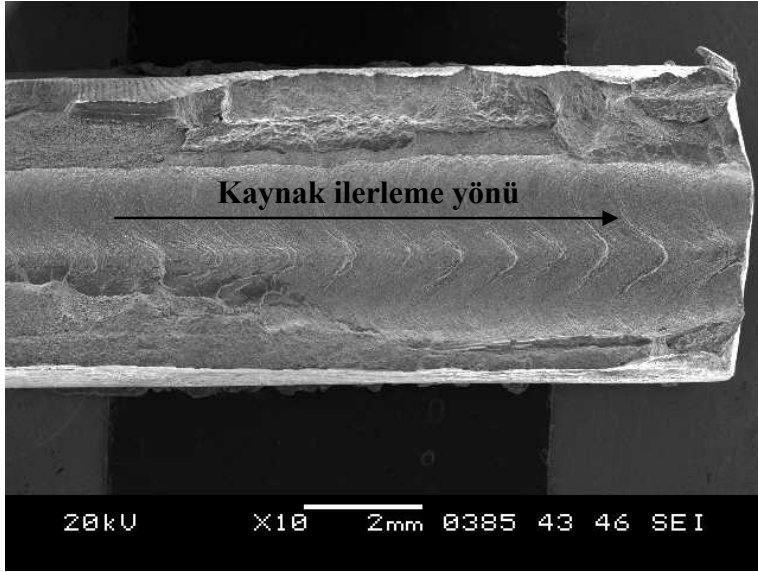
Şekil 4.23 : Çözelti sertleşmesi ve T6 yaşlandırması sonrasında makro ve mikro yapı değişimi

Kaynak parametresi : 1600 dev/dak ve 200mm/min hızda, sağ vidalı pim



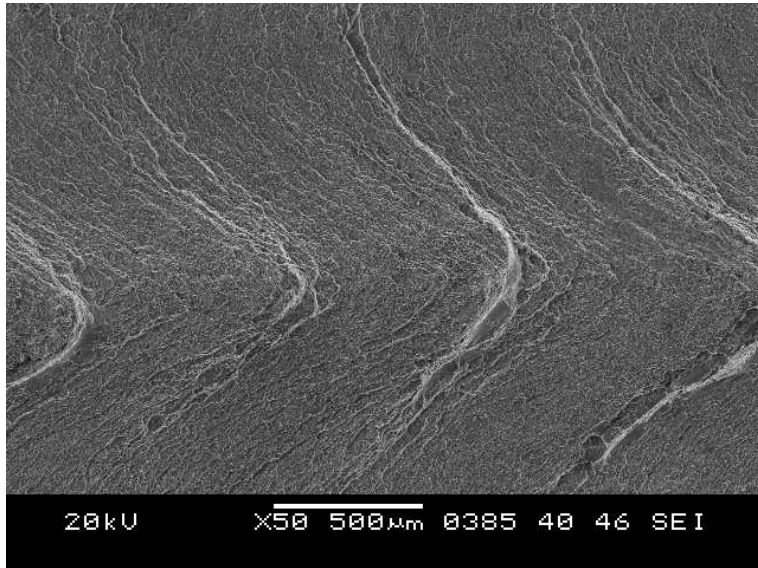
Şekil 4.24. : Ana malzeme ve kaynaklı numunelerin T6 yaşlanma öncesinde ve sonrasındaki mekanik özellikleri

AM	Ana malzeme AA 6063 ;
AM + T6	T6 yaşlandırması yapılmış ana malzeme AA 6063
3	1600 dev/dak ve 100mm/min hızda, sağ vidalı pim ile kaynatılan numune
3 + T6	1600 dev/dak ve 100mm/min hızda, sağ vidalı pim ile kaynatılan ve T6 yaşlandırması yapılmış numune
6	1600 dev/dak ve 200mm/min hızda, sağ vidalı pim ile kaynatılan numune
6 + T6	1600 dev/dak ve 200mm/min hızda, sağ vidalı pim ile kaynatılan ve T6 yaşlandırması yapılmış numune
9	1600 dev/dak ve 100mm/min hızda, sol vidalı pim ile kaynatılan numune
9 + T6	1600 dev/dak ve 100mm/min hızda, sol vidalı pim ile kaynatılan ve T6 yaşlandırması yapılmış numune
12	1600 dev/dak ve 200mm/min hızda, sol vidalı pim ile kaynatılan numune
12 + T6	1600 dev/dak ve 200mm/min hızda, sol vidalı pim ile kaynatılan ve T6 yaşlandırması yapılmış numune



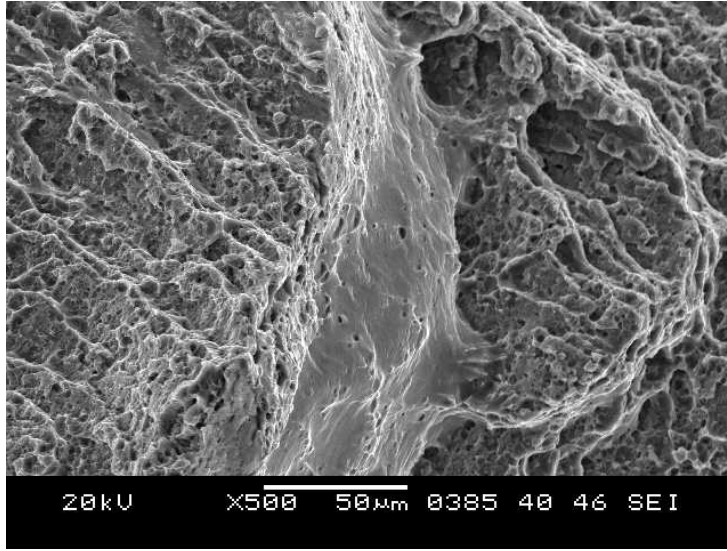
Şekil 4.25.: Çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlanması yapılan numunenin kırılma yüzeyi (X10)

Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 200mm/min, sol vidalı pim



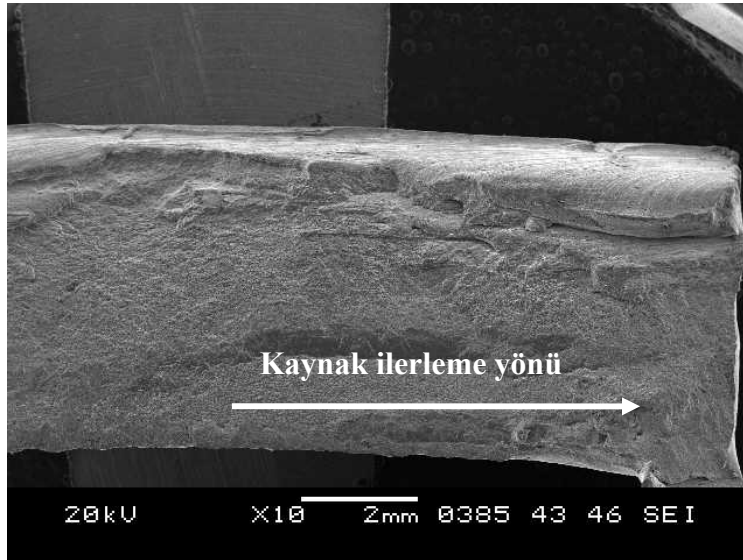
Şekil 4.26.: Çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlanması yapılan numunenin kırılma yüzeyi (X50)

Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 200mm/min, sol vidalı pim



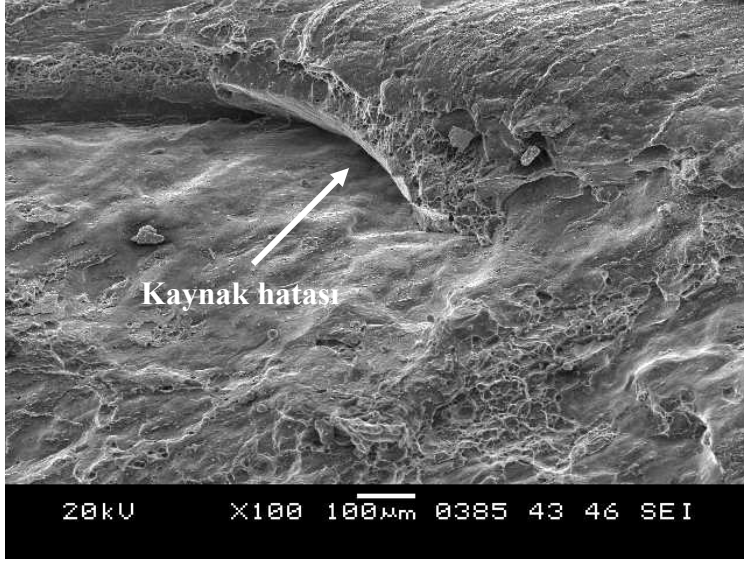
Şekil 4.27.: Çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlanması yapılan numunenin kırılma yüzeyi (X500)

Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 200mm/min, sol vidalı pim



Şekil 4.28.: Çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlanması yapılan numunenin kırılma yüzeyi (X10)

Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 200mm/min, sağ vidalı pim



Şekil 4.29. : Çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlanması yapılan numunenin kırılma yüzeyi (X100)

Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 200mm/min, sağ vidalı pim

5. SONUÇLAR VE İRDELEMELER

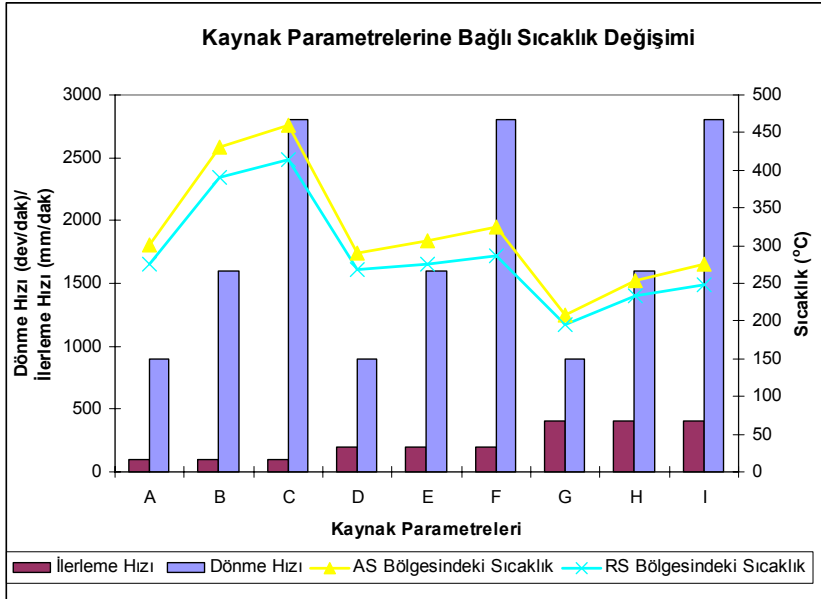
Bu çalışmada 5 mm kalınlığındaki AA 6063 (AlMgSi0.5) alüminyum alaşımı farklı kaynak parametreleri ile birleştirilmiştir. Kaynak prosesi sırasında karıştırıcı ucun baskı kuvveti sabit tutulurken, pim yapısı, dönme ve ilerleme hızları kaynak değişkenleri olarak belirlenmiştir. Araştırmada kaynak parametrelerinin mikroyapı ve kaynak mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonrasında aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

1. Birleştirilecek olan plakaların yüzey temizliği yapıldıktan sonra özel bir aparat yardımı ile alın altına gelecek şekilde bağlanarak başarılı bir şekilde sürtünme karıştırma kaynağı gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirme sonrasında plakalarda herhangi bir çarpılma ve deformasyon oluşmamıştır.
2. Farklı kaynak parametresi ile birleştirilen 12 numuneye eğme testi uygulandığında numunelerden sadece birinde kaynak bölgesinde kırılma oluşmuştur. Kırılan numune incelendiğinde bağlantı yüzeyinde kademe olduğu görülmüştür.
3. Sürtünme karıştırma kaynağında karıştırıcı ucun dönme ve ilerleme hızı kadar, karıştırıcı ucun yapısı da bağlantının mukavemeti açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada iki aşamalı gerçekleştirilen sürtünme karıştırma kaynağının ilk

aşamasında % 69,5 olan kaynak mukavemeti*, ikinci aşamada yapılan optimizasyon çalışmaları sonucu konik pimin vida derinliği pim boyunca sabit tutularak % 78'e çıkarılmıştır.

4. Sürtünme karıştırma kaynağında proses sırasında iş parçası ve karıştırıcı uç arasındaki ısı girdisi, kaynak bölgesinin şekillenmesinde ve parçaların birleşmesinde oldukça önemlidir. Yapılan deneysel çalışmada kaynak parametrelerine bağlı olarak birleşme bölgesindeki sıcaklık değişimi ölçülmüştür. Dönme ve ilerleme yönünün aynı olduğu “AS” bölgesindeki sıcaklık artışının, dönme ve ilerleme yönünün ters olduğu “RS” bölgesine göre daha fazla olduğu görülmüştür. Şekil 5.1.'de kaynak parametrelerine bağlı sıcaklık değişimi gösterimiştir.
5. Düşük dönme ve yüksek ilerleme hızlarında iş parçasındaki sıcaklık girdisinin yetersiz olması, kaynak bölgesinde gözenekli bir yapı oluşmasına neden olmuştur.

*) Kaynak mukavemeti = SKK numunesinin çekme mukavemeti /
ana malzemenin çekme mukavemeti

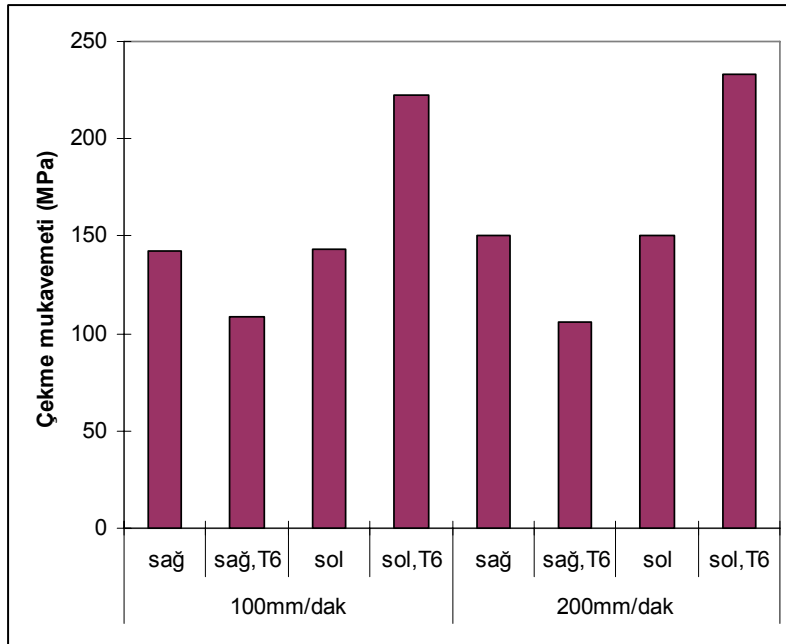


Şekil 5.1. : Kaynak parametrelerine bağlı sıcaklık değişimi

6. Çekme testi sonrasındaki kırılmaların %94 ITAB bölgesinde olmuştur. ITAB bölgesindeki kırılmalar kendi arasında incelendiğinde ise, kırılmaların % 64'ü "AS" bölgesinde olduğu görülmüştür.
7. Bu çalışmanın ikinci aşamasında iki farklı karıştırıcı uç kullanılmıştır. Kaynak prosesi sırasında sağ ve sol helisli karıştırıcı uçların helis açısı, ısı ile yumuşayan malzemenin akışında önemli rol oynamıştır. Sağ vidalı pim ile gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerde kaynak bölgesinde malzeme hareketi aşağıdan yukarı doğru, sol vidalı pimlerde ise bu hareket yukarıdan aşağıya doğru gerçekleşmiştir. Bunun sonucunda sağ vidalı pim ile birleştirilen numunelerde kaynak

yüzeyinin, sol vida ile birleştirilen numunelere göre daha çapaklı olduğu görülmüştür.

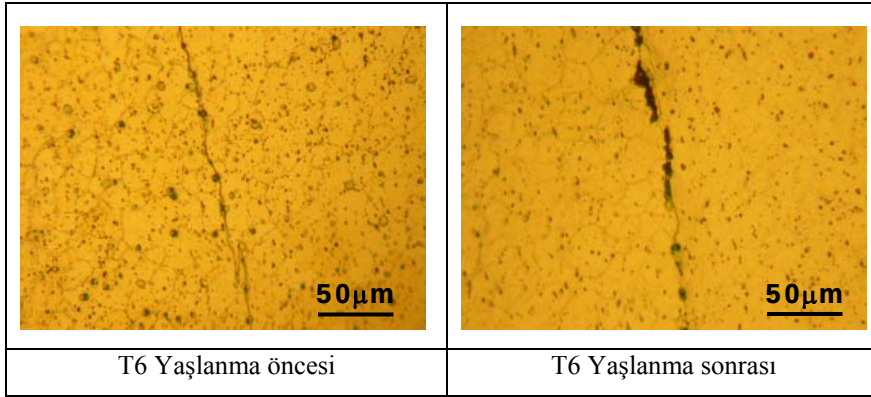
8. Kaynak parametreleri değiştirilmeden sağ ve sol helisli karıştırıcı uç ile birleştirilen numunelerin çekme test sonuçlarının hemen hemen aynı olduğu, ancak çökelti sertleşmesi ve yaşlanma sonrasında sol helisli karıştırıcı uç ile birleştirilen numunelerin çekme mukavemetlerinin oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Sağ ve sol helisli karıştırıcı uç ile birleştirilen numunelerin T6 yaşlanma öncesinde ve sonrasındaki çekme test sonuçları Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. : T6 yaşlanma öncesinde ve sonrasındaki çekme test sonuçları

Kaynak parametreleri : dönme hızı 1600 dev/dak,
ilerleme hızı 100 ve 200 mm/dak

9. Kısa süreli yorulma testinde düşük dönme hızı ile birleştirilen numuneler, orta ve yüksek dönme hızı ile birleştirilen numunelerden daha erken kırılmıştır. Numunelerin kırılma yüzeyleri SEM’ de incelendiğinde, kaynak kökündeki yetersiz birleşme ve kaynak yüzeyindeki kaynak ilerleme izleri çentik etkisi yaparak numunelerin daha kısa sürede kırılmasına neden olmuştur.
10. En iyi yorulma test sonuçlarının 1600 dev/dak ve 2800 dev/dak dönme hızında birleştirilen kaynaklı numunelerde elde edilmiştir. Ancak ana malzeme ile kaynaklı numunelerin yorulma ömrü karşılaştırıldığında, kaynaklı numunelerin yorulma ömrünün % 40 oranında azaldığı görülmüştür.
11. Sağ ve sol helisli karıştırıcı uç ile birleştirilen numunelerin makro ve mikro yapıları incelendiğinde, sağ helisli karıştırıcı uç ile birleştirilen numunelerin kaynak merkezinde Al_2O_3 tabakasının kesintisiz bir “zigzag çizgisi” oluşturduğu, yaşlandırma sonrasında ise bu “zigzag çizgisi” etrafındaki gözeneksi yapının arttığı görülmüştür. Bunun sonucunda sağ helisli karıştırıcı uç ile birleştirilen numunelerin yaşlandırma sonrasında mekanik mukavemet değerlerinde azalma olmuştur. Yaşlanma öncesindeki ve sonrasındaki mikroyapı değişikliği şekil 5.3.’de gösterilmiştir (Kaynak Parametresi:1600 dev/dak, 100 mm/min, sağ helisli uç).



Şekil 5.3. : Yaşlanma öncesindeki ve sonrasındaki mikro yapıdaki değişim
Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 100 mm/min ve sağ helisli uç

12. Çözelti sertleştirmesi ve yaşlandırma sonrasında kaynak kesitinin makro ve mikro yapısı incelendiğinde, yaşlandırma sonrasında kaynak bölgesindeki küçük taneler birleşerek iri taneli yapıyı oluşturduğu görülmüştür (bkz .şekil : 4.23).

6. ÖNERİLER

1. Sürtünme karıştırma kaynağı kolay bir birleştirme prosesi olmasına rağmen, kaynak bölgesindeki ısı dağılımı, kalıntı gerilimlerinin oluşumu, birleşme bölgesindeki malzeme hareketi ve mikro yapı oluşumu gibi konular oldukça karmaşıktır. Sürtünme karıştırma prosesinin daha iyi anlaşılabilmesi için deneysel bazı çalışmalar matematik modellemeler ile desteklenmektedir. Bu deneysel çalışmadan faydalanarak geliştirilecek bir matematiksel model yardımı ile, farklı et kalınlıklarındaki AA 6063 alüminyum alaşımı için kaynak parametreleri optimize edilebilir.
2. Sürtünme karıştırma kaynağının endüstriyel uygulamalarının ülkemizde de yaygınlaşmasını sağlamak için, bilhasa 5XXX ve 7XXX serisi Al alaşımlarının kullanıldığı gemi ve uçak sanayisinde üniversite sanayi işbirliği kapsamında projeler geliştirmek gerekir.
3. Konvansiyonel kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi güç olan Cu ve Ti gibi malzemelerin alaşımları, sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi gerçekleştirilerek nükleer enerji üretim alanlarında da uygulama alanları yaratılabilir.
4. Kısmi kristal plastik malzemelerin kimyasal yöntemlerle yapıştırılması mümkün değildir, bu malzemelerde birleştirme ya

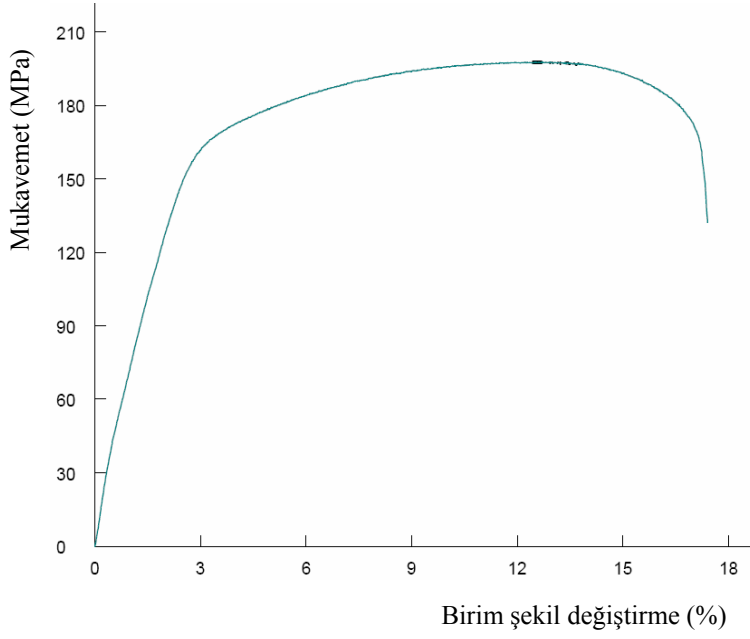
sıcak yapıştırma veya ultrasonik kaynak yöntemi ile gerçekleştirilmektedir. UHMW-HDPE gibi mühendislik plastiklerinde de sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili araştırmalar yapılarak, kısmi kristal malzemeler için farklı birleştirme yöntemleri geliştirilebilir.

5. Yeni kaynaklı birleştirme yöntemlerinden biri olan sürtünme karıştırma kaynağı ile ilgili kalite kontrol sistemlerinin de tanımlanması ve geliştirilmesi gerekir. Ancak kalite kontrol sistemleri geliştirilmiş olan prosesler endüstride etkili uygulama alanı bulabilir.
6. Sürtünme karıştırma kaynağında en önemli kaynak parametrelerinden biri karıştırıcı ucun geometrisi ve yapısı, bu konuda sınırlı çalışma yapılmıştır. Firmaların yapmış oldukları araştırmalara ise gizlilik kapsamında olduğu için ulaşılamamaktadır. Karıştırıcı ucun omuz ve pim yapısının geometrisi ve tasarımı üzerine araştırma yapılarak, farklı kalınlıklarda ve kompozisyondaki malzemeler için universal karıştırıcı uç geliştirilebilir.
7. Karıştırıcı ucun aşınma dayanımını artırmak için farklı yüzey proseslerinin aşınma dayanımına etkisi araştırılarak, uzun süre dayanabilen karıştırıcı uçlar geliştirilebilir.

8. Isı iletim katsayısı yüksek olan malzemeler (Cu alaşımları) ile ergime sıcaklığı yüksek olan malzemelerde (Ti alaşımları) ön ısıtmanın sürtünme karıştırma kaynağındaki etkisi araştırılarak kaynak hızları artırılabilir.

7. EKLER

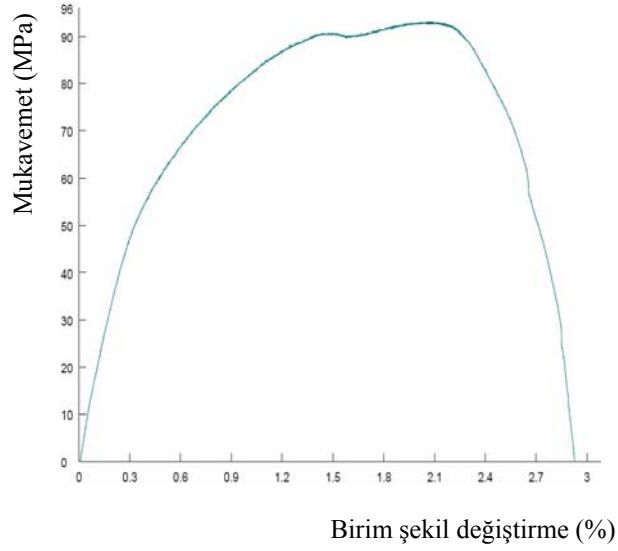
7.1. Ana Malzemenin Mukavemet ve Birim Şekil Değiştirme Grafiği



Ek 7.1.: AA 6063 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri

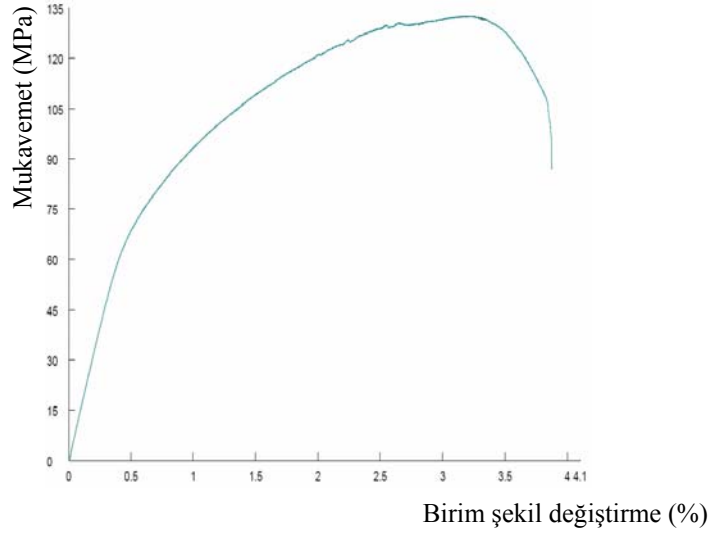
7.2. Kaynaklı Numunelerin Mukavemet & Birim Şekil Değiştirme Grafiği

7.2.1. Birinci Denemesi Sonrasında Kaynaklı Numunelerin Mukavemet & Birim Şekil Değiştirme Grafikleri



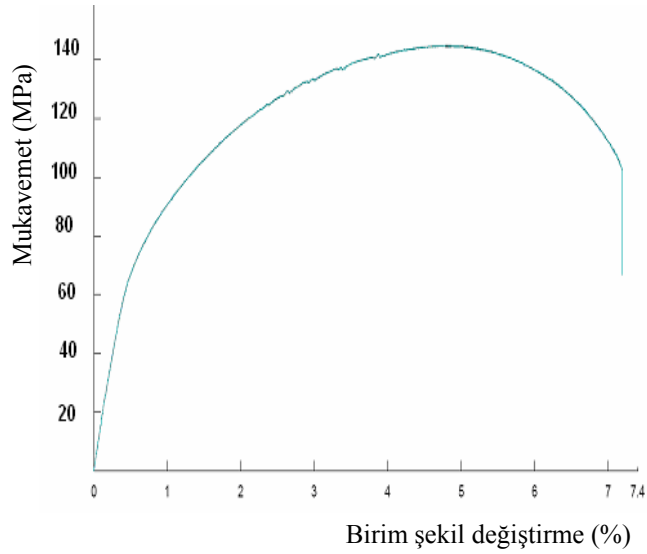
Ek 7.2.1.1.: AA 6063 alüminyum alaşımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

Kaynak parametresi : 900 dev/dak, 100 mm/dak



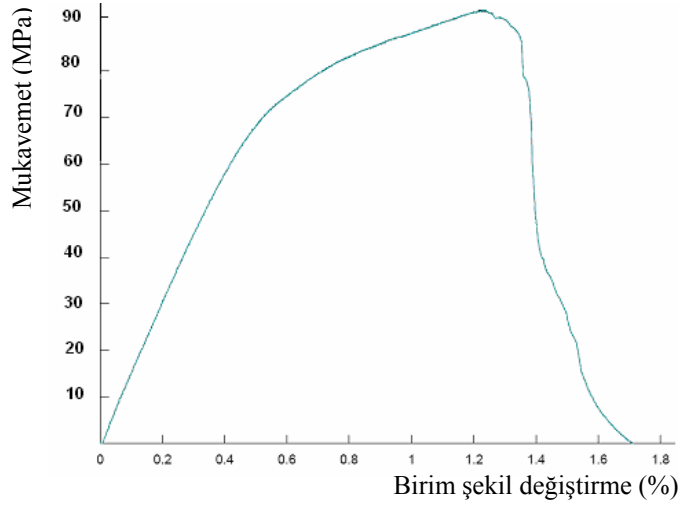
Ek 7.2.1.2.: AA 6063 alüminyum alaşıımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 100 mm/dak



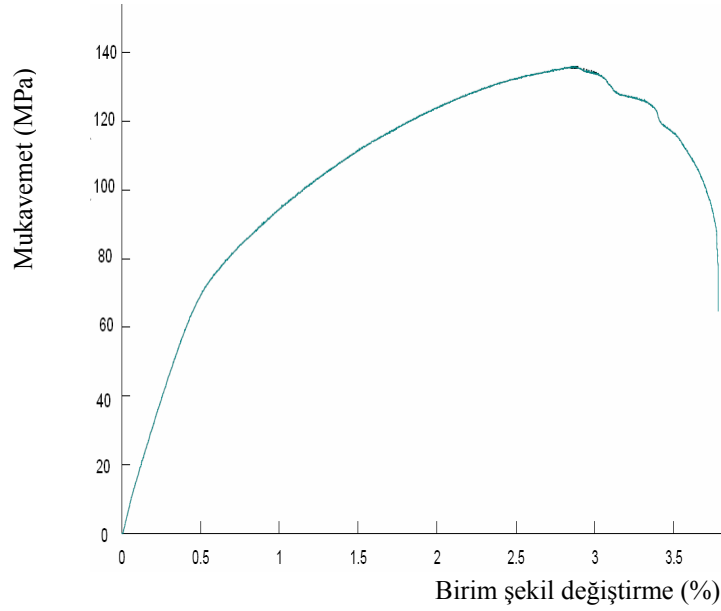
Ek 7.2.1.3.: AA 6063 alüminyum alaşıımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

Kaynak parametresi : 2800 dev/dak, 100 mm/dak



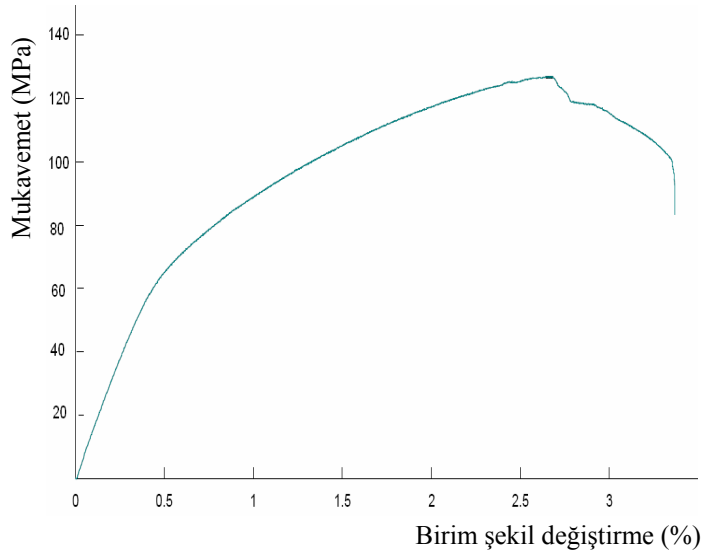
Ek 7.2.1.4.: AA 6063 alüminyum alaşımasının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

Kaynak parametresi : 900 dev/dak, 200 mm/dak

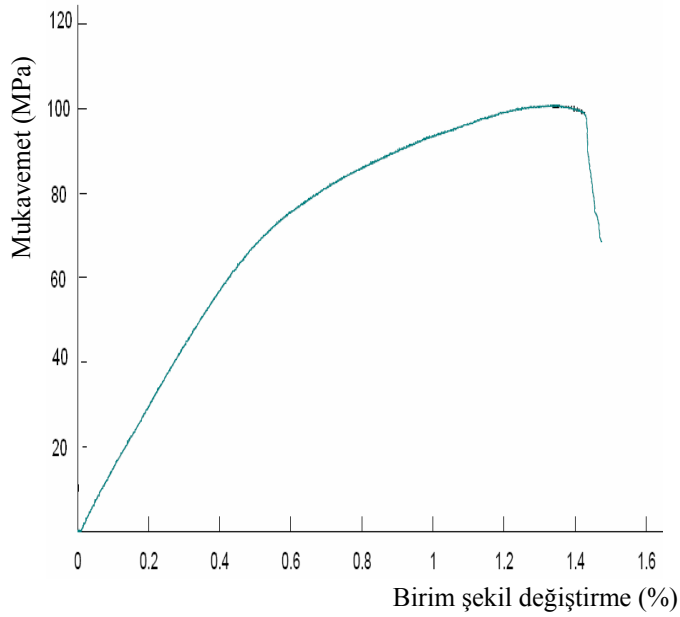


Ek 7.2.1.5.: AA 6063 alüminyum alaşımasının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

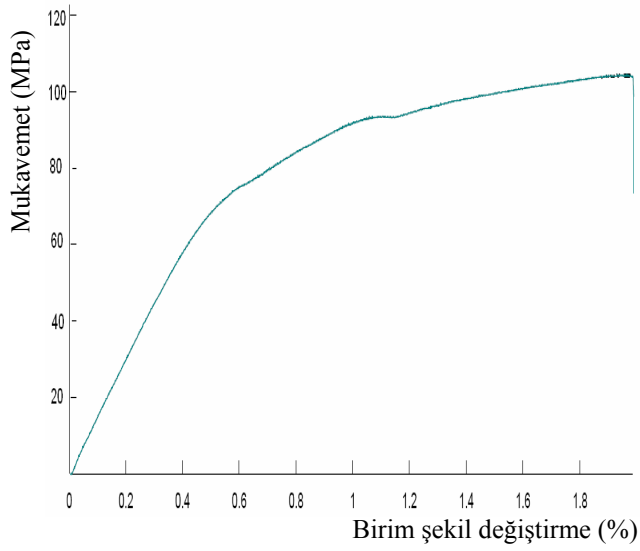
Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 200 mm/dak



Ek 7.2.1.6.: AA 6063 alüminyum alaşımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri
Kaynak parametresi : 2800 dev/dak, 200 mm/dak

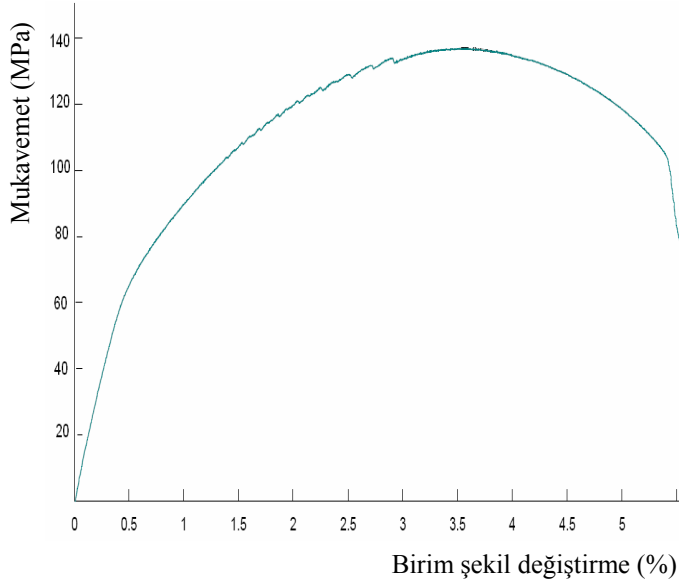


Ek 7.2.1.7.: AA 6063 alüminyum alaşımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri
Kaynak parametresi : 900 dev/dak, 400 mm/dak



Ek 7.2.1.8.: AA 6063 alüminyum alaşımlının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

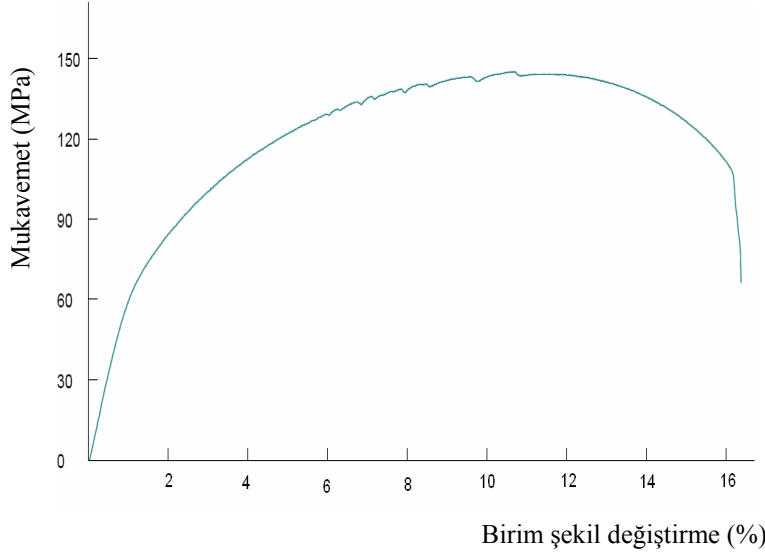
Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 400 mm/dak



Ek 7.2.1.9.: AA 6063 alüminyum alaşımlının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

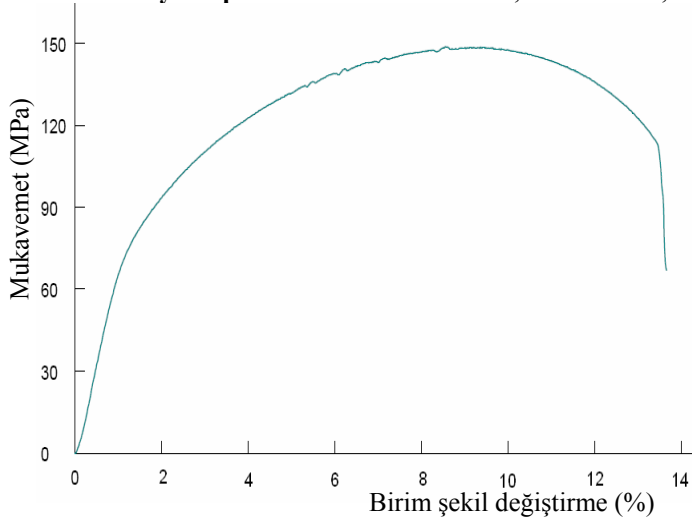
Kaynak parametresi : 2800 dev/dak, 400 mm/dak

7.2.2. İkinci Denemesi Sonrasında Kaynaklı Numunelerin Mukavemet & Birim Şekil Değiştirme Grafikleri



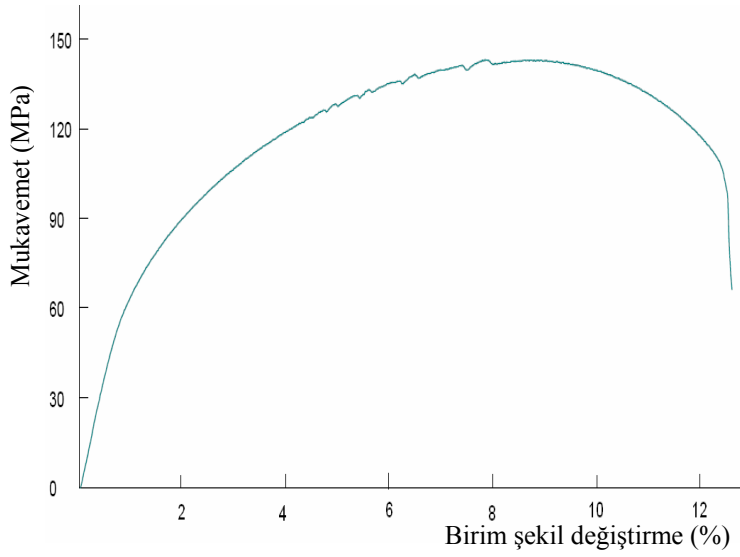
Ek 7.2.2.1.: AA 6063 alüminyum alaşımasının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

Kaynak parametresi : 900 dev/dak, 100 mm/dak, sağ vidalı pim

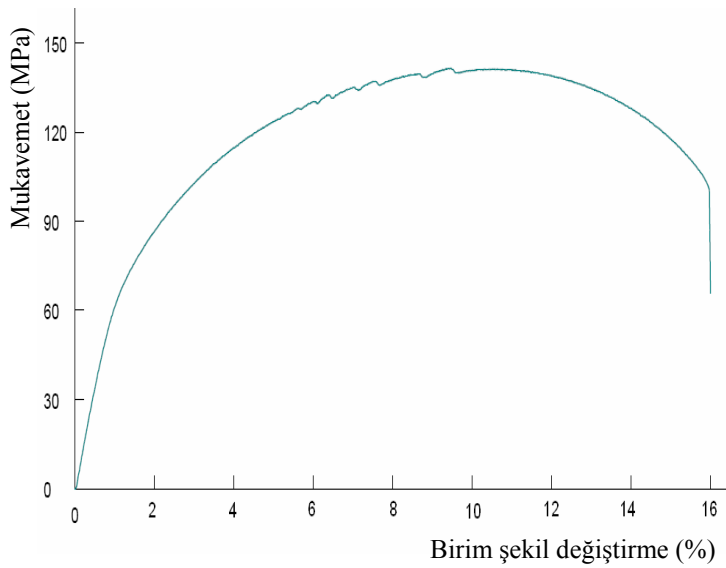


Ek 7.2.2.2.: AA 6063 alüminyum alaşımasının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

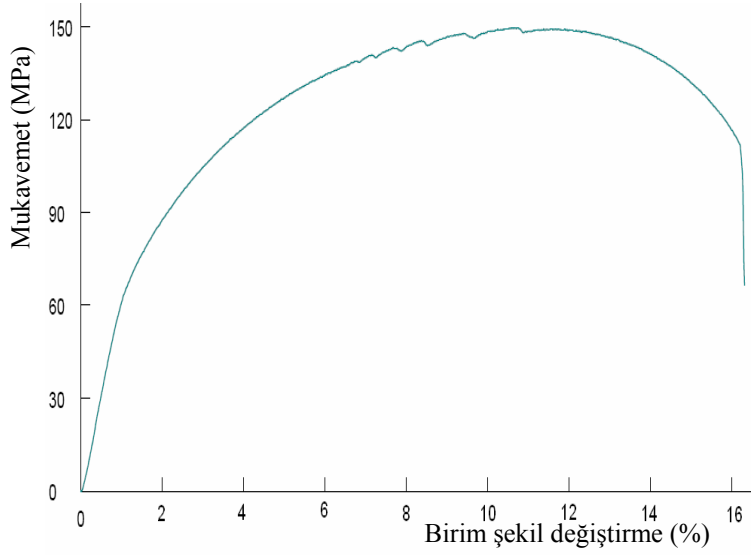
Kaynak parametresi : 1250 dev/dak, 100 mm/dak, sağ vidalı pim



Ek 7.2.2.3.: AA 6063 alüminyum alaşımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri
Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 100 mm/dak, sağ vidalı pim

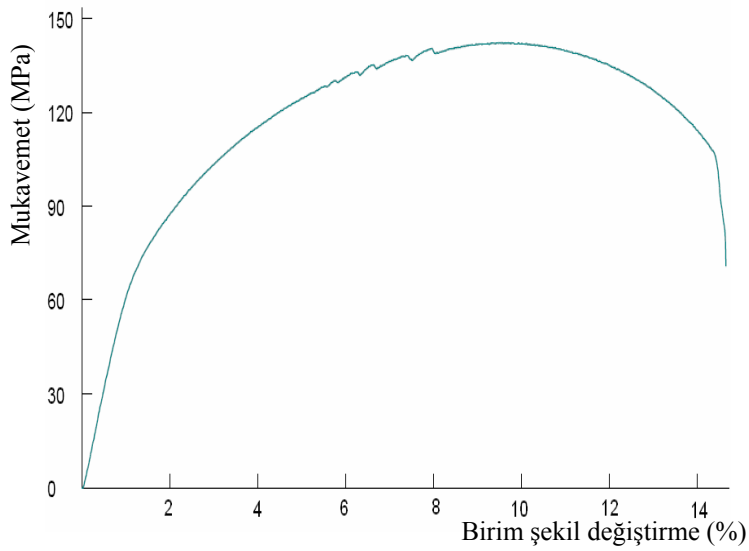


Ek 7.2.2.4.: AA 6063 alüminyum alaşımının SKK sonrasındaki mekanik özellikler
Kaynak parametresi : 900 dev/dak, 200 mm/dak, sağ vidalı pim



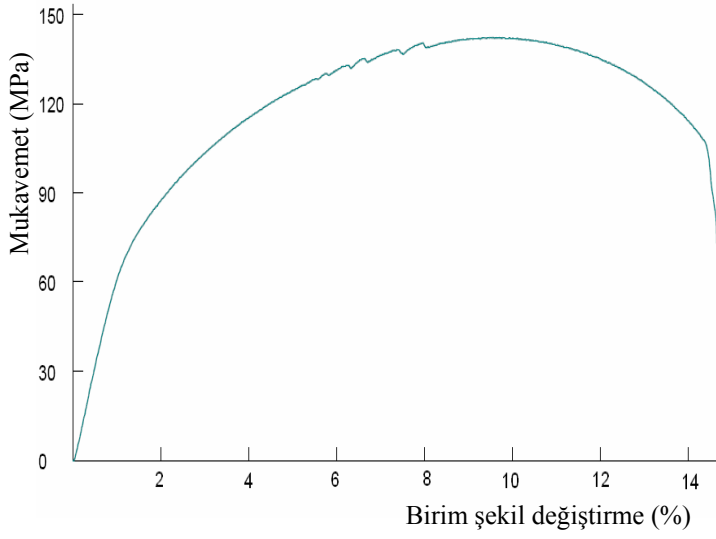
Ek 7.2.2.5.: AA 6063 alüminyum alaşımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

Kaynak parametresi : 1250 dev/dak, 200 mm/dak, sağ vidalı pim



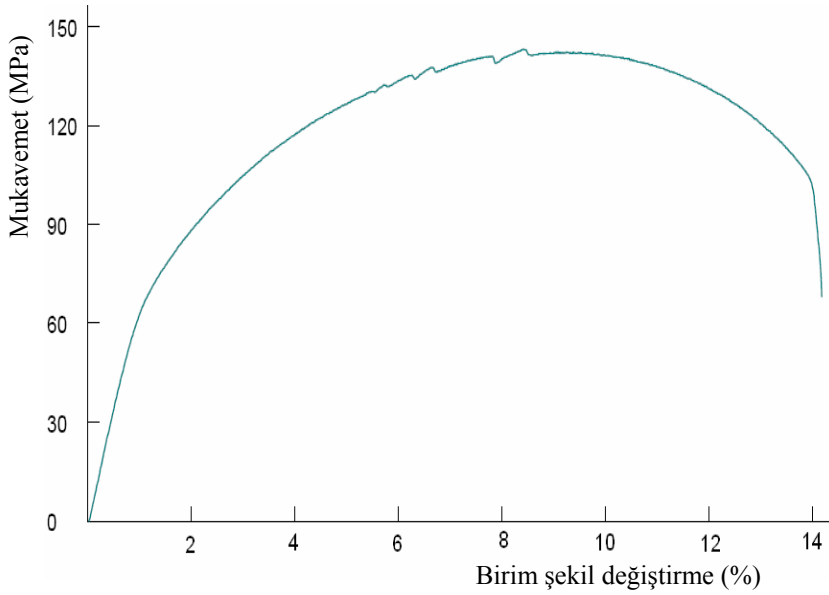
Ek 7.2.2.6.: AA 6063 alüminyum alaşımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 200 mm/dak, sağ vidalı pim



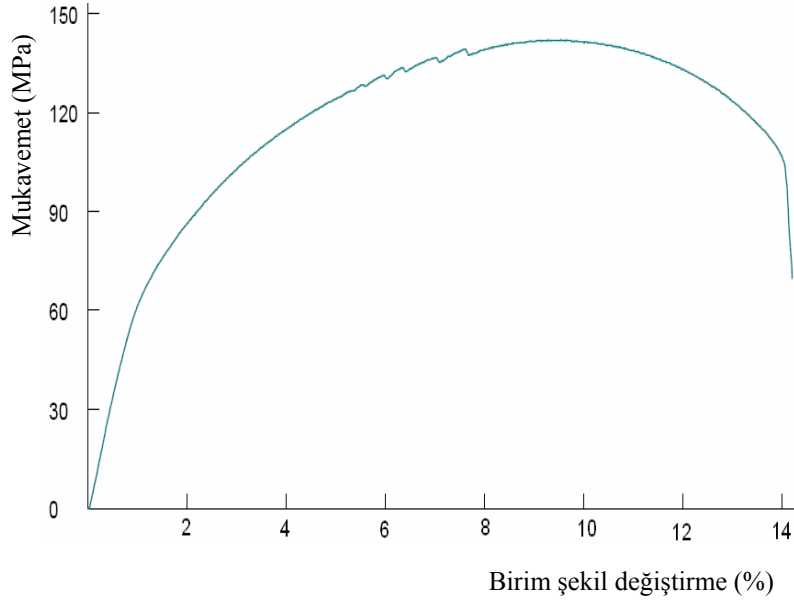
Ek 7.2.2.7.: AA 6063 alüminyum alaşıımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

Kaynak parametresi: 900 dev/dak, 100 mm/dak, sol vidalı pim

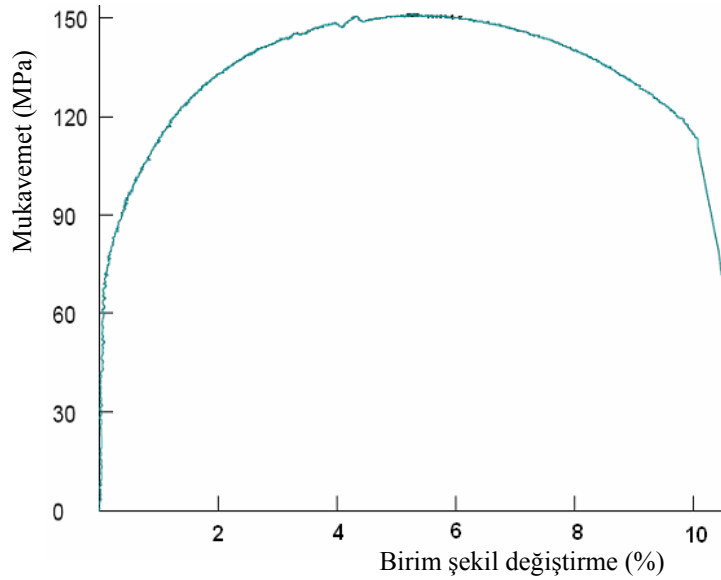


Ek 7.2.2.8.: AA 6063 alüminyum alaşıımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri

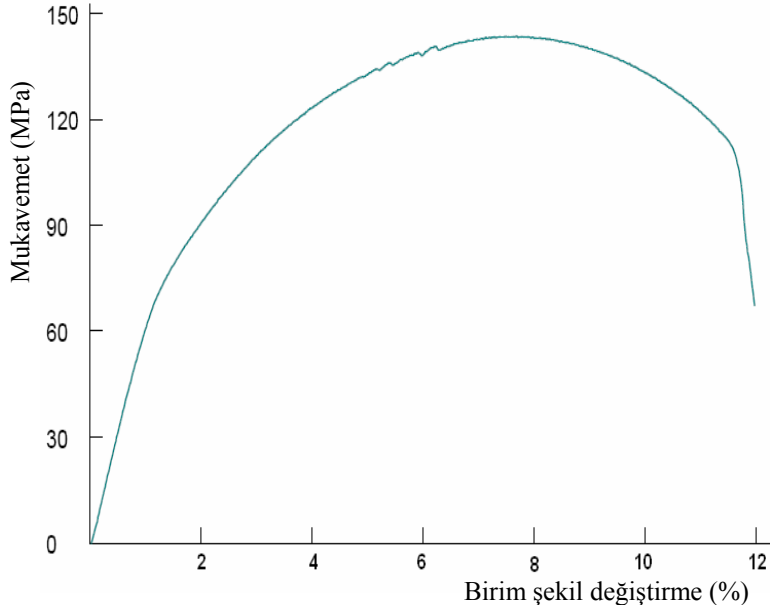
Kaynak parametresi: 1250 dev/dak, 100 mm/dak, sol vidalı pim



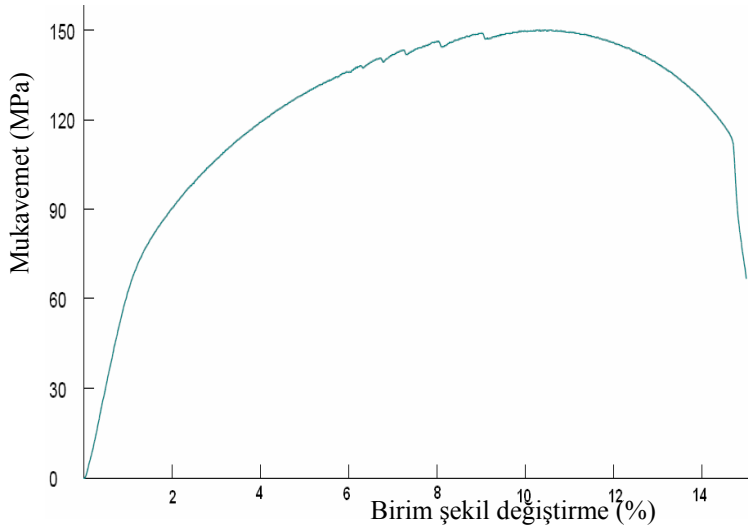
Ek 7.2.2.9.: AA 6063 alüminyum alaşımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri
Kaynak parametresi: 1600 dev/dak, 100 mm/dak, sol vidalı pim



Ek 7.2.2.10.: AA 6063 alüminyum alaşımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri
Kaynak parametresi : 900 dev/dak, 200 mm/dak, sol vidalı pim

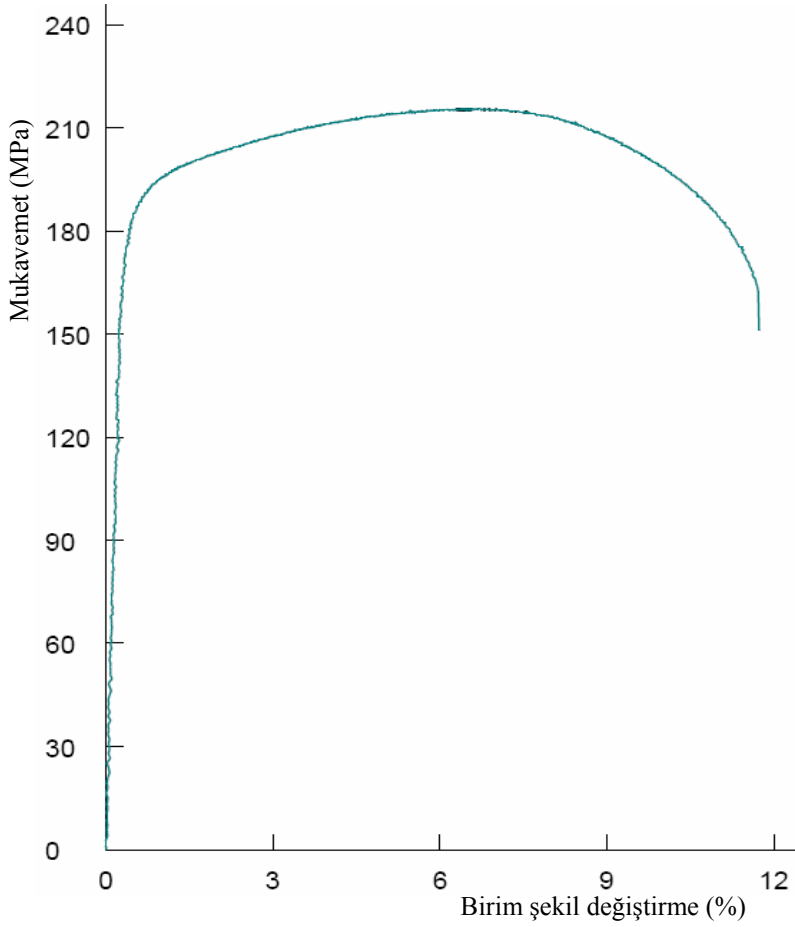


Ek 7.2.2.11.: AA 6063 alüminyum alaşımının SKK sonrasındaki mekanik özellikleri
Kaynak parametresi : 1250 dev/dak, 200 mm/dak, sol vidalı pim

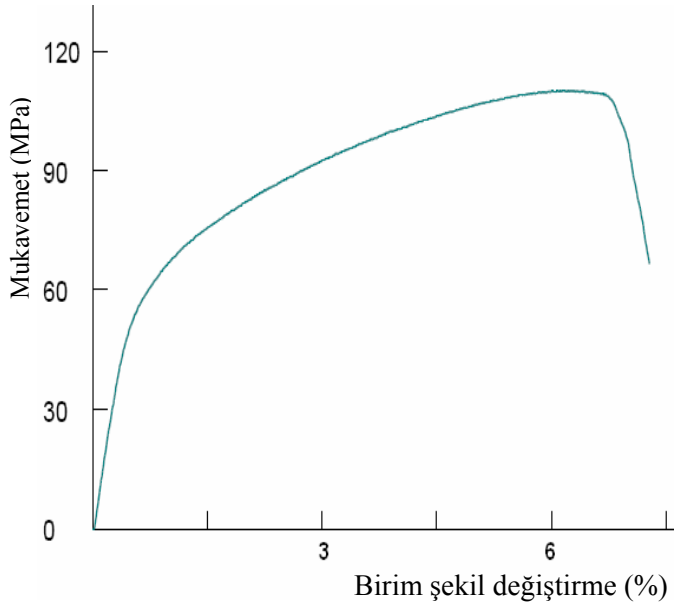


Ek 7.2.2.12.: AA 6063 alüminyum alaşımının SKK sonrasındaki mekanik özellikler
Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 200 mm/dak, sol vidalı pim

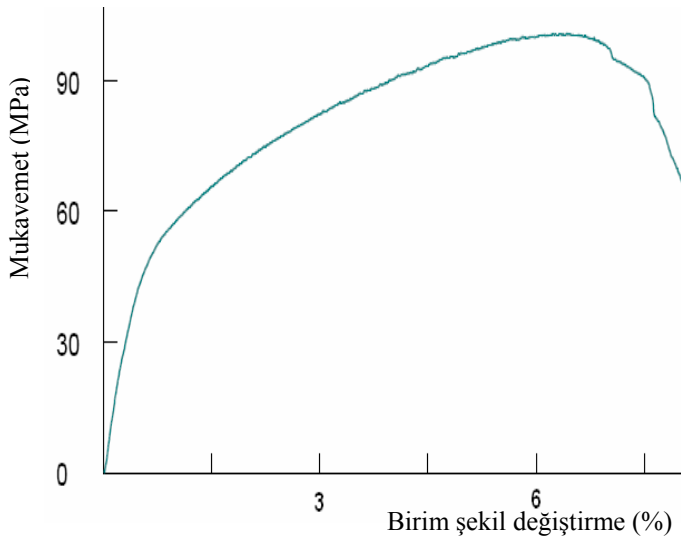
7.3. Çökelti Sertleşmesi ve T6 Yaşlandırma Sonrasında Kaynaklı Numunelerin Mukavemet & Birim Şekil Değiştirme Grafikleri



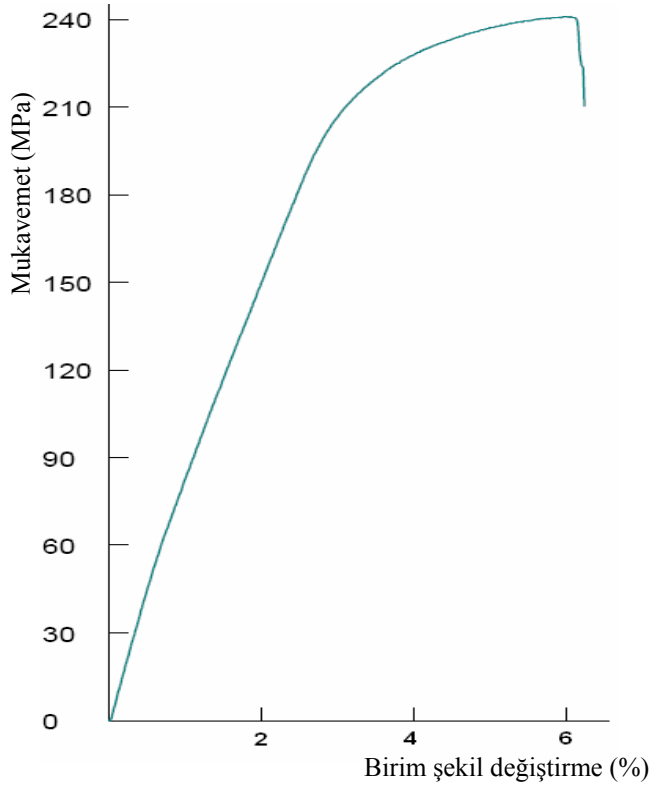
Ek 7.3.1.: AA 6063 alüminyum alaşımlarının çözelti sertleşmesi ve T6 yaşlandırma sonrasındaki mekanik özellikleri



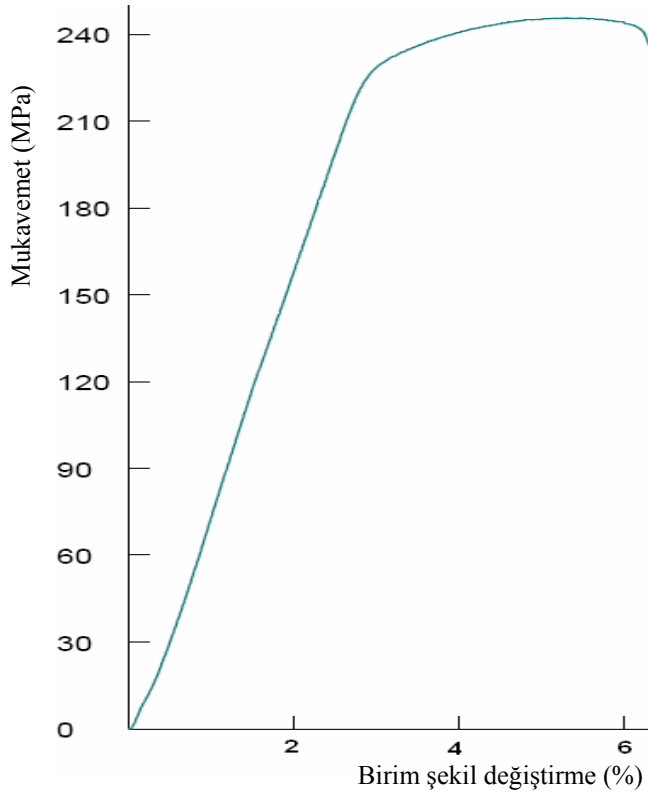
Ek 7.3.2.: SKK ile birleştirilen AA 6063 alüminyum alaşımının çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlandırma sonrasındaki mekanik özellikleri,
Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 100 mm/dak, sağ vidalı pim



Ek 7.3.3.: SKK ile birleştirilen AA 6063 alüminyum alaşımının çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlandırma sonrasındaki mekanik özellikleri,
Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 200 mm/dak, sağ vidalı pim

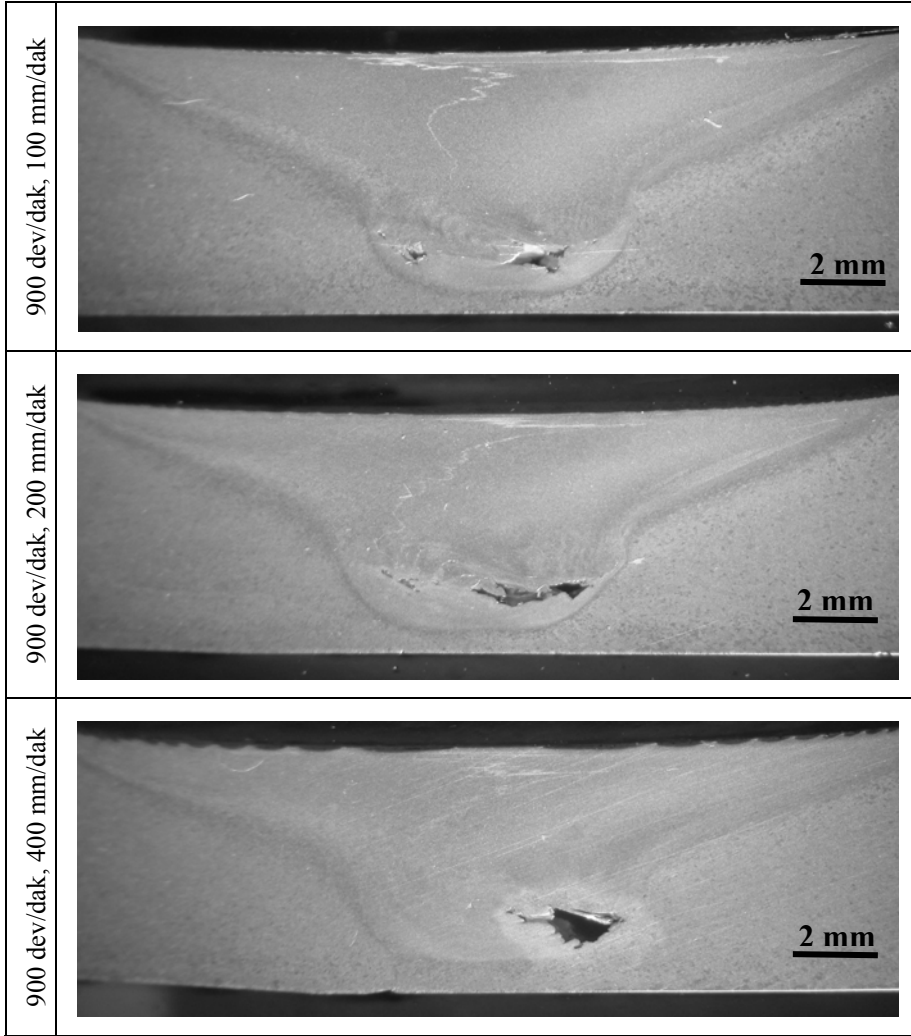


Ek 7.3.4.: SKK ile birleştirilen AA 6063 alüminyum alaşımının çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlandırması sonrasındaki mekanik özellikleri,
Kaynak parametresi :1600 dev/dak, 100 mm/dak, sol vidalı pim



Ek 7.3.5.: SKK ile birleştirilen AA 6063 alüminyum alaşımının çökelti sertleşmesi ve T6 yaşlandırması sonrasındaki mekanik özellikleri,
Kaynak parametresi : 1600 dev/dak, 200 mm/dak, sol vidalı pim

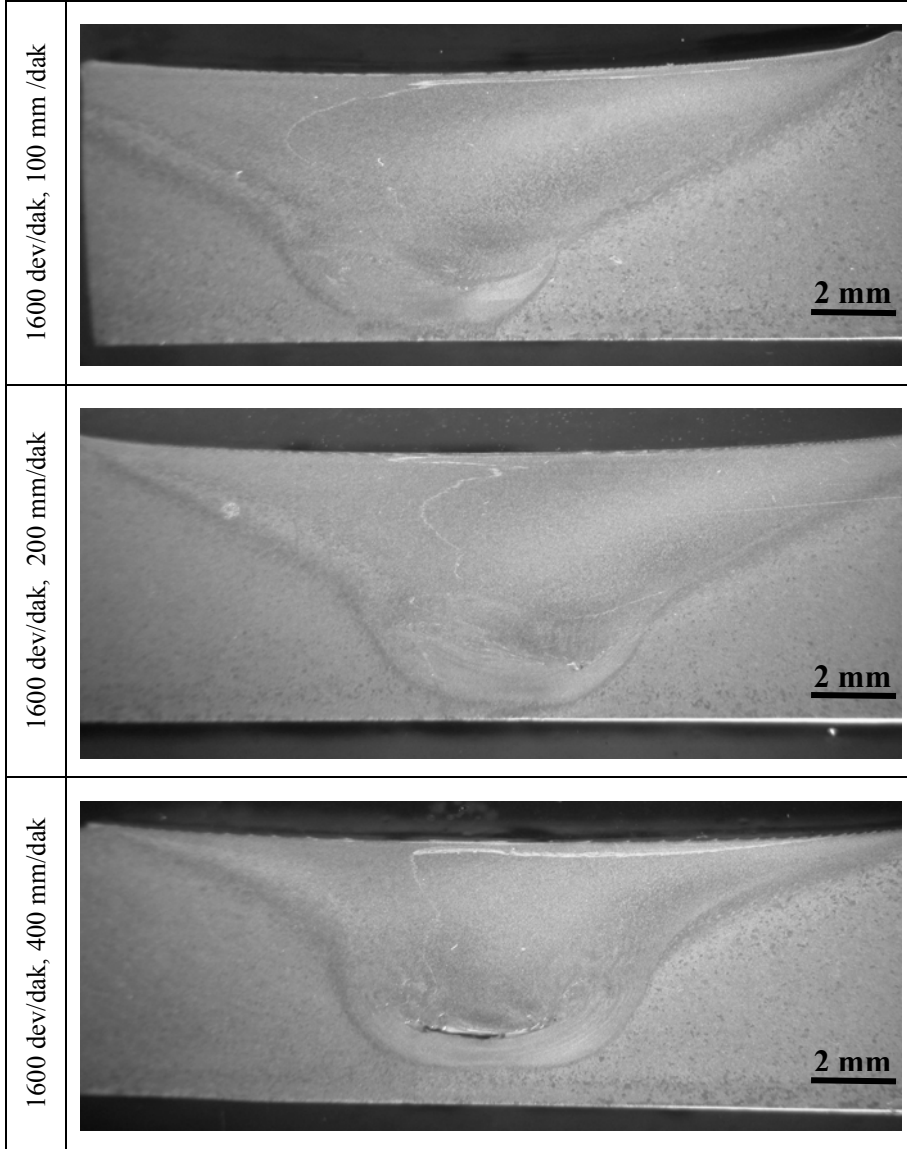
7.4. Birinci Denemesi Sonrasında Kaynaklı Numunelerin Makro Yapısı



Ek 7.4.1.: Kaynak Kesitinin Makro Yapısı

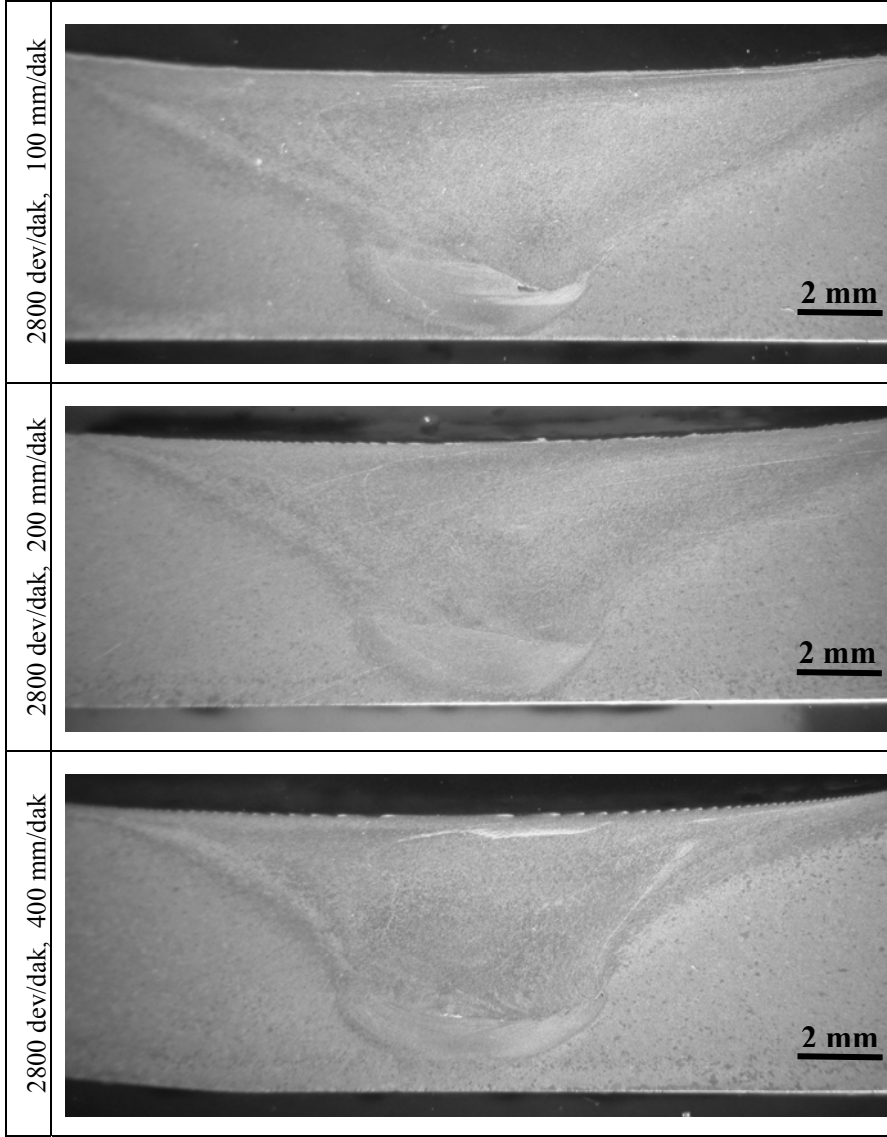
Kaynak parametreleri : 900 dev/dak, 100 mm/dak;

900 dev/dak, 200 mm/min; 900 dev/dak, 400 mm/min



Ek 7.4.1.2.: Kaynak Kesitinin Makro Yapısı

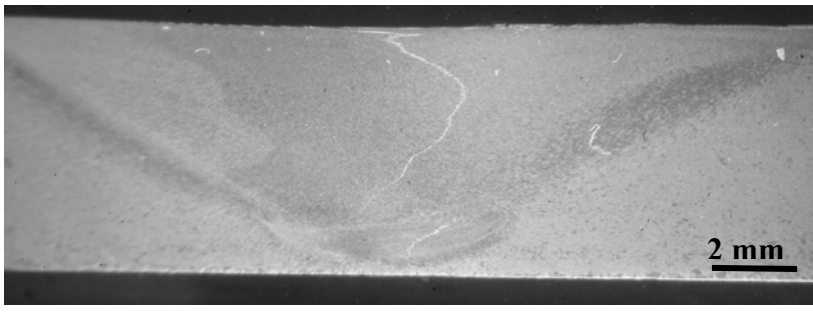
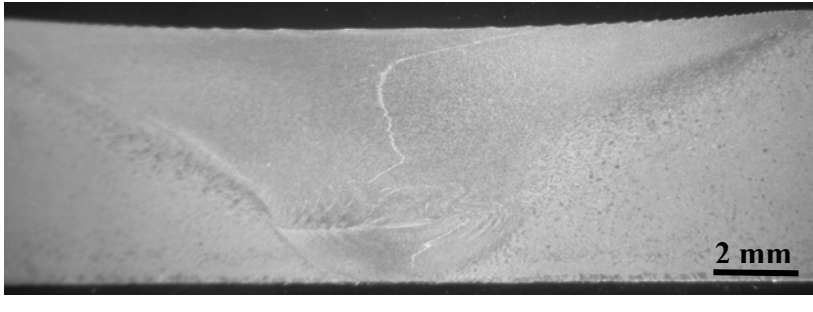
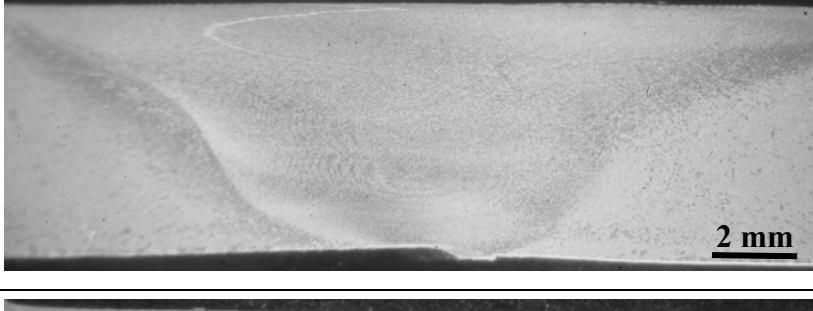
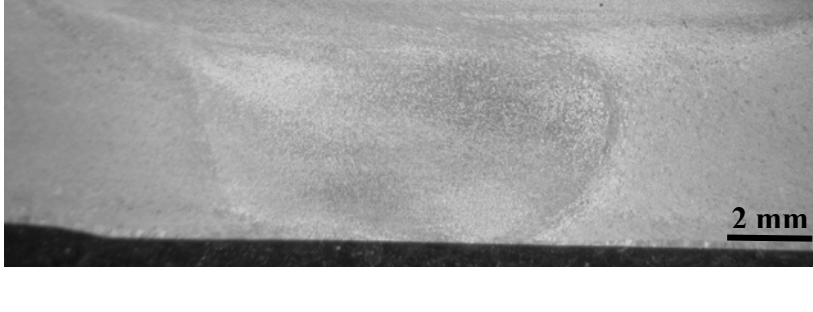
Kaynak parametreleri : 1600 dev/dak, 100 mm/dak;
1600 dev/dak, 200 mm/min; 1600 dev/dak, 400 mm/min



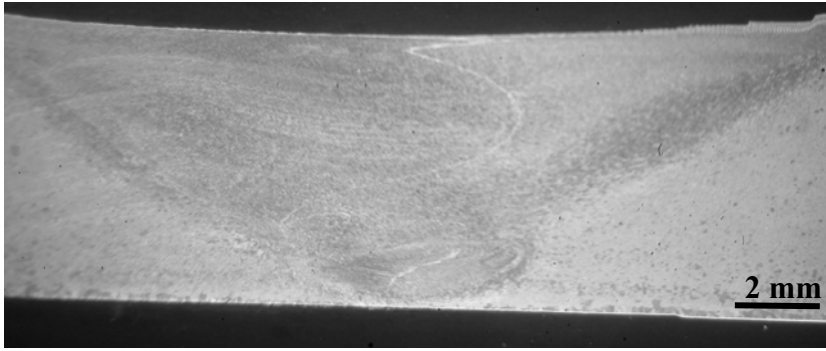
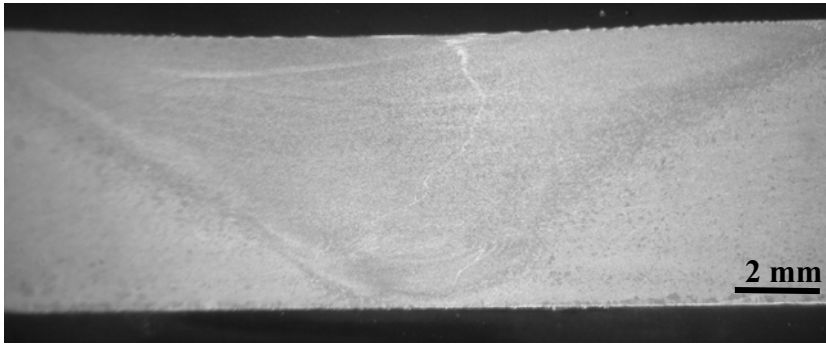
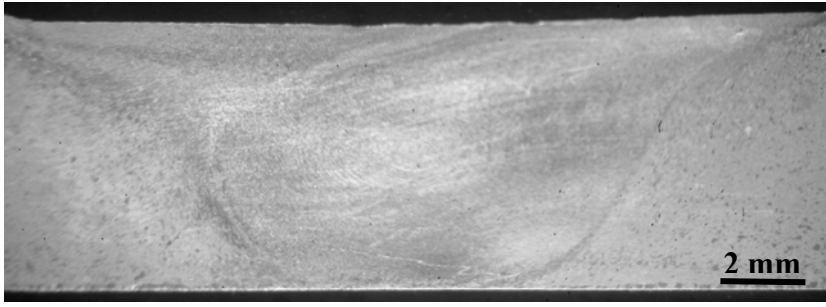
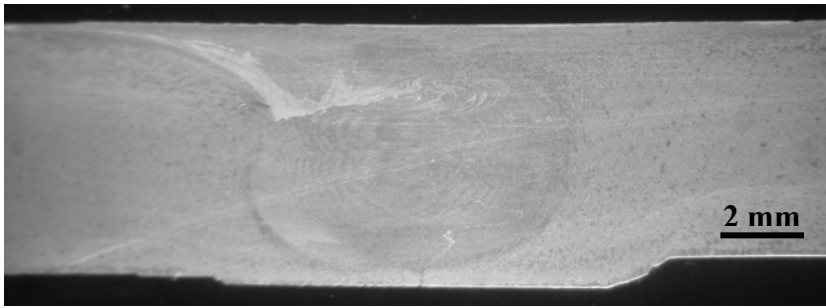
Ek 7.4.1.3.: Kaynak Kesitinin Makro Yapısı

Kaynak parametreleri : 2800 dev/dak, 100 mm/dak;
2800 dev/dak, 200 mm/min; 2800 dev/dak, 400 mm/min

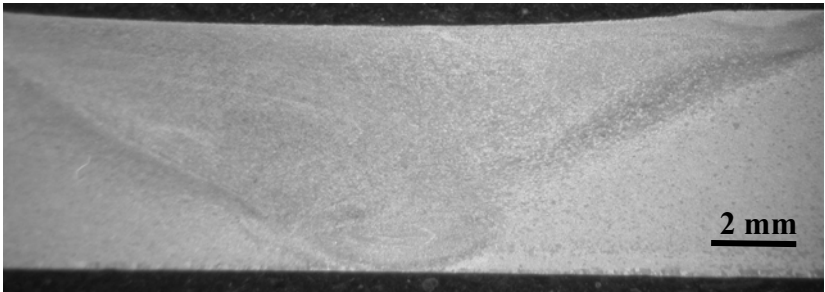
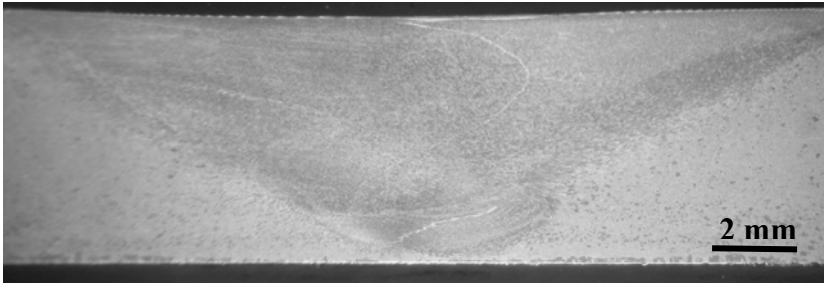
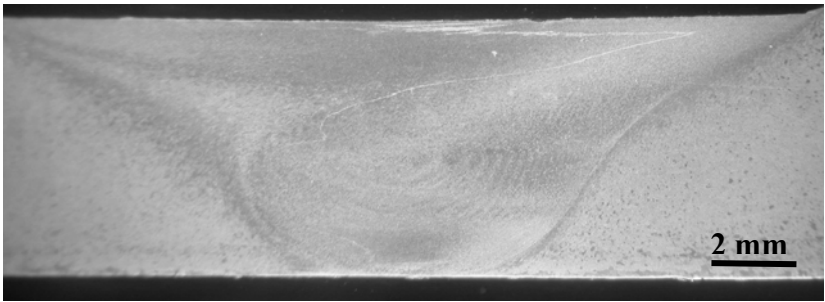
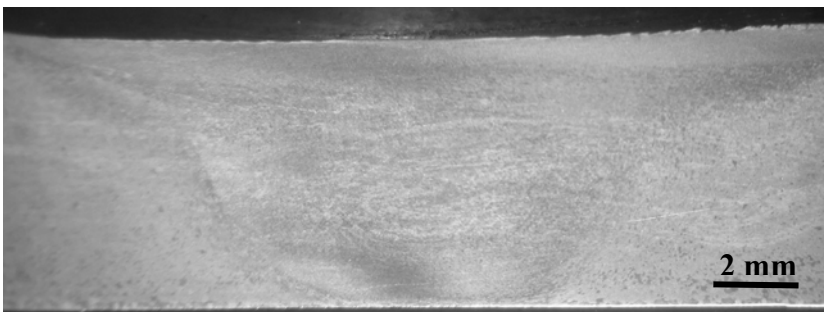
7.5. İkinci Denemesi Sonrasında Kaynaklı Numunelerin Makro Yapısı

900 dev/dak, 100 mm/dak Pim vida yönü sağ	
900 dev/dak, 200 mm/dak, Pim vida yönü sağ	
900dev/dak, 100mm/dak Pim vida yönü sol	
900dev/dak, 200mm/dak Pim vida yönü sol	

Ek 7.5.1.: Kaynak Kesitinin Makro Yapısı, dönme hızı 900 dev/dak

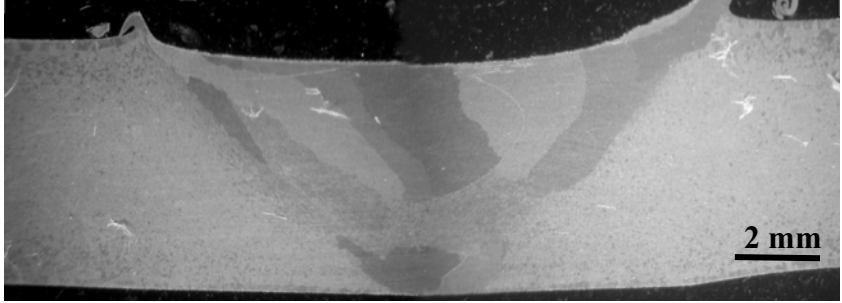
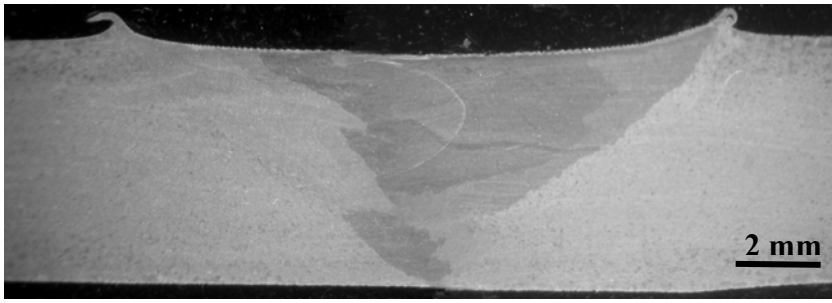
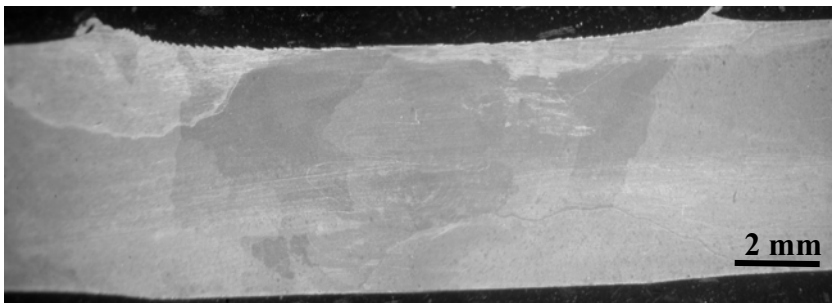
1250dev/dak, 100mm/dak, Pim vida yönü sağ	
1250dev/dak, 200mm/dak, Pim vida yönü sağ	
1250dev/dak, 100mm/dak Pim vida yönü sol	
1250dev/dak, 200mm/dak Pim vida yönü sol	

Ek 7.5.2.: Kaynak Kesitinin Makro Yapısı, dönme hızı 1250 dev/dak

1600dev/dak, 100mm/dak Pim vida yönü sağ	
1600dev/dak, 200mm/dak Pim vida yönü sağ	
1600dev/dak, 100mm/dak Pim vida yönü sol	
1600dev/dak, 200mm/dak Pim vida yönü sol	

Ek 7.4.2.2.: Kaynak Kesitinin Makro Yapısı, dönme hızı 1600 dev/dak

7.6. Çökelti Sertleşmesi ve T6 Yaşlandırma Sonrasında Kaynaklı Numunelerin Makro Yapısı

1600dev/dak, 100mm/dak, Pim vida yönü sağ	
1600dev/dak, 200mm/dak, Pim vida yönü sağ	
1600dev/dak, 100mm/dak, Pim vida yönü sol	
1600dev/dak, 200mm/dak, Pim vida yönü sol	

Ek 7.6.1.: Kaynak Kesitinin Makro Yapısı, dönme hızı 1600 dev/dak

8. KAYNAKLAR

- Benavides S.,** Li Y., Murr L.E., Brown D., McClure J.C., 1999, Low Temperature Friction Stir Welding of 2024 Aluminum, Scripta Materialia, Vol. 41, No.8, 809-815p
- Czechowski M.,**2005, Low Cycle Fatigue of Friction Stir Welded AlMg Alloy, Journal of Materials Processing Technology, 164-165p
- Squillace A.,** Enzo De A., Giorleo G., Bellucci F., 2004, Comparison between FSW and TIG Welding Techniques: Modifications of Microstructure and Pitting Corrosion Resistance in AA 2024-T3 Butt Joints, Journal of Materials Processing Technology, 152, 97-105p
- Zhou C.,** Yang X., Luan G., 2006, Investigation of Microstructures and Fatigue Properties of Friction Stir Welded AlMg Alloy, Materials Chemistry and Physics, Vol. 98, 285-290p,
- Zhou C.,** Yang X., Luan G., 2005, Fatigue Properties of Friction Stir Welds in Al 5083 Alloy, Scripta materialia 53, 1187-1191p,
- Thomas M.W.,** Nicholas E.D., Needham J.C., Murch M.G., Templesmith P., Dawes C.J., Dec/1991, G.B. Patent Application No. 912 5978.8
- Peel M.,** Steuwer A., Preuss M., Withers P.J., 2003, Microstructure Mechanical Properties and Residual Stresses

- as a Function of Welding Speed in Aluminium AA 5083 Friction Stir Welds, *Acta Materialia* 51, 4791-4801p,
- Deqing W.**, Shuhua L., Zhaoxia C., 2004, Study of Friction Stir Welding of Aluminum, *Journal of Materials Science*, 39, 1689-1693p,
- Scialpi A.**, Filippis L.A.C., Cavaliere P., 2007, Influence of Shoulder Geometry on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 6083 Aluminium Alloy, *Materials and Design*, vol.28, 1124-1129p,
- Liu H.J.**, Fujii H., Maeda ., Nogi K., 2003, Tensile Properties and Fracture Locations of Friction Stir Welded Joints of 2017-T351 Aluminium Alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, 692-696p,
- Moataz M. A.**, Hanadi G.S., 2005, Friction Stir Welding Parametters: a Tool for Controlling abnormal Grain Growth during Subsequent Heat Tratment, *Materials Science and Engineering*, A391, 51-59p,
- Mishra R.S.**, Ma Z.Y., 2005, Friction Stir Welding and Processing, *Materials Science and Engineering* , vol. 50, 1-78p,
- Andersson C.G.**, Andrews R.E., 1999, *Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding*, Thousand Oaks, CA, USA,
- Hautala T.**, Tianien T., David S.A., DebRoy T., Lippold J.C., Smartt H.B., Vitek j.M., 2003, *Proceeding of the Sixth*

- International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, GA, ASM International, 324p,
- Park H.S.**, Kimura T.K., Murakami T., Nagano Y., Nakata K., Ushio M., 2004, Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welds of 60%Cu-40%Zn Copper Alloy, Materials Science and Engineering., A 371, 160-169p,
- Juhas M.C.**, Viswanathan G.B., Fraser H.L., 2001, Proceeding of the Lightweight Alloys for Aerospace Application, TMS, Warrendale, PA, USA, 209-217p,
- Lienert T.J.**, Jata K.V., Wheeler R., Seetharaman V., 2001, Proceeding of the Joining Advance and Specialty Materials III, ASM International, Materials Park, OH, USA, 160p,
- Ramirez A.J.**, Juhas M.C., 2003, Materials Science Forum 2999, 426-432p,
- Bricknell R.H.**, Edington J.W., 1991, Acta. Metall. A 22, 2809p,
- Lienert T.J.**, Stellwag Jr. W. L., Grimmer B.B., Warke R.M., 2003, Welding Journal 82, 1p,
- Park S.H.C.**, Sato Y.S., Kokawa H., Okamoto K., Hirano S., Inagaki M., 2003, Scripta Mater. 49, 1175p,
- Johnson R.**, Threadgill P.L., David S.A., Smartt H.B., 2003, Proceeding of the Sixth International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, GA, ASM International, 88-92p,
- Posada M.**, Deloach J., Reynolds A.P., Halpin J.P., David S.A., Smartt H.B., 2003, Proceeding of the Sixth International

- Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, GA, ASM International, 307-312p,
- Lienert T.J.**, Gould J.E., 1999, Proceedings of the First International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, USA,
- Konkol P.J.** Mathers J.A., Johnson R., Pickens C.R., 2001, Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan,
- Reynolds A.P.**, Tang W., Posada M., Deloach J., 2003, Science Technology Welding of Joining 8, 6, 455p,
- Sterling C.J.**, Nelson T.W., Sorensen C.D., Steel R.J., Packer S.M., 2003, Friction Stir Welding and Processing II, TMS 165-171p,
- Nakata K.**, Inoki S., Nagano Y., Hashimoto T., Johgan S., Ushio M., 2001, Proceedings of the Third International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, 27-28p,
- Park S.H.C.**, Sato Y.S., Kokawa H., David S.A., Smartt H.B., 2003, Proceeding of the Sixth International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, GA, ASM International, 267p,
- Nagasawa F.**, Otsuka M., Yokota T., Ueki T., Kaplan H.I., Hym J., Clow B., 2000, Magnesium Technology 2000, TMS, 383-386p,
- Uzun H.**, Donne C.D., Argagnotto A., Ghidini T., Gambaro C., 2005, Friction Stir Welding of Dissimilar Al 6013-T4 to

X5CrNi18-10 Stainless Steel, *Materials and Design* 26, 41-46p,

Ericsson M., Jin L.Z., Sandström R., 2007, Fatigue Properties of Friction Stir Overlap Welds, *International Journal of Fatigue* 29, 57-68p,

Zhang H.W., Zhang Z., Chen J.T., 2005, Finite Element Simulation of the Friction Stir Welding Process, *Materials Science and Engineering*, A 403, 340-348p,

Chen M.C., Kovacevic R., 2003, Finite Element Modeling of Friction Stir Welding-Thermal and Thermomechanical Analysis, *International Journal of Machine, International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 1319-1326p,

Sato Y.S., Takauchi H., Park S.H.C., Kokawa H., 2005, Characteristics of the Kissing-Bond in Friction Stir Welded Al Alloy 1050, *Materials Science and Engineering*, A 405, 333-338p

Liu H.J., Chen Y.C., Feng J.C., 2006, Effect of Zigzag Line on the Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joints of an Al-Cu Alloy, *Scripta Materialia* 55, 231-234p,

Thomas W.M., Staines D.J., Watts E.R., Norris I.M., 13th January 2005, The Simultaneous Use of Two or More Friction Stir Welding Tools, Published on the Internet,

ÖZGEÇMİŞ

1959 Kayseri doğumlu SAYER, ilk ve orta öğrenimini Kayseri’de tamamlamıştır. 1980 yılında Goethe Enstitüsü’nde Almanca eğitimi almıştır. 1981-1988 yılları arasında Ruhr Üniversitesi Bochum’da Makina Konstrüksiyon dalında lisans ve yüksek lisan eğitimi yapmış, 1988 yılında Clausthal Teknik Üniversitesi’nde “Managment Training” programına katılmıştır. 1989 yılında Almanya’da vakum pompa üreticisi Busch (Lörack) firmasında tasarım mühendisi olarak işe başlamıştır. 1990 yılında Türkiye’ye dönen SAYER, 1990-1991 yılları arasında Taksan Takım Tezgahları (Kayseri) firmasında araştırma geliştirme mühendisi olarak görev yapmıştır. 1991 – 2002 yılları arasında Arçelik A.Ş. (İzmir) Süpürge İşletmesinde sırasıyla, ürün geliştirme mühendisi, proje lideri ve ürün geliştirme yöneticisi olarak çalışmıştır. 2002 yılında Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksekokulu’nda Öğretim Görevlisi olarak göreve başlamıştır. Halen, Plastik Teknolojisi Programı’nda Plastik Teknolojisi ve Plastik Üretim Teknikleri konusunda ders veren SAYER, aynı zamanda Program Koordinatörlük görevini de yürütmektedir.