

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AA 6063-T6 BORULARININ
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI
YÖNTEMİYLE KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN
İNCELENMESİ**

**Tezi Hazırlayan
Teoman EREN**

**Tezi Yöneten
Yrd.Doç.Dr.Eyyup GERÇEKÇİOĞLU**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

**Eylül 2005
KAYSERİ**

Yrd.Doç.Dr. Eyyup GERÇEKÇİOĞLU danışmanlığında Teoman EREN tarafından hazırlanan "AA6063-T6 Borularının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi" adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

26 / 09 / 2005

JÜRİ:

Başkan : Doç.Dr.Sedat ÖZDEN

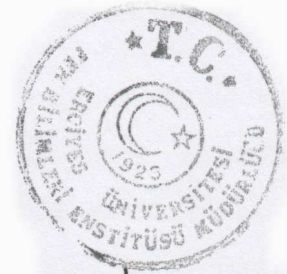
Üye : Yrd.Doç.Dr.Şükrü SU

Üye : Yrd.Doç.Dr.Eyyüp GERÇEKÇİOĞLU

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulunun 04/10/2005 tarih ve .2005./37-07 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

04/10/2005.



N. Ayyıldız
Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ
Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımı sürekli olarak değerli görüş ve katkılarıyla yönlendiren ve beni teşvik eden Sayın Hocam Yrd.Doç.Dr. Eyyup GERÇEKÇİOĞLU'na teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmaların incelenmesi esnasında yardım ve katkılarını esirgemeyen Arş.Gör. Kemal YILDIZLI' ya, tüm çalışmalarım boyunca bana sürekli destek olan tüm 2nci Ana Bakım Merkez Komutanlığı personeli adına Sayın Komutanım Ord.Kd.Alb. Burhan ÖZGÜR'e, Teknik Müdürüm Y.Müh.Alb. İzzet YIRGAL'a ve İinci İşletme Amirim Müh.Yzb. Murat ACAR'a, deneysel çalışmalar esnasında emeğini esirgemeyen Ünite Şefim Cengiz BAYRAKTAR'a, deneysel çalışmaların incelenmesinde imkânlarından faydalandığım Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, Araştırma Fonu yoluyla maddi katkıda bulunan Erciyes Üniversitesi ' ne teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmam esnasında bana destek olan eşim Nilüfer EREN'e ve tüm eğitim öğretim sürem boyunca bana maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, bugüne gelmemde büyük emekleri olan annem Hatice EREN ve babam Metin EREN'e teşekkür ederim.

**AA 6063-T6 BORULARININ
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI YÖNTEMİYLE
KAYNAK EDİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

Teoman EREN

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Eylül 2005
Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr.Eyyup GERÇEKÇİOĞLU**

ÖZET

Sürtünme karıştırma kaynak (SKK) yöntemi günümüzde üzerinde yoğunlukla çalışılan, yeni kaynak tekniklerinden birisidir. SKK, diğer sürtünme kaynak yöntemlerinde olduğu gibi bir katı hal kaynak yöntemidir.

Yapılan çalışmada, AA 6063-T6 boru malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan borular 110 mm dış çap, 5 mm cidar kalınlığı ve 45 mm uzunluğunda hazırlanmıştır. Kaynak işlemi için Üniversal freze, ilgili ilave ekipmanları ve boruların üzerine rijit halde bağlanması için özel bağlama aparatı yapılmıştır. Borular bu aparatın üzerine sabitlendikten sonra, iş tablası üzerine bağlanarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.

Kaynak işleminde değişken parametreler olarak, kaynak takım hızları; 560, 710, 900, 1120 ve 1400 d/d, iş parçası çevresel ilerleme hızları da; 8.04, 6.28 ve 4.94 mm/s olarak seçilmiştir. Genel olarak uygun kaynak dikişleri elde edilmiştir. Ancak en uygun kaynak dikişleri için optimum hızların; 560 d/d – 4.94 mm/s, 900 d/d – 6.28 mm/s, 1120 d/d – 8.04 mm/s, 1120 d/d – 4.94 mm/s ve 1400 d/d – 4.94 mm/s olduğu gözlemlenmiştir.

Isıdan etkilenen bölgelerdeki (IEB) tane yapıları ile ana malzemenin tane yapıları arasında önemli bir fark görülememiştir. Termo-mekanik olarak etkilenmiş bölgede (TMEB) ise ısı plastik deformasyonu etkisinin hissedilir derecede ortaya çıkması nedeniyle tane yapıları küçük ve genellikle lameller şeklindedir. Dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölgedeki (DYKB) taneler, ana malzemenin tane yapılarından çok daha küçük yapıdadırlar. Kaynak kesitlerinin farklı bölgelerinde mikro sertlik değerlerinde 1-25 HV_{0,045} değerlerinde düşüşler tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AA6063-T6, sürtünme karıştırma kaynağı, boru kaynağı, katı-hal kaynağı, yüzey pürüzlülüğü.

**THE INVESTIGATION OF
FRICTION STIR WELDING CAPABILITIES
OF
AA6063-T6 TUBES**

Teoman EREN

**Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
M.S. Thesis, September 2005
Thesis Supervisor: Assistant Professor Eyyup GERÇEKÇİOĞLU**

ABSTRACT

At the present time, The Friction Stir Welding (FSW) is one of the commonly studied new welding techniques. FSW is a solid-state welding technique similar other friction welding techniques.

In this study, 6063-T6 Aluminium Alloy tube materials were used. These tubes were prepared with 110 mm outer diameters 5 mm wall thickness and 45 mm length. Universal milling machine, related equipments and special fixture were engineered for welding. The welding was realized after the tubes fixed on the fixture and after fixed on the milling machine table.

The chosen variable welding parameters were; 560, 710, 900, 1120 and 1400 rev/min for welding tool velocity and 8.04, 6.28 and 4.94 mm/sec for welding velocity. In general, the suitable welding views were obtained. The most suitable welding parameters were; 560 rev/min – 4.94 mm/sec, 900 rev/min – 6.28 mm/sec, 1120 rev/min – 8.04 mm/sec, 1120 rev/min – 4.94 mm/sec and 1400 rev/min – 4.94 mm/sec.

There was no considerable difference between the microstructure in heat affected zone (HAZ) and in main material. The microstructures in thermo mechanically affected zone (TMAZ) were small and lamellar, caused by plastic deformation. The microstructures in dynamically re-crystallization zone (DRXZ) were the smaller than main material microstructure. There was a decrease in the hardness 1-25 HV_{0,045} of different zones on welding cross-sections.

Keywords: AA6063-T6, friction stir welding, tube welding, solid-state welding, surface roughness.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	xiii
1.BÖLÜM	
GİRİŞ	1
2.BÖLÜM	
GENEL KAYNAK YÖNTEMLERİ	3
2.1. Giriş	3
2.2. Kaynak Proseslerinin Sınıflandırılması	4
2.3. Katı Hal Kaynağı	6
2.3.1. Ultrasonik Kaynak	6
2.3.2. Soğuk Basınç Kaynağı	7
2.3.3. Titreşim Kaynağı	8
2.3.4. Sürtünme Kaynağı	10
2.3.4.1. Dönel Sürtünme Kaynağı	10
3.BÖLÜM	
SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ	17
3.1. Giriş	17
3.2. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi Yapılış Prensibi	19
3.3. Sürtünme Karıştırma Yönteminde Kullanılan Karıştırıcı Eleman Tipleri ...	21
3.3.1. Whorl™ Serisi Pimler (Batacıcı Uçlar)	21
3.3.2. MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ Serisi Pimler (Batacıcı Uçlar)	22
3.3.3. Skew-Stir™ ve A-Skew™ Serisi Pimler (Batacıcı Uçlar)	24
3.4. Kaynak İşlemi Esnasındaki Malzeme Akışı	26

3.5. Sürtünme Karıştırma Kaynaklarındaki Mikro-Yapıdaki Sınıflandırma	31
3.6. SKK Yönteminin Kullanım Alanları	33
3.6.1. Gemi Endüstrisinde Sürtünme – Karıştırma Kaynağı Uygulamaları	35
3.6.2. Uçak ve Uzay Endüstrisinde SKK Uygulamaları	36
3.6.3. Otomotiv Endüstrisinde Sürtünme – Karıştırma Kaynağı Uygulamaları	37
3.6.4. Hızlı Tren Üretiminde Sürtünme – Karıştırma Kaynağı Uygulamaları	38
4.BÖLÜM	
DENEYSEL ÇALIŞMA	40
4.1. Giriş	40
4.2. SKK İşleminde Kullanılan NC Freze Tezgahı ve Elemanları	40
4.3. SKK İşleminde Kullanılan Özel Aparat Tasarımı	42
4.4. Kaynak Takımı (Stirrer)	44
4.5. Kaynak İşleminde Kullanılan Boru Malzemeleri	45
4.6. SKK İşleminin 6063-T6 Alüminyum Borularına Uygulanması	46
4.7. Kaynaklı Bölgenin Dış Yüzey Makro Görüntüleri ve Pürüzlülük Ölçümleri	50
4.8. Kaynaklı Bölgelerin Mikro-yapılarının İncelenmesi	63
4.8.1. SKK İşleminde, Kaynak Takım Hızı ve İş Parçası Çevresel İlerleme Hızının Mikro-yapıya Etkileri	64
4.8.1.1. Isıdan Etkilenmiş Bölgeler (IEB)	65
4.8.1.2. Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölgeler (TMEB)	65
4.8.1.3. Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge – Weld Nugget, (DYKB)	66
4.8.1.4. Kaynak Sonrası Mikro-Sertlik Ölçümleri	83
5.BÖLÜM	
SONUÇ VE ÖNERİLER	84
5.1. Sonuçlar	84
5.2. Öneriler	85
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİŞ	91

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kaynak İşleminin Prensibi.....	3
Şekil 2.2. Dikiş Kaynağı Örneğinde Ultrasonik Kaynağı Prensibi.....	6
Şekil 2.3. Ultrasonik Nokta Kaynağı Prensip Şeması ve Yöntemin Bazı Parametreleri.	7
Şekil 2.4. Soğuk Basınç Kaynağının Şematik Gösterimi.....	8
Şekil 2.5. Titreşim Kaynağının Şematik Gösterimi.....	9
Şekil 2.6. Titreşim Kaynak Yöntemi.....	9
Şekil 2.7. (a) Lineer Hareketle Sürtünme , (b) Dönel Sürtünme Prensip Şeması.....	10
Şekil 2.8. Dönel Sürtünme Kaynağı Şematik Gösterimi.....	11
Şekil 2.9. Dönel Sürtünme Kaynağının Şematik Gösterimi.....	12
Şekil 2.10. Dönel Sürtünme Kaynağı Yöntemi Basamakları.....	13
Şekil 2.11. Dönel Sürtünme Kaynağına Uygun Parça Kesitleri.....	15
Şekil 2.12. Değişik Dönel Sürtünme Kaynağı Türlerinde, Devir Sayısı ve Basıncın Zamanla Değişimi (A: Sürekli Tahrikli Dönel Sürtünme Kaynağı, B: Volan Tahrikli Dönel Sürtünme Kaynağı, C: Kombine Dönel Sürtünme Kaynağı (Frenleme Dışarıdan), D: Kombine Dönel Sürtünme Kaynağı (Kendinden Frenleme)).....	17
Şekil 3.1. SKK Kaynağının Kavramsal Gösterimi.....	19
Şekil 3.2. SKK Süresince, Kaynak Dikişi Boyunca Gelişme Bölgeleri.....	19
Şekil 3.3. Sürtünme Karıştırma Kaynak Takımı Şematik Gösterimi.....	20
Şekil 3.4. SKK Takımı Hareketlerinin Kademeleri	21
Şekil 3.5. SKK Kaynak Takımı Çevresindeki Malzeme Akışı	21
Şekil 3.6. Çeşitli Whorl™ Konfigürasyonları.....	23
Şekil 3.7. 75 mm Kalınlığındaki AA6082T6 Alaşımının Kaynağında Whorl™ Takımını Kullanılması, Kaynağın Bitmiş Hali ve Kaynak Dikişinin Görüntüsü.....	23
Şekil 3.8. MX Triflute™ Pimin Esin Kaynağı Deniz Kabuklarıdır. MX Triflute™ Serisi Pimin Resim ve Şematik Çalışma Şekli.....	24

Şekil 3.9. MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ Dizaynlar.....	25
Şekil 3.10. Flared Triflute Probe İle Yapılmış Olan Bindirme Kaynağında Kaynak Ara Yüzeyinin Görünümü.....	25
Şekil 3.11. Skew-Stir Metodunun Çalışma Prensibi ve A-Skew Ucunun Resmi.....	26
Şekil 3.12. Whorl™ ve MX Triflute™ Takımlarının Omuz Profilleri.....	26
Şekil 3.13. Geri Çekilebilir Pim Takımları.....	27
Şekil 3.14. İş Parçasına Açılan Kanal ve Çelik Topların Yerleştirilmesi.....	28
Şekil 3.15. 6,4 mm'lik AA6061-T6 Levhasındaki İz Pozisyonları, Farklı Yönlerde Yönlendirilmiş, Malzeme İçerisindeki Çelik Bilyelerin Dağılımının Şematik Görünümü.....	29
Şekil 3.16. AA6061 Kaynağı İçin Radyografik Görüntü Çizimleri. (Şekil 3.14.'de Belirtilen Takım Kaynak Ölçülerinde ve Pozisyonları İçin Geçerlidir)	29
Şekil 3.17. A6061 Kaynağı İçin Her İki Taraftan Çekilmiş Radyografik Görüntü Çizimleri.....	30
Şekil 3.18. Kaynak Bölgesi İçerisindeki Akış Tipleri; (A) Swirl Ve Vortex Tipi Akışlar, (B) Vortex – Spiral Akış Tipi Arası Akış Şekli, (C) Karışık Akış Tipi, (D) Homojen Karışım ve Kaynak Merkezine Yakın Olan Akış Şekilleri....	32
Şekil 3.19. Üç Boyutlu Kaynak Bölgesi İçerisindeki Akış Tipleri; (A) X-Y Düzlemine Dik Pozisyonda Çalışan Normal Takım , (B) Z Eksenine Göre 2 Derecelik Eğimde Çalışan Yivli Takım.....	32
Şekil 3.20. SKK Temel Kaynak Bölgeleri.....	33
Şekil 3.21. Sürtünme Karıştırma Bindirme Kaynağının Şematik Gösterimi.....	35
Şekil 3.22. T ve L Profillerinde Sürtünme - Karıştırma Kaynağı Uygulaması.....	36
Şekil 3.23. Alüminyum Ekstrüzyon Panellerinin Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilmesi.....	37
Şekil 3.24. Shuttle External Tank Projesi ve Marshall Space Flight Center Laboratuvarlarındaki Sürtünme Karıştırma Kaynak Sistemlerinden Görüntüler.....	38

Şekil 3.25. SKK ile Birleştirilen Al-Alaşımı Prototip Otomobil Jantı.....	39
Şekil 3.26. Japonya’da Sürtünme Karıştırma Kaynağının Kullanıldığı Hızlı Tren ve Bu Yöntem ile Kaynağı Yapılan Al-Paneller.....	40
Şekil 3.27. SKK Sistemlerinin Endüstrideki Uygulamaları.....	41
Şekil 4.1. (a) SKK Kaynağında Kullanılan NC Freze Tezgahı ve Üzerindeki Kaynak Aparatları (Perspektif Görünüş).....	43
Şekil 4.1.(b) SKK Kaynağında Kullanılan NC Freze Tezgahı ve Üzerindeki Kaynak Aparatları (Önden Görünüş).....	44
Şekil 4.2. (a) Deneysel Çalışmada Kullanılan SKK Kaynak Aparat Parçaları, (b) Aparatın Montajlı Hali ve Kaynak Numune Çifti.....	45
Şekil 4.3. Alüminyum Boru Çifti Ve Kaynak Aparatlarının, Divizör ve Karşılık Puntası Arasına Yerleştirilmesi, (a) Önden Görünüş, (b) Alından Görünüş.....	45
Şekil 4.4. Dişli Tahrik Grubu.....	46
Şekil 4.5. Deneysel Çalışmada Kullanılan Kaynak Takımının, (a) Ölçüleri, (b) Perspektif Görüntüsü.....	47
Şekil 4.6. (a) SKK Yapılacak Boru Kesit Ölçüleri, (b) SKK Yapılacak Boru Çifti Perspektif Görüntüsü.....	47
Şekil 4.7. Alüminyum Boruların Kaynak Öncesi ve Sonrası Durumları, (a) Kaynak Öncesi Parçaların Aparata Montajlı Biçimde Freze Tezgahı Divizörüne Bağlanmış Görüntüsü, (b) Kaynak Takımı ve Malzeme Üst Yüzeyi Yakın Görüntüsü, (c)Kaynaktan Hemen Sonraki Durum, (d)Kaynaklı Numunenin Aparattan Çıkarılmış Görüntüsü.....	49
Şekil 4.8. Kaynak Takımının Numuneye Göre Pozisyonu.....	50
Şekil 4.9. SKK Sonrası Kaynak Takımı Omzunun ve Pim Kısmının Görüntüsü.....	50
Şekil 4.10. SKK Yapılırken Kullanılan Sıcaklık Ölçer.....	52
Şekil 4.11. 560 d/d Kaynak Takımı Dönüş Hızında (a) 8,04 mm/s, (b) 6,28 mm/s ve (c) 4,94 mm/s çevresel ilerleme hızlarında kaynağı yapılmış borular.....	53
Şekil 4.12. 710 d/d Kaynak Takımı Dönüş Hızında; (a) 8,04 mm/s, (b) 6,28 mm/s ve (c) 4,94 mm/s çevresel ilerleme hızlarında kaynağı yapılmış borular	54

- Şekil 4.13. 900 d/d Kaynak Takımı Dönüş Hızında; (a) 8,04 mm/s, (b) 6,28 mm/s ve (c) 4,94 mm/s çevresel ilerleme hızlarında kaynağı yapılmış borular55
- Şekil 4.14. 1120 d/d Kaynak Takımı Dönüş Hızında; (a) 8,04 mm/s, (b) 6,28 mm/s ve (c) 4,94 mm/s çevresel ilerleme hızlarında kaynağı yapılmış borular56
- Şekil 4.15. 1400 d/d Kaynak Takımı Dönüş Hızında; (a) 8,04 mm/s, (b) 6,28 mm/s ve (c) 4,94 mm/s çevresel ilerleme hızlarında kaynağı yapılmış borular..... 57
- Şekil 4.16. 560 d/d Dönüş Hızındaki Kaynak Takımıyla Yapılmış Kaynaklı Boruların Genel Görünüş Bölgelerinden Alınan Pürüzlülük Grafikleri; (a) 8,04 mm/s, (b) 6,28 mm/s ve (c) 4,94 mm/s.....58
- Şekil 4.17. 710 d/d Dönüş Hızındaki Kaynak Takımıyla Yapılmış Kaynaklı Boruların Genel Görünüş Bölgelerinden Alınan Pürüzlülük Grafikleri; (a) 8,04 mm/s, (b) 6,28 mm/s ve (c) 4,94 mm/s.....59
- Şekil 4.18. 900 d/d Dönüş Hızındaki Kaynak Takımıyla Yapılmış Kaynaklı Boruların Genel Görünüş Bölgelerinden Alınan Pürüzlülük Grafikleri; (a) 8,04 mm/s, (b) 6,28 mm/s ve (c) 4,94 mm/s.....60
- Şekil 4.19. 1120 d/d Dönüş Hızındaki Kaynak Takımıyla Yapılmış Kaynaklı Boruların Genel Görünüş Bölgelerinden Alınan Pürüzlülük Grafikleri; (a) 8,04 mm/s, (b) 6,28 mm/s ve (c) 4,94 mm/s.....61
- Şekil 4.20. 1400 d/d Dönüş Hızındaki Kaynak Takımıyla Yapılmış Kaynaklı Boruların Genel Görünüş Bölgelerinden Alınan Pürüzlülük Grafikleri; (a) 8,04 mm/s, (b) 6,28 mm/s ve (c) 4,94 mm/s.....62
- Şekil 4.21. Kaynak Takım Hızı Ve İş Parçası İlerleme Hızının Fonksiyonu Olarak Yüzey Pürüzlülük Değişimi.....63
- Şekil 4.22. Mikro-Yapıların İncelendiği Kaynak Bölgeleri.....66
- Şekil.4.23. SKK İşlemi Öncesindeki Malzemeye Ait Mikro-Yapı.....66
- Şekil 4.24. (a) 560 d/d'da 8.04 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....70
- Şekil 4.24. (b) 560 d/d'da 6.28 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....71
- Şekil 4.24. (c) 560 d/d'da 4.94 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik

- Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....72
- Şekil 4.25. (a) 710 d/d'da 8.04 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....73
- Şekil 4.25. (b) 710 d/d'da 6.02 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....74
- Şekil 4.25. (c) 710 d/d'da 4.94 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....75
- Şekil 4.26. (a) 900 d/d'da 8.04 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....76
- Şekil 4.26 (b) 900 d/d'da 6.28 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....77
- Şekil 4.26. (c) 900 d/d'da 4.94 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....78
- Şekil 4.27. (a) 1120 d/d'da 8.04 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....79
- Şekil 4.27. (b) 1120 d/d'da 6.28 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....80
- Şekil 4.27. (c) 1120 d/d'da 4.94 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....81

- Şekil 4.28. (a) 1400 d/d'da 8.04 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....82
- Şekil 4.28. (b) 1400 d/d'da 6.28 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikro-Yapı Görüntüleri.....83
- Şekil 4.28. (c) 1400 d/d'da 4.94 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin Mikro-Yapı Görüntüleri.....84
- Şekil 4.29. Ölçüm Alınan Kaynak Bölgelerinin Gösterimi.....85

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1 Kaynak Proseslerinin Sınıflandırılması.....	4
Tablo 2.2 Dönel Sürtünme Kaynağı İçin Temel Veriler (Sürekli Tahrikli Dönel Sürtünme Kaynağı).....	16
Tablo 4.1 AA6063-T6 Borularına Ait Kimyasal Analiz Değerleri.....	48
Tablo 4.2 Kaynak Parametreleri ve Kaynak Esnasında Ölçülen Sıcaklık Değerleri.....	51
Tablo 4.3 Sıcaklık Ölçerin Teknik Özellikleri.....	52
Tablo 4.4 Her Numune için Kaynak Üst Yüzeyinden Alınan Pürüzlülük Değerleri.....	64
Tablo 4.5 SKK Kaynak Kesitlerinin Mikro-Sertlik Değerleri ($HV_{0,0.45}$).....	85

1.BÖLÜM

GİRİŞ

Her kaynaklı birleştirmede kaynak bölgesi ve çevresinde istenmeyen dayanım düşüşleri olmaktadır. Bu ve benzeri olumsuzlukların en aza indirilebileceği bir kaynak yöntemi geliştirme çabaları devam etmektedir. Bu amaçla; Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) işlemleri bir katı hal kaynak yöntemi olup, 1990 yılında İngiltere Kaynak Enstitüsünde Mr.Wayne Thomas tarafından bulunmuş ve ilk defa 1991 yılında İngiltere’de patenti alınmıştır. Endüstriyel olarak kullanımını ise bundan yaklaşık 5 yıl sonrasında başlamıştır. Başlangıçta özellikle demir dışı metallerden olan alüminyum alaşımları üzerinde yapılmış olmakla birlikte, günümüzde demir türü malzemelerin kaynağı için de bu yöntem kullanılmaya başlamıştır. Diğer kaynak tekniklerine göre daha iyi mekanik özellikler elde edilebilmesi ve dolgu malzemesi kullanılmadan birleştirme yapılabilmesi gibi avantajlarından dolayı önemli kaynak işlemleri arasına girmiştir. Söz konusu kaynak yöntemi ticari olarak da kullanım alanını her geçen gün genişletmektedir.

Katı hal kaynak tekniği olan bu yöntemde kaynatılacak parçalar arasında, kendi etrafında dönen ve aynı zamanda da esas sürtünme ısısı ve kaynatma görevini gerçekleştiren özel geometriye sahip takımlar bulunmaktadır.

Kaynak işlemleri esnasında iki şekilde sürtünme ısısı üretilmektedir. Birincisi karıştırıcı takımın omuz diye tanımlanan geniş çaplı kısmının alt yüzeyi ile kaynatılacak parçaların üst yüzeyi arasında üretilen sürtünme ısısı, ikincisi ise omuz kısmının alt tarafında ve kaynatılacak iki parça arasında hareket eden vidaya benzer ucun (pin) ürettiği sürtünme ısısıdır.

Kaynak işlemleri esnasında bilhassa vidalı uç kısmının bulunduğu bölgede oldukça farklı deformasyon şekilleri ve malzeme akış yönleri ortaya çıkmaktadır. Yani kompleks bir malzeme akışı söz konusudur. Yapılan çalışmalarda bu hal açıkça görülmektedir. Pinin

yapısı özellikle sol yan vidaya benzer şekilde imal edilerek, karıştırma işlemi esnasında ergime noktası yakın sıcaklıklara getirilen malzemenin, üst yüzeye doğru çıkması engellenmektedir.

Vidalı ucun omuz kısmına yakın bölgelerinde laminar bir akış söz konusu iken, kaynak dikişinin “kök” diye tanımlanan kısmında ise oldukça kompleks malzeme akışı meydana gelmektedir.

SKK yapılmış parçalar incelendiğinde bu yöntemin üç farklı malzeme üretim işleminin bir araya getirilmesiyle oluştuğu düşünülebilir. Böylece dövme, ekstrüzyon ve sürtünme yöntemlerinin her üçü de SKK kaynak işleminde kendini göstermektedir.

Bu yöntemin avantajlı yönlerinden birisi de aynı türden malzemelerin kaynak işleminin de mümkün olabilmesidir. Çoğu alüminyum alaşımları, bakır, titanyum, çelik, paslanmaz çelikler ve çelik-alüminyum gibi malzemeler bu yöntemle kaynatılabilmektedir.

SKK yöntemini günümüzde yaygın olarak Boeing, Lockheed Martin, Airbus, General Dynamics, Alcoa gibi firmaların yanı sıra bir kısım enstitüler (TWI, EWI, USC, BYU, CTC, SDSMT, AJT gibi) tarafından kullanırken ülkemizde de FNSS-Nurol Zırhlı Araçlar Fabrikası - Gölbaşı/Ankara- tarafından ZMA araçlarında, 40 mm'ye kadar kalınlıktaki 5XXX ve 7XXX serisi alüminyum levha malzemelerin kaynak işleminde kullanılmaya başlanmıştır.

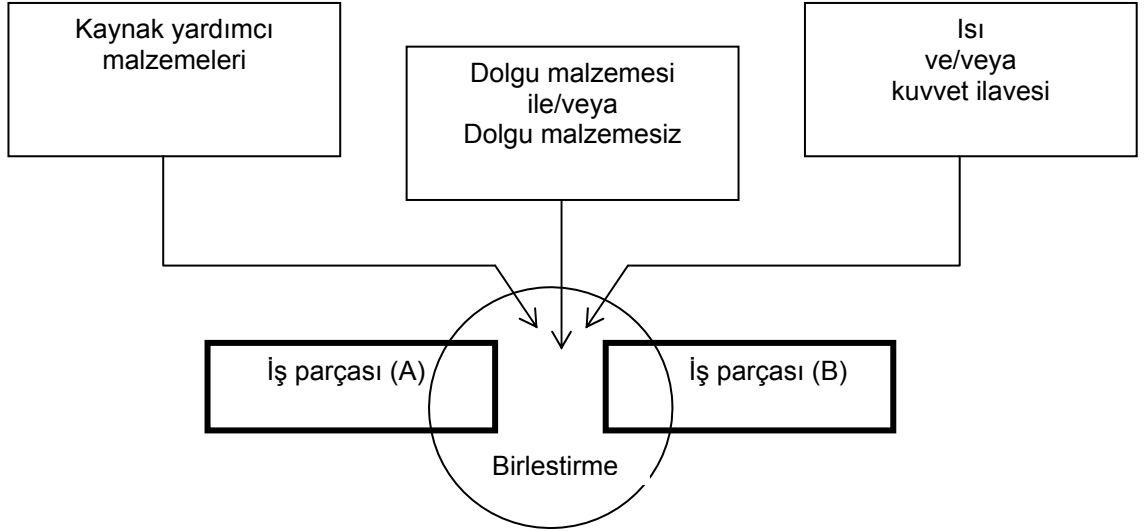
Yapılan araştırma ve çalışmaların çoğu, levha malzemelerin SKK yöntemi ile birleştirilmesi üzerine gerçekleştirilmiştir. Yapmış olduğumuz literatür taramasında da boruların sürtünme karıştırma kaynağı üzerine yeterli çalışmalara rastlanılmamıştır. Bu çalışmanın amacı ise aynı tür alüminyum alaşımlı 6083-T6 boru malzemelerinin SKK yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılmasıdır. Bunun için de karıştırıcı takım için farklı devir sayıları ve boru malzemeleri için farklı ilerleme miktarları kullanılarak, sürtünme karıştırma kaynak işlemleri gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

2.BÖLÜM

GENEL KAYNAK YÖNTEMLERİ

2.1.Giriş

Kaynak, malzemelerin ısı enerji ve/veya basınç ile sürekli bir içyapıya sahip olacak şekilde birleştirilmesi işlemidir. Eğer varsa dolgu malzemelerinin erime sıcaklığı, ana malzemelerinkine eşdeğer seviyededir. Kaynak işleminin temel prensibi Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kaynak İşleminin Prensibi.

Kaynağın diğer birleştirme işlemleriyle karıştırılmaması için lehimleme ve yapıştırma terimlerinin anlamlarını açıklamak gerekir.

Lehimleme: Malzemelerin erime sıcaklığı düşük bir dolgu tarafından ısıtılarak, malzemelerin birbirlerine bağlandığı birleştirme yöntemidir. “Erime sıcaklığı”, lehim malzemesi için likidus, ana malzeme için ise solidus sıcaklığı anlamına gelir.

Birleştirme bölgesinde ana malzemeler sıvı lehim tarafından ısıtılarak sarılır; bağlantı, ana malzeme ve lehim arasındaki difüzyon işlemleri ile gerçekleşir [1].

Yapıştırma: Aynı veya farklı malzemelerin yabancı bir madde (yapıştırıcı, ara tabaka) ile birbirine birleştirilmesi işlemidir. Yapıştırıcı malzeme ile birleştirilecek parçalar arasında yapışma mekanizması olarak adhesion (yüzey yapışması)'dan yararlanır. Yapıştırma düzgün ve büyük yüzeyli farklı malzemelerin birleştirilmesinde büyük önem arz eder [1].

2.2. Kaynak Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Kaynak Yöntemlerinin sınıflandırılması Tablo 2.1 de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Kaynak Yöntemlerinin Sınıflandırılması [1].

ENERJİ TAŞIYICISI CİNSİNE GÖRE	ANA MALZEMENİN CİNSİNE GÖRE	KAYNAK İŞLEMİ AMACINA GÖRE	KAYNAK İŞLEMİ İŞLEYİŞ ŞEKLİNE GÖRE	İMALAT TÜRÜNE GÖRE
Gaz	Metaller	Birleştirme Kaynağı	Eritme Kaynağı	Elle Kaynak
Elektrik akımı	Plastikler	Kaplama Kaynağı	Katı-Hal Kaynağı	Yarı Mekanik Kaynak
Ark	Kompozit Malzemeler			Tam Mekanik Kaynak
Işın				Otomatik Kaynak
Hareket				
Sıvı				

Bir kaynaklı birleştirmede çoğunlukla,

- Dayanım ve tokluk,
- Yüksek ve çok düşük sıcaklıklara karşı direnç gösterme kabiliyeti,
- Korozyon ve aşınmaya karşı direnç,
- Gaz, buhar, basınç ve vakuma karşı sızdırmazlık gibi özel şartlar aranmaktadır.

Çok sayıda ana malzeme (çelik, demir dışı metaller) ve bunlardan üretilen, kalınlığı $\approx 0,001$ mm ile 1000 mm arasında değişen yarı mamuller (levha, boru, profil) ve çeşitli enerji sağlayıcılar, cihaz teknolojileri, kaynak dolgu malzemeleri (çubuk elektrotlar, tel elektrotlar, koruyucu gazlar vs.) göz önüne alındığında günümüzde pratik anlamda 50 mm'den fazla farklı kaynak yöntemi kullanılmaktadır. Bunlara ilave olarak, çeşitli biçimlerdeki dolgu malzemeleri, yardımcı malzemeler, cihaz düzenekleri ve farklı imalat koşullarından doğan teknolojik şartlar göz önüne alındığında 100'ün üzerinde varyasyon ortaya çıkmaktadır [1].

Yukarıdaki bilgiler ışında, literatürde mevcut bulunan birleştirme kaynak tekniklerini aşağıdaki ana başlıklar altında toplamak mümkündür.

A. Otojen Gaz Kaynağı

B. Ark Kaynağı

a. Örtülü Elektrot Ark Kaynağı

b. Koruyucu Gaz Ark Kaynağı

i. Metal Aktif-Asal Gaz Ark (Mig-Mag) Kaynağı

ii. Tungsten Asal Gaz Ark (Tig) Kaynağı

c. Özlü-Tel Ark Kaynağı

d. Tozaltı Ark Kaynağı

e. Plasma Ark Kaynağı

f. Saplama Ark Kaynağı

C. Elektrik Direnç Kaynağı

D. Özel Kaynaklar

a. Lazer Işın Kaynağı

b. Elektron Işın Kaynağı

c. Elektro-Curuf Kaynağı

d. Termit Kaynağı

E. Katı Hal Kaynağı

a. Ultrasonik Kaynak

b. Soğuk Basınç Kaynağı

c. Titreşim Kaynağı

d. Sürtünme Kaynağı

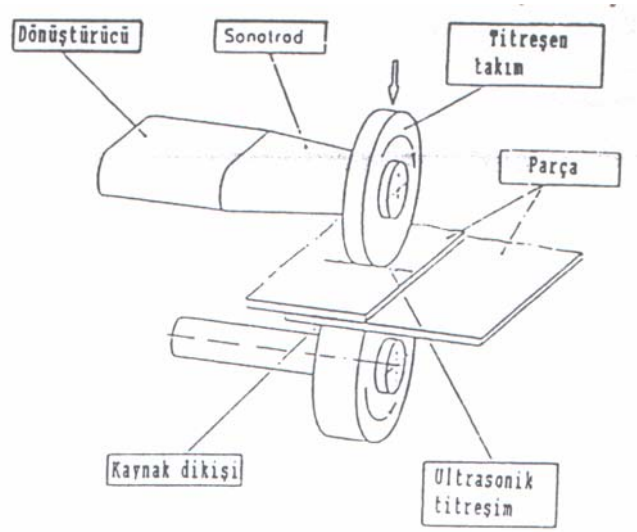
- i. Dönel Sürtünme Kaynağı
- ii. Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Çalışma konusu gereği olarak Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ayrı bir bölüm halinde incelenecektir.

2.3.Katı Hal Kaynağı

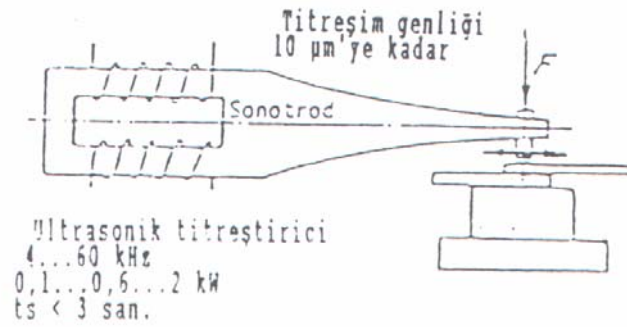
2.3.1. Ultrasonik Kaynak

Ultrasonik kaynak yönteminde parçalar, ultrasonik dalgalanmalardan çıkan titreşim yardımı ile birleştirilir (Şekil 2.2) Bu amaçla bir elektro-akustik dönüştürücüden yararlanılır.



Şekil 2.2. Dikiş Kaynağı Örneğinde Ultrasonik Kaynağı Prensibi [1].

Birleştirilecek parçalar sabit bir “örs” üzerindedir (Şekil 2.3). Sonotrod yardımı ile teğetsel titreşimler parçaya aktarılır. Sıkıştırma kuvveti ve kaynak yüzeyleri arasındaki bağıl hareketlerin genliğini yeterince yüksek ise, akma başlar. Kir, su ve oksit filmleri yırtılır. Yüzeyler ısınır, düzenlenir, birbirlerine yaklaşarak bağ kuvvetleri etkin hale gelir. Isınma sadece çok ince bir tabaka ile sınırlıdır.



Şekil 2.3. Ultrasonik Nokta Kaynağı Prensipli Şeması ve Yöntemin Bazı Parametreleri [1].

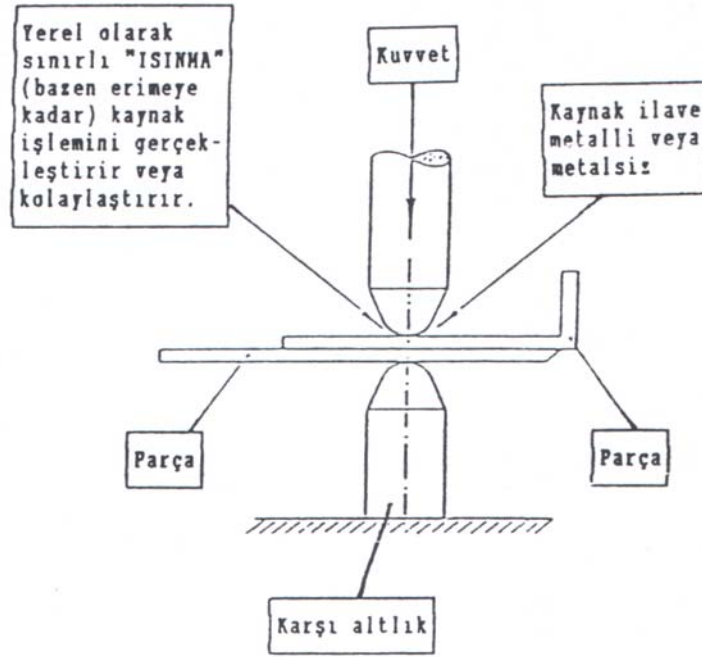
Bu yöntemle, yumuşak metallere ince sacların, folyoların veya tellerin (kalınlık 0,03-2mm) daha kalın çelik, demir dışı metallere, cam veya seramik gibi malzemeler üzerinde kaynağı yapılır. Sert ve tabakalar halinde kırılan bir oksit tabakasına sahip alüminyum, bu yöntem için çok uygundur. Ultrasonik kaynak bu malzemelerin dışında diğer birçok metal kombinasyonları içinde kullanılabilir.

Ultrasonik nokta kaynağı ile sıcaklığa dayanıklı yarı iletken kontaklar (silisyum üzerinde alüminyum veya altın tel, altın kaplanmış kontaklar üzerine alüminyum tel büyük sayılarda üretilirler. Folyo haddehanelerinde alüminyum folyo bobinleri birbirleri ile ultrasonik dikiş kaynağı yardımıyla birleştirilerek kesintisiz bantlar elde edilir [1].

2.3.2. Soğuk Basınç Kaynağı

Bu yöntemle parçalar, ısı verilmeden basınç altında birleştirilir. Temizlenmiş kaynak yüzeylerinin şekil değiştirmesi ile oksitler ve absorbe olmuş gazlar gibi yabancı tabakalar yırtılır. Metal yüzeyleri birbirine temas eder. Sınırlı bir yerel deformasyon ısı ve yeniden kristalleşme ile birleşir. Şekil 2.4.'de yöntemin prensibi gösterilmektedir.

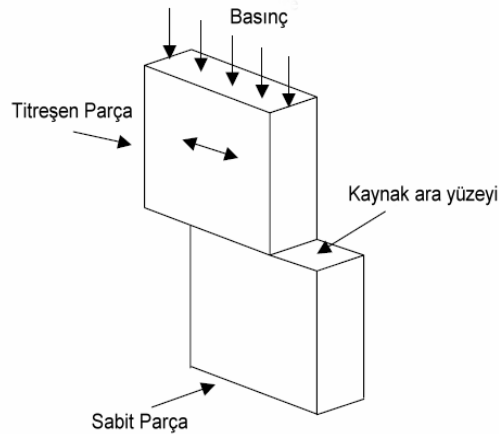
Homojen ve yumuşak metallere kaynağı, bakır (elektrikli trenlerin telleri), alüminyum/bakır veya gümüş/bakır, iletken ve kontak bağlantıları, kompozit malzemelerden kovanlar. Cr-Ni çelikleri ile alüminyum, tantal, niyobyum, bakır ve nikelin bağlantıları. Soğuk şekil değiştirme sayesinde pekleşmiş güvenilir bağlantılar elde edilir [1].



Şekil 2.4. Soğuk Basınç Kaynağının Şematik Gösterimi [1].

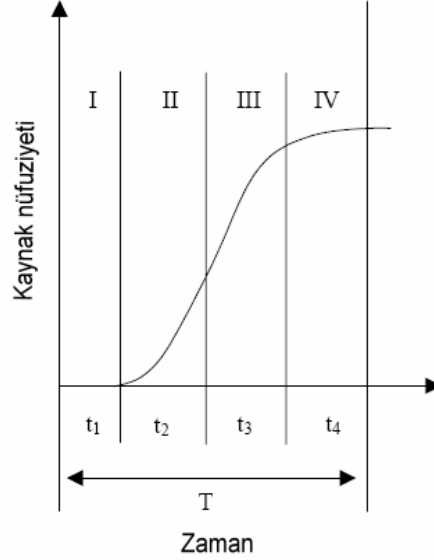
2.3.3. Titreşim Kaynağı

Titreşim kaynağında, basınç altında temas eden iki parçanın birleştirilmesi yapılır. Parçanın biri sabit, diğeri uygun frekansta, ara yüzeye paralel olarak, mekanik sürtünmeyle yeterli ısı oluşana ve malzemenin ara yüzey birleşmesine uygun hale gelene kadar titreştirilir. Çizgisel titreşim hareketi bitirildikten sonra Şekil 2.5.'de gösterildiği gibi basınç altında birleştirme işlemi yapılır.



Şekil 2.5. Titreşim Kaynağının Şematik Gösterimi [2].

Titreşim Kaynak yönteminin 4 fazı vardır. 1)Katı sürtünme fazı, 2)Geçiş akış fazı, 3)Sabit-Durum akış hali ve 4)Katılaşma fazı. Şekil 2.6.'da, Titreşim kaynak yönteminde, yataydaki akışı ve kaynak zamanının etkisiyle parçaların birbirlerine yaklaştığı yerdeki mesafeyle bağlantılı olarak kaynak nüfuziyeti gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Titreşim Kaynak Yöntemi [2].

Faz 1'de Coulomb sürtünmesi, ara yüzeyde ısı oluşturur. Bu ısı malzemenin erime sıcaklığına yaklaşıncaya kadar sıcaklığın yükselmesini sağlar. Bu fazda kaynak nüfuziyeti sıfırdır.

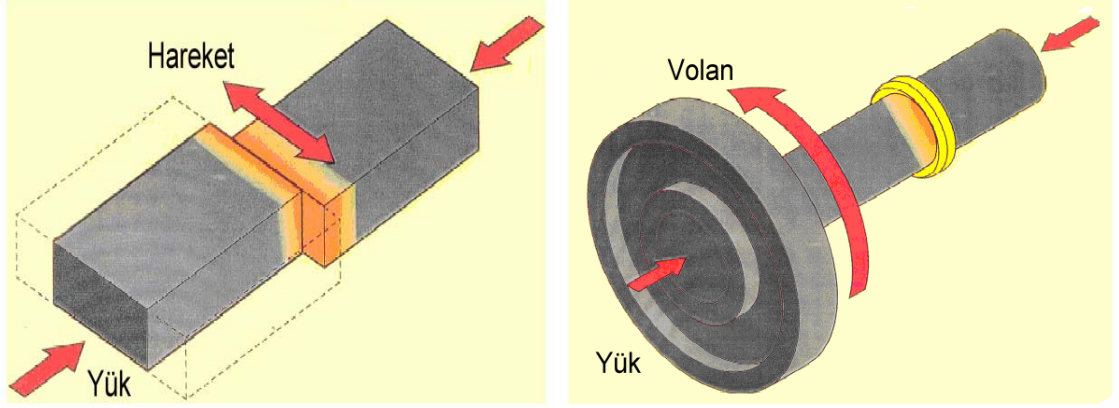
Faz 2'de ara yüzeydeki malzeme erimeye başlar ve katı Coulomb sürtünmesinden yapışkan yaymaya geçer. Erimeye başlayan malzeme kaynak nüfuziyetini artıracak şekilde, yatay doğrultuda akmaya devam eder.

Faz 3'de kaynak nüfuziyetinin zamana göre lineer olduğu anda, erime ve akış oranı kararlı hala geçer. Bu iyi kaynak kalitesinin elde edildiği durumdur.

Faz 4'de lineer titreşim hareketi durdurulur ve kaynak nüfuziyeti için malzeme soğuyana kadar kaynak ara yüzeyine dik şekilde sürekli basınç uygulanır [2].

2.3.4.Sürtünme Kaynağı

Kavram olarak sürtünme kaynağı, sürtünme ile oluşan ısının etkisiyle birleşmeye uygun hale gelen malzemenin basınç altında birleştirilmesidir. Isının sürtünmeyle elde edilebilmesinin birçok yolu mevcuttur (Şekil 2.7)



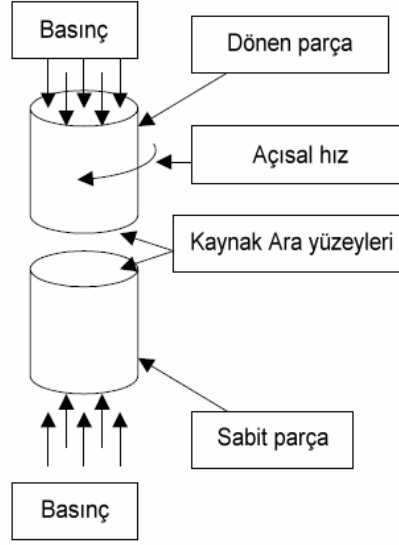
Şekil 2.7. (a) Linear Hareketle Sürtünme , (b) Dönel Sürtünme, Prensip Şeması [3].

Sürtünme tekniğinin kullanıldığı bir çok kaynak birleştirme ve yöntem teknolojileri mevcuttur. Yüzey sürtünmesi ve dönüşüm yöntemi, sürtünme ekstrüzyon yöntemi, dönel sürtünme kaynağı ve sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ve yöntemi (SKP) bunlar arasında yer alır. Bu teknolojilerin çoğunluğu kaynak enstitüsünde bulunup geliştirilmiştir. Bu yöntemlere sürtünmenin katkısı takım aşınmasıyla bir dereceye kadar değişmektedir.

2.3.4.1. Dönel Sürtünme Kaynağı

Dönel sürtünme kaynağı, oldukça yaygın bir sürtünme kaynağı yöntemidir. Dönel sürtünme kaynağı, genellikle dönel simetrisi olan parçaların, basınç altında (Pres kaynağı) alın kaynağı için kullanılır. Isı ihtiyacı, mekanik olarak sürtünme ile sağlanır. Dönel sürtünme kaynağı, metalik malzemeler ve kombinasyonları ile plastiklerin birleştirilmesine uygundur.

Bu yöntemde, Şekil 2.8.'de görüldüğü üzere birinci parça sabit, diğeri dönerek, erime gerçekleşene kadar, belli bir açısal hızla ve aksenal kuvvet basınç uygulanır.



Şekil 2.8. Dönel Sürtünme Kaynağı Şematik Gösterimi [2].

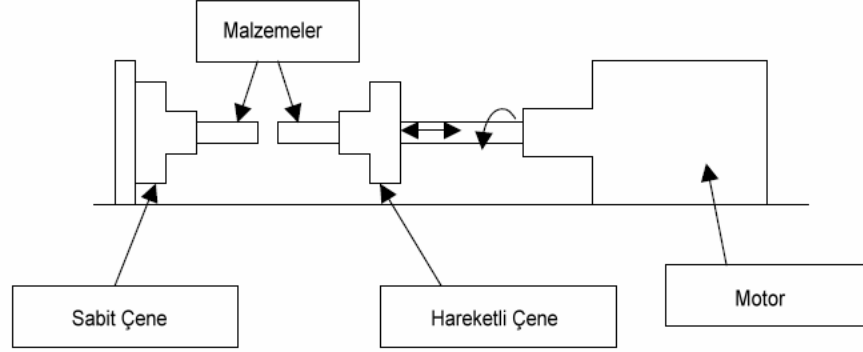
Dönel Sürtünme kaynağı Şekil 2.9.'da şematik olarak gösterilmiştir. İki malzeme, biri sabit çene diğeri hareketli çene olmak üzere iki çeneye yerleştirilir. Malzemeler dönel basınç altında temas ettirilir. Parçaların birleştirilecek yüzeyleri arasında bağıl bir hareket olduğundan, sürtünme söz konusudur. Sürtünme, parçaların ısınmasına neden olur. Yeterli ısı girdisi sağlandığında bağıl hareket durdurulur ve kuvvet artırılarak parçalar birleştirilir. Sonuç olarak malzeme katılaşıyor ve kaynak oluşmuş olur. Bu yöntemde, dönme hızının ve basma kuvvetinin doğru seçilmesi önemlidir. Optimum kaynak basıncı ve hızında, sıcaklık ani olarak yükselerek, kararlı hal fazında kaliteli kaynak elde edilebilir. Kaynak mukavemeti direkt olarak dövme basıncının süresine bağlıdır. Kaynak mukavemeti, dövme basınç süresinin yeterli sürede uygulanmaması sonucunda azalır.

Dönel Sürtünme kaynağı dört fazdan oluşur (Şekil 2.10).

Faz 1'de sürtünmeyle ara yüzeyde ısı oluşur. Bu ısı malzemenin erime sıcaklığına yaklaştıkça sıcaklığın yükselmesini sağlar.

Faz 2'de ısınma mekanizması katı sürtünmeden erimiş bölge içinde kesme sürtünmesine dönüşür. Sıcaklık, kesme oranı ve ısı oluşma oranı çok yükselinceye kadar artar. Erimiş film tabakası çok ince ve kararsız hal sürtünme fazındadır. Erimiş film tabakası kalınlığı

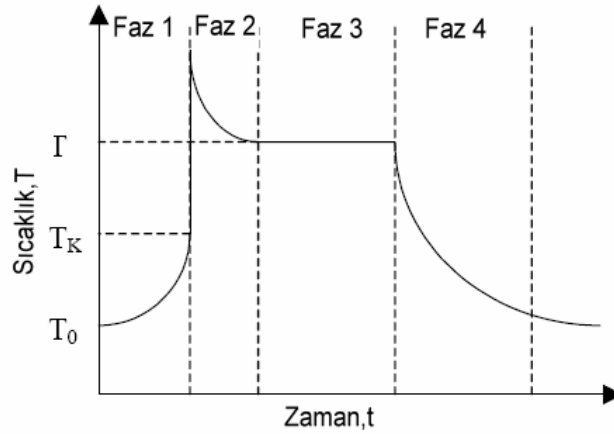
artıkça, aksenal basınç etkisiyle erimiş malzemenin bazı parçaları sıkarak dışarı çıkarabilir.



Şekil 2.9. Dönel Sürtünme Kaynağının Şematik Gösterimi [2].

Faz 3'de ara yüzeylerdeki ısı oluşumu ve kaybı eşitlik durumuna ulaşmasıyla kararlı hal akış fazı vuku bulur. Bu faz süresince, eriyen katman sabit kalınlıkta ve sabit sıcaklıktadır. Dikkat edilirse, iyi kalitede bir kaynak için gerekli hassas akış sağlandığı zaman, kararlı hal rejimi, yüksek kaynak mukavemeti sağlar.

Faz 4'te döngüsel hareket ani veya kademeli olarak durdurulur. Dövme kuvveti malzeme soğuyana kadar uygulanır [2].



Şekil 2.10. Dönel Sürtünme Kaynağı Yöntemi Basamakları [2].

Günümüze kadar metalik malzemelerin seri üretiminde sadece sabit makinelerle dönel sürtünme kaynağı yaygın olarak uygulanmıştır. Bu yöntemin iki uygulanma şekli vardır. Bunlar; sürekli tahrikli dönel sürtünme kaynağı ve volan tahrikli dönel sürtünme kaynağı'dır.

Bu yöntemlerde tahrik şekli ve yığılma işlemi birbirinden farklıdır. Birinci yöntemde, enerji girdisi sürekli tahrikle (motor), sabit dönme hızında yapılır. Parçalara yeterli ısı girdisi sağlanınca tahrik kesilir ve dönel hareket bir fren yardımıyla mümkün olduğunca hızlı bir şekilde durdurulur.

İkinci yöntemde ise, parçaya verilecek enerji, dönel bir volana depolanır. Bu kinetik enerji, parçaların ısıtılması için kullanılarak parçaların kaynağı tamamlanır.

ABD'de ve uçak/uzay sanayinde genellikle volan tahrikli dönel sürtünme kaynağı kullanılır [2]. Avrupa'daki kaynak makineleri ise genellikle sürekli tahrikli makinelerdir. Ancak bu makineler oldukça geliştirilmiş olup, frenleme ve yığılma süreleri serbestçe ayarlanabilmektedir. Yani yığılmanın, tahrikin durdurulmasından sonra yapılması zorunluluğu yoktur. Bu tür çalışmaya "kombine dönel sürtünme kaynağı" adı verilir.

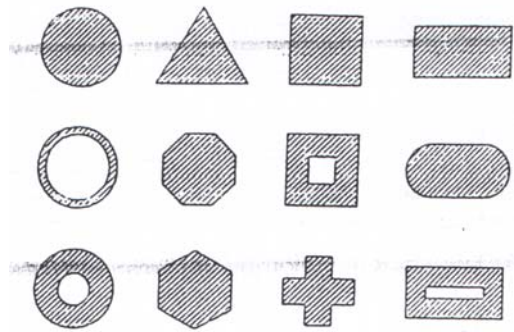
Diğer dönel sürtünme kaynağı türleri olan radyal dönel sürtünme kaynağı türleri olan radyal dönel sürtünme ile kaplama ve orbital dönel sürtünme kaynağının pratikte önemli bir uygulama alanı yoktur. Doğrusal dönel sürtünmeli kaynak ve sürtünmeli saplama kaynağı gibi yeni yöntemler geliştirilerek, dönel sürtünme kaynağı yöntemleri, seri imalata uygun hale getirilmeye çalışılmaktadır.

Dönel sürtünme kaynağı makineleri, yatay veya düşey (ender olarak) sabit kaynak makinelerdir. Makine büyüklüğü, uygulanan en yüksek yığılma kuvvetine bağlı olarak değişir. Hassasiyetleri bakımından takım tezgahları ile karşılaştırılabilirler.

Dönel sürtünme kaynağı tam mekanize bir yöntem olup, otomasyona çok uygundur. Dönel sürtünme kaynak makineleri için değişik ilave donanımlar söz konusudur. Bunlar; Parça yükleme ve boşaltma donanımı, hızlı takım değiştirme donanımları, parametre kontrolleri, yığılma çapağının ve yüzeylerin nümerik kontrollü olarak işlenmesi, dönel ayna için pozisyon kontrollü frendir.

Birçok metalik malzeme ve kombinasyonunun dönel sürtünme kaynağı için, uygulamalar ve deneylerle elde edilmiş veriler mevcuttur. Dönel sürtünme kaynağının özelliği, eritme kaynağı yöntemlerinin uygulanamadığı malzeme ve malzeme kombinasyonlarında da başarıyla kullanılmasıdır. Diğer kaynak yöntemleri için kaynağa uygunluğu belirleyen kriterler, dönel sürtünme kaynağı için her zaman kullanılmaz. Bunun nedeni, birleştirme sıcaklığının düşük, kaynak süresinin kısa ve birleştirmenin bir kuvvet altında yapılmasıdır. Buna örnek olarak çeliğin (alaşımly veya alaşimsız) alüminyum ve bakır ile toz metalürjisi ile üretilen parçaların ve seramiklerin (Al_2O_3 , ZrO_2) alüminyum ile sert ve ağır metallerin diğer metallere dönel sürtünme kaynağı gösterilebilir.

Dönel sürtünme kaynağı ile dolu ve içi boş kesitlerin kaynağı yapılabilir. Dolu kesitlerde çaplar 1mm'den 300mm'e kadar olabilir. Boş kesitlerde ise, benzer büyüklüklerdeki kesit alanlarına sahip parçalar dönel sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirler. Yakın zamana kadar geçerli olan, dönel sürtünme kaynağının yalnızca dönel simetriye sahip kesitlerde kullanılabileceği sınırlaması, günümüzde değerini yitirmiştir. Dönel aynanın istenilen pozisyonda frenlenebilmesi sayesinde dönel simetrisi olmayan malzeme kesitlerinde de dönel sürtünme kaynağı uygulanabilmektedir. Şekil 2.11.'de dönel sürtünme kaynağına uygun parça kesitleri gösterilmiştir [1].



Şekil 2.11. Dönel Sürtünme Kaynağına Uygun Parça Kesitleri [1].

Kaynak parametrelerinin (dönme hızı, aksenal kuvvetler, parçaların kısalması, kaynak süresi) ve bunların zamanla değişiminin kontrolü kolay olup, bu sayede kaynak işleminin akışı programlanabilir. Buna paralel olarak malzemedan gelen etkiler de

kontrol edilebilirse, kaliteli ve güvenilir kaynak dikişleri elde edilebilir. Bu veriler, istatistiksel değerlendirmeler için çok uygundur. Böylece kaynağı yapılan parçaların yüksek düzeyde bir güvenilirliğe sahip olması sağlanabilir. Değişik malzemeler için önemli kaynak parametreleri, Tablo 2.2 de toplu olarak verilmiştir.

Dönel sürtünme kaynağı yıllardır hızlı, çevreye zararlı olmayan ve güvenilir bir kaynak yöntemi olarak kabul edilmektedir. Seri ve kütle üretiminde kullanılır, ayrıca az sayıda parçalar için de (örneğin tamir kaynakları) ekonomik olarak kullanılabilir. Dönel sürtünme kaynağı, takım üretiminde ve otomotiv sanayinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır: örneğin supapların kaynağında, mafsal ve tahrik millerinde. Aks parçalarında, dönel sürtünme kaynağından, hafif yapıların elde edilmesinde de yararlanılabilir. Örneğin bir tahrik mili orta kısmı alüminyumdan, uçları ise çelikten olacak şekilde imal edilebilir. Diğer uygulama alanları, elektroteknik, yapı endüstrisi ve tesisat yapımıdır [1].

Tablo 2.2 Dönel Sürtünme Kaynağı İçin Temel Veriler (Sürekli Tahrikli Dönel Sürtünme Kaynağı) [1].

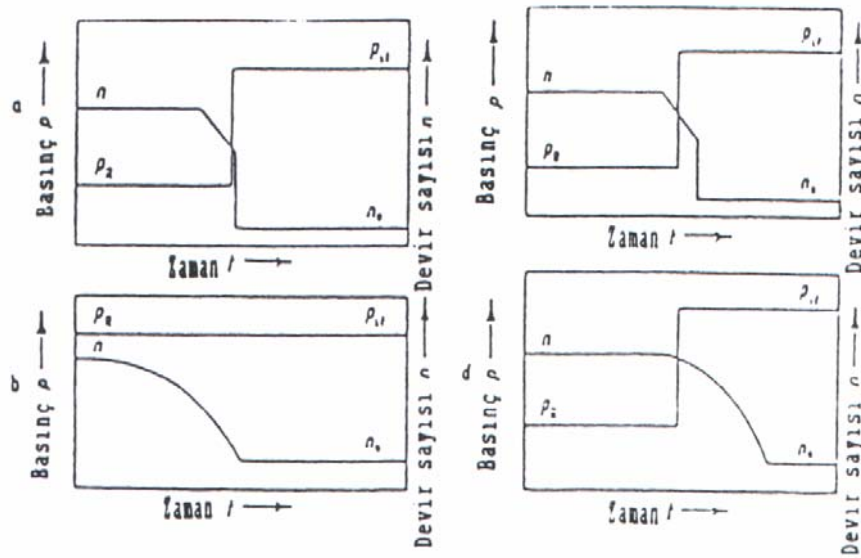
	Birim alan için		Sürtünme Süresi, S
	Sürtünme Kuvveti, N/mm ²	Yığılma Kuvveti, N/mm ²	
Alaşımız ve Düşük Alaşımli Çelikler	20 – 80	60 – 250	1 – 10
Yüksek Alaşımli Çelikler	40 – 100	120 – 400	3 – 15
Hafif Metaller	10 – 80	20 – 160	0,1 – 6

Dönel sürtünme kaynağının özellikleri;

- Kısa kaynak zamanı
- Sıçrantı duman veya ışımanın olmaması
- Birleştirilecek parçaların yüksek hassasiyette hazırlanması
- Az çarpılma, simetrik ısı girdisi
- Düşük kaynak bölgesi sıcaklığı
- Kaynak banyosu olmaması

- Bir çok malzeme kombinasyonlarının kaynağa uygunluğu
- İyi kaynak kalitesi
- Kaynak dolgu malzemesinin olmaması
- Yarı otomatik veya tam otomatik kaynağa uygunluk
- Eksenel simetriği olmayan parçalarda uygulanabilirlik
- Kaynaklanacak yapı elemanlarında kesit sınırlaması
- Sadece alın kaynağı
- Kötü tahribatsız muayene kontrolü'dür.

Değişik dönel sürtünme kaynağı türleri için devir sayısı ve basıncın zamana karşı değişimi Şekil 2.12.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Değişik Dönel Sürtünme Kaynağı Türlerinde, Devir Sayısı Ve Basıncın Zamanla Değişimi (a: Sürekli Tahrikli Dönel Sürtünme Kaynağı, b: Volan Tahrikli Dönel Sürtünme Kaynağı, c: Kombine Dönel Sürtünme Kaynağı (Frenleme Dışarıdan), d: Kombine Dönel Sürtünme Kaynağı (Kendinden Frenleme)) [1].

3.BÖLÜM

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ

3.1.Giriş

Demir türü veya demir dışı metallerin kaynatılabilmesi için çok sayıda ticari kaynak yöntemleri geliştirilmiştir. Bunlar;

—Ergitme,

—Optik,

—Katı hal

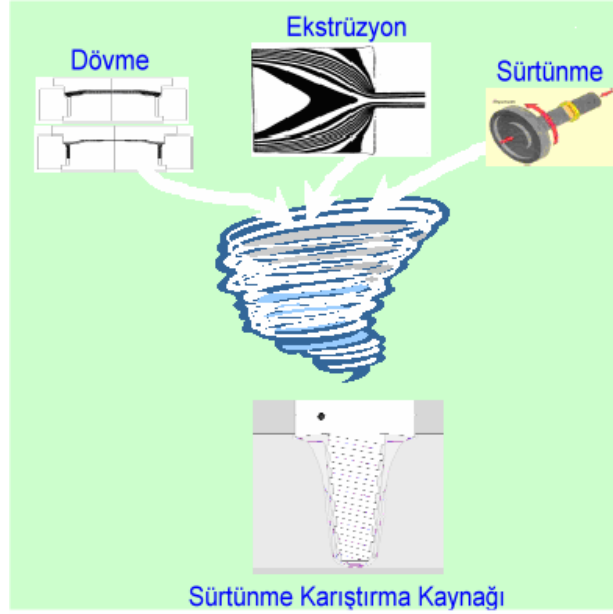
kaynak yöntemleri olarak en genel halde sınıflandırılabilir.

Sürtünme Karıştırma Kaynak (SKK) yöntemi de katı hal kaynak yöntemlerindedir. Uygulama olarak sürtünme kaynağından tamamen farklılık gösterir. SKK yönteminde kaynak işlemini gerçekleştiren ve özel olarak hazırlanmış bir takım bulunur. Söz konusu kaynak takımının ve iş parçasının kaynak esnasında belirli hareketleri yapması gerekir.

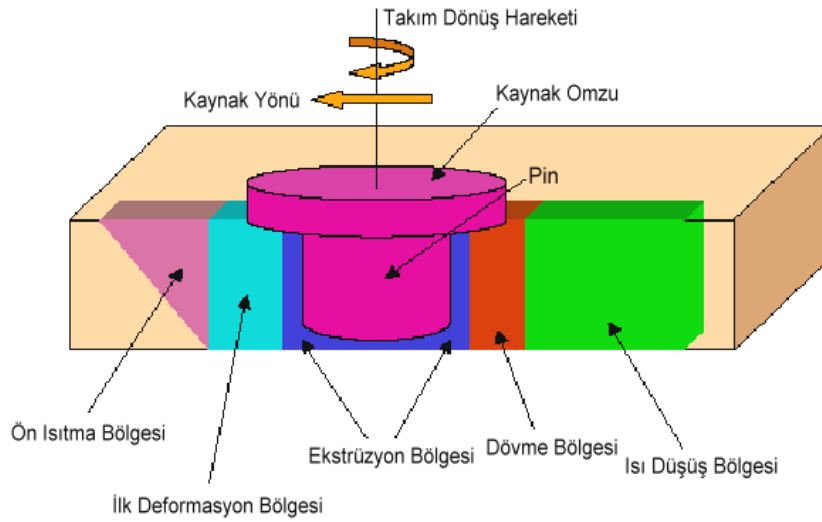
SKK yöntemi 1990'lı yılların başlarında Cambridge UK Kaynak Enstitüsü tarafından bulunmuş bir yöntemdir [4-11] ve birçok malzemenin kaynatılmasında kullanılabilir. Çoğunlukla alüminyum alaşımlarına [4, 7, 8, 12-32] uygulanmakla birlikte, çelik [33], bakır, titanyum alaşım malzemelerine [34,35], benzer olmayan malzeme çiftlerine [36,37,38] ve kompozit malzemelere [39,40] de uygulanabilmektedir.

Yöntemin, dışardan ek enerji ve dolgu malzemesi ihtiyacı olmadan kaynak yapılabilme, kaynak dikiş bölgesinin iyi mekanik özellikler göstermesi, kusursuz kaynak dikişi görüntüsü ve otomasyona uygunluğu gibi diğer kaynak yöntemlerine göre üstün özellikleri mevcuttur.

SKK yöntemi Şekil 3’de gösterildiği gibi kavram olarak; dövme, ekstrüzyon ve sürtünme tekniklerinin birleşimiyle oluşmuş bir birleştirme kaynak yöntemidir [3].

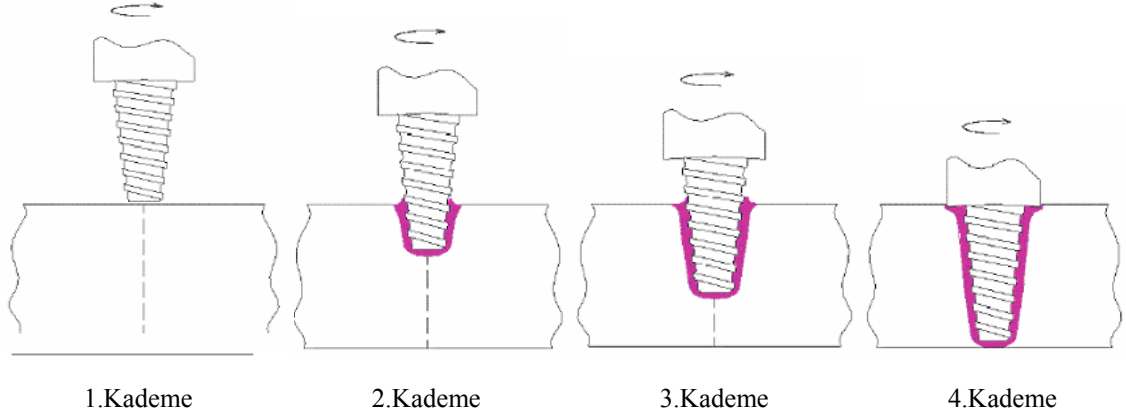


Şekil 3.1. SKK Kaynağının Kavramsal Gösterimi [3].

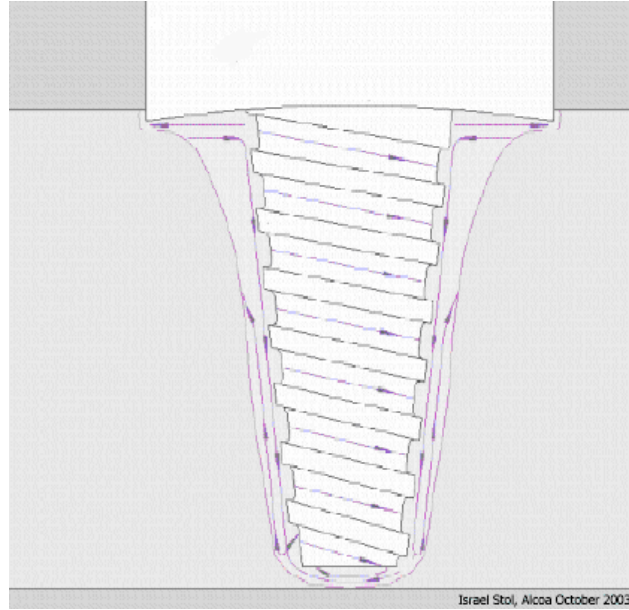


Şekil 3.2. SKK Süresince Kaynak Dikişi Boyunca, Gelişme Bölgeleri [3].

Şekil 3.4, en genel halde takım hareketlerinin kademelerini göstermektedir [3].



Şekil 3.4. SKK Takımı Hareketlerinin Kademeleri [3].



Şekil 3.5. SKK Kaynak Takımı Çevresindeki Malzeme Akışı [3].

Takımın omuz kısmı kaynatılacak yüzeylerin dış yüzeyi ile sürtünme hareketi yaparken, pim kısmı ise iki parça arasında dönel hareket yaparak malzemenin plastik olarak deformasyona uğramasını sağlar. Sürtünme ve karıştırma hareketleri esnasında sürtünme ısısi ortaya çıkar ve malzemelerin de daha kolay akışı elde edilir. Gerekli ısı, işlem anında takım etrafında ortaya çıkmaktadır. Omuz, sürtünme ısısi oluşturmak ve ısı

neticesinde yumuşak bir metal elde etmek için iş parçası üzerine bastırılır. Pim'in de sürtünme ısısına katkısı olmakla beraber, plastikleşen malzeme akışının, omuzdan malzemeye doğru akmasını sağlar (Şekil 3.5).

Pim üzerine vida dişi açılmıştır. Bu vida dişinin amacı, plastik deformasyona uğramış iş parçasının malzeme kaybına sebep olmadan pim çevresinde tam ve düzgün bir şekilde dağılmasını sağlamaktır. Kaynak kök kısmının tam kaynamasını sağlamak için, pim ucunun malzeme (plaka veya boru) arkasına çok yakın geçmesi gerekmektedir.

Kaynak takım omzunun kuvvetli bir şekilde malzemenin üst yüzeyine temas edip pim ile malzeme tabanı arasında az bir mesafe kalana kadar, malzemeye doğru hareket ettirilir. Bu noktada kaynak takımı alın bağlantısı boyunca kuvvetli bir direnç sağlar. Bu durum kaynağın bitimine kadar devam eder.

Kaynak işlemi esnasında sürtünme sonucu ortaya çıkan sıcaklığın ise kaynak dikişi merkezinde $0.8T_M$ değerini geçmediği ölçülmüştür [28]. Burada T_M mutlak ergime sıcaklığıdır. Bu yüzden işlem, ergimenin olmadığı katı haldeki birleşme ve süper-plastik kayma akışının oluştuğu bir işlemde ibarettir.

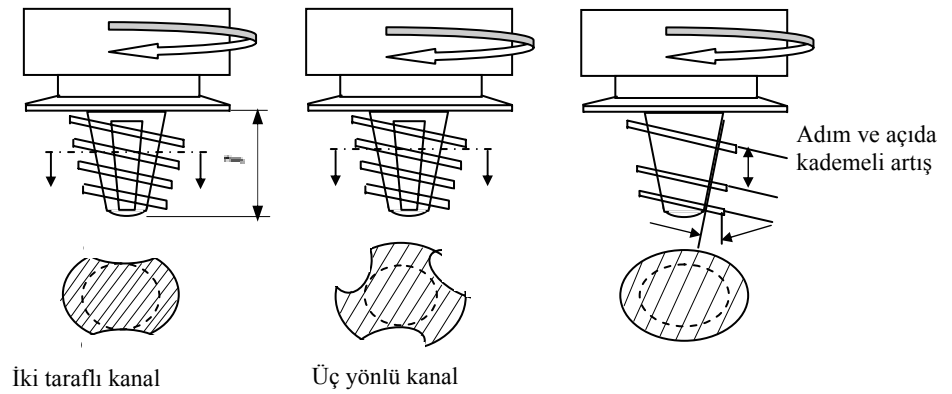
3.3.Sürtünme Karıştırma Yönteminde Kullanılan Karıştırıcı Eleman Tipleri

SKK yöntemi başlangıç dönemlerinde akademik seviyede incelenirken, günümüzde artık hem akademik hem de ticari manada çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların en önemli bölümlerinden birisi de kaynak işleminde kullanılan takımın geometrik yapısının seçimidir. Yöntemin bulunuşundan günümüze kadar oldukça farklı şekillerde takım uçları geliştirilmiştir.

3.3.1. Whorl™ Serisi Pimler (Baticı Uçlar) [41]

Denemeler sonunda, Whorl™ konfigürasyonları belirlenmiştir (Şekil 3.6). Kesik koni şeklindeki Whorl™ pim (probe), plastik akışa uğrayan metali aşağıya doğru yönlendirmek için helisel sırtlı profiller ihtiva etmektedir. Yani bir tür ekstrüzyon olayı gerçekleşmektedir.

Whorl™ tipi dairesel olmayan pim kesitleri sağlar. Bu nedenle, malzemenin daha kolay akmasına imkân vermek için pimin yer değiştirme miktarı, dönme miktarından daha az olması gerekmektedir. Şekil 3.7.'de 75 mm kalınlığındaki AA 6082-T6 alaşımının içine geçmiş Whorl™ serisi pim görülmektedir ve buradan da kaynak kesiti görüntüsü ile takım profilinin ilişkisi açıkça görülmektedir. Pim etrafındaki malzemenin daha etkili akması için her bir helisel sırt arasındaki uzaklığın sırt kalınlığından daha büyük olması gerekir. Pimin ucunun helisel sırtlarla paralel olması kritik bir özellik değildir.



Şekil 3.6. Çeşitli Whorl™ Konfigürasyonları.



Şekil 3.7. 75 mm Kalınlığındaki AA6082T6 Alaşımının Kaynağında Whorl™ Takımını Kullanılması, Kaynağın Bitmiş Hali ve Kaynak Dikişinin Görüntüsü.

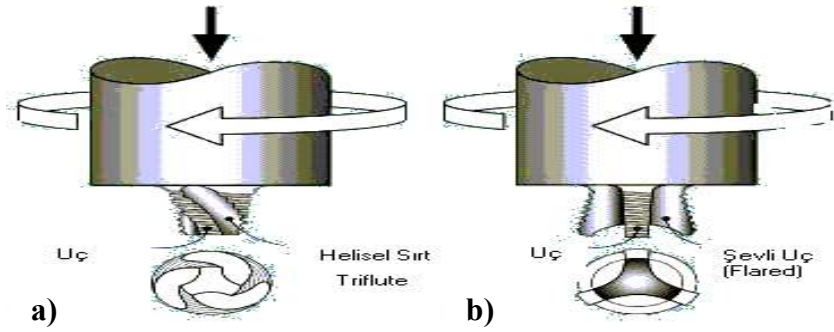
3.3.2. MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ Serisi Pimler (Batıcı Uçlar) [41]

Multi-Helix takımların (MX Triflute™) yivlerinin çevresinde helisel sırtların bulunması takımın hacmini düşürmekle beraber malzeme akışına yardım eder ve yüzeydeki oksitleri dağıtır (Şekil 3.8 ve 9).

Alın kaynağında kullanılan, Whorl™ ve Triflute™ uçları kesik piramit şeklindedir ve yüzeylerinde aşağıya doğru delme etkisini kolaylaştırmak amacıyla kaba işlenmiş helisel sırtlar ve oluklar bulunmaktadır. Bu girintili köşe şekilleri, ucun hacmini azaltır ve statik hacim oranı için uygun olan karıştırma hacmini sağlar. Daha iyi bir hacim oranı ile malzemenin akış yolu daha iyi olur ve böylece uç daha etkili çalışır. Ayrıca özellikle ucun etrafındaki kaba işlenmiş helisel sırtlarda bulunan girintili köşe özellikleri kaynak bölgesindeki yüzey oksitlerinin parçalanmasına ve dağıtılmasına yardımcı olur.



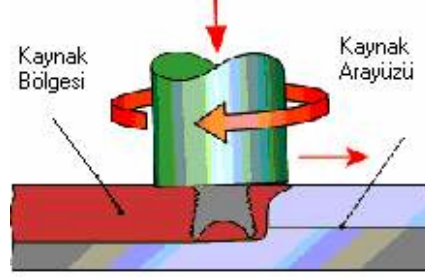
Şekil 3.8. MX Triflute™ Pimin Esin Kaynağı Deniz Kabuklarıdır. MX Triflute™ Serisi Pimin Resim ve Şematik Çalışma Şekli.



Şekil 3.9. MX Triflute™ ve Flared-Triflute™ Dizaynları.

Bindirme kaynağında ise uç, daha geniş kaynak bölgesi sağlamak ve kaynak yapılan ara yüzeylerde daha büyük levha kalınlıklarından dolayı oluşabilecek problemleri önlemek amacıyla daha farklı tasarlanmıştır (Şekil 3.10). Bindirme kaynağında pim yüzeyi kaynak ara yüzeyine zorunlu olarak dikdir ve alttaki levhaya yeteri kadar nüfuz edebilmesi ana amaçtır. Kaynak ara yüzeyinin üst yüzeyden mesafesi ve ucun

girintilerinin kaynağın kenarıyla kesiştiği açı çok önemlidir. Bu özellik, yorulma ile doğrudan bağlantılıdır. Ucun karakteristiği, süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki farkın artırmasıyla ucun etrafındaki ve aşağısındaki akış yolunun büyümesidir.



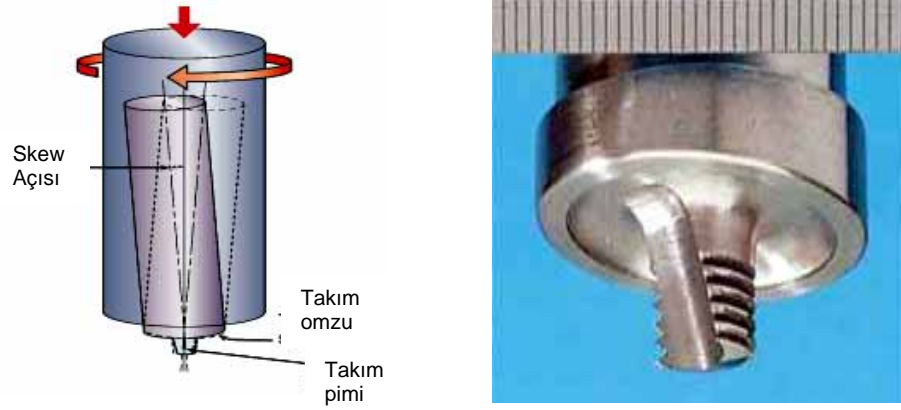
Şekil 3.10. Flared Triflute Probe ile Yapılmış Olan Bindirme Kaynağında Kaynak Ara Yüzeyinin Görünümü.

3.3.3. Skew-Stir™ ve A-Skew™ Serisi Pimler (Baticı Uçlar) [41]

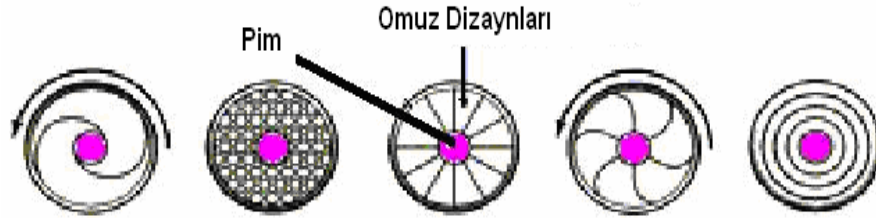
Sürtünme karıştırma kaynağı uygulaması için geliştirilen Skew-Stir™ serisi pim, pim ekseninin iş mili eksenine göre biraz eğim verilmesi ile diğer pimlerden ayrılır. Skew-Stir™ serisi pimler, dinamik süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki oranı pimin eğik hareketi ile artırabilmektedirler. Bu oran,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

Şekil 3.11.'de görüleceği üzere, omuz yüzeyi, eğik takım eksenine belirli bir eğim oluşturmaktadır. Omuz yüzeyi ise, plakanın üst kısmına bağlı olarak sabit durmaktadır. Omuz, iş parçası üzerinde iken dairesel hareket yapar. Takımın odak noktası, iş parçası yüzeyine veya iş parçasının herhangi bir noktası üzerine geldiğinde, omuzun temas yüzeyi esken dışı bir yörüngede hareket eder. Ayrıca, omuzun bu yörünge hareketi, omuzun eğrilik açısına ve odak noktası ile levhanın üst yüzeyi arasındaki mesafeye bağlıdır. Eğrilik açısı ve aradaki mesafe arttıkça, omuzun hareket sahası da artacaktır.

Whorl™ ve MX Triflute™ takımlarının omuzları (shoulder) da özel profillere sahiptir. Omuz profilleri, omuz ile iş parçası arasında daha iyi bir temas yüzeyi sağlamak amacıyla kullanılır. Sürtünme teması ile akan malzemenin kaynak bölgesinden ayrılması önlenmektedir (Şekil 3.12).



Şekil 3.11. Skew-Stir Metodunun Çalışma Prensibi ve A-Skew Ucunun Resmi.



Şekil 3.12. Whorl™ ve MX Triflute™ Takımlarının Omuz Profilleri.



Şekil 3.13. Geri Çekilebilir Pim Takımları[42]

Kaynak sonunda parça üzerinde genellikle küçük delikler kalabilmektedir. Pim, iki parça arasında kaynak bağıını oluşturmak için yavaşça daldırılır ve yüksek hızda döndürülür. Kaynak sonunda tek parçalı pim takımı geri çekilir ve delikten uzaklaştırılır. Bunlardan bazılarında yani tamburlar, borular ve stok tanklarında da böyle bir kaynak kabul edilemez. Diğer bir geri çekme, değişen kalınlıklarındaki malzemeler kaynatıldığında farklı uzunlukta pim takımları (Şekil 3.13) gereklidir.

Bu geri çekme problemini çözümlenebilmek için NASA Marshall Uzay Uçuş Merkezi kaynak mühendisleri otomatik olarak geri çekilebilir pim takımı dizaynı yapmışlardır[42]. Kaynak sonrasındaki deliği önlemek için takım omuzu içerisindeki pim bilgisayar destekli şekilde otomatik geri çekilebilir olarak kullanılmaktadır. Bu dizayn piminin açılma ayarına ve malzeme kalınlıklarına göre pim boyunda ayarlama imkanı sağlar ve kaynak sonunda uygun bir kapalı delik ortaya çıkarır.

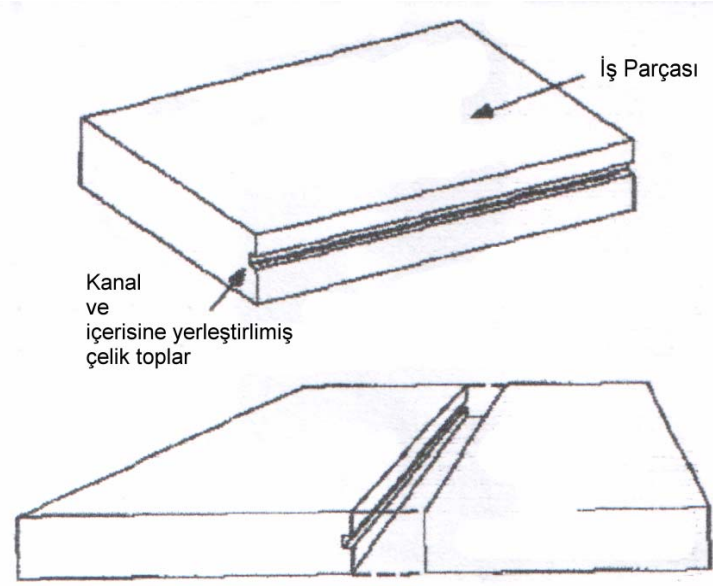
3.4.Kaynak İşlemi Esnasındaki Malzeme Akışı

İşlem esnasında malzeme akış şeklini incelemek amacıyla farklı çalışmalar yapılmıştır [19]. Dönel takım (veya pimli başlık) işlem esnasında kayma şekil değişimi ve sürtünme ısısının her ikisinin etkisiyle, kaynak esnasında oldukça kompleks bir malzeme akışı meydana getirir. Sürtünme ısısını oluşturan çelik takım kol, omuz ve pimden (Şekil 3.3.'de görüldüğü gibi) oluşmaktadır.

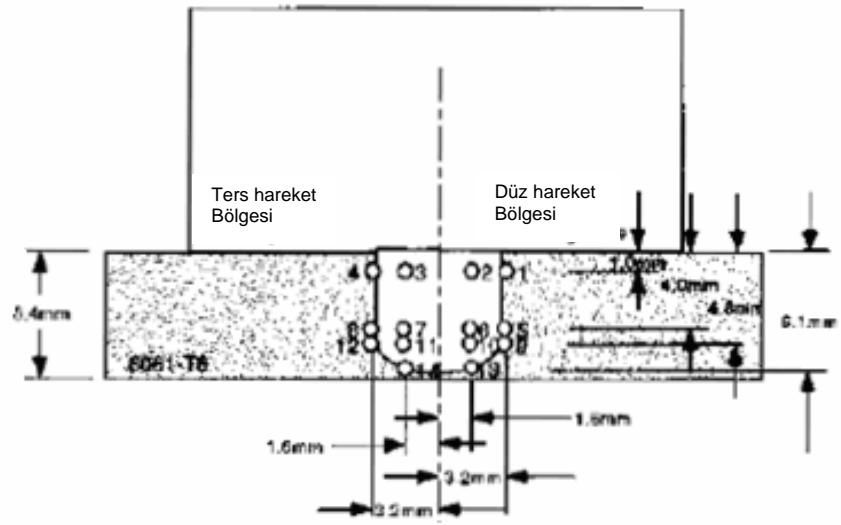
Takıma paralel ve dik yönde vorteks hareketlerinin devreye girdiği katı hal akış halleri olarak tanımlanan, dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölgedeki (DYKB) kesit boyunca lineer çizgiler ortaya çıkmaktadır.

Colligan [43] kaynak esnasında malzeme akış yönünü tespit etmek için 6.4 mm kalınlıklarında AA6061-T6 levhalar ve 0.38 mm çaplarında çelik bilyeler kullanmıştır. Kaynak işlemi süresince uygun bir teknik kullanarak küçük bilyelerin kaynak edilen iki levha arasına girmesi sağlanmıştır (Şekil 3.15). Kaynak takım elemanı olarak farklı tipler denenmesine rağmen, aralarında çok az bir fark olduğunu tespit etmiştir. Burada önemli olan şeylerden birisi de takımın dönme ve iş parçasının veya takımın ilerleme yönleridir.

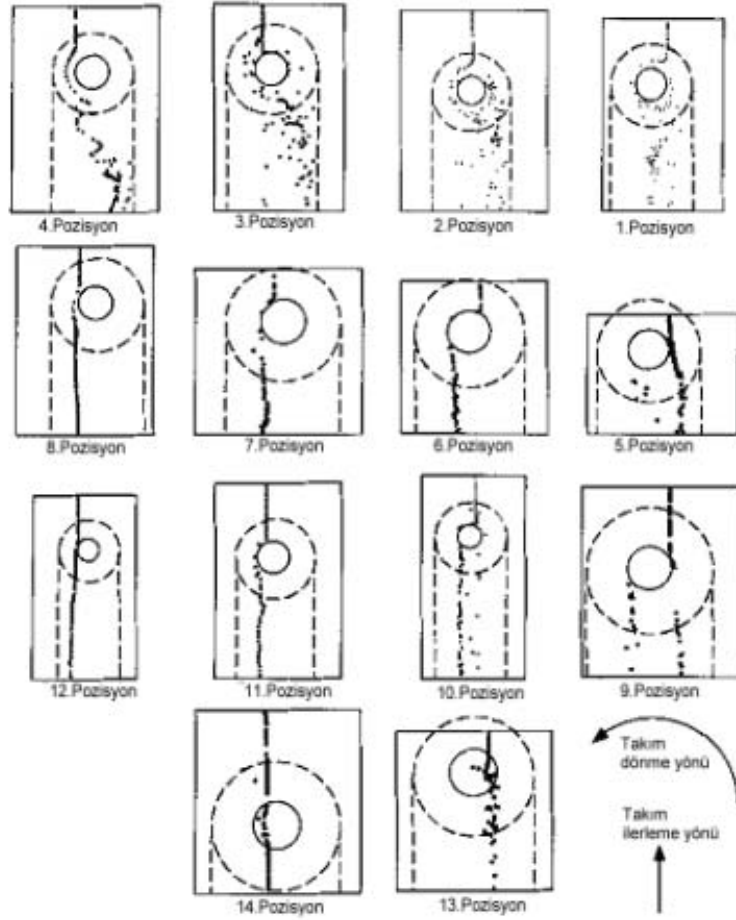
SKK işlemi esnasında, dönen kaynak takımı (stirrer), takım geometrisinin bir fonksiyonu olarak değişen, çevresindeki malzeme içerisinde karmaşık plastik deformasyon oluşturur. Takım üzerindeki vida ya ters akışlı ekstrüzyonun kaynak üst yüzeyine doğru ya da pim etrafında zorunlu olarak çevresel akış şeklinde malzeme aşağı (yani içeri) doğru yönelir [5]. Malzeme akış şekli metalografik, standart radyografi veya X-ray tomografi yoluyla incelenmiştir.



Şekil 3.14. İş Parçasına Açılan Kanal ve Çelik Topların Yerleştirilmesi [43].



Şekil 3.15. 6,4 mm'lik AA6061-T6 Levhasındaki İz Pozisyonları, Farklı Yönlere Yönelmiş, Malzeme İçerisindeki Çelik Bilyelerin Dağılımının Şematik Görünümü [43].

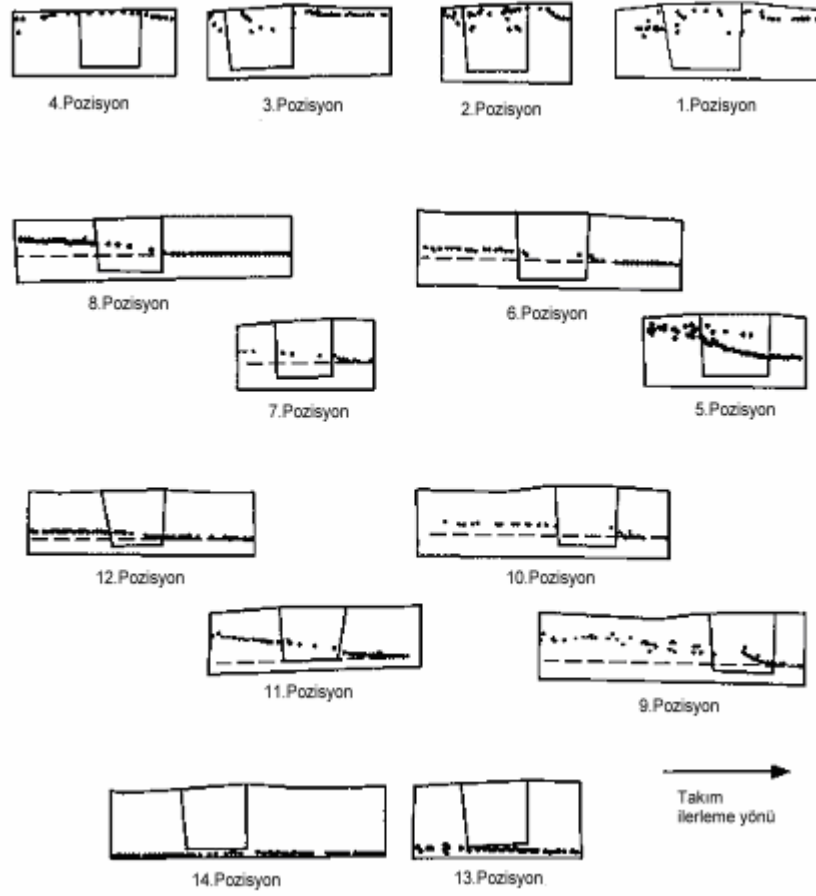


Şekil 3.16. AA6061 Kaynağı İçin Radyografik Görüntü Çizimleri. (Şekil 3.14.'de Belirtilen Takım Kaynak Ölçülerinde ve Pozisyonları için Geçerlidir)[43].

Şekil 3.16'da sürtünme karıştırma esnasında çelik bilyelerin malzeme içerisindeki akış şekilleri gösterilmektedir. Burada verilen pozisyonlar Şekil 3.15.'deki şekil üzerine numaralı olarak gösterilen çelik bilyelere aittir. Dolayısıyla kaynak işlemi, başladığında kaynaklı bölge içerisindeki bilyelerin dağılım durumuna göre plastik deformasyona uğramış malzemenin de akış şekli hakkında bir karar vermek mümkün olmaktadır. Bununla birlikte oldukça farklı malzeme akış şekilleri ortaya çıkmaktadır.

Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'deki 1, 2 ve 3. pozisyonlar çelik bilyelerin yeniden yönlendirilerek pim arkasında karışık olarak çökeldiği halleri göstermektedir. 4 ile 14 arasındaki pozisyonlar da çelik bilyeler birbirini takip eden sürekli hat çöktüklerini sergilemektedir. Bu genel halde, malzemenin karışık dağılımı, geriye birbirini izleyen orijinal hattın görülmediği birbirini takip eden bir modelin oluşumunu gösterir. Bu tip

dağılımda, bireysel birbirini izleyen elemanlar kaynak takım pimi arkasındaki nispeten geniş bir bölgede tahmin edilemeyen yönlerde dağılmaktadırlar. Tersine olarak, bu hallerde burada birbirini izleyen malzeme, pimin arkasında yaklaşık olarak malzemenin sürekli hattında toplanır. Birbirini izleyen malzeme orijinal pozisyonundan malzemenin en üst yüzeyine bir dereceye kadar yakın nihai pozisyona hareket etmektedir.



Şekil 3.17. AA6061 Kaynağı için Her İki Taraftan Çekilmiş Radyografik Görüntü Çizimleri [43].

Bu sonuçlar göstermektedir ki, pim yolunda direkt olarak levhanın orta kesitinden gelen malzeme kaldırılır ve pimin dönme yönünde, pim etrafında yönlendirilir. Pim kenarları ile beraber sıralanmış levhanın orta kesitinden gelen malzeme ayrıca kaldırılır, fakat dönen pim tarafından ortaya çıkarılan kayma kuvvetleri vasıtasıyla daha az etkilenir. Kaynağın ilerleme kenarı üzerinde, bu kenara ait malzeme pimin dönme akışıyla tutulabilir ve kaynak merkez hattından ileriye doğru itilebilir. Yeniden işlenen kenar

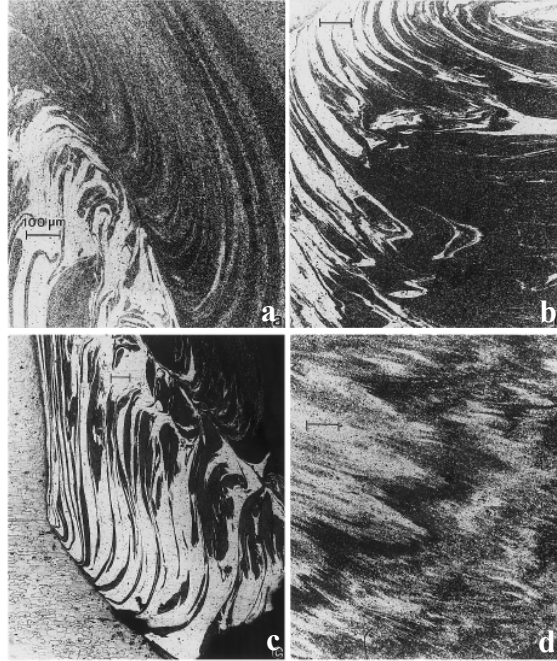
üzerinde pim kanarıyla birlikte sıralanmış orta kalınlıktaki malzeme, yanal olarak çok fazla yer değiştirmeksizin pim tarafından çevredeki malzeme yönlendirilirken basit şekilde kaldırılır.

Ying Li ve arkadaşları 2024 ve 6061 alüminyum alaşımlarının SKK ile kaynak işlemi üzerine incelemeler yapmışlardır [28]. Yapmış oldukları çalışmalarında Şekil 3.18.'de görüldüğü gibi farklı malzeme akış şekillerini tespit etmişlerdir. Bunlar homojen akış tipimin yanısıra, kompleks spiraller ve vortekse benzer akış tipleridir. Bir diğer tipi de ara geçiş akış tipidir (Şekil 3.18.(b)).

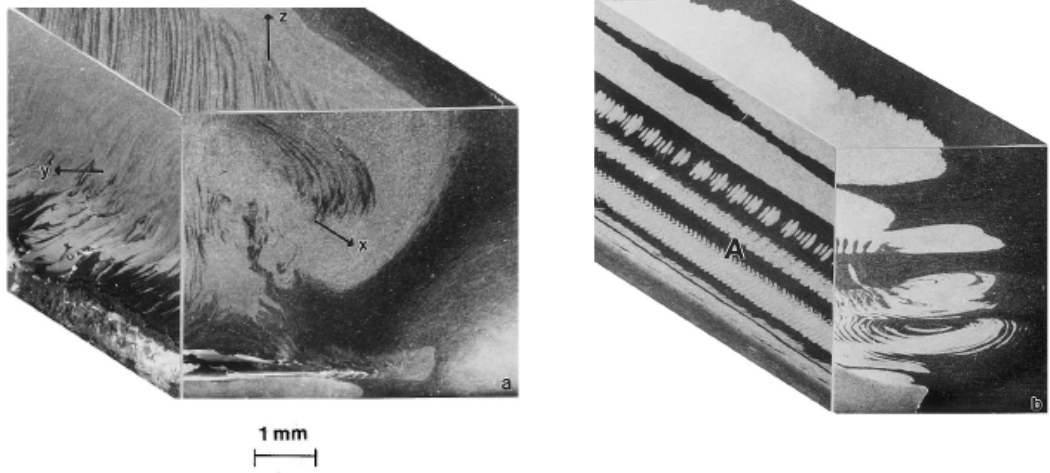
Diğer bir araştırmada ise kaynak takım pimin etrafındaki malzemenin dönele akış alanını üç grupta göz önüne almışlardır [44]. Bunlar;

- 1) Saf yer değiştirme alanı
- 2) Rijit disk dönele akış alanı ve
- 3) Radyal olarak simetrik vorteks halkalı akış alanı 'dır.

Özellikle bu 3.cü maddedeki akış alanında ifade edilen durum, Şekil 3.5'de gösterilen malzemenin akış şeklidir [3].



Şekil 3.18. Kaynak Bölgesi İçerisindeki Akış Tipleri; (a) Swirl ve Vorteks Tipi Akışlar, (b) Vorteks-Spiral Akış Tipi Arası Akış Şekli, (c) Ara Geçiş Akış Tipi, (d) Homojen Karışım ve Kaynak Merkezine Yakın olan Akış Şekilleri [28].

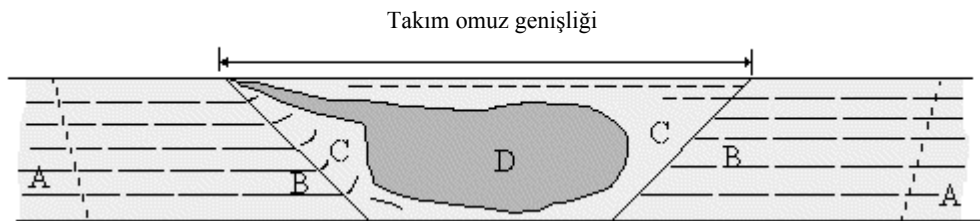


Şekil 3.19. Üç Boyutlu Kaynak Bölgesi İçerisindeki Akış Tipleri; (a) X-Y Düzlemine Dik Pozisyonda Çalışan Normal Takım, (b) Z Eksenine Göre 2 Derecelik Eğimde Çalışan Yivli Takım [28].

Ying Li ve arkadaşları söz konusu akış şekillerini üç boyutlu olarak da Şekil 3.19.'da göstermektedir [28, 29].

3.5.Sürtünme Karıştırma Kaynaklarında Mikroyapıdaki Sınıflandırma [45]

Mikroyapının sınıflandırılması ile ilgili ilk çalışma P.C.Threadgill tarafından 1997'de yapılmış olup, bu çalışma alüminyum alaşımlardan uygun bilgi temelleri üzerine tesis edilmiştir. Daha sonra Dünya Malzeme Birleştirme Teknoloji Merkezi TWI, mevcut çalışmayı geliştirmiş, endüstride ve üniversitelerde birçok kişiyle irdeleme yapılmıştır. Ayrıca Sürtünme Karıştırma Kaynak Lisans Birliği tarafından da kabul edilmiştir. Şekil 3.20.'de görüldüğü gibi sistem net bir şekilde kaynak bölgelerine ayrılmıştır.



Şekil 3.20. SKK Temel Kaynak Bölgeleri (A: Etkilenmemiş – Ana malzeme, B: Isıdan etkilenmiş bölge (IEB), C: Termo-mekanik olarak etkilenmiş bölge (TMEB), D: Dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölge - weld nugget (DYKB))

Etkilenmemiş Malzeme (veya ana malzeme): Bu bölge kaynaklı bölgeden uzak, deforme olmamış, mikroyapısı ve mekanik özellikleri değişmemiş olan malzeme bölgesidir.

Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB): Bu bölge, kaynak merkezine yakın bulunmaktadır. Malzeme, mikroyapı veya mekanik özelliklerin değişimini sağlayan termal çevrimden etkilenmektedir. Bununla birlikte bu alanda plastik deformasyon oluşmaz.

Termo-Mekanik Olarak Etkilenmiş Bölge (TMEB): Söz konusu bölgede, malzeme sürtünme karıştırma kaynak takımı tarafından plastik olarak deforme edilmiştir. Bundan dolayı ısı ayrıca malzeme üzerinde bazı etkiye sahiptir. Malzemenin alüminyum olması durumunda, bu bölgede rekristalizasyon olmaksızın önemli plastik şekil değişimi sağlamak mümkündür ve rekristalize olmuş bölge ve deforme olmuş TMEB arasında genellikle net bir sınır vardır. Bununla birlikte, diğer metaller üzerindeki çalışmalar da göstermiştir ki, alüminyum, çoğu diğer metallerden farklı bir tarz göstermektedir [45]. Çünkü rekristalize olmadan yüksek sıcaklıkta aşırı bir deformasyon olabilmektedir. Diğer metallerde, sınırlı rekristalizasyon bölgesi yoktur ve tüm TMEB rekristalizasyon olmuş gibi görünmektedir. Bu, termal olarak faz dönüşümüne uğramış malzemenin kesin doğruludur. Örnek olarak saf titanyum, b titanyum alaşımları, östenitik paslanmaz çelikler ve bakır. Ferritik çelikler ve a-b titanyum alaşımları (Ör: Ti-6Al-4V) gibi malzemelerde, termal faz transformasyonu yüzünden mikroyapıyı anlamak çok zordur ve bu IEB / TMEB sınırlarını hassas bir şekilde tanımlanmasını zorlaştırabilir.

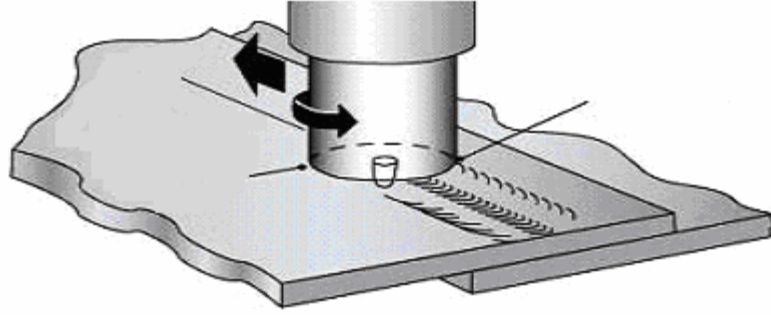
Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB): Alüminyum alaşımlarında TMEB içerisindeki rekristalize olmuş bölgeye dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölge (DYKB) denir. Takım omzunun hemen altındaki (TMEB nin bir parçası) alan, tane yapısının farklılığından dolayı, ayrı kategoride verilmesi önerilmiştir. Buradaki mikroyapı, omuzun arka yüzeyi sürtünmesine, malzemenin soğuma süresiyle ilişkilidir. Bu bölge, TMEB'nin bir alt bölgesi olarak ayrı irdelenmesinde fayda vardır.

3.6. SKK Yönteminin Kullanım Alanları

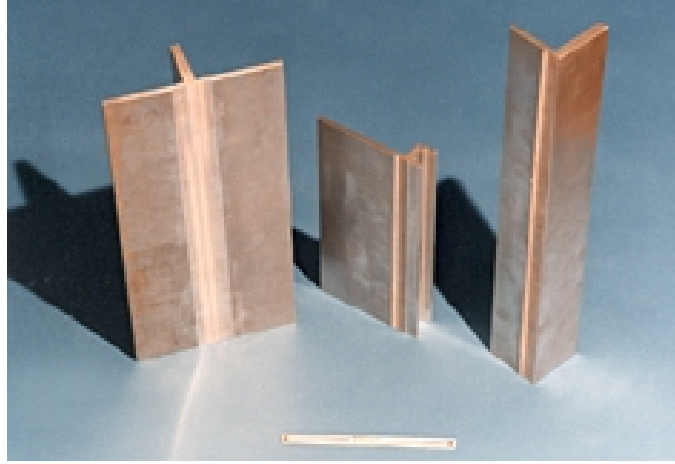
Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi gerek yaşlandırma sertleştirilmesi yapılan gerekse yaşlandırma sertleştirilmesi yapılamayan (l xxx ve 5xxx serileri gibi ısıl işleme duyarlı olmayan) Al-alaşımalarında başarı ile kullanılabilir. Bu yöntem ile elde edilen birleştirmelerin yüzey kalitesi ark kaynağı ile elde edilen birleştirmelerden çok daha yüksektir. Buna ilaveten, bu yöntem ile kaynak edilen 5454 alüminyum alaşımının korozyon performansının da oldukça iyi olduğu tespit edilmiştir. Hatta, geleneksel kaynak yöntemleri ile kaynağı çok güç olan 7075 alüminyum alaşımı bile bu yöntem ile başarılı bir şekilde birleştirilmiş ve elde edilen birleştirmeler oldukça iyi mekanik özellikler göstermiştir [41].

Bu kaynak yöntemi ile farklı kalınlardaki levhaların birleştirme işlemi pimin eğik konumda levhalara daldırılması ile yapılabilir. Bu kaynak yöntemi ile tek pasoda 50 mm kalınlığa kadar Al-alaşımındaki levhaların alın kaynağı yapılabilir. Ayrıca çift taraftan kaynak yaparak kalın parçaların da birleştirilmeleri mümkündür. Bu şekilde, 75 mm kalınlığındaki 6082 Al-alaşımı levhalar çift taraftan kaynak edilerek başarı ile birleştirilmiştir. Bu kaynak metodu ile düz ve çeşitli profillerdeki sac ve levhaların alın ve bindirme kaynağı yapılabilir. Şekil 3.21.'de sürtünme karıştırma bindirme kaynağının yapılışını şematik olarak göstermektedir. Al-alaşımı veya mukavemeti düşük diğer malzemelerden T ve L profillerin üretiminde ve boru bağlantı kaynaklarında da bu yöntem kullanılabilir (Şekil 3.21) [41].

Al-alaşımaları dışında, ergitme kaynak yöntemleri ile kaynağı mümkün olmayan veya güç olan Al-Li gibi bazı alaşımlar ve 0.8 mm kalınlığındaki çinko sacların kaynağında bu yöntem başarı ile uygulanmıştır. Ayrıca, düşük karbonlu yumuşak çeliklerin, Mg-alaşımının, Ti-Al alaşımlarının, saf Cu ve pirinç gibi Cu-alaşımlarının, düşük sertlikteki östenitik paslanmaz çeliklerin ve ergime derecesi birbirine yakın farklı iki malzemenin kaynağında da bu yöntem başarı ile uygulanabilir. Özel amaçlı sürtünme karıştırma kaynağı makinelerinde 50 mm kalınlığındaki saf bakır levha 100 mm/dak kaynak hızında mükemmel kalitede kaynak edilmiştir [41].



Şekil 3.21. Sürtünme Karıştırma Bindirme Kaynağının Şematik Gösterimi [41].



Şekil 3.22. T ve L Profillerinde Sürtünme - Karıştırma Kaynağı Uygulaması [41].

SKK yöntemi, çinko ve kurşun levhalarda olduğu kadar magnezyum alaşımlarında da başarı ile uygulanabilmektedir. İngiliz Kaynak Enstitüsünde (TWI) 9.5mm kalınlığındaki magnezyum AZ61A alaşımında yapılan ilk deneyler başarı ile sonuçlanmıştır [41]. Japonya'da yapılan bir çalışmada da, 6 mm kalınlığındaki AZ31 magnezyum alaşımı üzerinde yapılan deneylerde, kaynak esnasında ince yeniden kristalleşmiş tane yapısının oluşmasından dolayı, numunelerin mukavemeti ile baz malzemenin mukavemet değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu saptanmıştır [41].

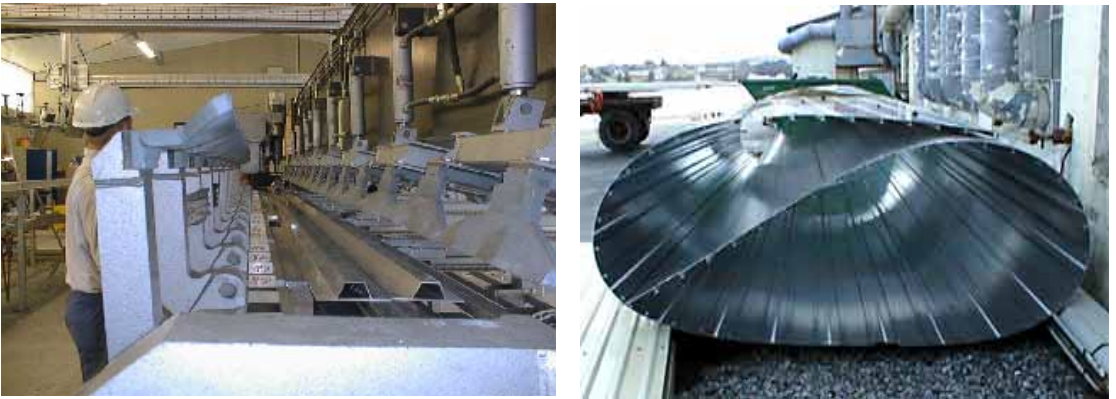
Uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan titanyum alaşımlarında sürtünme karıştırma kaynağı denemeleri başarı ile gerçekleştirilmiş ve çalışmalar devam etmektedir. Yüksek korozyon dayanımından dolayı petrol boru hattı şebekeleri ve su üstü platformlarında

rakipsiz olan bu alaşımın sũrtũnme karıştırma kaynağının bu uygulamalarda kullanabilirliği konusunda araştırmalar sũrdũrũlmektedir [41].

3.6.1. Gemi Endũstrisinde Sũrtũnme - Karıştırma Kaynağı Uygulamaları [41]

Sũrtũnme karıştırma kaynağı ile ilgili ilk ticari uygulama, balıkçı gemilerinin derin dondurucularının oluklu alũminyum panellerinde kullanılmıştır. Bu kaynak yũntemindeki minimum çarpılma ve yũksek verimlilik, teknik ve ekonomik yũnden sert panel üretiminde bu işlemi cazip kılmaktadır. Bu yũntem ile Japonya'da alũminyum petek paneller ve deniz suyunun korozyon etkisine dayanıklı panellerin ũretimleri yapılmaktadır [41].

Yũksek hız feribotlarında kullanılan standart boydaki alũminyum ekstrũzyon panelleri sũrtũnme karıştırma kaynağı ile birleştirilmektedir. Ergitme kaynaklarına kıyasla ısı girdisinin dũřũk olması panellerdeki çarpılma ve kalıntı gerilmelerini minimum dũzeyde olmasını sağlamaktadır. Norveç'te bulunan Hydro Marine Aluminum firmasında son ũ yilda 70 kilometre uzunluğunda Şekil 3.23'de gũsterilen alũminyum ekstrũzyon paneli sũrtũnme karıştırma kaynağı ile birleştirilmiştir [41].

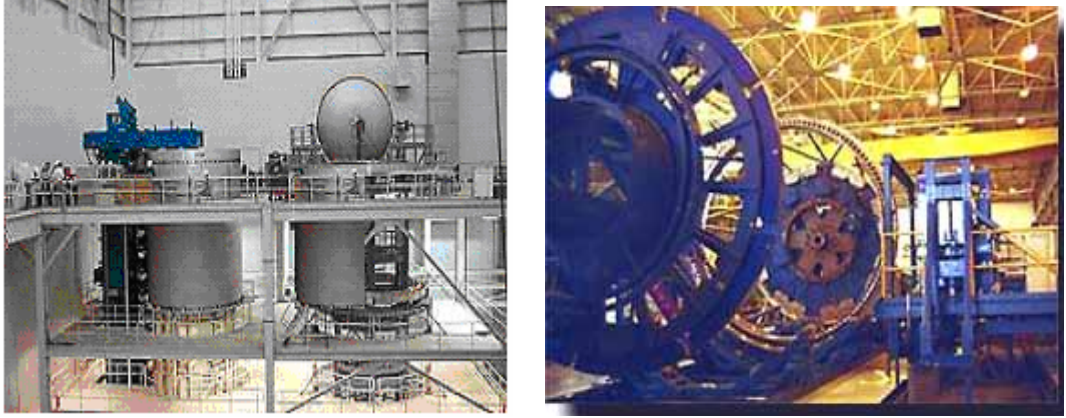


Şekil 3.23. Alũminyum Ekstrũzyon Panellerinin Sũrtũnme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi.

3.6.2. Uçak ve Uzay Endüstrisinde SKK Uygulamaları [41]

1993 yılında NASA, Lockheed Martin Laboratuvarlarından, Space Shuttle External Tank projesinde (uzay mekiklerinin yakıt tanklarında) AA2219 alüminyum alaşımı yerine kullanılmak üzere daha yüksek mukavemetli, düşük yoğunluk ve hafiflikte bir malzeme geliştirilmesi için talepte bulunmuştur. Bunun üzerine Al-Li 2195 olarak bilinen çok daha hafif yeni bir alüminyum alaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen bu alaşım sayesinde External Tank projesinin (yakıt tankı) ağırlığı yaklaşık 3500 kg azaltılmıştır.

Yeni düşük ağırlıklı Al-Li 2195 alaşımının ergitme kaynağı çok zor olmakta ve kaynak bölgesinin mukavemeti göz ardı edilemeyecek kadar düşmektedir. Dolayısıyla, bu uygulama için mukavemet düşüşünün daha düşük seviyede olduğu bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı ideal bir birleştirme yöntemidir. Günümüzde, Al-Li 2195 alaşımından üretilen uzay mekiklerinin yakıt tanklarının son kubbe kısımlarının kaynağında bu yöntem başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Şekil 3.24.).



Şekil 3.24. Shuttle External Tank Projesi ve Marshall Space Flight Center Laboratuvarlarındaki Sürtünme Karıştırma Kaynak Sistemlerinden Görüntüler.

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

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

Eclipse Aviation Corporation da, üreteceği özel jetlerde perçinleme ve yapıştırma yerine; maliyet ve montaj zamanından tasarruf amacıyla sürtünme karıştırma kaynağını kullanmaya karar verdiğini açıklamıştır. Bu, belki de sürtünme karıştırma kaynağının ilk büyük havacılık denemesi olacaktır. Bu günlerde deneme uçuşlarının yapılması beklenmekte ve sonuçlarına göre imalatta kullanmaya elverişli olup olmadığına karar verilecektir.

3.6.3. Otomotiv Endüstrisinde Sürtünme-Karıştırma Kaynağı Uygulamaları [41]

Ulaşım sektöründe alüminyum ekstrüzyonlarının birleştirilmesinde vidalama, perçinleme, yapıştırma, bağlama ve kaynak gibi birçok birleştirme metodu kullanılmaktadır (Şekil 3.25). Bunlardan kaynak metodu ürünün yüksek mukavemetli olması istendiği durumlarda kullanılır.



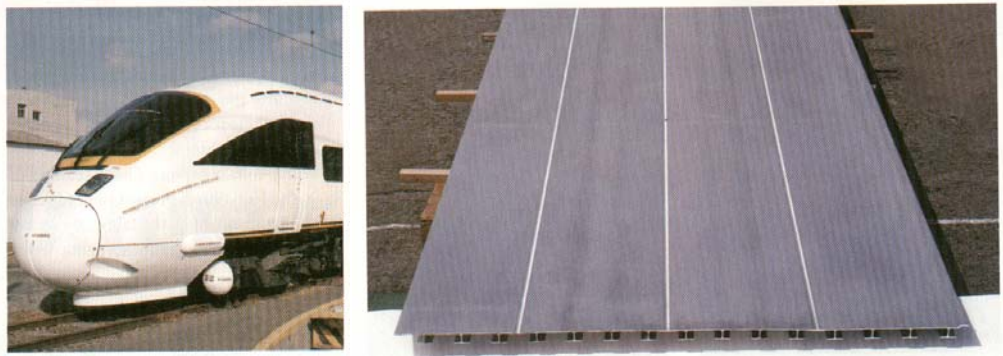
Şekil 3.25. SKK ile Birleştirilen Al-Alaşımı Prototip Otomobil Jantı.

Halen, otomotiv endüstrisindeki yüksek üretim oranları, rekabetçi üretim ortamları ve düşük maliyet gereksinimleri geleneksel olan diğer birleştirme tekniklerinin uygulanmasına neden olmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı otomotiv parçalarında,

alüminyum birleştirmelerde kayda değer bir potansiyel artışı sağlamakla beraber otomotiv sektöründe kullanılabilirliği sınırlıdır. Otomotiv endüstrisindeki yoğun üretim nedeniyle, bu yeni teknolojiyi uygulamaya geçirmek için bir hayli zamana ihtiyaç duyulması beklenmektedir. Kaynak teknolojisindeki gelişme hızlandığında artırılmış üretim için büyük potansiyel, özel parçaların büyük oranda üretiminin sağlanması sonucunda açığa çıkacaktır. Yüksek kalite ve yükseltilmiş kaynak mukavemeti, ağırlık azaltışını mümkün hale getirecektir. Özellikle, Mg-alaşımlarının otomotiv sektöründe bu yeni kaynak teknolojisi sayesinde kullanımı ile ağırlıktan tasarruf daha da artırılabilir.

3.6.4. Hızlı Tren Üretiminde Sürtünme - Karıştırma Kaynağı Uygulamaları [41]

Modern yolcu treni vagonlarının imalatında, alüminyum ekstrüzyonlardan üretilen petek paneller daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu panellerde, uzun Al -ekstrüzyonlar aralarına sıklık artırıcı destekler yerleştirilerek birleştirilmektedir. Bu sayede, hem çarpışmalarda emniyet hem de bükme kuvvetlerine dayanımı artırmaktadır. Klasik ergitme kaynağı, özellikle yüksek mukavemetli Al-alaşımlarındaki IEB bölgesinde aşırı mukavemet kaybına sebep olduğu için, son yıllarda Almanya ve İngiltere'de meydana gelen hızlı tren kazalarında daha dayanıklı kaynaklara ihtiyaç duyulduğu gerçeği ortaya çıktı.

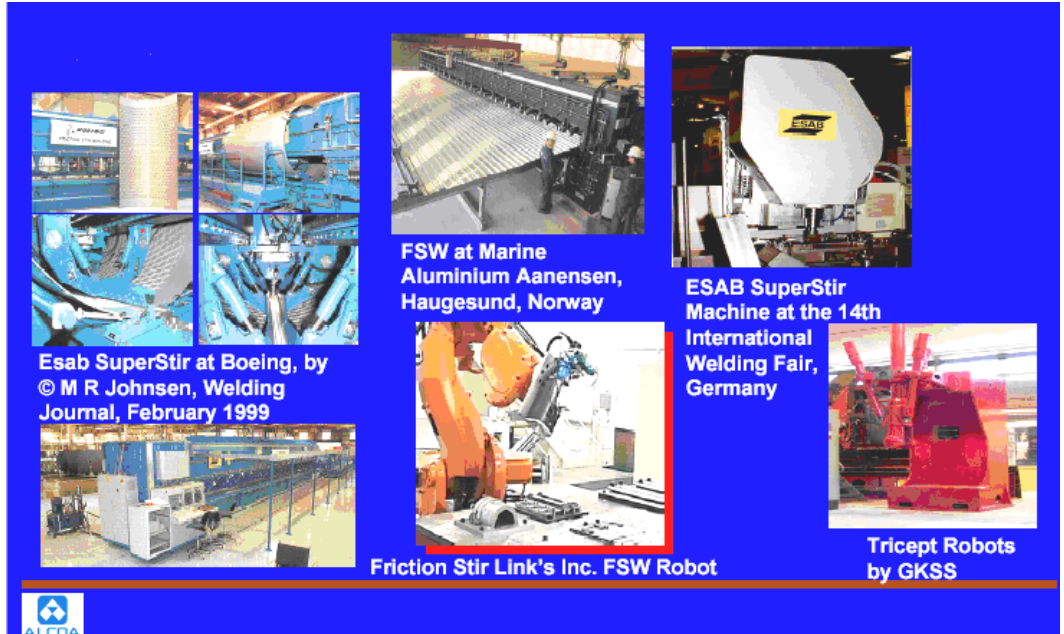


Şekil 3.26. Japonya'da Sürtünme Karıştırma Kaynağının Kullanıldığı Hızlı Tren ve Bu Yöntem ile Kaynağı Yapılan Al-Paneller.

Sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak bölgesinde daha düşük seviyelerde mukavemet kaybına neden olduğundan cazip bir alternatif oluşturduğu için son yıllarda Avrupa ve Japonya 'da hızlı tren vagonlarının üretiminde bu kaynak teknolojisi ile imal edilen Al-alajını petek paneller kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 3.26.).

Eritme kaynak yöntemiyle kaynatılmayan malzemelerin SKK ile kaynatılabilmesi uygulama alanının genişlemesine sebep olmuştur. Bu yöntem, endüstride; Boeing, Lockheed Martin, Airbus, General Dynamics, Alcoa v.b. firmalarda, akademik olarak da; TWI, EWI v.b enstitülerde geliştirilmeye devam etmektedir [3].

SKK yöntemi, gemi, taşımacılık, uzay, otomotiv ve enerji sektörlerinde, parça ve yapıların imatlarına adaptasyonu sağlanarak otomasyona geçilmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27. SKK Sistemlerinin Endüstrideki Uygulamaları [3].

+

4. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1.Giriş

Sürtünme Karıştırma Kaynak (SKK) işlemini gerçekleştirmek için, dikey işleme merkezli freze tezgahı, tezgah iş tablasına monte edilen divizör, karşılık puntası, özel hazırlanmış aparat kullanılmıştır. Bunlarla birlikte freze takım tutucusuna bağlanan, sürtünme işlemini gerçekleştirerek kaynak için gerekli ısıyı, karıştırma işlemini gerçekleştirerek kaynak homojenliğini sağlayan kaynak takımı da kullanılmıştır. Kaynak işleminin istenilen şartlarda gerçekleştirilmesinde, aparatın ve özellikle kaynak takımının özellikleri büyük önem taşımaktadır.

SKK işlemi, alüminyum boru bağlanmış aparatın divizör aynasıyla karşılık puntası arasına uygun bir şekilde tutturulması ve kaynak takımının, sürtünme - karıştırma işlemine başladıktan sonra, divizör aynasının döndürülmesiyle gerçekleştirilir.

SKK kaynak işlemleri, freze kafasına bağlı kaynak takımının farklı dönme hızlarında ve divizör aynasına bağlı aparata monteli boruların farklı çevresel ilerleme hızlarında gerçekleştirilmiştir.

SKK işlemi esnasında değişik noktalarda sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Kaynak numunelerinin SKK işlemi sonrasında, kaynak dikişi dış yüzeylerinin pürüzlülük değerleri, kaynak kesitindeki farklı bölgelerin mikro-yapıları incelenmiş ve bu bölgelerdeki mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır.

4.2. SKK İşleminde Kullanılan NC Freze Tezgahı ve Elemanları

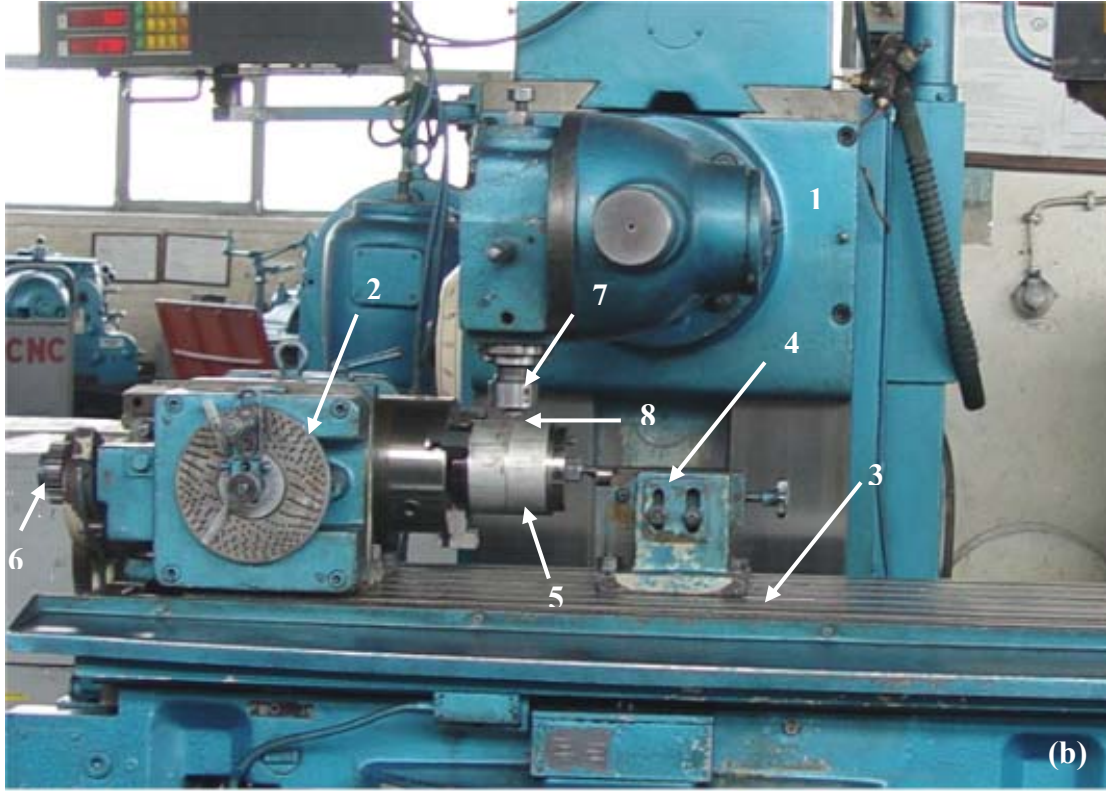
SKK işleminde kullanılan freze tezgahı HECKERT marka ve 14.5 kW gücündedir.



Şekil 4.1. (a) SKK Kaynağında Kullanılan NC Freze Tezgahı ve Üzerindeki Kaynak Aparatları (Perspektif Görünüş).

Kaynak işleminde kullanılan freze tezgahı ve diğer elemanlar;

- 1.Dikey İşleme Merkezli NC Freze Tezgahı
- 2.Divizör
- 3.İş Tablası
- 4.Karşılık Puntası
- 5.Özel Aparat (Üzerine Boruların Monte Edildiği Elemanlar Grubu)
- 6.Dişli Tahrik Grubu
- 7.Freze Tezgahı Takım Tutucusu
- 8.Kaynak Takımı (SKK Ucu)



Şekil 4.1.(b) SKK Kaynağında Kullanılan NC Freze Tezgağı ve Üzerindeki Kaynak Aparatları (Önden Görünüş).

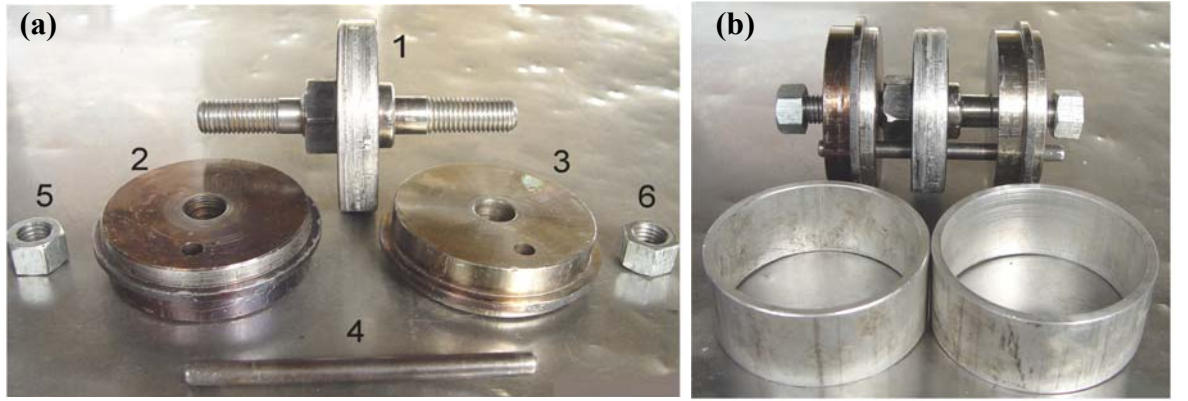
4.3. SKK İşleminde Kullanılan Özel Aparat Tasarımı

Özel aparata ait detay resimleri Şekil 4.2.'de gösterilmiştir. Boru çiftlerinin kaynağında divizöre bağlanan bu kaynak aparatı 6 ana parçadan oluşmaktadır.

1. **Kaynak altlığı ve merkezleme mil grubu:** Kaynak esnasında, plastik deformasyona uğrayan kaynak bölgesinin alt kısma akmasını engelleyerek, kökte ve kaynak yüzeyinde şekil bozukluklarını önlemek amacıyla tasarlanmıştır.
- 2-3. **Sağ ve sol baskı plakaları:** Divizör dönerken, boruların alın altına basmasını ve boruların kaynak esnasında eş zamanlı dönmesini sağlamak amaçlı tasarlanmıştır.

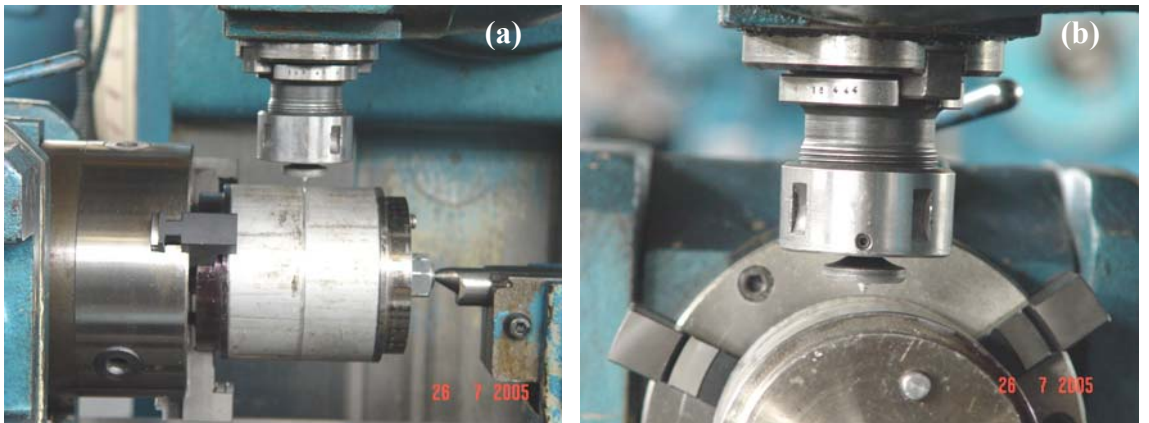
4. **Baskı plakaları sabitleme pimi:** Baskı plakalarını sabitleyerek boruların eş zamanlı dönmesine yardımcı olması için imal edilmiştir.

5-6. **Sıkıştırma somunları:** Montajın son basamağında sıkıştırılarak tüm aparatların sabitlenebilmesi amaçlı imal edilmiştir.



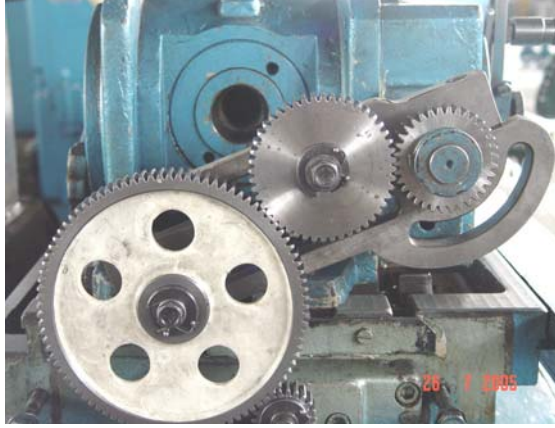
Şekil 4.2. (a) Deneysel Çalışmada Kullanılan SKK Kaynak Aparat Parçaları, (b) Aparatın Montajlı Hali ve Kaynak Numune Çifti.

Şekil 4.3.'de alüminyum boru çifti ve kaynak aparatlarının, divizör ve karşılık puntası arasındaki montajlı hali gösterilmektedir. Şekil 4.3.(b), Şekil 4.3(a)'nın alından görünüşüdür. Şekilde kaynak takım tutucusu da görülmektedir.



Şekil 4.3. Alüminyum Boru Çifti ve Kaynak Aparatlarının, Divizör ve Karşılık Puntası Arasına Yerleştirilmesi, (a) Önden Görünüş, (b) Alından Görünüş

Dişli tahrik grubu (Şekil 4.4), kaynak esnasında rijit halde montajlı olan özel aparat ve üzerindeki boruları çevresel olarak istenilen hızda (mm/s) hareket ettirmeye yarar.



Şekil 4.4. Dişli Tahrik Grubu

4.4. Kaynak Takımı (Stirrer)

Alüminyumun yumuşak bir malzeme olması nedeniyle talaşlı imalatı ya da ekstrüzyonu oldukça kolay olmaktadır. SKK işlemini gerçekleştirecek takımın aşınmaya ve sıcaklığa karşı dayanıklı olması gerektiğinden, kaynak takımı malzemesi olarak Ç-4140 seçilmiştir. Şekil 4.5.(a)'da görüldüğü gibi kaynak takımı, verilen ölçülerde (tüm ölçüler mm'dir) CNC torna tezgahında hazırlanmıştır. Nihai boyuta getirilen takım, 800°C'ye kadar ısıtıldıktan sonra, yağda su verme işlemine tabi tutulmuştur. Sertleştirme sonrasında, 50–55 HRC arasında sertlik değerleri elde edilmiştir.

Kaynak takım ucu (pim) daha önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, kaynak işlemine etki eden en önemli faktörlerden birisidir. Literatür araştırmaları ışığında, çalışmaların ilk aşamalarında yapılan çok sayıda yapılan SKK denemeleri sonucunda kaynak dikiş kalitesi bakımından en uygun kaynak takımı dizayn edilmiştir. Pim olarak isimlendirilen sol yan vida kısmının hatvesi 1,2 mm, omuza bitişik çap 4,4 mm ve pim yüksekliği 5 mm'dir. Omuz yüksekliği 5,5 mm olmakla birlikte, omuz üst yüzeyinden sap kısmına doğru kavisli olarak işlenmiştir. Kaynak esnasında kaynak takımının, iş parçası yüzeyinden kazıma şeklinde malzeme kaybı oluşturmaması için omuzun malzemeye temas eden (alt) yüzeyinin dış kenarları da kavisli imal edilmiştir (Şekil 4.5).

Endüstride sıklıkla kullanılan 110 mm dış çap, 100 mm iç çap ölçülerindeki AA6063-T6 boruları, mekanik test numune ölçülerine uyması için 45 mm uzunluklarında kesilerek hazırlanmıştır. Boruların her iki ucu da kaynak öncesinde talaşlı imalat yoluyla, birbirine paralel olarak işlenmiştir, çünkü özel aparat üzerine rijit halde bağlanırken boru çiftlerinin karşılıklı kenarları birbirine tam olarak temas etmeleri gerekir. Aksi halde kaynak dikişi istenilen özellikte elde edilemeyebilir.

Boruların sertliği 110 HV olup, kimyasal analiz değerleri Tablo 4.1 de verilmiştir.

Tablo 4.1 AA6063-T6 Borularına ait Kimyasal Analiz Değerleri

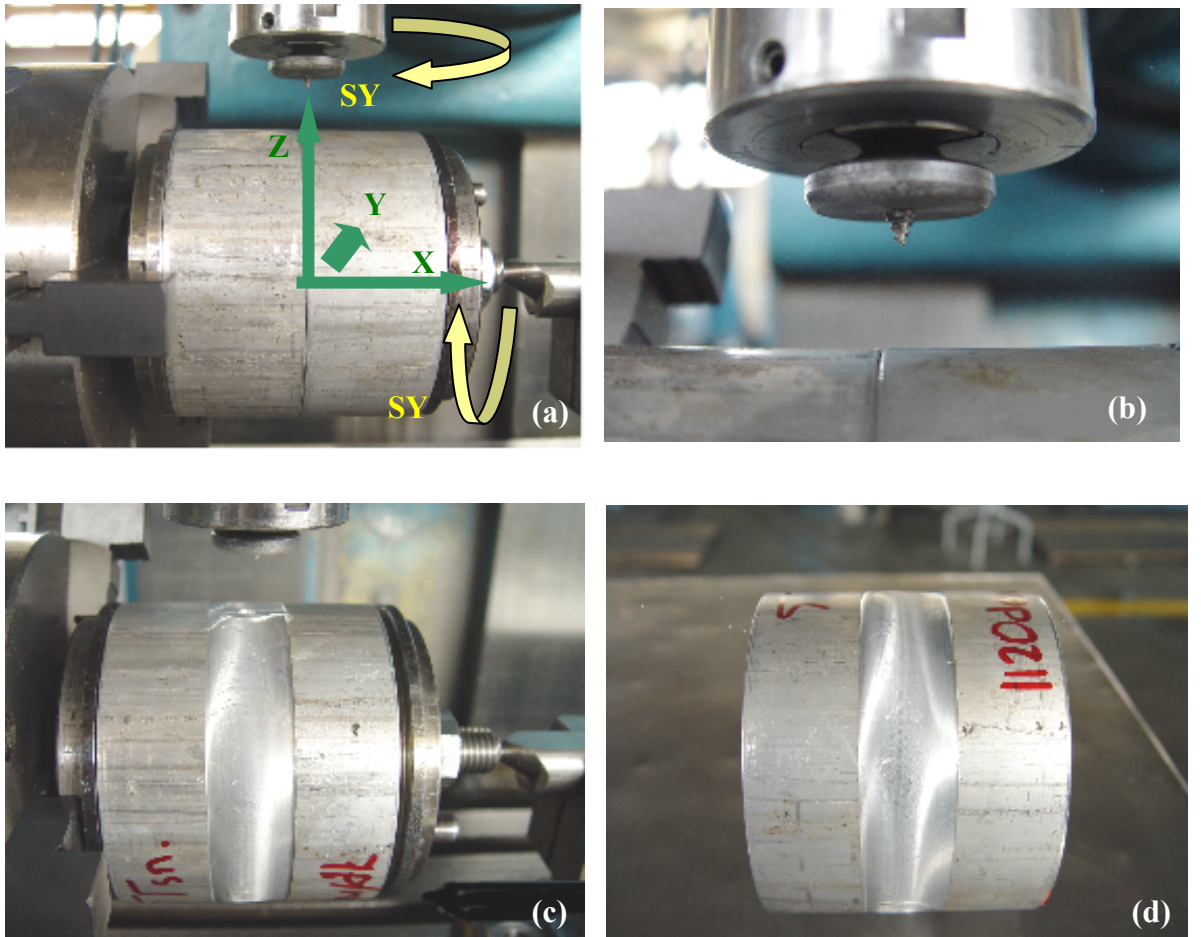
<i>Element,%</i>	<i>Mg</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Ti</i>	<i>Mn</i>	<i>Ni</i>	<i>Al</i>
AA6063-T6	0,5094	0,4221	0,1872	0,0072	0,0023	0,0016	G.kalan

4.6. SKK Kaynak İşleminin 6063-T6 Alüminyum Borularına Uygulanması

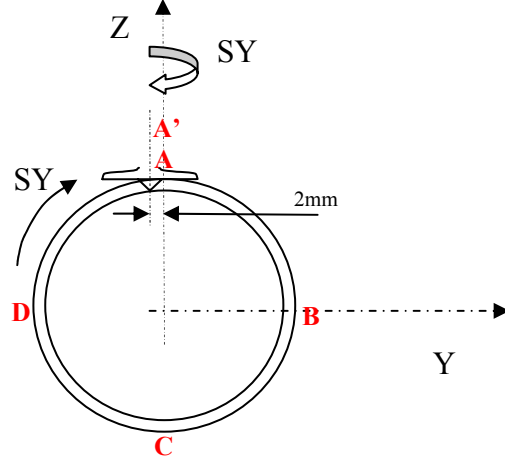
SKK işleminin gerçekleştirileceği freze tezgahının kabiliyetleri çerçevesinde optimum kaynak şartlarını belirleyebilmek için SKK kaynak işlemi, kaynak takımının (stirrer), belirlenen beş ayrı dönme hızında ve her bir dönme hızı için de üç ayrı kaynak hızında (boruların çevresel ilerleme hızı) yapılmıştır. Kaynak takımı için devir sayıları 560, 710, 900, 1120, 1400 d/d, ilerleme hızları (kaynak hızları) da 4.94, 6.28 ve 8.04 mm/s 'dir. Böylece toplamda 15 ayrı SKK bağlantısı yapılmıştır.

Kaynak edilecek borular Şekil 4.7.(a) ve (b)'de görüldüğü gibi, özel aparat üzerine rijit halde bağlanır. Aparatın bir ucu divizör aynasına, diğer ucu ise karşılık puntasına tutturulur. Kaynak başlamadan önce belirlenen hızda freze kafasına bağlanan kaynak takımı saat yönü istikametinde (SY) döndürülmeye başlanır. Kaynak takımı dönerken, numunenin divizöre bağlı olduğu, alt tabla yavaş bir şekilde yukarı kaldırılarak, kaynak takımının omuz kısmı malzemeye temas edene kadar, malzeme içerisine girmesi sağlanır. Omuz kısmı malzemeye merkezden, kaynak ilerleme yönü tersine 2 mm kaçık (Şekil 4.8) ve temas yüzeyinin tam ortasından temas ederek sürtünmektedir. Bu temas ve sürtünmeden 5 sn sonra oluşan ısı belli bir seviyeye geldikten sonra, kaynak takımı

dönme devam ederken, divizör belirlenen ilerleme hızında saat yönünde (SY) döndürülmeye başlanır. Kaynak, Şekil 4.8’de gösterilen A’ noktasına ulaştığında divizörün dönmesi durdurulur fakat kaynak takımı dönmeye devam ettirilir. Tabla tekrar aşağı indirilir, kaynak takımı malzemeden çıkartılır ve kaynak takımı durdurulur. SKK kaynağı, 360° lik bir dönme periyodunda tamamlanmış olur (Şekil 4.7.(c)). Kaynak sonrasında kaynak takımı çıkış noktasında bir oyuk oluşmaktadır. Şekil 4.7.(d)’de kaynak işlemi tamamlanmış ve özel aparattan çıkarılmış kaynaklı malzeme görülmektedir. Tablo 4.2 de kaynak elemanları toplu halde verilmektedir.



Şekil 4.7. Alüminyum Boruların Kaynak Öncesi ve Sonrası Durumları, (a) Kaynak Öncesi Parçaların Aparata Montajlı Biçimde Freze Tezgahı Divizörüne Bağlanmış Görüntüsü, (b) Kaynak Takımı ve Malzeme Üst Yüzeyi Yakın Görüntüsü, (c)Kaynaktan Hemen Sonraki Durum, (d)Kaynaklı Numunenin Aparattan Çıkarılmış Görüntüsü.



Şekil 4.8. Kaynak Takımının Numuneye Göre Konumu.



Şekil 4.9. SKK Sonrası Kaynak Takımı Omzunun ve Pim Kısımının Görüntüsü.

Kaynak esnasında malzemeye temas eden kaynak takımı omuz alt bölgesiyle pim kısmının, kaynak sonrası bir miktar alüminyum malzemeyle sıvandığı görülmüştür (Şekil 4.9). Bu durumun sonraki SKK yöntemiyle elde edilen kaynağa yaptığı etkinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilmiştir.

Sürtünme Karıştırma Kaynak işlemi esnasında, sürtünme ısısı nedeniyle boruların kaynak yüzeylerindeki sıcaklık değişimi Şekil 4.10.'da görülen Testo 825-T4 marka infra-red ışınli dijital termometre cihazıyla ölçülmüştür. Cihaza ait teknik bilgiler Tablo 4.3 de verilmiştir. Sıcaklık ölçümleri Şekil 4.7.'de gösterilen parça üzerindeki 5 noktada, yani A, B, C, D ve A' noktalarında yapılmıştır. Burada A ve A' noktaları kaynak işleminin başlangıç ve bitiş noktaları olup, iş parçaları 360° lik dönme periyotlarını tamamladıklarında bu iki nokta üst üste gelmekte ve iş parçaları kısmen de olsa ısıl dengeye gelmiş olmaktadır. Belirtilen noktalarda yapılan ölçümler Tablo 4.2 de toplu halde verilmiştir.

Tablo 4.2 Kaynak parametreleri ve Kaynak Esnasında Ölçülen Sıcaklık Değerleri.

Numune no	Kaynak takım hızı (dev/dk)	Kaynak hızı (mm/sn)	A Başlangıç noktası sıcaklığı (°C)	B noktası sıcaklığı (°C)	C noktası sıcaklığı (°C)	D noktası sıcaklığı (°C)	A' Bitiş noktası sıcaklığı (°C)
1	560	8,04	195	246	278	279	258
2	560	6,28	150	234	230	260	260
3	560	4,94	217	263	309	320	305
4	710	8,04	194	263	265	315	310
5	710	6,28	185	264	253	302	304
6	710	4,94	200	280	310	311	310
7	900	8,04	205	302	275	296	286
8	900	6,28	185	303	312	306	304
9	900	4,94	205	332	334	339	331
10	1120	8,04	230	305	33	334	335
11	1120	6,28	219	287	292	321	322
12	1120	4,94	205	332	334	339	331
13	1400	8,04	214	306	324	326	332
14	1400	6,28	246	309	290	297	322
15	1400	4,94	204	287	328	344	330



Şekil 4.10. SKK Yapılırken Kullanılan Sıcaklık Ölçer.

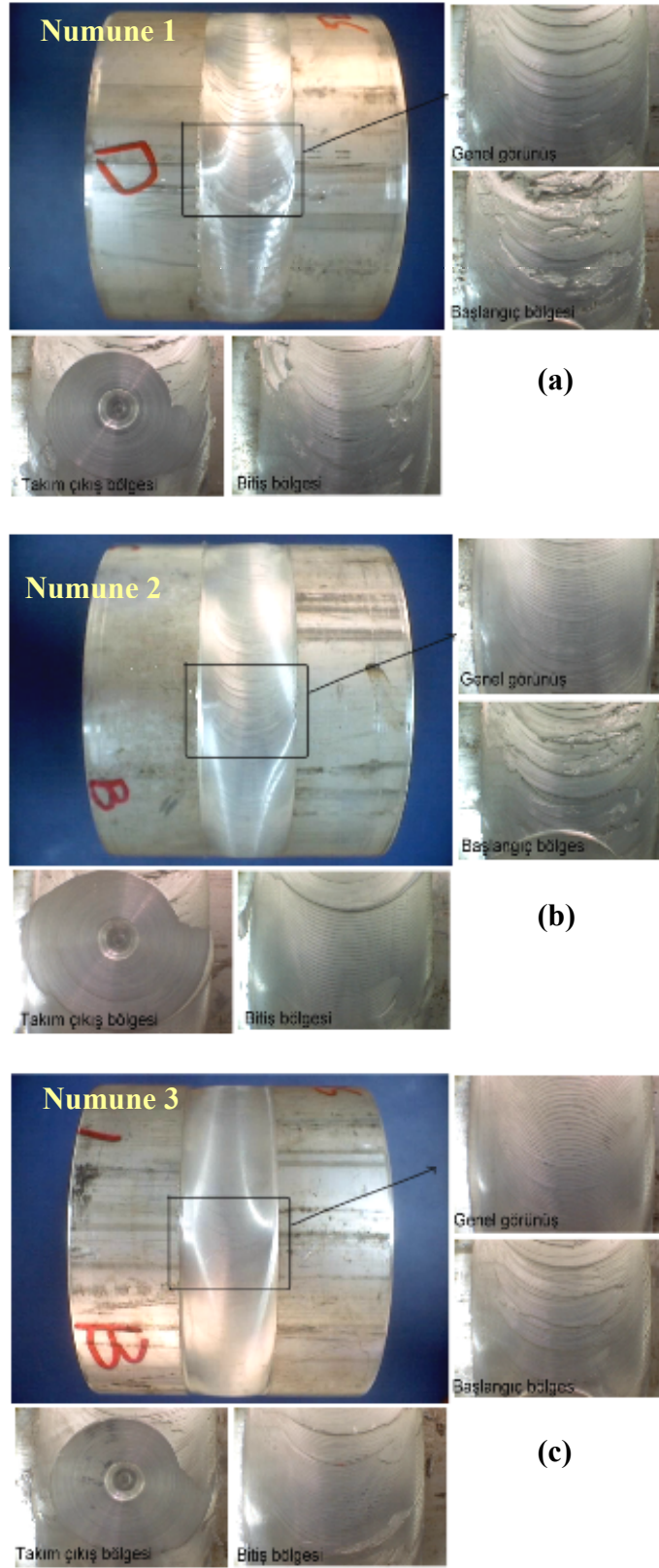
Tablo 4.3 Sıcaklık Ölçerin Teknik Özellikleri.

Testo 825-T4 Dijital Sıcaklık Ölçer Teknik Bilgileri	
Ölçüm Aralığı	-50°C→500°C
Çözünürlüğü	0.5°C
Hassasiyeti	± %2 °C
Çalışma Sıcaklığı	0°C→50°C
Cevap Verme Süresi	<2 sn

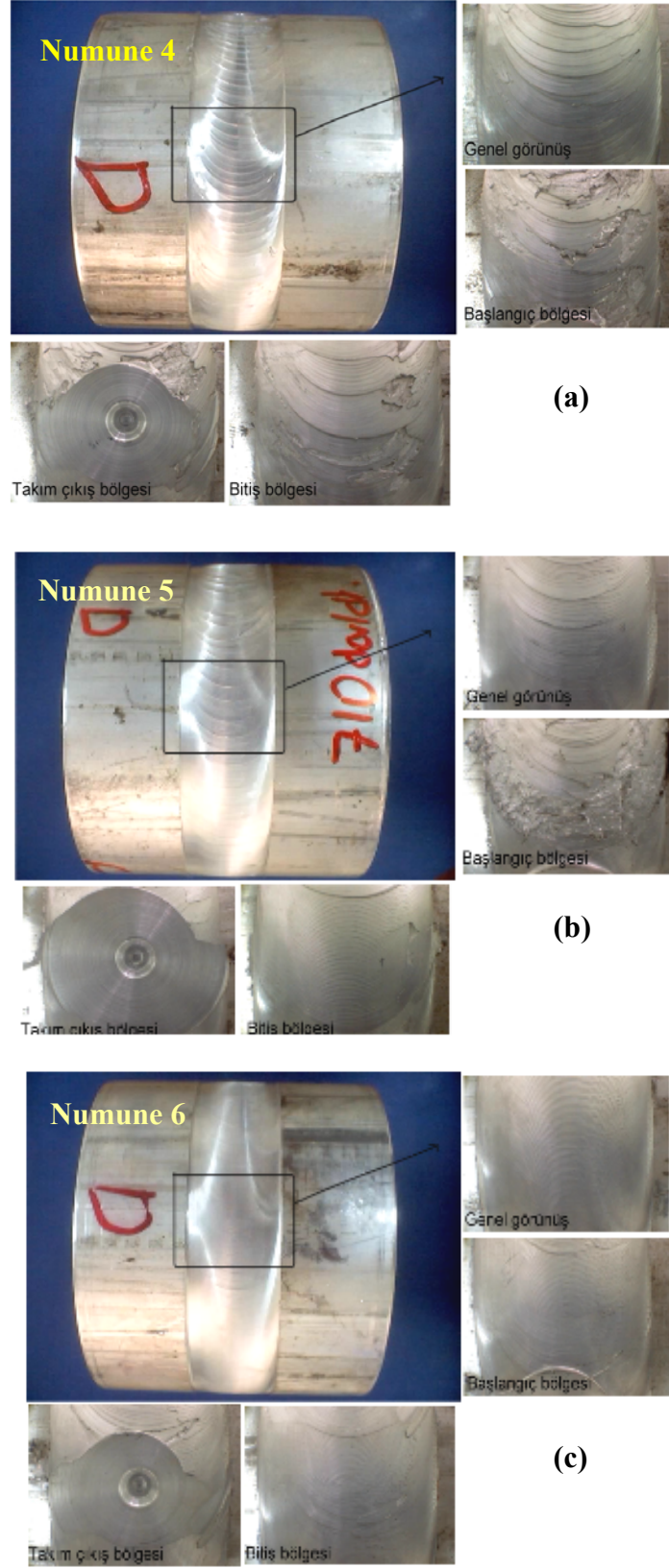
4.7. Kaynaklı Bölgenin Dış Yüzey Makro Görüntüleri ve Pürüzlülük Ölçümleri

Şekil 4.11, 12, 13, 14 ve 15.'de görüldüğü gibi kaynak sonrasında, kaynaklı bölgelerin üst yüzeyleri gözlenerek fotoğraf görüntüleri alınmıştır. Görüntüler başlangıç, genel, bitiş ve takım çıkış yerlerinden alınmıştır.

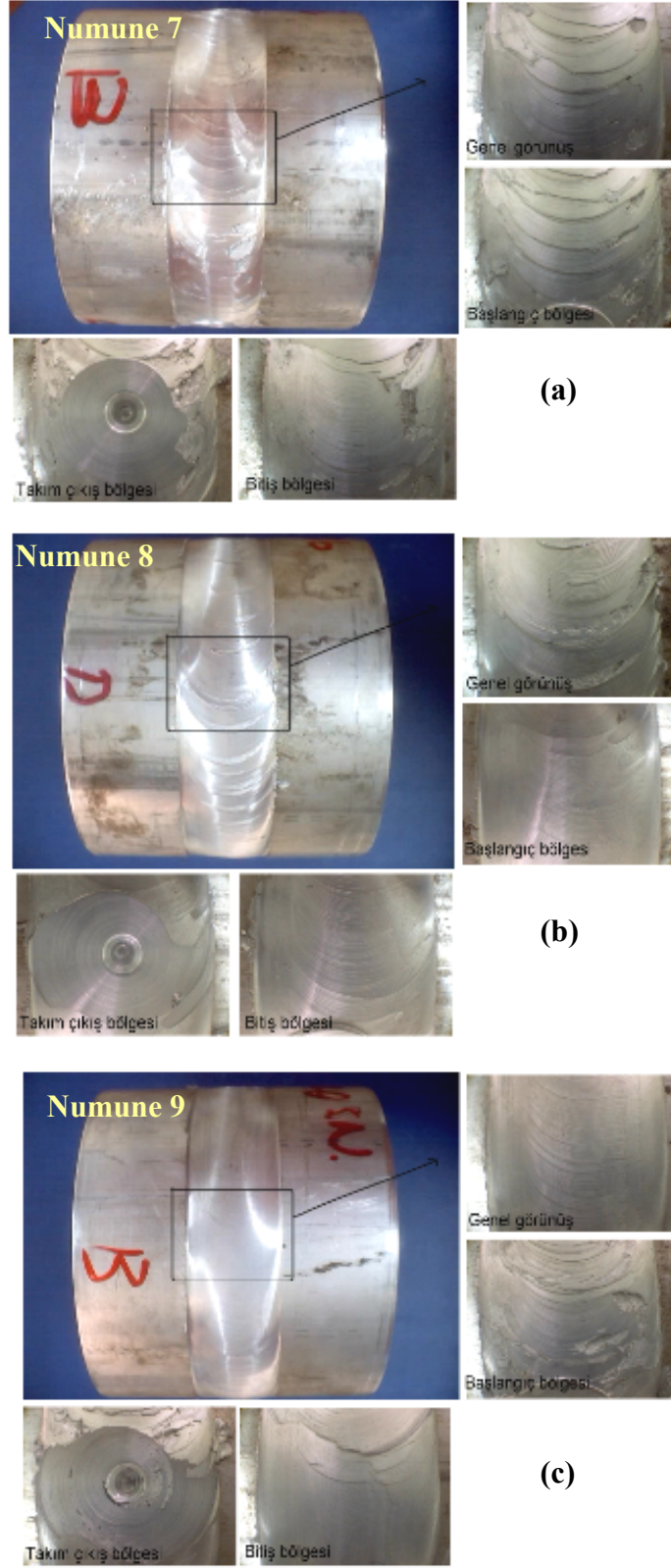
Kaynak dikişinin üst yüzeylerinden belirli noktalarında, Mitutoyo Surfes 201 pürüzlülük ölçme cihazı kullanılarak, ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Ölçülen değerler Tablo 4.4 de verilmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri, yoğunlukta 3 ila 9 µm arasında değiştiği görülmüştür. Burada beklenen, kaynak takımının sabit dönme hızı ve iş parçalarının artan ilerleme hız değerlerine göre de yüzey pürüzlülük değerlerinin doğal olarak artış göstereceği yönündedir. Ancak bazı noktalarda bu beklenenin dışında sapmalar görülmüştür. Aynı zamanda da yüzey pürüzlülüğü ölçülen bölgelere ait grafikler Şekil 4.16.'da gösterilmektedir.



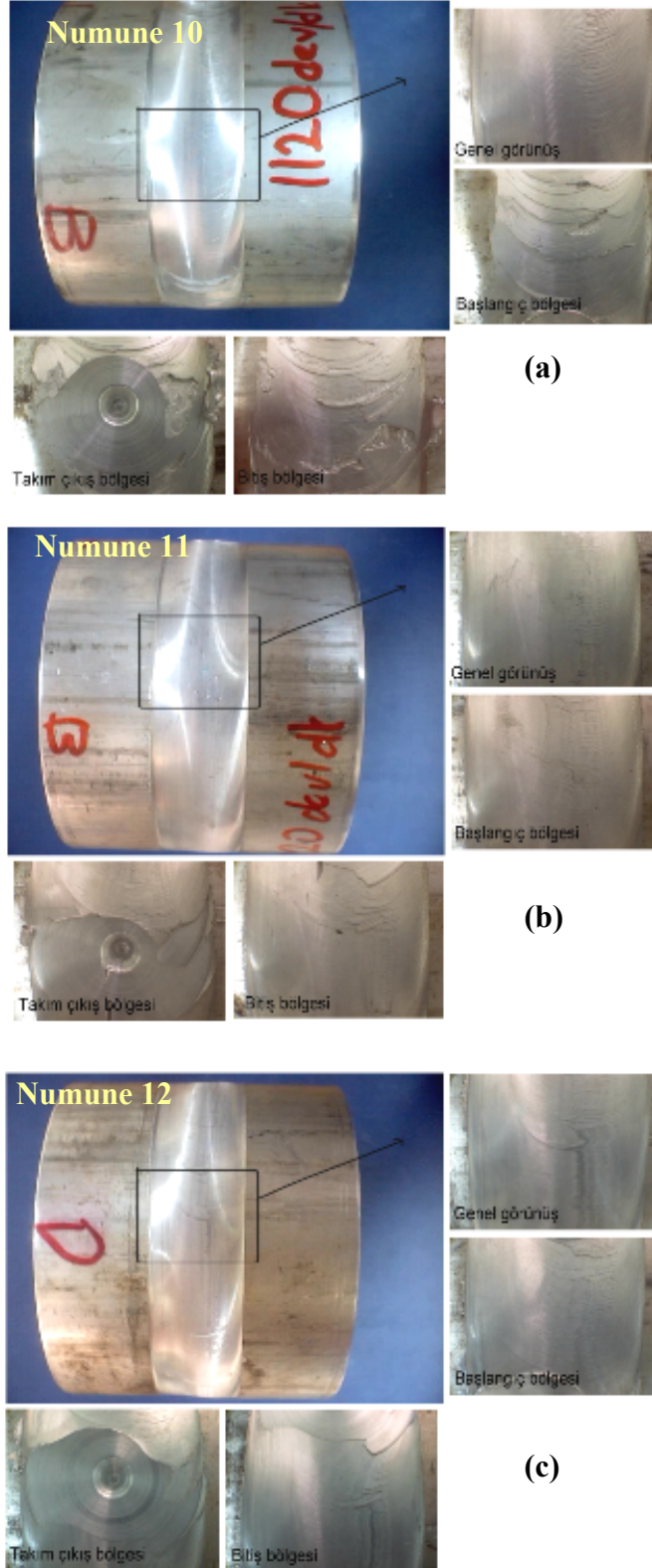
Şekil 4.11. 560 d/d Kaynak Takımı Dönüş Hızında (a) 8,04mm/s, (b) 6,28mm/s ve (c) 4,94mm/s çevresel ilerleme hızlarında kaynağı yapılmış borular.



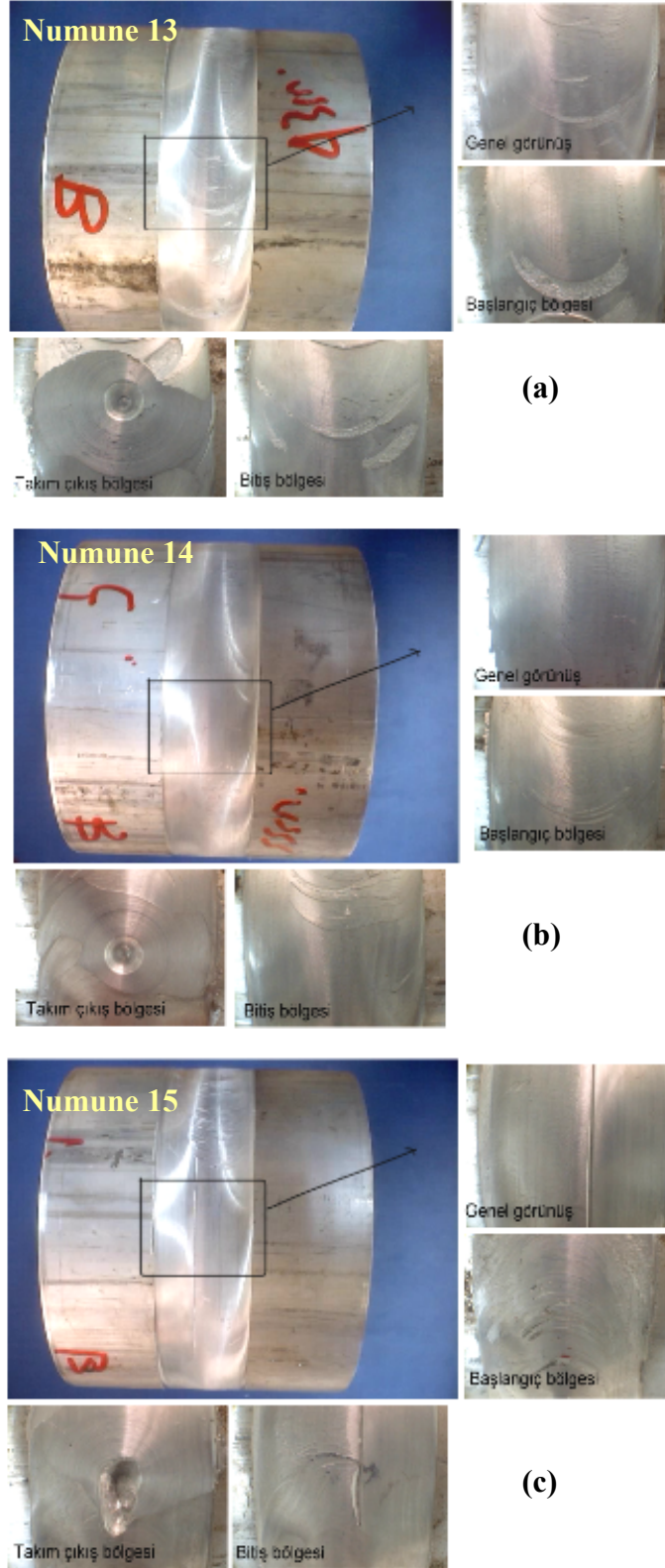
Şekil 4.12. 710 d/d Kaynak Takımı Dönüş Hızında (a) 8,04mm/s, (b) 6,28mm/s ve (c) 4,94mm/s çevresel ilerleme hızlarında kaynağı yapılmış borular.



Şekil 4.13. 900 d/d Kaynak Takımı Dönüş Hızında (a) 8,04mm/s, (b) 6,28mm/s ve (c) 4,94mm/s çevresel ilerleme hızlarında kaynağı yapılmış borular.

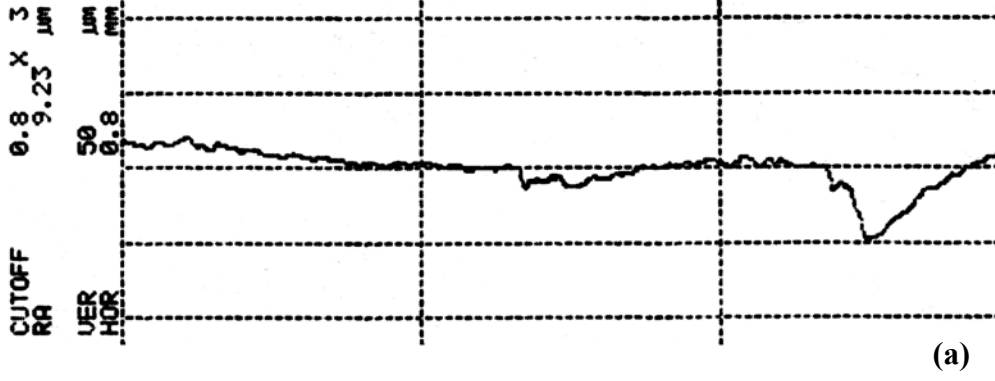


Şekil 4.14. 1120 d/d Kaynak Takımı Dönüş Hızında (a) 8,04mm/s, (b) 6,28mm/s ve (c) 4,94mm/s çevresel ilerleme hızlarında kaynağı yapılmış borular.

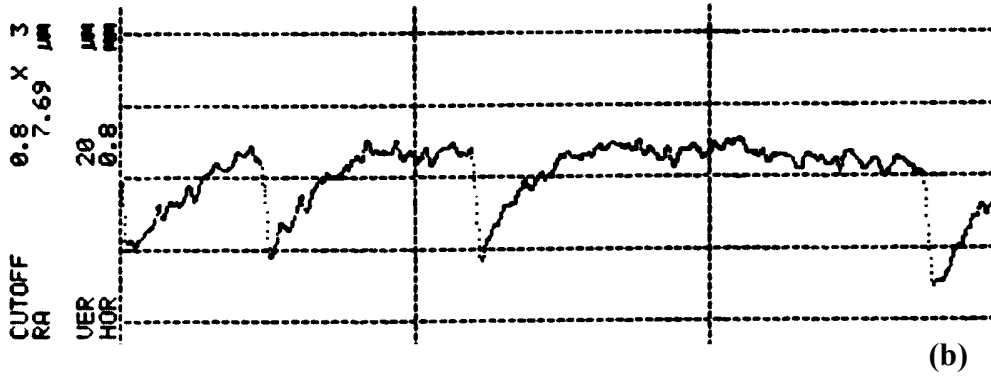


Şekil 4.15. 1400 d/d Kaynak Takımı Dönüş Hızında (a) 8,04mm/s, (b) 6,28mm/s ve (c) 4,94mm/s çevresel ilerleme hızlarında kaynağı yapılmış borular.

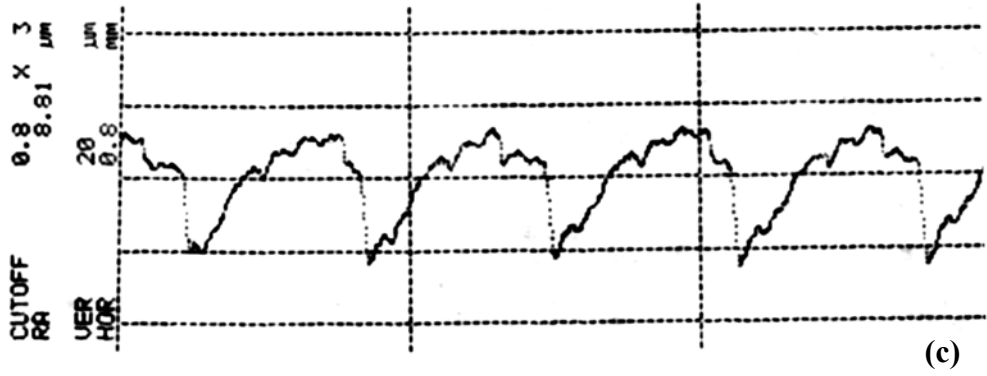
Numune 1



Numune 2

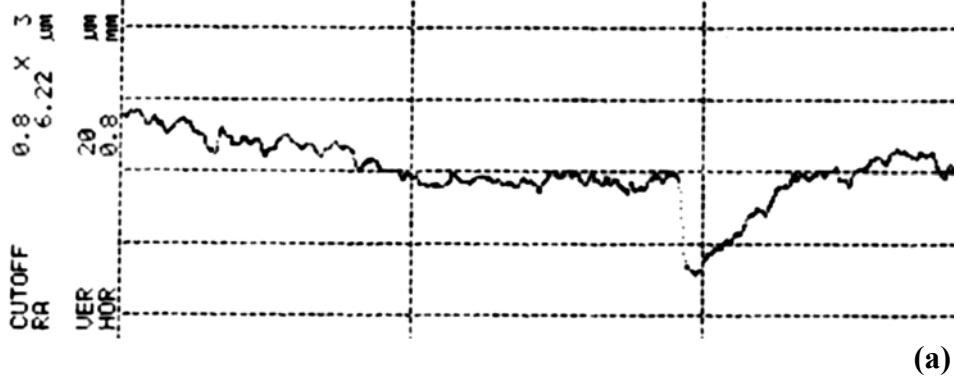


Numune 3

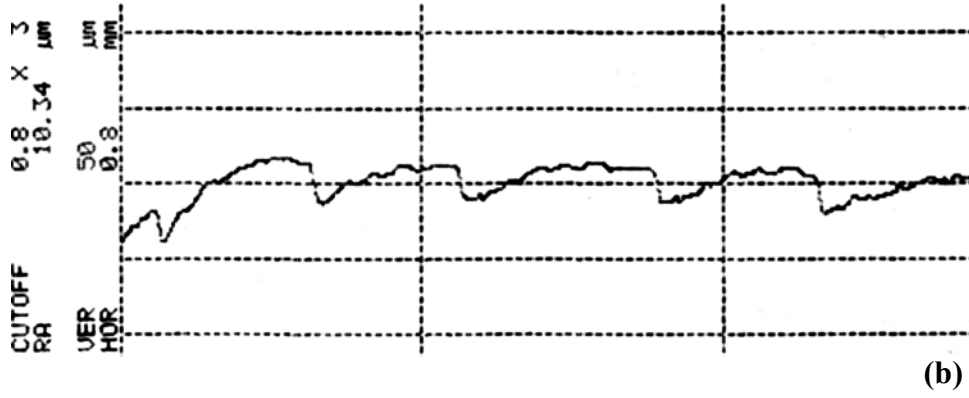


Şekil 4.16. 560 d/d Dönüş Hızındaki Kaynak Takımıyla Yapılmış Kaynaklı Boruların Genel Görünüş Bölgelerinden Alınan Pürüzlülük Grafikleri; (a) 8,04mm/s, (b) 6,28mm/s ve (c) 4,94mm/s.

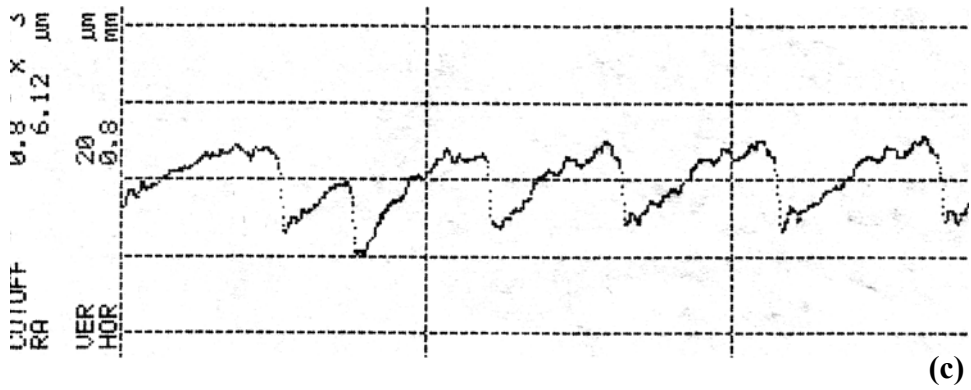
Numune 4



Numune 5

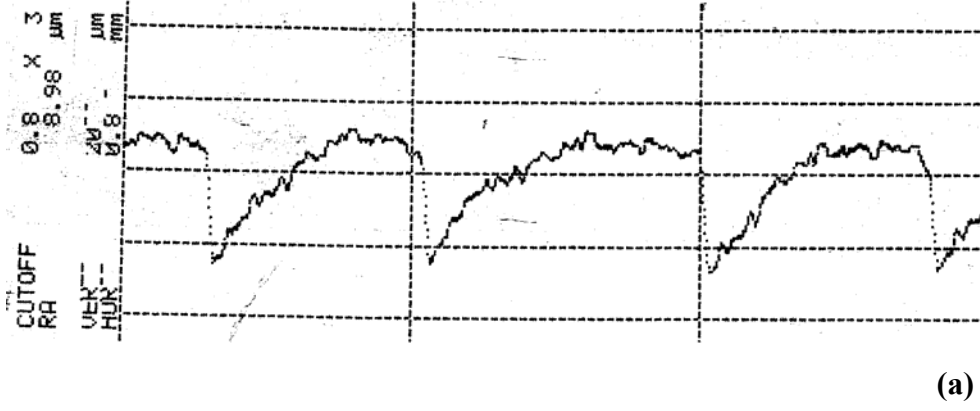


Numune 6

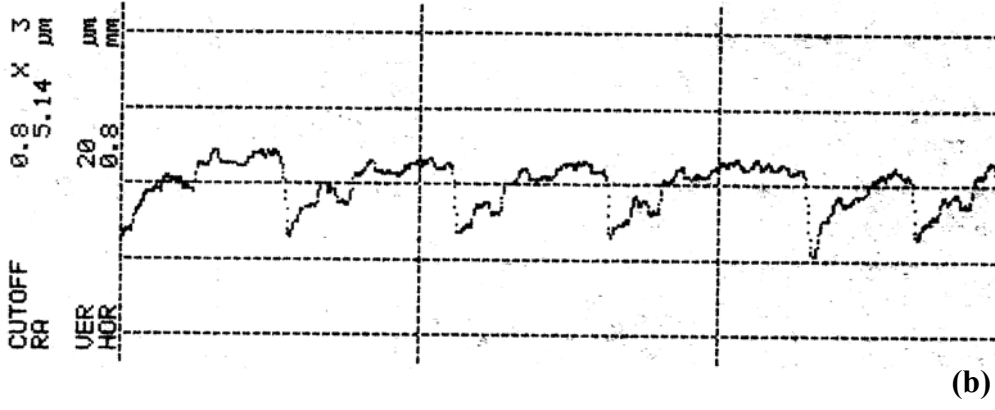


Şekil 4.17. 710 d/d Dönüş Hızındaki Kaynak Takımıyla Yapılmış Kaynaklı Boruların Genel Görünüş Bölgelerinden Alınan Pürüzlülük Grafikleri; (a) 8,04mm/s, (b) 6,28mm/s ve (c) 4,94mm/s.

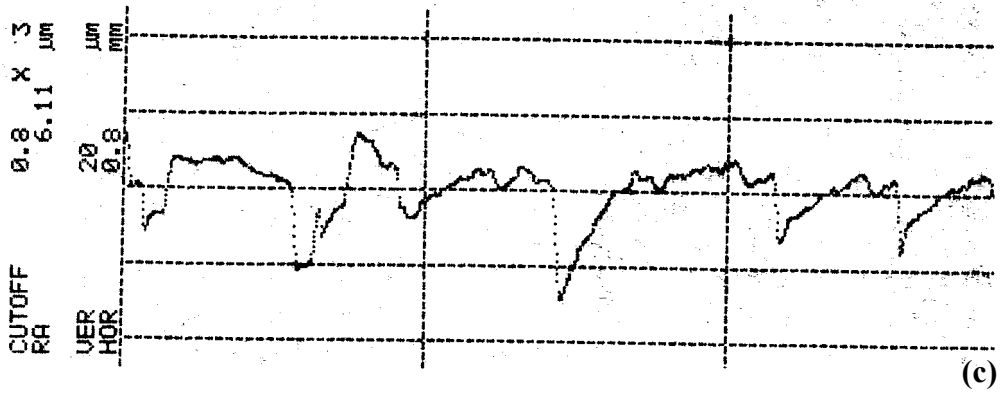
Numune 7



Numune 8

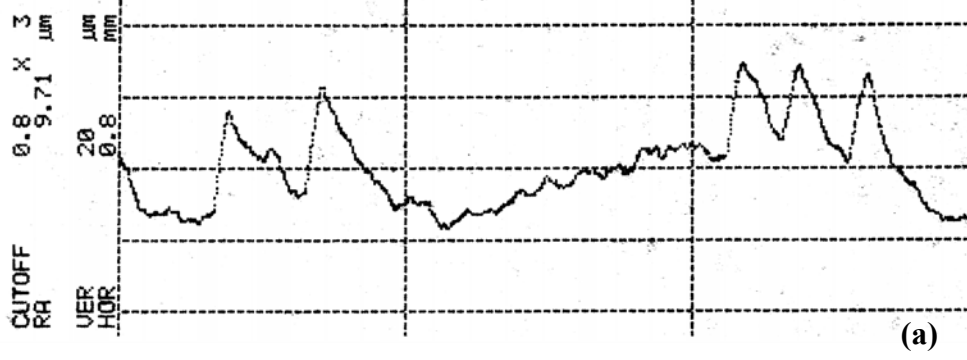


Numune 9

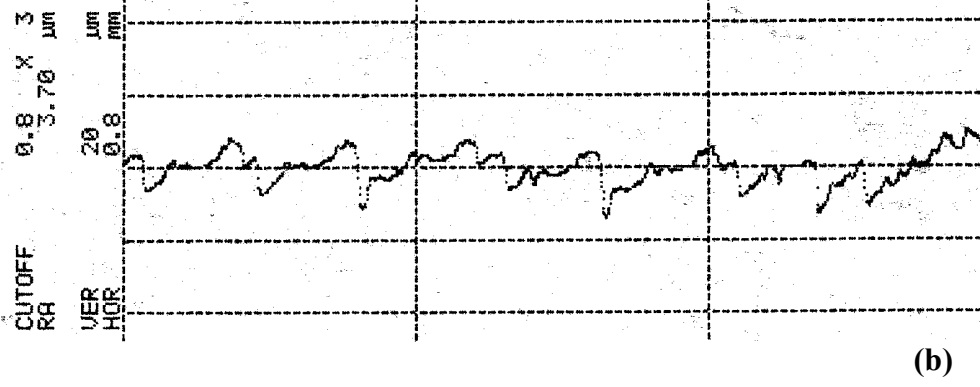


Şekil 4.18. 900 d/d Dönüş Hızındaki Kaynak Takımıyla Yapılmış Kaynaklı Boruların Genel Görünüş Bölgelerinden Alınan Pürüzlülük Grafikleri; (a) 8,04mm/s, (b) 6,28mm/s ve (c) 4,94mm/s.

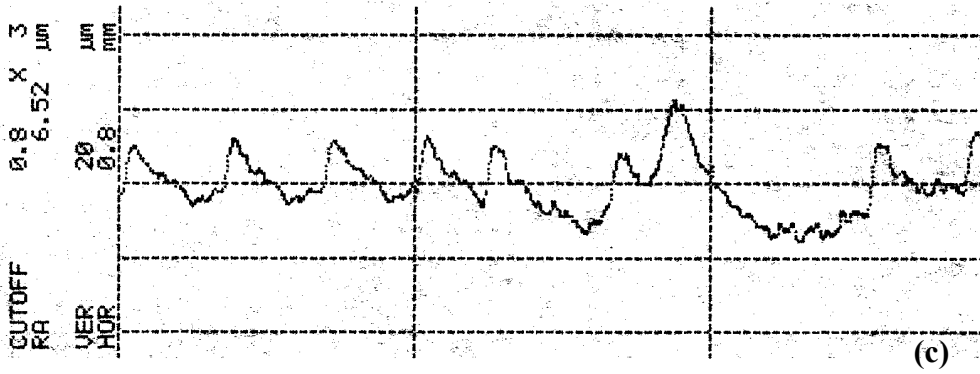
Numune 10



Numune 11

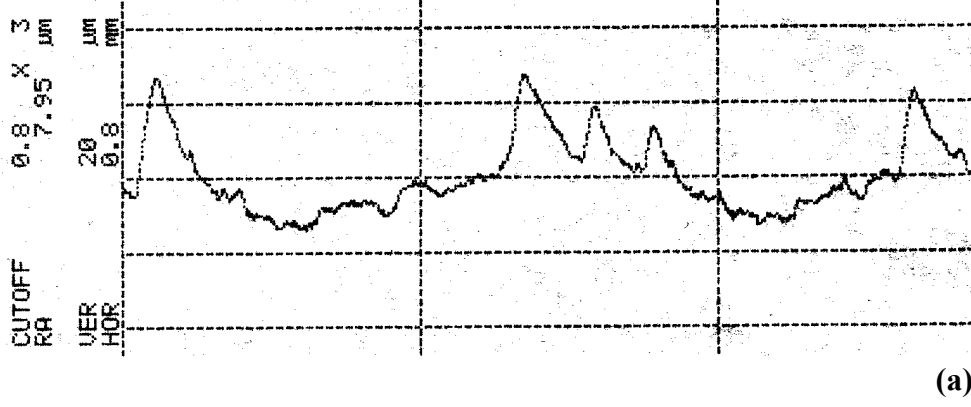


Numune 12

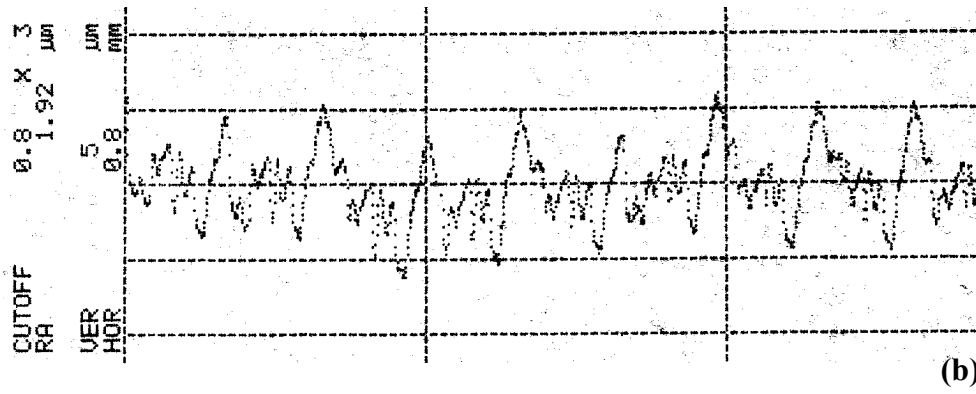


Şekil 4.19. 1120 d/d Dönüş Hızındaki Kaynak Takımıyla Yapılmış Kaynaklı Boruların Genel Görünüş Bölgelerinden Alınan Pürüzlülük Grafikleri; (a) 8,04mm/s, (b) 6,28mm/s ve (c) 4,94mm/s.

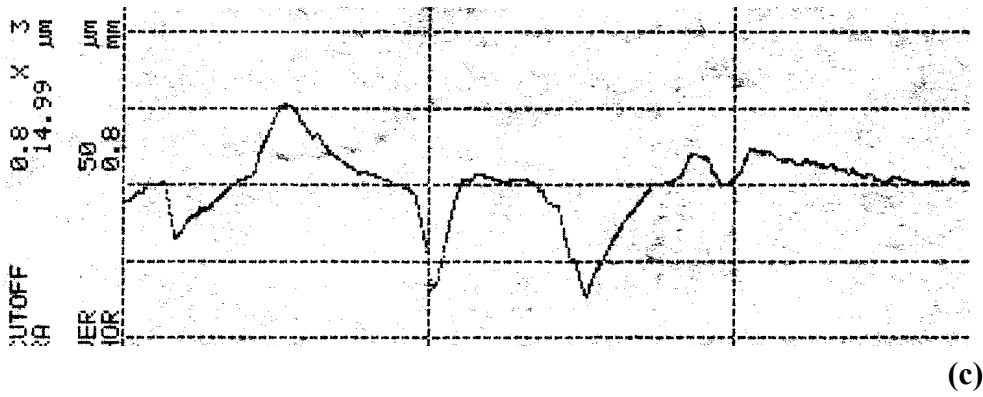
Numune 13



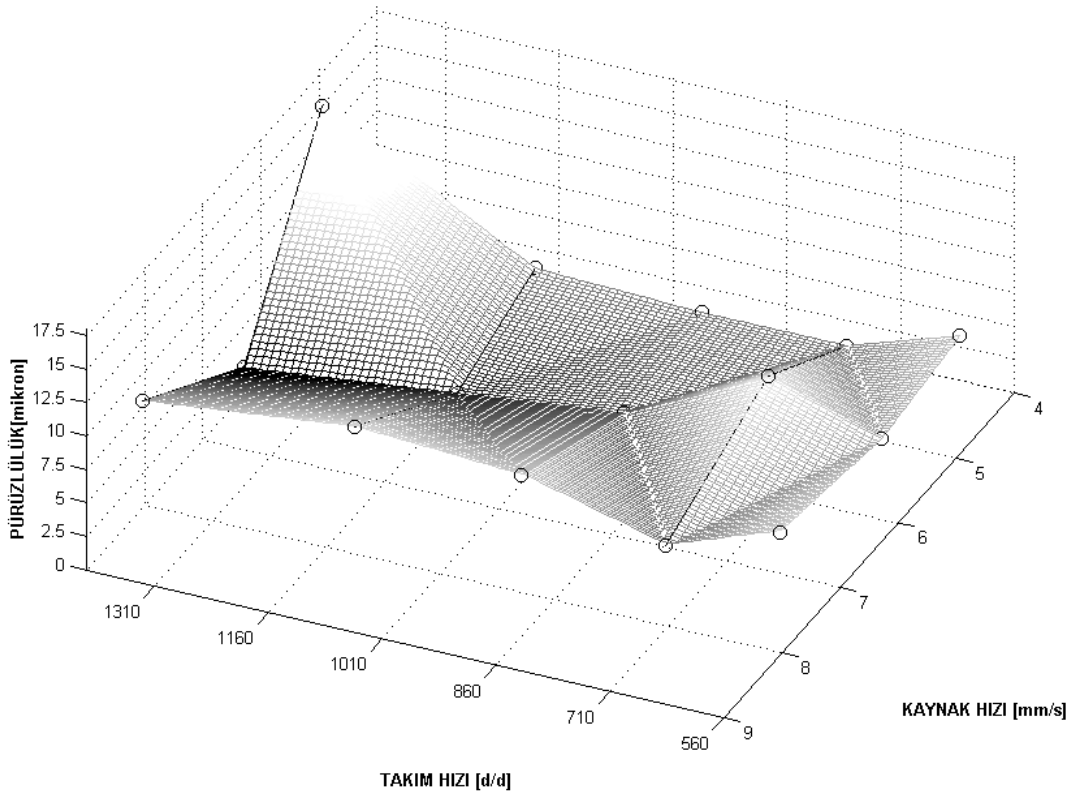
Numune 14



Numune 15



Şekil 4.20. 1400 d/d Dönüş Hızındaki Kaynak Takımıyla Yapılmış Kaynaklı Boruların Genel Görünüş Bölgelerinden Alınan Pürüzlülük Grafikleri; (a) 8,04mm/s, (b) 6,28mm/s ve (c) 4,94mm/s.



Şekil 4.21. Kaynak Takım Hızı ve İş Parçası İlerleme Hızının Fonksiyonu Olarak Yüzey Pürüzlülük Değişimi.

Kaynak edilmiş yüzeylerin Profilometre ile ölçülen ortalama yüzey pürüzlülük (R_a)'ya ait grafikler Şekil 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 ve 4.20'de verilmektedir. Ayrıca hız değerlerine bağlı olarak elde edilen bu değişimler üç boyutlu halde Şekil 4.21'de de gösterilmiştir.

Genellikle artan hız değerlerine bağlı olarak yüzeylerdeki pürüzlülüğün azaldığı gözlenmektedir. İş parçasının 8.04 mm/s'lik çevresel ilerleme hızı ve kaynak takımının değişen tüm dönme hızlarında R_a değerlerinde kısmî düşüşler mevcuttur. Önemli miktarda R_a 'daki azalmalar 6.28 mm/s'lik çevresel ilerleme hız değeri ve değişen kaynak takım hızlarında görülmektedir. Tablo 4.2 incelendiğinde, bunun nedeninin artan sıcaklıkla hızlanan plastik deformasyonun etkisi olduğu düşünülebilir. Çünkü sıcaklıkta düzenli bir artış mevcuttur. 4.94 mm/s'lik çevresel ilerleme hız değerindeki R_a değerlerinde de düşmeler mevcut olmakla birlikte 1400 d/d'lık takım hızındaki R_a

değerinin de gerçekte düşük olması gerekirken büyük bir değer ortaya çıkmıştır. Ölçüm hatasından veya kaynak dikiş hatalarından dolayı Ra değeri büyük çıkmış olabilir.

Tablo 4.4 Her Numune İçin Kaynak Üst Yüzeyinden Alınan Pürüzlülük Değerleri.

Numune no	Kaynak takım hızı (dev/dk)	Kaynak hızı (mm/sn)	Dikey ölçü (μm)	Yatay ölçü (mm)	Pürüzlülük [Ra] (mm)
1	560	8,04	50	0,8	9,23
2	560	6,28	20	0,8	7,69
3	560	4,94	20	0,8	8,81
4	710	8,04	20	0,8	6,22
5	710	6,28	50	0,8	10,34
6	710	4,94	20	0,8	6,12
7	900	8,04	20	0,8	8,98
8	900	6,28	20	0,8	5,14
9	900	4,94	20	0,8	6,11
10	1120	8,04	20	0,8	9,71
11	1120	6,28	20	0,8	3,7
12	1120	4,94	20	0,8	6,52
13	1400	8,04	20	0,8	7,95
14	1400	6,28	5	0,8	1,92
15	1400	4,94	50	0,8	14,99

Ra değerinin ölçümlerinden görüldüğü gibi yüzey kalitesi açısından en uygun iş parçası çevresel ilerleme hız değerinin 6.28 mm/s olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 ve 4.20'deki grafikler incelendiğinde bu hız değerindeki genliklerdeki değişim çok dar aralıklarda kalmaktadır.

SKK metodu dışındaki kaynak metotlarında olduğu gibi, demir dışı metallerin kaynak işlemlerinde, bilhassa alüminyum ve bakır gibi malzemelerin kaynağında, ısı iletim

katsayılarının yüksek olması sebebiyle kaynak hızının iyi seçilmesi gerekir. Aksi halde istenilen özellikte kaynak dikişleri elde etmek mümkün olmaz. Optimum kaynak hız değeri iş parçası üzerindeki ısı dağılımı bakımından çok önemli olmaktadır. Şekil 4.28.(c)'deki makro yapıda da görüldüğü gibi, düşük ilerleme hız değerinde yapılan kaynak işleminde “kissing bond” diye tabir edilen iki borunun yapışma üst yüzeyinde, plastik deformasyon olmasına rağmen ayrılma olmuştur. Yani birleşme olayı söz konusu değildir. Birleşme üstten aşağı inildikçe gerçekleşmiştir.

4.8. Kaynaklı Bölgelerin Mikroyapılarının İncelenmesi

Araştırmacılar kaynaklı bölgelerin mikroyapılarını incelerlerken birbirlerine yakın ifadeler kullanmışlardır. Sürtünme karıştırma kaynak tekniğiyle imal edilmiş parçalardaki mikroyapı bölgeleri, diğer kaynaklı birleştirmeler sonucu elde edilen kaynak dikiş bölgeleri kısmen birbirlerinden farklılık göstermektedir. SKK kaynaklı bağlantılarda diğer kaynak yöntemlerine nazaran kaynaklı söz konusu bölgeleri ayırt etmek daha zordur. SKK yöntemiyle elde etmiş olduğumuz iş parçalarının kaynaklı bölgelerini tanımlarken de bu zorluklar daha net ortaya çıkmaktadır.

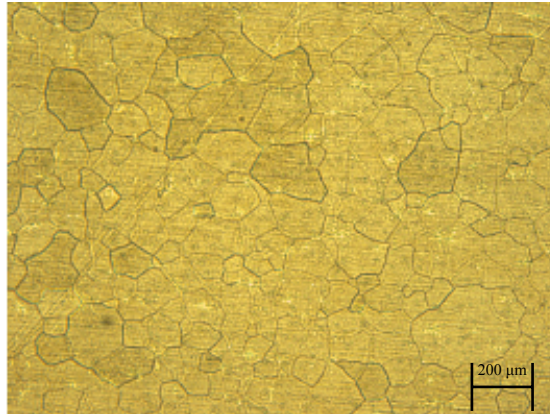
Çalışmalarımızda da, AA6063-T6 borularının SKK kaynak işlemi sonrasında kaynaklı bölgelerinin sınıflandırılması, Şekil 4.22'de görüldüğü gibi, Dünya Malzeme Birleştirme Teknoloji Merkezi TWI'ndeki tanımlar paralelinde dört ana grup halinde irdelenmeye çalışılmıştır [45]. Bunlar;

1. Isıdan etkilenmiş bölgeler (IEB),
2. Termo-mekanik etkilenmiş bölgeler (TMEB),
3. Dinamik olarak yeniden kristalleşme Bölgesi - (Termo-mekanik etkilenmiş bölgenin bir kısmı) (DYKB) ve
4. Kaynak kök bölgeleri 'dir.

Isıdan etkilenmemiş (ana) bölge üzerinde fazla inceleme yapılmamıştır. Tüm kaynak işlemlerinde aynı cins malzemeler kullanılmıştır.



Şekil 4.22. Mikroyapıların İncelendiği Kaynak Bölgeleri.



Şekil.4.23. SKK İşlemi Öncesindeki Malzemeye Ait Mikroyapı.

Ayrıca malzemenin işlenmemiş haldeki mikroyapısı Şekil 4.23.'de görülmektedir. Tane yapısı 100 – 200 µm arasında değişmektedir. Mikroyapı incelemek için bakalite alınan numuneler sırasıyla 600, 800, 1000, 1200 numaralı zımparalarla zımparalanmış sonrasında ise 4 µm, 2 µm ve 1 µm'luk elmas pastayla yüzeyler nihai olarak parlatılmıştır. Bundan sonra da numuneler ultrasonik temizleyici içerisinde temizlenmiştir. Dağlama işlemi de Keller dağlayıcı (%1 HF, %1.5 HCl, %2.5 HNO₃, %95 saf su) ile yapılmıştır. Dağlama süresi her bir numune için 10 saniyedir.

4.8.1. SKK İşleminde, Kaynak Takım Hızı ve İş Parçası Çevresel İlerleme Hızının Mikroyapıya Etkileri

Bu bölümde, değişen parametrelerin (kaynak takım hızları ve iş parçası çevresel ilerleme hızlarının) mikroyapı üzerine etkisi incelenmiştir. SKK yönteminde sürtünme

nedeniyle ortaya çıkan ısıyla değişen sıcaklık değerleri ve bunlara bağlı olarak da mikroyapıdaki değişimler söz konusudur.

Mikroyapıya yukarıdaki parametrelerin etkisini incelemek amacıyla 5 değişik kaynak takım hızı ve her bir takım hızı için 3 ayrı çevresel ilerleme hız seçilmiştir.

4.8.1.1. Isıdan Etkilenmiş Bölgeler (IEB)

Sabit kaynak takım hızı (Şekil 4.24.(a), (b) ve (c)) ve artan çevresel ilerleme hız değerlerinde IEB lerin mikroyapısında kısmi değişimler söz konusudur. 560 d/d'daki kaynak takım hızlarında, Şekil 4.24.(a), (b) ve (c)'deki IEB'ler incelendiğinde bu değişim açıkça görülmektedir. 8.04 mm/s'lik çevresel ilerleme hız değerindeki IEB'si ana malzemenin tane yapısı ve büyüklüğüne yakın bir görüntü sergilerken, 4.94 mm/s'lik çevresel ilerleme hız değerindeki IEB'sinde tane yapıları kısmen küçülmüş halde ve tane sınırları daha çok girintili çıkıntılı olarak görülmektedir. 6.28 mm/s değerlerindeki kesit mikroyapısında fazla bir değişim yoktur.

Mikroyapılardaki benzer değişimler 710 d/d'daki kaynak takım hızlarında, Şekil 4.25.(a), (b) ve (c)'deki IEB'lerinde de görülmektedir. Artan takım hızı nedeniyle birim zamanda üretilen ısı miktarı da değişmekte olup (Tablo 4.2), bu artış miktarı da mikroyapının değişmesine tesir etmektedir.

710 d/d, 900 d/d, 1120 d/d ve 1400 d/d kaynak takım hızlarında (Şekil 4.25, 26, 27 ve 28), 8.04 mm/s'lik çevresel hıza sahip kaynaklardaki IEB'lerde birbirlerine yakın yapılar mevcut, ancak özellikle 1400 d/d'da ve 8.04 mm/s'deki tane sınırları düzgünlüğünü kaybetmiş haldedir (Şekil 4.27.(a)).

Şekil 4.25.(b)-(c) ve Şekil 4.26.(b)- (c) 'deki IEB'ler birbirleriyle mukayese edildiğinde, tane yapılarındaki farklılaşmalar açıkça görülmektedir.

4.8.1.2. Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölgeler (TMEB)

Dinamik olarak yeniden kristalleşmiş (rekristalizasyon) bölgeye en yakın olan ve kendisi ile IEB arasındaki geçiş bölgesidir. Şekil 4.24.(a)'da görüldüğü gibi 560 d/d ve

8.04 mm/s'lik kaynak şartlarındaki TMEB'si ana yapıya yakın bir tane yapısına sahip iken, düşen çevresel ilerleme hız değerlerinde, tane yapısında küçülmeler olmuştur (Şekil 4.24.(b) ve 4.24.(c)). Bu bölgelerde, çok kenarlı tane yapılarının yanı sıra küresel tane yapısına benzer yapılar gözlemlenmiştir. Kaynak merkez bölgesindeki teneler tamamen küresel yapıya uygun bir halde gözükmetedirler. Hatta bu tür yapılar IEB'sinde (Şekil 4.26 ve 27) de mevcuttur.

Diğer bir tane yapısı şekli ise sürtünme karıştırma işleminin sonucu ortaya çıkan termal etkinin en fazla olduğu bölgelerdeki lamel yapıdır. Çünkü buradaki sıcaklıkların 450°C veya üzerinde olduğu tespit edilmiştir [10, 23, 24]. Bu nedenle plastik deformasyon bu bölgelerde daha etkin görev yapmaktadır (Şekil 4.24.(c), Şekil 4.25.(b) ve (c), Şekil 4.26.(c) ve Şekil 4.27.(a)). Weld Nugget denilen dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölgelerine (DYKB) bitişik kısımlardaki taneler katmanlar halinde ya da diğer bir ifadeyle lameller şeklindedir. Burada kaynak takım ucundan dolayı ortaya çıkan plastik deformasyon ve bunun etkisi açıkça görülmektedir.

4.8.1.3. Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge-Weld Nugget, (DYKB)

Katı hal kaynağı olan SKK yönteminde özellikle kaynak kesitinin merkez bölgelerindeki tane yapıları, IEB ve TMEB'lerindeki tane yapılarından çok daha farklı oluşmaktadır. Bilhassa bu bölgelerde, yapı dinamik olarak yeniden kristalleşme özelliği göstererek, oldukça ince, çok kenarlı tanelerle birlikte küresel taneler de diyebileceğimiz mikroyapılar oluşmaktadır. Malzeme sürtünme karıştırma işleminin etkisiyle super-plastik özellik göstermektedir. Kaynak takımının dinamik hareketi ve termal nedenlerden dolayı kaynak esnasında bu bölgedeki malzemenin mikroyapısı çok fazla değişiklik göstermektedir.

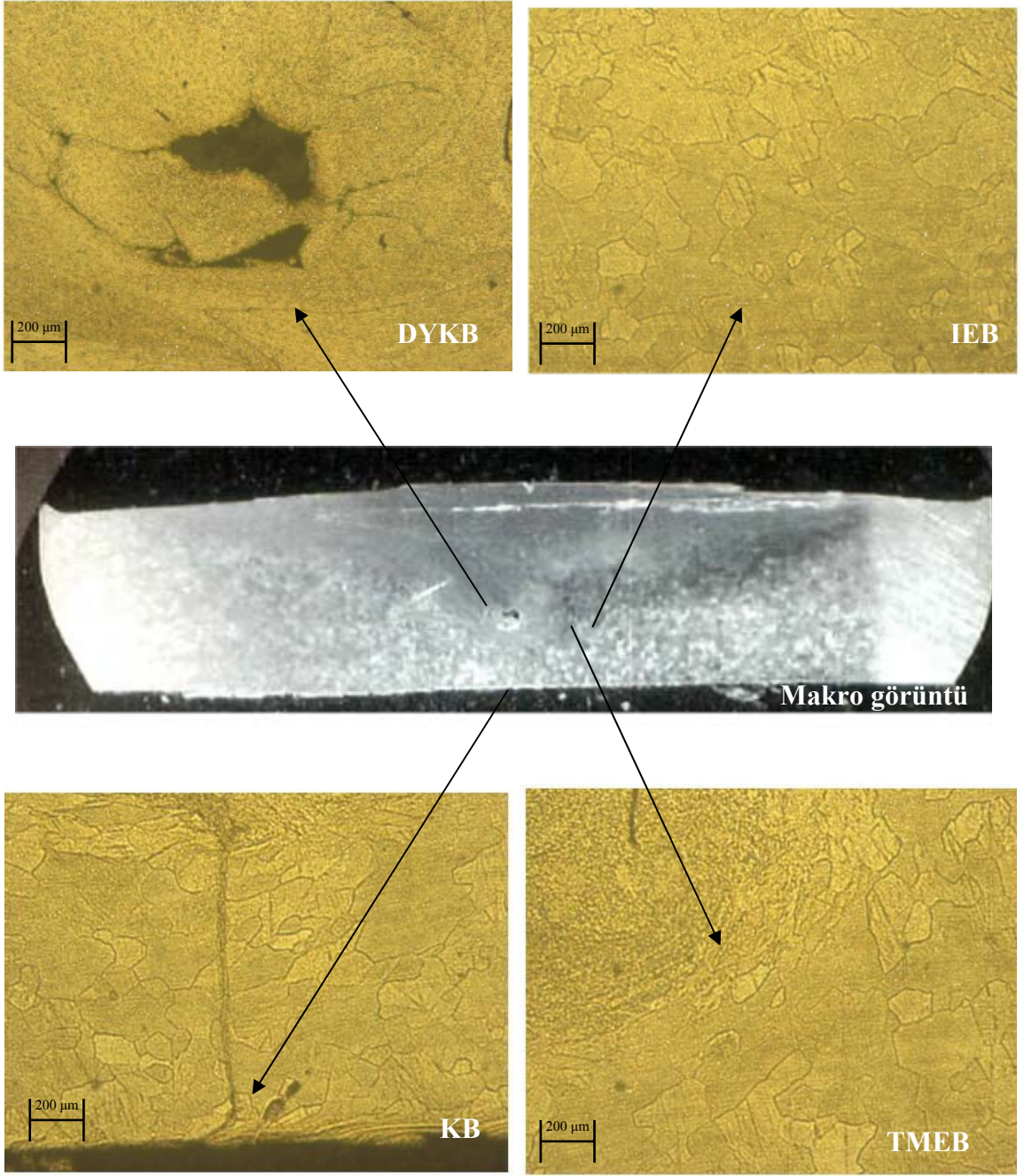
Kaynak takımının 560 d/d'lık hız değeri ve iş parçalarının farklı çevresel ilerleme hız değerlerinde Şekil 4.24.(a), (b) ve (c)'de görüldüğü gibi taneler lamel, çok kenarlı ve küresel şekilde olmak üzere farklı geometrik yapıya sahiptirler. Dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bu bölgede çevresel ilerleme hızına bağlı olarak iç boşluklar gittikçe kaybolmaktadır. Şekil 4.24.(c)'deki kesitte kalan boşluk miktarı ihmal edilebilir seviyededir. Özellikle 8.04 mm/s'lik ilerleme hızındaki kesitte görülen ve muhtemelen hızlı soğuma ya da sürtünme ısısının yeterli gelmemesinden, büyük çaplı iç boşluğun

yanı sıra diğerk kaynak bölgeleri ile yeterli şekilde bağ oluşturmamış ve plastik deformasyona uğramış parçacıklar görölmektedir.

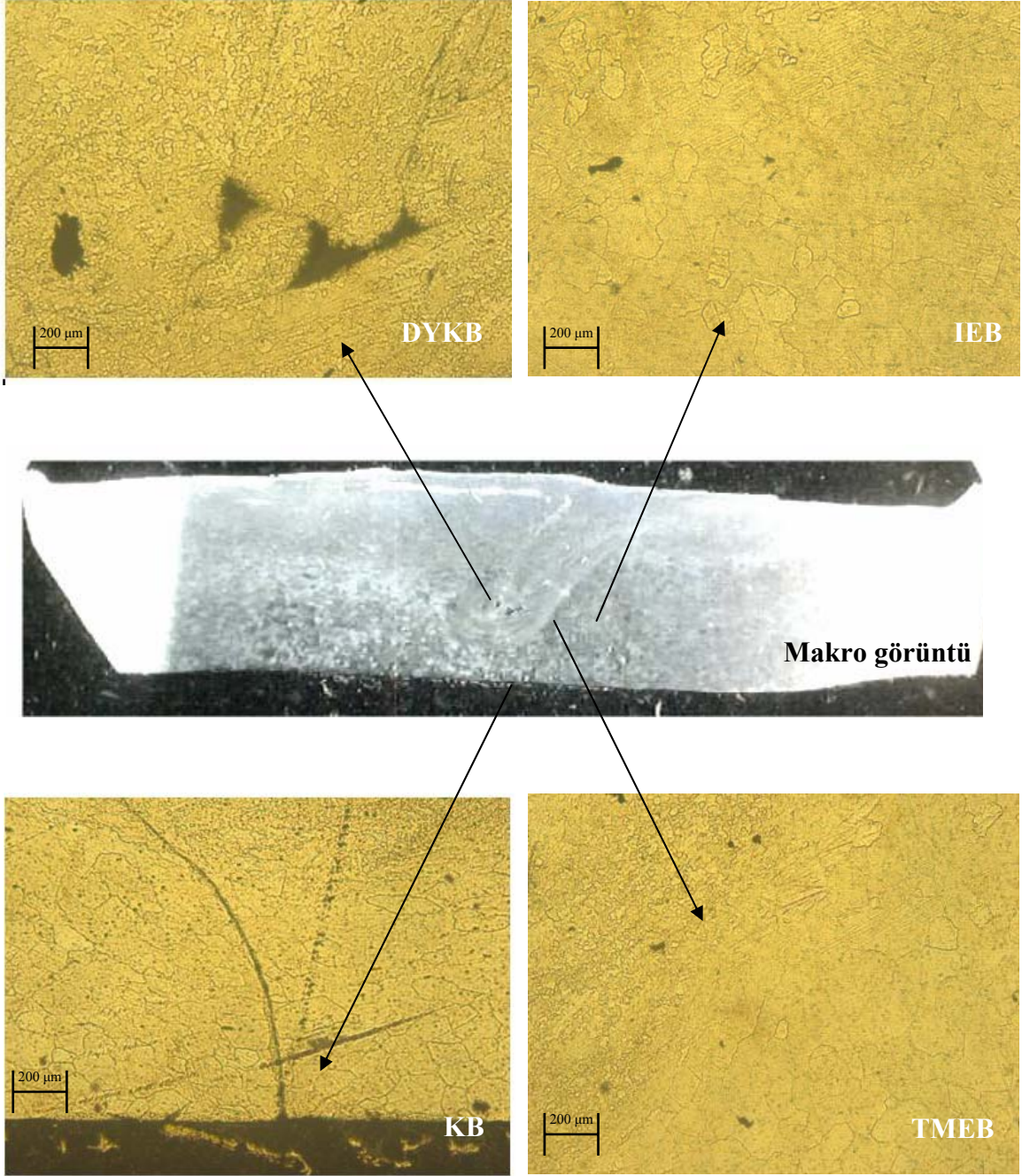
560 d/d ve 4.94 mm/s'lik hız değerlerindeki kaynak merkez bölgesindeki birleşme ara yüzeyinde yeterli bağ oluşumunun da gerçekleştiği görölmektedir. 8.04 mm/s ve 6.28 mm/s değerlerindeki kesitlerde de kaynak kök bölgelerinin üst kısımlarındaki ara yüzeylerde de yeterli kaynak bağının oluştuğu ancak borunun iç yüzeyine yakın kısımlarında yeterli bağ oluşmamıştır.

Benzer şekilde, Şekil 4.25, 26, 27 ve 28'de görüldüğü gibi kaynak merkez bölgelerinde yapı dinamik olarak yeniden kristalleşmiş ve çok ince tane yapısındadır. Şekil 4.25.(b)'den itibaren bu bölgeler incelendiğinde merkezdeki iç boşluklar kaybolmaya başlamıştır. Aynı durum Şekil 4.26.(b), Şekil 4.27.(c) ve Şekil 4.28.(c)'deki mikroyapılarda da gözlemlenmiştir. Bunların muhtemel sebepleri artan hız değerleri ve buna bağlı olarak da ortaya çıkan sürtünme ısı değerlerindeki artış olabilir. Özellikle bu kaynak merkez bölgelerindeki sıcaklık değerleri malzemenin erime sıcaklıklarına oldukça yakındır [10].

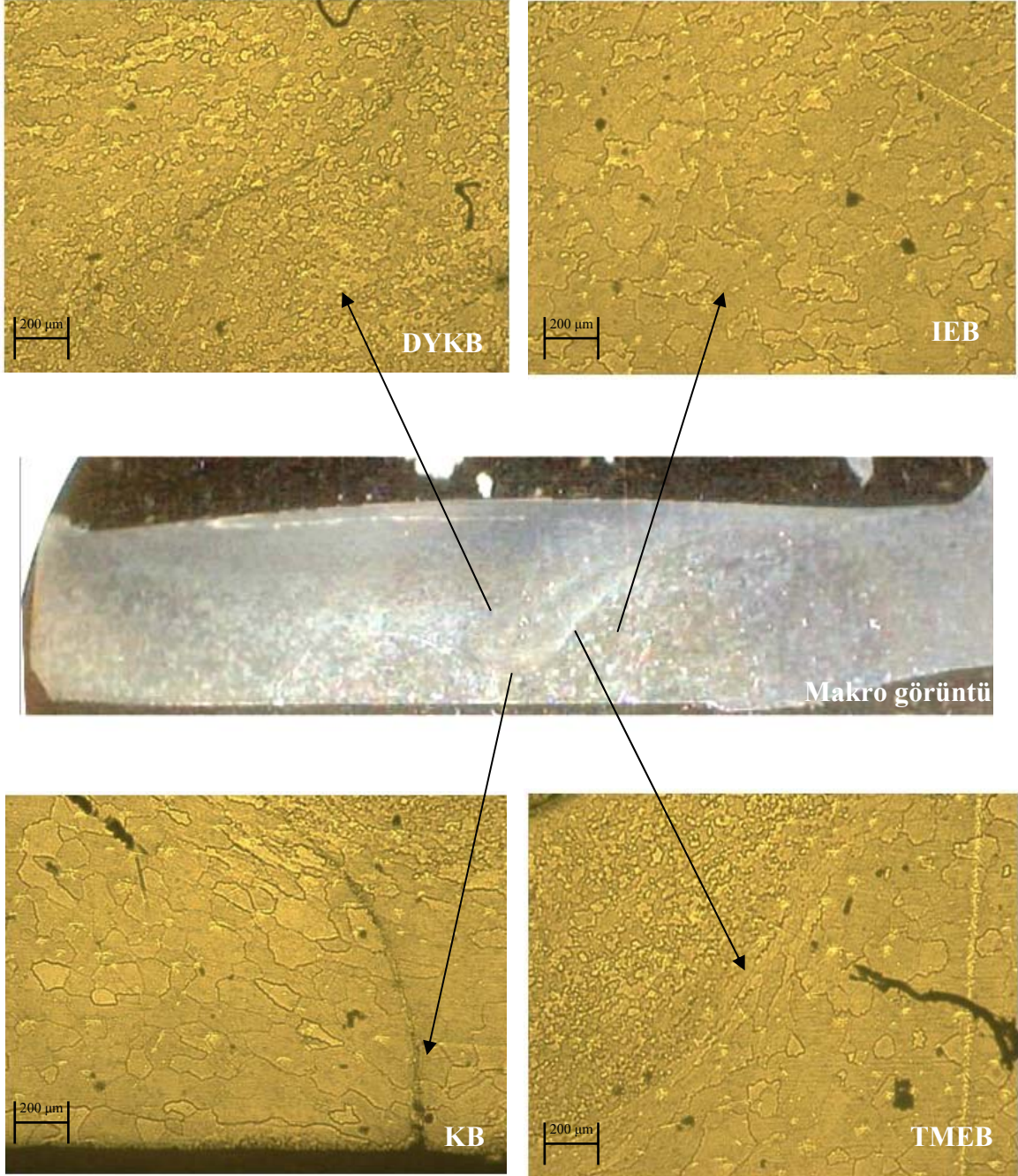
Kaynak kök kısımları incelendiğinde de kaynak takım hızının yüksek, iş parçası ilerleme hızının düşük olduğu (Şekil 4.24.(b), (c)) ve takım hızının yüksek olduğu (Şekil 4.26.(b),(c); Şekil 4.27.(c) ve Şekil 4.28.(c)) diğerk değerlerde kaynak kök kısmındaki yapışma yeterli görölmektedir. Fakat Şekil 4.25.(a), (b) ve Şekil 4.26.(a)'daki kaynak kök kısımlarındaki yeterli yapışmanın olmaması ise kaynak takım ucunun iş parçası arasında yeterli bir şekilde bastırılmadığını göstermektedir. Diğerk bir sebep de Şekil 4.8.'de görüldüğü gibi kaynak takım ucu birleşme (öpüşme) ara bölgesinden 2 mm kaçık olarak ayarlanmasından dolayı meydana gelmiş olabilir. Yani bu durumda kaynak takım ucunun iş parçası tabanına olan mesafe arttırılmış olmaktadır. Eğer takım ucu ile iş parçası tabanı arasındaki mesafe optimum şekilde ayarlanabilirse muhtemeldir ki kaynak kök kısmında istenilen özellikte birleşme meydana gelebilecektir.



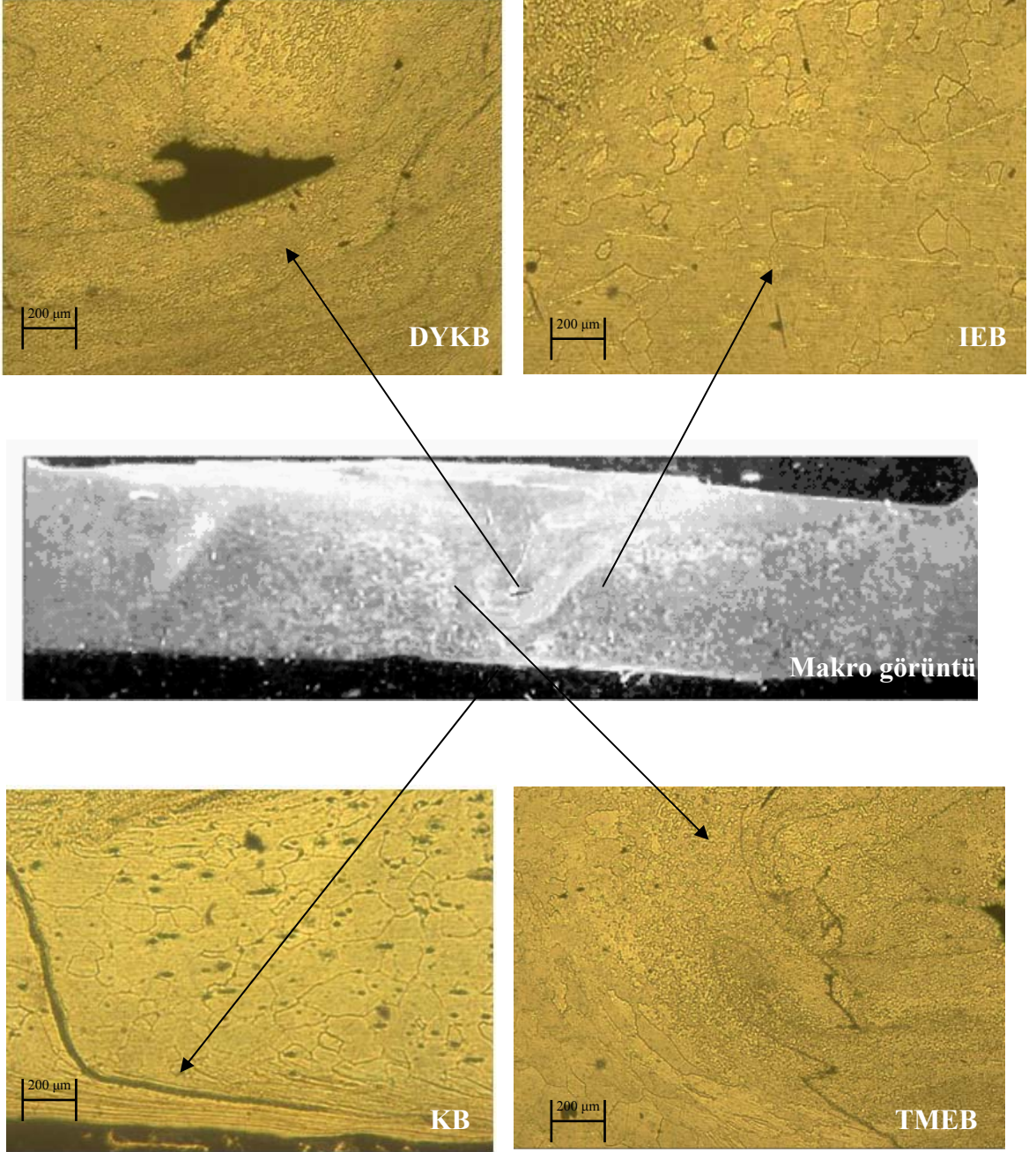
Şekil 4.24. (a) 560 d/d 'da 8.04mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



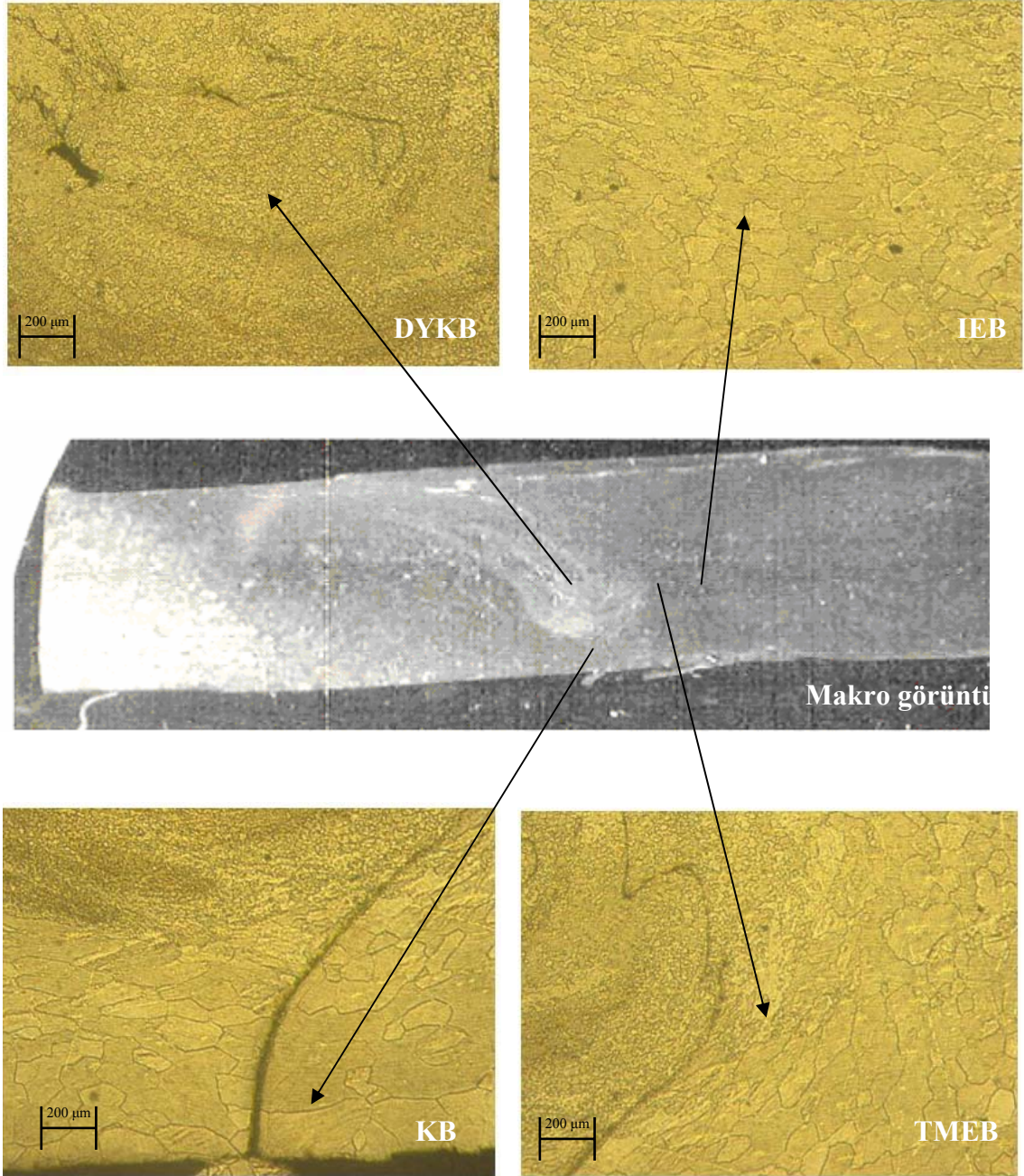
Şekil 4.24. (b) 560 d/d 'da 6.28mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



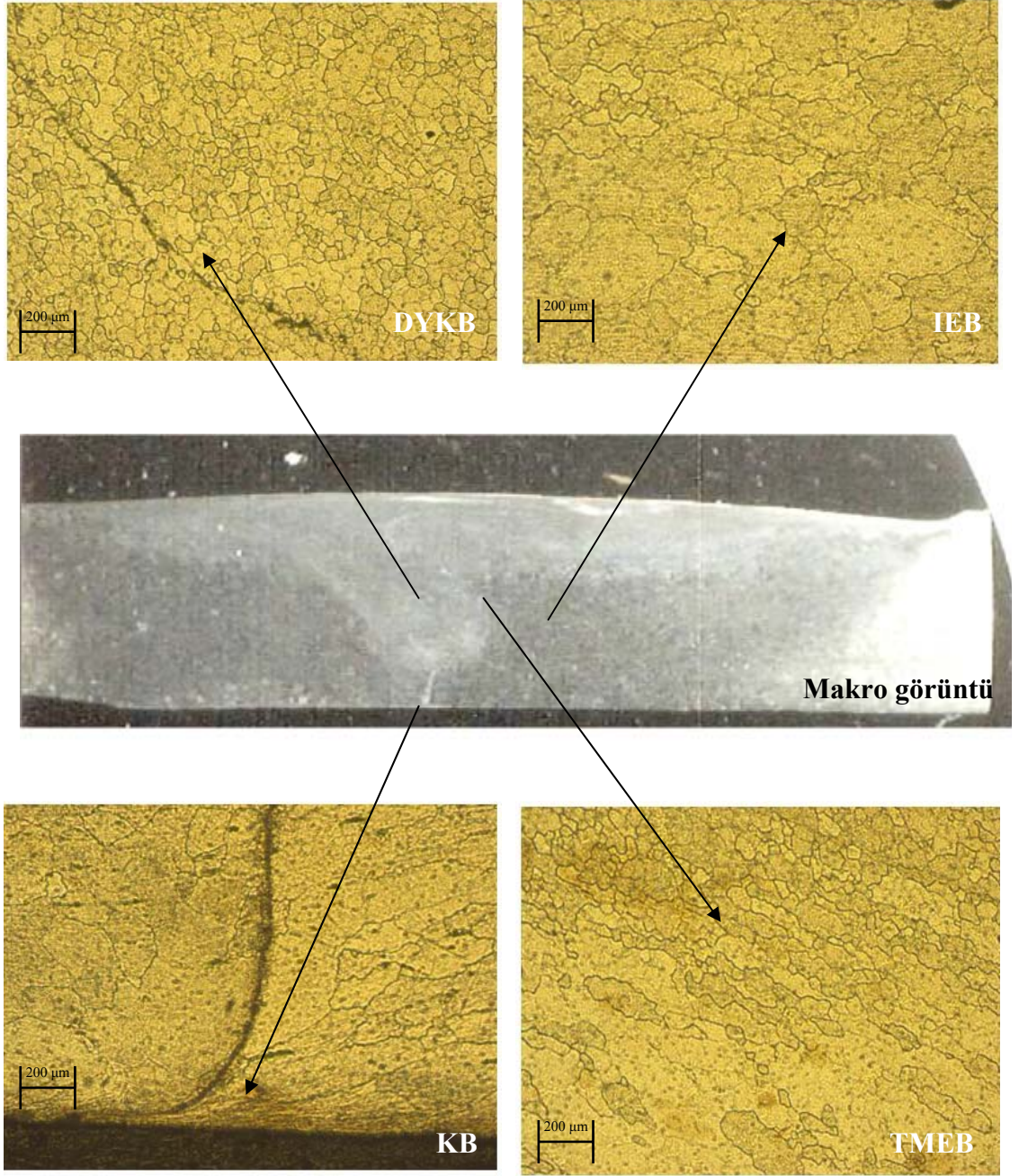
Şekil 4.24. (c) 560 d/d 'da 4.94mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



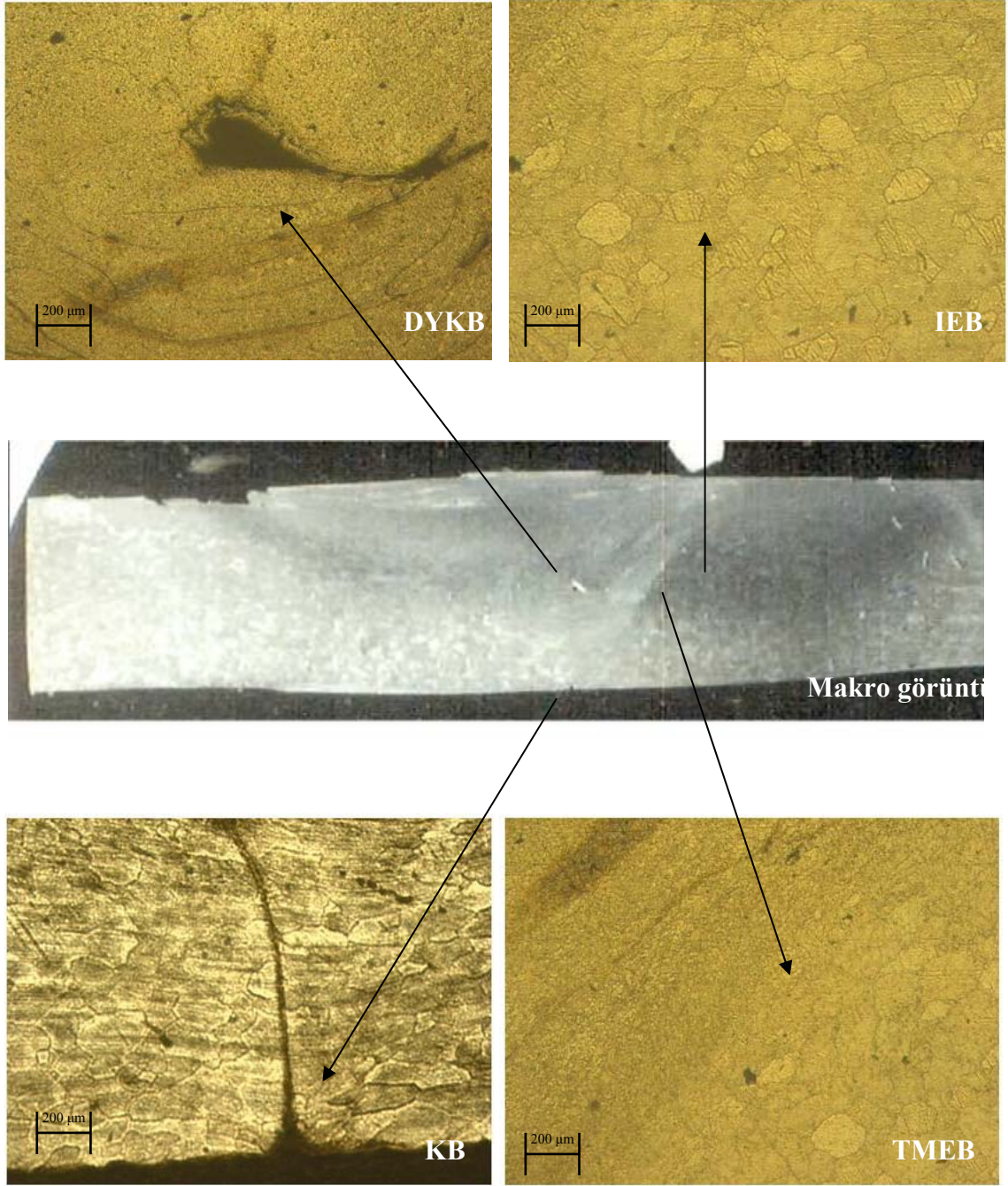
Şekil 4.25. (a) 710 d/d 'da 8.04 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



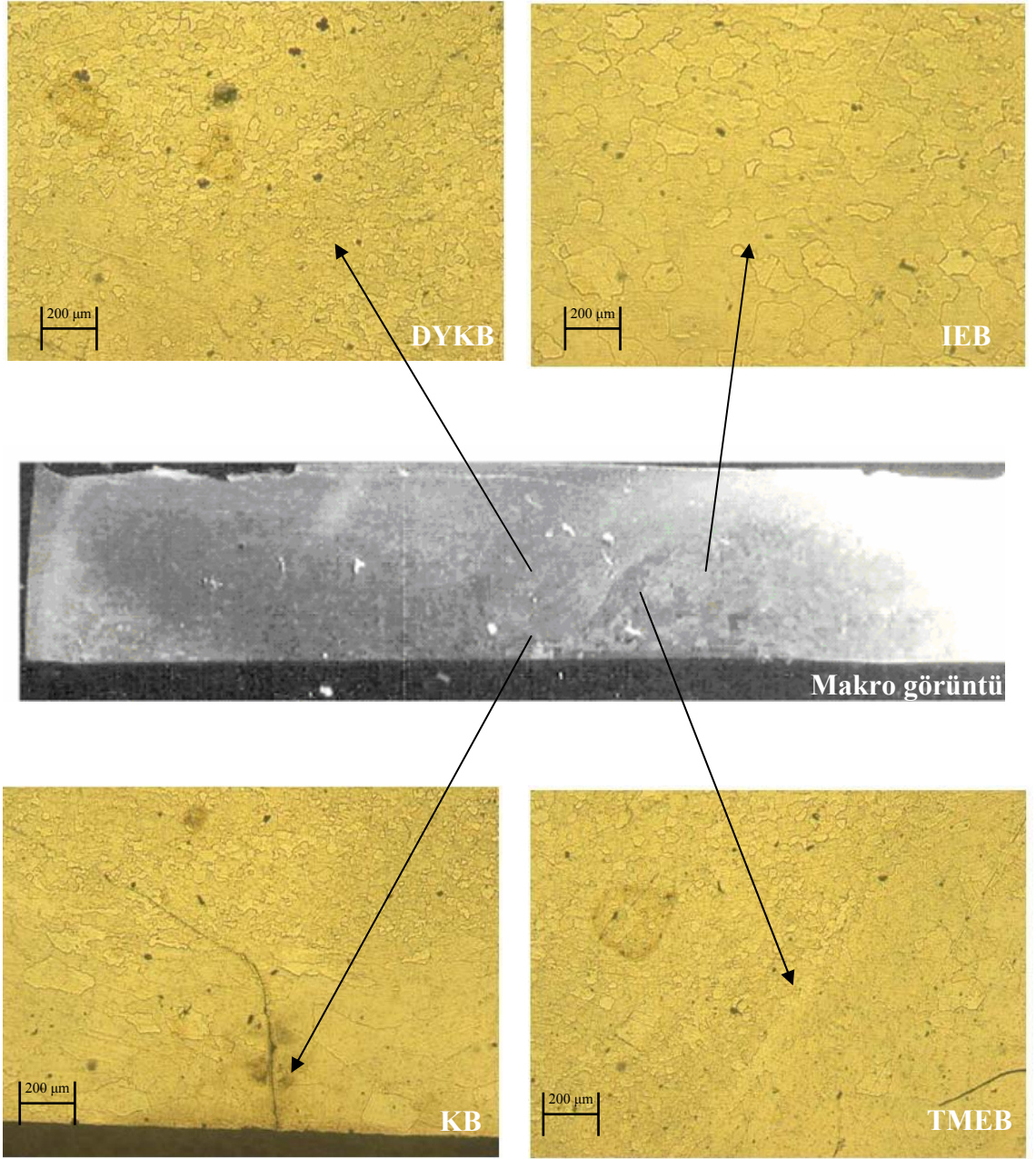
Şekil 4.25. (b) 710 d/d 'da 6.28 mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



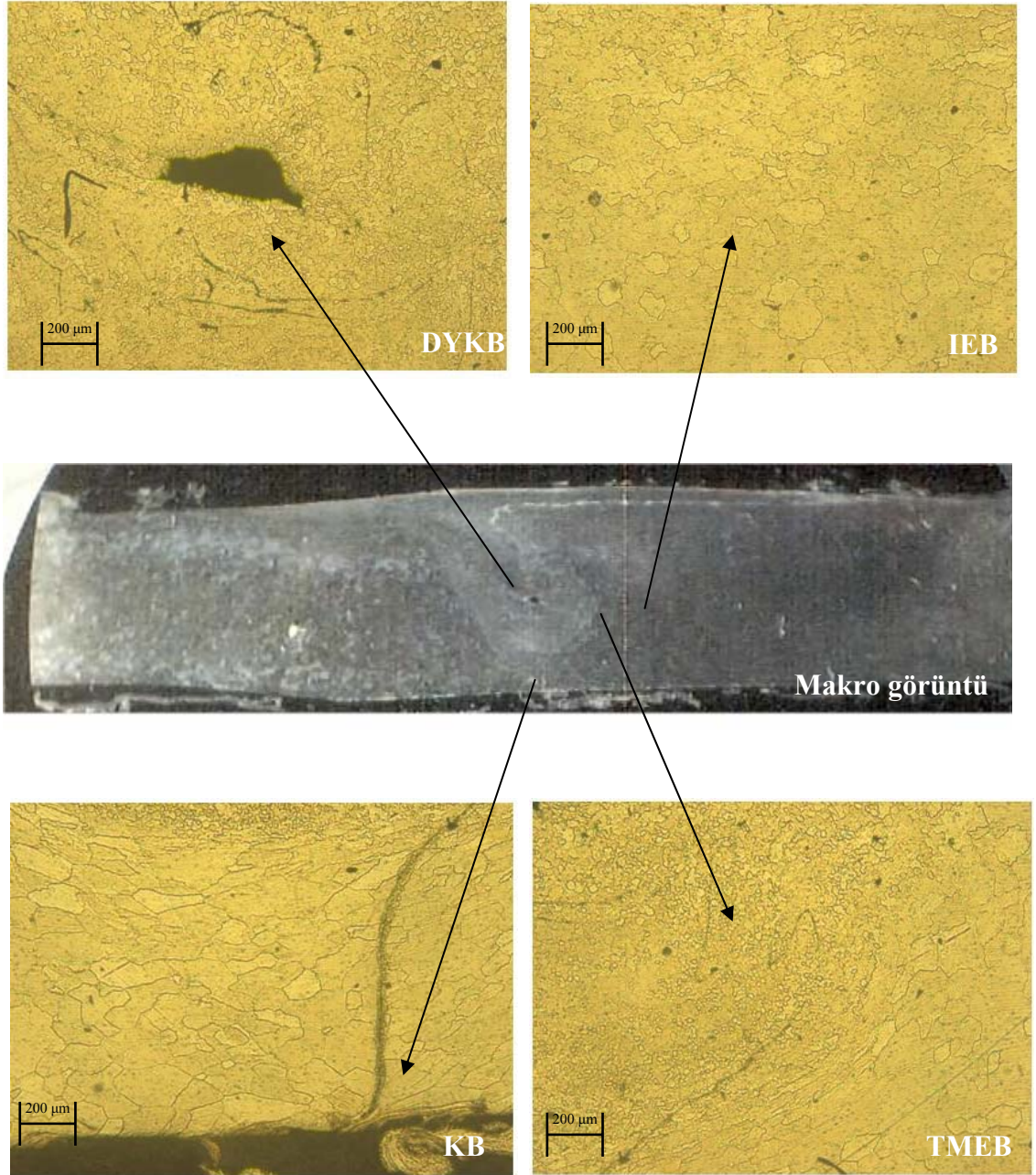
Şekil 4.25. (c) 710 d/d 'da 4.94mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



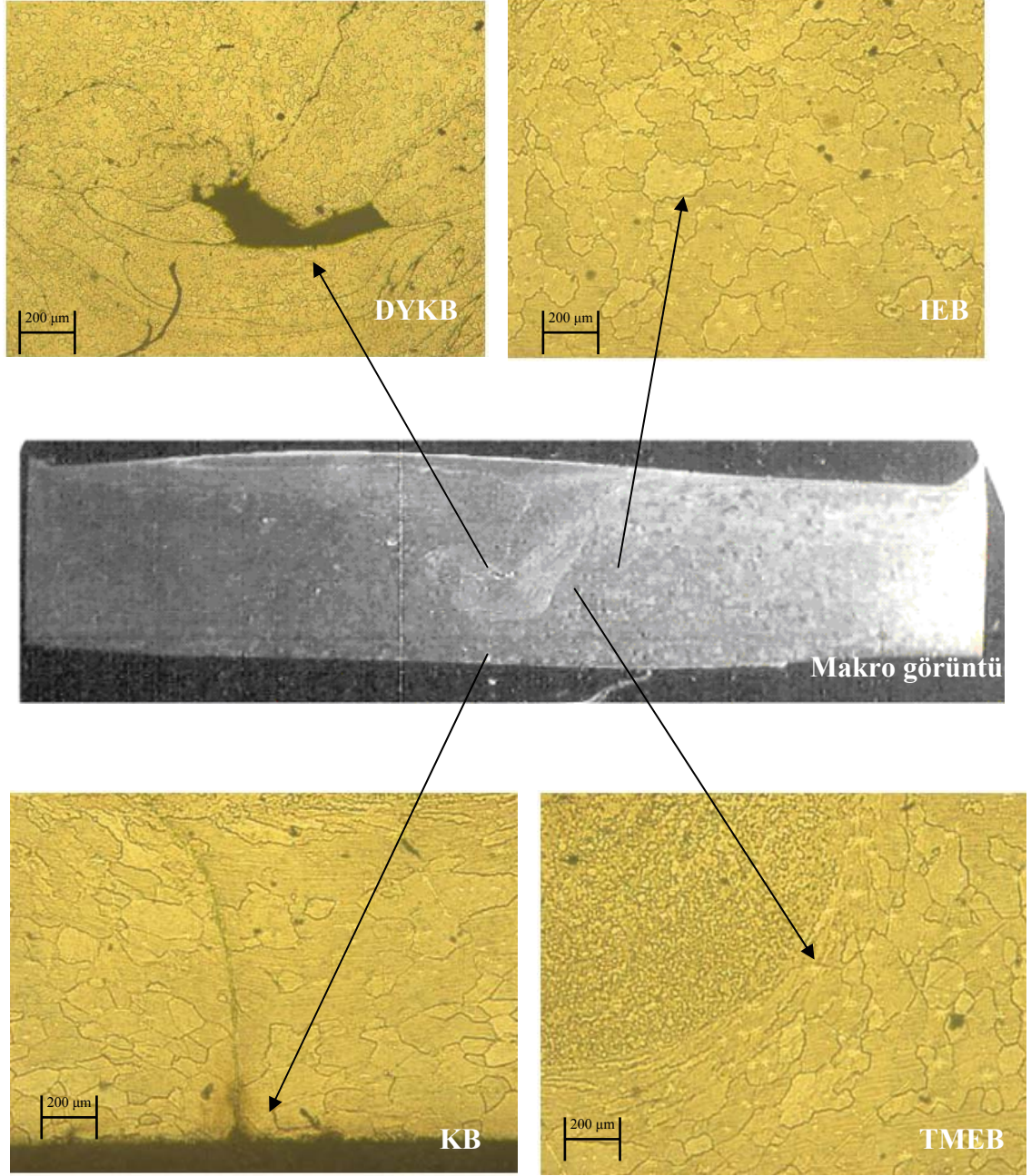
Şekil 4.26. (a) 900 d/d 'da 8.04mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



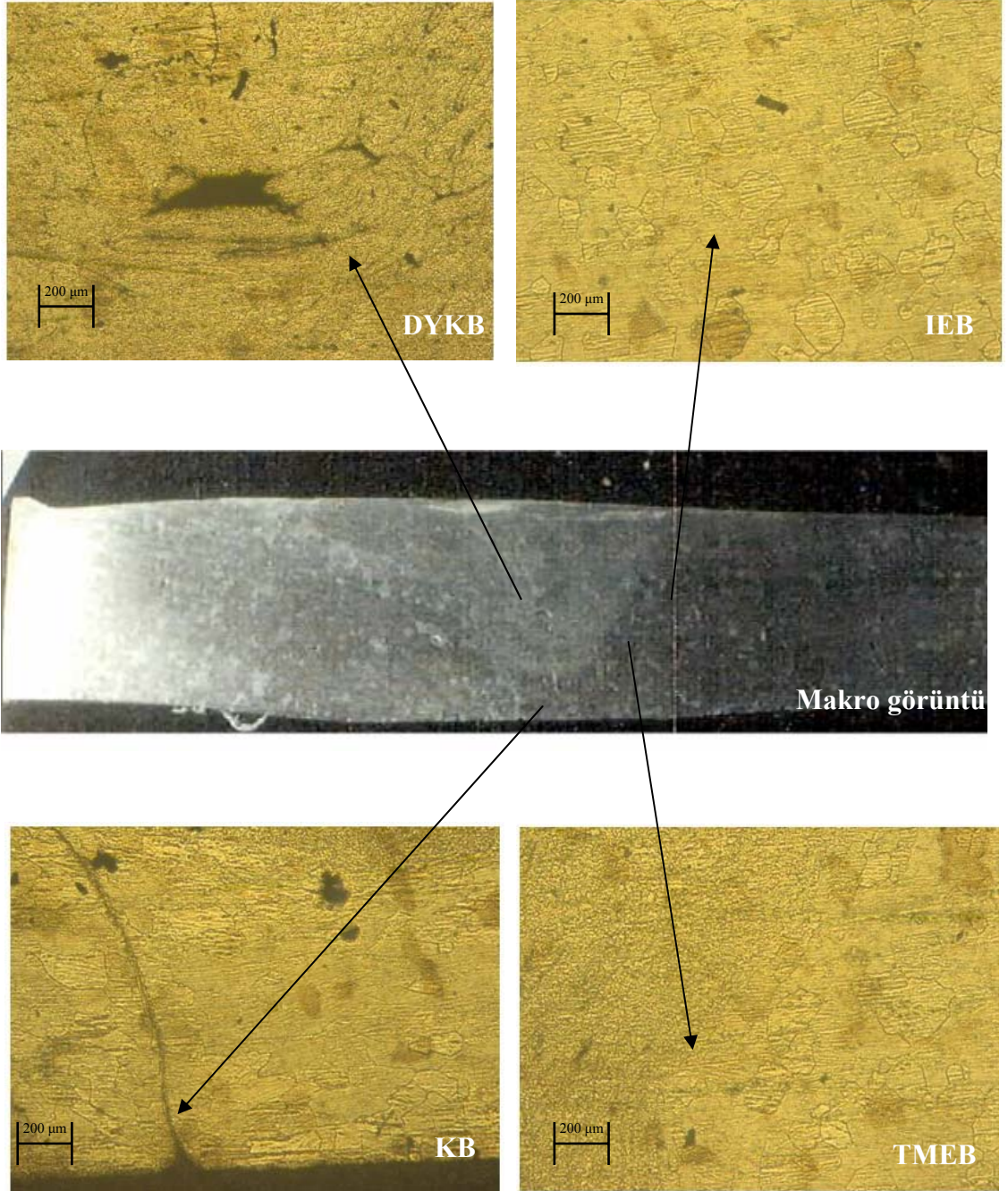
Şekil 4.26 (b) 900 d/d 'da 6.28mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgesinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



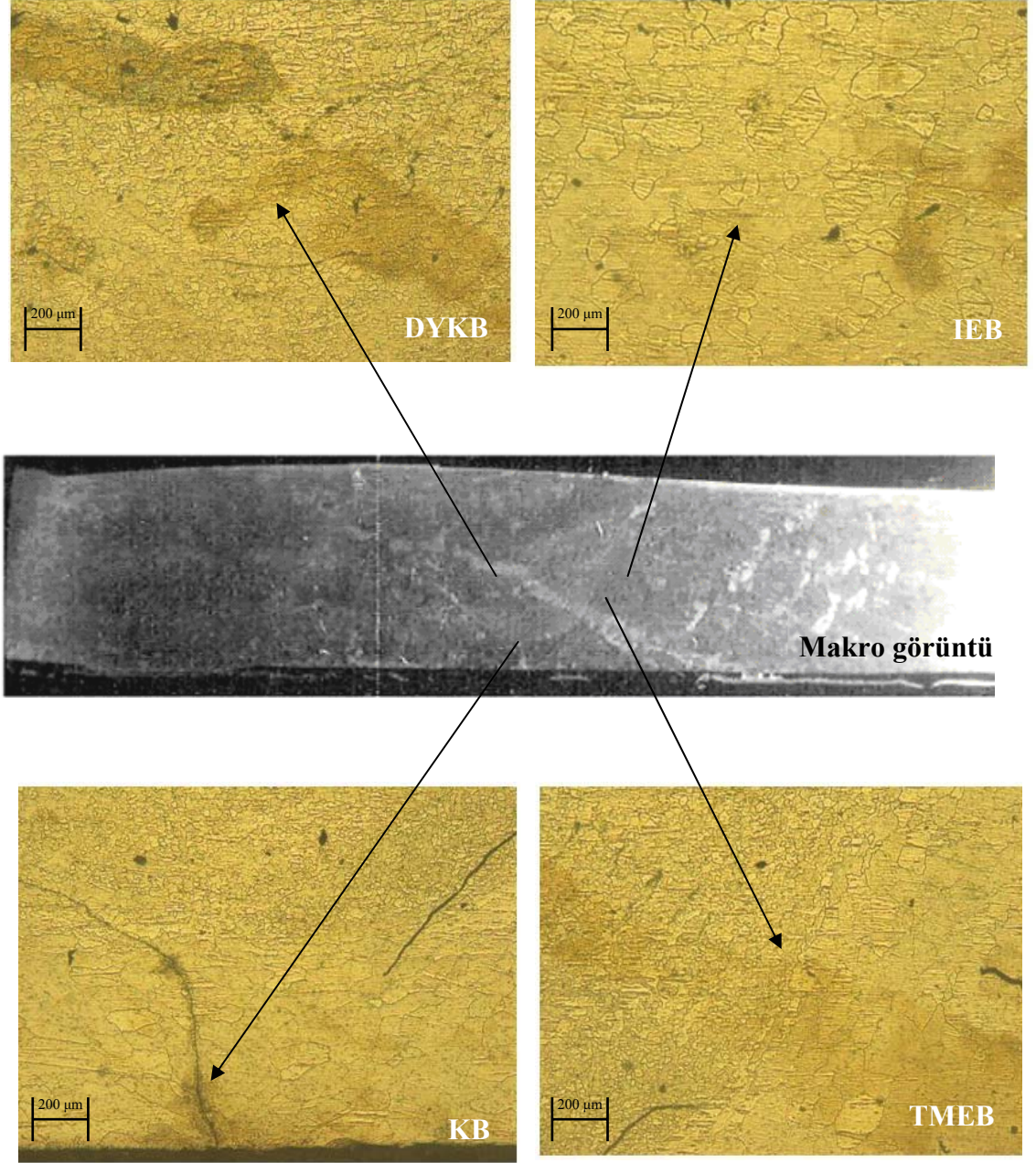
Şekil 4.26. (c) 900 d/d 'da 4.94mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekarık Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



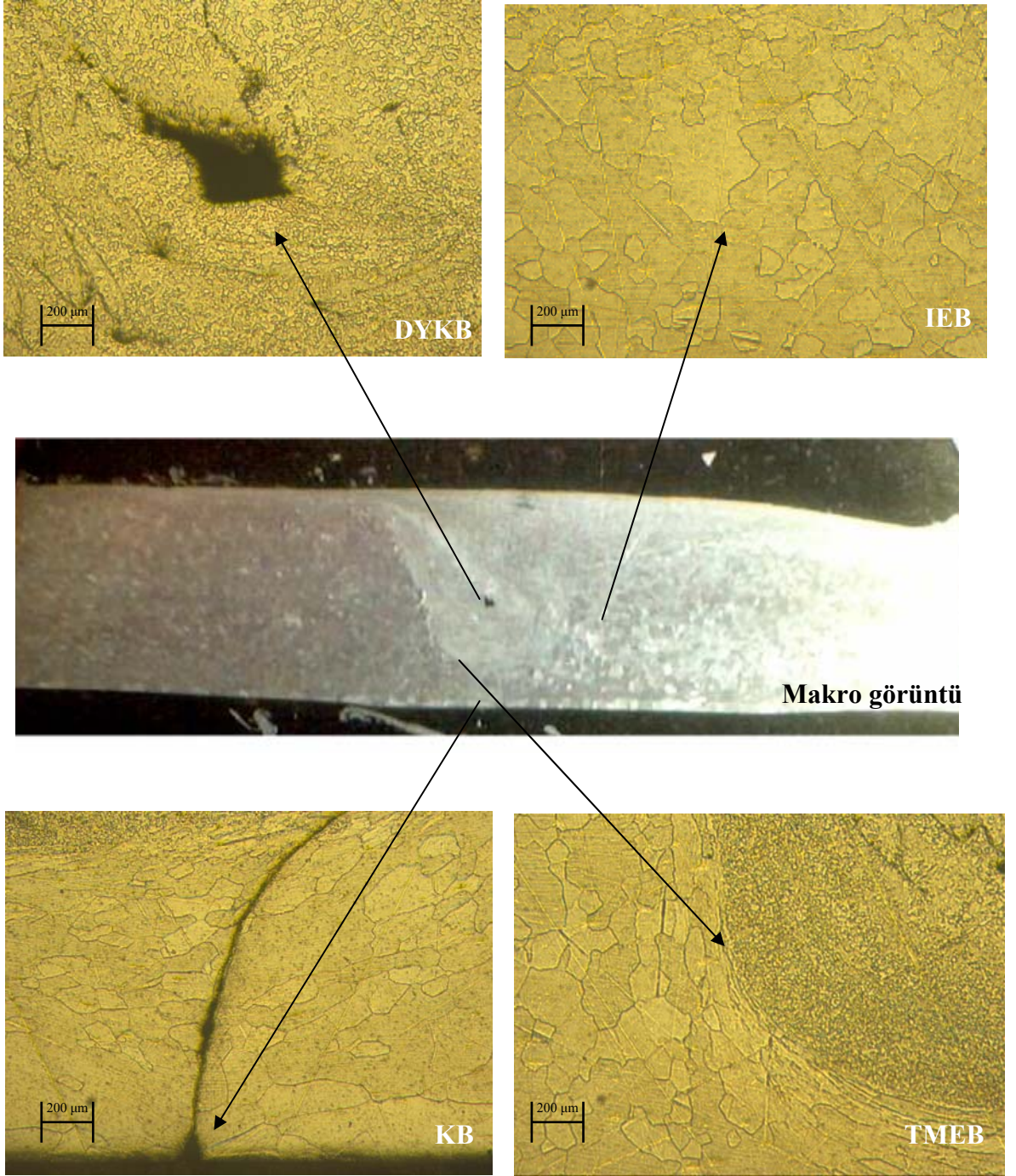
Şekil 4.27. (a) 1120 d/d 'da 8.04mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



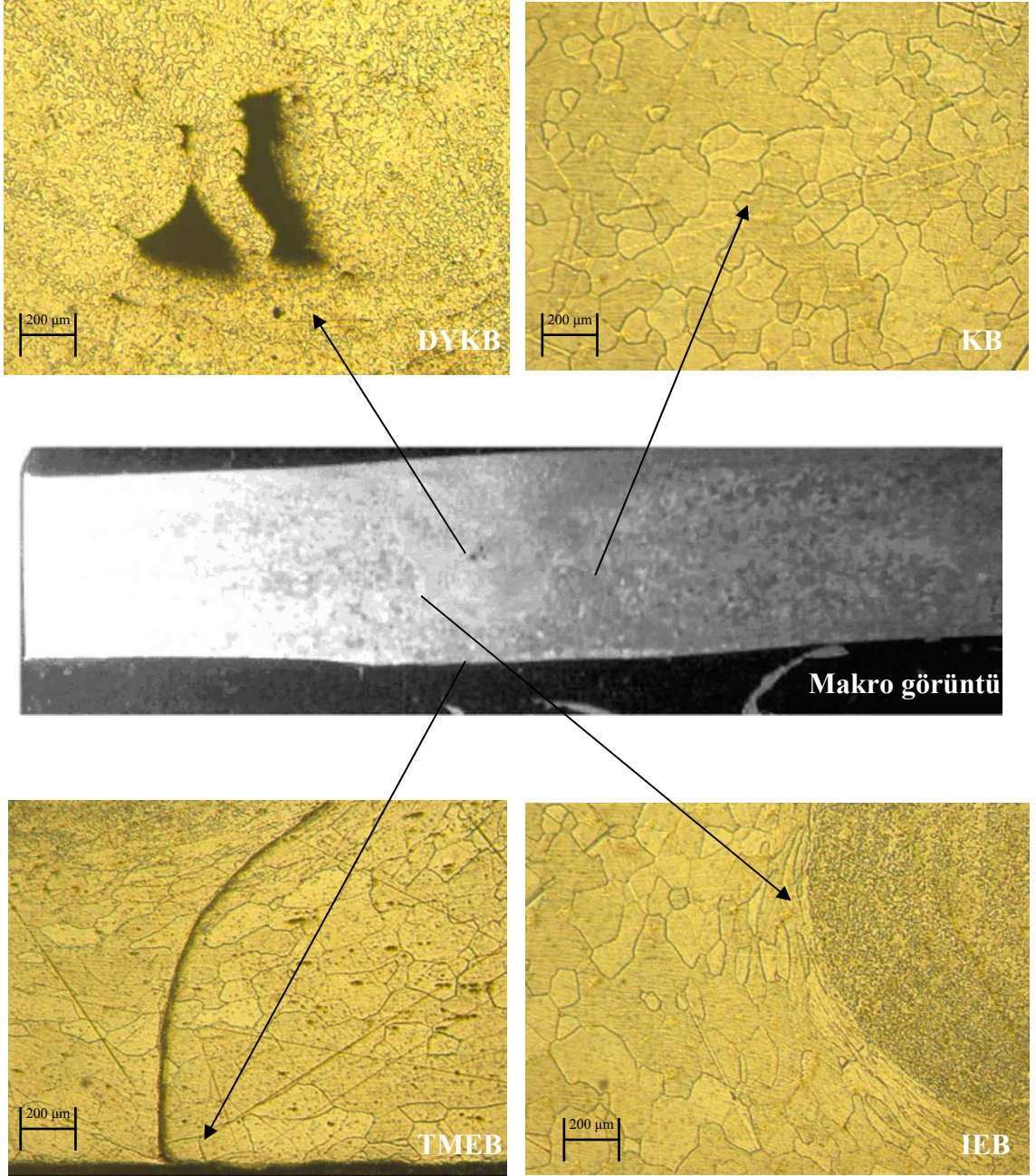
Şekil 4.27. (b) 1120 d/d 'da 6.28mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



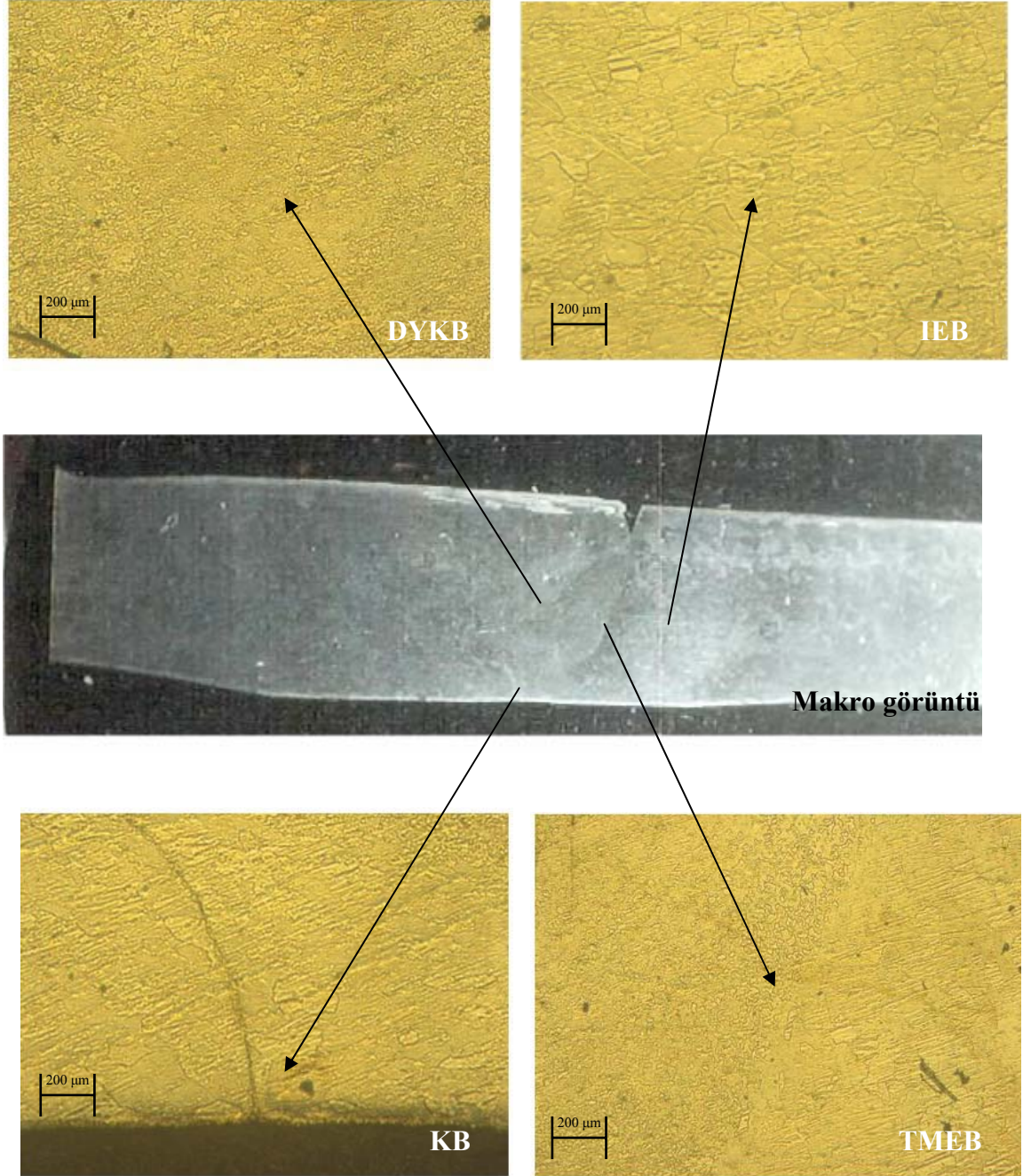
Şekil 4.27. (c) 1120 d/d 'da 4.94mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



Şekil 4.28. (a) 1400 d/d 'da 8.04mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



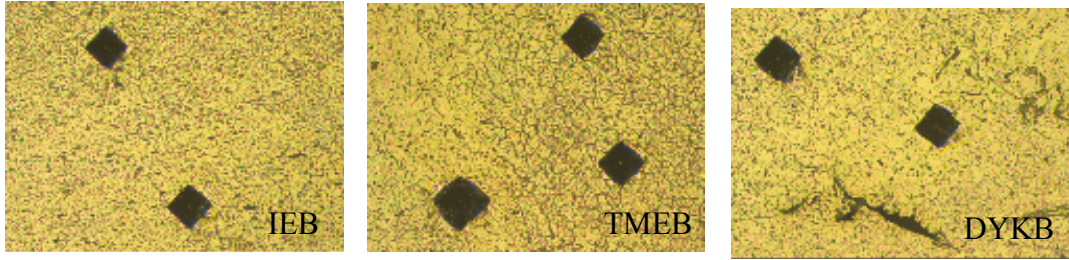
Şekil 4.28. (b) 1400 d/d 'da 6.28mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.



Şekil 4.28. (c) 1400 d/d 'da 4.94mm/s Kaynak İlerleme Hızında, Makro Yapı Üzerinden; Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşmiş Bölge (DYKB), Termo-Mekanik Etkilenmiş Bölge (TMEB), Isıdan Etkilenmiş Bölge (IEB) ve Kök Bölgelerinin (KB) Mikroyapı Görüntüleri.

4.8.1.4. Kaynak Sonrası Mikrosertlik Ölçümleri

Kaynak kesitine ait sertlik değerleri 45 gr. yük ve 5 s'lik yükleme süresi altında, Jena marka optik metal mikroskobuna monte edilen Mhp 160 sertlik ölçüm aparatı kullanılarak Vickers yöntemiyle ölçülmüş olup, çıkan sertlik değerleri Tablo 4.5 de verilmiştir. Ölçüm alınan kaynak bölgeleri Şekil 4.29.'da gösterilmektedir.



Şekil 4.29. Ölçüm Alınan Kaynak Bölgelerinin Gösterimi.

Tablo 4.5 SKK Kaynak Kesitlerinin Mikrosertlik Değerleri ($HV_{0.045}$).

Deney No	IEB	TMEB	DYKB	Yüzey altı
1	86	84	80	123
2	86	96	97	102
3	91	87	88	85
4	90	92	85	93
5	108	86	76	113
6	80	77	80	95
7	90	77	80	85
8	86	86	81	93
9	124	93	77	124
10	90	86	84	112
11	102	89	105	112
12	102	93	97	90
13	90	84	87	124
14	107	81	111	85
15	107	102	101	102

Başlangıçta T6 ısıl işlemi görmüş olan boruların sertliği $110 HV_{0.045}$ iken kaynak sonrası değerlerinde $25 HV_{0.045}$ 'lik düşüşler gözlenirken, yüzeye yakın bazı bölgelerde $110 HV_{0.045}$ 'in üzerinde sertlik değerleri ölçülmüştür. Çıkan bu yüksek sertlik değerlerindeki artışlarda soğumalardan ya da oksidasyonun etkisinden olabilir.

5.BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1.Sonuçlar

Sürtünme Karıştırma Kaynak (SKK) işlemleri tek tip kaynak takımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aparat, malzeme ve ortam sıcaklıkları sabittir. Kullanılan cihazların kalibrasyonu yapılmıştır. Kaynak esnasında oluşan titreşimin etkisi ve takım omuzu alt yüzeyindeki her numune için başlangıç etkileri ihmal edilmiştir. Değişken kaynak parametreler kaynak takım hızı ve iş parçasının çevresel ilerleme hızıdır.

1. 560, 710, 900, 1120 ve 1400 d/d kaynak takım hız değerleri ve 8.04 mm/s'lik iş parçası çevresel hız değerleri kullanılarak elde edilen kaynaklı parçaların DYKB bölgelerinin merkezinde farklı büyüklüklerde iç boşluklar meydana gelmiştir. Özellikle 560 d/d değerinde bu bölgede yeterli katı hal kaynak olayının gerçekleşmediği görülmüştür (Şekil 4.24.(a)).
2. Şekil 4.24'den 4.28'e kadar ki kaynak kök kısımları incelendiğinde, kaynak kök bölgelerinde yeterli yapışma sağlanamadığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak kaynak esnasında kaynak takım ucu (pin) borunun yapışma yüzeyinden 2 mm kaçık (Şekil. 4.8) olması ve izafi olarak pin ucunun malzeme içerisinde yeterli derinliğe erişememesi gösterilebilir. Eğer pin yeterli uzunlukta imal edilmiş olsaydı, muhtemelen kök kısmındaki bu olumsuzluklar meydana gelmemiş olacaktı. Başlangıçta kaynak takım pini, boru cidar kalınlığı 5 mm olması sebebiyle, 5 mm yüksekliğinde imal edildiğinden, olması gereken yükseklikten ondalık mertebesinde daha kısadır.
3. Isıdan etkilenen bölgelerde (IEB) ortaya çıkan tane yapısı, ana malzemenin tane yapısına eşdeğer büyüklükte tespit edilmiştir. Başlangıçta ana malzemenin tane

yapısı çok kenarlı yapıya sahip olup, ortalama tane büyüklükleri 100 – 200 µm arasında değişmektedir.

4. Termo-mekanik etkilenmiş bölgelerde (TMEB) tane yapılarında küçülmeler olmuştur. Aynı zamanda da plastik deformasyonun etkisiyle taneler lamel şeklinde görülmektedir. Diğer bir değişim ise başlangıçtaki tane yapılarının kenarları düzgün iken bu bölgedeki tanelerin kenarları zig-zaglı bir yapı şeklindedir.
5. Dinamik olarak yeniden kristalleşmiş bölgelerdeki (DYKB) tane yapılarında da başlangıçtaki tane yapısına göre çok büyük değişimler gözlemlenmiştir. Kaynak takım ucunun (pin) etkisi oldukça büyüktür. En yüksek sıcaklık değeri bu noktada çıkmaktadır. Bu nedenle hem yüksek hem de buna bağlı plastik deformasyon nedeniyle, bu bölgedeki tane yapısı oldukça küçüktür. Tane yapılarındaki bu değişimler 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 ve 4.29'daki DYKB bölgelerinde görülmektedir. DYKB'deki tane yapılarının hızlara bağlı olarak incelenebilmesi için SEM (taramalı elektron mikroskop) çalışmasının yapılması gerekmektedir. Mevcut mikroskop çalışmalarında tane yapılarının çok küçük olması nedeniyle, hıza bağlı değişimleri hakkında yorum yapılmamıştır. Ancak Hassan K.A.A. ve arkadaşlarının [38] yapmış oldukları çalışmalarda, artan hıza bağlı olarak DYKB'deki tanelerde büyümelerin olduğunu tespit etmişlerdir. Fakat mevcut incelemelerde bu bölgedeki yapılarda çok farklı değişim gözlenmiştir.
6. Kaynak dikiş kalitesi bakımından en uygun kaynak parametreleri, elde edilen sonuçlara göre; 560 d/d – 4.94 mm/s, 1120 d/d – 8.04 mm/s, 1120 d/d – 4.94 mm/s ve 1400 d/d – 4.94 mm/s'lik kaynak takım hızı – iş parçası çevresel ilerleme hız değerlerinde elde edilmiştir.

5.2.Öneriler

Mevcut çalışmalarda SKK işlemi için Universal freze tezgahı ile birlikte, bu işlem için hazırlanmış aparatlar kullanılmıştır.

Yapılan bu çalışmaların paralelinde gelecekte aşağıdaki çalışmaların yapılabileceği değerlendirilmiştir;

- Kaynak işleminde iş parçalarının aparat üzerinde titrememesi için daha uygun aparatlar yapılabilir ya da mevcut aparat geliştirilebilir. Çünkü, işlem esnasında nadiren de olsa bu durumla karşılaşmıştır. Bunun da kaynak dikiş kalitesini büyük ölçüde etkilediği görülmüştür.
- Levha halindeki alüminyum alaşımlarına, alüminyum esaslı kompozit malzemelere, alüminyum – çelik levhalara ve çelik levhalara uygulanabilen SKK yöntemi aynı şekilde alüminyum – bakır borulara da uygulanabilir. Bu sayede optimum kaynak parametreleri belirlenir.
- Mevcut çalışmada 6XXX serisi alüminyum boruların kaynağında tek tip kaynak takım ucu kullanılmıştır. Bununla birlikte literatür bilgilerinden faydalanarak, farklı kaynak takım uçları tasarlanılarak, en elverişli takım ucu belirlenebilir. Şayet SKK yapılması düşünülen malzeme kompozit malzeme ise aşınmanın da göz önünde bulundurulmasıyla kaynak takımı malzemesinin iyi seçilmesi gerekmektedir.
- Kaynak sonrası kaynak bitiş noktasında “kuş gözü” şeklinde tek tarafı kapalı bir delik kalmaktadır (Şekil 4.11, 12, 13, 14). Deliğin kapanması için NASA [42] bilgisayar destekli aparat geliştirmiştir. Bitiş noktasındaki bu deliğin kapanması için daha kolay uygulanabilir bir aparat geliştirilebilir.
- Şu ana kadar yapılan çalışmalarda, levha tipi malzemenin SKK işlemine ait sıcaklık dağılımı termokapılar yoluyla ya da sonlu elemanlar yoluyla hesaplanmaya çalışılmıştır. Aynı özellikte malzemeler olsa dahi, levha kaynağı ile boru kaynağı için oluşacak sıcaklık dağılımları birbirlerinden farklı olacaktır. Çünkü, levha malzemelerin yüzeyine kaynak takım omzunun alt yüzeyi tam olarak temas ederken, borularda kaynak takım omzunun alt yüzeyi tamamen temas edememektedir.
- Yapılan çalışmada kısa uzunluktaki borular kullanılmıştır. Daha uzun boruların SKK kaynak işleminde uygun bağlama aparatları geliştirilerek kullanılabilir.
- Kaynak edilmiş boruların mekanik özellikleri (çekme testleri, artık gerilme değerlerinin hesaplanması) incelenilebilir.

KAYNAKLAR

1. ODTÜ Kaynak Teknolojisi ve Araştırma Merkezi, European Welding Engineering, ODTÜ, 2002.
2. Yousefpour A., Hojjati M., Welding of thermoplastic composites Institute for aerospace research, CANADA LTR-AMTC-2002-0014, 2-20, 2002.
3. Arbegast William J. and et.al. <http://forums.sae.org/access/dispatch.cgi/stirweld>, Israel Stol, Alcoa, June 2004.
4. Attallah Moataz M., Salem Hanadi G., Friction stir welding parameters: a tool for controlling abnormal grain growth during subsequent heat treatment, Materials Science and Engineering, 2004.
5. Fonda R.W. et.al., Development of grain structure during friction stir welding, Scripta Material, 51, 243-248, 2004.
6. Boz M., Kurt A., The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical properties in friction stir welding process, Materials & Design, 25, 343-347, 2004.
7. Sato Yutaka S. et.al., FIB-assisted Tem study of an oxide array in the root of a friction stir welded aluminium alloy, Scripta Material, 50, 365-369, 2004.
8. Cabibbo M. et.al., TEM analysis of a fiction stir-welded buttjoint of Al-Si-Mg alloys, Materials Chemistry and Physics, 81, 289-292, 2003.
9. Sato Y.S. et.al., Hall-Petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys, Materials Science and Engineering A354, 298-305, 2003.
10. Song M., Kovacevic R., Thermal Modelling of friction stir welding in a moving coordinate system and its validation, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43, 605-615, 2003.
11. Rhodes C.G. et al., Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminium, Scripta Material, 36,69-75, 1997.
12. Squillace A. et.al., A comparison between FSW and TIG welding techniques: modification of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints, Journal of Materials Processing Technology,152, 97-105, 2004.
13. Sato Yutaka S. et.al., Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys, Scripta Material, 50, 1233-1236, 2004.

14. Sato Yutaka S. et.al., Post-weld formability of friction stir welded Al alloy 5052, *Materials Science and Engineering*, A369, 138-143, 2004.
15. Sutton Michael A. et.al., Banded microstructure in 2024-T351 and 2524-t351 aluminum friction stir welds Part II Mechanical characterization, *Materials Science and Engineering*, A364, 66-74, 2004.
16. Somasekharan A.C., L.E.Murr, Microstructures in friction-stir welded dissimilar magnesium alloys and magnesium alloys to 6061-T6 aluminum alloy, *Material Characterization*, 52, 49-64, 2004.
17. Sato Yutaka S. et.al., Friction stir welding of ultrafine grained Al alloy 1100 produced by accumulative roll-bonding, *Scripta Material*, 50, 57-60, 2004.
18. Liu H.J. et.al., Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 962-996, 2003.
19. Salem Hanadi G., Friction stir weld evolution of dynamically recrystallized AA 2095 weldments, *Scripta Material*, 49, 1103-1110, 2003.
20. Oertelt G., Babu S.S., David S.A., Kenik A., Effect of Thermal Cycling on Friction Stir Welds of 2195 Aluminum Alloys, *Welding Research*, 71 -79, 2001.
21. Chen Changming et.al., Wavelet transform analysis of acoustic emission in monitoring friction stir welding of 6061 aluminum, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 1383-1390, 2003.
22. Litynska L. et.al., TEM study of microstructure evolution in a friction stir-welded AlCuMgAg alloy, *Materials Chemistry and Physics*, 81, 293-295, 2003.
23. Hassan Kh.A. et.al, Stability of nugget zone grain structures in high strength Al alloy friction stir welds during solution treatment, *Acta Materialia* ,51, 1923-1936, 2003.
24. Su J.-Q. et.al., Microstructural investigation of friction stir welded 7050-T651 aluminium, *Acta Materialia*, 51, 713-729, 2003.
25. Krishnan K.N., On the formation of onion rings in friction stir welds, *Materials Science and Engineering*, A 327, 246-251, 2002.
26. Sutton M.A. et.al., Microstructural studies of friction stir welds in 2024-T3 aluminum, *Materials Science and Engineering*, A323, 160-166, 2002.
27. Pao P.S. et.al., Corrosion-fatigue crack growth in friction stir welded Al 7050, *Scripta Material*, 45, 605-612, 2001.

28. Li Ying et.al., Flow visualization and residual microstructures associated with the friction-stir welding of 2024 aluminum to 6061 aluminum, *Materials Science and Engineering*, A271, 213-223, 1999.
29. Li Ying et.al., Solid-state flow visualization in the friction-stir welding of 2024 Al to 6061 Al, *Scripta Material*, 40, 1041-1046, 1999.
30. Flores Olga Valerio et.al., Microstructural issues in a friction-stir-welded aluminum alloy, *Scripta Material*, 38, 703-708, 1998.
31. Thomas W.M., E.D. Nicholas, Friction stir welding for transportation industries, *Materials & Design*, 18, 269-273, 1997.
32. Liu G. et.al., Microstructural aspects of the friction-stir welding of 6061-T6 aluminum, *Scripta Material*, 37, 355-361, 1997.
33. Lienert T.J. et.al., Friction welding studies on Mild Steel, *Welding Research*, 1-9, 2003.
34. Sato Yutaka S. et.al., Recovery retardation in equal channel angular pressed Al-Zr alloy during friction stir welding, *Scripta Material*, 47, 869-873, 2002.
35. Jata K.V., S.L.Semiatin, Continuous Dynamic Recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys, *Scripta Material*, 43, 743-749, 2000.
36. Uzun H. et.al., Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 to X5CrNi18-10 stainless steel, *Materials & Design*, 26, 41-46, 2005.
37. Chen C.M., Kovacevic R., Joining of Al 6061 alloy to AISI 1018 steel by combined effects of fusion and solid state welding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44, 1205-1214, 2004.
38. Kimapong K., Watanabe T., Friction Stir Welding of Aluminum Alloy to Steel, *Welding Research*, 277-282, 2004.
39. Wert John A., Microstructures of friction stir weld joints between an aluminium-base metal matrix composite and a monolithic aluminium alloy, *Scripta Material*, 49, 607-612, 2003.
40. Prado R.A. et.al., Self-optimization in tool wear for friction-stir welding of Al 6061 + 20% Al₂O₃ MMC, *Materials Science and Engineering*, A349, 156-165, 2003.

41. am G., Srtnme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler, TMMOB Kaynak Teknolojisi, IV.Ulusal Kongresi 24-25 Ekim, 47-64, 2004.
42. <http://www.new-technologies.org>
43. Colligan K., Material Flow Behavior during friction stir welding of aluminum, Supplement to the welding journal, 229-237, 1999.
44. Guerra M. et.al., Flow patterns during friction stir welding, Materials Characterization, 49, 95-101, 2003.
45. <http://www.twi.co.uk>

ÖZGEÇMİŞ

Adı : Teoman
Soyadı : Eren
Doğum yeri, yılı : Kırıkkale, 1977
Baba Adı : Metin
Anne Adı : Hatice

Kırıkkale’de 1988 yılında Hürriyet İlkokulu’ndan, 1991 yılında Atatürk Orta Okulu’ndan ve 1994 yılında Kırıkkale Lisesi’nden mezun oldu. 1995 yılında Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümüne kayıt yaptırdı. Bu bölümden 2000 yılında mezun oldu. 2001 yılında 2nci Ana Bakım Merkezi K.lığı’nda Yedek Parça İmalat Bölüm Amiri olarak göreve başladı. 2003 yılında ODTÜ-KTM ve SLV München tarafından düzenlenen eğitimi tamamlayarak, Avrupa Kaynak Mühendisi (EWI) ve Uluslararası Kaynak Mühendisi (IIW) ünvanı aldı. Halen 2nci Ana Bakım Merkezi K.lığı’nda atandığı görevine Müh.Ütğm. olarak devam etmektedir.

İletişim Bilgileri:

2nci Ana Bkm.Mrk.K.lığı
38060 Kocasinan / Kayseri

İş Tel : 0 352 330 29 18
e-posta: erenteoman@hotmail.com