

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**AA7075 VE AA5754 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN SÜRTÜNME  
KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ İLE KAYNAK  
EDİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emre Deniz YALÇIN**

**HAZİRAN 2010  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**AA7075 VE AA5754 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN SÜRTÜNME**  
**KARIŞTIRMA KAYNAK YÖNTEMİ İLE KAYNAK**  
**EDİLEBİLİRLİĞİNİN İNCELENMESİ**

**Makine Müh. Emre Deniz YALÇIN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**  
**“Makine Yüksek Mühendisi”**  
**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21. 05. 2010**  
**Tezin Savunma Tarihi : 17. 06. 2010**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Tefik KÜÇÜKÖMEROĞLU**

**Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ekrem YANMAZ**

**Jüri Üyesi : Doç. Dr. Gençğa PÜRÇEK**

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Salih TERZİOĞLU**

**Trabzon 2010**

## ÖNSÖZ

Tez çalışmamın başından sonuna kadar yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, her türlü özveriye gösteren ve zamanının büyük bölümünü çalışmalarıma ayıran çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr Tefik KÜÇÜKÖMEROĞLU'na, ölçümlerde ve analizlerde bana yardımcı olan değerli arkadaşlarım Arş. Gör Onur SARAY'a ve Arş. Gör. Levent KARA'ya, beni bugünlere getiren değerli aileme saygı sevgi ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Emre Deniz YALÇIN  
Trabzon 2010

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET .....	VI
SUMMARY .....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Tanıtımı.....	1
1.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırması.....	3
1.2.1. 1XXX Serisi.....	4
1.2.2. 2XXX Serisi.....	4
1.2.3. 3XXX Serisi.....	5
1.2.4. 4XXX Serisi.....	5
1.2.5. 5XXX Serisi.....	6
1.2.6. 6XXX Serisi.....	6
1.2.7. 7XXX Serisi.....	7
1.2.8. 8XXX Serisi.....	7
1.2.9. Döküm Alüminyum Alaşımları .....	7
1.2.10. Al-Cu Alaşımları.....	8
1.2.11. Al-Cu-Si Alaşımları .....	8
1.2.12. Al-Si Alaşımları .....	9
1.2.13. Al-Mg Alaşımları.....	9
1.2.14. Al-Zn-Mg Alaşımları .....	10
1.2.15. Al-Sn Alaşımları .....	10
1.3. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri.....	10
1.3.1. Tavlama.....	11
1.3.2. Tam Tavlama .....	11
1.3.3. Kısmi Tavlama.....	12
1.3.4. Gerilim Giderme Tavlaması.....	12
1.3.5. Dökümlerin Tavllanması.....	13

1.3.6.	Çökme Yaşlanması.....	13
1.3.6.1.	Çözeltiyeye Alma Sıcaklığı .....	14
1.3.6.2.	Çözeltide Tutma Zamanı.....	14
1.3.6.3.	Su Verme (Soğutma) Hızı.....	15
1.3.6.4.	Soğutma-Yaşlandırma Arasındaki İşlemler .....	15
1.3.6.5.	Yaşlandırma İşlemi .....	15
1.4.	Alüminyum ve Alaşımlarında Isıl İşlem Gösterimi.....	16
1.5.	Sürtünme Karıştırma Kaynağı .....	18
1.6.	Sürtünme Karıştırma Kaynağının Çeşitli Malzemelere Uygulanması.....	20
1.6.1.	Bakır Alaşımları.....	20
1.6.2.	Titanyum Alaşımları .....	21
1.6.3.	Çelikler.....	21
1.6.4.	Magnezyum Alaşımları.....	21
1.6.5.	Plastikler.....	22
1.6.6.	Farklı Alaşım ve Metaller .....	22
1.7.	Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Uygulama Alanları.....	23
1.7.1.	Sürtünme Karıştırma Kaynağının En Genel Üstünlükleri ve Eksiklikleri.....	29
1.8.	Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Yapılabilen Çeşitli Birleştirme Türleri .....	30
1.9.	Kaynak Parametrelerinin SKK Yöntemine Etkisi .....	31
1.9.1.	Malzemenin Kalınlığı .....	31
1.9.2.	Karıştırıcı Uç Malzemesi ve Dizaynı.....	32
1.9.3.	Takım İlerleme Hızı ve Takım Devir Sayısı.....	33
1.10.	Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlar .....	33
1.10.1.	Üç Yivli ve Helezonik Takımlar.....	33
1.10.2.	Skew-Stir™ ve A-Skew™ Serisi Pimler (Batıcı Uçlar).....	36
1.11.	SKK Yönteminde Kullanılan Uç Malzemeleri .....	37
1.12.	Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Birleştirmenin Metalurjik Yapısı.....	37
1.13.	Alüminyum Alaşımların Kaynak Edilebilirliği.....	38
1.14.	Literatür Araştırması .....	39
1.15.	Çalışmanın Amacı.....	41
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	43
2.1.	Deney Düzenegi.....	43
2.2.	Karıştırıcı Uç.....	47
2.3.	Deney Malzemeleri .....	51

2.4.	Deneyde Kullanılan Tezgâh.....	52
2.5.	Kaynak İşlemi İçin Seçilen Kaynak Parametreleri .....	54
2.6.	Isıyı Ölçmek İçin Kullanılacak Termoelemanların (Thermocouple) Numuneler Üzerine Yerleştirilmesi ve Isı Ölçülmesi .....	55
2.7.	Mekanik Testler ve Metalurjik Muayene İçin Numunelerin Hazırlanması .....	56
2.8.	Metalografik İncelemeler .....	57
2.9.	Mikro Sertlik Ölçümleri.....	57
2.10.	Çekme Deneyleri.....	57
2.11.	Eğme Deneyi.....	58
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA .....	59
3.1.	Sıcaklık Ölçüm Sonuçları .....	59
3.2.	Görsel Muayene .....	66
3.3.	Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	71
3.4.	Çekme Deneyi Sonuçları .....	75
3.5.	Eğme Deneyi Sonuçları .....	80
3.6.	Metalografik İnceleme Sonuçları.....	83
3.8.	Kaynaklı Bölgenin Kimyasal Analizi .....	93
4.	SONUÇLAR .....	98
5.	ÖNERİLER.....	100
6.	KAYNAKLAR .....	101

ÖZGEÇMİŞ

## ÖZET

Bu çalışmada, AA 5754H22 ve AA 7075T651 alüminyum alaşımları sürtünme karıştırma kaynak tekniği (SKK) kullanılarak alın altına birleştirilmiştir. Gerçekleştirilen kaynak işlemi, karıştırıcı uç dizaynı, takım dönme hızı ve takım açısı sabit tutularak farklı ilerleme hızları ve takım baskı kuvvetleri altında gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen numuneler, mikrosertlik, metalografik, çekme ve eğme deneyleri yardımıyla incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, AA5754H22 ve AA7075T651 alüminyum alaşımlarının başarılı bir şekilde sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirildiğini göstermiştir.

Yapılan değerlendirmede artan baskı kuvvetinin birleştirilen malzemelerin sertlik ve mukavemetlerinde önemli bir değişiklik gözlenmezken kırılma mekanizmalarında belirgin farklılıklar görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Sürtünme Karıştırma Kaynağı, AA 5754H22, AA7075T651.

## **SUMMARY**

### **Investigation Of Joinability AA 7075 And AA5754 Aluminum Alloys By Friction Stir Welding Method**

In this study, AA 5754H22 and AA7075T651 aluminum alloys are joined in the butt manner by using friction stir welding process. Welding process is realized by fixing the stirring pin design, the speed of rotating tool and the angle of tool, however the different travel speeds and tool impress forces are applied. The joined samples were investigated by the methods of micro hardness, metallographic and tensile test. Results of this study indicate that AA5754H22 and AA7075T651 aluminum alloys were successfully joined by friction stir welding. In this assessment, although not much change has occurred on the values of tensile stress and hardness depending on the amount of impress force, some diversity was observed in the fraction mechanism.

**Key Words:** Friction Stir Welding, AA 5754H22, AA7075T651.



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Şekil 1. Al-Mg <sub>2</sub> Si faz denge diyagramı .....	16
Şekil 2. Kaynak şeması .....	19
Şekil 3. SKK kaynağının şematik gösterimi .....	20
Şekil 4. Japonya 'da sürtünme karıştırma kaynağının kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntem ile kaynağı yapılan Al-paneller.....	25
Şekil 5. Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi .....	26
Şekil 6. SKK kullanılarak yapılan hücumbot .....	27
Şekil 7. Ülkemizde üretiminde SKK yöntemi kullanıldığı belirtilen zırhlı personel taşıyıcı .....	28
Şekil 8. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde gerçekleştirilen birleştirmeler.....	30
Şekil 9. Pimin eğik konumu.....	31
Şekil 10. Helezonik takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri ve deniz kabuğuna olan benzerliği.....	34
Şekil 11. Helozonik takımlar .....	34
Şekil 12. Yivli takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri.....	35
Şekil 13. Helezonik ve üç yivli takımların omuz profilleri .....	35
Şekil 14. A-Skew ucunun resmi .....	36
Şekil 15. Skew-Stir metodunun çalışma prensibi .....	36
Şekil 16. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış alüminyum alaşımın mikroyapısı .....	38
Şekil 17. Tabla üst görünüş.....	44
Şekil 18. Tabla ön görünüş .....	44
Şekil 19. Hidrolik sistem üst görünüş .....	45
Şekil 20. Hidrolik sistem üst görünüş .....	45
Şekil 21. Hidrolik sistemin değişik açıdan görünüşü .....	46
Şekil 22. Deney düzeneğinin yandan görünümü hidrolik silindir detayı .....	46
Şekil 23. Deney düzeneğinin değişik açıdan görünümü ve tanımı.....	47
Şekil 24. Karıştırıcı uç malzemesin ısıtılma işlem şeması.....	48
Şekil 25. Takım malzemesinin sertlik değerinin monevişlenme sıcaklığına göre değişim grafiği.....	49
Şekil 26. İmal edilen kaynak ucunun (takım) çizimi .....	50
Şekil 27. İmal edilen takımın yandan görünümü .....	51

Şekil 28.	İmal edilen takımın üstten görünümü .....	51
Şekil 29.	Deneyde kullanılan freze tezgâhı.....	53
Şekil 30.	Kaynak yönü görüntüsü.....	53
Şekil 31.	Kaynak doğrultusu şeması.....	54
Şekil 32.	Numune üzerindeki Termoeleman yerleştirmelerinin gösterimi.....	55
Şekil 33.	Test numunelerinin kaynaklı bölgedeki yeri .....	56
Şekil 34.	Çekme numunesi teknik resmi .....	58
Şekil 35.	1000 dev/dk, 85mm/dk ve 6500N yük altında gerçekleşen deneyin sıcaklık değişim grafiği .....	60
Şekil 36.	1000 dev/dk, 85mm/dk ve 8500N yük altında gerçekleşen deneyin sıcaklık değişim grafiği .....	60
Şekil 37.	1000 dev/dk, 85mm/dk ve 10000N yük altında gerçekleşen deneyin sıcaklık değişim grafiği .....	61
Şekil 38.	1000 dev/dk, 85mm/dk ve 11500N yük altında gerçekleşen deneyin sıcaklık değişim grafiği .....	61
Şekil 39.	1000 dev/dk, 115mm/dk ve 6500N yük altında gerçekleşen deneyin sıcaklık değişim grafiği .....	62
Şekil 40.	1000 dev/dk, 115mm/dk ve 8500N yük altında gerçekleşen deneyin sıcaklık değişim grafiği .....	62
Şekil 41.	1000 dev/dk, 115mm/dk ve 10000N yük altında gerçekleşen deneyin sıcaklık değişim grafiği .....	63
Şekil 42.	1000 dev/dk, 115mm/dk ve 11500N yük altında gerçekleşen deneyin sıcaklık değişim grafiği .....	63
Şekil 43.	Artan baskı kuvvetlerinde T1 noktasında elde edilen en yüksek sıcaklık değerlerinin grafiği .....	64
Şekil 44.	Artan takım baskı kuvvetinde T2 noktasında ölçülen en yüksek sıcaklık değerinin değişimi. ....	65
Şekil 45.	Artan baskı kuvvetlerinde T3 noktasında elde edilen en yüksek sıcaklık değerinin değişimi. ....	65
Şekil 46.	1000 d/dk dönme hızında 85 mm/dk ilerleme hızında 6500 N yük altında yapılan deneyde elde edilen kaynaklı numune .....	67
Şekil 47.	1000 d/dk dönme hızında 85 mm/dk ilerleme hızında 8500 N yük altında yapılan deneyde elde edilen kaynaklı numunenin görünümü.....	67
Şekil 48.	1000 d/dk dönme hızında 85 mm/dk ilerleme hızında 10000 N yük altında yapılan deneyde elde edilen kaynaklı numunenin görünümü.....	68
Şekil 49.	1000 d/dk dönme hızında 85 mm/dk ilerleme hızında 11500 N yük altında yapılan deneyde elde edilen kaynaklı numune .....	68
Şekil 50.	1000 d/dk dönme hızında 115 mm/dk ilerleme hızında 6500 N yük altında yapılan deneyden elde edilen numune .....	69

Şekil 51.	1000 d/dk dönme hızında 115 mm/dk ilerleme hızında 8500 N yük altında yapılan deneyden elde edilen numune .....	69
Şekil 52.	1000 d/dk dönme hızında 115 mm/dk ilerleme hızında 10000 N yük altında yapılan deneyden elde edilen numune .....	70
Şekil 53.	1000 d/dk dönme hızında 115 mm/dk ilerleme hızında 11500 N yük altında yapılan deneyden elde edilen numune .....	70
Şekil 54.	Kaynaklı bölgede mikro sertlik ölçüm doğrusu .....	71
Şekil 55.	1000 dev/dk dönme hızında, 85 mm/dk ilerleme hızında ve 6500–8500–10000–11500 N yük altında yapılan deneylerin x ekseninde mikro sertlik grafiği.....	72
Şekil 56.	1000 dev/dk dönme hızında, 85 mm/dk ilerleme hızında ve 6500–8500–10000–11500 kg yük altında yapılan deneylerin y ekseninde mikro sertlik grafiği.....	72
Şekil 57.	1000 dev/dk dönme hızında, 115 mm/dk ilerleme hızında ve 6500–8500–10000–11500 N yük altında yapılan deneylerin x ekseninde mikro sertlik grafiği.....	73
Şekil 58.	1000 dev/dk dönme hızında, 115 mm/dk ilerleme hızında ve 6500–8500–10000–11500 N yük altında yapılan deneylerin y ekseninde mikro sertlik grafiği.....	73
Şekil 59.	Mikrosertlik ölçümlerine göre kaynaklı bölge mikroyapısı .....	75
Şekil 60.	Ana malzemelerin gerilme-birim uzama grafiği.....	76
Şekil 61.	Deneylerin toplu çekme dayanım grafiği .....	77
Şekil 62.	Çekme numunelerinin kaynak yüzeyinden toplu görüntüsü .....	79
Şekil 63.	Kaynak dikişi içeren çekme numunesinin kopma bölgesinin görünümü .....	80
Şekil 64.	1000 d/dk, 85 mm/dk ve 6500 N yük altında yapılan deneyden elde edilen numunenin eğme deneyi yapılmış yan görüntüsü.....	81
Şekil 65.	85 mm/dk ve 10000 N yük altında gerçekleşen deneyden elde edilen numunenin eğme deneyi kaynak dikişi görüntüsü .....	81
Şekil 66.	85 mm/dk ve 10000 N yük altında gerçekleşen deneyden elde edilen numunenin eğme deneyi kaynak yüzeyi görüntüsü.....	82
Şekil 67.	85 mm/dk ve 11500 N yük altında gerçekleşen deneyden elde edilen numunenin eğme deneyi kaynak yüzeyi görüntüsü.....	82
Şekil 68.	AA5754H22 alüminyum alaşımının metalografik içyapısı.....	83
Şekil 69.	AA7075T651 alüminyum alaşımının metalografik içyapısı .....	84
Şekil 70.	Gerçekleşen deneylerdeki kaynak dikişlerinde oluşan bölgelerin görünümü.....	85
Şekil 71.	1000 d/dk, 85 mm/dk ve 6500 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki mikroyapı.....	86
Şekil 72.	1000 d/dk , 85 mm/dk ve 8500 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapı .....	87

Şekil 73.	1000 d/dk , 85 mm/dk ve 10000 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapı .....	87
Şekil 74.	1000 d/dk , 85 mm/dk ve 11500 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapı .....	88
Şekil 75.	1000 d/dk, 115 mm/dk ve 6500 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapı .....	89
Şekil 76.	1000 d/dk, 115 mm/dk ve 8500 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapılar .....	90
Şekil 77.	1000 d/dk, 85 mm/dk ve 10000 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapılar .....	91
Şekil 78.	1000 d/dk, 115 mm/dk ve 11500 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapılar .....	92
Şekil 79.	85 mm/dk ve 6500 N yük altında gerçekleştirilen kaynağın karışma bölgesinin belirli bir kısmındaki element dağılımı .....	94
Şekil 80.	85 mm/dk ve 11500 N yük altında gerçekleştirilen kaynağın karışma bölgesinin belirli bir kısmındaki element dağılımı .....	95
Şekil 81.	115 mm/dk ve 6500 N yük altında gerçekleştirilen kaynağın karışma bölgesinin belirli bir kısmındaki element dağılımı .....	96
Şekil 82.	115 mm/dk ve 11500 N yük altında gerçekleştirilen kaynağın karışma bölgesinin belirli bir kısmındaki element dağılımı .....	97

## TABLULAR DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Tablo 1. Alaşım elementlerinin alüminyumun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi.....	1
Tablo 2. Alüminyum alaşımları için tanımlama sistemi.....	4
Tablo 3. Alüminyum döküm alaşımları ve gösterimi.....	8
Tablo 4. Bazı işlenik Al alaşımları için kullanılan tam tavlama koşulları.....	12
Tablo 5. Takım çeliğinin kimyasal bileşimi.....	47
Tablo 6. Karıştırıcı uç malzemesinin ısı genleşme tablosu.....	48
Tablo 7. AA 5754H22 Kimyasal bileşimi.....	52
Tablo 8. AA 7075T651 Kimyasal bileşimi.....	52
Tablo 9. Kaynak parametreleri tablosu.....	55
Tablo 10. Ana malzemenin mekanik özellikleri.....	76
Tablo 11. Deney numunelerinden elde edilen çekme deneyi sonuçları.....	78

## SEMBOLLER DİZİNİ

<b>SEM</b>	: Tarayıcı elektron mikroskobu
<b>SKK</b>	: Sürtünme karıştırma kaynağı
<b>ITAB</b>	: Isıdan etkilenen bölge
<b>TEB</b>	: Termomekanik etkilenen bölge
<b>DKB</b>	: Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge
<b>TEM</b>	: Geçişli elektron mikroskobu
<b>TSE</b>	: Türk standartları enstitüsü
<b>DIN</b>	: Alman standartlar enstitüsü
<b>VSD</b>	: Vickers sertlik değeri
<b>T</b>	: Mutlak sıcaklık
<b>d/dk</b>	: Takım dönme hızı devir/dakika
<b>mm/dk</b>	: Takım ilerleme hızı
<b>N</b>	: Newton
<b>OM</b>	: Optik mikroskop
<b>TWI</b>	: İngiliz Kaynak enstitüsü
<b>J</b>	: Joule
<b>EDS</b>	: Enerji dağılım spektrometresi

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Alüminyum ve Alaşımlarının Tanıtımı

Alüminyum iki genel özelliği ile tanınır. Bu özellikler hafiflik ve korozyon direncidir. Saf alüminyum aynı hacimdeki çelik, bakır veya pirincin ağırlığının yaklaşık 1/3'ü kadar olup özgül ağırlığı 2.7 Mg/m<sup>3</sup>'tür. Atmosfere, suya, tuzlu suya, yağa ve pek çok kimyasallara karşı mükemmel bir korozyon direncine sahiptir. Ayrıca alüminyumun elektriksel ve ısı iletkenliği de üstündür. Ağırlıkları göz önüne alındığında bakırdan yaklaşık iki kat daha fazla elektrik iletir. Elektrik ve elektronik endüstrisinde önemli bir özellik olan ferromanyetik olmama özelliği alüminyumda mevcuttur. Yanıcı ve patlayıcı malzemelerin yanında önemli bir özellik olan alev almama özelliği vardır. Bu metal zehirli değildir, böylece yiyecek ve içeceklerin saklanması için güvenlidir. Ayrıca bazı alüminyum alaşımlarının dayanımları yapı çeliklerinin dayanımlarından daha yüksektir.

Tablo 1. Alaşım elementlerinin alüminyumun mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine etkisi [1].

Nitelikler	Cu	Si	Mg	Zn	Ni	Co	Ti	Mn	Fe	Cr
Kopma mukavemeti	++	+	+	++	+	+	+			-
Elastiki sınır	++	+	-	+	-					
Sertlik	++		-	-	+			+	+	
Isıya dayanıklılık	++		++		+				+	
Kaynak kabiliyeti	-	++	+	-	-		+	+		+
Talaş kaldırma ile işlenebilirlik	++	-	+	+	+		++	+	++	+
Elastikiyet modülü	+	++	-	+	+	++		+	-	
Döküm kabiliyeti	+	++	-	+			+	-	-	
Süneklik	-	--	+				+		--	
Korozyon direnci	-	+	++	+				-	--	++
Anodizasyona elverişsizlik	-	+	++	+				-		

++ : çok iyi

+: iyi

-: ortanın altında

~ : zararlı

Alüminyumun endüstri alanına girişi, kurşun ve çinkoya oranla daha sonra olmuş ise de, endüstri alanındaki hızlı gelişme ve mekanik özellikleri iyi olan malzemeye ihtiyaç talebi alüminyum demir çelik alaşımlarından sonra ikinci sıraya çıkarmıştır.

Alüminyum endüstrisindeki hızlı büyüme bu metalin eşsiz özellik bileşimi atfedilmektedir. Bu özellikler alüminyumu çok yönlü yapı ve mühendislik malzemelerinden biri yapmaktadır. Alüminyum ağırlıkça hafiftir ve alaşımlan, kopma olmaksızın çelikte aynı yükü taşımaları halinde aynı kesit ve boy için çelikten daha hafiftir. Alüminyum iyi elektriksel ve ısı iletkenliğin yanında yüksek ısı ve ışık yansımaları özelliklerine de sahiptir. Pek çok hizmet şartlarında korozyon direnci oldukça iyi ve zehirsizdir. Alüminyuma döküm yöntemiyle değişik şekiller verilebilir ve iyi yüzey kalitesi verir. Alüminyumun bu üstün özellikleriyle mühendislik malzemesi olarak büyük önem kazanmıştır [1].

Alüminyumun yoğunluğu  $2,7\text{g/cm}^3$  olup çelik ( $7,83\text{ g/cm}^3$ ) ve bakır ( $8,93\text{ g/cm}^3$ ) yoğunluğuyla kıyaslandığında, yaklaşık üçte biri kadardır. Mukavemeti çelikten düşük olsa da, kesit artırılarak çeliğe eşdeğer mukavemet sağlanmaktadır. Birçok konstrüksiyonda alüminyum alaşımların kullanılması ağırlıkta düşme yaptığı için avantaj sağlamaktadır. Doğru yapılan bir yapı tasarımında alaşımsız çelik yerine alüminyum kullanmak konstrüksiyon üzerine %50 den fazla hafifleme sağlar (özellikle alaşımlama ile özgül mukavemeti arttırılmış alaşımları) [2].

Avrupa Alüminyum Birliği alüminyum üreticileri için en büyük kullanım sektörünün taşımacılık olduğunu bildirmektedir. Burada özellikle otomobiller, hava taşıtları ve gemi sektörü en önemli kullanım alanlarıdır. Bunun yanında ambalaj sektörü, taşımacılık sektörünü büyük bir gelişme hızı ile takip etmektedir [3].

Alüminyum mukavemet, güvenlik ve konfordan vazgeçmeden, boyutlan küçültmeden bir otomobil dizayn edilmesinde kullanılabilecek en önemli konstrüksiyon malzemesidir.

Alüminyum ve alaşımları otomobillerde genellikle döküm alaşımı olarak, hareket sistemi, motor bloğu kutusu gibi parçaların üretiminde kullanılırken, döküm alaşımları dışında levha, profil gibi değişik üretim teknikleri ile üretilmiş parçalar kasa ve soğutma sistemi gibi aksamalarda kullanılmaktadır [4].

Korozyon dayanıklılığı ve konstrüksiyona hafiflik kazandırdığı için otomobil, kamyon, tren, deniz taşıtı gibi nakliye araçlarında hem döküm hem de dövme alaşımlar kullanılmaktadır. Alüminyum kullanımının yaklaşık %25 'i taşıt araçlarının üretimine aittir. Taşıt araçları ne kadar hafif olursa olsun, hareket etmeleri için daha az enerjiye ihtiyaç duyulur. Böylece aracın ağırlığını azaltarak yakıt tüketimini düşürmekte, buna karşın yük kapasitesini artırmaktadır. Günümüzde yaklaşık olarak bir otomobilde 50 kg alüminyum



kullanılmaktadır. Bu sayede, yaklaşık 100 kg demir-çelik ve bakırdan tasarruf sağlanmaktadır. Yapılan hesaplar sonucunda, üretiminde alüminyum kullanılan bir otomobilin, yeterince alüminyum kullanılmamış otomobile göre ekonomik ömrü boyunca 1500 Lt daha az yakıt harcadığı tespit edilmiştir. Avrupa'da tüketilen alüminyumun yaklaşık üçte biri ulaşım sektörü tarafından kullanılmaktadır.

Bir uçağın ağırlıkça ortalama %70' i alüminyumdan oluşmaktadır. Alüminyum alaşımlarının hafifliğinin yanı sıra sağlamlığı ile de havacılık sektörünün gelişmesine büyük katkı sağlamıştır. Alüminyum-lityum alaşımları ile uçakların %15 hafiflemesi mümkündür. Alüminyum olması halinde modern hava taşımacılığında ve uzay sanayinden bahsedilemeyeceği açıktır. Alüminyum hava, su, tuzlu su, petro-kimyasal ve birçok kimyasal sistem ortamlarında yüksek korozyon dirençleri gösterir. Deniz araçlarında, alüminyum süper yapı sistemleri ile ağırlık merkezi daha aşağıya çekilmekte ve böylece araçların dengesi artırılmakta ve daha çok hacim sağlanmaktadır [3]

Diğer taraftan, alüminyum genellikle yorulma zorlanması altında yorulma dayanımının göstermez ve bu nedenle kırılma oldukça düşük gerilmede oluşur. Ergime sıcaklığının düşük olmasından dolayı, alüminyumun yüksek sıcaklıklardaki performansı iyi değildir. Alüminyum düşük sertliğinden dolayı zayıf aşınma direncine sahiptir [5].

## **1.2. Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırması**

Alüminyum alaşımları üretim metotları esas alınarak dövme ve döküm olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir. Plastik şekil verme yöntemleriyle şekillendirilen dövme alaşımlar, döküm alaşımlardan oldukça farklı mikro yapı ve bileşimlere sahiptirler. Her ana grup içindeki alaşımlar, ısıl işlem yapılabilir ve yapılamaz alaşımlar olmak üzere iki alt gruba ayrılabilirler. Isıl işlem yapılabilir alaşımlar, yaşlandırma işlemi ile sertleştirilebilirken, ısıl işlem yapılamayan alaşımlar ise katı eriyik sertleşmesi, pekleşme ve dağılım (dispersiyon) sertleştirilmesi ile mukavemetlidir. Dövme alaşımlarında dört basamaklı sayısal bir tasarım sistemi, alüminyum ve alüminyum alaşımlarını dökülmüş ve dökümhane ingotu şeklinde tanıtmada kullanılır. İlk basamak alaşım grubunu gösterir. Bir kesir işaretiyle diğerlerinden ayrılan son basamak ürünün biçimini, örneğin dökümler veya ingotu gösterir. Esas alaşım sınırlarının tanımlanması sayısal tasarımdan önce bir seri harfle gösterilir. Örneğin, Harf "x" deneysel alaşımlar için kullanılır. Bununla beraber alüminyum döküm alaşımları daha

yaygın olarak üç basamakla tanımlanır. Dövme ve döküm alüminyum alaşımları Tablo 2'de belirtilen numara sistemi ile tanımlanmaktadır [5].

Tablo 2. Alüminyum alaşımları için tanımlama sistemi [5].

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

### 1.2.1. 1XXX Serisi

% 99 veya daha yüksek saflıktaki alüminyum özellikle elektrik ve kimyasal alanda geniş bir kullanıma sahiptir. Bu çeşit alüminyum mükemmel korozyon direnci, yüksek termal ve elektriksel özellikler, düşük mekanik özellikler ile mükemmel bir işlenebilirliğe sahiptir. Deformasyon sertleşmesi ile orta derecede mukavemet artışı sağlanabilir. Bu alaşım çoğunlukla, demir ve silisyum safsızlığı içerir. Bu gruptaki alüminyum alaşımları, genelde kimyasal ekipman, reflektörler, ısı değiştirgeçleri, elektriksel iletken ve kapasitör, paketlenme folyolarının imalatında ve dekoratif amaçlı mimari uygulamalarda kullanılmaktadır [6].

### 1.2.2. 2XXX Serisi

Bu grup alüminyum alaşımlarında bakır temel alaşım elemanıdır. Optimum özellikler için bu alaşımlara çökeltme ısıl işlemi uygulanır. Çözeltiye alınmış durumda mekanik

özellikleri düşük karbonlu çeliklerinki ile aynıdır ve bazen daha yüksek olabilir. Bazı durumlarda mekanik özellikleri daha fazla arttırmak için çökelme (yaşlanma) ısıl işlemi uygulanır. Bu işlem, alaşımın sünekliğini azaltırken akma dayanımını artırır, çekme dayanımına büyük bir etkisi olmaz.

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

2XXX grubu alaşımlar özellikle yüksek mukavemet/ağırlık oranlarının gerekli olduğu parçalar ve yapılar için uygundur. Çoğunlukla araç ve uçak tekerlerinde, araçların süspansiyon parçalarında, uçak gövdelerinde ve 150°C'ye kadar olan sıcaklıklarda dayanım gerektiren parçalarda kullanılmaktadır. Bu alaşımların kaynaklanabilirliği kısıtlıdır, ancak bu gruptaki bazı alaşımlar üstün işlenebilirlik özelliğine sahiptirler [6].

### 1.2.3. 3XXX Serisi

3XXX grubunda ana alaşım elemanı mangandır. Bu alaşımlara genellikle ısıl işlem uygulanamaz fakat 1XXX grubundaki alaşımlardan yaklaşık %20 daha fazla dayanıma sahiptirler. Çünkü alüminyuma sadece sınırlı bir yüzde oranında (yaklaşık % 1.5'a kadar) mangan efektif olarak ilave edilir. Bununla birlikte, bu gruptaki üç cins alaşım (3003, 3004 ve 3105) iyi işlenebilirlik gerektiren orta mukavemet uygulamalarında genel amaçlar için kullanılırlar. Bu gruptaki alaşımlar içki kutulan, mutfak gereçleri, ısı değiştirgeçleri, depolama tankları, mobilya, anayol işaretleri, çatı ve kenar kaplamalar ve diğer mimari uygulamalarda kullanılırlar [6].

### 1.2.4. 4XXX Serisi

4XXX serisi Al alaşımlarında ana alaşım elemanı silisyumdur. Si, alüminyuma yeterli miktarlarda (% 12'ye kadar) ilave edilerek alaşımı gevrekleştirmeden ergime derecesinin azalmasına neden olur. Bu nedenle, alüminyum-silisyum alaşımları alüminyum

birleştirmede esas metalin ergime sıcaklığından daha düşük ergime aralıklarında sert lehim alaşımı olarak ve kaynak telinde kullanılırlar. Bu gruptaki alaşımların çoğuna ısı işlem uygulanamaz. Fark edilir miktarlarda Si içeren alaşımlar anodik oksitlemeden sonra koyu gri renge dönüşür. 4032 alaşımı düşük ısı genleşme katsayısı ve yüksek aşınma direncine sahiptir, bu nedenle bu alaşım dövme motor pistonlarının üretimine uygundur [6].

#### **1.2.5. 5XXX Serisi**

5XXX grubunda ana alaşım elemanı alüminyumda çok etkili ve geniş oranda kullanılan magnezyumdur. Magnezyum ana alaşım elemanı olarak veya mangan ile birlikte kullanıldığında ortaya çıkan alaşım orta-yüksek dayanımlı ısı işlem uygulanamayan alaşımdır. Magnezyum mangandan daha etkili bir sertleştiricidir. %0.8 civarında magnezyum ilavesi ile elde edilen sertlik değeri yaklaşık %1.25 mangan ilavesi ile sağlanabilir. Bu gruptaki Al alaşımları iyi kaynak özelliklerinin yanında deniz ortamında iyi bir korozyon direncine sahiptirler. Bununla birlikte, gerilmeli korozyon çatlamasını engellemek için yüksek magnezyumlu alaşımlarda müsaade edilen güvenli işlem sıcaklıklarında (yaklaşık  $\alpha$ 3.5 üzerinde magnezyum içeren alaşımlarda 65°C'nin üzerindeki işlem sıcaklıklarında) ve soğuk deformasyon miktarında belirli kısıtlamalar yapılmalıdır. Bu seri alaşımlar, mimari uygulamalarda, dekoratif ve süsleme amaçlı uygulamalarda, gemilerde ve ev aletlerinde kullanılmaktadırlar [6].

#### **1.2.6. 6XXX Serisi**

6XXX serisi alaşımlar, içyapılarında magnezyum silikat ( $Mg_2Si$ ) oluşturacak oranlarda Mg ve Si içeren ısı işlem uygulanabilen alaşımlardır. 2XXX ve 7XXX serisi alaşımlar kadar dayanıklı olmasalar da, 6XXX serisi alaşımlar şekillendirilebilen, kaynaklanabilir, işlenebilir ve korozyon dirençli orta dayanımlı alaşımlardır. Isıl işlem uygulanabilen bu gruptaki alaşımlara çözeltiyeye alma işleminden sonra yapay yaşlandırma işlemi (T6 işlemi) uygulandığında alaşımların dayanımları önemli ölçüde artırılabilir.

Mimari uygulamalar, ulaşım endüstrisi, köprüler ve kaynaklı yapılar bu alaşımların uygulama alanlarıdır [6].

6XXX serisi Al alaşımları genellikle ekstrüzyon edilmiş halde kullanılırlar. Bileşimlerinde bulunan Si ve Mg alaşım elementleri, kısmen  $\alpha$  -Al matrikste çözünmüş olarak ve kısmen intermetalik faz olarak bulunurlar. Alaşımın bileşimine ve katılaşma koşullarına bağlı olarak katılaşma esnasında değişik intermetalik fazlar oluşabilir. Bütün ticari alaşımlarda Fe, empurite olarak bulunur ve katılaşma esnasında Al-Fe ve Al-Fe-Si gibi intermetalik fazları oluşturur.  $\alpha$  -Al matrikste veya Al-Fe-Si intermetalik fazında Si, Mg ile birleşerek katılaşma işleminin ileriki safhasında  $Mg_2Si$  partiküllerini oluşturur. Alaşımın mekanik özelliklerinin belirlenmesinde intermetalik partiküllerin çeşidi, boyutu, morfolojisi ve dağılımı önemli bir yer tutar [6].

### **1.2.7. 7XXX Serisi**

% 1-8 arasındaki çinko 7XXX grubundaki Al alaşımlarında önemli bir alaşım elemanıdır. Magnezyum ile beraber kullanıldığında yüksek dayanımlı ısıl işlem uygulanabilen alaşımlar elde edilir. Çoğunlukla bakır ve krom gibi diğer elementler de küçük miktarlarda ilave edilir. 7XXX alaşımları uçak gövde yapılarında, yüksek gerilme altında çalışan parçalarda kullanılmaktadır [6].

### **1.2.8. 8XXX Serisi**

Alüminyum ve silisyum içeren alüminyum alaşımlarıdır. Yaşlandırılabilirler.

### **1.2.9. Döküm Alüminyum Alaşımları**

Alüminyum döküm alaşımları, dayanım arttırıcı elementlerin yanında, yeterli akışkanlık sağlayarak dökümlerde oluşan çekme boşluklarını beslemek için gereken miktarda katılarak ötektik oluşturan ve akıcılığı arttıran elementleri (çoğunlukla silisyum) de içermelidirler. Ötektik yapıcı elementlerin gerekli miktarları döküm işlemindeki parçaya bağlıdır. Kum dökümde alaşımlar genellikle metal kalıba dökümden daha az ötektiğe sahiptirler. Çünkü kum kalıplar sıcaklık kaybını tolere edebilir fakat deformasyon göstermeyen metal kalıplarda ise bu sıcaklık kaybı büyük çatlamalara neden olur. Kullanılan döküm yöntemindeki soğuma hızı büyük ölçüde alaşım ve empurite elementlerinin dağılımını etkiler. Örneğin, alüminyum alaşımlarının basınçlı dökümünde

oldukça yüksek soğuma hızı dayanımı arttırıcı ve ötektik yapı oluşturan bileşenlerin ince taneli dağılımına sebep olurlar, bu etki yüksek safsızlığa rağmen dökülebilirliği iyidir.

Döküm yöntemi ile üretilen çok sayıda alüminyum alaşımı vardır. Bu alaşımların içerdikleri ana alaşım elementleri ve standart gösterimi Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Alüminyum döküm alaşımları ve gösterimi [6].

<b>Alaşım</b>	<b>Gösterimi</b>
Al (en az % 99 Al)	1XX.X
Al-Cu	2XX.X
Al-Si (Cu ve/veya Mg'lu)	3XX.X
Al-Si	4XX.X
Al-Mg	5XX.X
Kullanılmayan seri	6XX.X
Al-Zn	7XX.X
Al-Sn	8XX.X

#### 1.2.10. Al-Cu Alaşımları

Bu alaşımlar, % 4-5 arasında Cu, demir ve silisyum empuritelere ve bazen de az miktarlarda magnezyum içeren ısıtım uygulanabilen alaşımlardır. Özellikle % 0.15'ten daha az demir içeren ingotlarda üretildiklerinde oldukça yüksek dayanım ve sünekliklere ulaşabilirler. Az miktarlarda mangan ilave edildiğinde, demir ve silisyum ile birleşerek bu elementlerin gevrekleştirici etkisini azaltır. Bununla beraber, bu alaşımların dökülebilirliği zayıftır ve çok dikkatli yolluk ve besleyici sistemi gerektirirler. Bu alaşımlar çoğunlukla kum döküm ile üretilirler, metal kalıplara döküldüklerinde akışkanlığı sağlamak için silisyum ilave edilmelidir. Bu silisyum ilavesi sünekliği önemli ölçüde azaltır.

Önceleri çok kullanılan alüminyum döküm alaşımlarından olan yüksek bakır içerikli (% 7-8) Al-Cu alaşımlarının yerini Al-Cu-Si alaşımları almıştır. % 9-11 arasında Cu içeren Al-Cu alaşımları aşınma dirençli ve yüksek sıcaklığa dayanımlı olduklarından otomobil pistonları ve silindir bloklarında kullanılırlar [6] .

#### 1.2.11. Al-Cu-Si Alaşımları

En çok kullanılan döküm alaşımları Cu ve Si elementlerini birlikte içeren alaşımlardır. Her iki alaşımın da miktarları geniş oranda değişebilir, bazı alaşımlarda Cu

yoğunlukta, bazılarında ise Si yoğunlukta olabilir. Bu alaşımlarda, Cu dayanımı, Si ise dökülebilirliği artırır. Karmaşık şekilli parçaların dökümünde daha yüksek Si alaşımları kullanılır.

% 3-5'ten daha fazla bakır içeren Al-Cu-Si alaşımlarına ısıtma işlemi uygulanabilir. Ancak ısıtma işlemi çoğunlukla magnezyumu da içeren alaşımlara uygulanır, çünkü Mg alaşımının ısıtma işlemine verdiği tepkiyi artırır. Mg içermeyen alaşımların ısıtma işlemine cevabı çok yavaş olacağından yapılan ısıtma işlemi ekonomik olmaz. % 10'dan daha fazla Si içeren alaşımlar düşük ısıtma genleşmeye sahiptirler ve bu alaşımlar yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur. Alaşım içindeki Si miktarı % 12-13'ü geçerse yapıda birincil silisyum kristalleri bulunur ve eğer bunlar düzgün dağılmışlarsa alaşıma mükemmel aşınma direnci sağlarlar. Otomobillerin motor blokları ve pistonlar bu alaşımların en önemli kullanım alanlarıdır [6].

#### **1.2.12. Al-Si Alaşımları**

Cu ilavesi içermeyen Al-Si alaşımları dökülebilirlik ve korozyon direnci gerekli olduğunda kullanılırlar. Eğer yüksek dayanım gerekli ise magnezyum ilave edilerek alaşım ısıtma işlemi uygulanabilir duruma getirilir. % 2 kadar düşük Si'li alaşımlar dökümde kullanılır, fakat bu alaşımlarda Si miktarı çoğunlukla % 5 ile % 13 arasındadır. Özellikle yüksek Si'li alaşımların dayanım ve süneklikleri modifikasyon ile önemli oranda değiştirilebilir.

Hiperötektik alaşımların kum ve sürekli kalıp dökümlerinde yapı proötektik silisyumun modifikasyonu ile inceltir. Burada fosfor ilaveleri en etkilidir. Fosfor modifikasyonu sadece kalın kesitli basınçlı dökümde gereklidir [6].

#### **1.2.13. Al-Mg Alaşımları**

Al-Mg döküm alaşımlarının en önemli avantajı özellikle deniz suyuna ve deniz atmosferine karşı yüksek korozyon direncine sahip olmalarıdır. En iyi korozyon direnci düşük safsızlık miktarı gerektirir, bu nedenle alaşımlar yüksek kalitede metallerden hazırlanmalı ve dökümhanede büyük bir dikkatle kullanılmalıdır. Al-Mg alaşımlarının

nispeten düşük döküm kabiliyeti ve magnezyumun oksitlenmeye eğilimi kullanım zorluklarını ve maliyeti artırır [6].

#### **1.2.14. Al-Zn-Mg Alaşımları**

Bu alaşımlar, dökümden sonra oda sıcaklığında 20-30 gün doğal yaşlandırıldıklarında maksimum dayanımlarını kazanırlar. Bu dayanım artırıcı işlem fırında yapılan yaşlandırma (yapay yaşlandırma) işlemi ile hızlandırılabilir.

Diğer alaşımlarda (Al-Cu, Al-Si-Mg) gerekli olan yüksek sıcaklıktaki çözeltiye alma ısıl işlemi ve şiddetli su verme çoğu Al-Zn-Mg döküm alaşımlarında optimum özellikler için gerekli değildir. Bununla beraber, bu alaşımlarda Mg-Zn fazının mikro segregasyonu oluşabilir. Bu durum, hızlı katılaşmanın daha iyi özellikler sağladığı olarak bilinen kuralı tersine çevirir. Al-Zn-Mg döküm alaşımlarında ince veya hızlı soğutulmuş kesitlerin dayanımının kalın veya yavaş soğutulmuş kesitlerin dayanımından daha düşük olduğunda; zayıf kesitlere çözeltiye alma, su verme ve doğal veya yapay yaşlandırma işlemleri ile gerekli dayanım kazandırılabilir. Al-Zn-Mg alaşımlarının dökülebilirliği zayıftır, fakat bazı gerilmeli korozyon şüphesine rağmen genelde korozyon dirençleri iyidir [6].

#### **1.2.15. Al-Sn Alaşımları**

% 6 Sn içeren bu alaşımların küçük miktarlarda bakır ve nikel ile alaşımlandırılarak dayanımları artırılır. Kalayın sağladığı mükemmel yağlama özelliğinden dolayı bu alaşımlar döküm yataklarında kullanılırlar. Al-Sn alaşımının yatak performansı büyük oranda döküm metodu ile etkilenir. En iyi yatak özellikleri elde etmede, kalayın dentrit yapı içinde ince dağılımı için küçük dentrit içi boşluklar gerekir. Bu küçük boşluklar, sadece soğumanın hızlı olduğu döküm yöntemleri ile elde edilebilir [6].

### **1.3. Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri**

Al alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler çoğunlukla çökeltme ile sertleşebilir işlenik ve döküm alaşımlarının sertlik ve dayanımını arttırmak için uygulanan özel işlemlerle sınırlıdır. Isıtma ve soğutma işlemleri ile önemli oranda dayanım kazanamayan Al



alaşımına ısıtma işlemi uygulanamayan alaşımlar, bu işlemlerle önemli ölçüde dayanımı artıranlara ise ısıtma işlemi uygulanabilen alüminyum alaşımları denmektedir. Dayanımı azaltmak ve sünekliği arttırmak için yapılan ısıtma işlemi (tavlama) her iki gruptaki alüminyum alaşımlarına uygulanabilir. Metalurjik tepkiler alaşımın çeşidine ve istenen yumuşama derecesine göre değişebilir [1].

### **1.3.1. Tavlama**

Isıtma işlemi uygulanabilen ve uygulanamayan alüminyum alaşımlarında soğuk deformasyonun etkisini ortadan kaldırmak amacıyla 300°C-450°C sıcaklık aralığında tavlama işlemi yapılır. Malzemenin yumuşama derecesi öncelikle tavlama sıcaklığına bağlıdır. Verilen bir malzemenin yumuşaması için gerekli zaman; düşük tavlama sıcaklıklarında saatlerden, yüksek sıcaklıklarda dakikalara kadar değişebilir. Tel gibi çok hızlı ısıtılabilen ve soğutulabilen ürünler sadece birkaç dakika sürebilen toplam ısıtma ve soğutma zamanı gerektiren sürekli işlemlerle tavlınırlar.

Alüminyum alaşımlarına uygulanan tavlama işlemleri hedeflenen amaca göre değişik çeşitlerde olabilir. Tavlama süresi ve sıcaklığı malzemenin ilk içyapısı ve ısıtma işlemine göre değiştiği gibi alaşımın çeşidine göre de değişir [6].

### **1.3.2. Tam Tavlama**

Isıtma işlemi uygulanabilen ve uygulanamayan işlenik alaşımların en yumuşak, sünek ve işlenebilir durumda elde edilebilmesi için tam tavlama işlemi uygulanır ("O" temperi). Bu ısıtma işlemine tabi olan malzeme yeniden kristalleşir. Isıtma işlemi uygulanabilen alaşımlarda, çözelti elementlerinin alüminyum ile birleşerek oluşturduğu fazlar tam tavlama ile kararlı duruma geçmek için yeterli oranda tamamen çökelirler ve doğal yaşlanma sertleşmesini engellerler. Bazı işlenik alüminyum alaşımları için kullanılan tam tavlama koşulları Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Bazı işlenik Al alaşımları için kullanılan tam tavlama koşulları [6].

Alaşım	Tavlama Sıcaklığı (°C)	Tavlama Zamanı (saat)
2014	415	2-3
2024	415	2-3
6061	415	2-3
6063	415	2-3
7005	345	2-3
7075	415	2-3

### 1.3.3. Kısmi Tavlama

Bu tavlama, soğuk işlenmiş ısıtıl işlem uygulanamayan işlenik alaşımlarda mekanik özelliklerin soğuk işlenmiş (H18 temperi) ve tam tavllanmış (O temperi) şartlarda elde edilen özellikler arasında elde edilmesi için yapılır. Kısmi tavlama işlemine aynı zamanda toparlanma tavlama veya temper tavlama da denilebilir. Mekanik özellikler bakımından orta seviyede olan kısmi tavllanmış malzeme H2 temper işareti ile tanımlanır.

Kısmi tavlama için kullanılan sıcaklıklar rekristalizasyon sıcaklığının altındadır. Tavlama sıcaklığına bağlı olarak, gerilim gevşemesinden, dislokasyon yoğunluğundaki alt yapı değişikliklerinden ve dislokasyonların yeniden düzenlenmesinden (poliganizasyon) veya kısmi rekristallenmeden dolayı malzeme kısmi bir yumuşama gözlenir. Kısmi tavlama işlemi (H2 temperi) uygulanmış bir alaşımın eğilebilirliği ve şekil alabilirliği genellikle son olarak soğuk işlem görmüş (H1 temperi) ve eşit dayanıma sahip aynı alaşımın bu özelliklerinden önemli oranda yüksektir. H2 ısıtıl işleminde uniform ve uygun mekanik özellikleri için tavlama sıcaklığının sıkı bir kontrolü gereklidir [1].

### 1.3.4. Gerilim Giderme Tavlama

Bu tavlama işlemi ısıtıl işlem uygulanabilen işlenik alaşımlarda sadece deformasyon sertleşmesinden meydana gelen etkileri uzaklaştırmak için yapıldığından gerilim giderme tavlama olarak ifade edilmektedir. Bu işlemde tavlama sıcaklığı 345°C'ye kadar olabilir. Tavlama işleminin sonucunda sadece toparlanma, kısmi rekristalizasyon veya tamamen rekristalizasyon da meydana gelebilir. Gerilim giderme tavlama bazı alaşımları tamamen

rekristalize edebilmesine rağmen, tam tavlamanın yaptığı gibi belirli ısı işlem uygulanabilen alaşımları kararlı hale getiremez. Bu alaşımların tam tavlama için genellikle daha yüksek sıcaklıklar, düşük bir sıcaklığa kontrollü soğutma ve düşük sıcaklıkta ilave tutma süresi gerekir [6].

### 1.3.5. Dökümlerin Tavlama

Bu işlem, 315-345°C arasındaki sıcaklıklarda 2 ila 4 saat arasında yapılır. İşlem sonundaki döküm halinde artık gerilmelerden tamamen arınmış ve katı çözümlerde çözünen zenginleşmesi ile oluşan fazların çökelmesi bir yapı elde edilir. Böyle tavlama yüksek sıcaklıklardaki çalışma şartlarında maksimum boyutsal kararlılık sağlarlar [6].

### 1.3.6. Çökme Yaşama

İşlenik (dövme) ve döküm alaşımlarının dayanım ve sertliklerini artırma işlemi çökme sertleşmesi mekanizması ile olur. Çökme ile sertleşen alaşım sistemleri denge diyagramlarında azalan sıcaklıkla azalan katı eriyebilirlik eğrisine (solvüs eğrisi) sahiptirler. Böylece, alaşım solvüsün üzerindeki bir sıcaklıktan soğutulduğunda 2. faz partikülleri katı hal çökmesi ile oluşurlar. Bu şart birçok ikili Al sistemi tarafından karşılanmasına rağmen, çoğu pek az çökme sertleşmesi gösterir ve ısı işlem uygulanamaz olarak gruplandırılırlar. Örneğin; Al-Si ve Al-Mg alaşımları çökme sertleşmesi sonucunda mekanik özelliklerinde nispeten önemsiz değişiklikler gösterir. Buna karşılık Al-Cu alaşım sisteminde özelliklerde büyük değişiklikler gözlenir.

Al-Cu gibi ısı işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarında, çökme işleminin ilk kademesi oda sıcaklığında meydana gelir, buna “doğal yaşama” denir. Çökme işlemi, alaşımı yüksek sıcaklıklara ısıtmak suretiyle hızlandırılır, buna “yapay yaşama” denir. Yapay yaşama ile maksimum dayanım ve sertlik elde edilir. Eğer alaşım çok yüksek yaşlandırma sıcaklığında çok uzun süre tutulursa alaşımın dayanım ve sertlik değeri düşer, bu olaya “aşırı yaşama” denir.

Çökme sertleşmesi esnasında oluşan içyapısal değişimler, ışık mikroskobu ile incelenemeyecek kadar küçük çökme partikülleri içerir. Belirli durumlarda, çökme metalografik numunelerin dağlanması ile ortaya çıkarılabilirler. Alüminyum alaşımlarında

çözeltiye alınmış ve su verilmiş durumda değişik yönlenmiş taneler arasındaki renk farkı; özellikle 2XXX işlenik alaşımlarında ve 2XX.X döküm alaşımlarında, nispeten yüksektir. Bu renk farkı çökeltme ısı işlemi ile dikkate değer bir şekilde azalır. Bununla beraber, çökelti partiküllerinin incelenmesi genellikle sadece elektron mikroskobu ile mümkündür.

2XXX, 6XXX ve 7XXX serisi işlenik alaşımlar ve 2XX.X, 3XX.X ve 7XX.X serisi döküm alaşımlarının sertlik ve dayanımları çökeltme sertleşmesi uygulanarak önemli oranda arttırılır. Bu alaşımların bazıları dayanımı arttıran alaşım elemanı olarak sadece bakır veya bakır ve silisyumu birlikte içerirler. Bununla birlikte, ısı işlemi uygulanabilen çoğu alaşımlar magnezyum ile birlikte bakır, silisyum ve çinko elementlerinden bir veya birkaçını içerirler. Magnezyum, bakır, silisyum ve çinko ile birleşerek kompleks bileşikler oluşturur. Bu çökeltmeler, basit  $CuAl_2$  ve  $ZnAl$  bileşiklerinden daha etkili ve daha hızlıdır.

Çökeltme sertleşmesi ısı işlemi sonucunda elde edilen mekanik özellikler uygulanan çözeltiye alma sıcaklığına, bu sıcaklıkta tutma süresine, soğutma hızına, yaşlandırma sıcaklığına ve zamanına bağlı olarak değişir [6].

### 1.3.6.1. Çözeltiye Alma Sıcaklığı

Çözeltiye alma işleminin amacı, alaşım içindeki sertleştirici elementleri katı eriyikte yüksek oranda çözündürmek ve bu sayede neredeyse homojen bir katı çözelti elde etmektir. Sıcaklık ile birlikte hem eriyebilirlik (çözünübilirlik) hem de difüzyon hızı arttığından, çoğunlukla ergimenin olmadığı en yüksek sıcaklık çözeltiye alma sıcaklığı olarak uygulanır.

Alaşıma uygun çözeltiye alma sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta çözeltiye alma işlemi uygulandığında, çözünme işlemi tamamlanamaz ve malzemenin dayanımı beklenildiğinden daha düşük elde edilir. Aşırı yüksek çözeltiye alma sıcaklığında ise içyapıda aşırı ısınma sonucu ötektik ergime meydana gelir, malzemenin dayanımı, sünekliği ve kırılma tokluğu düşebilir [6].

### 1.3.6.2. Çözeltide Tutma Zamanı

Çözelti sıcaklığında uygun tutma zamanı çözünmemiş veya çökelmiş faz bileşenlerinin yeterli miktarda çözünmesi ve katı eriyik homojenliğinin sağlanması için

gereklidir. Bu zaman, ince levhalar için birkaç dakikadan kalın parçalarda 20 saate kadar değişebilir. Tutma zamanı ısıtma işlemi göreceğ malzemenin kesit kalınlığı ile artar [6].

### **1.3.6.3. Su Verme (Soğutma) Hızı**

Mekanik özellikler ve korozyon direnci için zararlı olan çökelme çeşidinden kaçınmak için, çözeltiye alma işlemi esnasında oluşan katı çözelti oda sıcaklığında aşırı doymuş bir çözelti oluşturmak için hızla soğutulmalıdır. Bu durum çökelme sertleşmesi için en uygun koşuldur. Çoğunlukla soğutma işlemi soğuk suya hızla daldırılarak yapılır. Hem ince hem de kalın kesitli karmaşık şekilli parçalar genellikle daha yavaş soğutan orta derecede bir soğutma ortamında soğutulurlar. Bu ortam, sıcak su (65-80°C), kaynayan su, sulu çözelti veya diğer bazı akışkan ortamlar olabilir. Maksimum boyutsal kararlılık için bazı dövme parçaları ve dökümler havada soğutulurlar. Böyle durumlarda çökelti ile sertleşme kısıtlı olur fakat sertlik ve dayanım uygulama için yeterli olabilir. Ayrı bir çözeltiye alma işlemi uygulanmayan ekstrüzyon ürünleri çoğunlukla havada soğutulurlar. Özellikle 6063 gibi alaşımlar havada soğutma için uygundur ve bu alaşımların mekanik özellikleri düşük soğutma hızı ile büyük oranda etkilenmezler [6].

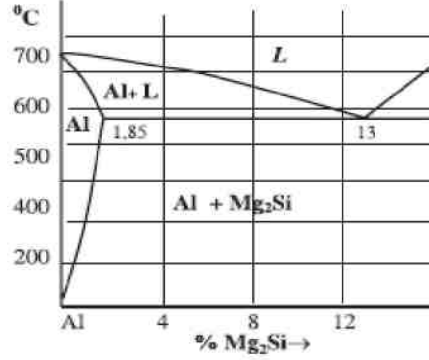
### **1.3.6.4. Soğutma-Yaşlandırma Arasındaki İşlemler**

Çoğu ısıtma işlemi uygulanabilen Al alaşımları soğutma işleminden hemen sonra neredeyse tavlama şartlarındaki kadar sünekler. Bu nedenle, levhaların şekillendirilmesi ve ekstrüzyon germe işlemleri sıklıkla soğutma işleminden sonra yapılır. Doğal yaşlanma malzemenin dayanımını, şekillendirmeye ve germeye karşı dayanımı arttırdığından, bu işlemler mümkün olduğunca soğutma işleminden hemen sonra yapılmalıdır [1].

### **1.3.6.5. Yaşlandırma İşlemi**

T5 ve T10 temperleri arasındaki temperlerde malzeme üretmek için oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda çökelme sertleştirme ısı işlemi uygulanır. Çökelme ısıtma işlemi uygulanan alaşımda çökelen partiküllerin şekil, boyut, dağılım ve miktarı yaşlandırma sıcaklığına, yaşlandırma zamanına ve malzemenin iç yapısına göre değişir [1].

Gerek çözeltiliye alma ve gerekse yaşlandırma işlemlerinde sıcaklığın çok iyi kontrol edilmesi gerekir. 6063 Al alaşımına ait çözünürlük-sıcaklık ilişkisi Al-Mg<sub>2</sub>Si faz denge diyagramı ile açıklanabilir. Bu diyagram Şekil 1’de verilmiştir. Solidüs eğrisinin altındaki sıcaklıklarda, denge diyagramında iki katı faz bulunmaktadır. Bunlar; Al katı çözeltilisi ve Mg<sub>2</sub>Si intermetalik bileşiğidir [7].



Şekil 1. Al-Mg<sub>2</sub>Si faz denge diyagramı [7].

Çözeltiliye alma ısıl işleminden sonra hızla soğutulan alaşım oda sıcaklığında aşırı doymuş katı bir çözelti halindedir. Bu alaşımın oda sıcaklığında belli bir süre bekletilmesi ile katı çözeltilide çökeltirler (2. faz) meydana gelirse, bu olaya doğal yaşlanma denir. Çözeltiliye alınmış alaşım oda sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılıp, bu sıcaklıkta belli bir müddet bekletilirse çökeltme olayı hızlanır ve doğal yaşlanmaya göre malzemenin dayanımı daha fazla artar, sünekliği azalır. Bu işleme de yapay yaşlandırma denir. 6000 serisi alaşımlar için yaşlandırma sıcaklıkları genellikle 160-200°C arasındadır [7].

#### 1.4. Alüminyum ve Alaşımlarında Isıl İşlem Gösterimi [1,6]

Al ve alaşımları için geliştirilen temper gösterim sistemi malzemeye uygulanan mekanik veya termal işlemlere dayanılarak yapılan ifade şeklidir. Temel temper tasarımları tekli büyük harflerden oluşur. Ana temperlerin pek çok alt işlemi temper harfini takiben bir veya daha fazla basamakta rakamla ifade edilir. Temel temper işlemleri ve açıklamaları aşağıda verilmiştir:

F: Üretildiği gibi. Pekleşme üzerine kontrol yok mekanik özellikler sınırlaması yok.

O: Tavlanmış demektir. İşlenik alaşımlarda en düşük dayanım elde etmek için, döküm alaşımlarında sünekliği ve boyutsal kararlılığı arttırmak için uygulanır.

H: Deformasyonla sertleşmiş anlamındadır. Sadece işlenik Al alaşımları için kullanılır. Deformasyon sertleşmesi ile mukavemet kazanan ürünler için kullanılır. Dayanımda bir miktar azalma sağlamak için ilave bir ısıtma işlemi uygulanabilir.

W: Çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmış anlamındadır. Sadece çözeltiye alma işleminden sonra oda sıcaklığında doğal yaşlanan alaşımlara uygulanan kararsız bir ısıtma işlemidir. Bu gösterim sadece doğal yaşlanma zamanı; örneğin W /2 saat gibi olduğunda geçerlidir.

T F, O veya H: Temperlerinden daha kararlı bir temperdir. Kararlı yapılar elde etmek için deformasyon sertleşmeli veya sertleşmesiz bir ısıtma işlemidir. "T" harfini takip eden 1'den 10'a kadar olan sayılar özel bir işlemi ifade ederler.

T1: Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden soğutulmuş ve doğal yaşlanma ile kararlı bir duruma getirilmiş anlamına gelmektedir. Döküm veya ekstrüzyon gibi yüksek sıcaklıkta şekillendirme işleminden sonra soğuk deforme edilmeyen ürünler için kullanılır. Oda sıcaklığındaki yaşlanma ile mekanik özellikler dengelenir.

T2: Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden soğutulmuş, soğuk işlem görmüş ve doğal yaşlandırma ile kararlı bir duruma gelmiş demektir. Haddeleme veya ekstrüzyon gibi bir sıcak şekillendirme işleminden soğutulan ürünlere özellikle dayanımlarını arttırmak için soğuk işlem (deformasyon) uygulanır. Oda sıcaklığında yapılan doğal yaşlandırma işlemi ile de mekanik özellikler dengelenir.

T3: Sırasıyla çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırılarak kararlı bir duruma getirilmiş anlamına gelmektedir. Çözeltiye alma işleminden sonra özellikle dayanım arttırmak için soğuk işlem uygulanır ve oda sıcaklığında doğal yaşlandırma ile mekanik özellikler dengelenir.

T4: Çözeltiye alma işleminden sonra doğal yaşlandırma işlemi uygulanmış ve kararlı bir yapı sağlanmış demektir. Çözeltiye alma işleminden sonra soğuk işlem uygulanmaz ve mekanik özellikler doğal yaşlanma ile dengelenir.

T5: Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış anlamına gelmektedir. Döküm veya ekstrüzyon gibi yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden sonra soğuk işlem uygulanmaz. Mekanik özellikler ve boyutsal kararlılık veya her ikisi de çökelme ısıtma işlemi ile iyileştirilir.

T6: Çözeltiyeye alma ve ardından yapay yaşlandırma işlemini tanımlar. Çözeltiyeye alma işleminden sonra soğuk işlem uygulanmaz. Mekanik özellikler veya boyutsal kararlılık çökeltme işlemi ile iyileştirilir.

T7: Çözeltiyeye alma ısı işlemi takiben uzun süre çökeltme işlemi uygulanarak aşırı yaşlanmanın oluştuğunu ifade eder. Bu ısı işlemle maksimum dayanım değerlerinin altında dayanım elde edilir, fakat gerilmeli korozyon çatlama direnci gibi bazı özellikler iyileşir.

T8: Sırasıyla çözeltiyeye alma ısı işlemi, soğuk işlem ve yapay yaşlandırma işlemlerini ifade eder.

T9: Çözündürme ısı işleminden geçilir, yapay yaşlanma yapılır ve soğuk işlemden geçilir.

T10: Sıcak işlemenden soğutulur, soğuk işlemden geçilir ve yapay olarak yaşlandırılır.

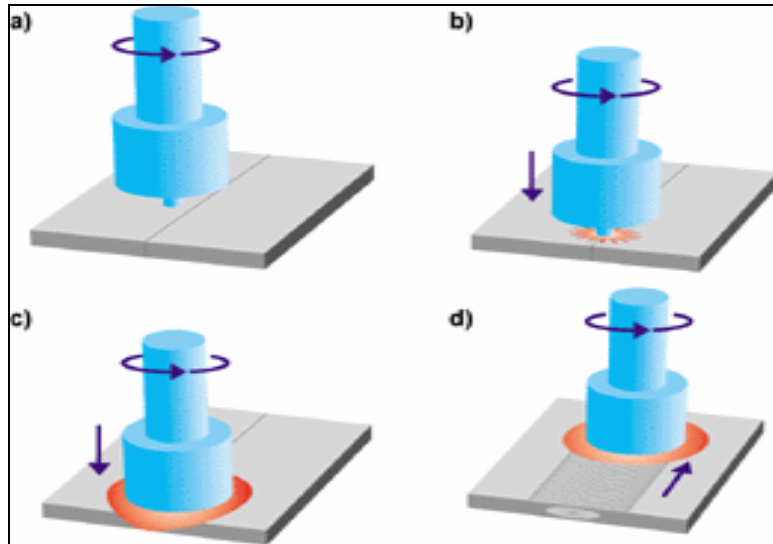
### **1.5. Sürtünme Karıştırma Kaynağı**

Son yıllarda geliştirilen sürtünme kaynağının değişik bir şekli olan bir katı hal kaynak yöntemi ile alüminyum alaşımı levhaların alın kaynağında sıvı hal kaynak metodlarından çok daha iyi sonuçlar alınmıştır. Bu yöntemin adı, sürtünme-karıştırma kaynağıdır (friction stir welding). Bu yöntemde, maliyet artırıcı bir faktör olan elektrot ve koruyucu gaz kullanımı söz konusu değildir. İş kazalarına yol açabilecek ark oluşumu, radyasyon, zehirli gaz çıkışı veya insan gözüne zararlı lazer ışını gibi olumsuz hususlar bu yöntemde mevcut olmadığı için temiz ve çevreci bir kaynak yöntemidir. Ayrıca, toplam ısı girdisinin düşük olduğu bir katı hal kaynak yöntemi olduğundan ergitme kaynaklarında karşılaşılan çatlak ve porozite oluşumu söz konusu değildir. Alaşımının tüm kaynak yöntemlerinde karşılaşılan kaynak bölgesindeki mukavemet kaybı bu yöntemde düşük ısı girdisinden dolayı daha düşük seviyelerdedir [8].

İşlem, kaynak yapılacak parçadan daha sert bir malzemedan üretilmiş sürtünme aparatının dönen ucu ile kaynaklanacak parçaların birleşme bölgesinde ısı meydana getirilmesi prensibine dayanır. Karıştırıcı uç, daha geniş çaplı bir metal gövdeye bağlı, daha küçük çaplı bir sonda olarak şekillenmiştir. Karıştırıcı uç birleşme bölgesi içine daldırıldığında geniş çaplı omuz diye tarif edilen metal kısım birleştirilecek yüzeylere önce bir temas yapar. Karıştırıcı ucun dalma derinliği kaynak nüfuziyeti olarak da söylenebilir.

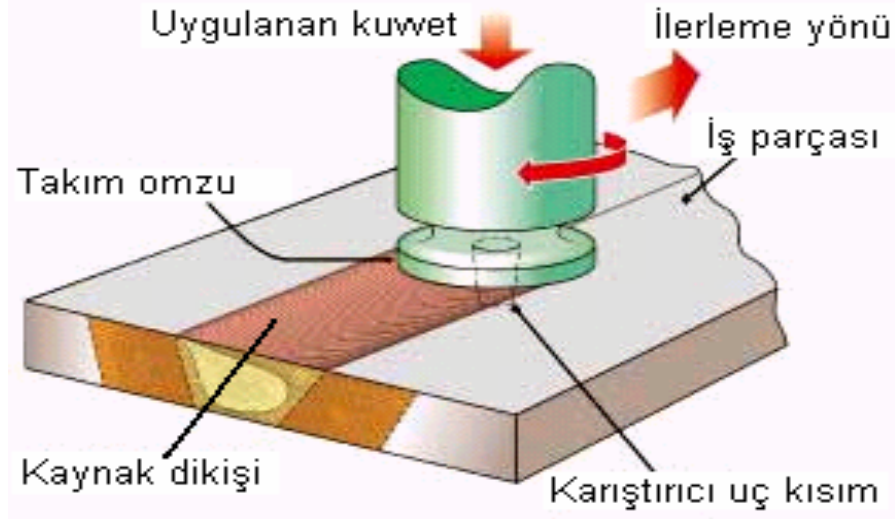


Omzun malzemeye teması kaynak bölgesine ilave bir ısı sağlamanın yanı sıra, yumuşayan bölgeye karıştırıcı ucun kesik koni şeklindeki ucu daldırılır. Isıl olarak yumuşayan metal karıştırıcı uca doğru giderek daralan ancak üst yüzeyde omuz ile temas eden daha geniş bir görünüm arz eder. Karıştırıcı uçtan omuza kadar olan bölgedeki kombine sürtünme ısı, gömülmüş olan karıştırıcının çevresi ile malzeme üst yüzeyi ve omuzun temas ettiği temas yüzeyinde yumuşamış bir metal oluşturur. Karıştırıcı uç çevresinde malzeme akışı, karıştırıcı uç arkasında ise malzeme ile dönen uç arasında izafi bir dönüş meydana gelmektedir. Sürtünme karıştırma kaynağı, kendi kendine oluşan bir birleştirme tekniğidir. Birleşen malzeme doğal katı faz haldedir ve ergime kaynağı hataları içermez. Bu yöntemde tüketilen bir dolgu malzemesi, koruyucu gaz ve kenarların hazırlanması gerekmez [9].



Şekil 2. Kaynak şeması

- a) SKK takımına ilk dönüş verilmesi
- b) SKK takımının malzemeye daldırılması
- c) SKK takımının omuz kısmının plakaları ön ısıtması
- d) Yeterli ön ısıtmanın ardından SKK takımına ilerleme verilmesi



Şekil 3. SKK kaynağının şematik gösterimi

## 1.6. Sürtünme Karıştırma Kaynağının Çeşitli Malzemelere Uygulanması

SKK; Alüminyum, bakır, titanyum, magnezyum ve bunların alaşımları ile çelikler, farklı alaşımların birleştirilmelerinde kullanılmaktadır. Ayrıca metallerin yanında termoplastik malzemelerin kaynağında da kullanılmaktadır.

### 1.6.1. Bakır Alaşımları

Çelik ve nikel alaşımlarına göre 10-100 kez daha yüksek ısıl yayılma gücü sebebiyle bakırın geleneksel kaynak yöntemleriyle kaynaklanması zordur. Bu yüzden kaynak için gerekli olan ısı girdisi çok yüksektir bu da oldukça düşük kaynak hızlarıyla sonuçlanır. 1.5-50 mm kalınlıktaki bakır plakaların sürtünme karıştırma kaynağı başarıyla yapılmaktadır. SKK yapılmış bakır alaşımlarının çekme mukavemetleri ana malzeme ile benzer değerler vermektedir. SKK ile tungsten ark kaynağı ile yapılan birleştirmelerde elde edilen bazı özellikler benzerdir. Örneğin çözünmüş gaz ( $H_2$  ve  $O_2$ ) miktarları her ikisinde de benzer olmasına rağmen gaz tungsten ark kaynağında koruyucu gaz (helyum) kullanılırken SKK'da koruyucu gaz kullanılmamaktadır. SKK yapılmış bakır malzeme termal kararlılığı ile bakırın ve gaz tungsten ark kaynağı yapılmış bakırın termal kararlılığı benzerdir [10].

### 1.6.2. Titanyum Alaşımları

Her ne kadar birçok titanyum alaşımları gaz tungsten ark kaynağı gibi geleneksel ergitme işlemleri ile kaynak yapılabilse de kaynak sonrası ısıl işlem gerektirebilmektedir. Bu ilave işlem üretim maliyetini arttırmaktadır. Bir katı hal kaynak işlemi olan SKK'nın kaynak sonrası ısıl işleme olan ihtiyacı ortadan kaldırması beklenmektedir. Ne yazık ki titanyum alaşımlarının SKK ile ilgili bilgiler řu an için yetersizdir. İlk araştırmalar SKK'nın titanyum alaşımlarının birleştirilmesinde etkili bir kaynak yöntemi olduğunu gösterse de SKK sırasında mikro yapısal gelişimin anlaşılabilmesi için daha çok araştırma yapılması gerekmektedir [10].

### 1.6.3. Çelikler

Ergitme kaynağı işlemine göre SKK' da ki düşük ısı girdisinin IEAB' de daha az metalürjik değişiklik yapması ve kalın kesitli birleşmelerin kaynağında çok önemli olan çeliklerdeki çarpılma ve kalıntı gerilmeyi minimize etmesi beklenmektedir.

Ayrıca çeliklerdeki hidrojen çatlağı problemine sürtünme karıştırma kaynak işleminin katı hal kaynağı oluşu sebebiyle karışlaşılmaz. Ek olarak katı hal sürtünme karıştırma kaynağı işleminde, kaynakla ortaya çıkan kokulu gazlar da oluşmaz. Bu avantajlar sürtünme karıştırma kaynağını çeliğin birleştirilmesinde birçok uygulama için avantajlı hale getirmektedir.

SKK'nın çeliklerde uygulanabilirliği üzerine yapılan araştırmalar SKK'nın farklı çelik tiplerinin birleştirilmesi uygulamalarında kullanılabilirliği açısından ümit vericidir. Bunların yanında çeliklerin SKK'sında kullanılan uygun takım malzemelerinin seçimi kritik bir konudur. SKK için temel gereksinim takım ve iş parçası malzemesi arasında sertlik ve yüksek sıcaklık özellikleri arasındaki uygun farkı korumaktır. Çünkü çelikler çok yüksek sertliğe ve yüksek sıcaklık özelliklerine sahiptir. Takım malzemesinin 1000°C ve üzerindeki sıcaklıklarda iyi aşınma direnci ve tokluk göstermesi önemlidir [10].

### 1.6.4. Magnezyum Alaşımları

Magnezyum alaşımlarının SKK'nın kalitesi, devir sayısı ve ilerleme hızı ile ilgilidir. Genellikle bir sıvı faz oluşumuyla sonuçlanmaz. Alüminyum alaşımlarının SKK'da olduğu

gibi Mg alaşımlarının SKK'da da üç mikro yapısal bölge bulunmaktadır. Bunlar karıştırma bölgesi (kaynak metali), ısı etkisi altındaki bölge ve termomekanik etkilenen bölgedir. Magnezyum alaşımlarının SKK'da karıştırma bölgesinde ince yeniden kristalleşmiş taneler meydana gelmektedir. Dökülmüş magnezyum alaşımlarında ise kaba  $\alpha$ -Mg fazı ve  $\beta$ Al<sub>12</sub>Mg<sub>17</sub> intermetalik bileşiği SKK'dan sonra kaybolmaktadır.

Karıştırma bölgesinin sertliği genellikle bu bölgedeki ince tane yapısı yüzünden ana metalden daha serttir. Dövme magnezyum alaşımları AZ31B-H24 ve AZ61' de çekme değerlerinde azalma gözlenirken AZ91 gibi döküm magnezyum alaşımlarında çekme değerlerinde iyileşme vardır [10].

### 1.6.5. Plastikler

Plastikler birçok uygulamada kullanılmakta ve verimli bir şekilde birleştirilmeleri önemlidir. Plastiklerin sürtünme karıştırma kaynağı basit birkaç adımda yapılmaktadır. Dönen bir takım sıkıca bağlanmış iki iş parçasının arasına dalmaktadır.

Pim ve iş parçası arasındaki sürtünme malzemenin ısısının yükselmesine sebep olur ve takım birleşme hattı boyunca hareket eder. Malzeme takım etrafında hareket ederken kaynak bölgesinde karışır. İşlem süresince birincil ısı üretimi takım ve iş parçası arasındaki sürtünme ile olur. Bununla beraber polimerler, artan sıcaklıkla kendiliğinden yağlanma eğilimindedir. Bu nedenle sık sık dış ısı ilavesi gerekir.

Kaynaklı parça soğurken tüm kaynak boyunca uniform soğuma hızının yükseltilmesi çok önemlidir. Eğer dışarıdaki malzeme içeridekine göre daha hızlı soğursa katı bir kabuk oluşur. İçerdeki tabakalar daha geç soğuduğu için malzeme büzülür ve kabuktan ayrılır [7].

### 1.6.6. Farklı Alaşım ve Metaller

SKK farklı alaşım ve metallerin kaynaklanmasında kullanılan yeni bir kaynak yöntemi olarak tanımlanabilir. Farklı alüminyum alaşımlarının ya da bakır alaşımlarının birbirleriyle veya alüminyum alaşımlarının diğer metallerle kaynaklanması konularında çalışmalar yapılmaktadır. Çok sert bir alüminyum alaşımının çok yumuşak bir alüminyum alaşımıyla karıştırılması durumunda kaynak verimliliğinin azaldığı gözlenmektedir.

Önceki çalışmalar göstermiştir ki; farklı metallerin (alüminyumun bakıra kaynağı gibi) SKK kusursuz bir kaynak ile sonuçlanmamaktadır. Fakat son zamanlarda yapılan bazı çalışmalarda alüminyumla çelik ve alüminyumla magnezyum gibi farklı metallerin SKK ile birleştirilmelerinde başarılı sonuçlar alınmıştır. Alüminyum-Çelik SKK birleştirmelerinde alüminyum ve demir arasında çelik parçalar ve intermetalikler bulunmuştur [10].

### **1.7. Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin Uygulama Alanları**

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin alüminyum alaşımlarında uygulanabilirliği üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu araştırma sonuçları göstermektedir ki, bu yöntem gerek yaşlandırma sertleştirilmesi yapılan gerekse yaşlandırma sertleştirilmesi yapılamayan (1XXX ve 5XXX serileri gibi ısı işleme duyarlı olmayan) alüminyum alaşımlarında basan ile kullanılabilir. Bu yöntem ile elde edilen birleştirmelerin yüzey kalitesi ark kaynağı ile elde edilen birleştirmelerden çok daha yüksektir. Bu yöntem ile elde edilen birleştirmelerin kaynak performansı, klasik kaynak yöntemleri ile yapılan kaynaklara nazaran daha iyidir. Ayrıca, sürtünme karıştırma kaynağında pimin ilerleme hızını artırarak bu mukavemet düşüşünün daha da azaltılması ve pimin çapının küçük seçilmesi ile mekanik özelliklerin etkilendiği bölgenin eninin küçültülmesi mümkündür. Buna ilaveten, bu yöntem ile kaynak edilen 5754 alaşımının korozyon performansının da oldukça iyi olduğu tespit edilmiştir. Hatta geleneksel kaynak yöntemleri ile kaynağı çok güç olan 7075 alaşımı bile bu yöntem ile başarılı bir şekilde birleştirilmiş ve elde edilen birleştirmeler oldukça iyi mekanik özellikler göstermiştir [11].

Bilindiği üzere alüminyum alaşımlarının oldukça hafif olmasına karşılık, mukavemet özelliklerinin oldukça yüksek olması nedeniyle günümüzde savunma sanayi, otomotiv, demiryolu vagonları imalatı, uçak sanayi ve makine imalat sanayisinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu alaşımlarda karşılaşılan en önemli problem, alaşımların kaynaklı birleştirmelerinde karşılaşılan sorunlardır. Bu malzemelerin geleneksel kaynak yöntemleriyle kaynaklı birleştirilmeleri oldukça zor olmanın yanı sıra elde edilen mekanik özellikler istenilen değerlerden uzaktır. Sıvı hal kaynak yöntemleri ile alüminyum alaşımlarının kaynağında yüksek miktarda çatlak ve gözenek (porozite) oluşumu söz konusudur. Alüminyum alaşımlarında meydana gelen çatlak oluşumunun nedeni, bu alaşımların katılma sıcaklık aralıklarının geniş olması ve ısı genleşme katsayılarının

yüksek olmasıdır. Bir katı hal kaynağı olan sürtünme karıştırma kaynağında ise bu olumsuzluklar önemli ölçüde giderilebilmektedir [12].

Ulaşım sektöründe alüminyum ekstrüzyonlarının birleştirilmesinde vidalama, perçinleme, yapıştırma, bağlama ve kaynak gibi birçok birleştirme metodu kullanılmaktadır. Bunlardan kaynak metodu ürünün yüksek mukavemetli olması istendiği durumlarda kullanılır [13].

Sürtünme karıştırma kaynağının otomotiv endüstrisine getireceği bazı faydalar şunlardır.

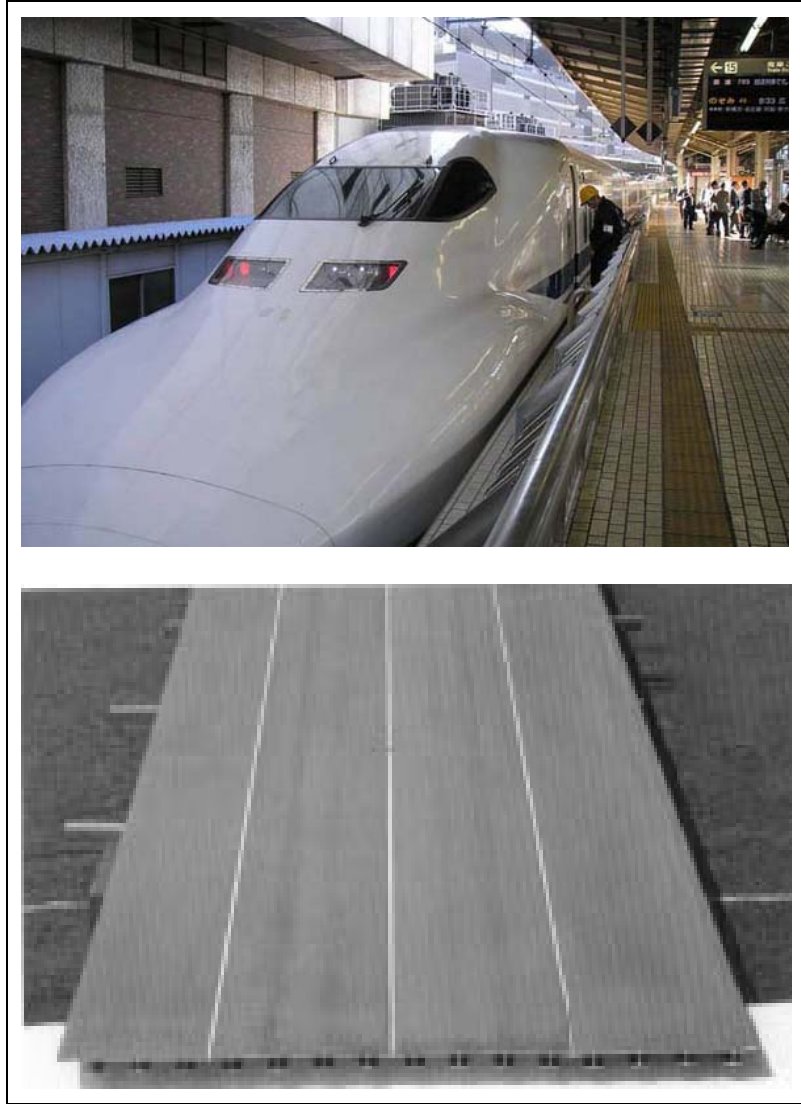
- Kaynak bölgesinde nispeten yüksek mukavemet
- Minimum çarpılma ve kalıntı gerilmeler
- Kaynak dumanını olmayışı, dolayısıyla çevreci bir kaynak tekniği olması
- İlave tel ve koruyucu gaza ihtiyaç duyulmaması
- Hassas kaynak ağzı hazırlığına gerek olmaması
- Otomasyona çok uygun oluşu
- Çeşitli metaller ve alüminyumların (Al-ekstrüzyon ve Al-döküm) birçok pozisyonda birleştirilebilmesi

Halen, otomotiv endüstrisindeki yüksek üretim oranları, rekabetçi üretim ortamları ve düşük maliyet gereksinimleri geleneksel olan diğer birleştirme tekniklerinin uygulanmasına neden olmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynağı otomotiv parçalarında, alüminyum birleştirmelerde kayda değer bir potansiyel artışı sağlamakla beraber otomotiv sektöründe kullanılabilirliği sınırlıdır. Otomotiv endüstrisindeki yoğun üretim nedeniyle, bu yeni teknolojiyi uygulamaya geçirmek için bir hayli zamana ihtiyaç duyulması beklenmektedir. Kaynak teknolojisindeki gelişme hızlandığında artırılmış üretim için büyük potansiyel, özel parçaların büyük oranda üretiminin sağlanması sonucunda açığa çıkacaktır. Yüksek kalite ve yükseltilmiş kaynak mukavemeti, ağırlık azaltımını mümkün hale getirecektir. Özellikle, Mg alaşımlarının otomotiv sektöründe bu yeni kaynak teknolojisi sayesinde kullanımı ile ağırlıktan tasarruf daha da artırılabilir [13].

Otomotiv sektöründe alüminyum kullanımının hızla artması yakıt ve ağırlık tasarrufunda daha etkili araçların üretilmesine yol açmıştır. Süspansiyon kolları gibi küçük çaptaki parçalar bu yöntem ile Japonya'da üretilmektedir. Bunun yanı sıra Norveç'te tekerlek jantlarının bu yöntem kullanılarak yapımı da gerçekleştirilmektedir [12].

Modern yolcu treni vagonlarının imalatında, alüminyum ekstrüzyonlardan üretilen petek paneller daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu panellerde, uzun al-ekstrüzyonlar

aralarına sıklık artırıcı destekler yerleştirilerek birleştirilmektedir. Bu sayede, hem çarpışmalarda emniyet hem de bükme kuvvetlerine dayanım artırılmaktadır. Klasik ergitme kaynağı, özellikle yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarında aşın mukavemet kaybına sebep olduğu için, son yıllarda Almanya ve İngiltere'de meydana gelen hızlı tren kazalarında daha dayanıklı kaynaklara ihtiyaç duyulduğu gerçeği ortaya çıktı. Sürtünme karıştırma kaynağı, kaynak bölgesinde daha düşük seviyelerde mukavemet kaybına neden olduğundan cazip bir alternatif oluşturduğu için son yıllarda Avrupa ve Japonya 'da hızlı tren vagonlarının üretiminde bu kaynak teknolojisi ile imal edilen alüminyum alaşımı petek paneller kullanılmaya başlanmıştır (Şekil 4) [2].



Şekil 4. Japonya 'da sürtünme karıştırma kaynağının kullanıldığı hızlı tren ve bu yöntem ile kaynağı yapılan Al-paneller [2].

Yüksek hızlı trenler, tren yolunun mevcut yokuşlu yerleri, pis altyapı, tramvaylar, demiryolu tankerleri ve vagonlarda SKK uygulamaları yapılmaktadır.

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



Şekil 5. Yüksek hız feribotlarında kullanılan alüminyum ekstrüzyon panellerinin sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesi [13].



Friction Stir Links, Inc ve Marinette Marine tarafından üzerinde yaklaşık 40 km uzunluğunda SKK yöntemi ile gerçekleştirilmiş kaynak dikişi bulunan bir hücumbot üretilmiştir. Söz konusu hücumbotun suya indirme sırasındaki görüntüsü şekil 6'da görülmektedir. Bu yöntem, yolcu gemilerinin üzerinde bulunan hafif yapıların üretiminde de çığır açmış ve zaman içinde yolcu gemileri, katamaran türü hızlı feribotların, hava yastıklı Hovercraft türü feribotların yapımında da etkin olarak kullanılmaya başlanmıştır [14].



Şekil 6. SKK kullanılarak yapılan hücumbot [14].

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

karıştırma kaynağı ideal bir birleştirme yöntemidir. Günümüzde, Al-Li 2195 alaşımından üretilen uzay mekiklerinin yakıt Tanklarının son kubbe kısımlarının kaynağında bu yöntem başarılı bir şekilde uygulanmaktadır [2].

Buzdolabı panelleri, pişirme ekipmanları ve mutfaklar, beyaz eşyalar, gaz tankları ve gaz merdivenleri, motor ve şasi kızakları, hidrofora olan tüplerin bağlanan parçaları, kamyon gövdesi, mobil vinçler, zırhlı taşıtlar, yakıt tankları, karavanlar, otobüs ve hava taşımacılığı taşıtları, motosiklet ve bisiklet yapıları, asansörler, alüminyum arabaların tamiri, magnezyum ve magnezyum/alüminyum eklemleri [12].

SKK yöntemi ayrıca zırhlı taşıt yapımında da uygulama alanı bulunmaktadır, bu amaçla korozyona dirençli 2XXX, 5XXX, 7XXX serisi paslanmaz alüminyum alaşımlarının kullanıldığı zırhlı personel taşıma araçlarının alt ve yan panellerinin birbirine kaynağı yapılmaktadır. Zırhlı personel taşıyıcı imalatında da bu yöntem kullanılmaktadır. İmal edilmiş olan söz konusu aracın tipik bir görüntüsü Şekil 7’de verilmiştir [14].



Şekil 7. Ülkemizde üretiminde SKK yöntemi kullanıldığı belirtilen zırhlı personel taşıyıcı [23].

SKK yöntemi zaman içinde alüminyum alaşımlarından üretilmiş elektronik parçalarında kaynaklı üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Radyatörlerde, soğutucularda ve ısı değiştiricilerde kullanılan alüminyum plakaların üretimine de giren SKK yöntemi nükleer reaktörlerde kullanılan kaynaklı tankların ve donanımlarının da üretiminde kullanılmaktadır. Nükleer endüstride kullanılan yüksek seviye radyoaktivite içeren

atıkların depolanmasında kullanılan zırhlı elemanlar ile derine gömülmede kullanılan depolama tanklarının üretiminde de SKK yöntemi ile kaynak edilmiş elemanlar kullanılmaktadır [14].

### **1.7.1. Sürtünme Karıştırma Kaynağının En Genel Üstünlükleri ve Eksiklikleri [2, 14]**

Sürtünme karıştırma kaynağının üstünlükleri:

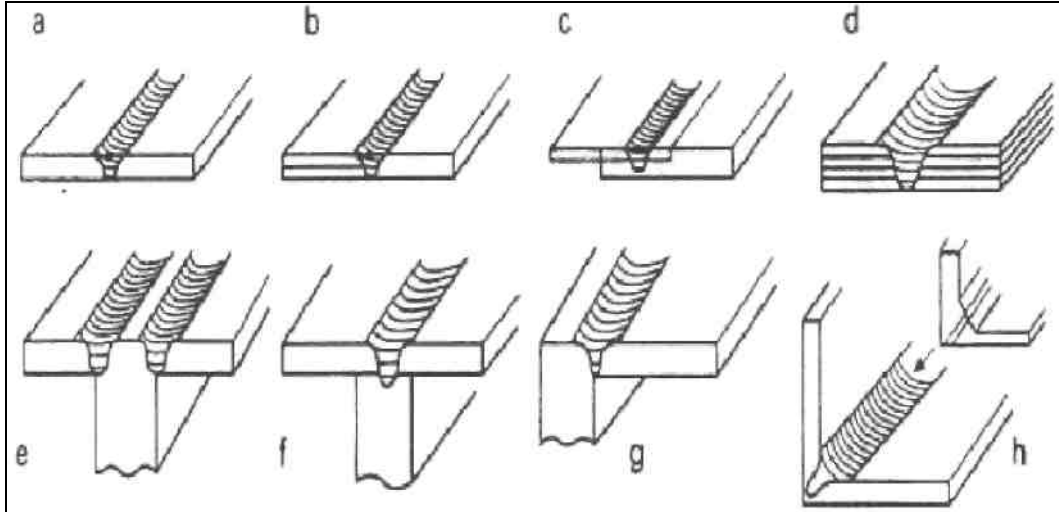
1. Ergitme kaynağı zor olan 2XXX ve 7XXX serisi Al-alaşımları ve Al-Li alaşımları kaynak edilebilir.
2. Kaynak esnasındaki toplam ısı girdisi düşüktür, dolayısıyla mekanik özelliklerdeki kayıp minimumdur.
3. Özellikle ince levhalarda büzülme, distorsiyon ve kalıntı gerilmeler çok düşüktür.
4. Kaynak öncesi yüzey hazırlama aşırı kritik değildir, yüzeyde ince oksit filmleri tolere edilebilir.
5. Katı hal kaynağı olduğu için çatlak ve porozite oluşumu gibi ergitme kaynaklarında karşılaşılan problemler söz konusu değildir.
6. Dolgu malzemesine gereksinim yoktur.
7. Kaynak sonrası kaynak yüzeyi talaş alınmış gibi düzgündür ve yüzey işleme gerektirmez.
8. Alın ve bindirme kaynağı yapılabilir.
9. Aynı takım ile tipik olarak 1000 m kaynak yapılabilir.
10. Yöntemin doğası gereği ark, kıvılcım, gaz ve toz söz konusu olmadığından çok temiz ve çevreci bir kaynak yöntemidir.
11. Enerji verimliliği yüksek bir kaynak yöntemidir.
12. Otomasyona ve robotik uygulamaya çok uygundur.
13. Operatör gereksimi daha azdır.
14. 15-50 mm kalınlıklar arasındaki parçalar istenirse her iki taraftan da kaynak edilebilir.
15. Kaynak, ark olmaksızın yapıldığı için manyetik üfleme tehlikesi yoktur.

Yöntemin eksikleri:

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

### 1.8. Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Yapılabilen Çeşitli Birleştirme Türleri

Sürtünen karıştırma kaynağında uygulanabilir birleştirme türleri; küt alın, bindirme, T-köse, dış ve iç köse, boyuna ve çevresel birleştirmelerdir (Şekil 8). Ayrıca bu yöntem yerçekiminin etkisi olmadığından tüm pozisyonlarda rahatlıkla uygulanabilir [15].



Şekil 8. Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde gerçekleştirilen birleştirmeler  
a) küt alın birleştirme, b) birleştirilmiş ek ve bindirme birleştirme,  
c) bindirme, d) çoklu bindirme, e) iki pasolu T- köse birleştirme, f) tek pasolu T- köse birleştirme, g) dış köse birleştirme, h) iç köse birleştirme [15].

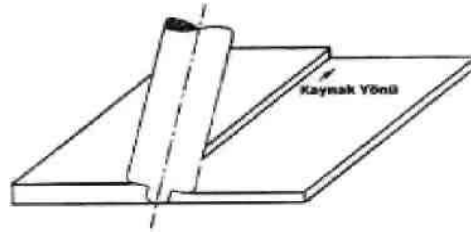
Bu kaynak yöntemi ile düz ve çeşitli profillerdeki sac ve levhaların alın ve bindirme kaynağı yapılabilmektedir. Şekil 4.13 sürtünme karıştırma bindirme kaynağının yapısını şematik olarak göstermektedir. Al-alaşımı veya mukavemeti düşük diğer malzemelerden T ve L profillerin üretiminde ve boru bağlantı kaynaklarında da bu yöntem kullanılabilir [13].

### 1.9. Kaynak Parametrelerinin SKK Yöntemine Etkisi

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

#### 1.9.1. Malzemenin Kalınlığı

Bu kaynak yöntemi ile farklı kalınlıklardaki levhaların birleştirme işlemi pimin eğik konumunda levhalara daldırılması ile yapılabilmektedir (Şekil 9). Ayrıca çift taraftan kaynak yaparak kalın parçalarında birleştirilmeleri mümkündür. Bu şekilde, 75mm kalınlığındaki 6082 Al-alaşımı levhalar çift taraftan kaynak edilerek başarı ile birleştirilmiştir [13].



Şekil 9. Pimin eğik konumu

Bu kaynak yöntemi, büyük uzunluktaki kaynakların ergime olmaksızın yapılmasını sağlamaktadır. Bu ergitme kaynakları ile karşılaştırıldığında önemli bazı metalürjik avantajlar sağlar. İlk olarak; ergime olmaması katılma çatlaklarının giderilmesini sağlar. İkinci olarak ergitme kaynağı ile bir araya getirilemeyen farklı ve uyumsuz alaşımlar başarıyla birleştirilebilir. Üçüncü olarak, karıştırma ve dövme hareketi ergime kaynağı ile elde edilebilenden daha iyi özelliklere sahip ince taneli yapı üretir ve son olarak; düşük

kaynama noktasına sahip alaşım elementleri buharlaşma yoluyla kaybolmazlar. Diğer avantajları; düşük distorsiyon, kenar hazırlanmasına ihtiyaç duyulmaması, porozitelerin daha az olması, koruyucu gaz ve dolgu metali gibi kaynak sırasında kullanılan malzemelere ihtiyaç duyulmaması ve oksit içeren yüzeylerin birleştirilebilir olmasıdır [16].

### 1.9.2. Karıştırıcı Uç Malzemesi ve Dizaynı

Yöntemde, yüksek sıcaklıklarda aşınma direncine sahip malzemelerden üretilen, değişik tasarımlardaki, tükenmeyen döner takımlar kullanılır. Örneğin, kaynak bağlantılarında H13 (X40CrMoV51) takım çeliğinden tek parça takımlar ve karıştırıcı uç kısmın malzeme olarak sıcakta yüksek mukavemete sahip olan MP 159 malzemesinden ve omuz kısmı ise H13 takım çeliğinden imal edilmiş ve iki parçalı olan takımlar kullanılmaktadır. Bu konudaki gelişmeler hızla devam etmekte olup, geliştirilen takım ve malzemeleri ile ilgili bilgilere ulaşmak oldukça zordur [15].

SKK kaynak yöntemi ilk olarak geliştirildiğinde kullanılan batıcı uçlar; yüzeyine helisel diş açılmış, uzunluğu kaynak edilecek levha kalınlığından biraz kısa silindirik pimlerdi. Fakat son yıllarda sürtünmeden açığa çıkan ısı ile akıcı kıvama gelen malzemenin kaynak bölgesinde kalmasını geliştirmek için çok değişik pim dizaynları geliştirilmiştir [13].

Kaynağı zor veya daha kalın malzemelerde, plastik Şekil değiştiren kısmın, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akısı, göz önünde tutulması gereken önemli bir noktadır. Eğer, oldukça geniş çapta karıştırıcı uç kısımlar gerekli ise çok geniş hacimli malzeme hareketi olacaktır. Takımlar, plastik Şekil değiştirebilen malzemenin, karıştırıcı uç kısım etrafındaki akısını artıracak şekilde geliştirilmelidir. Oldukça geniş hacimli karıştırıcı uç kısımlar, içi boş olarak tasarlanmıştır. Kullanılan karıştırıcı uç kısım profilleri, sürtünme karıştırma kaynak yönteminin kalitesini artırmak için vidaya benzer yivli veya sarmal yivli, mikser veya pervane şekilli olarak geliştirilmiştir. Mikser tip içi boş karıştırıcı uç kısma sahip takım, plastik şekil değiştiren malzemenin, karıştırıcı uç kısmın içinden geçmesine olanak sağlar. Benzer çaptaki dolu takımlar ile karşılaştırıldığında, daha az miktarda malzeme yer değiştirir [17].

### 1.9.3. Takım İlerleme Hızı ve Takım Devir Sayısı

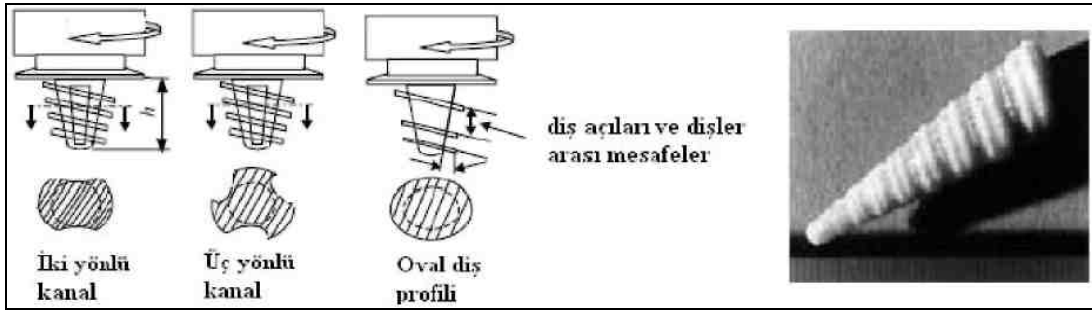
Sürtünme karıştırma kaynağında iki parametre çok önemlidir. Bunlar saat yönünde veya saat yönünün tersi yönde takımın devir sayısı ( $n$ , d/dk) ve kaynak hattı boyunca takımın ilerleme hızıdır ( $V$ , mm/dk). Takımın dönmesi dönen pim etrafındaki malzemenin karışmasına sebep olur, takımın dönmesi karışan malzemeyi pimin önünden arkasına taşır ve kaynak prosesi sonlanır. Yüksek kaynak hızlarında asıl problem yeterli birleşmenin olmadığı soğuk kaynaktan kaçınmanın sağlanmasıdır [22]. Takımın yüksek devir sayılarında sürtünmenin fazla olması sebebiyle yüksek ısılar üretilir ve malzemenin daha kuvvetli karışmasına sebep olur [10]. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynaklanma hızının değişmesi malzeme sertliğini de değiştirmektedir. Artan kaynak ilerleme hızlarında sertlik değerleri de artmaktadır. Bunun nedeni yüksek kaynak hızlarında malzemeye aktarılan ısı girdisinin azalmasıdır [9].

## 1.10. Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kullanılan Takımlar

### 1.10.1. Üç Yivli ve Helezonik Takımlar

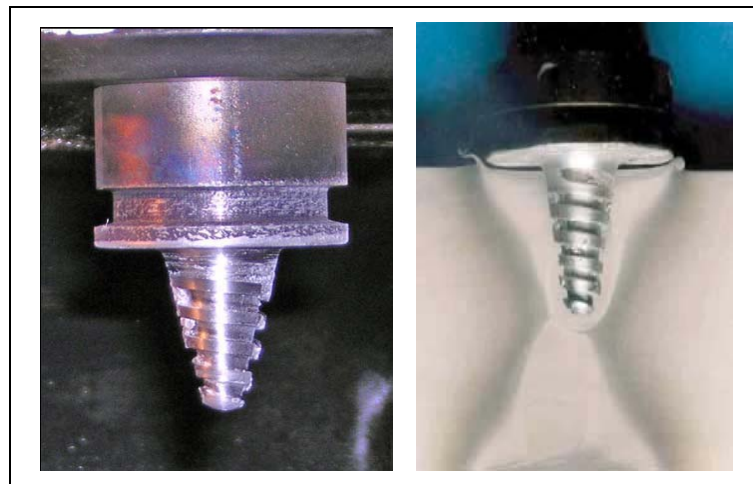
Son yıllarda, TWI tarafından üç oluklu veya üç yivli (MX Triflute) ve helezonik (Whorl) takımlar geliştirilmiştir. Bu yöntemde kullanılan takım genel olarak omuz ve karıştırıcı uç kısım olmak üzere iki önemli bölümü içerir. Takımın omuz kısmı, plastik Şekil değiştiren kaynak bölgesinin diğer bir deyişle iş parçasının yüzeyi üzerinden sıkıştırarak (baskı uygulayarak) hareket eder. Isı, ince parçaların kaynağında dönen takımın omuz kısmı ile iş parçasının yüzeyi üzerindeki sürtünmeden oluşur, bu kaynak işlemi için gerekli ısının ana kaynağıdır. Bununla beraber, iş parçasının kalınlığı arttıkça, takımın omuz kısmı ile iş parçası yüzeyleri arasındaki sürtünmeden dolayı oluşan ısıya ek olarak, iş parçası ile takımın karıştırıcı ucu arasındaki dönme sırasında sürtünmeden de elde edilen ısı daha da artar. Bunlara ek olarak, takımın karıştırıcı ucunun ana işlevi, kaynak hattındaki işlenen malzemenin yeterliliğini sağlamak ve doyurucu bir kaynak dikişini, takımın etrafındaki malzemenin akışı ile kontrol etmektir. 1 mm ila 50 mm arasındaki kalınlıklara sahip alüminyum alaşımlı levhalar, bir pasoda, sürtünme karıştırma kaynak yöntemi sayesinde başarıyla kaynak edilir. MX üç yivli takım kullanılarak, 6 mm'den 50 mm'ye kadar olan kalınlıklardaki malzemelerin tek pasoda kaynaklarını yapmak oldukça iyi

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



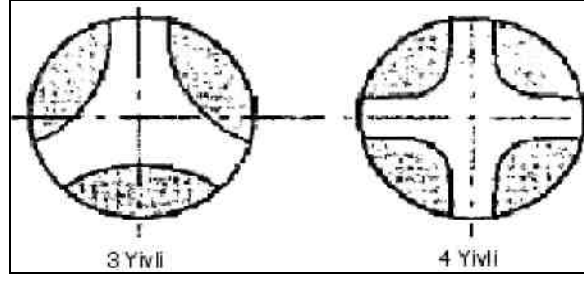
Şekil 10. Helezonik takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri ve deniz kabuğuna olan benzerliği [17].

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde kullanılan takımların karıştırıcı uçları dairesel etkiler ve burulma yüklerinin etkisi altındadır. Her iki karıştırıcı uçta, kaynak işlemi sırasında geleneksel pim türü karıştırıcı uçlardan daha fazla etkili olacak şekilde akışa neden olur. Şekil 11'de helezonik takımların, Şekil 12'de ise yivli takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri görülmektedir [13].



Şekil 11. Helozonik takımlar [25].



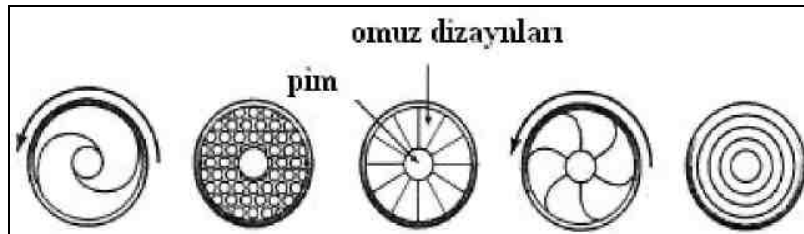


Şekil 12. Yivli takımların karıştırıcı uç kısımlarının enine kesitleri [17].

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

Yeni jenerasyon helezonik ve üç yivli takımlarının omuzları da özel profillere sahiptir (Şekil 13). Omuz profilleri, omuz ile iş parçası arasında daha iyi bir temas yüzeyi sağlamak amacıyla kullanılır. Sürtünme teması ile akan malzemenin kaynak bölgesinden ayrılması önlenmektedir [13].

Gerçekleştirilmek istenilen kaynak işleminin başarılmasında kaynak bölgesinde ihtiyaç duyulan gereken ısı miktarının aktarılmasında karıştırıcı uç üzerinde bulunan omuz kısmının önemli etkisi vardır. Bu nedenle uç tasarımında çeşitli omuz tipleri denenerek malzeme türüne göre etkileri araştırılmaktadır.

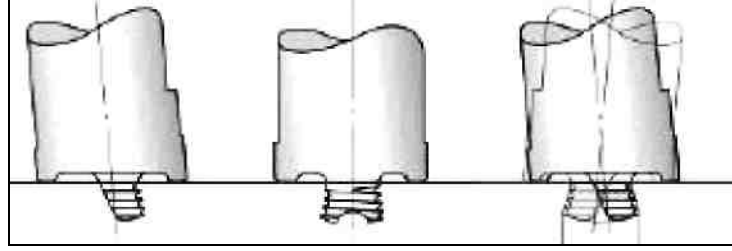


Şekil 13. Helezonik ve üç yivli takımların omuz profilleri [15].

### 1.10.2. Skew-Stir™ ve A-Skew™ Serisi Pimler (Batıcı Uçlar)

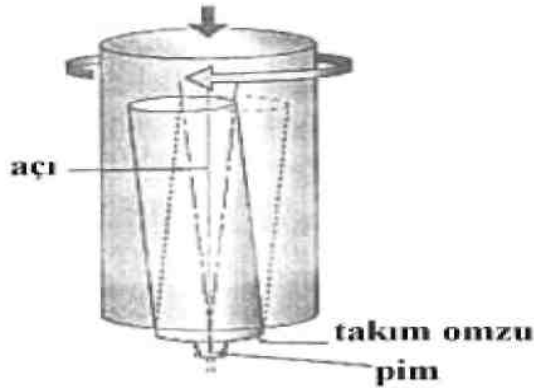
SKK için geliştirilen Skew-Stir™ biçimi pimler Şekil 14’te gösterildiği gibi makine miline biraz eğik olarak verilen takım eksenine geleneksel metottan farklıdır [8].

Skew-Stir™ serisi pimler, dinamik süpürme hacmi ile statik hacim arasındaki oranı pim eğik hareketi ile artırabilmektedirler. Bu oran, boşluk oluşumunu gidermede veya azaltmada ve işlem verimliliğini yükseltmede önemli bir faktördür [13].



Şekil 14. A-Skew ucunun resmi [8].

Şekil 15’te görüleceği üzere, omuz yüzeyi, eğik takım eksenine belirli bir eğim oluşturmaktadır. Omuz yüzeyi, plakanın üst kısmına bağlı olarak sabit durmaktadır. Omuz, iş parçası üzerinde iken dairesel hareket yapar. Takımın odak noktası, iş parçası yüzeyine veya iş parçasının herhangi bir noktası üzerine geldiğinde, omuzun temas yüzeyi eksen dışı bir yörüngede hareket eder. Ayrıca, omuzun bu yörünge hareketi, omuzun eğrilik açısına ve odak noktası ile levhanın üst yüzeyi arasındaki mesafeye bağlıdır. Eğrilik açısı ve aradaki mesafe arttıkça, omuzun hareket sahası da artacaktır [18].



Şekil 15. Skew-Stir metodunun çalışma prensibi [18].

### 1.11. SKK Yönteminde Kullanılan Uç Malzemeleri

Takım malzemesi olarak en yaygın kullanılan malzemelerin başında; alaşımlı takım çelikleri, yüksek hız çelikleri, nikel-kobalt alaşımlarının yüksek tokluğa ve sertliğe sahip olanları ile sert metal karbürler gelmektedir. Ayrıca, diğer malzemelere oranla daha düşük mukavemet ve tokluğun yeterli olduğu uygulamalarda (alüminyum alaşımlarının bazı türleri için) uç maliyetinin düşük olması istenen uygulamalarda, ısıl işlem çelikleri de (AISI 4140, ISO 683/II Type 3, DIN 42CrMo4; AISI 4340, ISO 683/VIII Type 4, DIN 40NiCrMo6 v.b.) yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 1.12. Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Birleştirmenin Metalurjik Yapısı

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi bir katı hal kaynak yöntemi olduğundan kaynak dikişinde ergime meydana gelmez. Yüksek ısı olmadığından dolayı ısıdan etkilenen bölge de oldukça dardır. Ergitme kaynak yöntemi ile elde edilen kaynak dikişlerinden farklı bir kaynak dikişi ve metalurjik yapı elde edilir. Isıdan etkilenmeyen ana metalden kaynak dikişine doğru bu bölgeleri sıralarsak, bu bölgeler; ana malzeme, ısının tesiri altında kalan bölge (ITAB), termomekanik etkilenen bölge (TEB), dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB).

Karışım bölgesini şekli, kaynak parametrelerine, birleştirilen alaşımların mekanik özelliklerine ve kullanılan karıştırıcı ucun şekline bağlı olarak değişir.

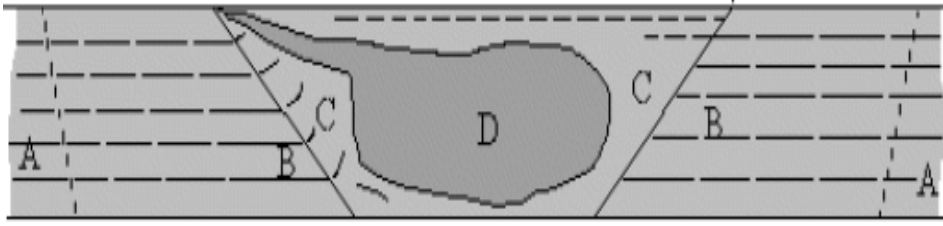
Ana Malzeme: Kaynak metalinden yeterince uzakta olup, karıştırma esnasında oluşan ısıdan etkilenmez. Bu bölgede plastik deformasyon meydana gelmez ve malzemenin mikro yapı ve özelliklerinde değişme oluşmaz.

ITAB: Kaynak metaline daha yakın, ısıdan etkilenmeyen ana metale komşu olan bölgedir. Bu bölgedeki malzeme karıştırma esnasında meydana gelen ısıdan etkilenir ve malzemenin yapı ve özellikleri değişir. Bu bölgede plastik deformasyon meydana gelmez. Karıştırma esnasında oluşan ısı değerinin yüksek olmaması nedeniyle ergitme kaynak teknikleri ile karşılaştırıldığında ITAB daha dardır.

TEB: Hem ısının etkilediği hem de plastik deformasyonun meydana geldiği ITAB'a komşu olan bölgedir. Bu bölgede karıştırmanın etkisiyle hem plastik deformasyon meydana gelmekte hem de oluşan ısının tesiriyle kısmi ince taneli bir yapı oluşmaktadır. Karıştırma esnasında oluşan ısı, bu bölgenin mikro yapı ve mekanik özelliklerini değiştirir.

Sürtünme karıştırma kaynak tekniği ile birleştirilen alüminyum termomekanik etkilenen bölgesinde yeniden kristalleşme görünmez.

DKB: Dinamik olarak kaynak dikişinin merkezinde oluşan ve insan midesine benzer şekilde bulunan bölgedir. Aşırı plastik deformasyonun ve oluşan ısı ile mikroyapı ve özelliklerin değiştiği bir bölgedir. Metal yığına benzediği için kaynak külçesi adı verilmiştir. Diğer metallerde çok net değildir. Alüminyum alaşımlarında yeniden kristalleşen bölgedir. Genellikle yapısı soğanın iç kesit yapısına benzer. Çok dar aralıklarla birbirini takip eden hakların dizilişi şeklindeki bir kesite sahiptir [19].



Şekil 16. Sürtünme karıştırma kaynağı yapılmış alüminyum alaşımının mikroyapısı  
A: Ana malzeme, B: Isıdan etkilenen bölge (ITAB), C: Termomekanik etkilenen bölge (TEB), D: Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB).

A: Kaynaktan etkilenmeyen ana malzeme

B: Isı etkisi altındaki bölge (ITAB)

C: Alüminyum alaşımlarında bulunan yeniden kristalleşmemiş bölge

D: Alüminyum alaşımlarında bulunan yeniden kristalleşen kaynak çekirdeği

C+D: Termomekanik olarak etkilenen bölge

### 1.13. Alüminyum Alaşımların Kaynak Edilebilirliği

Alüminyum malzemeler kaynak edilmesi güç malzemelerdir. Bu alaşımlar bazı istisnai durumlar hariç ticari olarak ark kaynağı ile birleştirilmektedirler. Fakat ergitme kaynak yöntemleri ve difüzyon kaynağı gibi bilinen kaynak yöntemleri ile kaynaklarında çeşitli sorunlar bulunmaktadır. Ergitme kaynak yöntemleri ile alüminyum alaşımlarının (özellikle yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış olanların) kaynağında yüksek miktarda çatlak ve gözenek oluşumu gibi problemler mevcuttur. Alüminyum alaşımlarının kaynağı esnasında çatlak oluşumunun nedeni; bu alaşımların katılma sıcaklık aralıklarının geniş

ve ısı genleşme katsayılarının yüksek olmasıdır. Ark kaynağında yüksek ısı girdisi, bu malzemelerin ısı genleşmelerinin yüksek ve katılma sıcaklık aralıklarının geniş olması sonucu özellikle çatlama daha duyarlı yaşlandırma sertleştirilmesi yapılmış alüminyum alaşımlarında kaynak dikişinde çatlak oluşumuna yol açmaktadır. Ark kaynağındaki yüksek ısı girdisi aynı zamanda, ITAB bölgesinde, tane sınırlarında düşük ergime dereceli fazların oluşumuna ve bu bölgede de çatlama yol açabilir [19].

#### 1.14. Literatür Araştırması

Son yıllarda keşfedilerek geliştirilmekte olan sürtünme karıştırma kaynağı pek çok araştırmacının ve sanayicinin ilgisini çekmekte ve dolayısıyla farklı iş kollarında ortaya çıkan çeşitli sorunları çözebilmek amacıyla, birçok bilimsel ve teknik araştırmaların yapılması ihtiyacı ortaya çıkarmıştır.

Son yıllarda gerçekleştirilmiş olan araştırmalardan bazıları incelendiğinde;

Heinz ve Skrozki AA6013-T6 ve AA6013-T4 alüminyum alaşımlarının SKK ile birleştirilebilirliklerini, 1400 d/dk devirde ve 400-450 mm/dk ilerleme hızında incelemiş ve birleştirilen alaşımların kaynak bölgesindeki çökeltilerin tamamen ayrılmış durumda olduğunu belirlemişlerdir [20].

Sungong lim ve arkadaşları, 4 mm kalınlığındaki AA 6013-T651 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinde, farklı kaynak parametrelerinin, elde edilen kaynağın çekme dayanımına etkilerini incelemişlerdir. Söz konusu bu çalışmada, farklı takım devir sayıları ( 1000, 1400, 1600, 2000, 2500 d/dk) ve takım ilerleme hızları (100, 200, 300, 400 mm/dk) parametreleri kullanarak SKK ile birleştirilmiş. Yapılan çalışmanın sonucunda gerçekleştirilen çekme deneylerinde elde edilen kopma uzamasının kaynak hızı ile doğru, takım devir sayısı ile ters orantılı olarak değiştiği, mukavemet değerlerinin ise kaynak parametrelerinden (takım devir sayısı, takım ilerleme hızı) daha az oranda etkilendiğini gözlemlemiş [21].

Krishann bir çalışmasında, AA6013 ve AA7075 alüminyum malzemeleri farklı takım devirlerinde (400, 800, 1400 d/dk) ve ilerleme hızlarında (120-288 mm/dk) SKK ile birleştirip kaynaklı bölgenin iç yapısını 3 eksende incelenmiştir. Bu çalışma sonucunda soğan halkaları takımın dönmesi, ileri hareketi ve geri çekilme tarafındaki malzemeyi aşırı deforme etmesi esnasındaki sürtünme ısınmalarından dolayı meydana geldiği ve halkalar

arasındaki mesafenin takımın bir devrinde ki ilerleme miktarına eşit olduğunu belirlemiştir[21].

Colligen ve arkadaşları, 25 mm kalınlığındaki AA5083-H131 levhanın SKK kaynaklı birleştirilmesinde ilerleme hızının oluşan içyapı ve gerilme yığılması özelliklerine etkilerini inceledi. Sabit takım ilerleme hızı (100-140 mm/dk) ve takım dönme hızında (250 d/dk), iki parçalı takım kullanarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirdikleri kaynak işleminde, kaynak dikişinin başlangıç ve son bölgesinde belirgin boşluk hatalarının oluştuğunu belirlenmişlerdir. Mukavemet verileri göstermişirki bağlantıdaki uzama değeri artan ilerleme hızıyla orantılı olarak artmaktadır. Birleşme bölgesinde uzama miktarı ana malzemenin uzama miktarının %56'sı oranına erişmekte olduğu görülmüş [21].

Benavides ve arkadaşları 6,5 mm kalınlığındaki AA2024 alüminyum alaşım levhalarının oda sıcaklığı ve -30C sıcaklıkta kaynak edilebilirliği çalışmalarında, 650 d/dk'lık takım devir sayısı ve 60mm/dk'lık takım ilerleme hızı sabit olarak tutularak gerçekleştirmişlerdir. Kaynak parçalarının başlangıç noktasından 10 mm uzağında başlangıç, en yüksek ve 40 mm ilerleme sonrasında elde edilen sıcaklık değerleri sırasıyla, oda sıcaklığında yapılan kaynak işleminde 30, 330 ve 220° C olarak elde edilirken -30° C'lık ortam sıcaklığında yapılan kaynaklarda ise -30, 70 ve 140° C ölçülmüştür. Çalışmanın sonucunda; -30° C de yapılan kaynakta, daha düşük kaynak sıcaklığı elde edilmekte olduğu, bu etkinin kaynak bölgesinin dar alanda olmasından ve kaynak bölgesinin orta kısmında yüksek deformasyon oranının yanında sıcaklık seviyesinin diğer ortamlara oranla, oldukça düşük oluşmasından dolayı daha ince yapılı tane oluşumunun meydana gelmekte olduğunu görmüşlerdir [21].

P.Cavaliere, E.Cerri, A.Sqallece 2024 ve 7075 alüminyum alaşımlarını SKK ile kaynaklayıp mikro yapılarını incelemiştir. Kaynak 700 dev/dk dönme hızında ve 160 mm/dk ilerleme hızında kaynağı gerçekleştirdi ve kaynak bu parametrelerde başarılı bir şekilde yapıldı [21].

Mahoney ve arkadaşları 6,3 mm kalınlıkta AA7075-T651 plakayı SKK ile kaynaklayıp mukavemet değerlerini incelemişler. Kaynak 125 mm/dk ilerleme hızında yivli uç kullanılarak gerçekleştirildi. Omuz altında deforme olan taneler ve kaynak flaşı ile birlikte karıştırma bölgesi eliptik ve soğan halkalarını içermektedir. Kullanılan termoeleman SKK esnasında karıştırma bölgesi dışında 483 °C sıcaklık değerine erişti. Yüksek sıcaklıkların karıştırma bölgesi içinde olduğu düşünülmüştür [21].

Murr ve arkadaşları 6 mm kalınlığındaki AA 6061 T6 alüminyum alaşımları 400 d/dk takım devrinde 120 mm/dk ilerleme hızında SKK yöntemi ile kaynaklanmıştır. Kaynak işlemi sırasında oluşan çökelme işlemi ve buna bağlı içyapı değişimleri incelenmiştir. Çalışmada dinamik yeniden kristalleşme ve tane büyümesine ile birlikte sürtünme karıştırma kaynağına bağlı olarak çökelme olayı geçirmeli elektron mikroskobu yardımıyla incelenmiştir. Kaynak dikişi bölgesinin sertliği 55 VSD olarak ölçülürken esas metalde ve iş parçasında sertlik 110 VSD olarak ölçülmüştür [21].

Bir diğer çalışmalarında ise, Maeda ve arkadaşları kusur formasyonunda ilerleme ve rotasyonel hızların etkileri çalışmasında 5mm kalınlıklı AA 5083-0 ve AA6061-T651 tabakayı SKD61'den yapılmış takım kullanarak SKK ile kaynakladı. Takım yivli uç olup 3 derecelik eğimle kullanılmıştır. Takım ölçüleri sırasıyla omuz ölçüleri 15mm, uç çapı 6mm, uç boyu 4.8 mm olmaktadır. Dönme hızları 1200 den 1400 d/dk, ilerleme hızları 120 den 300 mm/dk olarak seçilmiştir. Sıcaklık ölçümleri kaynağın kökünde ve yüzeyinde ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümleri yardımıyla sıcaklık dağılım haritaları elde edilmiştir. AA6061 ilerleme bölgesinde 1800 d/dk ve 120mm/dk da kusursuz kaynak gerçekleştirilmiştir. Benzer yapı AA5083 ilerleme bölgesinde kaynak hataları olmuştur. Termal haritalar 1800 d/dk ve 120mm/dk de göstermiştir ki izotermal çizgiler AA6061'in ilerleme bölgesinde genişlemektedir [21].

D.R.Akula AA2024 ve AA 7075 alüminyum levhaları 800-1300 d/dk arasında 54-193 mm/dk ilerleme hızlarında başarılı bir şekilde SKK ile kaynakladı ve uzama, gerilme ve mikro sertlikleri optik mikroskop ve tarayıcı elektron mikroskobu ile inceledi. Ayrıca 2024 için en iyi kaynak parametresinin 1045 dev/dk dönme hızında ve 146 mm/dk ilerleme hızında olduğunu belirledi. 7075 için 840 dev/dk dönme hızında ve 193 mm/dk ilerleme hızında en iyi parametreyi belirledi. İkisi birbirine alın alana kaynakta ise en başarılı kaynak parametrelerinin, 675 d/dk ve 146 mm/dk olarak belirledi [21].

### **1.15. Çalışmanın Amacı**

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının imalat sanayindeki önemi hiç azalmayıp, aksine artan bir şekilde kullanılmaya devam etmektedirler. Özellikle otomotiv sanayi ve denizcilikte kullanılmakta olan alüminyum ve alüminyum alaşımları, gerek birbirlerine gerekse farklı türlerin birleştirilme ihtiyaçları gün geçtikçe artmaktadır. Gerçekleştirilen birleştirmelerde, birleşme bölgesinin içyapısı, birleştirilen parçanın mekanik özelliklerini

belirlemektedir. Ayrıca gerekleŖen birleŖtirme iŖleminden elde edilen ürünün birleŖme bölgesinden beklenen yüzey dzgnlg uygulanacak kaynak yönteminin belirlenmesinde etkin rol oynamaktadır. Bu nedenlerden dolayı, klasik kaynak yöntemlerinin yanında günümüzde “sürtünme karıŖtırma kaynağı” (SKK) eŖitli uygulamalar için alternatif kaynak yöntemi olarak karŖımıza çıkmaktadır.

Sanayide yaygın kullanılan alüminyum alaŖımı, genel olarak ergitmeli kaynak yöntemleriyle birleŖtirilmektedirler. Ergiterek gerekleŖtirilen bu yöntemlerle birleŖtirilen malzemelerin özellikle birleŖme bölgelerindeki yapısal özellikleri tamamen deđiŖime uğramaktadır. Bu durum, malzemelerin mekanik özelliklerini de olumsuz yönde deđiŖikliđe uğratmakta parçalara kaynak öncesinde uygulanan ısıl iŖlemlerin etkileri tamamen ortadan kalkmaktadır. Ayrıca, parçalara uygulanan yüksek ısıl etkiler nedeniyle Ŗekilsel deđiŖimler oluŖurmaktadır. Diğer taraftan, kaynak dikiŖlerinin temizlenip, yüzeylerinin düzeltilmesi için ek harcamalar yapılması da zorunlu kılmaktadır. Bu nedenlerle, hazırlanan bu alıŖma, seçilecek malzemelerin birleŖtirilmeleri için, kaynak iŖlemi sırasında ergimesine yol amadığı ve kaynak sonrasında elde edilen birleŖme bölgesinin önemli lde ek iŖleme gerek kalmayacak derecede düzgün elde edilebilmesi nedenleriyle sürtünme karıŖtırma kaynak yöntemi belirlenmiŖtir. Ayrıca, belirlenen bu kaynak yöntemi, birçok sanayi uygulamasında kullanılması önemli derecede ekonomiklik sağlayacağı tahmin edilmektedir. Bu alıŖmada, ülkemizde eŖitli sanayi dallarında yaygın bir kullanıma sahip olan AA 7075T651 ve AA 5754H22 alüminyum alaŖımlarının SKK yöntemi ile birleŖtirilebilirliđinin incelenmesi amalanmıŖtır. Bu amaçla, gerekleŖtirilecek alıŖmada, birleŖtirilen parçaların birleŖme bölgelerinin mekanik ve yapısal özellikleri ile kaynak iŖleminde uygulanması gereken en uygun takım yükünün belirlenmesi amalanmıŖtır.



## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

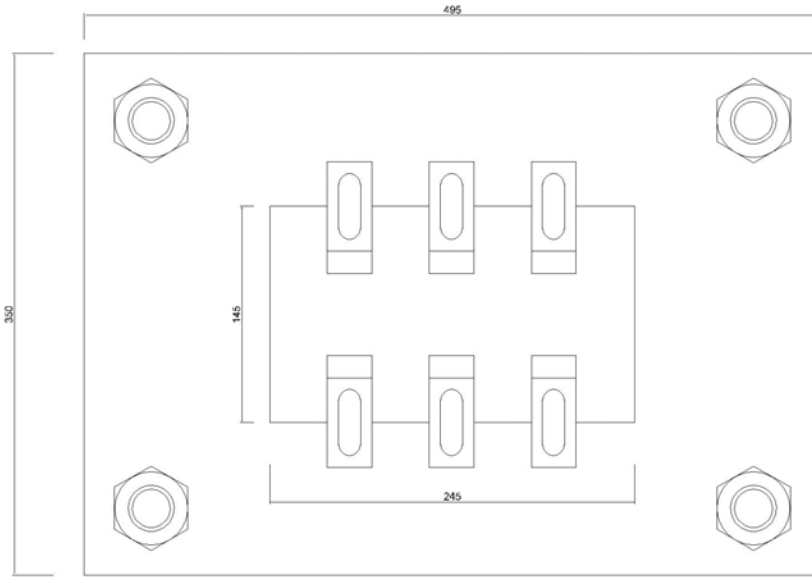
Bu çalışmada deney malzemesi olan AA7075T651 ve AA5745H22 alüminyum alaşımı levhalar kullanılmıştır. Bu alaşımlar sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile uygun parametreler kullanılarak alın altına birleştirilmişlerdir. Yapılan çalışmalar olarak deney düzeneğinin oluşturulması, karıştırıcı uç dizaynı ve imal edilmesi, deney malzemelerinin tedarik edilmesi, uygun parametrelerin belirlenmesi, sıcaklık ölçümleri, sertlik ölçümleri, çekme deneyi, eğme deneyi ve metalografik incelemeler yapılmıştır.

### 2.1. Deney Düzeneği

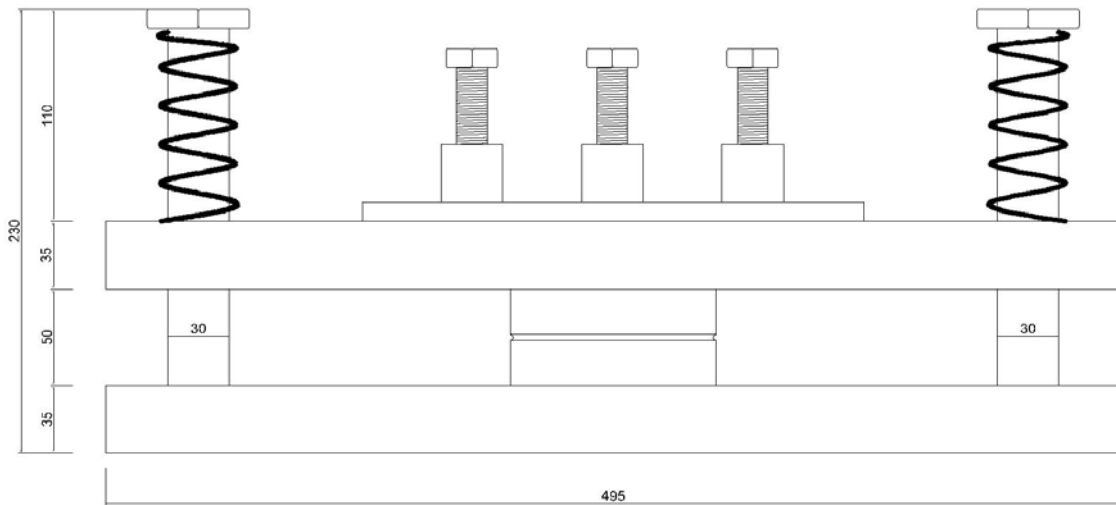
Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde, kaynak işleminin gerçekleştirilebilmesi için, belirli bir geometride hazırlanan dönen takım belli bir yükü malzemeye bastırılmakta ve takım dönme hareketine devam ederken parça ilerletilerek sürtünme, karışma ve dolayısıyla birleşme sağlanmış olmalıdır. Bu nedenle gerçekleştirilmek istenen kaynak işlemi bu işleve sahip bir düzenek tarafından gerçekleştirilmelidir. Bu nedenle söz konusu çalışma için ana tezgâh olarak dik bir freze tezgâhı kullanılmıştır. Kaynak takımı bu tezgâhın takım tutucusuna özel pens yardımıyla bağlanmıştır. Kaynak edilmek istenen malzemeler tezgâhın tablasına pabuçlar yardımıyla sabitlenerek, tezgâhın tablası ile birlikte takıma dik doğrultuda hareket ettirilebilmektedir. Ayrıca, kaynak sırasında iş parçasında istenilen şekil değişimini sağlayabilmek için iş parçasının belirli sıcaklığa kadar ısıtılması işi kullanılan takımın döner durumda iş parçasına bastırılmasıyla sağlanması gerekmektedir. Dolayısıyla, kaynak ucunu (takım) iş parçasına istenilen yükleme değeri ile bastırabilmek için tezgâhın tablası üzerine takıma paralel doğrultuda hareket edebilecek şekilde hidrolik yüklemeli bir tabla tasarlanıp imal edilerek yerleştirilmiştir.

Freze tezgâhları genellikle takımın iş parçasına göre sabit bir konumda durmasını sağlamak amacıyla tasarlanmışlardır. Bu nedenle, takımın iş parçasına uygulaması gereken baskı kuvvetlerini sabit tutmak klasik tezgâhlar için her zaman sorun teşkil etmektedir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için gerekli bir hidrolik yükleme sistemi tasarlanmıştır. Yüzeyleri taşlanmış olan 495x350x35 mm boyutlarına sahip iki tabla dört köşesine yerleştirilen 30 mm çapında taşlanmış dört adet mil kullanılarak takıma karşı olarak

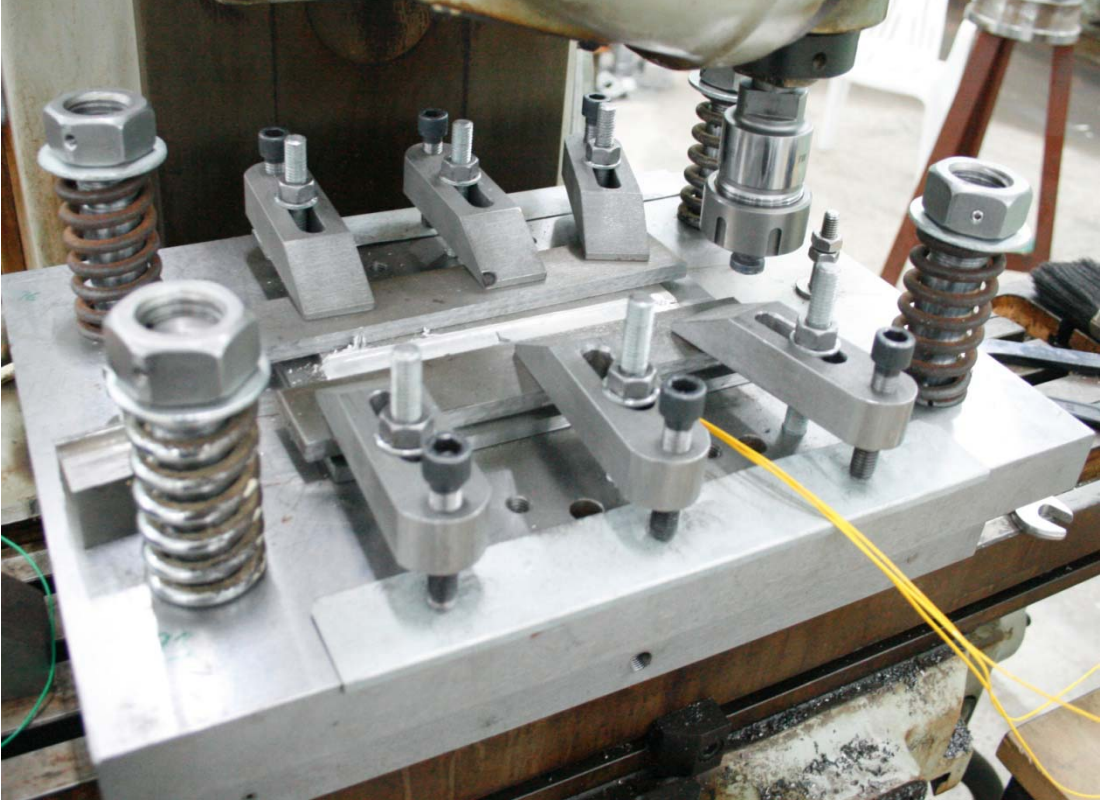
hareket edebilecek şekilde yerleştirilmişlerdir (Şekil 17-23). Söz konusu tablalar arasında hidrolik bir silindir yerleştirilmiştir. Bu silindir basıncı hassas olarak kontrol edilebilen hidrolik bir ünite ile beslenerek tablanın takıma uygulaması gereken kuvvet yaklaşık olarak 10 kg hassasiyetle kalibre edilmiştir. Bu düzenek sayesinde, sürtünme karıştırma kaynağı esnasında, freze tezgâhı ile sağlanan takım döndürme ve ilerletme işlemine ek olarak takım baskı yükü kontrol edilip uygulanarak kaynak işlemi çoğu parametresi denetlenerek gerçekleştirilebilmektedir.



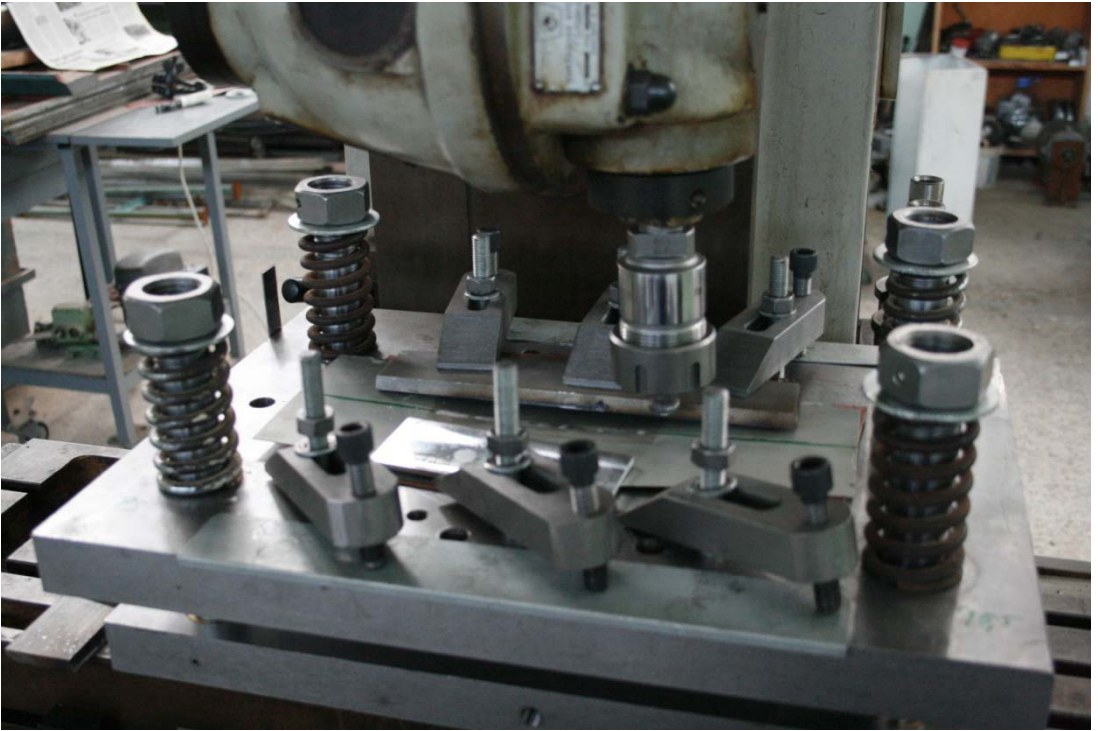
Şekil 17. Tabla üst görünüş



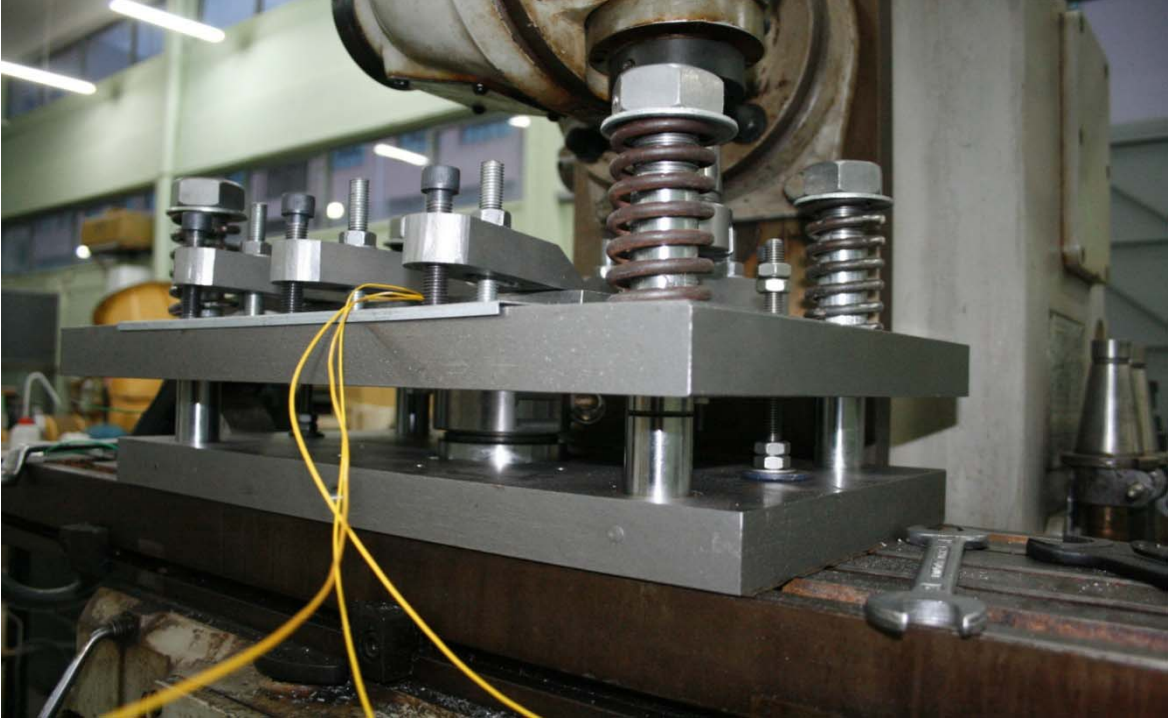
Şekil 18. Tabla ön görünüş



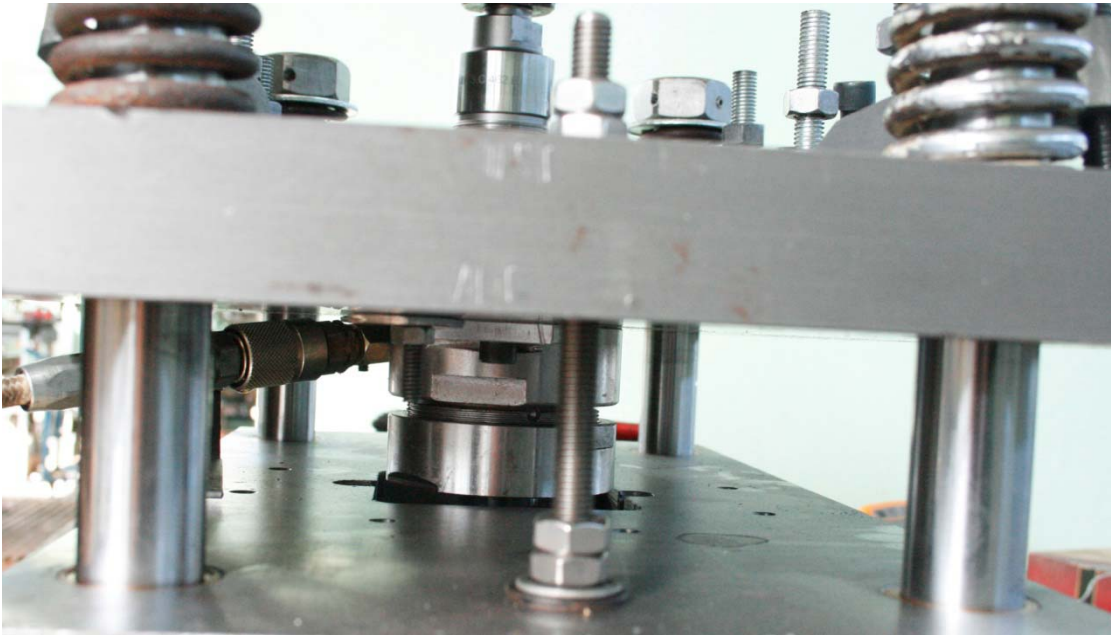
Şekil 19. Hidrolik sistem üst görünüş



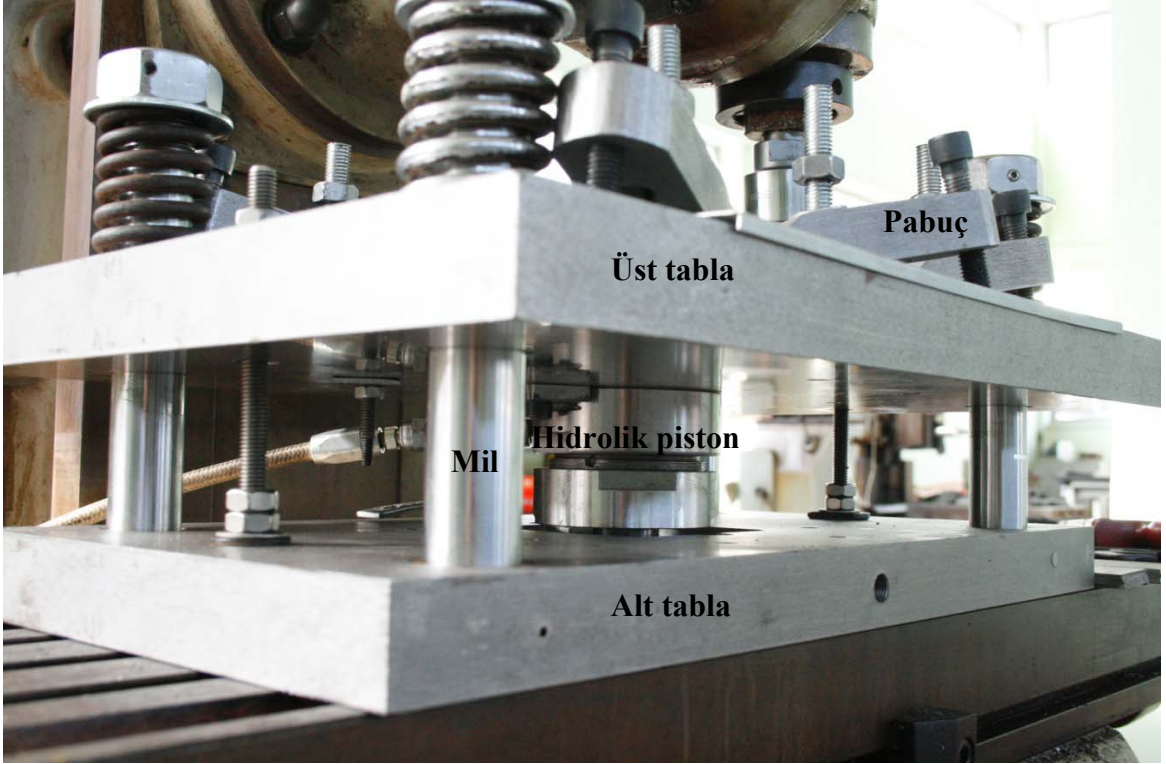
Şekil 20. Hidrolik sistem üst görünüş



Şekil 21. Hidrolik sistemin değişik açıdan görünüşü



Şekil 22. Deney düzeneğinin yandan görünümü hidrolik silindir detayı



Şekil 23. Deney düzeneğinin değişik açıdan görünümü ve tanımı

## 2.2. Karıştırıcı Uç

Karıştırıcı uç malzemesi olarak X 38 CrMoV5 3 (1.2367) sıcak iş takım çeliği seçilmiştir. Bu çelik yüksek sıcaklıkta mukavemeti ve aşınma direnci yüksek olan bir çeliktir.

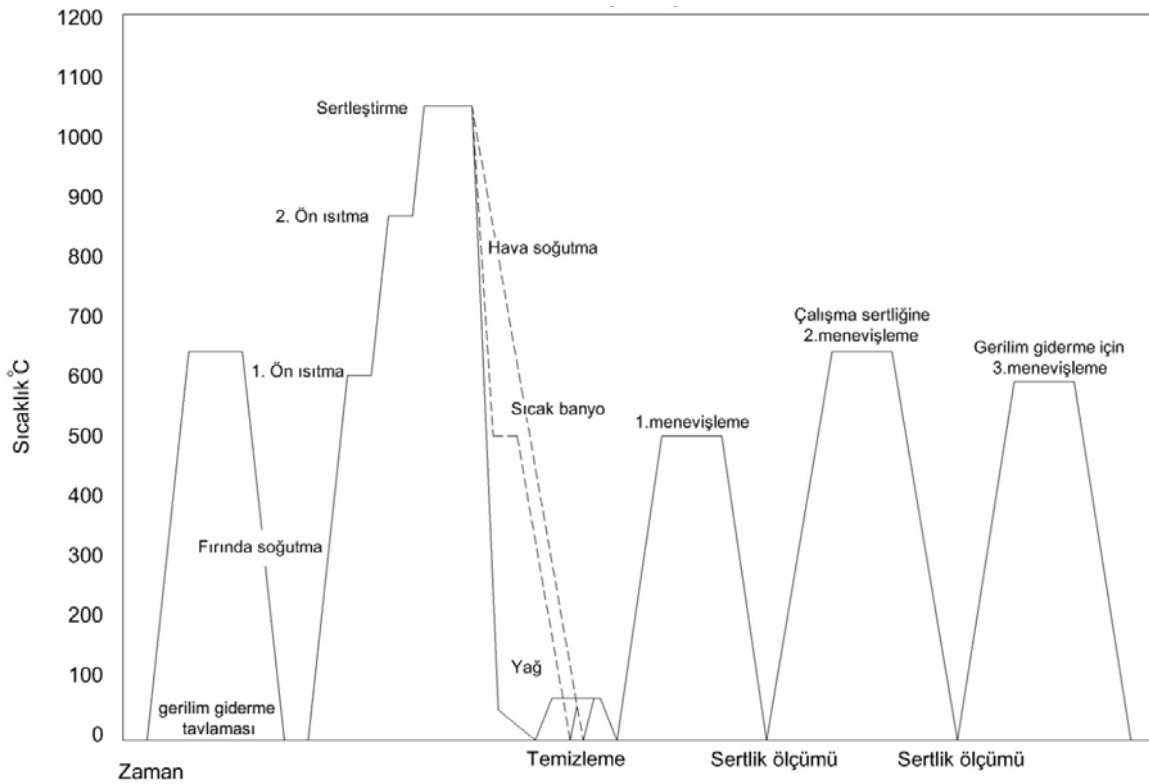
Tablo 5. Takım çeliğinin kimyasal bileşimi

Kimyasal Bileşim (%)			
C	Cr	Mo	V
0,37	5,00	3,00	0,60

Karıştırıcı uç aşağıdaki teknik resme uygun olarak imal edilmiştir. Kaynak yapılacak numunelerin kalınlığı 4 mm olduğu için takımın batıcı ucu 3.8 mm olarak tasarlanmıştır.

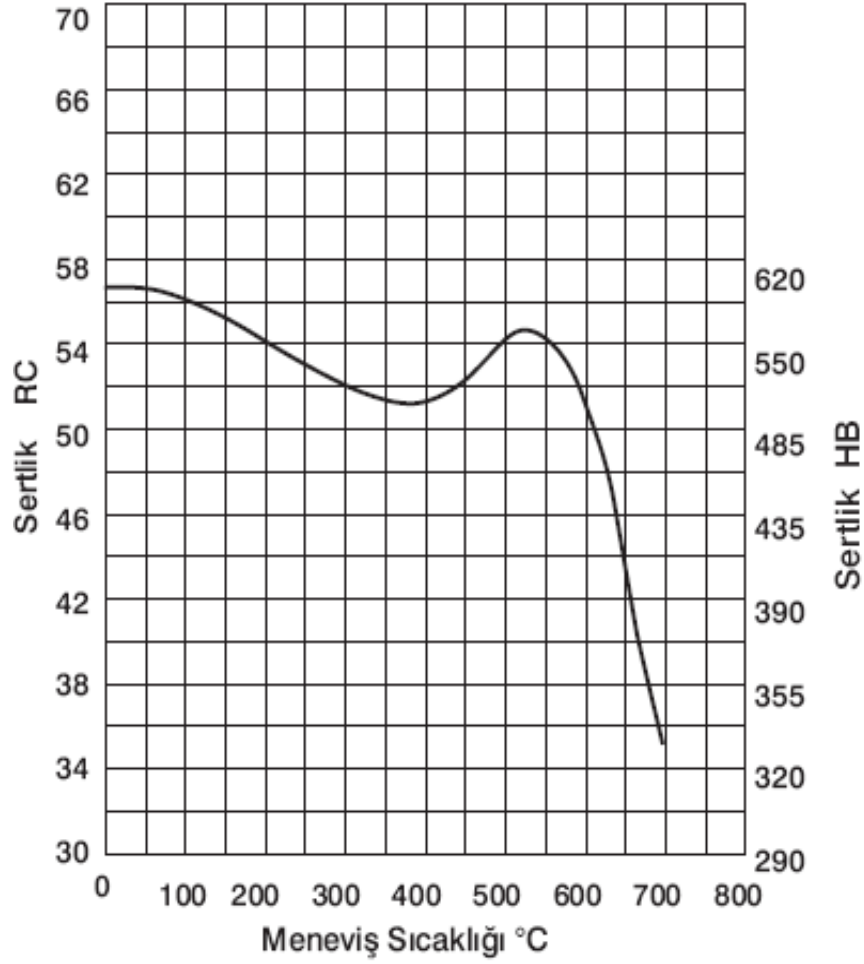
Tablo 6. Karıştırıcı uç malzemesinin ısı genleşme tablosu [23].

Fiziksel Özellikleri : Özgül ağırlığı : 20 °C'de 7,85 kg/dm <sup>3</sup> , Isıl genleşmesi : 20 °C'den ....°C'ye kadar, 10 <sup>-6</sup> m/(m.K) Isıl iletkenliği : 20 °C'de 25,0 W/(m.K)				
100 °C	200 °C	300 °C	400 °C	500 °C
11,5	12,0	12,2	12,5	12,9
<b>Isıl İşlemi :</b>				
Yumuşatma tavlaması : 750 - 800 °C				
Tavlama sonrası sertlik : En fazla 205 HB				
Gerilim giderme tavlaması : 600 - 650 °C				
Sıcak şekil verme : 1100 - 900 °C				
Sertleştirme : 1030 - 1080 °C				
Sertleştirme ortamı : Yağ, Sıcak banyo ( 500 - 550 °C ), Hava				
Sertleştirme sonrası sertlik : 52 - 56 HRC Yağ, Sıcak banyo				
50 - 54 HRC Hava				
Menevişleme sonrası sertlik :				
	400 °C	500 °C	550 °C	600 °C
	52 HRC	54 HRC	53 HRC	50 HRC

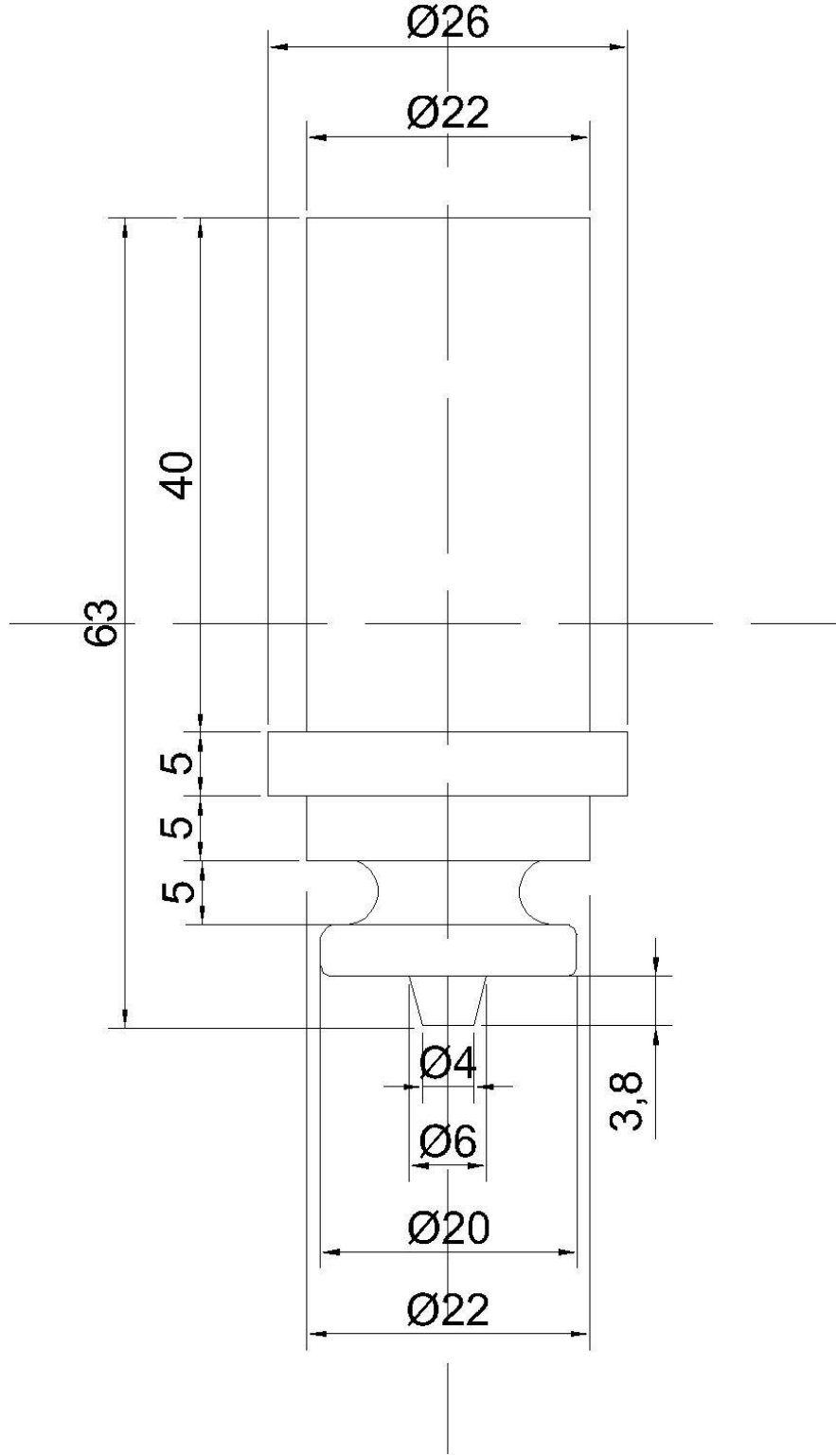


Şekil 24. Karıştırıcı uç malzemesinin ısı işlem şeması

Malzemeye Şekil 24'de görülen adımlarla ısıl işlem uygulanmıştır. Ayrıca takım malzemesinin ısıl işlemi esnasında yüzeyinde tufal oluŐmasını ve karbon kaybını önlemek için ısıl işlem uygulanmadan önce yüzeyi bakır ile kaplandı. Bu işlemler sonucunda Tablo 6'da verilmiş olan sertlik değerlerine eriŐilebilinmiŐtir.



Şekil 25. Takım malzemesinin sertlik değerinin meneviŐlenme sıcaklığına göre değişim grafiği [23].



Şekil 26. İmal edilen kaynak ucunun (takım) çizimi





Şekil 27. İmal edilen takımın yandan görünümü



Şekil 28. İmal edilen takımın üstten görünümü

### 2.3. Deney Malzemeleri

Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılacak malzemeler olarak seçilen AA7075 ve AA5754 alüminyum alaşımları özellikle endüstriyel alanda yaygın kullanımından dolayı ve özellikle AA7075 alaşımının diğer alüminyum alaşımlarına oranla daha zor kaynak kabiliyetinin olması sebebiyle özenle seçilmiştir. Deneylerde kullanılan numuneler 200x60x4 mm boyutlarda tedarik edilmiştir.

Tablo 7. AA 5754H22 Kimyasal bileşimi

KİMYASAL BİLEŞİMİ (%)									
Malzeme	%Fe	%Si	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ti	%Cr	%Al
AA5754	0,311	0,22	0,025	0,35	3,2	0,164	0,098	0,25	Geri Kalan

Tablo 8. AA 7075T651 Kimyasal bileşimi

KİMYASAL BİLEŞİMİ (%)									
Malzeme	%Cu	%Mn	%Mg	%Cr	%Zn	%Si	%Fn	%Ti+Zr	%Al
AA7075T651	1.80	0,30	2.55	0.24	5.55	0,40	0,50	0,25	Kalan

#### 2.4. Deneyde Kullanılan Tezgâh

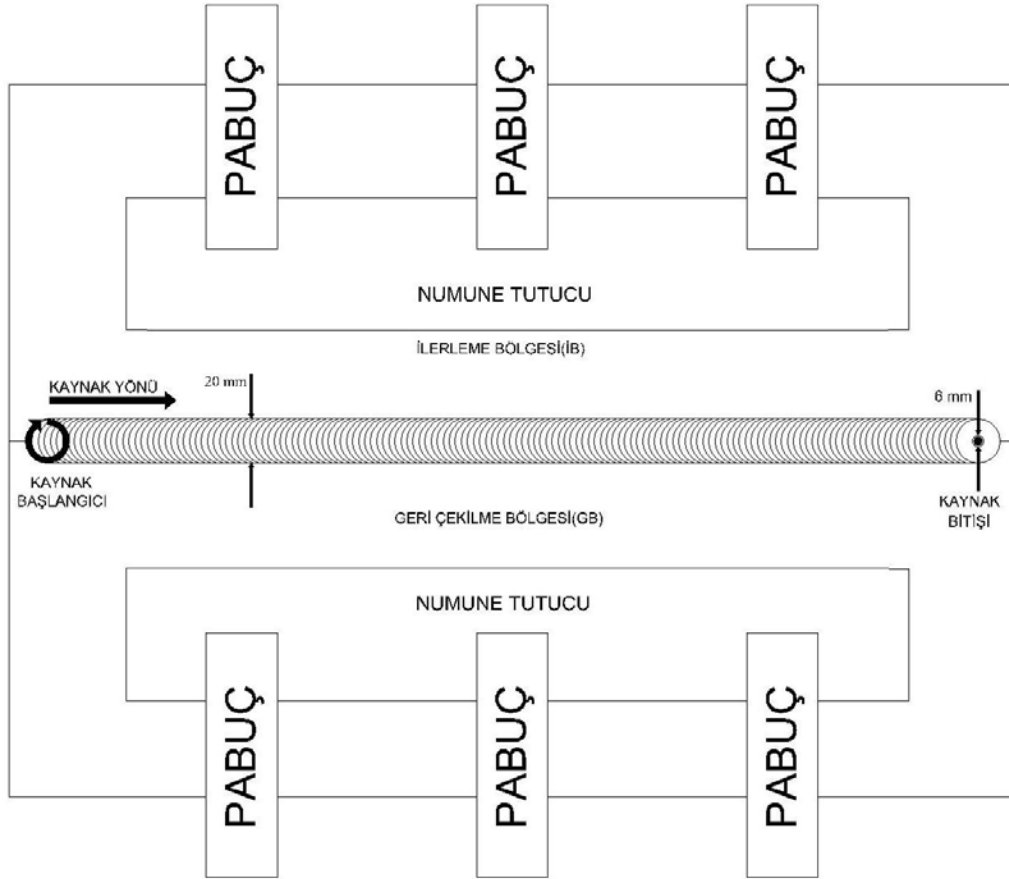
Kaynak işlemi için şekil 29’da görülen KTÜ makina mühendisliği bölümü takım tezgâhları atölyesinde bulunan devir sayısı 25 ile 1600 dev/dk arasında değiştirilebilen, tabla ilerleme sayısı 35 ile 1020 mm/dk arasında olan STANKOIMPORT marka ve tabla ölçüleri 1170 x 240 mm yarı otomatik freze tezgâhında yapılmıştır. Kaynak yapılacak numuneler alın alına gelecek şekilde freze tezgâh tablası üzerine bağlanan hidrolik silindir üzerine pabuçlar yardımıyla sabitlenmiştir. Karıştırıcı uç, frezenin dikey miline monte edilmiştir. Belirlenen parametreler kullanılarak numuneler tek yönlü kaynak edilmiştir.



Şekil 29. Deneyde kullanılan freze tezgâhı



Şekil 30. Kaynak yönü görüntüsü



Şekil 31. Kaynak doğrultusu şeması

## 2.5. Kaynak İşlemi İçin Seçilen Kaynak Parametreleri

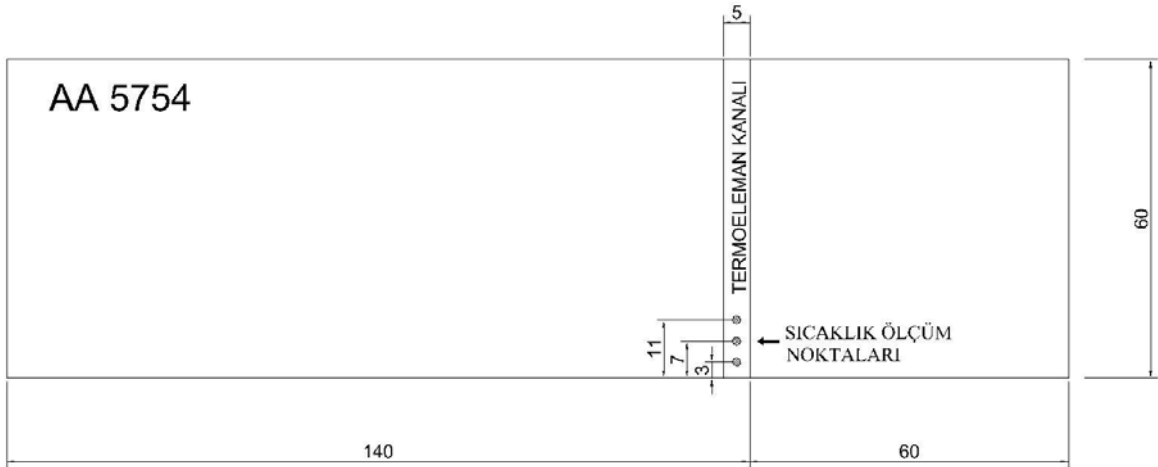
Kaynak için belirlenen malzemeler piyasadan hazır olarak tedarik edildi. Sürtünme karıştırma kaynağı öncesi kaynak edilecek numunelere kaynak öncesi herhangi bir ek ısıl işlem yapılmamıştır. Kaynak uygulanacak numuneler uzun kenarları temas edecek şekilde pabuçlar yardımıyla tabla üzerine bağlanmıştır. X 38 CrMoV 5.3 sıcak iş çeliğinden yapılan 20 mm omuz çapındaki karıştırıcı uç frezenin düşey miline monte edilmiştir. Bununla birlikte çizelgedeki kaynak parametreleri kullanılarak kaynak yapılmıştır. Karıştırıcı ucun batıcı kısmı kaynak numunelerine öncede açılmış başlangıç deliğine hizasında batırılmış ve sadece karıştırıcı dönme hareketi yaparak ısı girdisi sağlamak amacıyla 20-30 saniye sürtünme hareketi uygulanmıştır. Belirlenen kaynak parametreleri (ilerleme hızı, devir sayısı) numunelere uygulanmıştır. Numunelerin kalınlığı 4 mm olduğu için hidrolik silindire zarar verilmesin diye karıştırıcı takımın batıcı uç kısmı uzunluğu 3,8 mm olarak imal edilmiştir.

Tablo 9. Kaynak parametreleri tablosu

Deney No	Devir Sayısı (d/dk)	İlerleme Hızı (mm/dk)	Yük (N)
1	1000	85	6500
2			8500
3			10000
4			11500
5		115	6500
6			8500
7			10000
8			11500

## 2.6. Isıyı Ölçmek İçin Kullanılacak Termoelemanların (Thermocouple) Numuneler Üzerine Yerleştirilmesi ve Isı Ölçülmesi

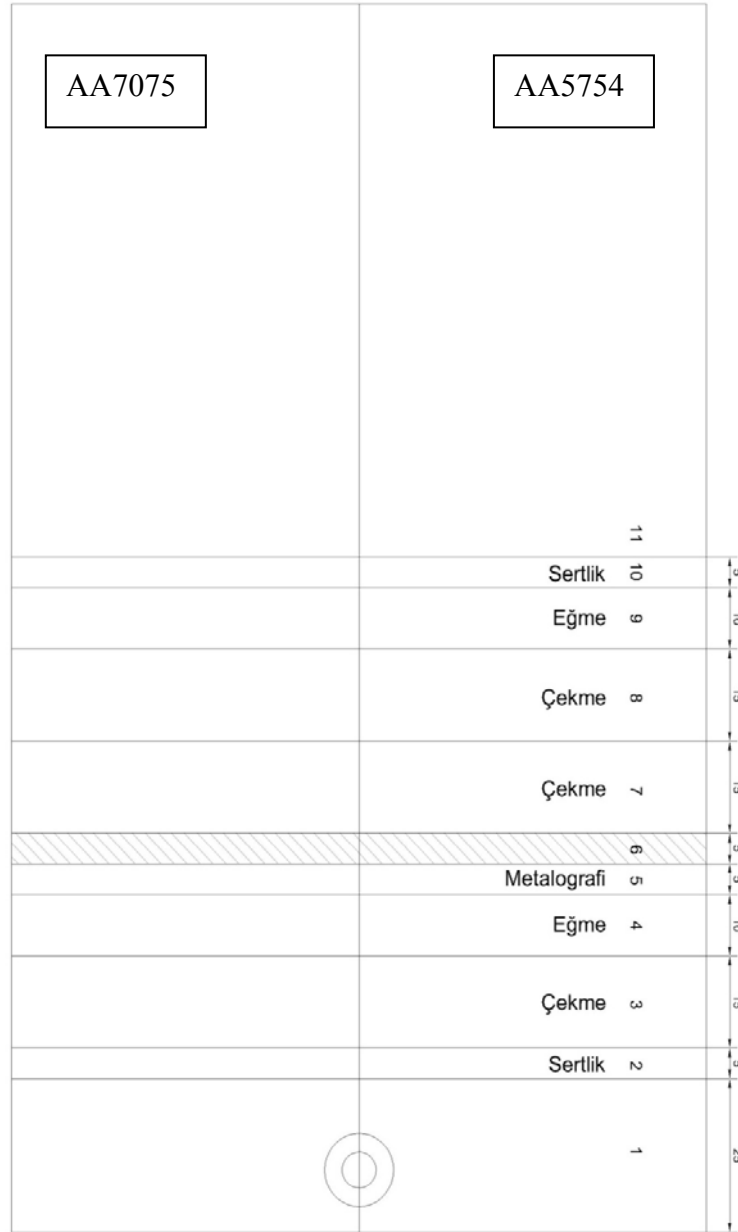
Deneyleerde oluşan sıcaklığı ölçmek için termoeleman (thermocouple) kullanılmıştır. Kaynak edilecek numunelerin ısı iletim katsayıları birbirine oldukça yakın değerlerde olmasından dolayı sıcaklık ölçümleri sadece bir tanesinde (AA5754) gerçekleştirilmiştir. Bunun için AA 5754'ün arka yüzey kısmına 5 mm genişliğinde bir kanal açılmış ve açılan bu kanal üzerine Şekil 32'de gösterilen biçimde 1,5 mm çapında delikler açılarak 3 adet termoeleman yerleştirilmiştir.



Şekil 32. Numune üzerindeki Termoeleman yerleştirmelerinin gösterimi

## 2.7. Mekanik Testler ve Metalurjik Muayene İçin Numunelerin Hazırlanması

Kaynak işlemi yapılan her bir numune fotoğraf ile görüntülenmiştir. SKK ile birleştirilen parçalardan numunelerin çıkarılış yerleri şekil 33’de gösterilmiştir. Numuneler yapılacak deneylere göre TSE 138-F’e göre uygun numuneler çıkartılmıştır. Kaynağın başlangıcından ve bitiş kısmından 25 mm olan kısımlar kullanılmamıştır. Bunun sebebi kaynağın başlangıcı ve sonundaki istikrarsız (homojen olmayan) bölgelerin değerlendirme işlemlerinde kullanılmamaktır.



Şekil 33. Test numunelerinin kaynaklı bölgedeki yeri

## 2.8. Metalografik İncelemeler

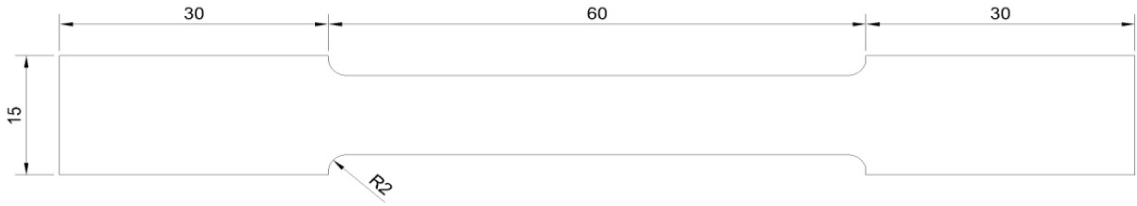
Kaynak sonrası numunelerde mikro yapıları belirlemek için kesilen ve bakalite alınan kaynak bölgeleri sırasıyla 150-220-400-600-800-1000-1500 numara zımpara ile sulu ortamda zımparalanmıştır. Sonraki işlem olarak numuneler alümina kullanılarak dönen parlatici disk yardımıyla parlatılmış ve uygun çözelti olarak 0,95 ml saf su, 1 ml HF, 1,5 HCl, 2,5 ml HNO<sub>3</sub> ile dağlanmış ve LEICA marka stereo mikroskopta incelenmiştir.

## 2.9. Mikro Sertlik Ölçümleri

Kaynaklı numunelerin sertlik ölçümleri için KTÜ makine müh. Bölümü malzeme bilimleri laboratuvarında ki INSTRON marka sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri bakalite alınmış kaynaklı numunelerin kaynak doğrultusunun x ekseninde 0.4 mm aralıklarla ölçülüp bunu takiben kaynak bölgesinde 0.2 mm (200 mikron) aralıklarla ölçülmüştür. Kaynak doğrultusunun düşey yönü y ekseninde 100 mikron ileriden 0.2 mm aralıklarla ölçülmüştür. Sertlik ölçümleri 2 kg yük altında 10.sn bekleme süresi uygulanarak ölçülmüştür.

## 2.10. Çekme Deneyleri

Çekme deneyleri şekil 34'de gösterilen teknik resme uygun olarak hazırlanmış olup bölümümüzde bulunan INSTRON 3382 marka çekme cihazı kullanılarak TS-138 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Kaynak numuneleri aşağıdaki şekle uygun olarak freze tezgâhında hazırlanmıştır. Kaynak edilen her bir numuneden en az 3 adet olmak üzere çekme numuneleri hazırlanarak deneye tabi tutulmuştur. Elde edilen sonuçların birbirleriyle çelişecek durumda elde edilmesi durumunda ek numuneler hazırlanarak deneyler tekrarlanmıştır.



Şekil 34. Çekme numunesi teknik resmi

### 2.11. Eğme Deneyi

Eğme deneyleri bölümümüz atölyesinde TREBEL marka universal çekme cihazı kullanılarak yapılmıştır. Eğme numuneleri TSE 6067 standartlarına uygun şekilde hazırlanmıştır. İlgili standarda göre madren çapı (d) / numune kalınlığı oranı 4 olacak şekilde madren çapı seçilmiştir. Kesilen numunelerde deney sonuçlarını olumsuz etkileyecek pürüzlükler ve çentikler için eğleme ve zımparalama işlemi yapılmıştır. Deney numuneleri 180° açıyla eğilmiştir. Kaynak edilen her bir numuneden 2 adet eğme numunesi çıkartılarak eğme işlemine tabii tutulmuştur. Eğme deneyi sonucunda numunelerde eğilme bölgelerinde herhangi bir hasar olup olmadığı incelenmiştir.

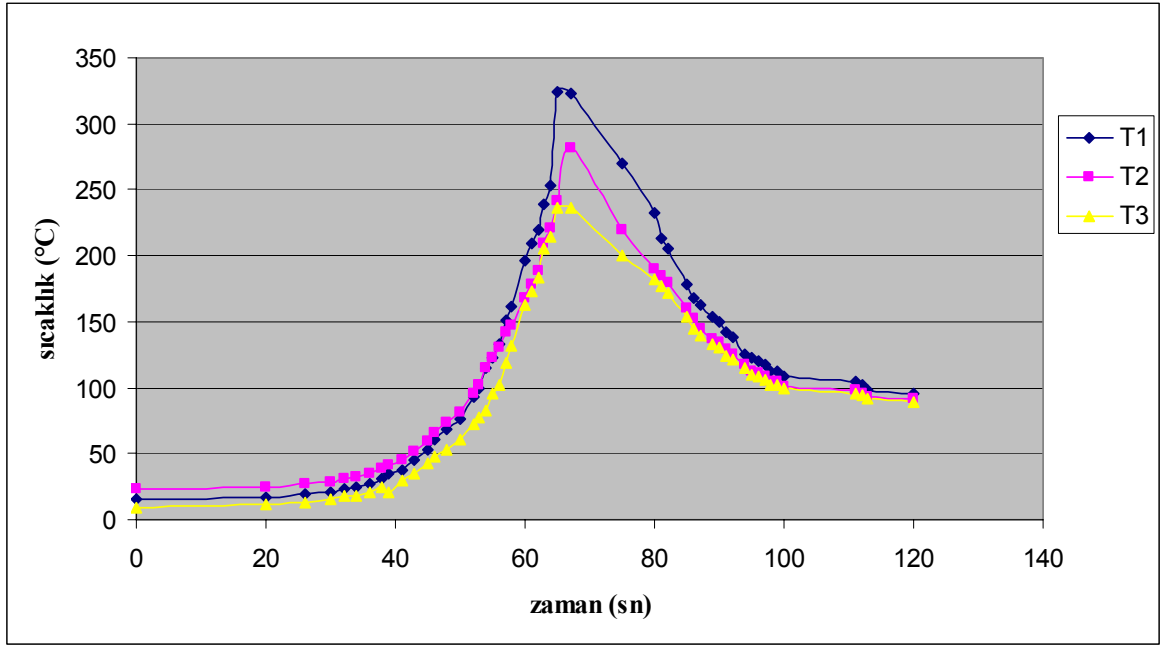


### **3. BULGULAR VE TARTIŞMA**

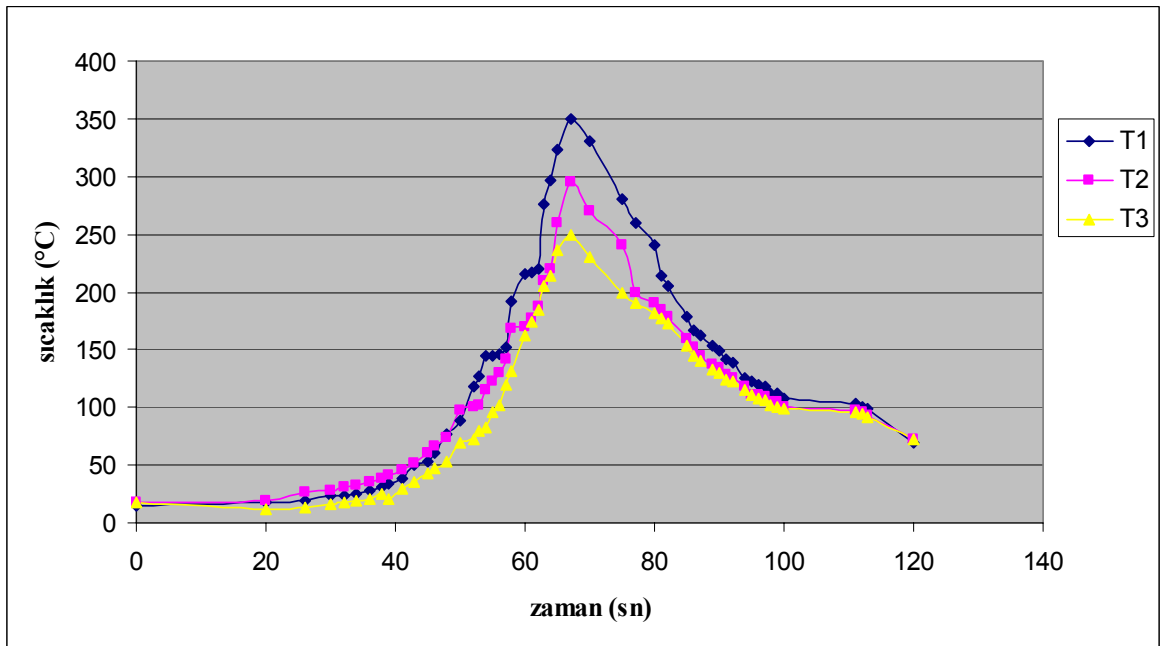
Kaynak işleminden sonra numunelere görsel muayene, mikro sertlik, çekme ve eğme deneyleri, metalografik inceleme ve SEM analizi yapılmıştır.

#### **3.1. Sıcaklık Ölçüm Sonuçları**

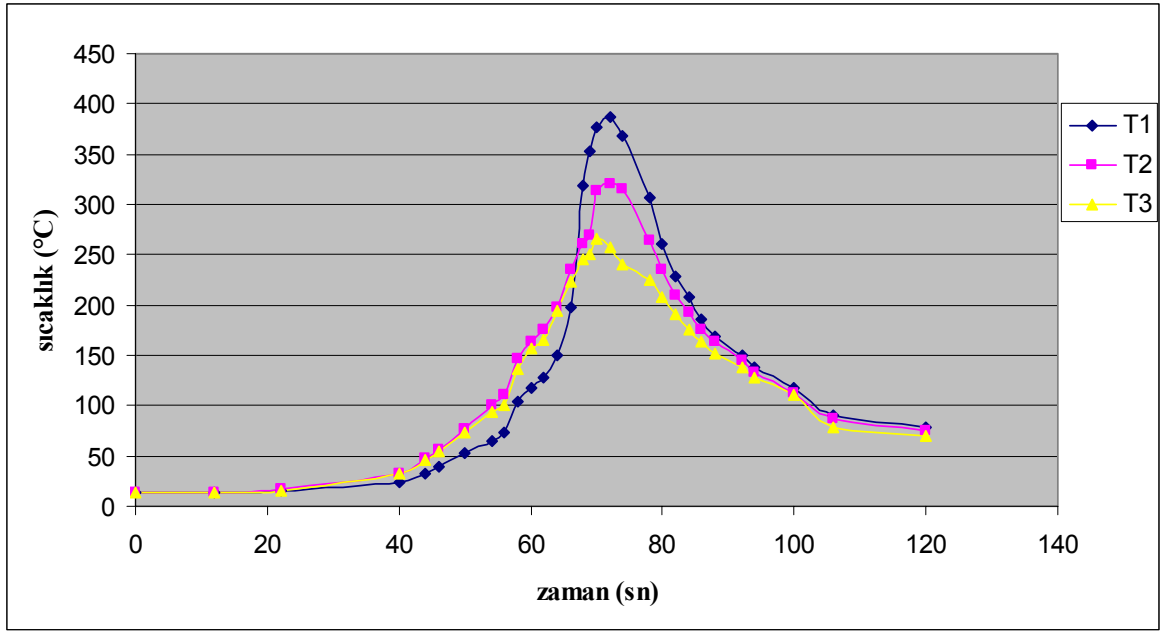
Deneylerin gerçekleştirilmesi sırasında numunelerin birleşme bölgelerindeki sıcaklık seviyeleri ve bu sıcaklıkların zamana ve takım ilerleme hızına göre değişimleri belirlenmiştir. Bütün deneylerde sıcaklıklar K tipi termoeleman yardımıyla ölçülmüştür. Deneylerde elde edilen T1, T2 ve T3 sıcaklıkları şekil 32’de gösterildiği gibi sırasıyla kaynak birleşme bölgesinden 3, 7, 11 mm mesafeden alınmıştır. Bütün deneylerde sıcaklık eğrilerinin karakteristiği hemen hemen benzer şekildedir. Bu değişim, kaynak esnasında gitgide artan sıcaklığın bir zirve değerine erişmesinden sonra daha yavaş bir hızda tekrar azalmıştır. İlerleme hızının ve baskı kuvvetinin artması ile ölçülen kaynak sıcaklığında belirgin artış olduğu görülmüştür. Deneyler boyunca en yüksek sıcaklık değeri 1000 d/dk, 85 mm/dk ve 11500N yük altında gerçekleşen 4. deneyde 397°C olarak ölçülmüştür. Bunun sebebi olarak, artan takım kuvveti ile baskıya bağlı olarak artan sürtünme kuvvetinin etkisine ek olarak ilerleme hızının diğer deneylere oranla düşük olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bu durum, takım baskı kuvvetlerinin aynı, takım ilerleme hızlarının ise farklı olduğu deneylerde gerçekleştirilen sıcaklık ölçümlerindeki değişiklik ile de doğrulanmaktadır. Takım ilerleme hızının daha yüksek olduğu deneylerde, aynı koşullarda daha düşük takım ilerleme hızlarına sahip olan deneylerde ölçülen sıcaklıkların daha düşük ölçüldüğü görülmüştür. Bunun sebebi, takım ilerleme hızının artması, deneyler esnasında oluşan sürtünme ile açığa çıkan ısının numunelere aktarılması için geçen sürenin daha kısa olmasından dolayı ısı girdisinin de azalmasıdır.



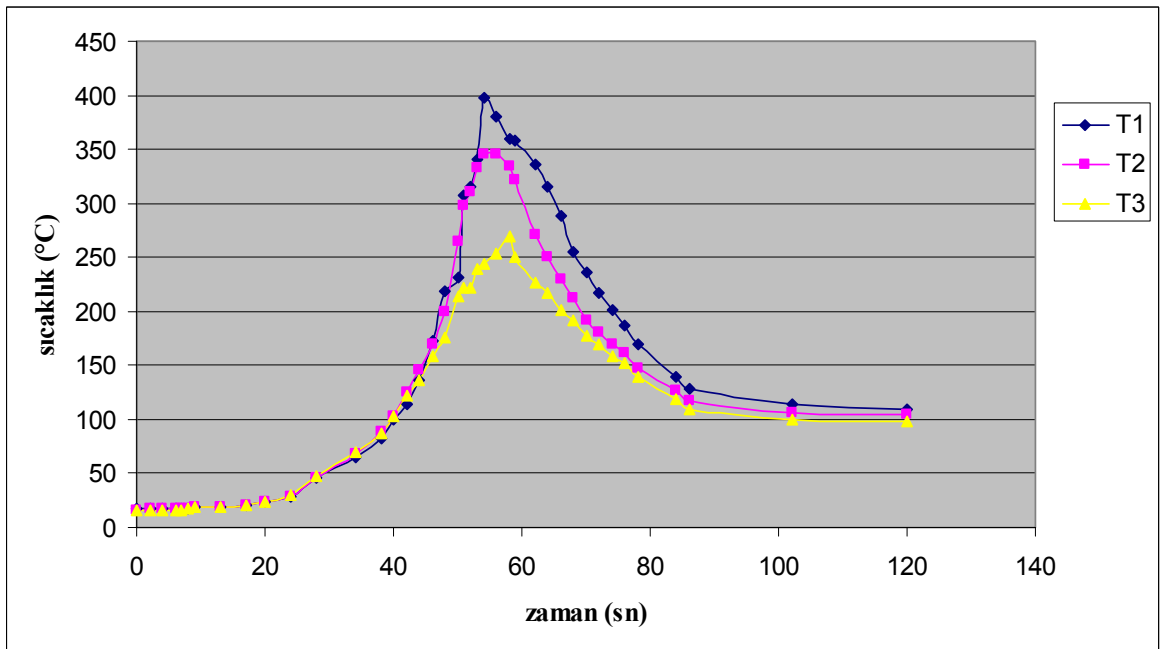
Şekil 35. 1000 dev/dk, 85mm/dk ve 6500N yük altında gerçekleştirilen deneyin sıcaklık değişim grafiği



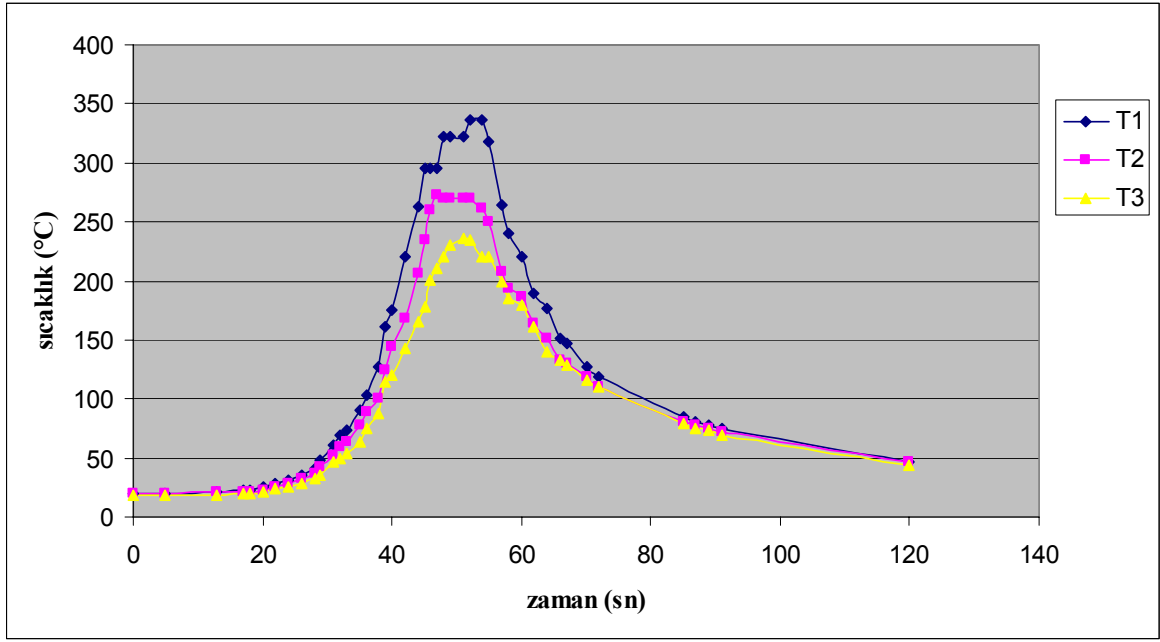
Şekil 36. 1000 dev/dk, 85mm/dk ve 8500N yük altında gerçekleştirilen deneyin sıcaklık değişim grafiği



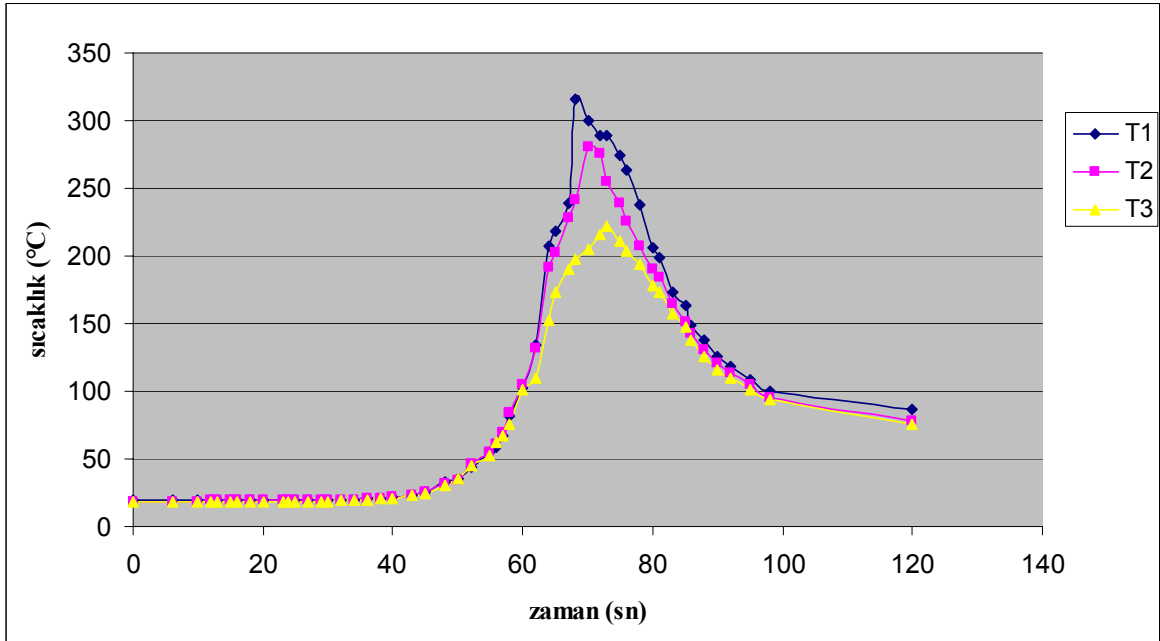
Şekil 37. 1000 dev/dk, 85mm/dk ve 10000N yük altında gerçekleştirilen deneyin sıcaklık değişim grafiği



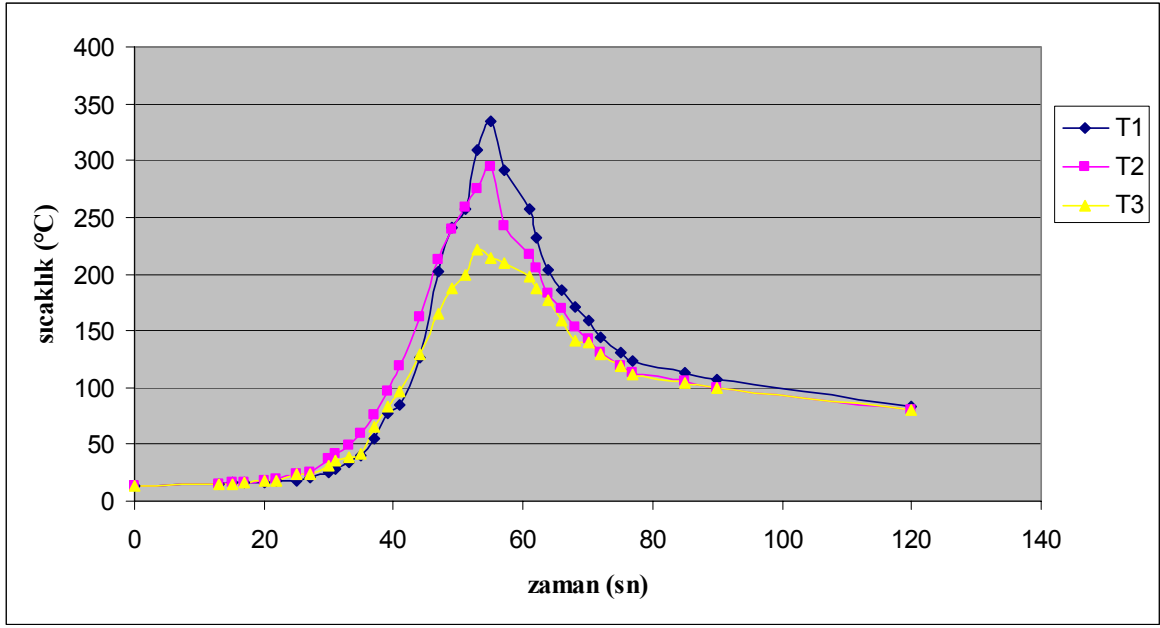
Şekil 38. 1000 dev/dk, 85mm/dk ve 11500N yük altında gerçekleştirilen deneyin sıcaklık değişim grafiği



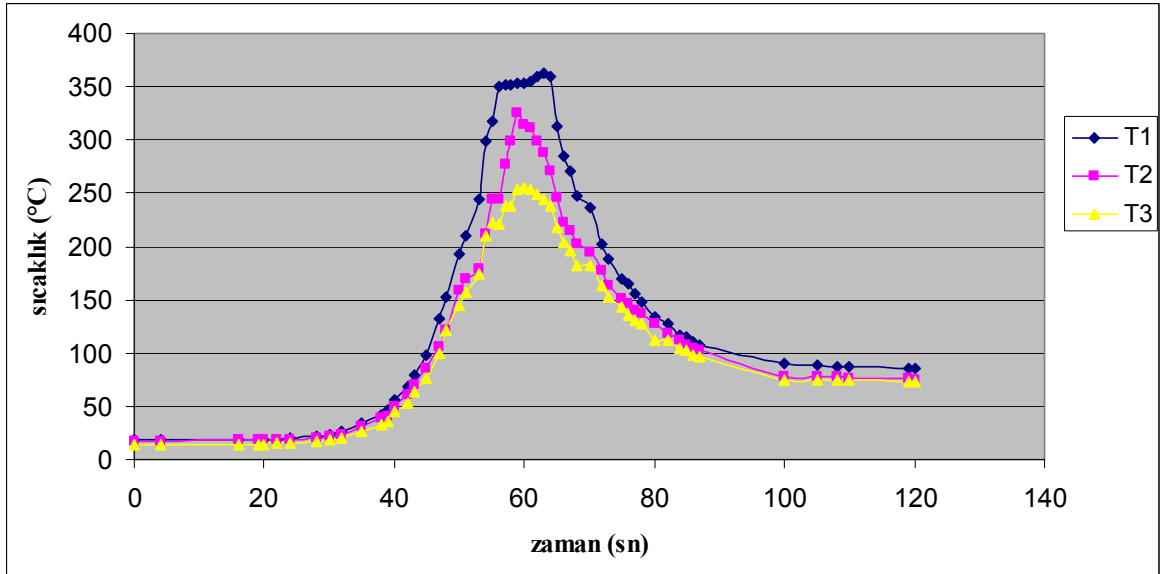
Şekil 39. 1000 dev/dk, 115mm/dk ve 6500N yük altında gerçekleştirilen deneyin sıcaklık değişim grafiği



Şekil 40. 1000 dev/dk, 115mm/dk ve 8500N yük altında gerçekleştirilen deneyin sıcaklık değişim grafiği



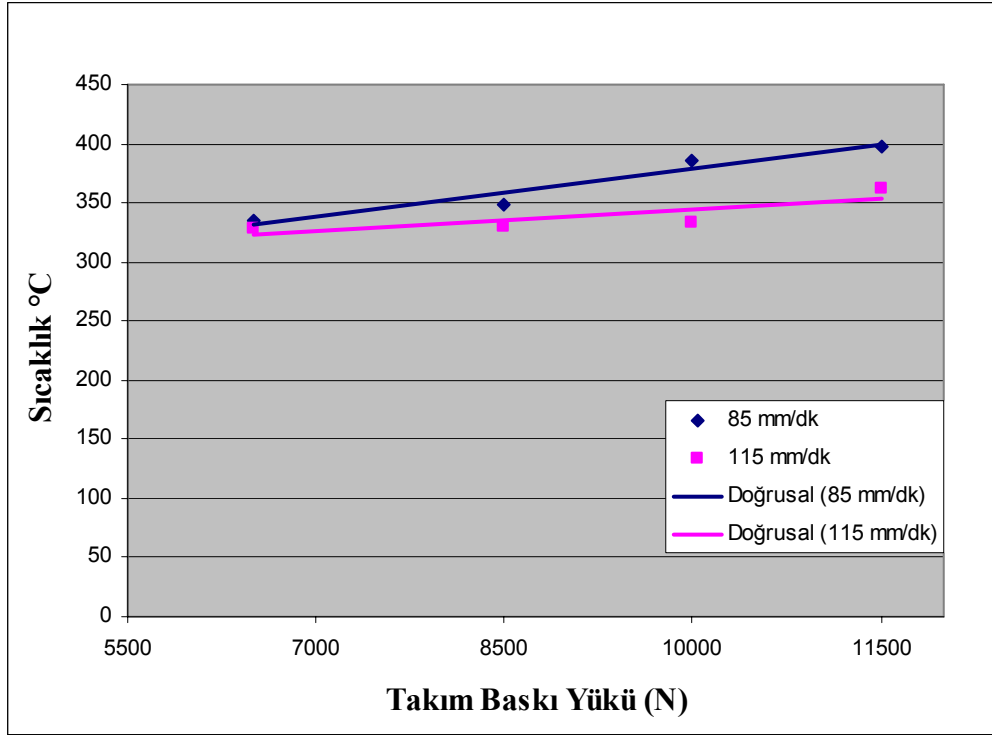
Şekil 41. 1000 dev/dk, 115mm/dk ve 10000N yük altında gerçekleştirilen deneyin sıcaklık değişim grafiği



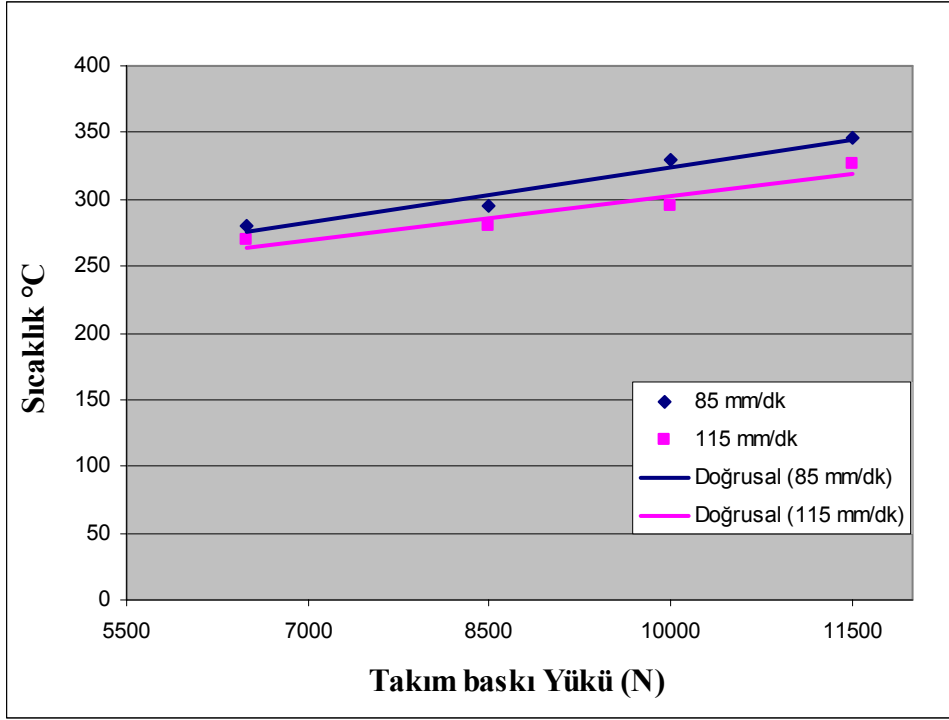
Şekil 42. 1000 dev/dk, 115mm/dk ve 11500N yük altında gerçekleştirilen deneyin sıcaklık değişim grafiği

Şekil 43’de görüldüğü gibi 1000 d/dk devir sayısında, 85 mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirilen deneylerde artan takım baskı kuvveti kaynak esnasında, kaynak bölgesinin orta kısmında oluşan sıcaklıkları artırmıştır. Diğer taraftan aynı şartlar altında artan ilerleme hızı erişilen sıcaklık seviyesinin daha düşük kalmasına yol açmıştır.

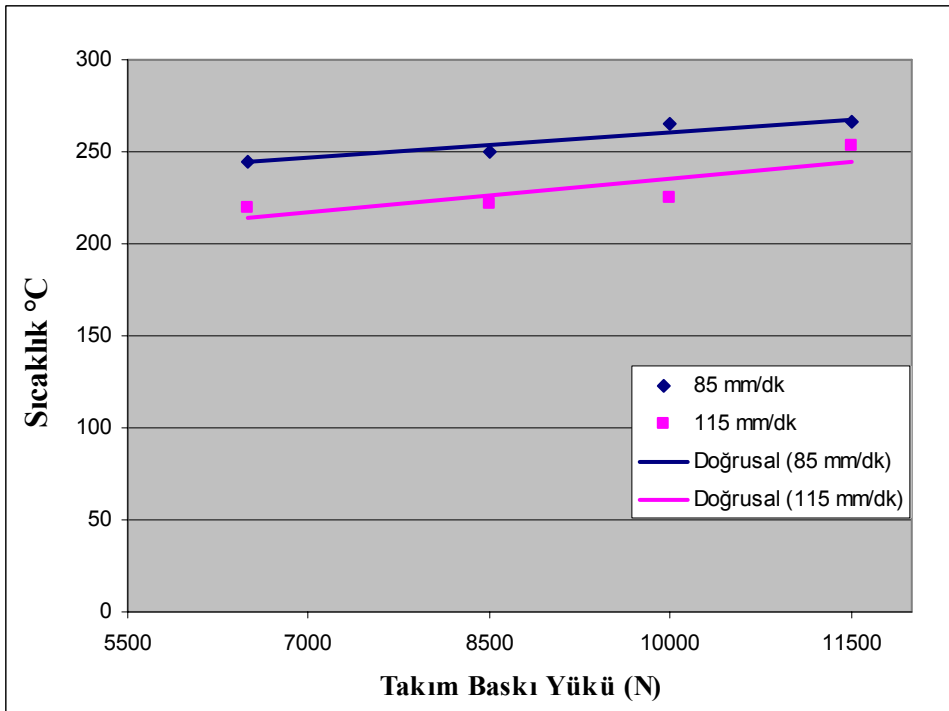
1000 d/dk devir sayısında, 85 ve 115 mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirilen kaynaklarda artan takım baskı kuvveti, en çok T2 sıcaklığını etkilemektedir.



Şekil 43. Artan baskı kuvvetlerinde T1 noktasında elde edilen en yüksek sıcaklık değerlerinin grafiğı



Şekil 44. Artan takım baskı kuvvetinde T2 noktasında ölçülen en yüksek sıcaklık değerinin değişimi.



Şekil 45. Artan baskı kuvvetlerinde T3 noktasında elde edilen en yüksek sıcaklık değerinin değişimi.

Şekil 45’de görüldüğü gibi 1000 d/dk devir sayısında, 85 ve 115 mm/dk ilerleme hızında gerçekleştirilen kaynaklarda artan takım baskı kuvveti T3 noktasında ölçülen sıcaklık değerini diğer deneylerle uyumlu şekilde arttırırken, artan ilerleme hızının T3 noktasında ölçülen sıcaklık değerini diğer sıcaklık ölçüm noktalarına oranla daha fazla etkilemekte olduğu görülmüştür. Bu durum, artan takım ilerleme hızı ile açığa çıkan ısı miktarındaki azalmaya ek olarak ısıtılması gereken malzeme kütesinin de artmasından (karıştırıcı uçtan uzaklaşmış olma ile) kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 43-45 artan baskı kuvvetlerinin T1, T2 ve T3 sıcaklıklarını genel olarak arttırırken, artan ilerleme hızının T1,T2 ve T3 sıcaklıklarını genel olarak düşürmekte olduğu açıkça görülmektedir. Bu koşullarda, oluşan sıcaklık değerlerinin, artan baskı kuvvetlerine oranla, ilerleme hızından daha fazla etkilenmekte olduğu anlaşılmaktadır.

### 3.2. Görsel Muayene

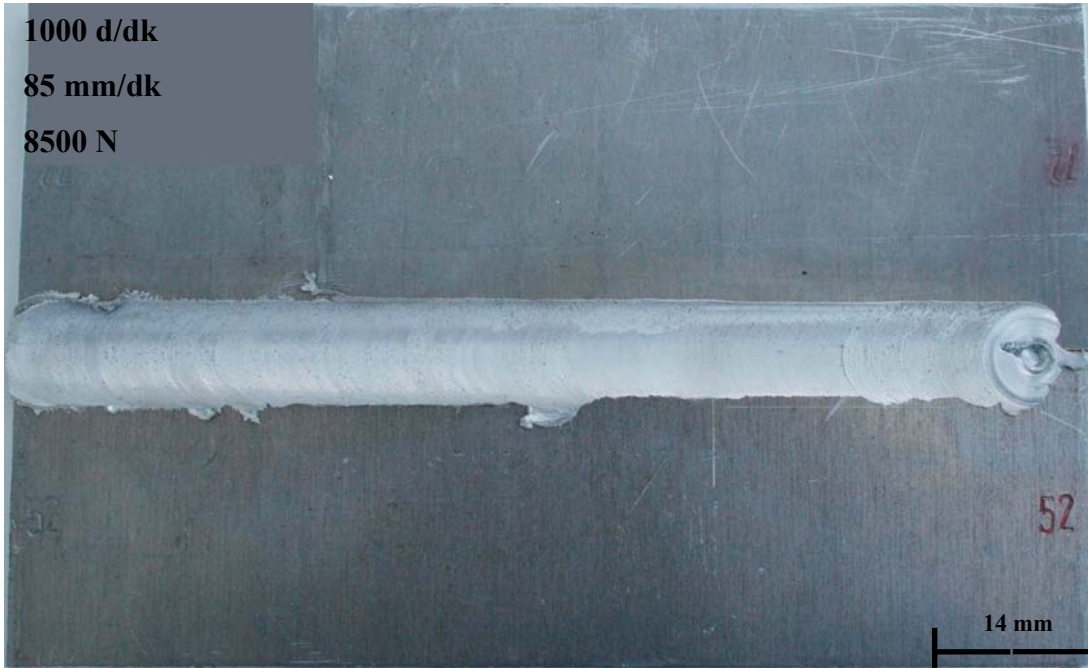
Yapılan görsel muayene sonucunda Şekil 37-45’den görülmekte olduğu gibi, SKK yönteminin diğer eğritmeli kaynak yöntemleri ile kıyaslandığı zaman görüntü ve yüzey kalitesi yönünden daha üstün olduğu (yüzey pürüzlülüğü düşük) açıkça görülmektedir. Aşağıdaki şekillerden de görüldüğü gibi, sabit devir sayısı ve sabit yük altında artan ilerleme hızı yüzey kalitesini olumsuz etkilemiştir. Şekil 46-53’den görüldü gibi artan ilerleme hızı kaynak dikişi bölgesinde yüzey pürüzlülüğün ve oluşan çapakların artmasına sebep olmuştur.

Artan yük değerleri koşullarında oluşan yüzey pürüzlülüğünde ise belirgin bir azalmaya yol açarken, sabit devir sayısı ve sabit ilerleme hızında artan takım yükü, kaynak bölgesinde oluşan çapak miktarının arttığı görülmektedir. Şekil 50, 6500 N’luk düşük bir takım yüküne karşılık, yüksek takım ilerleme hızı ile gerçekleştirilen kaynak işleminde, birleşme bölgesindeki pürüzlü yüzey oluşumunu göstermektedir. Artan takım baskı kuvvetinin birleşme bölgesinde çapak oluşumunu arttırması, artan sıcaklıkla birlikte malzemelerin mukavemet değerlerindeki azalma sonucunda, sabit tutulan takım baskı kuvvetinin takımı malzemeye daha fazla batırmasından kaynaklanan malzeme taşmalarıdır.





Şekil 46. 1000 d/dk dönme hızında 85 mm/dk ilerleme hızında 6500 N yük altında yapılan deneyde elde edilen kaynaklı numune



Şekil 47. 1000 d/dk dönme hızında 85 mm/dk ilerleme hızında 8500 N yük altında yapılan deneyde elde edilen kaynaklı numunenin görünümü



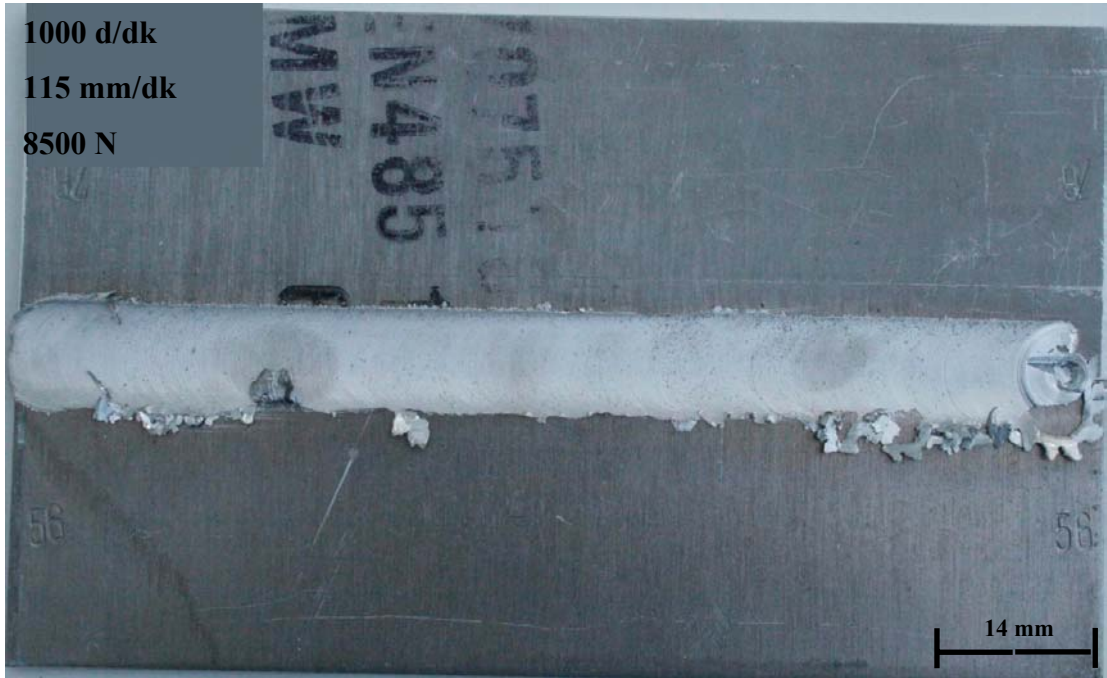
Şekil 48. 1000 d/dk dönme hızında 85 mm/dk ilerleme hızında 10000 N yük altında yapılan deneyde elde edilen kaynaklı numunenin görünümü



Şekil 49. 1000 d/dk dönme hızında 85 mm/dk ilerleme hızında 11500 N yük altında yapılan deneyde elde edilen kaynaklı numune



Şekil 50. 1000 d/dk dönme hızında 115 mm/dk ilerleme hızında 6500 N yük altında yapılan deneyden elde edilen numune



Şekil 51. 1000 d/dk dönme hızında 115 mm/dk ilerleme hızında 8500 N yük altında yapılan deneyden elde edilen numune



Şekil 52. 1000 d/dk dönme hızında 115 mm/dk ilerleme hızında 10000 N yük altında yapılan deneyden elde edilen numune

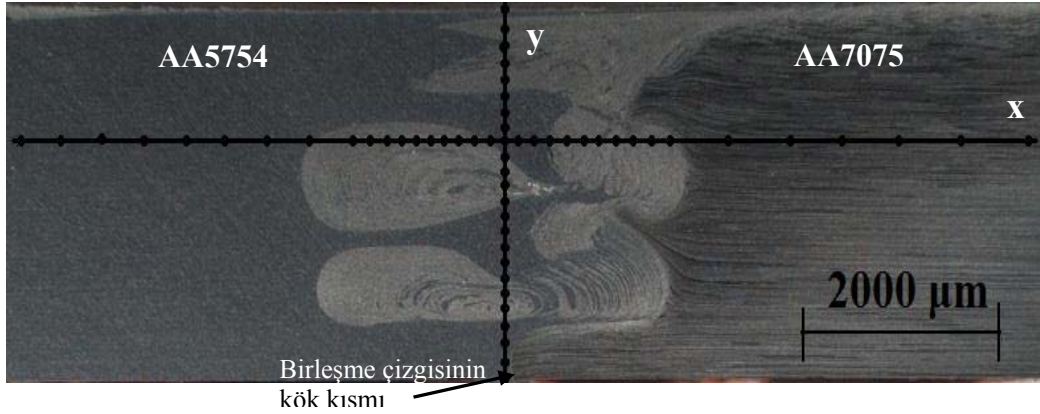


Şekil 53. 1000 d/dk dönme hızında 115 mm/dk ilerleme hızında 11500 N yük altında yapılan deneyden elde edilen numune

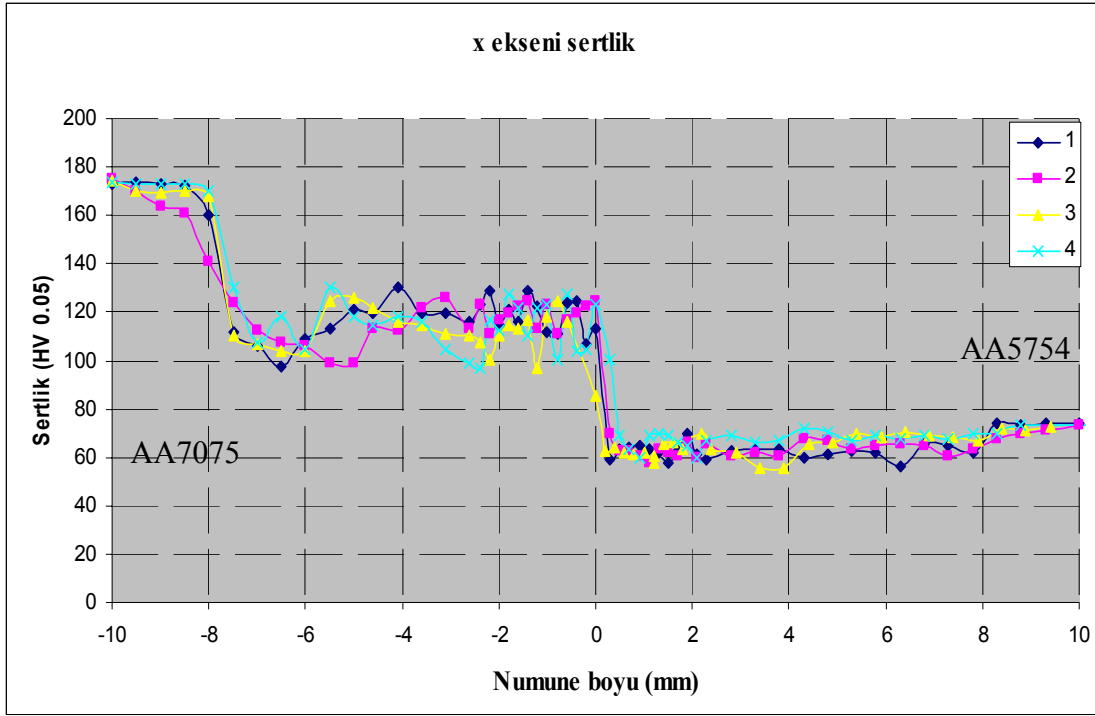
### 3.3. Mikro Sertlik Ölçüm Sonuçları

Mikro sertlik değerleri, Vickers ucu ile 2 kg'lık yükleme ve 10 saniyelik süre kullanılarak ölçülmüştür. Deneylede kullanılan malzemenin kaynak işleminden önceki sertlik değerini belirlemek amacıyla malzemenin ana yapısının sertlik değeri mikro sertlik ölçümü ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda AA7075 malzemenin ortalama sertlik değerinin 176 VSD2/10 olduğu, AA5754 malzemesinin ortalama sertlik değeri ise 74 VSD2/10 olduğu belirlenmiştir.

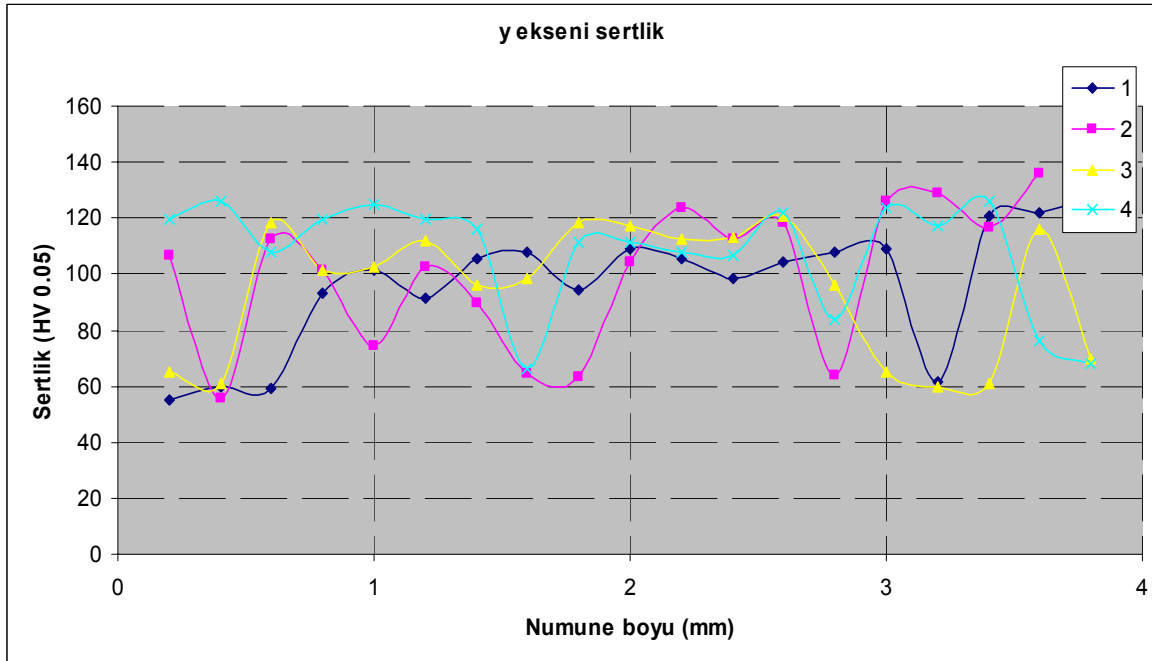
Kaynaklanan numunelerde sertlik değerleri Şekil 54'de belirtildiği gibi x (numunelerin yaklaşık orta bölgesi) ve y (yaklaşık birleşme çizgisi) eksenlerindeki belirli adımlarla ölçülmüş ve elde edilen veriler yardımıyla çizilen grafikler Şekil 55-58'de verilmiştir. Gerçekleştirilen ölçümlerde, kaynak bölgesindeki y ekseninde 0,2 mm'lik adım kullanılmıştır. x eksenindeki ölçümlerde ise kaynak bölgesinde 0,2 mm'lik adımlardan sonra esas metale yakın bölgelerde daha geniş (0,5 mm) adımlar kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir.



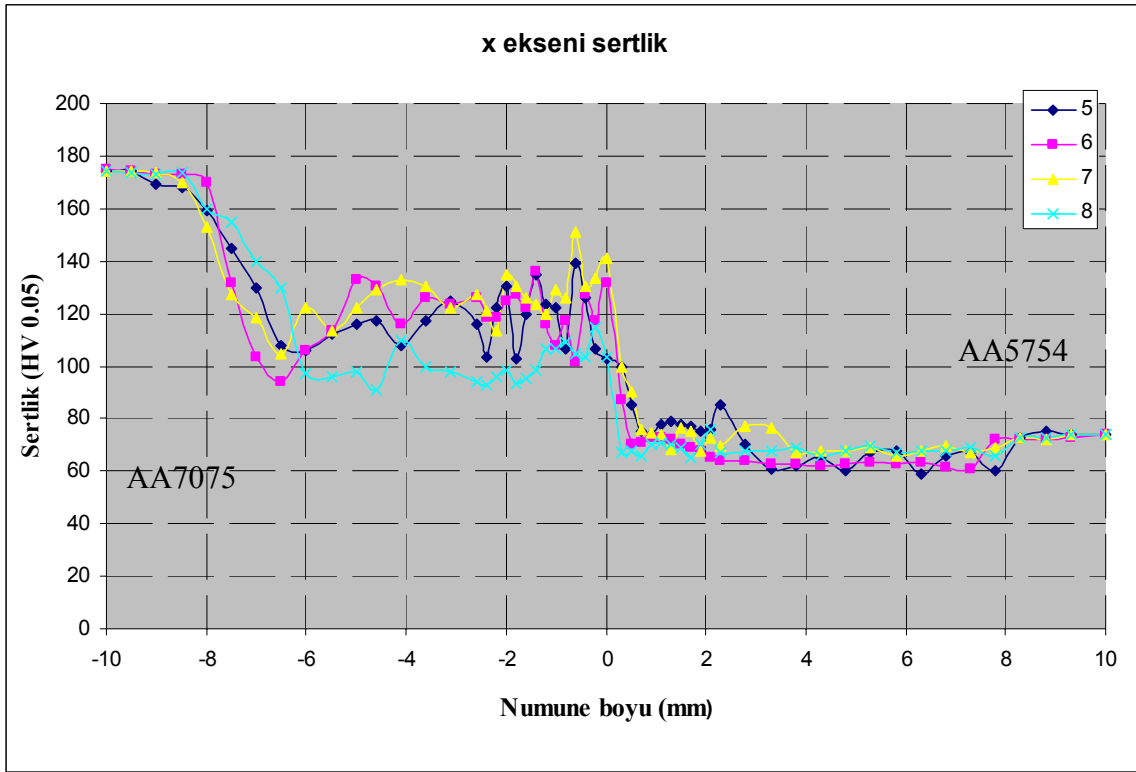
Şekil 54. Kaynaklı bölgede mikro sertlik ölçüm doğrusu



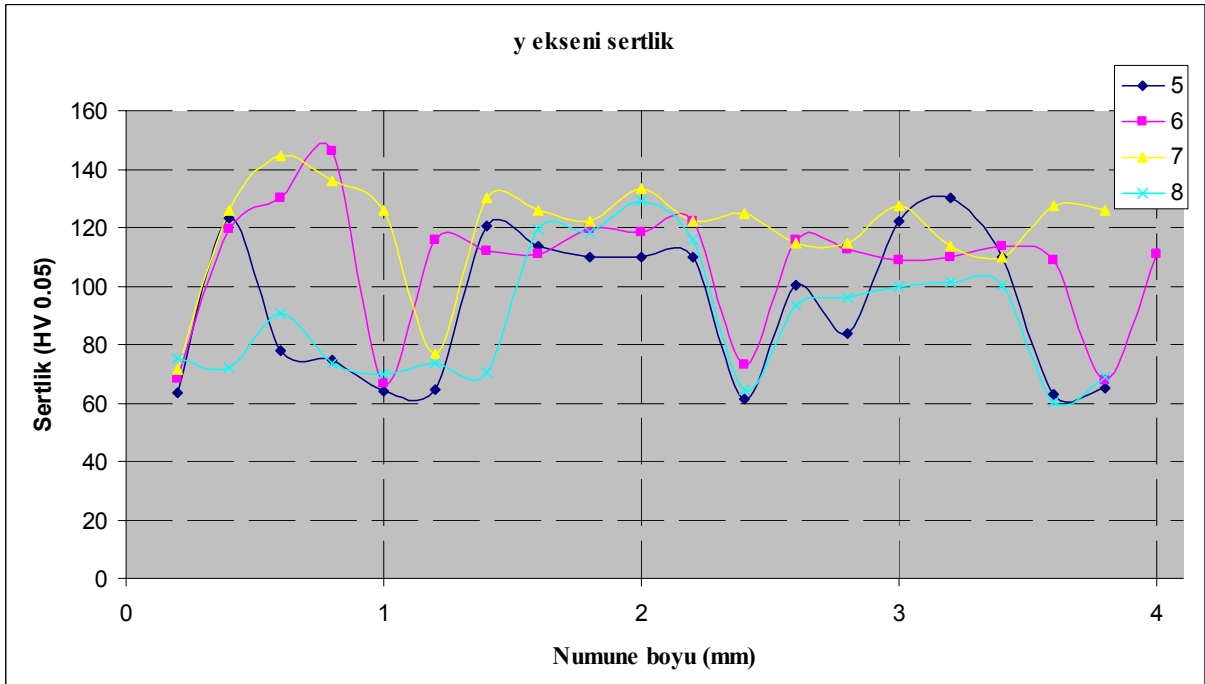
Şekil 55. 1000 dev/dk dönme hızında, 85 mm/dk ilerleme hızında ve 6500–8500–10000–11500 N yük altında yapılan deneylerin x ekseninde mikro sertlik grafiği



Şekil 56. 1000 dev/dk dönme hızında, 85 mm/dk ilerleme hızında ve 6500–8500–10000–11500 kg yük altında yapılan deneylerin y ekseninde mikro sertlik grafiği



Şekil 57. 1000 dev/dk dönme hızında, 115 mm/dk ilerleme hızında ve 6500–8500–10000–11500 N yük altında yapılan deneylerin x ekseninde mikro sertlik grafiği.



Şekil 58. 1000 dev/dk dönme hızında, 115 mm/dk ilerleme hızında ve 6500–8500–10000–11500 N yük altında yapılan deneylerin y ekseninde mikro sertlik grafiği.

Şekil 55'den görülmekte olduğu gibi, yapılan sertlik ölçümlerinde x eksenini boyunca - 10,0 mm bölgesinden itibaren (AA7075) kaynak çekirdeğine (birleşme bölgesi) giderken ölçülen sertliğin esas malzeme sertliği olan 176 VSD2 değerinden ani bir şekilde azalarak yaklaşık 120VSD2 değerine düştüğü görülmüştür. Birleşme bölgesinin merkezinde ise ölçülen sertlik değeri tekrar ani olarak 60VSD2 değerine (ölçülen en düşük değer) düşmüş olduğu görülmüştür. Merkez bölgeden ilerledikçe sertlik belirli bir bölge boyunca sabit kalmış ve merkez çizgisinden yaklaşık 8 mm uzakta sertlik değeri bir miktar artarak başlangıçta ölçülen ana malzemenin (AA5754) sertlik değeri olan 74 VSD2 değerine yükselmiştir. Birleşme bölgesinde belirlenen sertlik değişimleri, kaynaklı malzemelerin birleşme bölgelerinde yapısal dönüşüme uğramış olan ve çeşitli şekilde tanımlanmış bölgelerin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Bu değişimler, kaynak işlemi sırasında bu bölgede artan sıcaklık, basınç ve aşırı deformasyonun etkisiyle değişime uğrayarak, yaşlandırma işlemine ve deformasyon sertleştirme işlemine tabi tutulmuş olan her iki malzemenin de yeniden kristalleşmesi veya aşırı yaşlanması nedeniyle meydana gelmektedir. Dolayısıyla benzer durum, Şekil 57'den görülmekte olduğu gibi, takım ilerleme hızlarının farklı olması nedeniyle erişilen sıcaklık seviyelerinin farklı olması, birleşme bölgelerinde belirlenen sertlik değişimlerinin de farklı olmalarına neden olmaktadır.

Şekil 55 ve 57'dan görülmekte olduğu gibi takım ilerleme hızının yüksek olduğu durumlarda ölçülen sertlik değerlerinin daha geniş bir aralıkta değişmekte olduğu, takım ilerleme hızının daha düşük olduğu durumlarda ise ölçülen sertlik değerlerinin daha dar bir aralıkta değişmekte olduğu belirlenmiştir. Bu durum oluşan sıcaklık seviyelerinin farklı olmalarının yanında takımın karıştırma etkisinin düşük ilerleme hızlarında daha etkin olarak daha homojen bir karışım ortaya çıkarmasından kaynaklanmaktadır. Tüm bunlara ek olarak, daha yüksek takım ilerleme hızında birleşme bölgesinin söz konusu sıcaklık etkisinde daha az kalmış olması da birleşme bölgesindeki karışımın sertlik değerindeki değişimi etkilemekte olduğu düşünülmektedir.

Şekil 56 ve 58'de verilmiş olan numune birleşme bölgelerinin y-eksenleri doğrultularındaki sertlik değişimleri, x-eksenine oranla oldukça geniş bir sertlik aralığında değişmektedir. Bu durum, kaynak parametrelerine bağlı olarak ve uç geometrisinden kaynaklanan iki farklı soğan halkası oluşumunun yanında numunelerin birbirleri içerisine mızrak başı gibi toplu olarak girmiş olmasından kaynaklanmaktadır. Bu bilgi, ileriki bölümde verilmiş olan kaynaklı bölgelerin EDS analiz değerleri ile de desteklenmektedir.



Dolayısıyla, y-ekseni doğrultusunda ölçülen sertlik değerleri yaklaşık olarak AA5754 ve AA7075 alaşımlarının değişime uğramış sertlik değerlerinin (55VSD-150VSD) karışımlarından oluşmaktadır.



Şekil 59. Mikrosertlik ölçümlerine göre kaynaklı bölge mikroyapısı

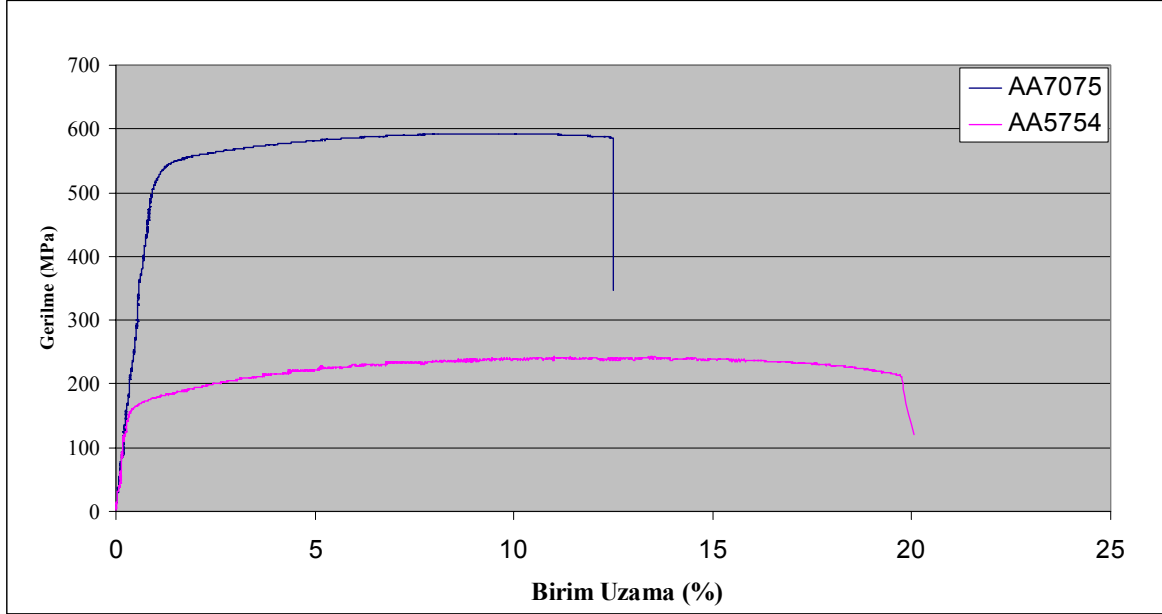
- A: Ana malzeme,
- B: Isıdan etkilenen bölge (ITAB),
- C: Termomekanik etkilenen bölge (TEB),
- D: Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB). Belirlenen kaynak bölgeleri

### 3.4. Çekme Deneyi Sonuçları

Çekme deneylerinde, öncelikle malzemelerin piyasadan tedarik edildikleri durumdaki (kaynak işlemi) mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, çekme deneyine tabi tutuldular. Gerçekleştirilen testlerden elde edilen Gerilme-Birim Uzama grafiği Şekil 60'da, sonuçlar ise toplu olarak Tablo 10'da verilmiştir. Bu diyagramdan, kullanılan deney malzemelerinden katı çökelti sertleşmesine tabi tutulmuş olan AA7075T6 alaşımının 593 MPa'lık çekme dayanımına ve yaklaşık % 12'lik uzama değerine sahip olduğu, deformasyon sertleşmesine tabi tutulmuş olan AA5754H2 alaşımının ise 242 MPa'lık çekme dayanımına ve yaklaşık % 20'lik uzama değerine sahip olduğu görülmektedir.

Söz konusu malzemelerin kaynak işlemi gerçekleştirildikten sonraki birleşme bölgelerinin mukavemetlerinin belirlenebilmesi için her bir numune çiftinden Şekil 33'de belirtilen yerlerden elde edilen malzemeler talaşlı imalat yöntemi ile şekillendirilerek TS 138-F standardına uygun olacak şekilde Şekil 34'de verilen geometride çekme deneyi numuneleri hazırlanarak teste tabi tutulmuştur. Gerçekleştirilen çekme deneylerinden elde

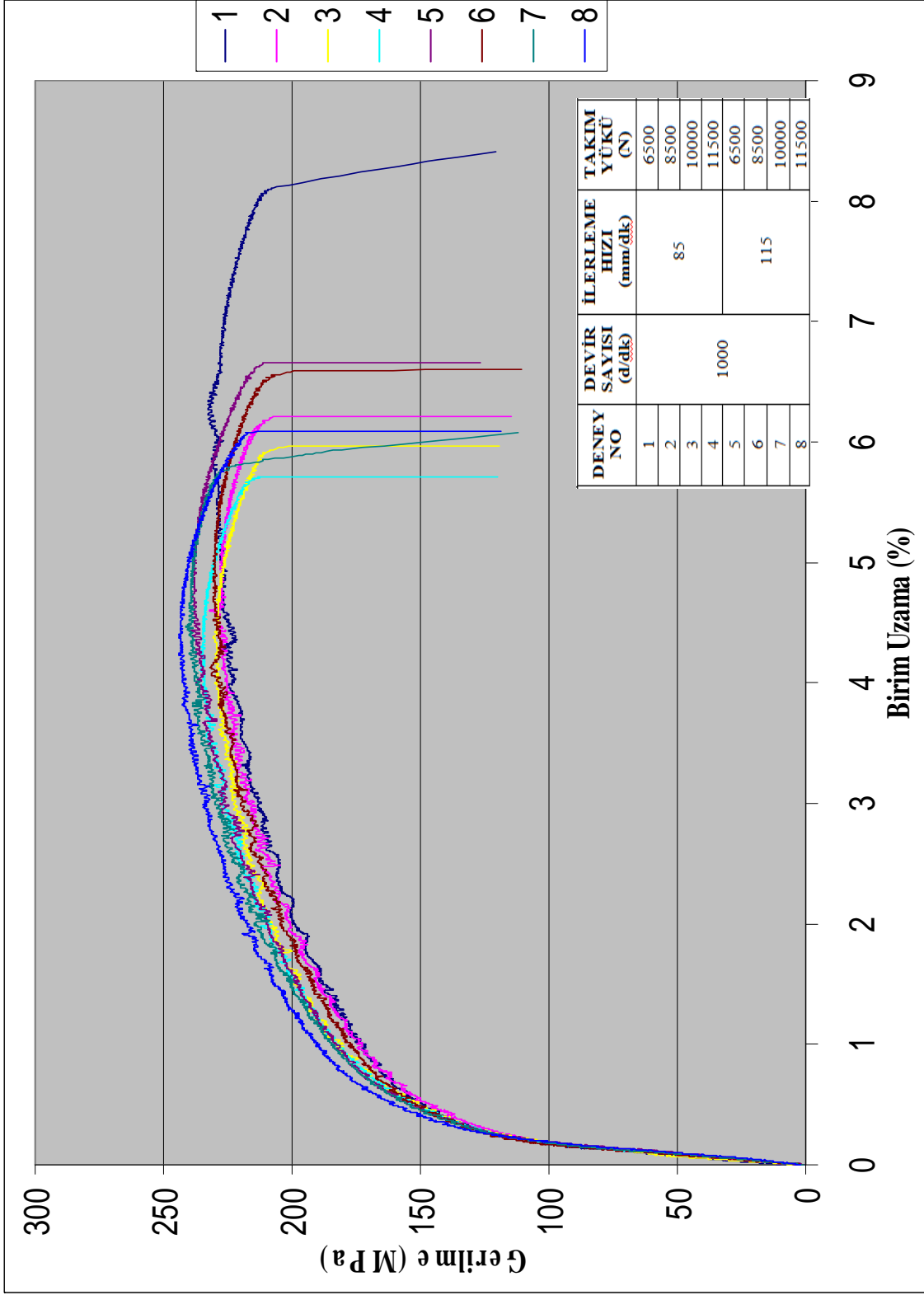
edilen Gerilme-Birim Uzama grafikleri toplu halde Şekil 61’de verilmiştir. Bu grafiklerden elde edilen verilerin ortalama değerleri ise Tablo 11’den görülmektedir.



Şekil 60. Ana malzemelerin gerilme-birim uzama grafiği

Tablo 10. Ana malzemenin mekanik özellikleri

MALZEME	ÇEKME DAYANIMI (MPa)	KOPMA UZAMASI (%)	KIRILMA ENERJİSİ (J)
AA 5754	242	19,8	84,4
AA 7075	593	12,5	69,9



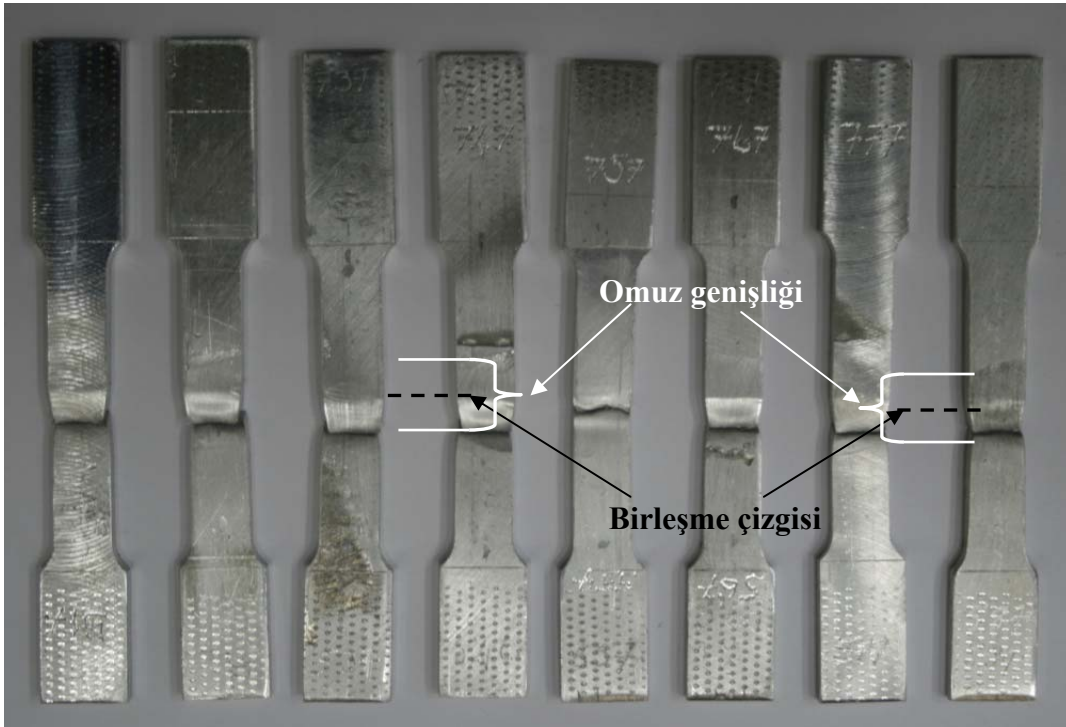
Şekil 61. Deneylelerin toplu çekme dayanım grafiği

Tablo 11. Deney numunelerinden elde edilen çekme deneyi sonuçları

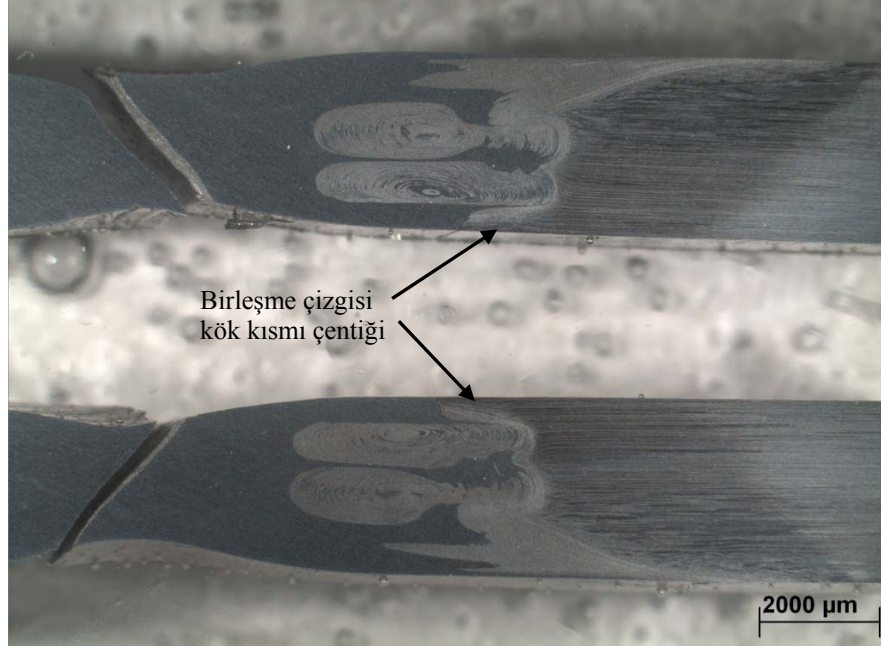
DENEY NO	DEVİR SAYISI (d/dk)	İLERLEME HIZI (mm/dk)	TAKIM YÜKÜ (N)	ÇEKME DAYANIMI (MPa)	KOPMA UZAMASI (%)	KIRILMA ENERJİSİ (J)
1	1000	85	6500	232	8,3	31,6
2			8500	231	6,2	25,9
3			10000	230	5,9	24,5
4			11500	235	5,7	24,0
5		115	6500	239	6,6	27,7
6			8500	231	6,5	26,5
7			10000	241	5,9	25,1
8			11500	243	6,0	27,2

Çekme deneyine tabi tutularak koparılmış olan numunelerin aynı şekilde ve aynı bölgeden kopmuş oldukları görülmektedir. Çekme deneyine tabi tutularak koparılmış olan numunelerden belirlenen ikisinin enine kesiti alınarak kopma bölgelerinin yeri ve bu bölgenin birleşme yerine göre konumu incelenmiştir. Yapılan incelemede, numunelerdeki kopmanın numunelerin tam birleşme bölgesinde olmayıp, sertlik grafiklerinde de belirtilmiş olduğu gibi, sertlik değerinin en düşük olarak ölçüldüğü, AA5754 malzemesi tarafında ve birleşme çizgisine belirli bir mesafe dışından (Metalografik incelemede bu yerin ITAB bölgesi olduğu anlaşılmıştır.) koptuğu görülmüştür (Şekil 62). Bu durumun, çekme deneyine tabi tutulan bütün numuneler için geçerli olduğu belirlenmiştir. Kopmanın olduğu bölgenin Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) olması, yer yer en düşük sertlik değerinin ölçülmüş olduğu (y-ekseni bölgesi) karışık (değişken) sertlik değerlerinin belirlendiği, dinamik olarak yeniden Kristalleşen Bölge (DKB) alanının ortalama mukavemet değerinin ITAB bölgesinin mukavemet değerinden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Çekme numunelerinin kırılma bölgeleri incelendiğinde, numunelerinin tümünün sünek karakterli bir kopma ile kırılmış olduğu görülmüştür. Şekil 63, şekil 59 ve sertlik değişim grafikleri ile karşılaştırılarak değerlendirildiğinde kopmanın ITAB'nin sınırında gerçekleşmiş olduğu belirlenmiştir. Bu durum, merkeze daha yakın kısımlarda daha düşük sertlik değerleri ölçülmüş olmasına rağmen takım omzunun deformasyonu etkisiyle tane incelmesinin ve kuvvet çizgilerinin yönlenmesi etkisinin bu bölgenin mukavemet değerini artmaktadır.

Deneylelerden elde edilen grafiklerin ve Tablo 10'da verilen bulguların değerlendirilmesinde, sabit tutulan devir sayısı ve ilerleme hızlarında arttırılan takım yükünün kaynak dikişini mukavemetini ihmal edilebilir seviyede arttırırken uzama değerlerinde ve kırılma enerjilerinde daha belirgin azalmalar gözlenmiştir. Diğer taraftan, diğer kaynak parametreleri sabit tutulurken ilerleme hızının arttırılması kaynak dikişini mukavemetlerinde artışa neden olmuştur. Sabit tutulan devir sayısı ve 85 mm/dk'lık takım ilerleme hızında arttırılan takım baskı yükünün kaynak dikişinin kırılma enerjisini yaklaşık % 20 oranında azalttığı, 115 mm/dk'lık takım ilerleme hızında arttırılan takım baskı yükünün kaynak dikişinin kırılma enerjisini ise değiştirmediği gözlenmiştir.



Şekil 62. Çekme numunelerinin kaynak yüzeyinden toplu görüntüsü

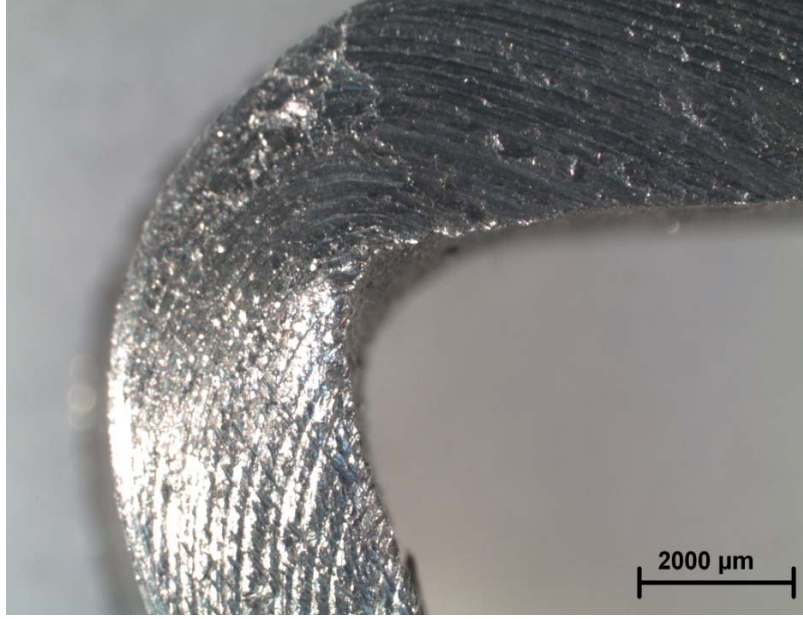


Şekil 63. Kaynak dikişi içeren çekme numunesinin kopma bölgesinin görünümü

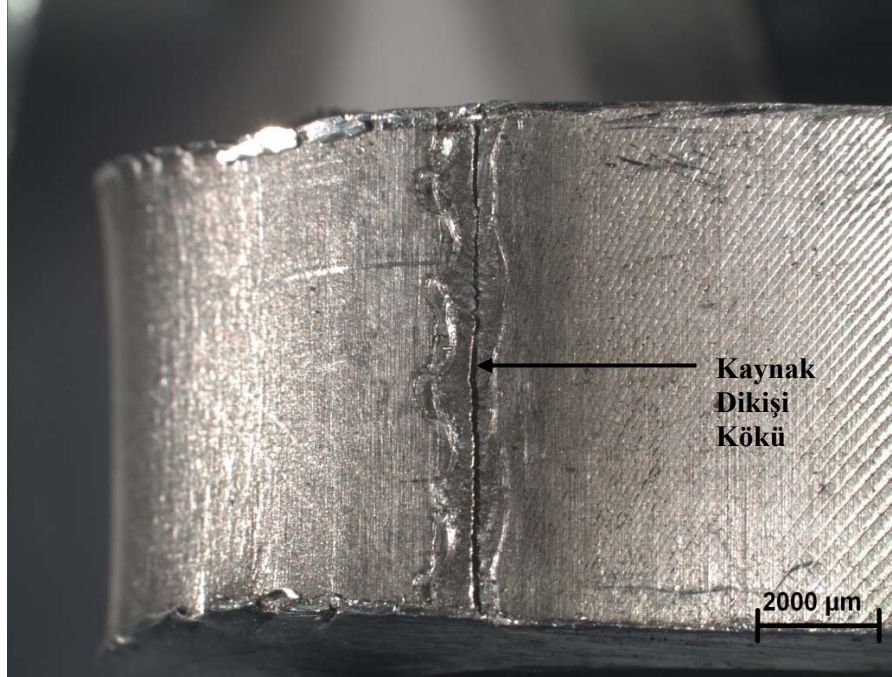
### 3.5. Eğme Deneyi Sonuçları

Eğme deneyleri, TS 6067 standardına uygun olarak hazırlanan deney numunelerinin içerdiği kaynak dikişlerinin kök bölgesi dışa ve kaynak kök bölgesi içe gelecek şekilde mandren yardımıyla 180° eğerek gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen eğme deneylerinden elde edilen numunelerin, Şekil 64'den de görüldüğü gibi, yan yüzeylerinde belirgin bir çatlama belirtisi tespit edilememiştir. Eğme deneyleri sonucunda, kök bölgesi dışa gelecek şekilde yerleştirilen numunelerin tümünün birleşme bölgelerinde belirgin çatlamların meydana geldiği görülmüştür (Şekil 66). Numunelerin kök bölgesi içe gelecek şekilde yerleştirilmesi durumunda ise numunelerin genelde ince çatlaklar içermekte olduğu (Şekil 65), ancak 11500 N'luk takım yükü altında kaynak edilen her iki ilerleme hızındaki numunelerin kırılma mekaniği uygulanabilecek büyüklükte herhangi bir çatlak içermedikleri, Şekil 67'den de görülmekte olduğu gibi, belirlenmiştir.

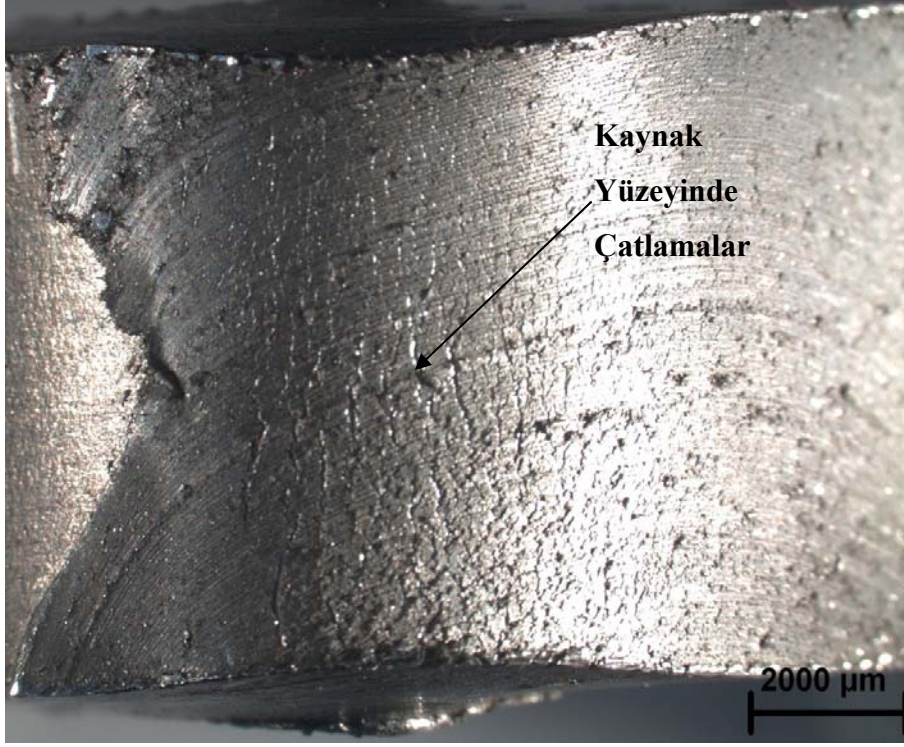
Eğme deneyi numuneleri incelendiğinde ilerleme hızlarının artması kaynak yüzeyinde oluşan çatlamların artmakta olduğu, artan takım baskı kuvvetinin ise çatlak oluşumunu azaltmakta olduğu görülmüştür.



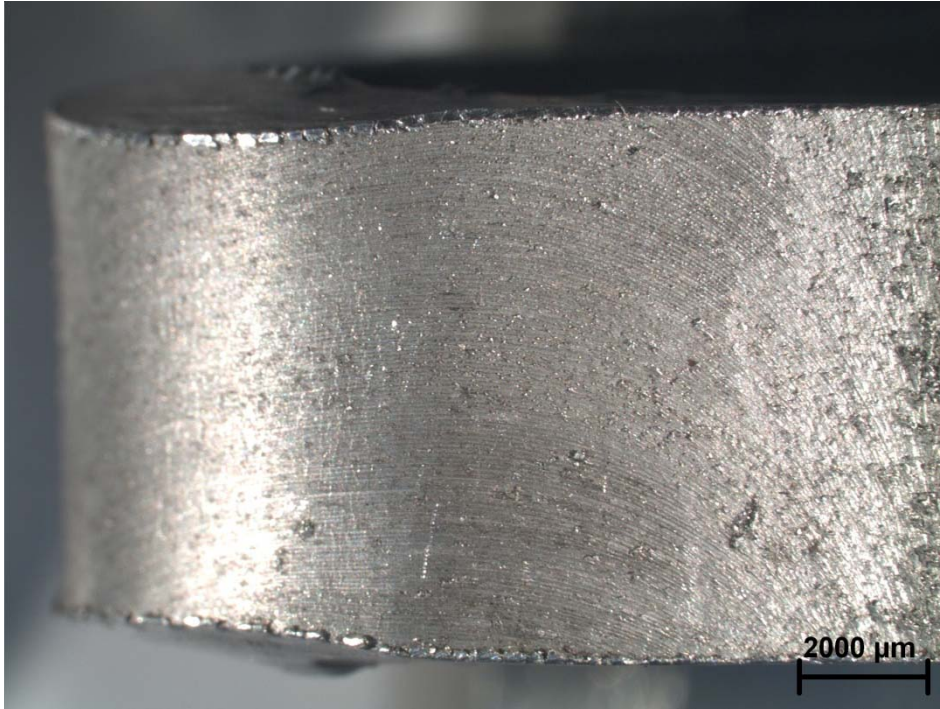
Şekil 64. 1000 d/dk, 85 mm/dk ve 6500 N yük altında yapılan deneyden elde edilen numunenin eğme deneyi yapılmış yan görüntüsü



Şekil 65. 85 mm/dk ve 10000 N yük altında gerçekleşen deneyden elde edilen numunenin eğme deneyi kaynak dikişi görüntüsü



Şekil 66. 85 mm/dk ve 10000 N yük altında gerçekleşen deneyden elde edilen numunenin eğme deneyi kaynak yüzeyi görüntüsü

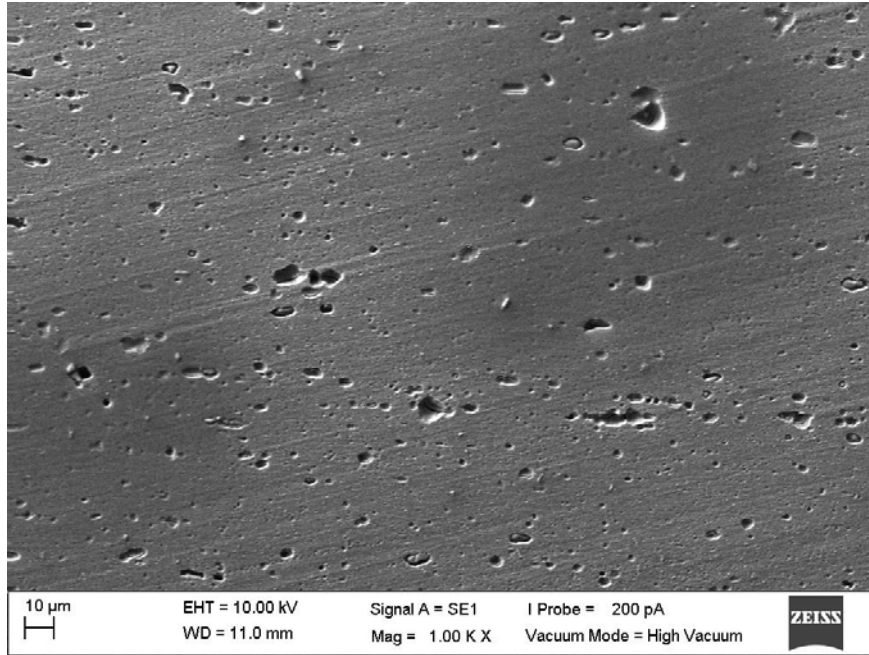


Şekil 67. 85 mm/dk ve 11500 N yük altında gerçekleşen deneyden elde edilen numunenin eğme deneyi kaynak yüzeyi görüntüsü

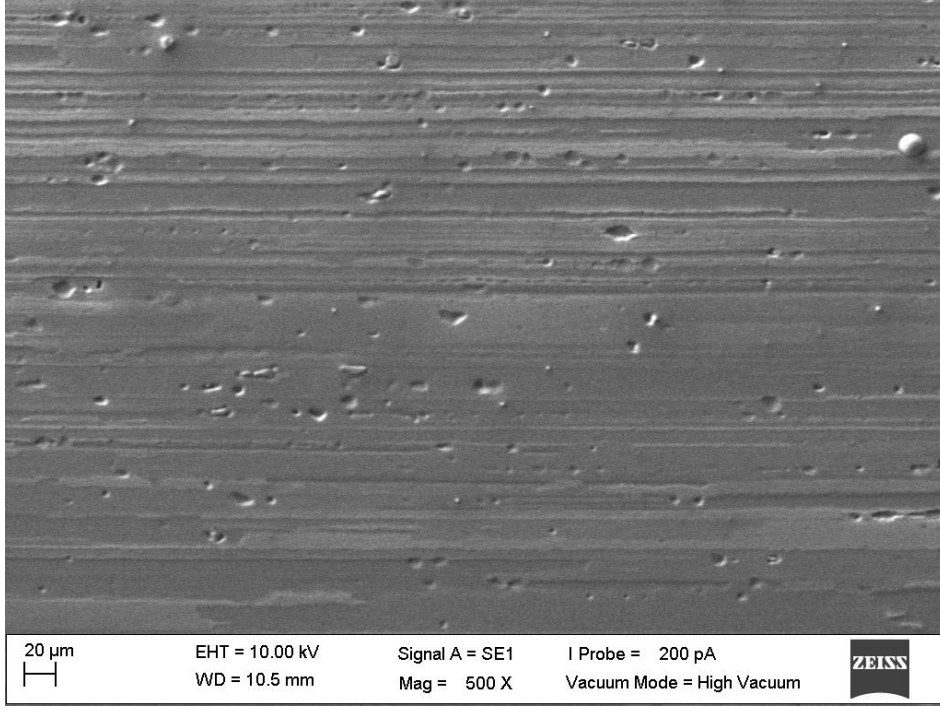


### 3.6. Metalografik İnceleme Sonuçları

Gerçekleştirilen çalışmada deney malzemesi olarak kullanılan AA5754 ve AA7075 alüminyum alaşımlarının kaynak öncesi mikroyapıları Şekil 68-69'da verilmiştir. İncelenen fotoğraftan kullanılan malzemelerin içyapılarının çeşitli büyüklüklerde boşluk içermekte olduğu ve bu gözenekler, malzemelerin üretimleri aşamasında oluşmuş ve gerçekleştirilen imalat aşamalarında (haddeleme, dövme gibi) deforme olarak şekil değişikliğine uğrayan (ezilmiş ve uzamış) gaz ve çekme boşluklarıdır. İçyapısında % 5,55 Zn, % 2,55 Mg ve % 1,5 Cu içeren AA7075T651 malzemesinin, içyapısında % 3,20 Mg içeren AA5754H22 malzemesinden daha az gözenek (boşluk) içerdiği görülmüştür. Malzemelerin içerdikleri tanelerin üretim aşamasındaki haddeleme doğrultularında deforme olarak yönlendikleri, özellikle AA7075 alaşımında olmak üzere, her iki malzemenin içyapısında da bariz olarak görülmüştür. Gerçekleştirilen sürtünme karıştırma kaynaklı birleştirmede elde edilen birleşme bölgesinin sertlik değerlerinin ve metalografik içyapıları incelenmesinde, literatürdeki bilgilerle uyumlu şekilde, Şekil 59'da verildiği gibi dört ana bölgeden (**A**: Ana malzeme, **B**: Isıdan etkilenen bölge (ITAB), **C**: Termomekanik etkilenen bölge (TEB) ve **D**: Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB). Belirlenen kaynak bölgeleri) oluşmuş olduğu belirlenmiştir.



Şekil 68. AA5754H22 alüminyum alaşımının metalografik içyapısı



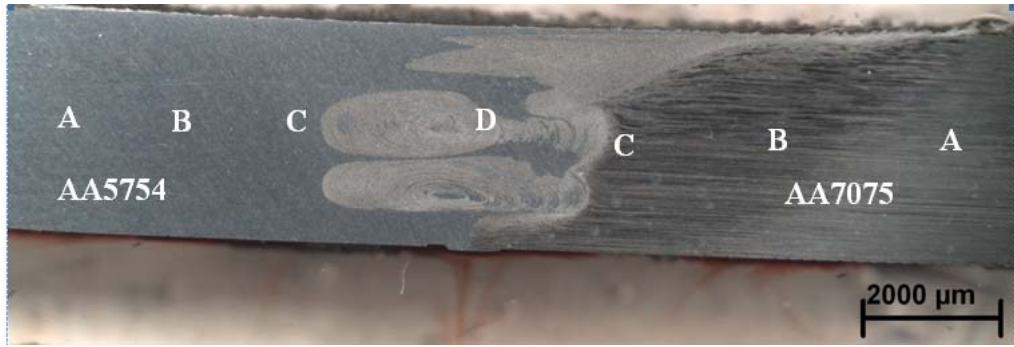
Şekil 69. AA7075T651 alüminyum alaşımının metalografik içyapısı

Gerçekleştirilen deneylerden elde edilen numunelerin mikro yapıları Şekil 71-78’de verilmiştir. Bu görüntülerin tümünde, birleşme bölgelerinin alt kısmında yaklaşık 0,2 mm boyunda birleşmemiş bir kısmın (çatlak şeklinde) kalmış olduğu belirlenmiştir. Bu çatlağın, kullanılan takımın karıştırıcı ucu boyunun parçaların kalınlığından daha kısa (4,0 mm yerine 3,8 mm) olarak kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum, kaynak işlemi sırasında dönen takımın numunelerin yerleştirildiği altlığın yüzeyine zarar vermemesi için tercih edilmiştir. Bu büyüklükteki bir çatlağın (numune kalınlığının % 5,0 oranında) mevcut bulunmasına rağmen, uygulanan çekme deneylerinin hiç birinde kopma bu bölgede meydana gelmemiştir. Bu durum, kaynak dikişinde ITAB bölgesinin en zayıf bölgeyi oluşturduğunun diğer bir göstergesidir. Elde edilen bu numunelerin içyapılarının incelenmesinde, deneylerin tümünde birleşme bölgesinin iki ayrı karışma kısmına sahip oldukları görülmüştür. Bu iki ayrı bölgenin kaynak için kullanılan karıştırıcı ucun helis yerine çevresel iki adet kanal içermesinden kaynaklanmaktadır. Bu kanallar helis şeklinde olmadıklarından dolayı meydana gelen karışma ayrı ayrı iki küme şeklinde oluşmuştur.

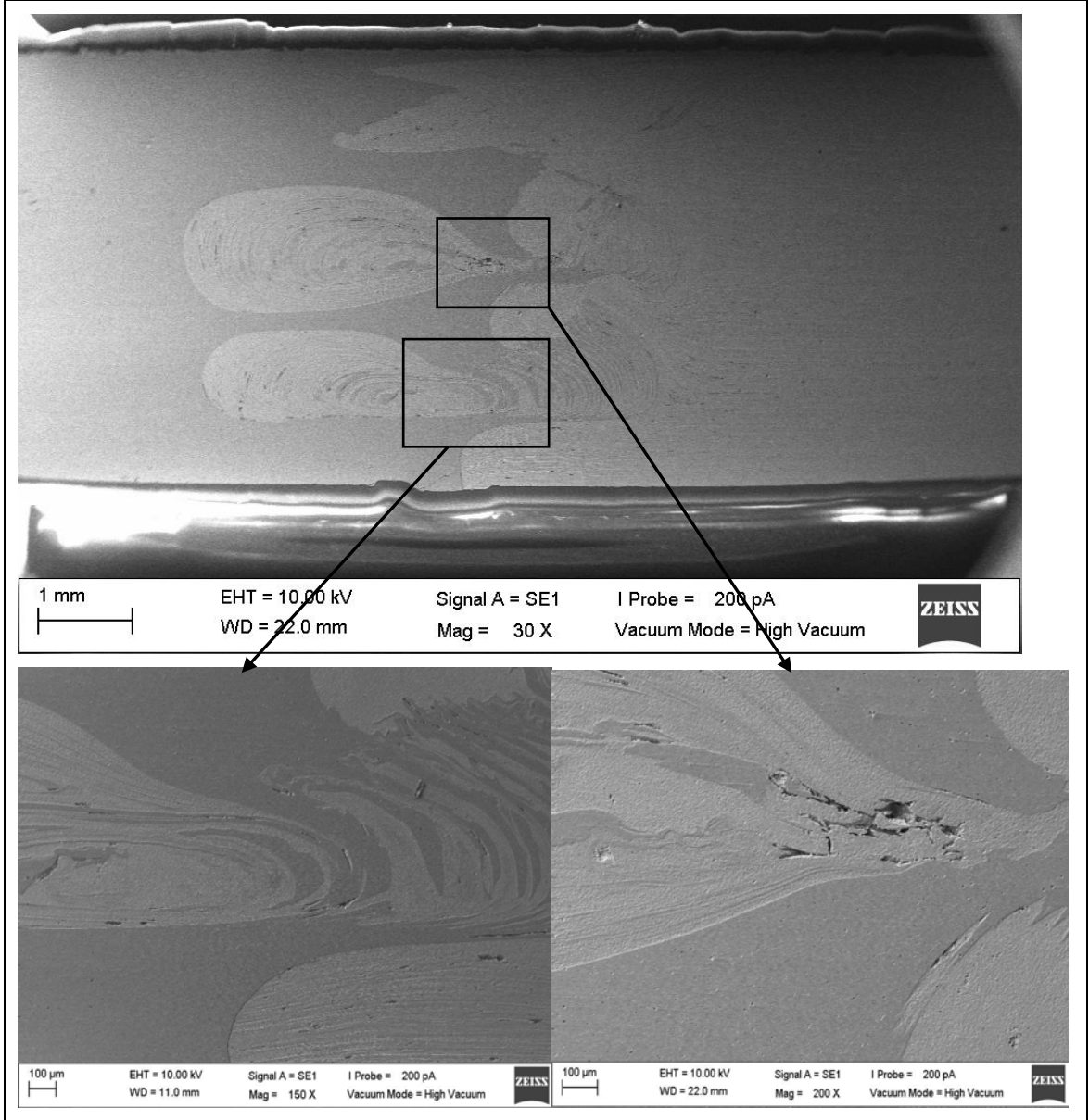
İncelenen mikro yapıların hemen hemen tümünde farklı miktarlarda boşluk ve gözeneklerin bulunduğu görülmektedir. Bu boşlukların artan takım ilerleme hızı ile arttığı (Şekil 71 ve Şekil 75), artan takım baskı yükü ile ise azalmakta olduğu tespit edilmiştir Şekil 71-74, Şekil 75-78. Şekil 71, 85 mm/dk’lık takım ilerleme hızında, 6500 N’luk takım

baskı kuvveti altında gerçekleştirilen SKK işleminde yaklaşık birleşme çizgisi bölgesindeki boşluk oluşumunu göstermektedir. Şekil 75 ise, aynı yük altında 115 mm/dk'lık takım ilerleme hızında gerçekleştirilen SKK işleminde aynı bölgedeki boşluk oluşumunu göstermektedir. Her iki şekilden, artan takım ilerleme hızının birleşme bölgesinde boşluk oluşumunun artmakta olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 71-78 incelendiğinde, gerek 85 mm/dk - 115 mm/dk'lık takım ilerleme hızlarında, artan takım baskı kuvvetinin ise boşluk oluşumunu azaltıcı etki yapmaktadır.

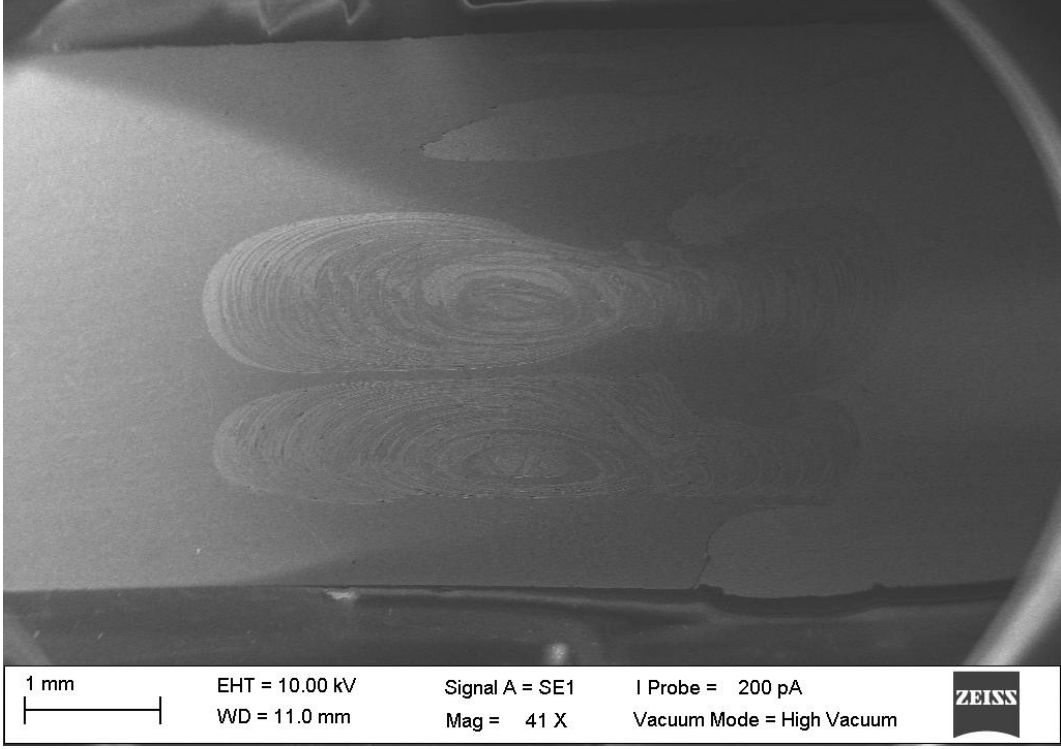
İncelenen mikro yapıların tümünde görülebilen ve özellikle Şekil 77 ve 78'den belirgin olarak fark edilebildiği gibi, birleşme bölgelerinden termomekanik olarak etkilenen bölge (TEB) ve dinamik olarak yeniden kristalleşen bölgelerin ince taneli bir yapıda ve karışma bölgelerinde fazların belirgin sınırlara sahip oldukları (farklı faz bölgeleri arasında difüzyonun gerçekleşmemiş olduğu) anlaşılmıştır.



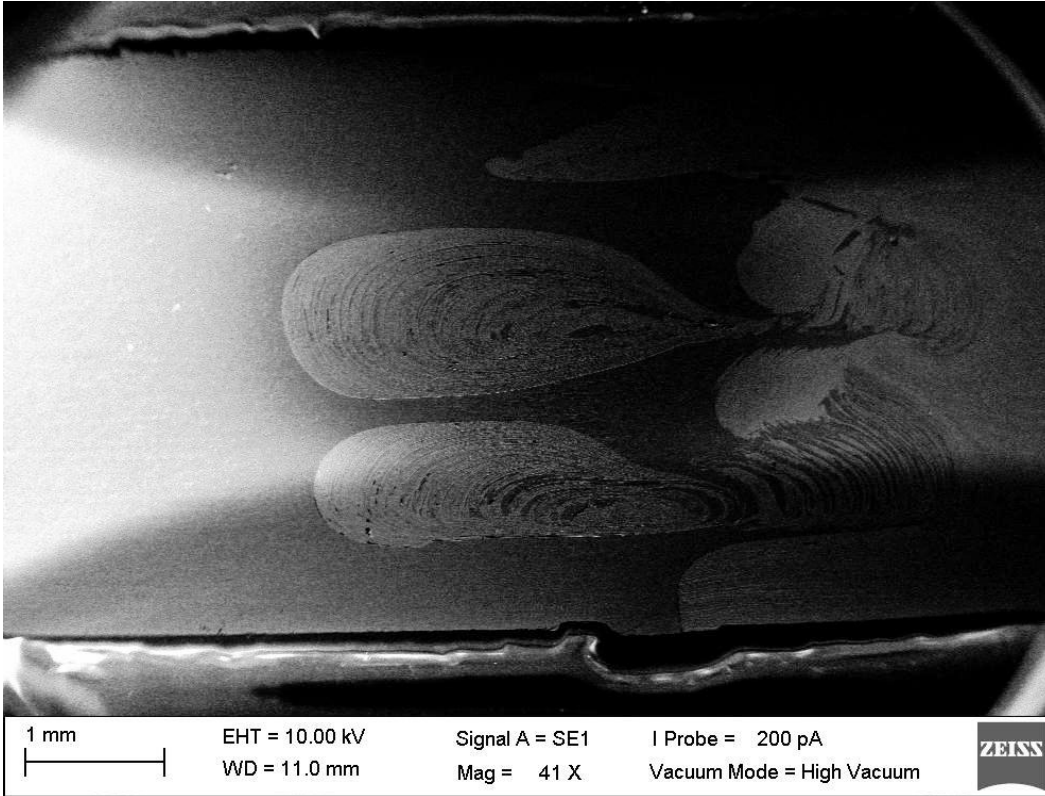
Şekil 70. Gerçekleşen deneylerdeki kaynak dikişlerinde oluşan bölgelerin görünümü



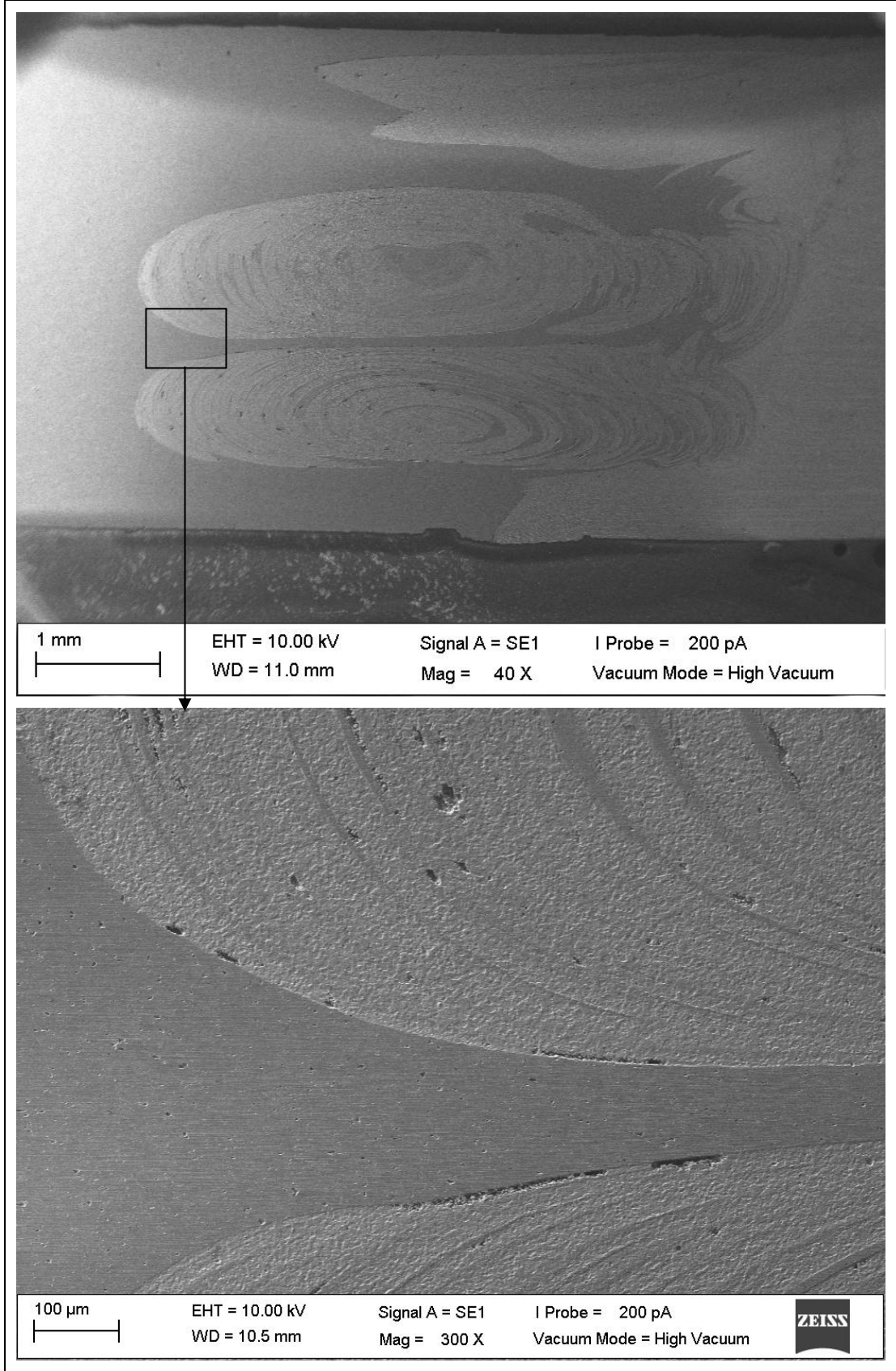
Şekil 71. 1000 d/dk, 85 mm/dk ve 6500 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki mikroyapı



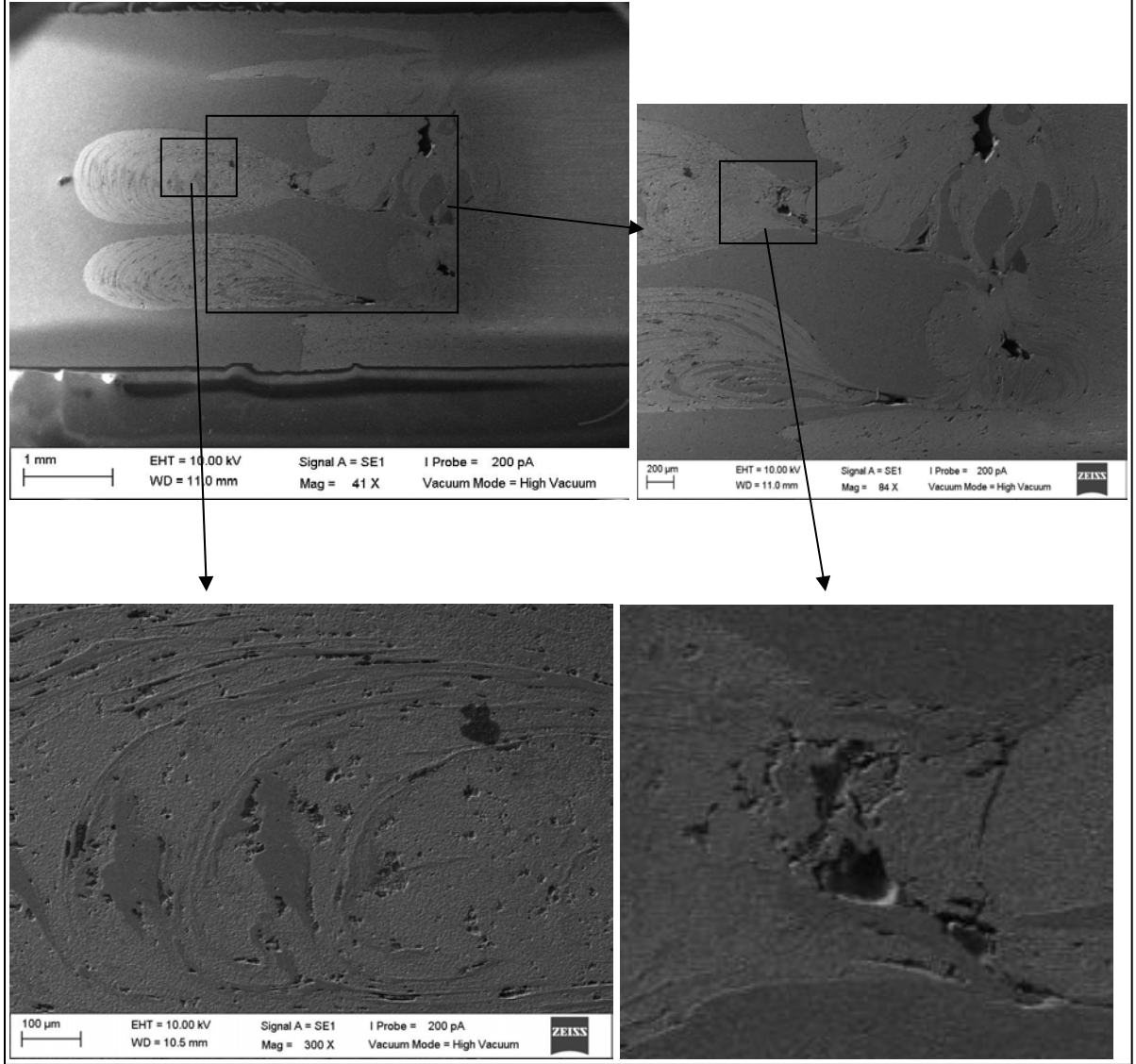
Şekil 72. 1000 d/dk , 85 mm/dk ve 8500 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapı



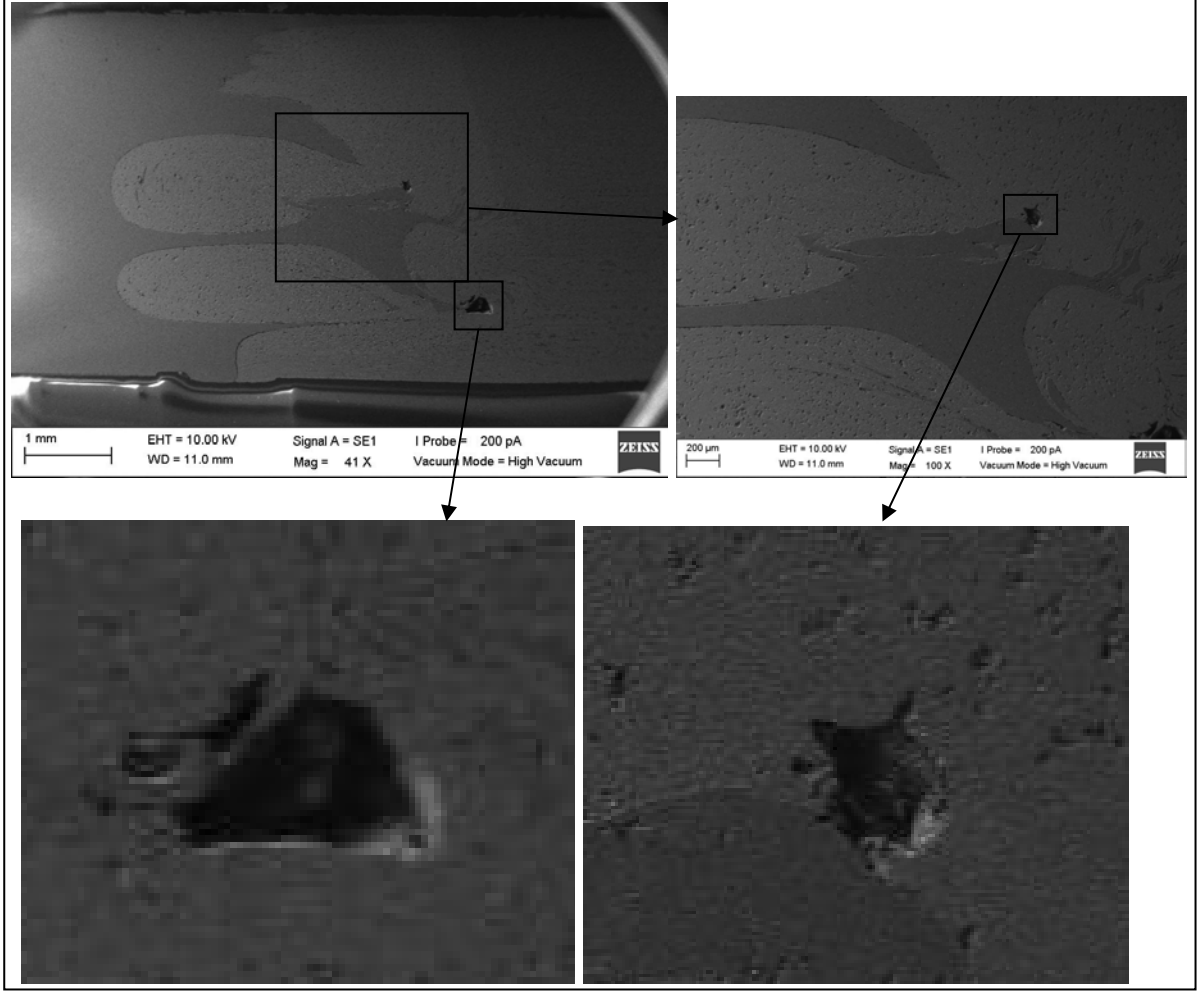
Şekil 73. 1000 d/dk , 85 mm/dk ve 10000 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapı



Şekil 74. 1000 d/dk , 85 mm/dk ve 11500 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapı

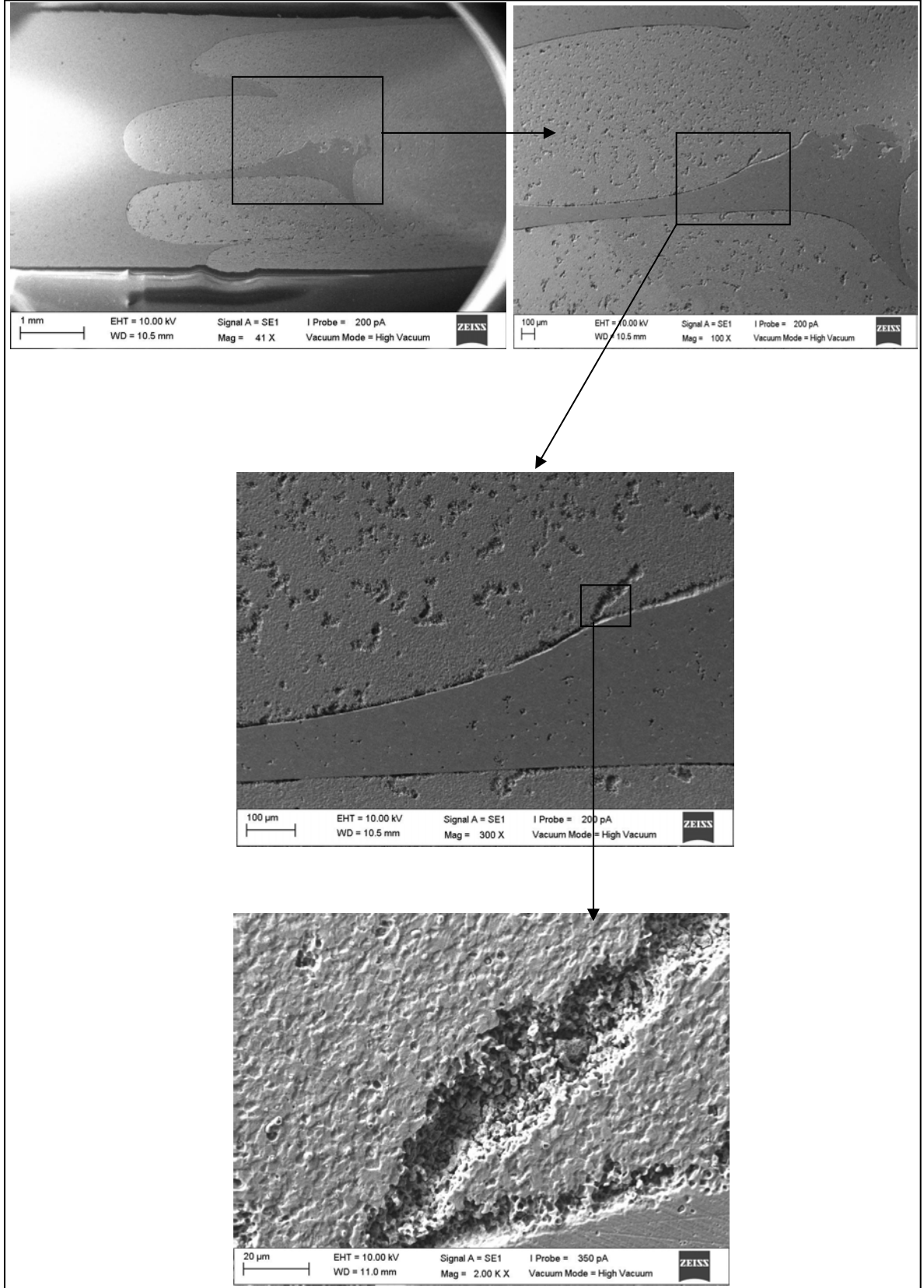


Şekil 75. 1000 d/dk, 115 mm/dk ve 6500 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapı

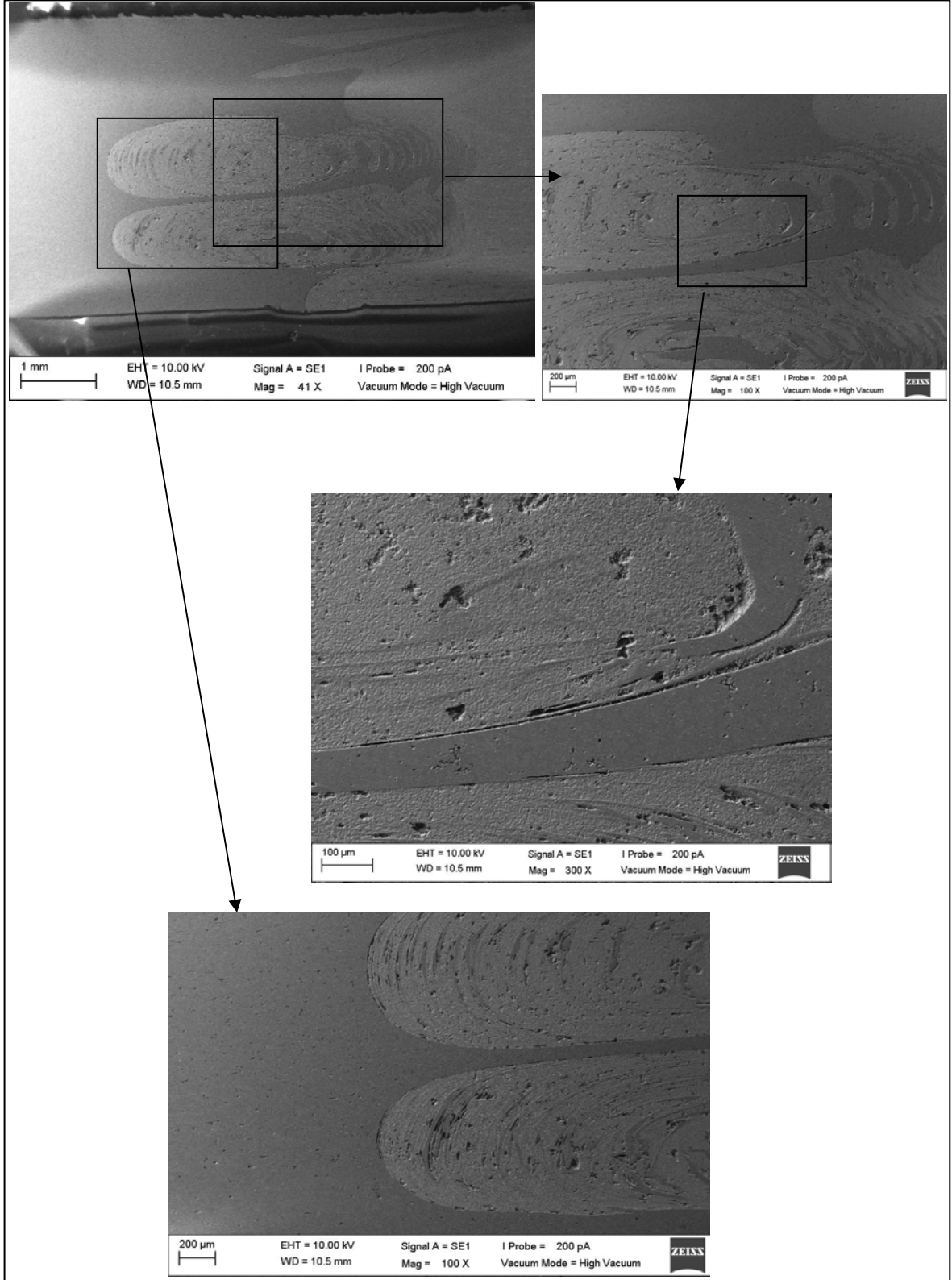


Şekil 76. 1000 d/dk, 115 mm/dk ve 8500 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapılar





Şekil 77. 1000 d/dk, 85 mm/dk ve 10000 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapılar



Şekil 78. 1000 d/dk, 115 mm/dk ve 11500 N yük altında gerçekleşen kaynaktaki içyapılar

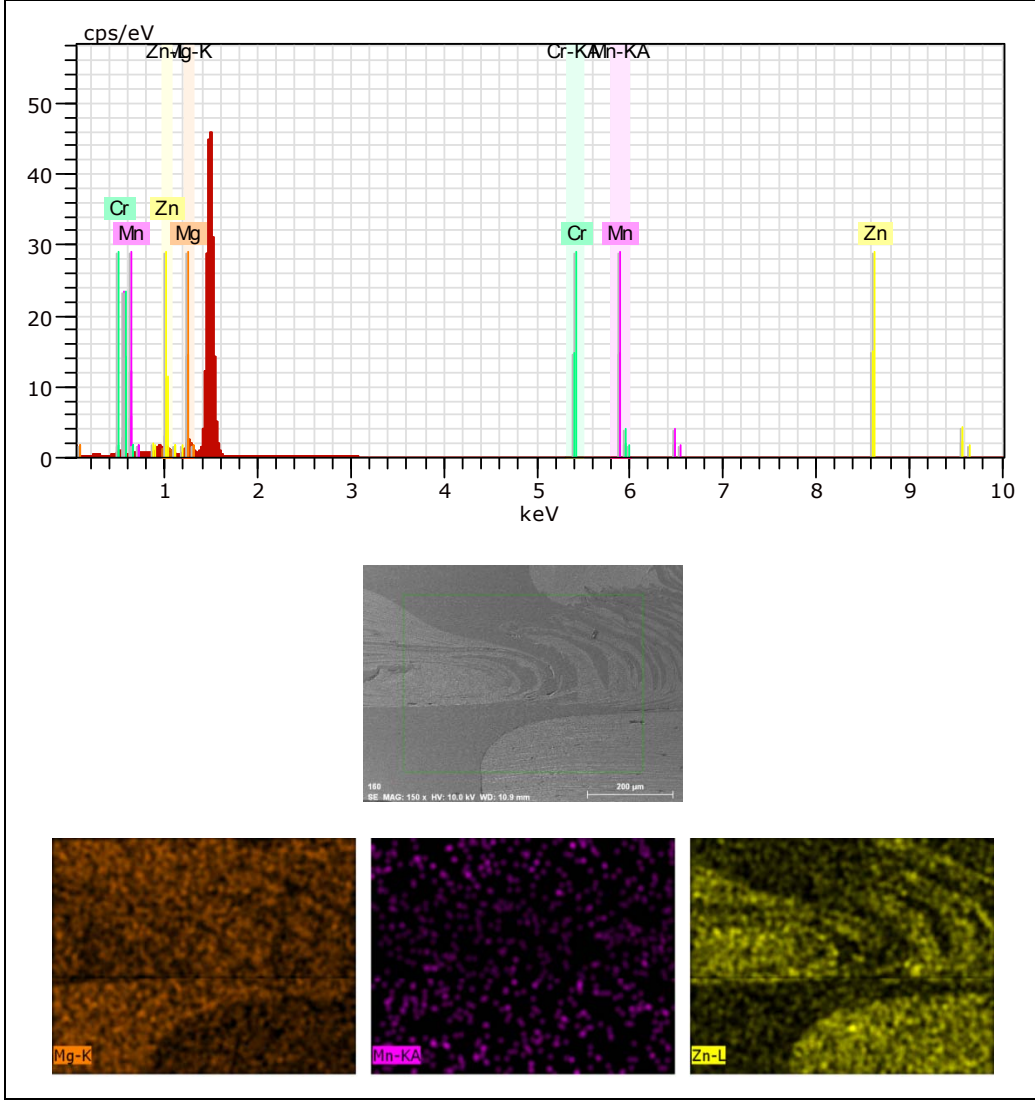
### 3.8. Kaynaklı Bölgenin Kimyasal Analizi

Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilen alaşımların birleşme bölgelerinin metalografik incelenmesinde farklı görünümlere sahip bölgelerin oldukları belirlendi. Bu bölgelerin tanımlanabilmesi için her bir numune taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla kimyasal olarak enerji dağılım spektrometresi (Energy Dispersive Spectroscopy-EDS) analizine tabi tutuldu. EDS analizleri, noktasal ve genellikle element dağılım haritaları çıkarılarak gerçekleştirildi. Gerçekleştirilen kimyasal analizlerin tipik örnekleri Şekil 79 – 82’den görülmektedir.

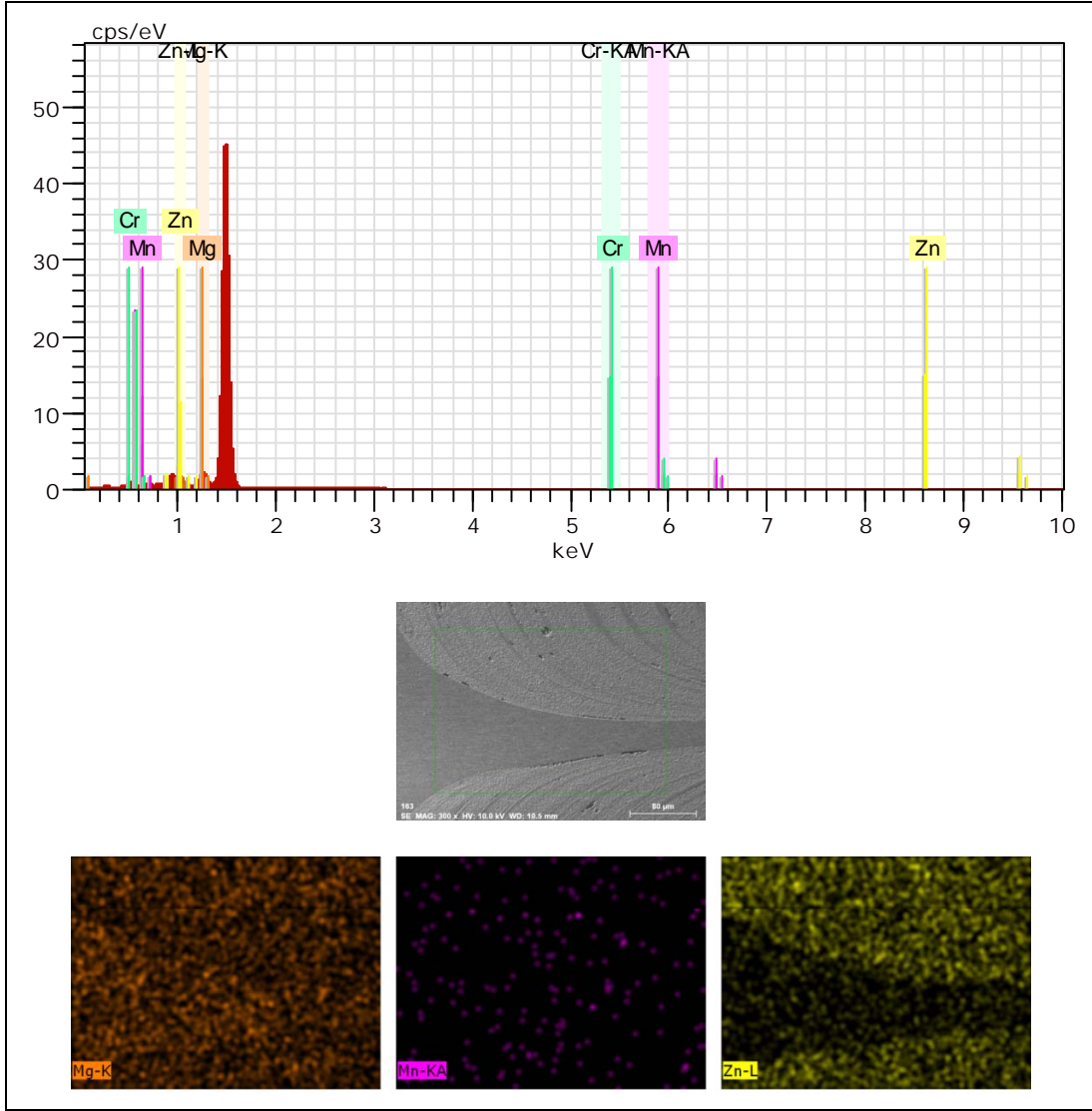
Metalografik görüntülerin incelenmesinde, AA7075T651 ve AA5754H22 alaşımlarının karışımlarından meydana gelen farklı görünümlere ve şekillere sahip bölgeler görülmüştür. Bu bölgelerin tanımlanması için kullanılan EDS analizlerinin değerlendirilmesinde numunelerin tümünde aynı görünümlerin aynı kimyasal yapıyı göstermekte olduğu anlaşılmıştır. Bu incelemelerin tipik örneklerinden olan Şekil 79. 85 mm/dk’lık takım ilerleme hızında 6500 N’luk takım baskı yükü kullanılarak yapılan kaynak dikişinin karışım bölgesinin belirli bir kısmındaki (karışmanın en etkin olduğu soğan halkaları bölgelerinde) element dağılımını göstermektedir. Bu şekilde, koyu renkli olarak görülen fazların magnezyumca zengin çinkoca fakir olan AA5754 alaşımından, açık renkli olarak görülen fazların ise çinkoca zengin olan AA7075 alaşımından oluşmuş olduğu anlaşılmıştır. Her iki malzemede de bulunan mangan oranları yakın değere sahip oldukları için fazların tanımlanmasında ayırt edici değer taşımamaktadır. Aynı ilerleme hızında 11500 N’luk yük altında gerçekleştirilen kaynak işleminden elde edilen numunenin Şekil 80’de verilen analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde de önceki numune ile tamamen örtüşen değerlerin bulunduğu belirlenmiştir.

Arttırılan takım ilerleme hızı ile gerçekleştirilen deneylerden elde edilen numunelerin analiz değerlerini gösteren Şekil 81 (6500 N) ve Şekil 82 (11500 N) incelendiğinde, aynı tanımlamaların geçerli olduğu (koyu renkli AA5754, açık renkli AA7075) görülmüştür.

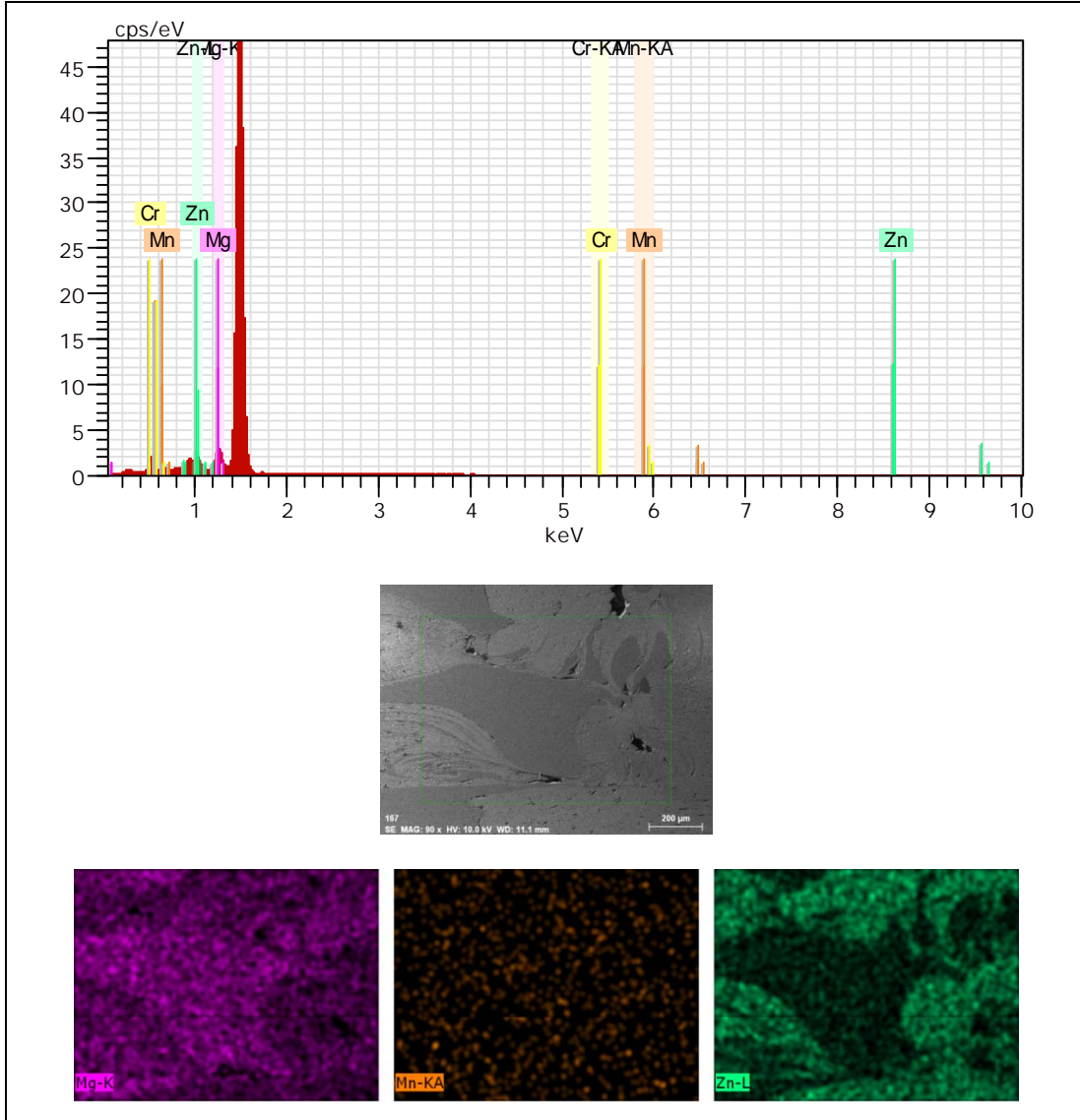
Gerçekleştirilen analizlerin tümünde, oluşan birleşmenin mekanik bir karışım ile gerçekleşmiş olduğu, faz sınırlarında keskin geçişlerin meydana geldiği ve böylece farklı faz bölgeleri arasında difüzyonun ihmal edilebilir bir mertebede bulunduğu, fazlar arasında çözünmenin meydana gelmediği anlaşılmıştır. Şekil 78’de soğan halkaları bölgesinde her iki fazın Şekil 82’de de görülmekte olduğu gibi mekanik birleşmeyi tipik olarak belirtmektedir.



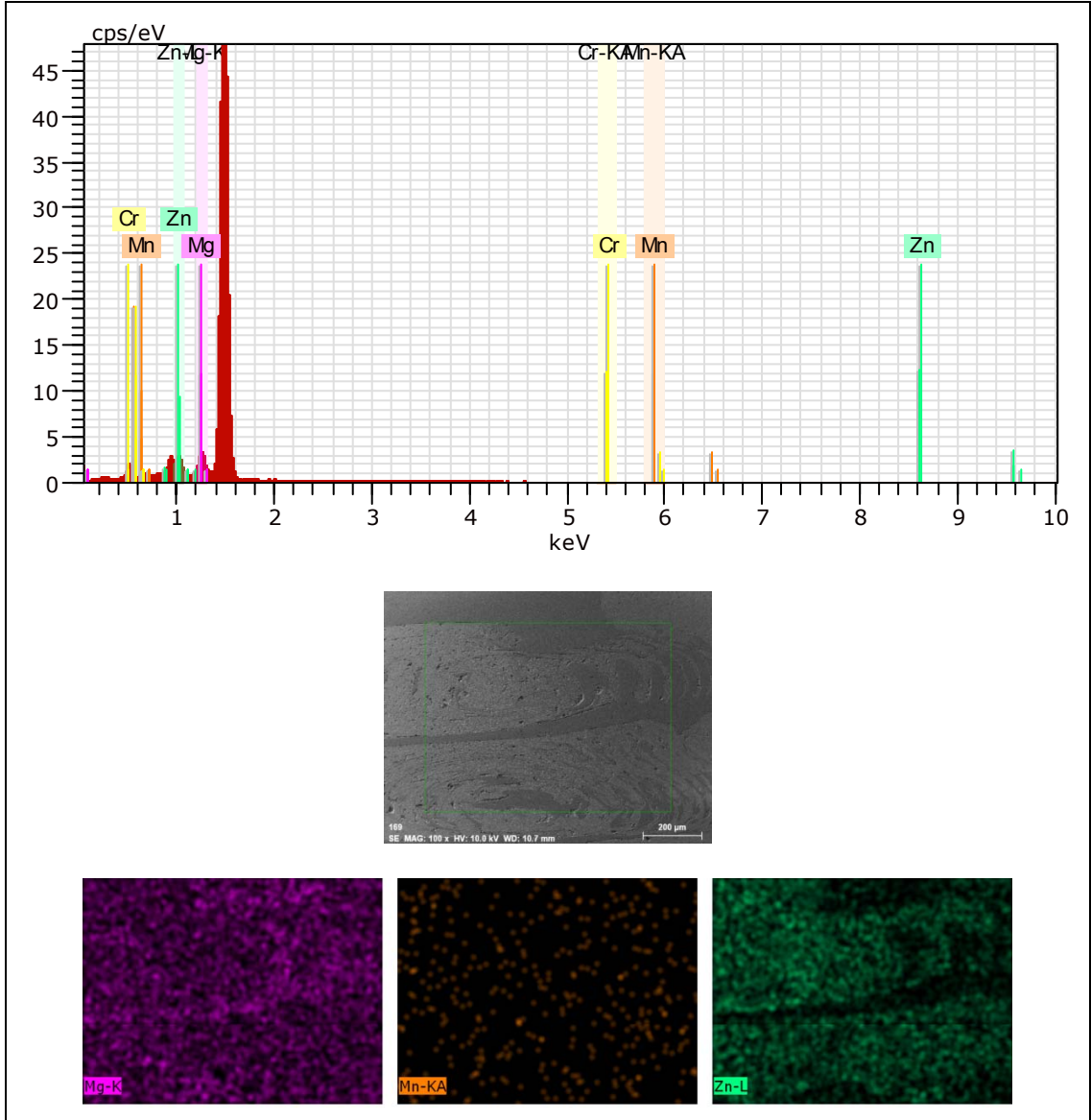
Şekil 79. 85 mm/dk ve 6500 N yük altında gerçekleştirilen kaynağın karışma bölgesinin belirli bir kısmındaki element dağılımı



Şekil 80. 85 mm/dk ve 11500 N yük altında gerçekleştirilen kaynağın karışma bölgesinin belirli bir kısmındaki element dağılımı



Şekil 81. 115 mm/dk ve 6500 N yük altında gerçekleştirilen kaynağın karışma bölgesinin belirli bir kısmındaki element dağılımı



Şekil 82. 115 mm/dk ve 11500 N yük altında gerçekleştirilen kaynağın karışma bölgesinin belirli bir kısmındaki element dağılımı

#### 4. SONUÇLAR

AA7075T651 ve AA5754H22 alüminyum alaşımları sabit 1000 d/dk devir sayısında, 85 – 115 mm/dk ilerleme hızlarında ve 6500-8500-10000-11500 N takım baskı yükü parametreleri kullanılarak gerçekleştirilen deneylerden ve bu deneylerden elde edilen sıcaklık ölçümleri, sertlik ölçümleri, çekme deneyi, eğme deneyi ve metalografik incelemeler ve değerlendirmelerden çıkarılan sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Kullanılan kaynak koşulları aralığında; AA5754H22 ve AA7075T651 alüminyum alaşımları başarılı bir şekilde sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilebilir.
2. SKK yapılan numunelerde esas metal, ITAB (Isı etkisi altındaki bölge), TEB (Termo mekanik etki altındaki bölge), DKB (Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge) olmak üzere dört ana bölge oluşmaktadır.
3. Farklı takım baskı yükü değerlerinde, artan ilerleme hızları kaynak dikişindeki yüzey pürüzlülüğünü arttırmaktadır.
4. Aynı takım baskı yükü değerinde, ilerleme hızının artması kaynak esnasında oluşan sıcaklık seviyesini azaltır. Aynı koşullarda düşük takım hızları Birleşme bölgesinde oluşan sıcaklığı artırmakta ve ITAB bölgesinin genişlemesine yol açmaktadır.
5. Sabit ilerleme hızlarında, takım baskı yükü değeri arttıkça kaynak dikişi bölgesinin sıcaklığı da belirgin olarak artmaktadır.
6. Çeşitli koşullarında gerçekleştirilen kaynak işleminde kaynak bölgesinde erişilen sıcaklık seviyesinin artması parçalarda ITAB ve TEB bölgelerini genişletmekte olup, sertlik değerlerini önemli derecede düşürmektedir.
7. En yüksek mukavemetli kaynak dikişi artan takım ilerleme hızı ve artan takım baskı kuvveti ile ortaya çıkmaktadır.
8. Kullanılan sınır değerler arasında, en sünek davranış gösteren ve en yüksek kırılma enerjisine sahip olan kaynak dikişi, % 8,3'lük uzama ile 6500 N takım baskı yükü altında, 85 mm/dk'lık takım ilerleme hızında gerçekleşmektedir.
9. Kullanılan kaynak parametreleriyle gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde elde edilen sıcaklık değerleri genel olarak bütün kaynak parametrelerinden etkilenmektedir.



10. Kullanılan kaynak parametreleriyle gerçekleştirilen kaynak işlemlerinin tümünde en zayıf bölge ITAB bölgesi olmaktadır ve tüm kopmalar bu bölgede meydana gelmektedir.
11. Kullanılan kaynak parametreleriyle gerçekleştirilen kaynak işlemlerinin tümünde gerçekleşen kopmalar sünek karakterlidir.
12. Kaynak bölgesine uygulanan şekil değiştirme işleminde, artan ilerleme hızı çatlak oluşumunu artırırken artan takım baskı kuvveti çatlak oluşumunu azaltmaktadır.
13. SKK yöntemi ile gerçekleşen birleşme işleminde, birleşme tamamen mekanik olarak gerçekleşmektedir.

## 5. ÖNERİLER

Sürtünme Karıştırma Kaynağı, diğer katı hal kaynak yöntemleriyle kıyaslandığı zaman alüminyum alaşımlarında başarıyla uygulanabilmektedir.

Sürtünme karıştırma kaynak makinesi olarak üniversal freze tezgâhlarının etkin olarak kullanılabilir olmasının yanında, daha başarılı ve kontrol edilebilir olarak kullanılabilmesi için klasik tezgâhlara özel bir yükleme donanımının eklenmesi gereklidir.

Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin alüminyum alaşımları dışındaki farklı alaşımların (yüksek ergime sıcaklığına sahip ya da farklı malzemeler) kaynağında da kullanılabilirliği araştırılmalıdır.

## 6. KAYNAKLAR

1. Smith W., “Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özellikleri Demir Dışı Alaşımalar” (çev. M. ERDOĞAN) Nobel yayın dağıtım 2001.
2. Çam, G., “Sürtünme karıştırma kaynağı ( SKK ): Al-alaşımaları için geliştirilmiş yeni bir kaynak teknolojisi”, TMMOB Mühendis ve Makine Dergisi, 46,541 (2005) 30-39
3. Külekçi, M.K. ve Şık, A., “Sürtünme karıştırma kaynağı ile Alüminyum alaşımı levhaların birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri”, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 70-75 (2003).
4. Güleyik, M. Y., “Alüminyum ve Alüminyum Alaşımaları” 1 TMMOB Mühendis ve Makine dergisi 401(1993) 27-34.
5. Askeland, D.R., Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri, (Çev. M. Erdoğan), Nobel Yayın Dağıtım 1998.
6. ASM Handbook Committee, metals handbook Properties and selection ,Non ferrous alloys and pure metals, ninth edition , volume 2. American Society for metals, Metalspark Ohio 1979.
7. Strand, S., “Joining plastics- can friction stir welding compete”, Electrical sulation Conference and Electirical Manufacturing&Coil Winding Technology Conferance, (2003) 321-326.
8. Thomas, W.M., Johnson, K.I and Wiesner, C.S., Friction stir welding- recent developments intool and process technologies, Advanced Engineering materials, 5, 7 (2003) 485-490.
9. Kurt A., Özdemir M., Boz M., “Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi”, Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, (2003). Sayfa 89-99.
10. Zeytin, H.K., Alüminyum alaşımaları otomotiv endüstrisinde uygulamaları ve geleceği, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, (2000) 91.
11. Mishra, R.S. and Ma, Z.Y., “Friction stir welding”, Materials Science and Engineering, 78 (2005).
12. Thomas, W.M and Nicholas, E.D., “Friction stir welding for the transportation Industries”, Materials&Design, 18 (1997) 269-273.
13. Külekçi, M.K. ve Şık, A., “Sürtünme karıştırma kaynağı ile Alüminyum alaşımı levhaların birleştirilmesi ve elde edilen kaynaklı bağlantıların özellikleri”, TMMOB

Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongre ve Sergisi, (2003b), Bildiriler Kitabı, 34-44.

14. Çam, G., 2003a, Sürtünme karıştırma kaynağı ve uygulama alanları, 3. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 3, 113-124.
15. Kaluç E., Taban E., TMMOB Makine Mühendisleri Odası MMO 2007-460
16. Özsoy, M. ve Kaluç, E., “Sürtünen eleman ile birleştirme kaynağının esasları”, Mühendis ve Makine Dergisi, 2002, 13.
17. Mathers, G., The welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing, Limited. 2002.
18. Mert. Ş ve Kaluç E ‘Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler’ TMMOB Makine mühendisleri odası, IV. kaynak teknolojisi sempozyumu (2003)103-115
19. Çam G., 2003b Sürtünme Karıştırma Kaynağındaki Gelişmeler TMMOB kaynak teknolojisi kongre sergisi bildiriler kitabı 4-21
20. Ericsson, M ‘Fatigue strenght of friction stir weld of joint in aluminum2 Ph.D.Thesis Royal Institute of Technology, Sweden 2005
21. Khaled T, “An Outsider Looks at Friction Stir Welding”, July 2005
22. Ericson, M. And Sandström, R., “ Influence of welding speed on the fatigue of friction stir weld and comparision with MIG and TIG”, International Journal of Fatigue 25, 137-138, (2003)
23. [www.saglammetal.com](http://www.saglammetal.com) 09.01.2010
24. [www.fnss.com.tr](http://www.fnss.com.tr) 22.01.2010
25. [www.twi.co.uk](http://www.twi.co.uk) 08.01.2010

## **ÖZGEÇMİŞ**

1981 yılında Trabzon'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Trabzon'da tamamladıktan sonra 2005 yılında Mustafa Kemal Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünde yüksek lisansa başladı. Şuan Artvin Bayındırlık ve İskan Müdürlüğünde Makine Mühendisi olarak görev yapmakta olup iyi derecede İngilizce bilmektedir.