

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ**

**FARKLI KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE BİRLEŞTİRİLEN
3000 SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMI PLAKALARIN
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERT ALİ BAYRAK

DENİZLİ, EYLÜL - 2021

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ



FARKLI KAYNAK YÖNTEMLERİ İLE BİRLEŞTİRİLEN
3000 SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMI PLAKALARIN
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERT ALİ BAYRAK

DENİZLİ, EYLÜL - 2021

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Kordinasyon Birimi tarafından 2020FEBE023 nolu proje ile desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

MERT ALİ BAYRAK

ÖZET

FARKLI KAYNAK YÖNTEMİ İLE BİRLEŞTİRİLEN 3000 SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMI PLAKALARIN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MERT ALİ BAYRAK

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI:DR. ÖĞR. ÜYE. VOLKAN ONAR)

DENİZLİ, EYLÜL - 2021

Son yıllarda otomotiv endüstrisi hafif ve aynı zamanda dayanımı yüksek araçlar üretmek, yakıt tasarrufu ve düşük gaz salınımı hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda otomobillerde hafif metallerin kullanımı artış göstermektedir. Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde özellikle soğutma sistemlerinde kullanılan 3005 serisi alüminyum alaşımının farklı kaynak yöntemleri ve farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilmesinin mekanik dayanımlara ve mikroyapıya etkisi incelenmiştir. Kaynaklı birleştirmeler MIG (Metal Inert Gas) ve CMT (Cold Metal Transfer) kaynak yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde üç farklı kaynak akımı (100 A, 110 A ve 120 A) ve üç farklı kaynak hızı (550 mm/dk, 600 mm/dk ve 650 mm/dk) kullanılmıştır. Numunelere uygulanan çekme testi ile mekanik dayanımları belirlenmiş olup ayrıca optik ve elektron (SEM, EDS) mikroskopları ile yapılan incelemelerle mikroyapı karakterleri ortaya çıkarılmıştır. MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8 ve M9 kodlu numunelerin sırasıyla çekme dayanımları 115, 106, 108, 138,126, 112, 143, 123, 146 MPa ve CMT kaynak yöntemi ile birleştirilen C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 ve C9 kodlu numunelerin çekme dayanımları sırasıyla 84, 62, 139, 85, 97, 125, 113, 143,120 MPa olarak ölçülmüştür. MIG kaynak yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirmelerde en yüksek çekme dayanımı 120 A kaynak akımı ve 550 mm/dk kaynak hızı parametrelerine sahip M9 kodlu numunede olduğu tespit edilmiştir. CMT kaynak yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirmelerde en yüksek çekme dayanımı C8 kodlu, 120 A kaynak akımına ve 600 mm/dk kaynak hızına sahip numunede olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada yüksek ısı girdisi ile iyi bir mikroyapı ve yüksek mekanik özellikler elde edildiği saptanmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: MIG, CMT, ALÜMİNYUM

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 3000 SERIES ALUMINIUM ALLOY PLATES JOINED BY DIFFERENT WELDING METHODS

MSC THESIS

MERT ALİ BAYRAK

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
AUTOMOTIVE ENGINEERING**

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. VOLKAN ONAR)

DENİZLİ, JULY 2021

In recent years, the automotive industry has aimed for fuel saving and low gas emission by producing lightweighted and high-strength vehicles. In line with this aim, the usage of light metals in the automotive industry is increasing. In this study, the effect of the joining the 3005 series aluminium alloy, which is used in the automotive industry especially in cooling systems, on the mechanical strength and microstructure by using various welding methods and welding parameters was examined. Welded joints were made using MIG (Metal Inert Gas) and CMT (Cold Metal Transfer) welding methods. Three different welding currents (100 A, 110 A and 120 A) and three different welding speeds (550 mm/min, 600 mm/min and 650 mm/min) were used in welded joints. The mechanical strength of the samples was determined by the tensile test applied to the samples, and the microstructural characteristics were revealed by the examinations made with optical and electron (SEM, EDS) microscopes. Tensile strengths of M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8 and M9 coded samples joined by MIG welding method, respectively, are 115, 106, 108, 138, 126, 112, 143, 123, 146 MPa and C1 joined by CMT welding method. The tensile strengths of, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8 and C9 coded samples were measured as 84, 62, 139, 85, 97, 125, 113, 143, 120 MPa, respectively.

It has been determined that the highest tensile strength in the joints made with the MIG welding method is in the M9 coded sample, which has 120 A welding current and 550 mm/min welding speed parameters.

It was determined that the highest tensile strength in the joints made with the CMT welding method was found in the C8 coded sample with a welding current of 120 A and a welding speed of 600 mm/min. In this study, it was determined that a good microstructure and high mechanical properties were obtained with high heat input.

KEYWORDS: MIG, CMT, ALUMINIUM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|---|------|
| ÖZET..... | i |
| ABSTRACT | ii |
| İÇİNDEKİLER..... | iii |
| ŞEKİL LİSTESİ..... | vi |
| TABLO LİSTESİ..... | ix |
| FORMÜL LİSTESİ | xi |
| SEMBOL LİSTESİ..... | xii |
| KISALTMALAR | xiii |
| ÖNSÖZ..... | xiv |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 2. ALÜMİNYUM | 3 |
| 2.1 Alüminyumun Elde Edilmesi | 3 |
| 2.2 Alüminyumun Genel Özellikleri | 4 |
| 3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI..... | 7 |
| 3.1 Alüminyum Alaşımalarının Sınıflandırılması..... | 7 |
| 3.1.1 1XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları | 8 |
| 3.1.2 2XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları | 8 |
| 3.1.3 3XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları | 8 |
| 3.1.4 4XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları | 8 |
| 3.1.5 5XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları | 9 |
| 3.1.6 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları | 9 |
| 3.1.7 7XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları | 9 |
| 3.1.8 8XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları | 10 |
| 3.2 Alüminyum Alaşımalarında Bulunan Elementlerin Alaşıma Etkileri .. | 10 |
| 3.2.1 Silisyum | 10 |
| 3.2.2 Bakır | 10 |
| 3.2.3 Magnezyum..... | 10 |
| 3.2.4 Krom..... | 11 |
| 3.2.5 Çinko | 11 |
| 3.2.6 Mangan | 11 |
| 3.2.7 Demir | 11 |
| 3.2.8 Titanyum..... | 11 |
| 3.3 Alüminyum Alaşımalarının Kullanım Alanları | 12 |
| 3.3.1 Otomotiv Endüstrisi | 12 |
| 3.3.2 Ambalaj Endüstrisi | 13 |
| 3.3.3 İnşaat Endüstrisi | 13 |
| 3.3.4 Elektrik Elektronik Endüstrisi..... | 13 |
| 3.3.5 Savunma ve Havacılık Endüstrisi | 13 |
| 3.3.6 Yeni Kullanım Alanları | 14 |
| 3.4 Alüminyum Alaşımalarının Kaynak Kabiliyeti | 14 |
| 3.4.1 Alüminyum Alaşımalarının Kaynaklanabilirliği | 14 |
| 3.4.2 Alüminyum Alaşımalarının Kaynak Kabiliyetini Etkileyen Faktörler | 16 |
| 3.4.2.1 Oksit..... | 16 |
| 3.4.2.2 Hidrojen Çözünürlüğü..... | 17 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.4.2.3 | Elektriksel İletkenlik | 18 |
| 3.4.3 | Çarpılma | 19 |
| 4. | ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA KULLANILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ..... | 20 |
| 4.1 | Katı Hal Kaynak Yöntemleri..... | 20 |
| 4.1.1 | Soğuk Kaynak Yöntemi..... | 20 |
| 4.1.2 | Difüzyon Kaynak Yöntemi | 20 |
| 4.1.3 | Sürtünme Kaynak Yöntemi | 20 |
| 4.1.4 | Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi | 21 |
| 4.2 | Örtülü Çubuk Elektrik Kaynak Yöntemi | 22 |
| 4.3 | Elektrik Nokta Direnç Kaynağı | 22 |
| 4.4 | TIG Kaynak Yöntemi | 23 |
| 4.4.1 | TIG Kaynak Yöntemi Avantajları ve Dezavantajları..... | 24 |
| 4.5 | Soğuk Metal Transfer (CMT) Kaynak Yöntemi | 24 |
| 4.5.1 | CMT Kaynak Makinesi Genel Donanımları..... | 26 |
| 4.5.2 | CMT Kaynak Yönteminin Genel Özellikleri..... | 26 |
| 4.5.3 | CMT Kaynak Yönteminin Türevleri | 27 |
| 4.5.3.1 | CMT Pulse..... | 27 |
| 4.5.3.2 | CMT Advanced | 27 |
| 4.5.3.3 | CMT Advanced Pulse | 27 |
| 4.6 | MIG Kaynak Yöntemi | 28 |
| 4.6.1 | MIG Kaynak Yönteminin Tarihçesi..... | 29 |
| 4.6.2 | MIG Kaynak Yönteminde Akım Şekli..... | 29 |
| 4.6.3 | MIG Kaynak Yöntemi Avantajları..... | 29 |
| 4.6.4 | MIG Kaynak Yönteminde Kullanılan Koruyucu Gazlar | 30 |
| 4.6.5 | MIG Kaynak Yönteminde Metal Transferi | 31 |
| 4.6.5.1 | Kısa Ark | 31 |
| 4.6.5.2 | Orta Ark | 31 |
| 4.6.5.3 | Sprey Ark | 31 |
| 4.6.6 | MIG Kaynak Yöntemi Parametreleri | 32 |
| 4.6.6.1 | Kaynak Akımı | 32 |
| 4.6.6.2 | Ark Gerilimi | 32 |
| 4.6.6.3 | Kaynak Hızı..... | 32 |
| 4.6.6.4 | Tel Çapı..... | 33 |
| 5. | LİTERATÜR ÇALIŞMALARI | 34 |
| 6. | DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... | 42 |
| 6.1 | 3005 Alüminyum Alaşımı..... | 42 |
| 6.2 | İlave Kaynak Metali..... | 43 |
| 6.3 | Koruyucu Gaz..... | 43 |
| 6.4 | MIG Kaynak Robotu | 43 |
| 6.5 | CMT Kaynak Robotu..... | 45 |
| 7. | YÖNTEM | 46 |
| 7.1 | Deney Numunelerinin Kaynaklı Birleştirilmeleri | 46 |
| 7.2 | Numunelerin Çekme Testine Uygun Olarak Kesilmesi..... | 48 |
| 7.3 | Metalografik Çalışmalar | 52 |
| 7.4 | Çekme Deneyi | 55 |
| 7.5 | Sertlik Deneyi..... | 55 |
| 8. | BULGULAR..... | 56 |
| 8.1 | Çekme Deneyi Sonuçları | 56 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 8.2 | MIG ve CMT Kaynak Yöntemleri ile Gerçekleştirilen Birleştirmelerin Farklı Boyutlardaki Mikroyapı ve Makroyapı Görüntüleri. | 67 |
| 8.3 | SEM Çalışmaları ve EDS Analizleri | 87 |
| 8.4 | Sertlik Deneyi Sonuçları | 105 |
| 9. | SONUÇ VE ÖNERİLER | 107 |
| 10. | KAYNAKLAR | 110 |
| 11. | ÖZGEÇMİŞ..... | 119 |

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1: Alüminyum oluşumunun şematik gösterimi (TMMOB 2016)..... | 4 |
| Şekil 3.2: Yıllara göre otomobillerde kullanılan alüminyum miktarı (TMMOB 2006)..... | 12 |
| Şekil 3.3: Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde kullanılan kaynak yöntemleri (Kırlı 2011)..... | 15 |
| Şekil 3.4: Hidrojen çözünürlüğü (Pakgil 2005)..... | 17 |
| Şekil 4.5: Sürtünme kaynak yöntemi (Özaslan 2019) | 21 |
| Şekil 4.6: Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi (Şen 2019) | 21 |
| Şekil 4.7: Elektrik nokta direnç kaynağı (Demir 2019)..... | 22 |
| Şekil 4.8: TIG kaynak yöntemi (Onar 2016)..... | 23 |
| Şekil 4.9: CMT kaynak robotu | 24 |
| Şekil 4.10: CMT kaynak yönteminde kaynak teli hareketi (Kahraman 2018).. | 25 |
| Şekil 4.11: CMT kaynak yönteminde zamana bağlı akım dağılımı (Talalaev 2012)..... | 25 |
| Şekil 4.12: CMT kaynak makinesi (Kaçar 2011) | 26 |
| Şekil 4.13: MIG kaynak yöntemi (Çetkin 2018) | 28 |
| Şekil 6.14: a-) Kaynaklı birleştirme öncesi, b-) Kaynaklı birleştirme sonrası .. | 42 |
| Şekil 6.15: MIG kaynak robotu | 44 |
| Şekil 6.16: CMT kaynak robotu | 45 |
| Şekil 7.17: MIG kaynak robotu ile gerçekleştirilen birleştirmeler | 46 |
| Şekil 7.18: CMT kaynak robotu ile gerçekleştirilen birleştirmeler | 47 |
| Şekil 7.19: Hassas testere makinesi | 53 |
| Şekil 7.20: Zımpara makinesi..... | 53 |
| Şekil 7.21: Dağlama işleminin gerçekleştirildiği muhafazalı alan | 54 |
| Şekil 7.22: Mikroskop ve bilgisayar donanımı..... | 54 |
| Şekil 7.23: Çekme deneyi cihazı | 55 |
| Şekil 7.24: Sertlik deney cihazı | 55 |
| Şekil 8.25: M1, M2 ve M3 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları..... | 56 |
| Şekil 8.26: M4, M5 ve M6 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları..... | 57 |
| Şekil 8.27: M7, M8 ve M9 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları..... | 57 |
| Şekil 8.28: C1, C2 ve C3 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları..... | 58 |
| Şekil 8.29: C4, C5 ve C6 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları..... | 58 |
| Şekil 8.30: C7, C8 ve C9 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları..... | 59 |
| Şekil 8.31: M3, M6 ve M9 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları..... | 59 |
| Şekil 8.32: M2, M5 ve M8 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları..... | 60 |
| Şekil 8.33: M1, M4 ve M7 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları..... | 60 |

| | |
|--|----|
| Şekil 8.34: C3, C6 ve C9 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları..... | 61 |
| Şekil 8.35: C2, C5 ve C8 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları..... | 61 |
| Şekil 8.36: C1, C4 ve C7 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları..... | 62 |
| Şekil 8.37: C1, C2, C3, M1, M2 ve M3 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları | 62 |
| Şekil 8.38: C4, C5, C6, M4, M5 ve M6 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları | 63 |
| Şekil 8.39 C7, C8, C9, M7, M8 ve M9 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları | 63 |
| Şekil 8.40: C3, C6, C9, M3, M6 ve M9 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları | 64 |
| Şekil 8.41: C2, C5, C8, M2, M5 ve M8 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları | 64 |
| Şekil 8.42: C1, C4, C7, M1, M4 ve M7 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları | 65 |
| Şekil 8.43: Farklı kaynak hızları ve farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımlarına kaynak akımının etkisini gösteren grafik | 65 |
| Şekil 8.44: Farklı kaynak akımları ve farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımlarına kaynak hızının etkisini gösteren grafik..... | 66 |
| Şekil 8.45: Çekirdek (Kaynak Bölgesi) | 87 |
| Şekil 8.46: Geçiş..... | 88 |
| Şekil 8.47: M9 numaralı numunenin 2000 x büyütmedeki geçiş bölgesi görüntüsü..... | 89 |
| Şekil 8.48: M9 numaralı numunenin 10000 x büyütmedeki görüntüsü | 89 |
| Şekil 8.49: M9 numaralı numunenin 6000 x büyütmedeki görüntüsü | 90 |
| Şekil 8.50: M9 kodlu numunenin ana metal kısmı EDS analizi..... | 91 |
| Şekil 8.51: M9 kodlu numunenin boşluk kısmı 1 EDS analizi | 92 |
| Şekil 8.52: M9 kodlu numunenin çatlak kısmı EDS analizi | 93 |
| Şekil 8.53 M9 kodlu numunenin tane sınırının EDS analizi..... | 94 |
| Şekil 8.54: C3 numaralı numunenin 3000 x büyütmedeki ana geçiş bölgesi görüntüsü..... | 95 |
| Şekil 8.55: C3 numaralı numunenin 5000 x büyütmedeki ITAB-Çekirdek Bölgesi | 95 |
| Şekil 8.56: C3 numaralı numunenin 500 x büyütmedeki geçiş bölgesi görüntüsü..... | 96 |
| Şekil 8.57: C3 numaralı numunenin 1000 x büyütmedeki ITAB bölgesi Mg ₂ Si oluşumu | 97 |
| Şekil 8.58: C3 numaralı numunenin 3000 x büyütmedeki çökeltme bölgesinden alınan SEM görüntüsü..... | 97 |
| Şekil 8.59: C3 numaralı numunenin 3000 x büyütmedeki kaynak bölgesi görüntüsü..... | 98 |
| Şekil 8.60: C3 numaralı numunenin 3000 x büyütmedeki kaynak bölgesi görüntüsü..... | 99 |
| Şekil 8.61: C3 numaralı numunenin 10000 x büyütmedeki ITAB bölgesi Al-Cu çökelmeleri | 99 |

| | |
|--|-----|
| Şekil 8.62: C3 kodlu numunenin boşluk kısmı EDS analizi | 100 |
| Şekil 8.63: C3 kodlu numunenin geçiş bölgesi EDS analizi..... | 101 |
| Şekil 8.64: C3 kodlu numunenin kaynak bölgesi EDS analizi..... | 102 |
| Şekil 8.65: C3 kodlu numunenin kaynak bölgesi EDS analizi..... | 103 |
| Şekil 8.66: C3 kodlu numunenin kırık yüzey EDS analizi | 104 |
| Şekil 8.67: C3 kodlu numunenin ana malzeme EDS analizi..... | 105 |
| Şekil 8.68: Sertlik deneyinde ölçüm yapılan noktaların sırasıyla gösterimi ... | 106 |
| Şekil 8.69: M9 ve C3 kodlu numunelerin sertlik değerleri | 106 |

TABLO LİSTESİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Tablo 2.1: Alüminyum elementinin genel özellikleri (Onar 2016) | 5 |
| Tablo 3.2: Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Turhan 2002) | 7 |
| Tablo 3.3: Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlarının kaynak edilebilirlik dereceleri (Onar 2010) | 18 |
| Tablo 4.4: MIG kaynak yönteminde kullanılan koruyucu gazların özellikleri (Anık ve Vural 1990) | 30 |
| Tablo 6.5: AA3005 alüminyum alaşımının kimyasal bileşenleri | 42 |
| Tablo 6.6: 4043 ilave kaynak telinin kimyasal bileşenleri | 43 |
| Tablo 7.7: MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde kullanılan kaynak parametreleri | 46 |
| Tablo 7.8: CMT kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde kullanılan kaynak parametreleri | 47 |
| Tablo 7.9: MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numuneler | 48 |
| Tablo 7.10: CMT kaynak yöntemi ile birleştirilen numuneler | 50 |
| Tablo 8.11: M1 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 67 |
| Tablo 8.12: M2 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 68 |
| Tablo 8.13: M3 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 69 |
| Tablo 8.14: M4 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 70 |
| Tablo 8.15: M5 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 71 |
| Tablo 8.16: M6 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 72 |
| Tablo 8.17: M7 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 73 |
| Tablo 8.18: M8 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 74 |
| Tablo 8.19: M9 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 75 |
| Tablo 8.20: C1 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 76 |
| Tablo 8.21: C2 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 77 |
| Tablo 8.22: C3 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 78 |
| Tablo 8.23: C4 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 79 |
| Tablo 8.24: C5 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 80 |
| Tablo 8.25: C6 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 81 |

| | |
|---|----|
| Tablo 8.26: C7 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 82 |
| Tablo 8.27: C8 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 83 |
| Tablo 8.28: C9 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri | 84 |
| Tablo 8.29: MIG ve CMT kaynak yöntemleri ile birleştirilen numunelerin 1x büyütmeledeki makro görüntüleri | 85 |

FORMÜL LİSTESİ

| | | |
|---|---|-----------------------|
| Al₂O₃ | : | Alümina |
| FeO | : | Demir Oksit |
| Al₂SiO₅ | : | Alüminyum Silikat |
| Al₂O₃ | : | Alüminyum Oksit |
| Al₂O₃H₂O | : | Mono-Hidrat Oksit |
| Al₂O₃3H₂O | : | Tri-Hidrat Oksit |
| Al (OH)₃ | : | Alüminyum Hidro Oksit |
| CO₂ | : | Karbon Dioksit |
| S⁻² | : | Sülfür |

SEMBOL LİSTESİ

| | | |
|------------|---|---------------|
| V | : | Volt |
| kWh | : | Kilowatt Saat |
| Mg | : | Magnezyum |
| Si | : | Silisyum |
| Cu | : | Bakır |
| Zn | : | Çinko |
| Al | : | Alüminyum |
| Mn | : | Mangan |
| Li | : | Lityum |
| Cr | : | Krom |
| Fe | : | Demir |
| Ti | : | Titanyum |
| Pb | : | Kurşun |
| Ni | : | Nikel |
| Cd | : | Kadmiyum |
| Ag | : | Gümüş |
| Ar | : | Argon |
| He | : | Helyum |

KISALTMALAR

| | | |
|--------------|---|------------------------------|
| ITAB | : | Isı Tesiri Altındaki Bölge |
| MIG | : | Metal Inert Gas |
| TIG | : | Tungsten Inert Gas |
| MAG | : | Metal Active Gas |
| FSW | : | Friction Stir Welding |
| ymk | : | Yüzey Merkezli Kübik |
| AA | : | Alüminyum Birliği |
| ABD | : | Amerika Birleşik Devletleri |
| SIGMA | : | Shielded Inert Gas Metal Ark |

ÖNSÖZ

Engin fikirleriyle yüksek lisansa başlamamda etkin olan, tez süresince bilgi ve tecrübesi ile her zaman yanımda hissettiğim, bir ağabey gibi sabrını ve hoşgörüsünü benden esirgemeyen danışman hocam Dr.Öğr.Üye. Volkan ONAR' a, lisans öğrenimimden bu zamana kadar bana bilimi sevdiren ve bilimsel çalışmalar yapma hayalini kazandıran Doç.Dr.Öğr.Üye. Arzum IŞITAN' a, yorulduğum ve bunaldığım vakitlerde bir parça nasihatini ve bir bardak demli çayını eksik etmeyen manevi hocam, ağabeyim sayın Mehmet Ali KURT' a, dostluklarıyla müşerref olmanın mutluluğunu bir ömür boyu taşıyacağım güzel arkadaşlarım H. Fatih TEKBAŞ, H. İbrahim SALMAN ve A. Kaan Yazıcı' ya, iki yıl boyunca bana sofralarını açan pek kıymetli ağabeylerim Murat ÇELİK ve Ahmet AKIN' a, tez süresince yardımlarıyla bana destek olan Bahadır IŞCAN ve Tuğçe ÇÖZELİ' ye teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İmkanlarını ve vakitlerini bu çalışma için ayıran başta Hüseyin AÇIKEL, Mehmet KAYALAR ve Serhan BALABAN olmak üzere tüm MAGMAWELD çalışanlarına ve Murat KONAR' a teşekkür ederim.

Hayatın her adımında ve zamanın her anında varlıklarıyla güç bulduğum, maddi manevi desteklerini her daim hissettiğim, babam Yavuz BAYRAK, annem Nadire BAYRAK ve kardeşim Metin BAYRAK' a, aynı soyadı taşımaktan şeref duyduğum kıymetli aile fertlerime, anlayışı ve destekleyici tutumuyla bu süreçte büyük yardımları olan, dünya ve ahiret yoldaşım sevgili nişanlım Sema Nur TOSUN' a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

1. GİRİŞ

Doğada bileşik halinde %8 civarında içeriği bulunan alüminyum, yer kabuğunda en çok bulunan elementlerden birisidir. Yer kabuğunda bu denli çokça olmasına karşın varlığının tespit edilmesi 1808 yılında Sir Humphry Davy tarafından gerçekleştirilmiştir. Alüminyumun endüstriyel üretimi ise 1886 yılında Paul Louis Toussaint Heroult ve Charles Martin Hall' in ayrı ayrı yaptıkları çalışmalar neticesinde başlamıştır. Hall-Heroult yöntemi diye adlandırılan ergimiş kriyolit içinde çözündürülen alüminyum oksit üzerinden elektrik akımı geçirilmesi yöntemi ile alüminyumun sıvı halde biriktirilmesi sağlanmıştır. 1988 yılında ilk alüminyum elektroliz tesisinin kurulmasıyla birlikte dünyada alüminyum üretimi ve kullanımı artış göstermeye başlamıştır (TMMOB 2006).

Alüminyum birincil üretimi; boksit cevherinin Bayer yöntemi kullanılarak alümina (Al_2O_3) elde edilmesi ve akabinde alüminaya uygulanan Hall-Heroult metodu ile sıvı alüminyumun elde edilmesi aşamalarını kapsamaktadır. Sıvı alüminyumun ürün ya da yarı ürün olarak imal edilmesi için külçe şeklinde döküm, haddeleme, çekme, dövme ve ekstrüzyon yöntemleri uygulanmaktadır. Genel olarak boksit cevheri ağırlığının %25'i oranında alüminyum elde edilmektedir. Kullanılmış alüminyumların geri dönüşüm tesislerinde dönüşümü ile üretilen alüminyumlar, ikincil alüminyum olarak adlandırılmaktadır. Alüminyumdan üretilmiş başta içecek kutuları olmak üzere her türlü alüminyum atıklar ikincil alüminyum üretimi için dönüştürülmektedir. Enerji ihtiyacının az olması ve çevre dostu olması gibi avantajları sebebiyle ikincil alüminyum üretimi hızla artmaktadır (Eroğlu ve Şahiner 2018).

Alüminyum alaşımlarının üretiminde dövme ve döküm yöntemleri kullanılmaktadır. Her iki yöntem ile üretilen alüminyum alaşımları ısıl işlem uygulanabilen ve ısıl işlem uygulanamayan seriler olarak iki alt sınıfa ayrılmaktadır. Alüminyum alaşımı serileri; dayanımını arttırmak amacı ile ısıl işlem uygulanabilen 2XXX, 6XXX, 7XXX ile ısıl işlem uygulanamayan 1XXX, 3XXX, 5XXX alüminyum alaşımı serilerinden ve ısıl işlem şartı taşımayan 4XXX alüminyum alaşımı serisinden oluşmaktadır (Başer 2012, Smith 2001).

Bilindiği gibi hafif ve yüksek mekanik özelliklere sahip metallere olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle alüminyum, magnezyum ve titanyum alaşımları gibi hafif yapı metallerinin birçok sektörde kullanımı sürekli artış göstermektedir. Hafif yapı metallerinden olan alüminyum alaşımları; hafiflik, yüksek korozyon direnci, iyi derecede ısı-elektrik iletkenliği ve geliştirilebilir mekanik özellikleri nedeniyle başta otomotiv endüstrisi olmak üzere birçok alanda tercih edilmektedir. Ayrıca alüminyum alaşımları yüksek şekillenebilme kabiliyeti sayesinde üretim maliyetini düşürdüğünden, imalat sektörlerindeki kullanım oranını artış göstermektedir (Totten ve Mackenzie 2003).

Farklı endüstrilerde kullanımı gittikçe artan alüminyum alaşımlarının kaynaklanabilirliği de önem arz etmektedir. Alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirilmelerinde ergitme kaynak yöntemleri kullanılmakla beraber basınç temelli kaynak yöntemleri de uygulanmaktadır. Alüminyum alaşımlarının ergitme kaynak yöntemleri (MIG, TIG, MAG) ile birleştirilmelerinde; ergime sonrasında yeniden katılaşma sürecinde kaynak bölgesinde oluşan gözeneklilik, Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)' de oluşan metalürjik dönüşümler ve çarpılmalar gibi problemler meydana gelmektedir. Bu problemlere rağmen uygulanabilirlik ve fiyat-performans açısından ergitme kaynak yöntemleri, alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinde büyük bir paya sahiptir. Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde kullanımı hızla artmakta olan sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) ise basınç temelli bir kaynak yöntemidir. FSW kaynak yöntemi ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde üstün mekanik özellikler elde edilmesi ve çarpılmaların olmaması bu kaynak yönteminin önemli kazanımları arasındadır. Bu sebeple havacılık ve uzay endüstrilerinden gemi inşa sektörüne, zırhlı araç imalatından otomotiv sektörüne kadar geniş bir yelpazede uygulama alanı bulmaktadır (Taban ve Kaluç 2005, Mathers 2002).

Bu çalışmada AA3005 serisi alüminyum alaşımı plakaların birleştirilmesinde Metal Inert Gas (MIG) ve Cold Metal Transfer (CMT) kaynak yöntemleri kullanılmıştır. Farklı kaynak parametrelerinde yapılan kaynaklı birleştirmelerden elde edilen numuneler çekme deneyine, sertlik testine ve mikroyapı incelemelerine tabi tutulmuştur. Mekanik deneylerin ve mikroyapı incelemelerinin neticesinde AA3005 alüminyum alaşımı plakaların kaynaklı birleştirilmelerinde kullanılan uygun kaynak yöntemleri ve optimum parametreler tespit edilmiştir.

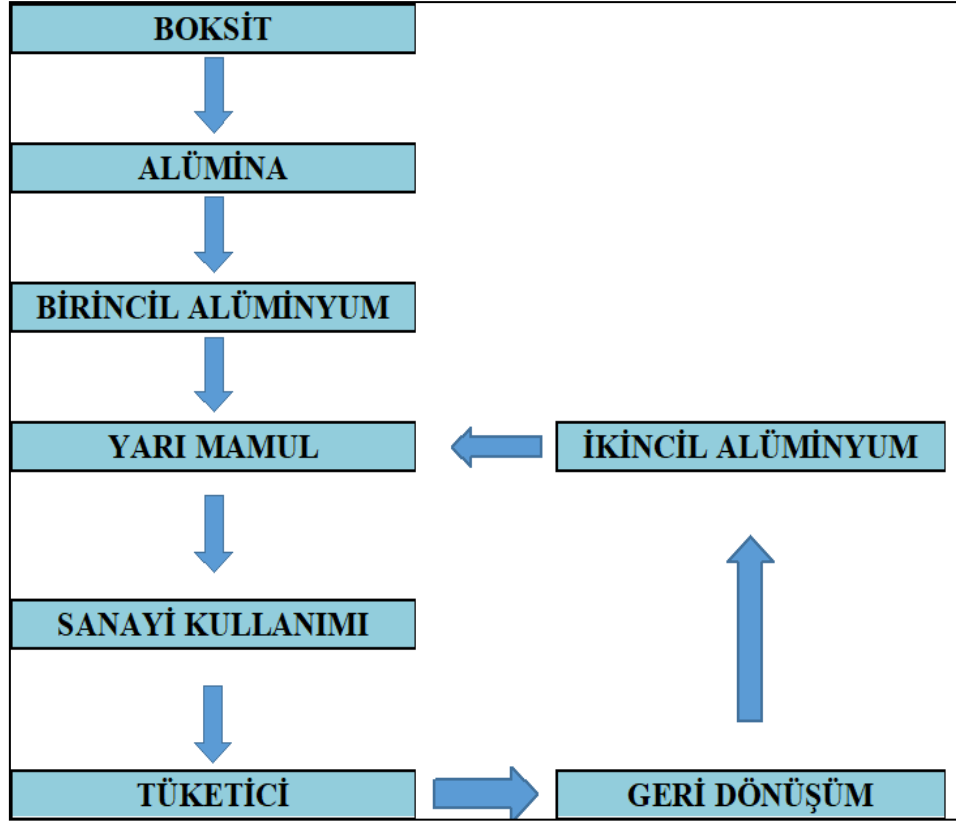
2. ALÜMİNYUM

2.1 Alüminyumun Elde Edilmesi

Dünya üzerinde en fazla bulunan madenlerden birisi de alüminyum rezervleridir. Yeraltında bileşik halinde bulunduğundan 1814'lü yıllarda üretilmeye başlanmasına rağmen üretim zorluğu nedeniyle tercih edilmemekteydi. Alüminyumun endüstriyel üretimi 1886 yılında Charles Martin Hall ve Paul Louis Toussaint Heroult'ın ayrı ayrı uyguladıkları özel elektroliz yöntemi ile başlamıştır (Onar 2010).

Oksijene karşı çekim gücünün yüksek olması nedeniyle doğada bileşik halinde bulunan alüminyum; demir oksit (FeO)-alüminyum oksit (Al_2O_3), demir oksit (FeO)-alüminyum silikat (Al_2SiO_5) ve alüminyum silikat (Al_2SiO_5) cevherlerinden elde edilmektedir. Dünya üzerinde en fazla bulunan alüminyum cevheri demir oksit-alüminyum oksit bileşiği olan boksittir (FeO- Al_2O_3). Alüminyum, mono-hidrat oksit ($Al_2O_3 \cdot H_2O$) ve tri-hidrat oksit ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) olmak üzere iki şekilde boksit içerisinde bulunmaktadır (Alper 2003).

Boksit cevherinden alüminyum üretimi iki farklı aşamada gerçekleşmektedir. Bu aşamalardan birincisi boksit cevherinden alümina elde edilmesi şeklinde tanımlanan Bayer metodudur. İkinci aşama ise alüminadan (Al_2O_3) elektroliz ile alüminyum elde edilmesidir. Genel itibariyle boksit cevherlerinin yakınına kurulan alümina tesislerinde südkostik eriyiği kullanılarak, boksit cevherlerinden alüminyum hidroksit ($Al(OH)_3$) elde edilmektedir. Bu işlemden sonra kalıntılar ayrılır ve alümina elde edilir. Beyaz toz görünümündeki alüminanın elde edilmesinden sonra elektroliz havuzlarına alınan alümina 4-5 volt (V) gerilim değerlerinde doğru akım verilerek suretiyle oksijenden ayrılması sağlanmaktadır. Böylelikle alüminyum, elektroliz havuzlarının dip kısımlarında birikmektedir. Genel olarak boksit cevheri ağırlığının %25'i kadar alüminyum üretilmektedir (Çetin 2005).



Şekil 2.1: Alüminyum oluşumunun şematik gösterimi (TMMOB 2016)

Alüminyum üretiminin endüstriyel olduğu ilk yıllarda, birincil alüminyum üretimi için ton başına 42.000 kWh enerji gerekirken günümüzde bu enerji miktarı 16.500 kWh olmuştur. Yüksek elektrik enerjisi gerektiren birincil alüminyum üretimine karşılık, geri dönüşüm yolu ile üretilen ikincil alüminyum üretiminde ise birincil alüminyum üretiminde kullanılan elektrik enerjisinin %5'i kadarı kullanılmaktadır. Bu durum ikincil alüminyum üretimi önemini arttırmaktadır. İkincil alüminyum üretimi için içecek kutuları, otomobil parçaları ve pencere çerçeveleri birer geri dönüşüm ürünleridir (Kasaplar 2007).

2.2 Alüminyumun Genel Özellikleri

Alüminyum, periyodik cetvelin üçüncü grubunda yer alan ara geçiş metalidir. Atom numarası 13 olan alüminyum yüzey merkezli kübik (ymk) kafes sistemine sahiptir. Alüminyum, özgül ağırlığının ($2,69 \text{ g/cm}^3$) düşük olması sebebiyle, demir ($7,78 \text{ g/cm}^3$), bakır ($8,93 \text{ g/cm}^3$) ve çinko ($7,14 \text{ g/cm}^3$) gibi elementlerden daha hafiftir. Bu sebeple otomotiv, uzay ve uçak endüstrilerinde kullanım yelpazesini büyütmektedir (Choudhay 1998).

Alüminyumun özellikleri genel başlıklar altında sıralanacak olursa;

- Hafiflik
- Sonradan mukavemet kazandırılabilirlik
- Sürdürülebilir kullanım
- Yüksek korozyon direnci
- İşlenebilirlik
- Şekillendirilebilirlik
- Yüksek ısı ve elektrik iletkenliği
- Kaynaklanabilirlik

gibi özellikler ön plana çıkmaktadır (Yağcıgil 1997).

Özellikle otomotiv endüstrisinde özgül ağırlığının sağladığı hafiflik özelliği nedeniyle alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kullanılması firmalar arasında büyük rekabet oluşturmaktadır. Çünkü otomobillerin daha az yakıt tüketmeleri dolayısıyla doğaya daha az karbon dioksit (CO₂) salmaları ve aynı zamanda yüksek mukavemete sahip olmaları otomobil kullanıcılarının birincil istekleri arasında yer almaktadır. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının bir diğer önemli özelliği ise korozyon direncidir. Atmosfere, tuzlu suya, asitli yağlara ve birçok kimyasallara karşı yüksek korozyon direncine sahiptir (Çam 2005).

Alüminyum elementinin genel özellikleri tablo 2.1’de verilmektedir.

Tablo 2.1: Alüminyum elementinin genel özellikleri (Onar 2016)

| Sembol | Al |
|---------------------------------------|--------------------------------|
| Atom Numarası | 13 |
| Atom Ağırlığı | 26,98 g/mol |
| Kristal Yapısı | YMK |
| Yoğunluğu (20°C) | 2,6989 g/cm³ |
| Ergime Noktası | 660,24 °C |
| Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı | 150-300 °C |
| Kaynama Sıcaklığı | 2300 °C |
| Özgül Isısı (100 °C) | 0,2259 cal/g |

| | |
|-----------------------------|-----------------------------------|
| Elastik Modül | 6500–7200 N/mm² |
| Kayma Modülü | 2,7 |
| Çekme Dayanımı | 4-9 kPa/mm² |
| Akma Sınırı | 1-3 kPa/mm² |
| Uzama (%) | 60 |
| Kopma Uzaması (%) | 30-50 |
| Çentik Darbe Tokluğu | 10 kg/cm² |
| Sertlik (BHN) | 15-30 |

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının mekanik dayanımlarını arttırmak için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Uygulanacak farklı ısıl işlemler sonucu mukavemet, sertlik ve diğer mekanik dayanımlarında iyileşmeler olabileceği gibi magnezyum (Mg), silisyum (Si), bakır (Cu) ve çinko (Zn) gibi elementlerin ilave edilmesi ile de mekanik dayanımlar arttırılabilmektedir. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının mekanik dayanımlarının bu denli arttırılabilmesi kullanım alanlarını genişlettiği gibi aynı zamanda da önemini arttırmaktadır (Boyer ve Gall 1998).

3. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

3.1 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları döküm ve dövme alüminyum alaşımları olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Isıl işlem uygulanabilen ve ısıl işlem uygulanamayan olmak üzere alüminyum alaşımları iki alt gruba ayrılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının üretiminde ısıl işlem olarak yaşlanma sertleşmesi uygulanmaktadır. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları ise deformasyon, katı eriyik ve dağılım sertleşmesi yöntemleri kullanılarak mekanik dayanımları iyileştirilmektedir (Ak 2012).

Alüminyum alaşımlarının gruplandırılmasında yaygın olarak Alüminyum Birliğinin (AA: Aluminium Association) standarttı kullanılmaktadır. Tablo 3.2’de alüminyum serileri verilmektedir (Turhan 2002).

Tablo 3.2: Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Turhan 2002)

| Seri Adı | Temel Alaşım Elementi |
|----------|------------------------------|
| 1XXX | Saf Alüminyum (% 99,0 Al) |
| 2XXX | Al-Cu |
| 3XXX | Al-Mn |
| 4XXX | Al-Si |
| 5XXX | Al-Mg |
| 6XXX | Al-Mg-Si |
| 7XXX | Al-Zn |
| 8XXX | Diğer Elementler |
| 9XXX | Kullanılmayan Seri |

3.1.1 1XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları

Saf alüminyum olarak adlandırılan 1xxx serisi alüminyum alaşımaları en az %99.00 Al (Alüminyum) içermektedir. Çekme dayanımları 70–190 N/mm² arasında değişen 1xxx serisi alüminyum alaşımaları, uygun kaynak yöntemleri ile kaynak edilebilmektedir. 1xxx serisi alüminyum alaşımaları yüksek elektrik ve yüksek korozyon direnci istenilen yerlerde kullanılmaktadır. Mekanik özellikleri düşük olan 1xxx serisi alüminyum alaşımaları, kimyasal tankların imalatında, boru hatları ve elektrik iletim hatlarında kullanılmaktadır. Yapısal uygulamalarda kullanımı çok düşüktür (Anderson 2000 ve Domke 1988).

3.1.2 2XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları

Isıl işlem uygulanabilen 2xxx serisi alüminyum alaşımalarının temel alaşım elementi bakırdır (Cu). Özellikle havacılık sektöründe kullanılmakla beraber yüksek mukavemet istenen alanlarda tercih edilmektedir. Bakır elementinin etkisi ile alüminyum alaşımının sertliği artmakta ve kopma dayanımı yükselmektedir. Buna karşın işlenebilme yeteneği azalmaktadır (Demir 2019).

3.1.3 3XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları

Temel alaşım elementi mangan (Mn) olan 3xxx serisi alüminyum alaşımaları iyi derecede şekil değiştirme kabiliyetine sahip olmakla birlikte, iyi derecede kaynaklanabilme özelliğine sahiptir. Korozyon direnci yüksektir. Genellikle otomotiv sektöründe, mimari alanda ve kimyasal kaplarda tercih edilen 3xxx serisi alüminyum alaşımalarının mekanik dayanımları da kötü değildir. 3003, 3004, 3005 ve 3105 serileri, 3xxx serisi alüminyum alaşımalarının en yaygın kullanılan serileridir (Mercan 2018).

3.1.4 4XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları

4xxx serisi alüminyum alaşımalarının temel alaşım elementi silisyumdur (Si). Silisyum elementi, 4xxx serisi alüminyum alaşımalarının ergime noktasını düşürerek

kaynak kabiliyetini arttırıcı yönde etkilemektedir. Bu sebeple 4043 serisi alüminyum alaşımı, kaynak dolgu teli olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca 4xxx serisi alüminyum alaşımları, döküm yöntemi ile üretilen karmaşık şekilli geometrilerin imalatında kullanılmaktadır (Öz 2007 ve Meyveci 2007).

3.1.5 5XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

Temel alaşım elementi magnezyum (Mg) olan 5xxx serisi alüminyum alaşımları, yüksek aşınma direnci, iyi derecede dayanımı ve düşük sıcaklık altında yüksek tokluk göstermesi gibi özellikleri ile yüksek kaynaklanabilirliği sayesinde farklı sektörlerde kullanılmaktadır. 5xxx serisi alüminyum alaşımları özellikle gemi inşa sektöründe ve otomotiv sektöründe kullanılmaktadır (Arıcı 2019).

3.1.6 6XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

Magnezyum (Mg) ve silisyum (Si), 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının temel elementlerini oluşturmaktadır. Isıl işlem uygulanabilen 6xxx serisi alüminyum alaşımları şekillenebilirlik, kaynaklanabilirlik ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri sebebiyle otomotiv ve havacılık sektörlerinde kullanılmaktadır. Ayrıca mimari alanda, bisiklet üretiminde ve köprü yapımında da kullanılmaktadır (Sirel 2008).

3.1.7 7XXX Serisi Alüminyum Alaşımları

Havacılık, uzay ve otomotiv endüstrilerinde yoğun olarak kullanılan 7xxx serisi alüminyum alaşımları, diğer alüminyum alaşımlarına bakıldığında yüksek sertlik ve iyi derecede dayanıma sahiptirler. Temel alaşım elementi olarak %4–8 çinko (Zn) ve %1–3 magnezyum (Mg) elementlerini içeren 7xxx serisi alüminyum alaşımlarına bakır (Cu) elementi ilavesi ile bu serinin dayanımları bir miktar daha arttırılabilmektedir. Ayrıca 7xxx serisi alüminyum alaşımlarına uygulanacak yaşlandırma veya farklı ısıl işlemler ile de mekanik dayanımları arttırılabilmektedir (Yılmaz ve diğ. 2012).

3.1.8 8XXX Serisi Alüminyum Alaşımaları

Temel alaşım elementi lityum (Li) olan 8xxx serisi alüminyum alaşımalarının en yaygın kullanılan türü AA8017 alaşımıdır. Özellikle uzay ve uçak taşıtlarında kullanılan, iyi derecede tokluk ve yorulma direnci gösteren AA8090 serisi alüminyum alaşımı da 8xxx serisi alüminyum alaşımalarının çokça kullanılan alaşımıdır (Malyer 2010).

3.2 Alüminyum Alaşımalarında Bulunan Elementlerin Alaşıma Etkileri

3.2.1 Silisyum

Alüminyum alaşımalarında kullanımı yaygın olan silisyum (Si) elementi, alüminyum alaşımaların kaynak kabiliyetini artırır. Aynı zamanda akışkanlık sağlayarak alüminyum alaşımalarının dökülebilirliğini iyileştirmektedir. Alüminyum alaşımalarının mukavemetini artırıcı yönde katkı sağlamaktadır (Ediz 2011).

3.2.2 Bakır

Bakır (Cu) elementi, alüminyum alaşımalarının korozyon direncini azaltıcı yönde etki etse de düşük ve yüksek sıcaklıklarda alüminyum alaşımalarının mukavemetini yükseltmektedir. Aynı zamanda alüminyum alaşımalarına sertlik kazandırmaktadır (Apelian 2009).

3.2.3 Magnezyum

Alüminyum alaşımına yüksek mukavemet kazandıran magnezyum (Mg) elementi, süneklik ve korozyon direnci özelliklerini iyileştirmektedir. Kaynak kabiliyetini artırıcı yönde de etkilemektedir (Kocacı 1996).

3.2.4 Krom

Alüminyum alaşımlarında çözünürlüğü sınırlı olan krom (Cr) elementinin ilave edilmesi ile $CrAl_7$ bileşiği meydana gelmektedir. Meydana gelen $CrAl_7$ bileşiği mangan ve titanyum ile inceltilmektedir (Yılmaz ve Şen 1996).

3.2.5 Çinko

Çinko (Zn) elementi, alüminyum alaşımlarının döküm kabiliyetini düşürücü yönde etkilemektedir. Alüminyum alaşımlarına yüksek yüzdelerde çinko elementi ilavesi yapıldığında sıcak çatlama olayı gözlenmektedir. Farklı alaşım elementleri ile kullanıldığında dayanımı arttırmaktadır (Ataşen 2015).

3.2.6 Mangan

Alüminyum alaşımları, mangan (Mn) elementi ilavesi ile iyi mukavemet kazanmaktadırlar. Aynı zamanda yapılan mangan elementi ilavesi ile alüminyum alaşımlarının korozyon direnci değişmeden yeniden kristalleşme sıcaklığı 50-60 °C arttırılabilmektedir. En çok 3xxx serisi alüminyum alaşımlarında kullanılmaktadır (Ataşen 2015).

3.2.7 Demir

Alüminyum alaşımlarında tane küçültücü etki gösteren demir (Fe) elementi bir kısım alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıktaki mukavemet değerini arttırıcı yönde etkiler (Akgül 2007).

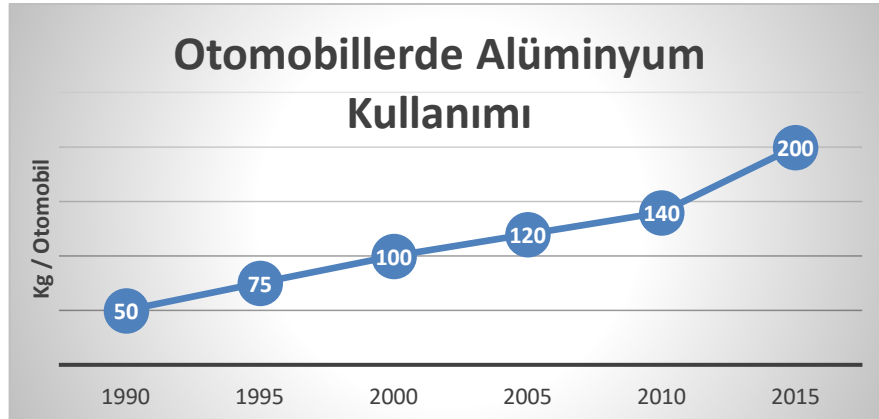
3.2.8 Titanyum

Alüminyum alaşımlarına %0,05–0,20 arasında ilave edilen titanyum (Ti) elementi, tane küçültücü bir etkide bulunmaktadır. Titanyum elementi akışkanlığı azaltması sebebiyle basınçlı dökümde tercih edilmemektedir (Demircioğlu 2002).

3.3 Alüminyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

3.3.1 Otomotiv Endüstrisi

Alüminyum alaşımlarının hafiflik ve aynı zamanda yüksek mukavemet özelliklerine sahip olması, bu alaşımların otomotiv sektöründe tercih edilmelerini sağlamaktadır. Özellikle bazı otomobil firmalarının daha az yakıt tüketen otomobil üretmek istemeleri, dolayısıyla hafif ve aynı zamanda dayanıklı bir malzemeye ihtiyaç duymaları, alüminyum alaşımlarının otomotiv sektöründeki önemini ve kullanım oranını gün geçtikçe arttırmaktadır (TMMOB 2006).



Şekil 3.2: Yıllara göre otomobillerde kullanılan alüminyum miktarı (TMMOB 2006)

Otomobil üretiminde alüminyum kullanım oranı toplam ağırlığın %25'i olarak hedeflenmektedir. Günümüzde bu oran %6 civarındadır. Bu oranın ivme kazanarak artacağı otomotiv firmaları tarafından ön görülmektedir. Günümüzde alüminyum alaşımları otomobillerin radyatör, vites parçaları ve farklı bölümlerinde yassı mamul olarak kullanılmaktadır. Ayrıca Audi markasının ürettiği A8 modelinin kaportası tamamen alüminyumdan üretilmiştir (TMMOB 2006).

3.3.2 Ambalaj Endüstrisi

Ambalaj sektörü, alüminyum ve alaşımlarının yaygın olarak kullanıldığı sektörlerden birisidir. Farklı malzemeler ile sağlanan korumayı, alüminyum ve alüminyum alaşımları çok küçük kalınlıkta sağlayabilmektedir. Rahatlıkla şekillendirilebilir olması, homojen ve hava geçirmez yapısı, mikron ölçüde üretilebilmesi alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ambalaj malzemesi olarak tercih edilmelerinin en önemli sebepleri arasındadır. Özellikle gaz, su, ısı ve mikroorganizma geçişine izin vermemesi, hava koşullarına dayanıklılığı gibi özellikleri sebebiyle gıda ve ilaç endüstrilerinde tercih edilmektedir (TMMOB 2006).

3.3.3 İnşaat Endüstrisi

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının hafiflik, yüksek korozyon direnci ve kolay şekillendirilebilirliği gibi özelliklerinden dolayı inşaat sektöründe kaplamalarda, mutfak tereklerinde, pencerelerde ve dekoratif eşyalarda tercih edilmektedir. Son yıllarda yapı elemanı olarak köprü inşaatlarında alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kullanımı yaygınlaşmaktadır (TMMOB 2006).

3.3.4 Elektrik Elektronik Endüstrisi

Alüminyumun elektrik sektöründe kullanımı Avrupa' da %10, ABD' de %9, Japonya' da %7 oranlarındadır. Özellikle yüksek gerilim hatlarında alüminyum teller kullanılmaktadır. Ayrıca şaselerde, yeraltı kablolarında ve elektronik cihazlarda tercih edilmektedir (TMMOB 2006).

3.3.5 Savunma ve Havacılık Endüstrisi

Savunma ve havacılık endüstrilerinde özellikle yüksek mukavemetli 5xxx serisi alüminyum alaşımları kullanılmakla beraber, ısıl işlem yöntemleriyle mukavemeti yükseltilebilen bazı alüminyum alaşımları da kullanılmaktadır. Yüksek mukavemet özelliklerini farklı çalışma sıcaklıklarında koruyabilen alüminyum

alaşımları (2219, 2014, 2090, 2024 ve 7075) havacılık endüstrisinde kullanılmaktadır (Anderson 2000).

3.3.6 Yeni Kullanım Alanları

Dünya’ da enerji tüketiminin hızla artmasıyla, alüminyum pillerin kullanım alanlarının genişleyeceği düşünülmektedir. Bu konudaki ilk çalışmalar alüminyum-sülfür (S^{-2}) piller ile başlamıştır. Alüminyum-sülfür pilleri ile 250 Wh / Kg verimliliğe ulaşılacak mümkün kılınmaktadır. Ayrıca kurşun (Pb) veya nikel (Ni)-kadmiyum (Cd) aküler ile çalışan elektrikli araçların kat ettiği mesafeyi 100 km’ den 300 km’ ye yükseltilebileceği öngörülmektedir. Alüminyum pillerin kullanılmasının önündeki en büyük engel olan yüksek maliyet probleminin çözülmesiyle, alüminyum pillerin yaygın bir kullanıma sahip olacağı düşünülmektedir (TMMOB 2006).

3.4 Alüminyum Alaşımalarının Kaynak Kabiliyeti

3.4.1 Alüminyum Alaşımalarının Kaynaklanabilirliği

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının hafiflik, korozyon direnci ve mukavemet kazandırılabilmesi gibi özellikleri sebebiyle günümüzde önem kazanmaktadır. Alüminyum ve alüminyum alaşımları genellikle kaynaklı birleştirme yöntemleriyle birleştirilip imal edilirler. Bu sebeple alüminyum ve alüminyum alaşımlarının yaygın bir şekilde kullanılması, bu alaşımların kaynaklanabilirliğinin önem kazanmasına neden olmaktadır. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirme işlemlerinde geleneksel ve modern kaynak yöntemlerinden birçok farklı kaynak yöntemi kullanılmaktadır (Reddy 2007).

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının birleştirilmelerinde uygulanan farklı kaynak yöntemlerinden MIG (Metal Inert Gas) ve TIG (Tungsten Inert Gas) kaynak yöntemleri en yaygın kullanılan yöntemlerdir. Bu iki kaynak yöntemi dışında plazma ark kaynağı, direnç kaynağı, lazer kaynağı ve özellikle saf alüminyumun birleştirilmesinde kullanılan oksit-asetilen kaynağı gibi birçok kaynak yöntemi

kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda bu kaynak yöntemlerinden farklı olarak CMT (Cold Metal Transfer) ve FSW (Friction Stir Welding) kaynak yöntemleri hızla önem kazanmaktadır (Kırlı 2011).

| Alüminyum ve Alüminyum Alaşımlarında Kullanılan Kaynak Yöntemleri | | |
|---|-----------------------------------|-----------------------------|
| Ergitme Kaynak Yöntemleri | Elektrik Direnç Kaynak Yöntemleri | Katı Faz Kaynak Yöntemleri |
| TIG | Nokta, Kabartı ve Dikiş Kaynağı | Sürtünme Kaynağı |
| MIG | Nokta Kaynağı- Yapıştırma | Sürtünme Karıştırma Kaynağı |
| Örtülü Elektrot İle Ark Kaynağı | Yüksek Frekans Endüksiyon Kaynağı | Patlamalı Kaynak |
| Oksi-Asetilen Kaynağı | Yakma Alın Kaynağı | Ultrasonik Kaynağı |
| Eloktron Işın Kaynağı | | Soğuk Basınç Kaynağı |
| Lazer Işın Kaynağı | | Sıcak Basınç Kaynağı |

Şekil 3.3: Alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde kullanılan kaynak yöntemleri (Kırlı 2011)

Çeliklerin kaynaklı birleştirmeleri ile kıyaslandığında alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmeleri daha zordur. Bu sebeple alüminyumun kaynaklı birleştirmelerinde malzeme özelliklerinin iyi bilinmesi ve bu malzemeye göre kaynak yönteminin doğru seçilmesi, kaynak parametrelerinin ve kullanılacaksa dolgu metalinin uygun tercih edilmesi düzgün bir kaynaklı birleştirme için önem arz etmektedir (Tunçel 2015).

Isıl işlem uygulanamayan 1XXX, 3XXX ve 5XXX serisi alüminyum alaşımları gazaltı kaynak yöntemleri (MIG, TIG) ile en kolay birleştirilen alüminyum alaşım serilerindedir. Isıl işlem uygulanabilen 2XXX ve 4XXX serisi alüminyum alaşımların kaynaklı birleştirilmeleri ise ancak özel yöntemler ile mümkündür. Mukavemeti yüksek olan bazı 7XXX serisi alüminyum alaşımlarının (AA7075–AA7178) kaynaklı birleştirilmelerinde; ITAB sertliğinin ana metalden daha yüksek olması ve sıcak çatlama olayının yüksek risk taşınması gibi sorunlar olduğundan kaynaklı birleştirmeleri tavsiye edilmemektedir. Buna karşılık AA7005 ve AA7039 serisi alüminyum alaşımları için özel kaynak yöntemleri kullanılmaktadır (Oğuz 1990).

Alüminyum ve alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinde, yapısında bulundurduğu hidrojen gazı kaynak bölgesinde gözenekli bir yapıya ve sıcak çatlak oluşumuna neden olmaktadır. Kaynaklı birleştirmelerde gözenek oluşumunu engellemek için; kaynağın hızlı soğutulması, koruyucu gaz seçimi ve miktarlarının iyi

seçilmesi ve ilave kaynak telinin kaliteli ve uygun seçilmesi alınacak tedbirlerin en başında gelmektedir (Parlak 2019).

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinde en sık karşılaşılan problemlerden birisi de oksit tabakasıdır. Bunun yanında hidrojen çözünebilirliği, ısı genleşme ve ısı iletkenlik gibi problemler alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerini etkilemektedir. Alüminyum kaynağında dikkat edilecek bir önemli hususta yüzey temizliğidir. Kaynak dikişlerinde gözenekli bir yapıya neden olmamak için; yüzeyi, nem ve hidrokarbonlardan korumak ve oksit temizliği yapmak gerekmektedir (Onar 2010).

3.4.2 Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Kabiliyetini Etkileyen Faktörler

3.4.2.1 Oksit

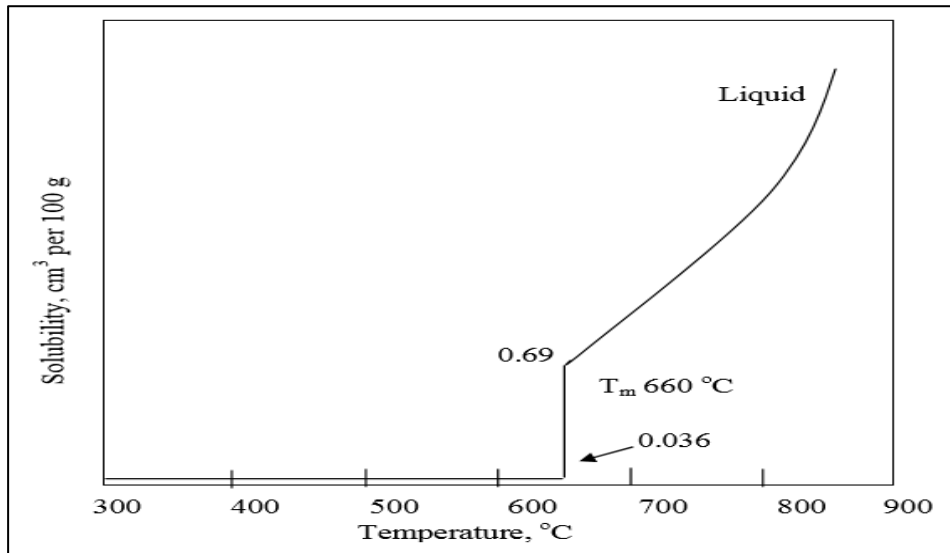
Oksijene karşı afinitesi yüksek olan alüminyumun hava ile temas etmesiyle yüzeyinde alüminyum oksit (Al_2O_3) tabakası oluşmaktadır. Gri renkli ve ergime derecesi (2050 °C) yüksek olan alüminyum oksit tabakası yaklaşık 1–3 mikron kalınlığındadır. Alüminyum oksitin ergime derecesinin, alüminyumun ergime derecesinden (650 °C) yüksek olması alüminyumun kaynaklı birleştirilmelerini zorlaştırmaktadır. Kaynaklı birleştirme esnasında ergimeyen alüminyum oksitin kaynak dikişine karışmasıyla alüminyum ve alüminyum alaşımlarının mukavemeti düşebilmektedir (Akça 2006).

Alüminyum oksidin önlenmesi için klorür ve florür içerikli tozlar kullanılmaktadır. Kaynak işlemi sonrasında malzemenin korozyon direncini düşürmemek için bu tozlardan arındırılması gerekmektedir. Bu sebeple toz kullanılmasına gerek duyulmayan asal gaz ark kaynak yöntemleri alüminyumun kaynaklı birleştirilmelerinde önemli ölçüde tercih edilmektedir. Ayrıca alüminyum oksit tabakası kalınlığı ile orantılı bir şekilde alüminyumun elektrik iletkenliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Onar 2010, Seygen 2001).

Alüminyum oksitin, kaynaklı birleştirmelere olan etkisinin giderilmesi için çoğunlukla tercih edilen TIG ve MIG kaynak yöntemleri uygulanırken, doğru akım - ters kutuplama (şase negatif kutupta) kullanılmaktadır. Ayrıca koruyucu gaz olarak argon kullanılması önerilmektedir. Alüminyum oksitin giderilmesi için bir diğer önlem ise kaynak yapılacak yüzeyin kaynak öncesinde tel fırça yardımıyla temizlenmesi işlemdir (Tülbentçi 1990).

3.4.2.2 Hidrojen Çözünürlüğü

Ergimiş haldeki alüminyum ve alüminyum alaşımlarında yüksek çözünebilme özelliği olan hidrojen, katı haldeki alüminyum ve alüminyum alaşımları için aynı özelliği göstermemektedir. Bu sebeple katılaşmanın hızlı olduğu alüminyum ve alüminyum alaşımlarının içerisinde gaz haliyle sıkışan hidrojen, gözenekli bir yapıya neden olmaktadır. Özellikle kaynak teli kullanılarak yapılan kaynaklı birleştirmelerde kaynak telinin pis ve nemli olması halinde gözenekli yapıların oluşması oranı artmaktadır. Dolayısıyla kaynak teli kullanılmayan kaynaklı birleştirmelerde bu oran daha düşüktür. Kaynak ilerleme hızının düşürülmesi veya kaynak akımının arttırılması gözenekli bir yapının oluşmaması için uygulanacak tedbirler içerisinde yer almaktadır (Güngör 2013).



şekil 3.4: Hidrojen çözünürlüğü (Pakgil 2005)

Alüminyum içerisinde kullanılan alaşım elementleri de bu hususta etkin rol oynayabilmektedir. Özellikle temel alaşım elementi magnezyum olan 5xxx serisi alüminyum alaşımlarında hidrojen çözünürlüğü daha iyi durumdadır (Güngör 2013).

3.4.2.3 Elektriksel İletkenlik

Alüminyum alaşımlarının ark kaynak yöntemleri ile birleştirilmelerinde kaynak şasesinin bağlanacağı yer önem arz etmektedir. Kaynak şasesi kaynak yapılacak alüminyum parçaya bağlanabileceği gibi çelik kaynak masasına da bağlanabilmektedir. Kaynak şasesinin alüminyum parçaya bağlanması halinde alüminyum parçanın yüzeyinde bozukluklar meydana gelebileceğinden, bu bağlanma şekli çoğunlukla tercih edilmemektedir. Çelik masanın paslı olmamasına dikkat edilerek, kaynak şasesi çelik masaya bağlanıp kaynak işlemi gerçekleştirilebilmektedir (Onar 2010).

Tablo 3.3: Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlarının kaynak edilebilirlik dereceleri (Onar 2010)

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

a: 20 °C' de eşdeğer hacim.
A: Rahatlıkla kaynak edilebilir.
B: Özel kaynak teknikleri ve ilave metal kullanılarak çoğu uygulamalarda kaynak edilebilir.
C: Sınırlı kaynak edilebilir.

Elektrik iletkenliği yüksek olan saf alüminyum elementi, saf bakır elementinin elektrik iletkenliğinin yaklaşık %62' si kadar elektrik iletkenliğine sahiptir. Yüksek elektrik

iletkenliği gösteren alüminyum alaşımlarının ark kaynaklı birleştirilmelerinde kullanılan elektrotlarda direnç ısınması olmaması sebebiyle Gaz Metal Active Welding (GMAW) tabancalarının uzun temas uçlu olanları tercih edilmektedir (Onar 2010).

3.4.3 Çarpılma

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirilmelerinde ısı girdisi ve hal değişiminden kaynaklı hacimsel kayıp oranının yüksek olması gibi başlıca sebepler, bu birleştirilmelerde çarpılmaya neden olmaktadır. Kaynaklı birleştirilmelerde önemli bir problem olan çarpılmayı engellemek veya asgari düzeye indirmek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır (Onar 2010).

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirilmelerinde çarpılmayı önlemek amacıyla çarpılma yönü bilinen alüminyum parçalar üzerinde çeşitli mekanik cihazlarla ön gerilme verilmesi uygulanabilecek basit tedbirlerden birini oluşturmaktadır. Kaynak dikişisi sırasında, ısı girdisinin optimum düzeyde tutulması ve kaynak ağızı açılması çarpılmanın engellenmesi için önemlidir. Özellikle alüminyum parçaların kaynaklı birleştirilmelerinde az da olsa çarpılma olmaktadır. Bu çarpılmaları çekiç gibi darbeli bir cisimle düzeltmeye çalışırken kaynak dikişini zorlamamaya dikkat edilmeli ve kaynak dikişisi kontrolü için penetrant testi uygulamak gerekmektedir (Onar 2010, Seygen 2001).

4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA KULLANILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ

4.1 Katı Hal Kaynak Yöntemleri

4.1.1 Soğuk Kaynak Yöntemi

Harici bir mekanik kuvvet yardımıyla gerçekleştirilen kaynaklı birleştirme soğuk kaynak yöntemi olarak isimlendirilmektedir. Tatbik edilen harici mekanik kuvvetin oluşturduğu basıncın malzemelerin üzerinde şekil değişikliğine neden olduğu ve kaynak bölgesinde sertliğin ana malzemeye göre daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Farklı alaşım türlerinde 105–350 kg/mm² basınç aralığında uygulanabilmektedir (Oğuz 1990).

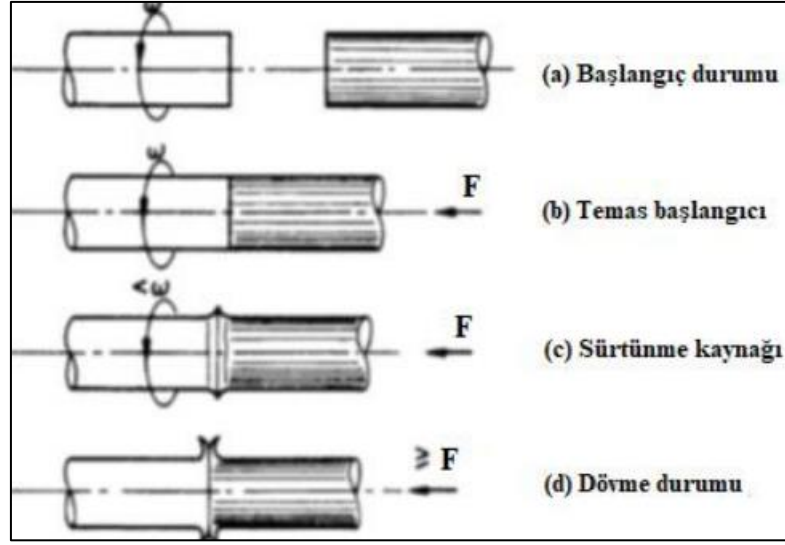
4.1.2 Difüzyon Kaynak Yöntemi

Difüzyon kaynak yöntemi yüksek sıcaklık ve basınç altında gerçekleştirilen bir kaynaklı birleştirme yöntemidir. Bu katı hal kaynak yöntemi çokça alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanabilmektedir. Difüzyon kaynak yöntemi ile gerçekleştirilecek kaynaklı birleştirilmelerde gümüş (Ag), bakır (Cu) ve Ag-Cu gibi elementler ilave tel veya yardımcı malzeme olarak kullanıldığı takdirde yüksek mukavemette bir birleştirme elde edilebilmektedir. Difüzyon kaynak yönteminde sıcaklık, zaman ve basınç gibi farklı parametrelerin yanı sıra kaynak öncesi yapılacak yüzey temizliği de büyük önem arz etmektedir (Demir 2019).

4.1.3 Sürtünme Kaynak Yöntemi

Sürtünme kaynağı hareketli olan parçanın sabit olan parçaya temas ettirilmesi suretiyle gerçekleştirilen bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu yöntemde kaynaklı birleştirme hareketli parçanın sabit parçaya sürtünmesinden dolayı oluşan ısı ve basınç

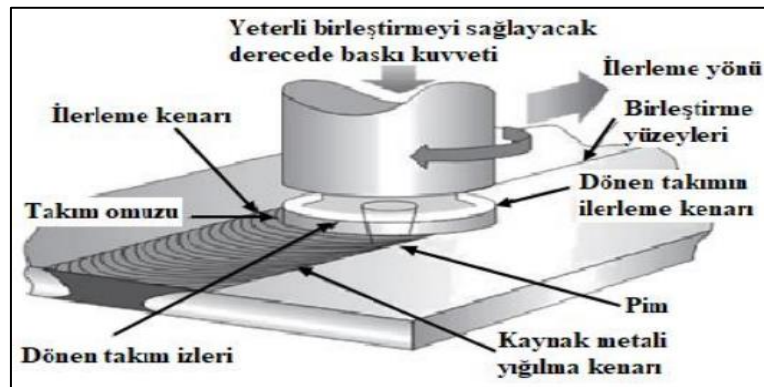
etkileriyle gerçekleşmektedir. Sürtünme kaynağında ilave tel, koruyucu gaz kullanılmamaktadır (Balta 2016).



Şekil 4.5: Sürtünme kaynak yöntemi (Özaslan 2019)

4.1.4 Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi

Buluşu 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü tarafından gerçekleştirilen, Friction Stir Welding (FSW) ismiyle literatürde yer edinmiş bir katı hal kaynak yöntemidir. FSW yöntemin önemi 1999 yılında uzay endüstrisinde kullanımıyla birlikte günümüze kadar artarak devam etmektedir. FSW yöntemi özellikle alüminyum, bakır ve magnezyum gibi hafif metallerin birleştirilmelerinde kullanılmaktadır. FSW yöntemiyle yapılan kaynaklı birleştirmelerde parçaların katı halde birbirlerine karışması esas alınmaktadır (Şen 2019).



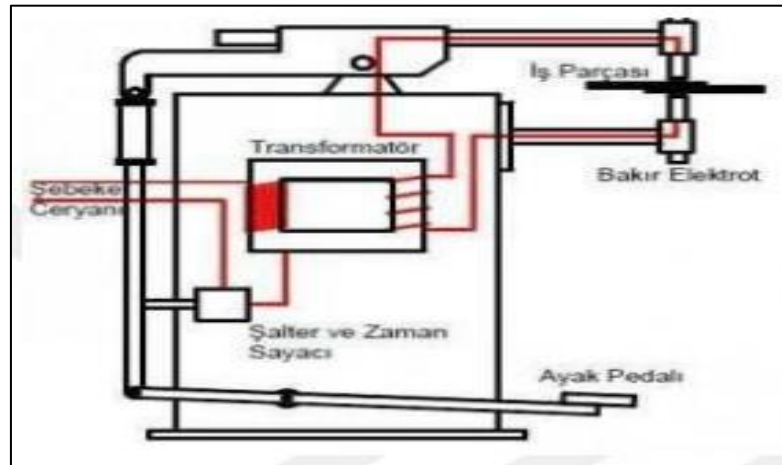
Şekil 4.6: Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi (Şen 2019)

4.2 Örtülü Çubuk Elektrik Kaynak Yöntemi

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinde dar bir kullanım alanına sahip olan örtülü çubuk elektrot kaynak yöntemi ısı işlem uygulandığında sertleşme göstermeyen Al-Si ve Al-Mg gibi alaşımların kaynaklı birleştirmelerinde kullanılmaktadır. Bu kaynak yöntemi 6 mm'den küçük et kalınlığındaki alüminyum alaşımlarına uygulanamamaktadır. Kaynak dikişi ve kaynak dikişine yakın kısımlardaki mekanik dayanımların düşük olması bu kaynak yönteminin kullanım alanının dar olmasının başlıca sebeplerinden birini oluşturmaktadır. Örtülü çubuk elektrot kaynak yöntemini koruyucu gaz kullanılan TIG (Tungsten Inert Gas) kaynak yöntemi ile karşılaştırıldığında ısı tesiri altındaki bölgenin örtülü çubuk elektrot yönteminde daha geniş olduğu ve bu sebeple nufuziyetin düşük olduğu belirtilmelidir (Oğuz 1990).

4.3 Elektrik Nokta Direnç Kaynağı

Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinde kullanılan bir kaynak yöntemidir. Elektrik nokta direnç kaynak yöntemi iki bakır elektrotun kaynak yapılacak parçayı basınç uygulayarak sabitlemesi ve elektrik akımı geçirilerek parçanın direnç göstermesi prensibiyle çalışmaktadır. Bu kaynak yöntemi uygulanırken akım şiddeti ve kuvvetin aşırısına kaçması çatlak oluşumu gibi problemlere sebep olmaktadır (Demir 2019).



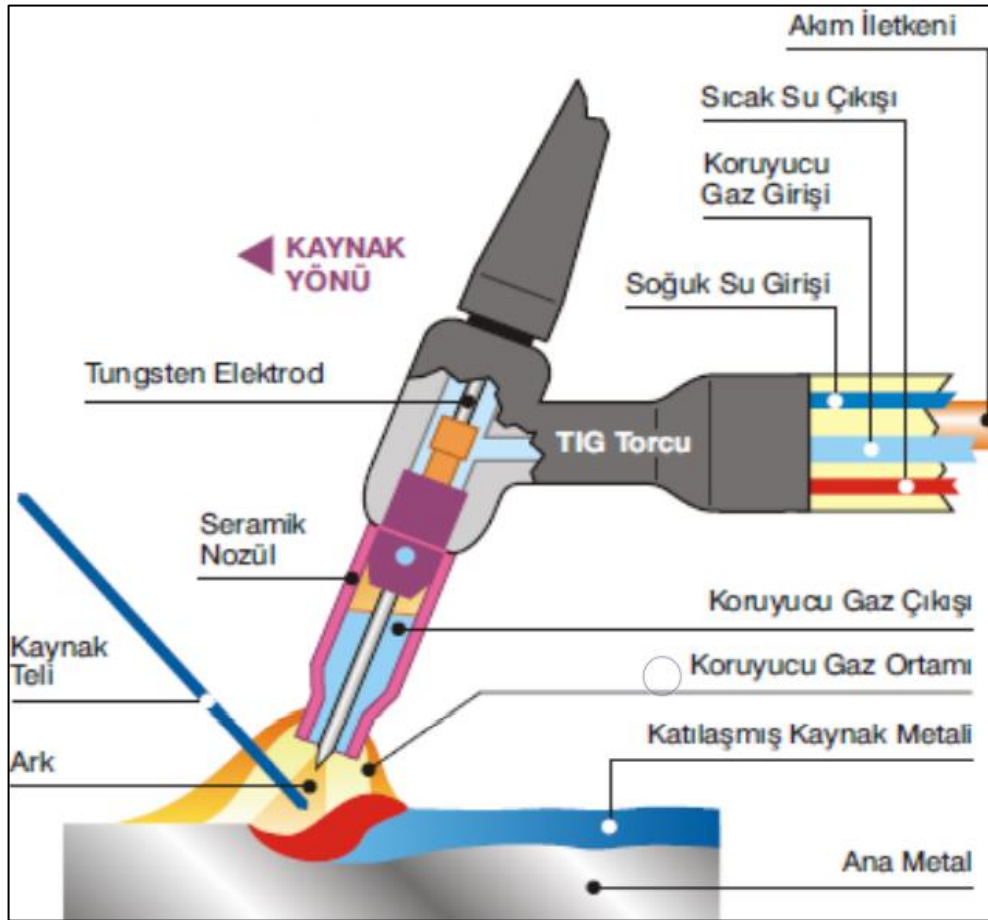
Şekil 4.7: Elektrik nokta direnç kaynağı (Demir 2019)

4.4 TIG Kaynak Yöntemi

TIG (Tungsten Inert Gas) kaynak yöntemi, ergimeyen bir elektrot olan tungsten ile iş parçası arasında koruyucu asal gaz altında oluşturulan kaynak arkı ile gerçekleştirilen bir kaynak yöntemidir (Onar 2010).

İlave tel kullanmadan kaynaklı birleştirme yapılabilen TIG kaynak yönteminde mekanik özellikleri korumak veya geliştirmek için ilave tel kullanımı da tercih edilebilmektedir (Alan 2013).

İlk olarak havacılık endüstrisinde kullanımı yaygınlaşan TIG kaynak yöntemi bu endüstrideki başarılarından sonra farklı sektörlerde de uygulama alanı bulmaya başlamıştır. Özellikle magnezyum, alüminyum gibi hafif metallerin kaynaklı birleştirilmelerinde yaygın bir şekilde tercih edilmektedir (Koca 2010).



Şekil 4.8: TIG kaynak yöntemi (Onar 2016)

4.4.1 TIG Kaynak Yöntemi Avantajları ve Dezavantajları

- Otomasyona uygun bir kaynak yöntemidir.
- İnce kesitli parçaların kaynaklı birleştirmelerinde tercih edilen bir yöntem olmasının yanı sıra farklı pozisyonlarda kaynak yapılmasına da elverişli bir kaynak yöntemidir.
- Özellikle kök paso yapılan kaynaklı birleştirmelerde nüfuziyeti iyidir.
- Kaynak dikişleri düzgündür ve kaynakta gözenek olmaz.
- Kaynak hızı diğer kaynak yöntemlerine göre düşüktür.
- Kalın kesitli parçaların kaynaklı birleştirmelerinde kullanımını maliyeti arttırmaktadır (Koca 2010).

4.5 Soğuk Metal Transfer (CMT) Kaynak Yöntemi

Fronius'un 1991 yılında müşterisinin talebi doğrultusunda çelik ve alüminyumun düşük ısı girdisiyle kaynaklı birleştirilmeleri üzerine yoğunlaştığı düşünce 2004 yılında CMT kaynak yönteminin geliştirilmesiyle sonuçlanmıştır (Imoudu 2017).



Şekil 4.9: CMT kaynak robotu

CMT kaynak yöntemi düşük ısı girdisiyle alüminyum, magnezyum gibi demir dışı metallerin kaynaklı birleştirmelerinde MIG/MAG kaynak yöntemleri ve diğer yöntemlere göre daha verimli sonuçlar vermektedir. CMT kaynak yönteminde sürekli

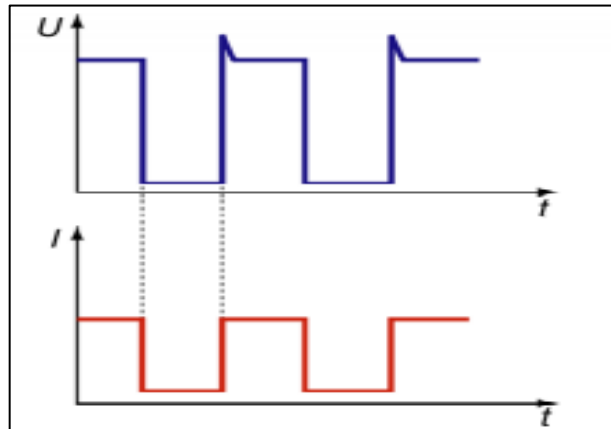
ısı girdisi olmaması diğer kaynak yöntemleri ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde görülen çukurlaşma, kaynak arkında sıçrama ve kaynak zayıflığı gibi olumsuzlukları engellemektedir. CMT kaynak yönteminde %30 oranında azaltılmış enerji girdisi ile kaynak çarpılmalarının minimize edilmesi ve yüksek hassasiyetin kazandırılması sağlanmıştır (Ünel 2016).

Geleneksel kaynak yöntemlerinde kaynak teli ileri yönlü hareketini devre tamamlanıncaya kadar devam ettirmektedir. Bu sebeple kaynak akımı yükselmektedir. CMT kaynak yönteminde ise kaynak telinin damla bırakarak geri çekilmesi yeni bir teknolojik prensibi oluşturmaktadır (Şen 2019).



Şekil 4.10: CMT kaynak yönteminde kaynak teli hareketi (Kahraman 2018)

CMT kaynak yönteminde tel besleme hızı veya yönünün yönlendirilebilir olması, CMT kaynak yönteminin geleneksel kaynak yöntemlerden ayıran önemli bir özelliğini oluşturmaktadır. Geleneksel kaynak yöntemlerinde sabit olan tel besleme hızı CMT kaynak yönteminde kısa devre ile yönetilebilmektedir. CMT kaynak yönteminin bir diğer özelliği ise kaynak arkının, akımın etkisinden ziyade kaynak telinin geri çekilmesiyle oluşmasıdır. Bu sebeple akım düşük tutularak ısı girdisinin azaltılması CMT kaynak yönteminin bir başka farklılığını oluşturmaktadır (Konar 2017).



Şekil 4.11: CMT kaynak yönteminde zamana bağlı akım dağılımı (Talalaev 2012)

4.5.1 CMT Kaynak Makinesi Genel Donanımları



Şekil 4.12: CMT kaynak makinesi (Kaçar 2011)

- **Tel Sürme Ünitesi:** Dolgu malzemesi olan kaynak telinin makaradan iş parçasına ulaşması için itici bir güç uygulayan bölümdür.
- **Dijital Kontrol Paneli:** Mikro işlemci ile idare edilen inverter güç kaynağı, hassas ölçü ve tekrarlanması gereken işlemlerde parametrelerin kayıt altında olmasına olanak sağlamaktadır.
- **Soğutma Ünitesi:** Kaynaklı birleştirmelerin eksiksiz ve güvenilir olması için tüm kaynak sistemleri ile uyumlu çalışan ve kaynak torcunun soğutulması için kullanılan önemli bir bölümü teşkil etmektedir.
- **Kaynak Torcu:** Kaynak telinin dakikanın 1/60'ı süresince 90 defaya yakın ileri-geri hareket etmesini ve parçaya tatbik edilecek baskının sabit oranda gerçekleşmesini sağlamaktadır (Şen 2019).

4.5.2 CMT Kaynak Yönteminin Genel Özellikleri

- **Düşük Isı Girdisi:** Kaynaklı birleştirme işlemi esnasında kaynak telinin ileri yönlü hareketinde oluşan kısa devreyi algılayıp kaynak telinin ileri yönlü olan

hareketini tersi yönünde devam ettirmesi arkın ısı verme süresini azaltmaktadır (Ersoy 2019).

- **Kararlı Ark Oluşumu:** Cmt kaynak yönteminde kaynak hızı çeşitli kaynak etkenlerinden ziyade kaynak arkının algılanmasıyla belirlenmektedir. Bu sebep üzere CMT kaynak yöntemi her pozisyonda uygulanabilmektedir (Ersoy 2019).
- **Çapaksız Kaynaklı Birleştirme:** Kaynak telinin geri yönlü hareketi ile oluşturduğu damlacık sayesinde çapaksız bir kaynaklı birleştirme gerçekleştirilebilmektedir (Ersoy 2019).

4.5.3 CMT Kaynak Yönteminin Türevleri

4.5.3.1 CMT Pulse

CMT Pulse kaynak yönteminde darbe ile CMT döngüsünün birleşmesi yüksek ısıya sebep olmaktadır. İlave edilebilen ayarlanabilir darbe, büyük güç ve esneklik kazandırmaktadır (Kaçar 2011).

4.5.3.2 CMT Advanced

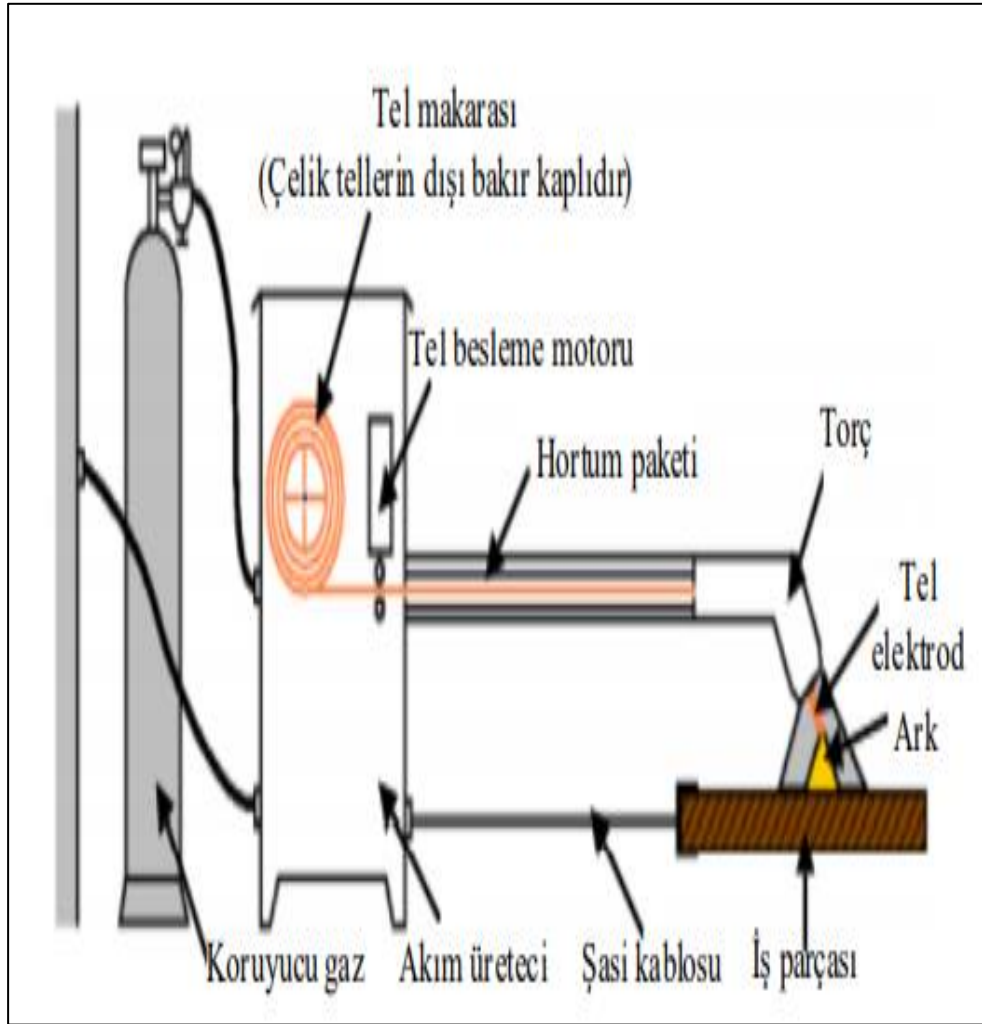
CMT kaynak yönteminden daha fazla soğuk olan bu yöntemde akımın kutuplaşması proses regülasyonu ile bağlantılıdır. %60 sınırına kadar yüksek erime yeteneği, kaynağın yayılımı ve iyi derecede ısı girdisi bu yöntemin avantajlarını oluşturmaktadır (Kaçar 2011).

4.5.3.3 CMT Advanced Pulse

CMT Advanced Pulse kaynak yönteminde çeşitli kombinasyonlarla kaynak arkının kararlılığı ve yüksek nüfuziyeti sağlanmaktadır (Kaçar 2011).

4.6 MIG Kaynak Yöntemi

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirilmelerinde çoğunlukla MIG (Metal Inert Gas) kaynak yöntemi tercih edilmektedir. Geleneksel kaynak yöntemlerine göre kaynak hızı belirgin şekilde daha yüksek ve kaynak yüzeyi daha dardır. 1,6 mm parça kalınlığına kadar kaynaklı birleştirme yapılabilen MIG kaynak yönteminde doğru akım ters kutuplama uygulanmaktadır (Büyükarslan 2006).



Şekil 4.13: MIG kaynak yöntemi (Çetkin 2018)

MIG kaynak yöntemi helyum ve argon gibi koruyucu gaz altında, otomatik veya yarı otomatik kaynak torcu ile sisteme dahil edilen ergiyen kaynak teli kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Koruyucu gaz olarak kullanılan asal gazlar, malzeme ile tepkimeye girmediği için tercih edilmektedir (Çetkin 2018).

4.6.1 MIG Kaynak Yönteminin Tarihçesi

1930 yılında ABD’ de gaz altı kaynak yönteminde koruyucu gaz olarak soy gazın kullanılması Hobart ve Devers isimli kişilerce patent altına alınmıştır. Koruyucu gaz olarak ilk kez helyum gazı 1940 yılında bir uçağın yapımında magnezyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinde kullanılmıştır. 1942 yılında ise helyum gazının yanında argon gazı da hafif metallerin kaynaklı birleştirmelerinde kullanılmaya başlamıştır (Uzun 2014).

MIG kaynak yöntemi 1947 yılında SIGMA (Shielded Inert Gas Metal Arc) ismiyle üretilen kaynak makineleri ile gelişim sürecini başlatmıştır. MIG kaynak yönteminin alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinde çoğunlukla tercih edilmesinde; yüksek kaynak hızı, dar ITAB (Isı Tesiri Altındaki Bölge) ve kaynak pozisyon genişliği gibi özellikleri önem arz etmektedir (Uzun 2014).

4.6.2 MIG Kaynak Yönteminde Akım Şekli

MIG kaynak yönteminde çoğunlukla doğru akım ters kutuplama kullanılmaktadır. Bu sebeple kaynak nüfuziyeti yüksek olmaktadır. Alüminyum gibi hafif metallerin yüzeyinde oluşan oksit ve benzeri tabakaların parçalanması için kaynak elektrotunun kesinlikle pozitif kutba bağlanması gerekmektedir. MIG kaynak yönteminde elektrotun negatif kutba bağlandığı uygulamalar az da olsa mevcuttur. Bu şekildeki bir akımda gerçekleştirilen kaynaklı birleştirmelerde ark kararlılığı ve kaynak nüfuziyeti azalmaktadır (Yıldız 2019).

4.6.3 MIG Kaynak Yöntemi Avantajları

- Otomasyona açık bir üretim yöntemidir.
- Çoğu kaynak pozisyonları için uygun bir yöntemdir.
- Kaynak hızı oldukça yüksektir.
- Metal yığıma miktarı fazladır.
- Cüruf sorunu yoktur.
- Kapalı alanlarda kullanıma uygundur.

- Dar alanlarda uygulanması pek mümkün değildir (Yıldız 2019).

4.6.4 MIG Kaynak Yönteminde Kullanılan Koruyucu Gazlar

MIG kaynak yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirme veya dolgu işlemlerinde oksit veya nitrür gibi olumsuz oluşumlardan malzemenin etkilenmemesi için hava ile teması kesecek gazlar kullanılmaktadır. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmelerinde çoğunlukla argon (Ar) gazı kullanılmakla birlikte helyum (He) gazının da tercih edildiği birleştirmeler bulunmaktadır (Anık ve Vural 1990).

Tablo 4.4: MIG kaynak yönteminde kullanılan koruyucu gazların özellikleri (Anık ve Vural 1990)

| Koruyucu Gaz | Safılık Derecesi (%) | Çiğlenme Sıcaklığı | Havaya Göre İzafi Yoğunluğu | Reaksiyon Şekli | Erime Sıcaklığı (°C) |
|----------------------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------|-----------------|----------------------|
| Argon (Ar) | 99,99 | -50 | 1,37 | Inert | -185,9 |
| Helyum (He) | 99,99 | -50 | 0,14 | Inert | -268,9 |
| Hidrojen (H) | 99,5 | -50 | 0,06 | Redükleyici | -252,9 |
| Karbondioksit (CO ₂) | 99,7 | -35 | 1,44 | Oksitleyici | -78,5 |

Kaynak dikişin görünümünü etkileyen koruyucu gazların fiziksel özellikleri bazı etkileşimlere sebep olmaktadır. Koruyucu gazın iyonizasyonun düşük olması durumunda, ark atmosferinde kararlı akım geçişi farklı taşıyıcılar tarafından sağlanabilmektedir. Koruyucu gazın yüksek iyonizasyona sahip olması ise gerilimi arttıracığından kaynak banyosu büyümekte ve nüfuziyet derinleşmektedir (Anık ve Vural 1990).

Koruyucu olarak kullanılan gazların yoğunlukları kaynak arkını örtme hususunda önem taşımaktadır. Argon gazının helyum gazından daha iyi koruyucu tabaka oluşturması bu hususta gaz yoğunluğunun önemine örnek teşkil etmektedir.

Koruyucu gazların kaynak viskozitesini etkileyici bir özelliği de bulunmaktadır. Farklı kaynak pozisyonlarında ve kök paso dikişlerde ergiyiğin yüzey gerilimi, yer çekimden büyük olması gerekmektedir. Kök dikiş istenmeyen durumlarda ise viskozitenin düşük olması gerekmektedir (Anık ve Vural 1990).

4.6.5 MIG Kaynak Yönteminde Metal Transferi

4.6.5.1 Kısa Ark

Kısa devre sınırlarının ölçülebildiği büyüklüklerde meydana gelmektedir. Takribi 200 Amper düzeyine kadar sürekli artış gösteren kaynak akımlarında, kısa devre frekansı (K°/s) artış göstermektedir. Bu artışa sebep olarak damla büyüklüğü değişmezken kaynak teli ilerleme hızının artması işaret edilmektedir. Bu sebeple kaynak işlemi düşük ısı girdisi ile gerçekleştirilmekte ve olası ark kesiklikleri kaynak sıçramalarına yol açmaktadır (Altuntaş 2015).

4.6.5.2 Orta Ark

Kaynak amperi 200 A'in üzerine çıktığı durumlarda kısa ark yerini orta arka (damlasal transfer) bırakmaktadır. Kaynak arkının başlamasıyla birlikte kaynak telinin uç kısmında damlacık oluşmaktadır. Oluşan damlacığın büyümesi, kaynak telinden kopmasına ve kaynak banyosuna düşmesine neden olmaktadır. Bu metal transfer şeklinde ısı girdisinin yüksek olması kaynak ark boyunun normalden uzun olmasına yol açmaktadır (Altuntaş 2015).

4.6.5.3 Sprey Ark

Sprey ark, kaynak elektrotunun uç kısmının sivri bir biçim alması neticesinde ilave metalin duşlama diye tabir edilen küçük damlacıklar şeklinde geçişi olarak tanımlanabilmektedir. Saniyede 100'den fazla oluşan, kaynak teli çapından küçük olan damlacıklar yüksek hızda kaynak telinden ayrılmaktadır. Bu yöntem ekseriyetle

koruyucu gaz olarak argonun seçildiği kaynaklı birleştirmelerde ve alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinde kullanılmaktadır (Altuntaş 2015).

4.6.6 MIG Kaynak Yöntemi Parametreleri

4.6.6.1 Kaynak Akımı

MIG kaynak yönteminde güçlü bir nüfuziyet, iyi kaynak formu ve sıçramayı minimize etmek için çoğunlukla doğru akımda kaynak işlemi gerçekleştirilmektedir. MIG kaynak donanımlarında kaynak telinin hızı ve akım uyumlu çalıştırılmaktadır. Kaynak telinin hızı arttıkça kaynak akımının değeri de artış göstermektedir. Dolayısıyla hacim olarak malzeme ergimesi artmaktadır (Altuntaş 2015).

4.6.6.2 Ark Gerilimi

Doğrudan kaynak akımıyla ilişkili olan ark geriliminin yükselmesi yaygın bir kaynak dilşine sebep olmaktadır. Ark gerilimi hesaplanırken koruyucu gaz, kaynak elektrotunun çapı, kaynağın uygulanma pozisyonu, kaynak malzemesinin kalınlığı ve var ise kaynak ağız önemli etkenlerdendir. Ark geriliminin nüfuziyet üzerine etkisi ise bir noktaya kadar arttırıcı doğrultuda olmakla birlikte o noktadan sonra düşürücü doğrultuda devam etmektedir (Altuntaş 2015).

4.6.6.3 Kaynak Hızı

Otomatik veya manuel olarak ayarlanabilen kaynak hızı, kaynak yayılımını etkileyen faktörlerden birini oluşturmaktadır. Kaynak hızının yüksek olması ısı girdisini azaltacağı gibi kaynak nüfuziyetini de düşürecektir. Bu sebeple kaynak hızını belirlerken belli sınırlar içerisinde kalmak verimli bir kaynak için önem arz etmektedir (Altuntaş 2015).

4.6.6.4 Tel apı

Kaynak telinin çap ölçüsü kaynak akımına gore değişiklik göstermektedir. Piyasada apı 1,0 mm, 1,2 mm ve 1,6 mm olan kaynak telleri çokça tercih edilmektedir. apı büyük olan kaynak telleri yüksek akımda kullanılabilir olduğundan ergime noktaları yüksek olmaktadır. Diğer yandan ince kaynak telleri, doğru kaynak akımı tercih edildiğinde kısa ark, spre y ark ve uzun ark ile büyük damlacıklar oluşturarak kaynaklı birleştirmelerde etkin sonuçlara neden olabilmektedir (Altuntaş 2015).

5. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Feng-yuan Shu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Al-Zn-Mg alaşım levhalarının TIG (Tungsten Inert Gas) kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Kaynak bölgesinin farklı noktalarındaki faz değişimi ve mikroyapısı tarama elektron mikroskopu (SEM), X-ışını kırınımı (XRD), transmisyon elektron mikroskopu (TEM) ve enerji dağılım spektrumu (EDS) ile karakterize edilirken mekanik özellikleri darbe testi ile değerlendirilmiştir. Kaynak dikişinde dağılmış bir biçimde küresel ve iğne benzeri bir η ($MgZn_2$) fazı olduğunu gözlemlemişlerdir. Isı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) faz bileşimi α (Al) + η ($MgZn_2$) + Al_6Mn olduğu ve çok sayıda dağılmış nano ölçekli çökelti parçacıkları gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak; darbe testi neticesinde kaynak bölgesinin darbe dayanımının ana metale göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Kaynak bölgesindeki $MgZn_2$ fazı alaşımın tokluğuna katkıda bulunduğunu gözlemlemişlerdir (Shu ve diğ. 2019).

Andrey S. Gnedenkov ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Al-Mg-SC alaşımının TIG (Tungsten Inert Gas) kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı, kimyasal bileşimi ve korozyon aktivitesi üzerine etkisini incelemişlerdir. Yeniden kristalleşmiş tane sınırlarında ikincil fazların çökmesiyle yoğun korozyon gözlemlemişlerdir. Korozyon işlemi yüksek konsantrasyonda anodik (Mg_2Si) ve katodik fazların ($(MnFe) Al_6$) gözlemlendiği α -Al tanelerin sınırı boyunca başlatılmış. Kaynak sırasında sıcaklığın artmasıyla ısı tesiri altındaki bölgede (ITAP) anodik fazların birleşmesine neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Isı tesiri altında kalan bölge, ana metal (BM,895 MPa) ve füzyon bölgesine (FZ,810 MPa) kıyasla daha yüksek bir mikro sertliğe (930Mpa) sahiptir. İkincil fazların hacim oranı ana metalde %26, füzyon bölgesinde %28 ve ısı tesiri altında kalan bölgede %38 olarak ölçmüşlerdir. Ortalama tane büyüklüğü sırasıyla ana metalde (9 ± 3) μm , ısı tesiri altındaki bölgede (16 ± 3) μm ve füzyon bölgesinde (21 ± 5) μm arttığını saptamışlardır. Kaynak bölgesini oksidasyondan korumak için plazma elektrolitik oksidasyon (PEO) uygulanmıştır ve Cl içeren bir ortamda yüksek korozyon koruması sağlamışlardır (Gnedenkov ve diğ. 2019).

Jungi Shen ve arkadaşları 6061T6 alüminyum alaşımı plakalarının birleştirilmesinde kullanılan TIG (Tungsten Inert Gas) kaynak ve CMT (Cold Metal Transfer) kaynak yöntemlerinin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada 6061T6 alüminyum levhaların birleştirilmesinde kullanılan TIG ve CMT kaynak yöntemlerini ayrı ayrı uyguladıkları gibi bu kaynak yöntemlerini birlikte de uygulamışlardır. Birleştirilen 6061T6 alüminyum levhalarının üst kısmına farklı akımlarda TIG kaynak yöntemi uygulanırken eşzamanlı olarak alt kısmına sabit akımda CMT kaynak yöntemi uygulanmıştır. Yaptıkları çalışma neticesinde; amper (A) arttıkça ısı girdisinin arttığını ve bu sebeple nüfuziyetin amperle doğru orantılı olduğunu fakat 6061T6 alüminyum alaşımındaki sertleşme fazının ısı girdisine karşı hassas olmasından dolayı ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) mekanik özelliklerin azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca ısı tesiri altındaki bölgede Mg₂Si fazının olduğu, kaynaklı birleştirmelerin sertlik eğrisinin kabaca W tipi dağılım gösterdiğini gözlemlemişlerdir (Shen ve diğ. 2018).

Keng Yan ve arkadaşları 5083 serisi alüminyum alaşımının TIG (Tungsten Inert Gas) kaynak yöntemi ile birleştirilmesindeki parametrelerden biri olan gaz (He) debisinin ark şekline ve nüfuziyete olan etkisini incelemişlerdir. Plaka üzerinde farklı debilerdeki helyum gazının ark boyuna etkisini yüksek hızlı video tekniği ile gözlemlemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda gaz debisinin artmasıyla arkın radyal yönde uzadığını ve gaz debisinin yükselmesinin voltaj değerini arttırdığını ve bu sebeple ısı girdisinin arttığını gözlemlemişlerdir (Yan ve diğ. 2017).

Giovanna Cornacchia ve arkadaşları 6005AT6 serisi alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde kullanılan MIG (Metal Inert Gas), CMT (Cold Metal Transfer) ve fiber lazer kaynak yöntemlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Fraktografik gözlemler ve kaynak sonrası mikroyapı incelemeleri için taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve enerji dağılımı spektroskopisi (EDS) cihazlarını kullanmışlardır. Bu çalışma neticesinde AA6005 alüminyum alaşımının birleştirmesinde CMT ve fiber lazer kaynak yöntemleri ile birleştirilen numunelerin, MIG kaynak yöntemi ile yapılan birleştirmelere göre üstün mekanik özellikler gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Gözeneklilik miktarını en fazla MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde tespit etmişlerdir. Yaptıkları birleştirmelerin kaynak

bölgesi sertliğinin, geçiş bölgesi ve ana metalden daha düşük olduğunu sertlik testi neticesinde elde etmişlerdir (Cornacchia 2017).

Shanavas S. ve arkadaşları AA5052H32 alüminyum alaşımının birleştirilmesinde kullanılan TIG (Tungsten Inert Gas) ve sürtünme karıştırma kaynak yöntemleri ile kaynaklanabilirliğini incelemişlerdir. TIG kaynak yöntemi ile yaptıkları birleştirmelerde farklı akım ve farklı gaz debisi ve kaynak teli olarak AA4043 kaynak telini kullanmışlardır. Yaptıkları çalışma neticesinde sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile yapılan birleştirmelerin TIG kaynak yöntemi ile yapılan birleştirmelere göre metalografik ve mekanik özelliklerinin daha üstün olduğunu gözlemlemişlerdir. TIG kaynak yöntemi ile farklı akım ve farklı gaz debilerde yapılan birleştirmelerin çekme deneyi sonucunda optimum parametreleri belirlemişlerdir (Shanavas S. 2017).

Chuang Cai ve arkadaşları 7xxx serisi alüminyum alaşımların birleştirilmesinde kullanılan Laser – MIG (Metal Inert Gas) hibrit kaynak yönteminde kullanılan koruyucu Argon (Ar) – Helyum (He) gazlarının karışım oranlarının kaynaklı birleştirmeye etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada A7N01P-T4 alüminyum alaşımını, ER5356 kaynak teli ile ve farklı Argon-Helyum gaz karışımlarında (%0 He-%25 He-%50 He-%75 He-%100 He) Laser – MIG hibrit kaynak yöntemiyle birleştirmişlerdir. Belirtilen farklı gaz karışımlarında yapılan kaynaklı birleştirmelerin plazma sıcaklığı, elektron yoğunluğu, kaynak nüfuziyeti ve gözeneklilik üzerine inceleme yapmışlardır. Sonuç olarak Laser – MIG hibrit kaynak yöntemi ile yapılan birleştirmelerde; He koruyucu gazın hacmi %0'dan %50'ye çıkartıldığında penetrasyon derinliğinin yaklaşık 4,7 mm'den 6,3 mm'ye yükseldiğini gözlemlemişlerdir. Gözeneklilik oranı %100 Ar gazı kullanılırken %5,2 iken, %50 He-%50 Ar kullanıldığında %1,0 olduğunu gözlemlemişlerdir (Cai ve Zhang 2019).

Liang Zhimin ve arkadaşları Al-Zn-Mg alüminyum alaşımlarının farklı kaynak telleri kullanılarak MIG (Metal Inert Gas) kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin mekanik ve mikroyapı özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. 12 mm kalınlığa sahip plakaların kaynaklı birleştirilmelerinde ER5356, ER5087 ve ER4043 olmak üzere üç farklı kaynak teli kullanmışlardır. Farklı kaynak telleri ile birleştirilen numunelerin çekme deneyi sonuçlarında; çekme dayanımlarının ER5356'da 294 MPa, ER5087'de 313 MPa ve ER4043'de 237 MPa olduğu ve ortalama uzamalarının ise

ER5356'da % 7,9, ER5087'de % 7,6, ER4043'de %1,6 olduğunu gözlemlemişlerdir. Çekme deneylerinde tüm kırılmaların iri taneli bölgeden kırıldığını saptamışlardır. Yaptıkları sertlik testi neticesinde en yüksek sertlik değerinin ER5087 kaynak teli kullanılarak birleştirilen numunelerde olduğunu tespit etmişlerdir (Zhimin 2019).

Yangyang Guo ve arkadaşları 5003 alüminyum alaşımının Plasma – MIG (Metal Inert Gas) hibrit kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğini incelemişlerdir. Bu çalışmada 6 mm kalınlığındaki 5003 alüminyum alaşımının kaynaklı birleştirilmesinde ER5356 kaynak teli kullanmışlardır ve kaynak hızı, plazma akımı, MIG akımı, gaz debisi parametrelerinin kaynak oluşumuna etkisini gözlemlemişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda; kaynak hızı arttıkça penetrasyon derinliğinin ve kaynak genişliğinin azaldığını, kaynak akımının artmasıyla her iki yöntemde de nufuziyetin ve kaynak genişliğinin arttığını, plazma gaz debisinin artmasıyla nufuziyetin önce arttığını daha sonra azaldığını gözlemlemişlerdir. Mikroyapı incelemelerinde ise kaynak bölgesinin üst kısmı ile alt kısmı arasında katılaşma sırasında oluşan dentritik kol mesafesinin üst kısımda daha büyük olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çekme deneyi neticesinde çekme dayanımının 274 MPa olarak belirlemişlerdir (Quan 2018).

Emine Mercan ve arkadaşları AA5754 ve AA6013 serisi alüminyum alaşımların otomatik MIG (Metal İner Gaz) kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mekanik, korozyon ve mikroyapı üzerine etkisini incelemişlerdir. 5 mm kalınlığındaki alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmelerinde argon koruyucu gazı altında farklı akımlar (125 A, 140A, 155A), farklı kaynak hızları (2,5 mm/s, 3 mm/s, 3,5 mm/s) ve farklı tel ilerleme hızları (3m/dk, 3.5m/d, 4m/dk) kullanmışlardır. Kaynaklı birleştirme işlemini tek pasoda sola kaydırma yöntemi kullanılarak Fronius TransSynergic 4000 Comfort tipi kaynak makinesi ile gerçekleştirmişlerdir. Kaynaklı birleştirme işlemlerinden sonra kesilen numuneleri; üç nokta eğme deneyine, çentik darbe deneyine, çekme deneyine, korozyon deneyine, mikrosertlik ölçümüne ve mikroyapı incelemesine tabi tutmuşlardır. Bu çalışma neticesinde; kaynak akımının ve kaynak hızının doğrudan ısı girdisine etkisi nedeniyle, alaşımın mukavemetini etkilediğini gözlemlemişlerdir (Mercan 2018).

Şafak Işık ve arkadaşları 1mm kalınlığa sahip 6082-T6 alüminyum alaşımı levhalarının AlMg5 ve AlSi5 kaynak telleri kullanılarak, CMT (Cold Metal Transfer) kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğini incelemişlerdir. Kaynaklı birleştirmeleri farklı

kaynak akımlarında (60A-110A), farklı kaynak teli hızlarında (3,7 m/dk-8,6 m/dk) ve farklı gerilimlerde (6.8 V-9.7V) uygulamışlardır. Bu çalışma sonucunda; 6082-T6 alüminyum alaşımı levhalarının CMT kaynak yöntemi ile 110A akım şiddeti, 20 mm/s kaynak hızı ve 9,7 V kaynak gerilimindeki birleştirilmelerinde levhada yanma ve delinme gözlemlenmiştir. 60 A akım şiddetindeki kaynaklı birleştirilmelerde ısı girdisinin yeterli olmaması nedeniyle birleşmenin gerçekleşmediğini tespit etmişlerdir. Çekme deneyi sonuçları neticesinde numunelerin; 60A ve 65A akım şiddetlerinde kaynak bölgesinden, 70A ve 90A akım şiddetlerinde ITAB (Isı Tesiri Altındaki Bölge) bölgesi yakınından ve artan diğer akımlarda kopmaların ana metalden olduğunu gözlemlenmiştir. Sertlik testi neticesinde tüm parametrelerde yapılan birleştirilmelerde ana metalin kaynak metalinden daha sert olduğunu elde etmişlerdir. Maksimum çekme dayanımını 25mm/s kaynak teli hızında elde etmişlerdir (Işık 2017).

Emel Taban ve arkadaşları 6,45 mm kalınlığındaki AW-5083 ve AW-5086 alüminyum alaşımı levhalarının birleştirilmesinde kullanılan TIG (Tungsten Inert Gas), MIG (Metal Inert Gas) ve sürtünme karıştırma kaynak yöntemlerinin mekanik ve mikroyapı üzerine etkilerini incelemişlerdir. AW-5083 ve AW-5086 alüminyum alaşım levhalarını eş ve farklı alaşım çiftleri olarak belirtilen kaynak yöntemleri kullanılarak uygun parametrelerde birleştirmişlerdir. Birleştirmelerin neticesinde tüm numuneler çekme deneyi, eğme deneyine tabi tutulmuştur. Alüminyum levhaların TIG ve MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmelerinde ER5356 kaynak teli ve koruyucu gaz olarak argon gazı kullanmışlardır. Sürtünme karıştırma kaynağında ise ilerleme hızını 1,25 cm/dk ve 1600 d/dk devir parametrelerini kullanmışlardır. Bu çalışma neticesinde; TIG ve MIG kaynak yöntemi ile yapılan kaynaklı birleştirilmelerde ısı girdisinden dolayı çarpılmaların olduğunu ve sürtünme karıştırma kaynağı ile yapılan kaynaklı birleştirilmelerde ise çarpılma olmadığını gözlemlenmiştir. Ayrıca Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile yapılan kaynaklı birleştirmelerin mekanik özelliklerinin, TIG ve MIG kaynak yöntemleri ile yapılan kaynaklı birleştirmelerden daha yüksek olduğunu gözlemlenmiştir (Taban 2004).

Emre Deniz Yalçın ve arkadaşları 4 mm kalınlığındaki AA5754 ve AA7075 alüminyum alaşım levhalarının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğini incelemişlerdir. Alüminyum levhaların birleştirilmesinde

kullanılan sürtünme karıştırma kaynak yönteminde sabit devir (1000 d/dk), farklı ilerleme hızları (85 mm/dk, 115 mm/dk) ve farklı yükler (6500 N, 8500 N, 10000 N, 11500 N) kullanmışlardır. Bu çalışma neticesinde farklı yük altında yapılan sürtünme karıştırma kaynağının ilerleme hızının artmasıyla pürüzlülüğünün arttığını gözlemlemişlerdir. Sabit ilerleme hızlarında ise baskı yükün artmasıyla kaynak dikiş dolgusundaki sıcaklığın arttığını gözlemlemişlerdir. Son olarak artan ilerleme hızı çatlak oluşumuna neden olurken baskı kuvvetinin artması çatlak oluşumunu azalttığını gözlemlemişlerdir (Yalçın 2010).

Adnan Köşker ve arkadaşları AA5754 serisi alüminyum alaşım levhalarının TIG (Tungsten Inert Gas) kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mekanik ve mikroyapı üzerine etkisini incelemişlerdir. AA5754 serisi alüminyum alaşım levhalarının kaynaklı birleştirilmelerinde alaşım malzemesi ile aynı özellikteki kaynak telini kullanmışlardır. Yapılan çalışmada; alüminyum alaşımının içerisindeki Cu elementinin ısı tesiri ile parçanın tamamına yayılmasının gevrek kırılmalara neden olduğunu saptamışlardır. Yaptıkları mikroyapı incelemeleri ile de bu gevrek kırılmanın ITAB (Isı Tesiri Altındaki Bölge) bölgesindeki iri taneli bölgede olduğunu gözlemlemişlerdir (Köşker 2011).

Beytullah Güngör ve arkadaşları 6 mm kalınlığındaki EN AW 5083-H111 ve EN AW 6082-T651 alüminyum alaşımı levhaların, eş ve farklı alaşım çiftlerinde sürtünme karıştırma kaynağı ve robotik CMT (Cold Metal Transfer)-MIG (Metal Inert Gas) kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinin mekanik ve metalürjik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Sürtünme karıştırma kaynağında kaynak parametreleri olarak 1250 devir/dk sabit devir olmakla beraber, 36 mm/dk ve 64 mm/dk ilerleme hızı kullanmışlardır. Robotik CMT-MIG kaynak yönteminde ise 194 A kaynak akımı, 19,5 V kaynak voltajı, 0,4 m/dk kaynak ilerleme hızı ve 11 m/dk tel besleme hızı olarak parametreleri belirlemişlerdir. CMT-MIG kaynak yönteminde ER5183 kaynak telini kullanmışlardır. Kaynaklı birleştirilmelerden aldıklarını numuneleri çekme, eğme ve yorulma deneylerine ve mikroskopik analizlere tabi tutmuşlardır. Bu çalışma neticesinde ergitme kaynak yöntemlerinde görülen açısız çarpılmanın robotik CMT-MIG kaynak yönteminde görülmediğini ve en iyi yorulma dayanımının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile yapılan birleştirilmelerde olduğunu gözlemlemişlerdir. Robotik CMT-MIG kaynak yöntemi ile yapılan birleştirmelerin mekanik

özelliklerinin, sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile yapılan birleştirmelere yakın sonuçlar verdiğini saptamışlardır (Güngör 2013).

Sunay Bebekoğlu ve arkadaşları havacılık endüstrisinde kullanılan 8 mm kalınlığındaki AA2024-T351 ve AA7075-T651 alüminyum alaşım levhalarının TIG (Tungsten Inert Gas) kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. TIG kaynak yöntemi ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde kaynak teli olarak; AA2024-T351 alüminyum alaşım levhası için ER4043, AA7075-T651 alüminyum alaşım levhası için ER5356 kaynak telleri kullanmışlardır. Yaptıkları kaynaklı birleştirmeler neticesinde numuneleri çekme deneyine tabi tutmuşlar ve AA2024-T351 alüminyum alaşımının ortalama çekme dayanımını (R_m) 112,8 MPa, AA7075-T651 alüminyum alaşımının çekme dayanımını 97,8 MPa olarak saptamışlardır. AA7075-T651 alüminyum alaşım levhalarının Kaynaklanabilirliği düşük olduğundan, çekme deneyi sonucunda kopmaların kaynak bölgesinden olduğunu gözlemlemişlerdir. AA2024-T351 alüminyum alaşım levhalarının kimyasal bileşiminde bakır (Cu) olması nedeniyle, ITAB (Isı Tesiri Altındaki Bölge) bölgesinin daha belirgin olduğunu gözlemlemişlerdir (Bebekoğlu 2019).

Melis Türköz Alıcı ve arkadaşları AA5754 ve AA6061 alüminyum alaşım levhaların CMT (Cold Metal Transfer) kaynak yöntemi ile farklı parametrelerde birleştirilmesinin kaynaklı birleştirme sonrası ısı işleme, mekanik özelliklere ve mikroyapı özelliklerine etkisini incelemişlerdir. 2 mm kalınlığındaki AA6061 ve AA5754 alüminyum alaşım levhalarını; 87A, 104A, 103A, 111A ve 114A akımlarda, 12V, 13.8V, 12.9V, 14.1V ve 14.4V kaynak voltajlarında, 500 mm/dk, 700 mm/dk ve 1000 mm/dk kaynak hızlarında birleştirmişlerdir. Yaptıkları çalışma neticesinde CMT kaynak yöntemi ile yapılan kaynaklı birleştirmelerin mikrosertlik testi sonucunda ısı girdisinin artmasıyla kaynak bölgesi sertliğinin düştüğünü ve ısı girdisinin artmasıyla maksimum çekme gerilmesinin azaldığını gözlemlemişlerdir (Alıcı 2019).

Abdurrahman Aydın ve arkadaşları 5 mm kalınlığındaki AA7075-T651 alüminyum alaşımı levhaların sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin yorulma ömrüne etkisini incelemişlerdir. Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile yapılan birleştirmelerde; farklı dönme hızları (500 rpm, 630 rpm, 800 rpm, 1000 rpm) ve farklı ilerleme hızları (50 mm/dk, 63 mm/dk, 80 mm/dk, 100

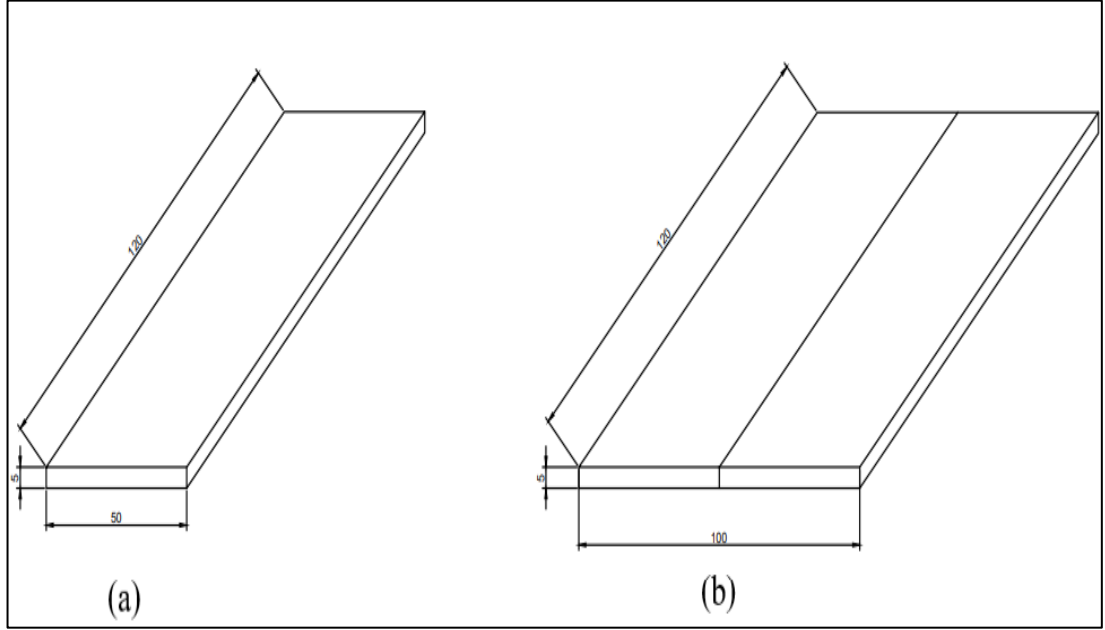
mm/dk) kaynak parametresi olarak kullanmışlardır. Kaynaklı birleştirmeleri yapılan numuneleri, mekanik özelliklerini tespit etmek için çekme deneyi, eğme deneyi ve yorulma testine tabi tutmuşlardır. Çekme deneyi sonucunda maksimum çekme dayanımının 1000 rpm dönme hızı ve 100 mm/dk kaynak hızı parametrelerinin kullanıldığı numunelerden elde etmişlerdir. Yaptıkları üç nokta eğme deneyi neticesinde tüm numunelerde çatlak oluştuğunu ve kırılmaların kaynak bölgesinden olduğunu gözlemlemişlerdir. Ana malzemenin, sürtünme karışırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş numunelere göre yorulma dayanımının daha yüksek olduğunu saptamışlardır. Metalografik incelemeler neticesinde kaynaklı birleştirmelerde boşluk hataları gözlemlemişlerdir (Aydın 2017).

Hakan Çetinel ve arkadaşları AA5083 ve AA6013 alüminyum alaşımlarının AlSi12 ve AlSi5 kaynak telleri kullanılarak TIG (Tungsten Inert Gas) kaynak yöntemi ile birleştirilmesinin mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Koruyucu gaz olarak argon kullanılan bu çalışmada kaynak parametreleri; 70 A (Amper), kaynak hızı 3mm/s, elektrot çapı 2,4 mm ve gaz debisi 7 lt/dk olarak sabit tutulmuştur. AA5083 ve AA6013 alüminyum alaşımları iki farklı kaynak teli ile hem kendi arasında hem de karşılıklı olarak birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmeler sonucunda elde edilen numuneler sertlik, darbe ve eğme testlerine tabi tutulmuştur. Yaptıkları testler neticesinde; AlSi12 kaynak teli kullanılarak yapılan kaynaklı birleştirmelerin sertlik değerinin AlSi5 kaynak teli ile yapılan kaynaklı birleştirmelere göre daha yüksek olduğu ve AA5083 ile AA6013 alüminyum alaşımlarının birbirleriyle olan kaynaklı birleştirmelerde her iki kaynak teli için de AA6013 alüminyum alaşımında mekanik dayanımların daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir (Çetinel ve Ayvaz 2011).

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 3005 Alüminyum Alaşımı

Gerçekleştirilen bu çalışmada 36 adet 120x50x5 mm ölçülerine sahip alüminyum levha kullanılmıştır.



Şekil 6.14: a-) Kaynaklı birleştirme öncesi, b-) Kaynaklı birleştirme sonrası

Farklı kaynak yöntemleri ile alın altına birleştirilen alüminyum alaşımı levhaların her birinden üç adet çekme, bir adet mikroyapı ve bir adet sertlik numunesi alınmıştır. Mekanik ve mikroyapı incelemelerin yapıldığı AA3005 alüminyum alaşımının kimyasal bileşenleri tablo 6.5’ de verilmektedir.

Tablo 6.5: AA3005 alüminyum alaşımının kimyasal bileşenleri

| Alaşım | Mg (%) | Mn (%) | Fe (%) | Si (%) | Cu (%) | Zn (%) | Cr (%) | Ti (%) |
|--------|---------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| AA3005 | 0,2-0,6 | 1,0-1,15 | <0,7 | <0,6 | <0,30 | <0,25 | <0,10 | <0,10 |

6.2 İlave Kaynak Metali

AA3005 alüminyum alaşımının MIG (Metal Inert Gas) ve CMT (Cold Metal Transfer) kaynak yöntemleri ile birleştirilmelerinde 4043 kaynak teli kullanılmıştır. 4043 kaynak telinin kimyasal bileşenleri tablo 6.6' da verilmektedir.

Tablo 6.6: 4043 ilave kaynak telinin kimyasal bileşenleri

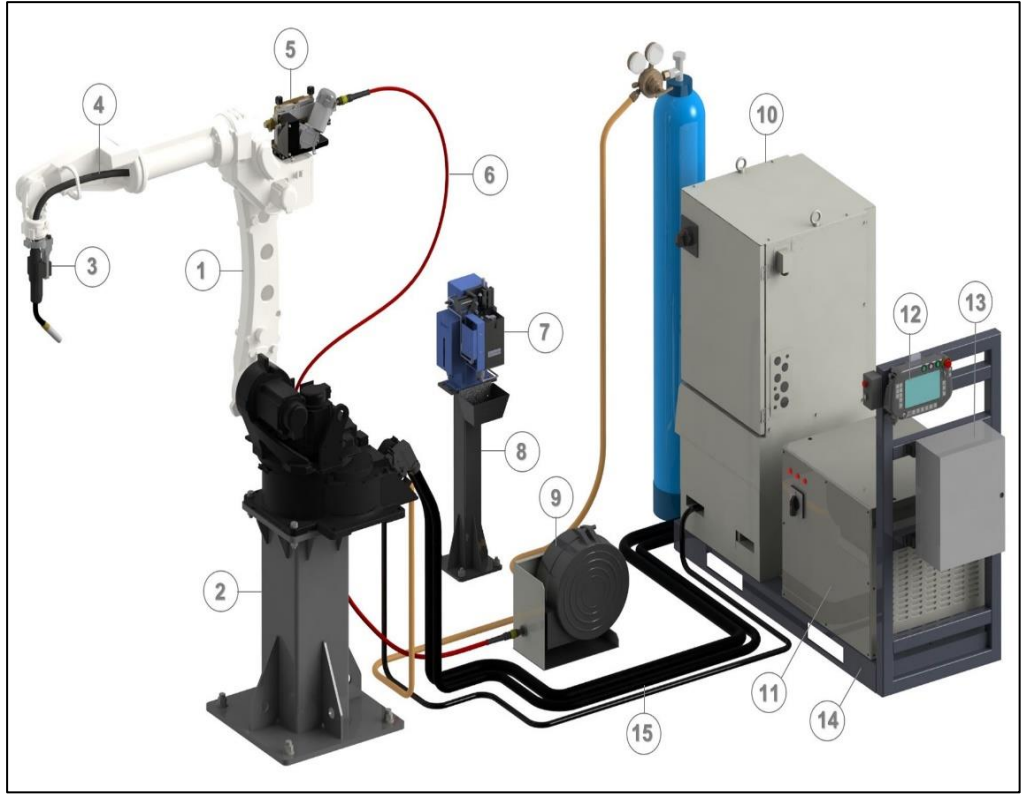
| TÜR | Si % | Fe % | Cu % | Mn % | Mg % | Ti % | Zn % | Al % |
|------|---------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 4043 | 4,5-6,0 | 0,80 | 0,30 | 0,05 | 0,05 | 0,20 | 0,10 | Kalan |

6.3 Koruyucu Gaz

Cold Metal Transfer (CMT) ve Metal Inert Gas (MIG) kaynak yöntemleri ile gerçekleştirilen birleştirilmelerde %100 Argon (Ar) gazı kullanılmıştır.

6.4 MIG Kaynak Robotu

MIG (Metal Inert Gas) kaynak yöntemi ile birleştirilen alüminyum alaşımları Panosonic TM2000WG3 Tawers kaynak robotu ile gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerde süper active alüminyum torç kullanılmıştır.



Şekil 6.15: MIG kaynak robotu

Şekil 6.15' de verilen kaynak robotunun kısımları;

1. Robot Kolu
2. Robot Sehbası
3. Kaynak Torcu ve Sensörü
4. Kaynak Torcu Kablosu
5. Tel Sürme Ünitesi
6. Tel Taşıyıcı Hortum
7. Torç Temizleme Ünitesi
8. Torç Temizleme Sehbası
9. Tel Sepet Taşıma Aparatı
10. Kaynak Makinesi
11. Trafo
12. Kumanda Ünitesi
13. Kumanda Kutusu
14. Taşıyıcı Palet
15. Kablo Grubu

6.5 CMT Kaynak Robotu

CMT (Cold Metal Transfer) kaynak yöntemi ile birleştirilen alüminyum alaşımlarında Fronius marka kaynak robotu kullanılmıştır.

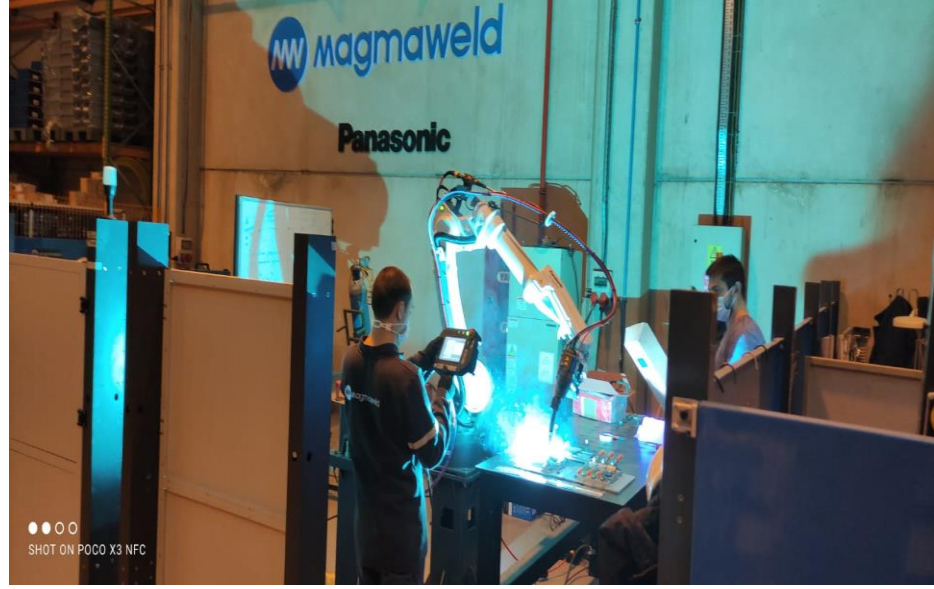


Şekil 6.16: CMT kaynak robotu

7. YÖNTEM

7.1 Deney Numunelerinin Kaynaklı Birleştirilmeleri

5 mm kalınlığındaki AA3005 alüminyum alaşım levhaları MIG (Metal Inert Gas) ve CMT (Cold Metal Transfer) kaynak yöntemleri ile farklı parametrelerde birleştirilmiştir.



Şekil 7.17: MIG kaynak robotu ile gerçekleştirilen birleştirmeler

MIG kaynak yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirmelerde üç farklı kaynak amperi ve üç farklı kaynak hızı kullanılmış olup, kullanılan parametreler tablo 7.7’ de verilmektedir. Bu kaynaklı birleştirmeler Magmaweld fabrikasında deneyimli uzmanlar eşliğinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 7.7: MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde kullanılan kaynak parametreleri

| NUMUNE NO | KAYNAK HIZI (mm/dk) | KAYNAK AMPERİ (A) | ISI GİRDİSİ (kJ/mm) |
|-----------|---------------------|-------------------|---------------------|
| M1 | 650 | 100 | 0,185 |
| M2 | 600 | 100 | 0,192 |
| M3 | 550 | 100 | 0,201 |
| M4 | 650 | 110 | 0,195 |
| M5 | 600 | 110 | 0,202 |
| M6 | 550 | 110 | 0,211 |
| M7 | 650 | 120 | 0,204 |
| M8 | 600 | 120 | 0,211 |
| M9 | 550 | 120 | 0,220 |



Şekil 7.18: CMT kaynak robotu ile gerçekleştirilen birleştirmeler

CMT kaynak yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirmelerde üç farklı kaynak amper ve üç farklı kaynak hızı kullanılmış olup, kullanılan parametreler tablo 7.8’ de verilmektedir.

Tablo 7.8: CMT kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde kullanılan kaynak parametreleri





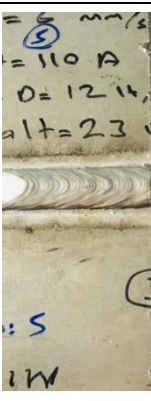







| NUMUNE NO | KAYNAK HIZI (mm/dk) | KAYNAK AMPERİ (A) | ISI GİRDİSİ (kJ/mm) |
|-----------|---------------------|-------------------|---------------------|
| C1 | 650 | 100 | 0,102 |
| C2 | 600 | 100 | 0,110 |
| C3 | 550 | 100 | 0,120 |
| C4 | 650 | 110 | 0,115 |
| C5 | 600 | 110 | 0,125 |
| C6 | 550 | 110 | 0,136 |
| C7 | 650 | 120 | 0,129 |
| C8 | 600 | 120 | 0,140 |
| C9 | 550 | 120 | 0,153 |

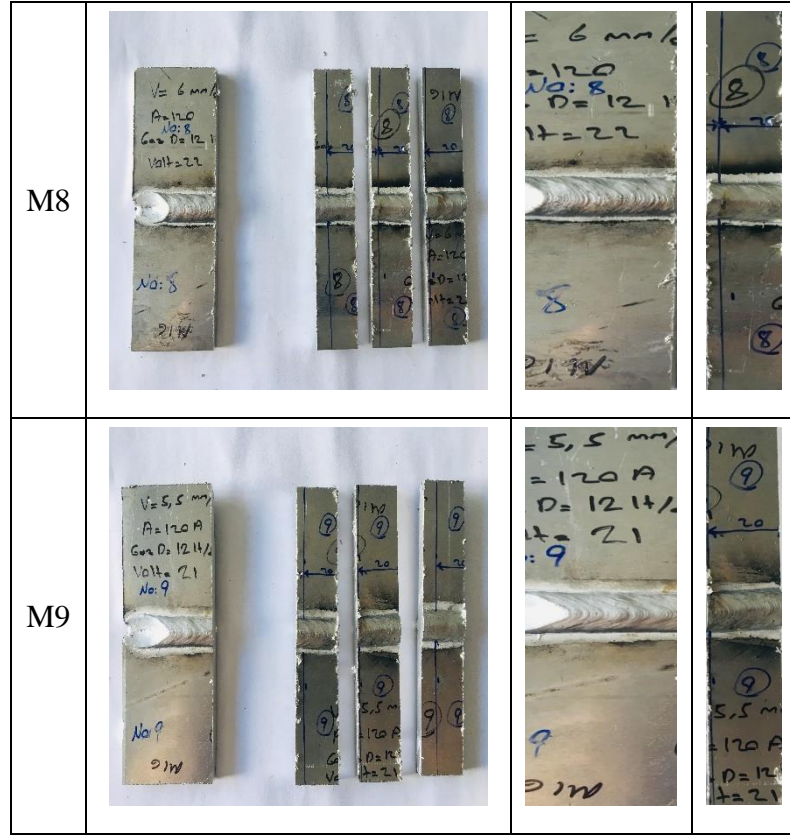
7.2 Numunelerin Çekme Testine Uygun Olarak Kesilmesi

MIG (Metal Inert Gas) ve CMT (Cold Metal Gas) kaynak yöntemleri ile birleştirilen alüminyum alaşımı levhalar su testeresi kullanılarak ISO 6892-1 standartlarına uygun şekilde kesilmiştir.

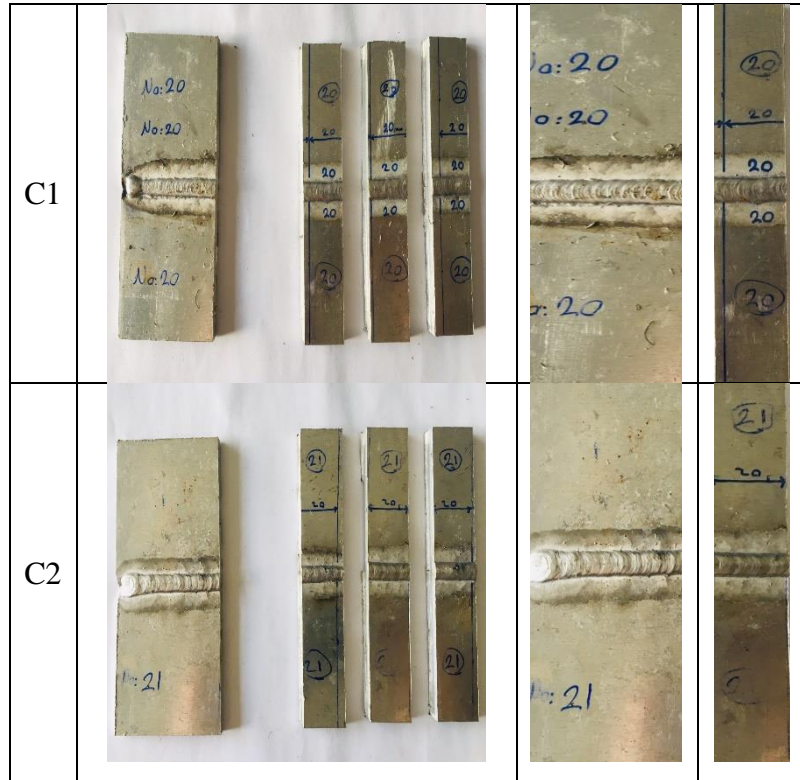
Tablo 7.9: MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numuneler

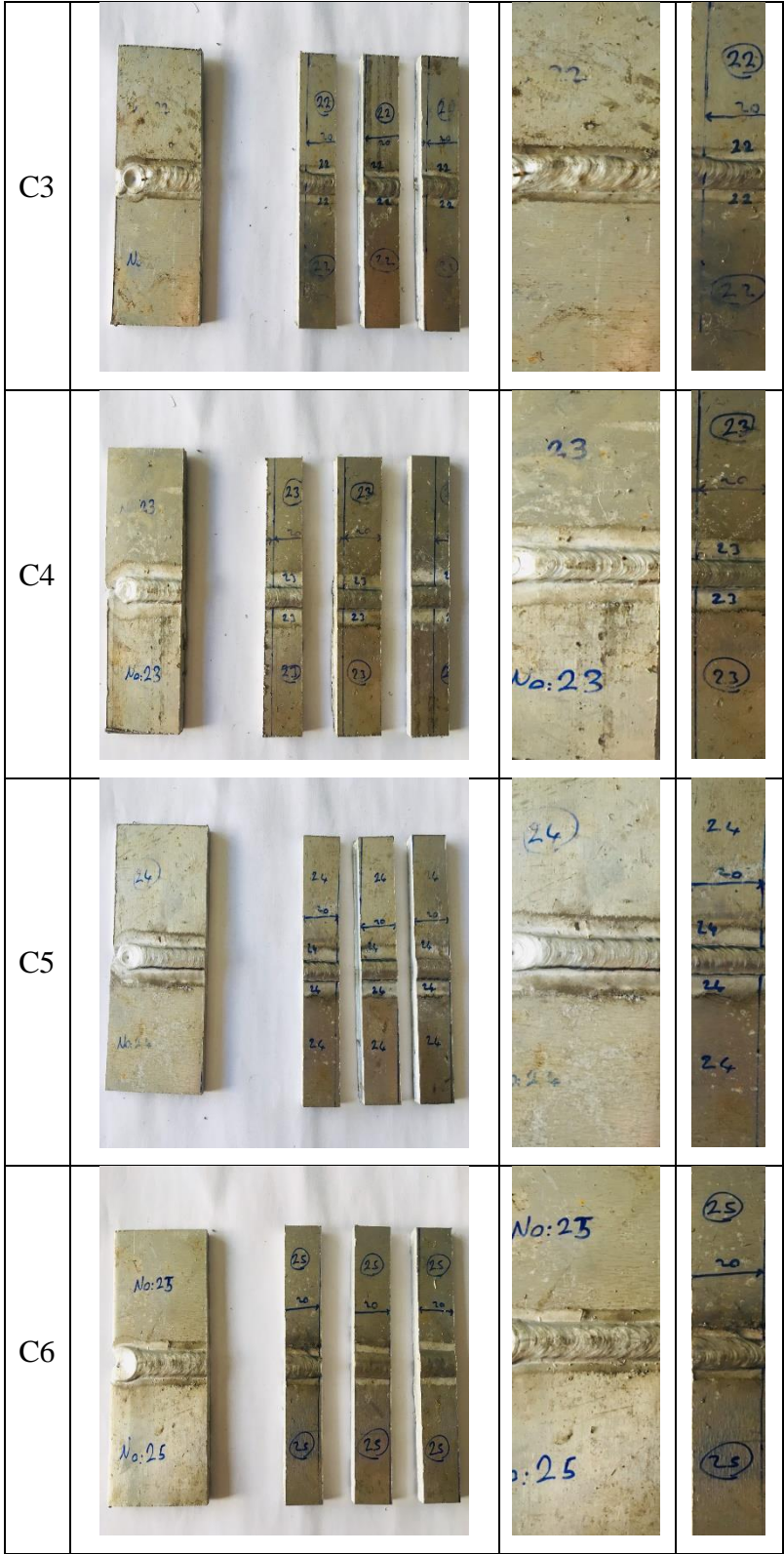
| | | | |
|----|--|--|--|
| M1 | | | |
| M2 | | | |
| M3 | | | |

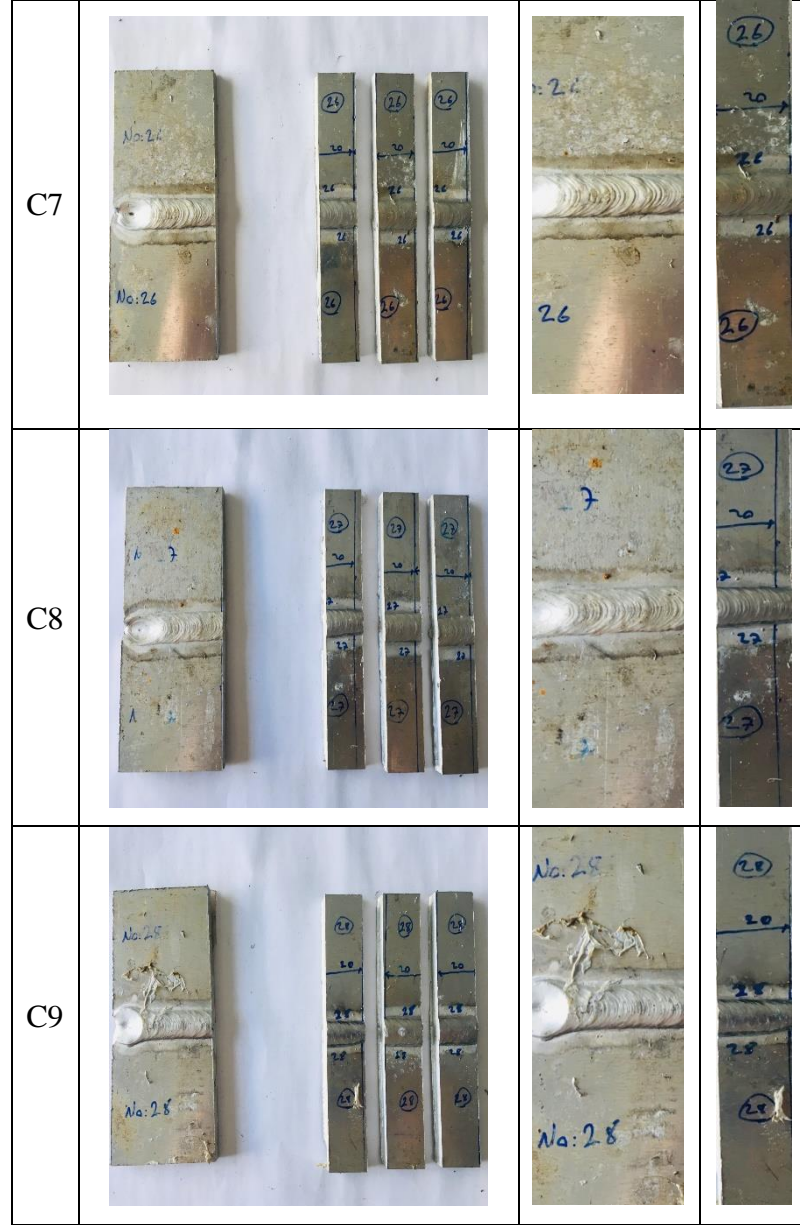
| | | | |
|----|---|--|---|
| M4 |  |  |  |
| M5 |  |  |  |
| M6 |  |  |  |
| M7 |  |  |  |



Tablo 7.10: CMT kaynak yöntemi ile birleştirilen numuneler







7.3 Metalografik Çalışmalar

Mikroyapı ve Makroyapı görüntülemeleri için numuneler Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalografi laboratuvarında HARDWAY marka hassas testere kullanılarak kesilmiş ve bakalite alınmıştır.



Şekil 7.19: Hassas testere makinesi

Bakalite alınan numuneler sırasıyla 400, 600, 800, 1000 ve 1200' lük METKON marka su zımparaları kullanılarak zımparanmış ve METKON marka keçeler kullanılarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.20: Zımpara makinesi

Parlatma işleminden sonra numuneler keller marka dağlayıcı yardımıyla dağlanmış ve görüntülemeye hazır hale getirilmiştir.



Şekil 7.21: Dağlama işleminin gerçekleştirildiği muhafazalı alan

Mikroyapı görüntüleri NIKON marka mikroskop kullanılarak 50x, 100x, 200x ve 500x büyütmede gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.22: Mikroskop ve bilgisayar donanımı

Tüm metalografik çalışmalar Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi metalografi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

7.4 Çekme Deneyi

Çekme deneyleri Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi malzeme mekanik testler laboratuvarında bulunan, şekil 7.23' de verilen 10 tonluk çekme cihazı ile 20 mm/dk hızla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.23: Çekme deneyi cihazı

7.5 Sertlik Deneyi

Sertlik deneyleri Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesinde bulunan Metkon marka sertlik deney cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler kaynak bölgesinden ana metale doğru 0,1 mm aralıklarla, 12 adet noktadan alınan sonuçlarla tamamlanmıştır.

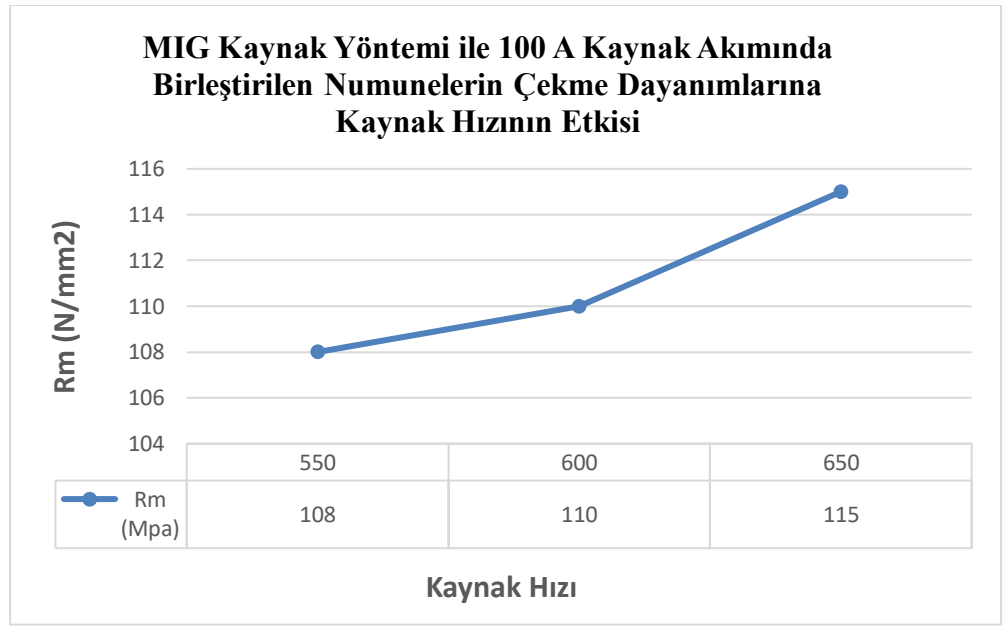


Şekil 7.24: Sertlik deney cihazı

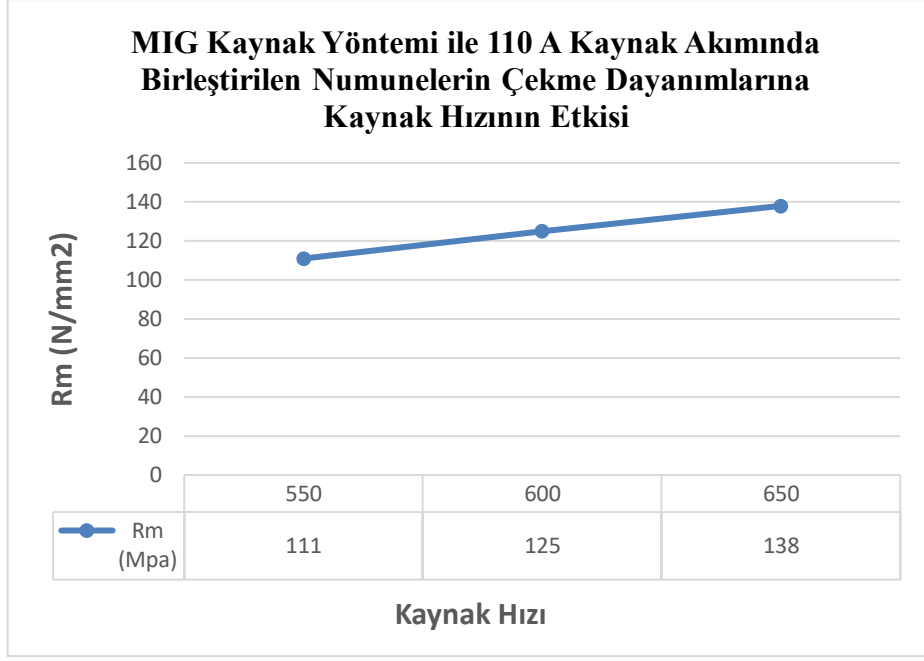
8. BULGULAR

8.1 Çekme Deneyi Sonuçları

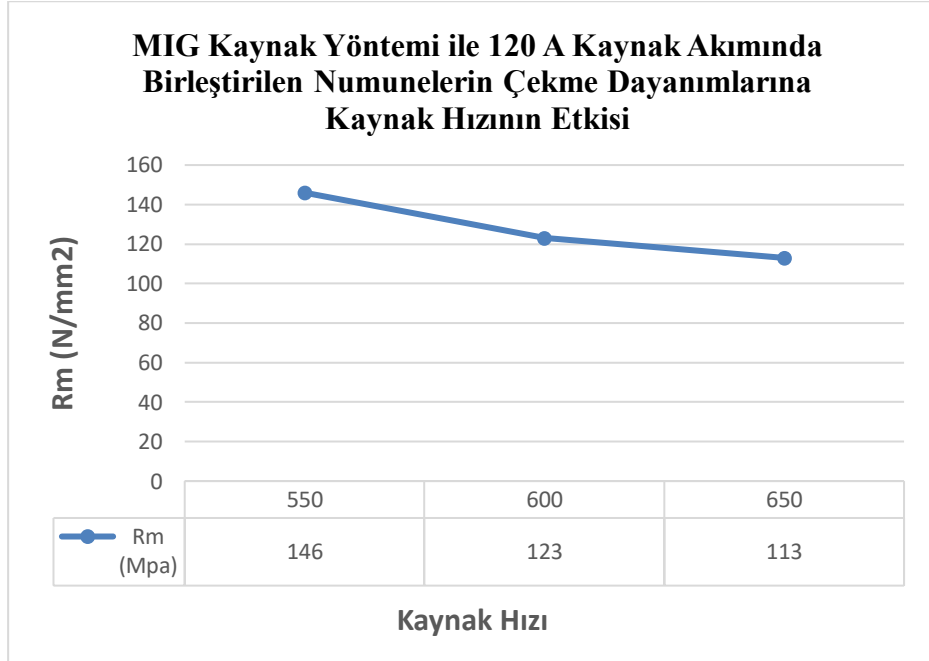
Gerçekleştirilen çekme deneyi sonuçları detaylı grafiklerle şekil 8.25, şekil 8.26, şekil 8.27, şekil 8.28, şekil 8.29, şekil 8.30, şekil 8.31, şekil 8.32, şekil 8.33, şekil 8.34, şekil 8.35, şekil 8.36, şekil 8.37, şekil 8.38, şekil 8.39, şekil 8.40, şekil 8.41, şekil 8.42, şekil 8.43, şekil 8.44 ve şekil 8.45’ de verilmektedir.



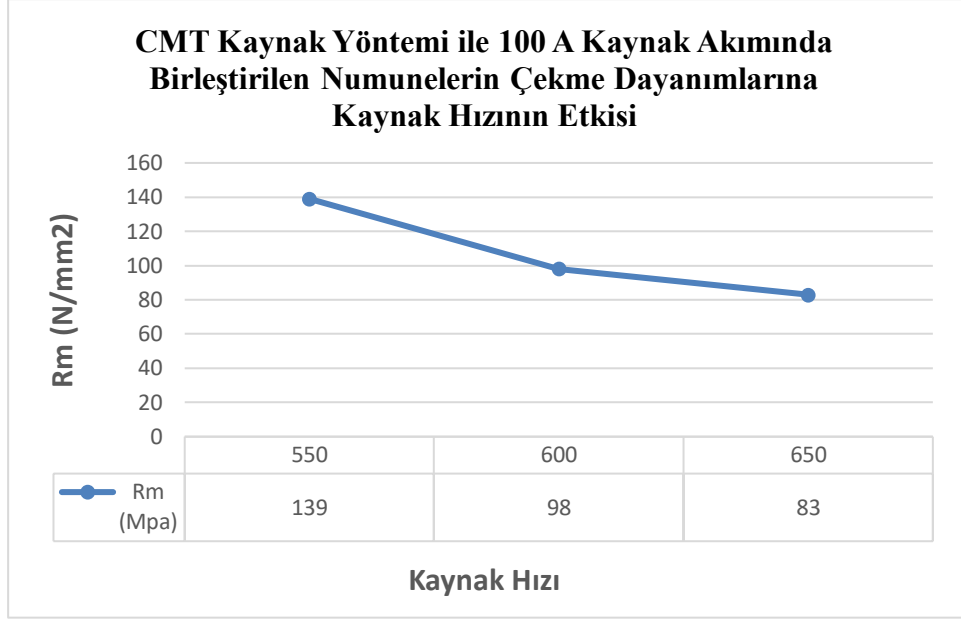
Şekil 8.25: M1, M2 ve M3 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları



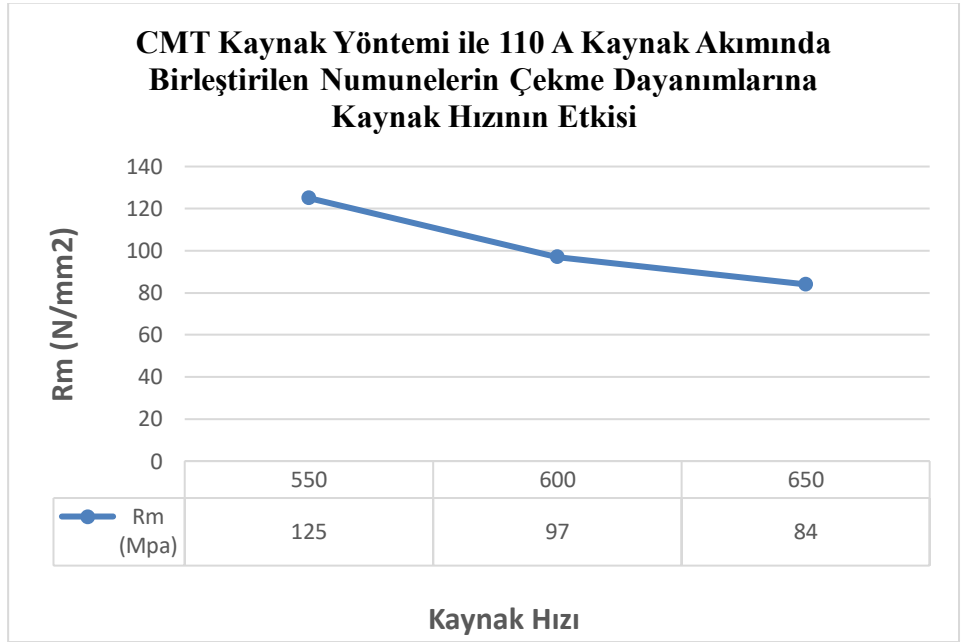
Şekil 8.26: M4, M5 ve M6 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları



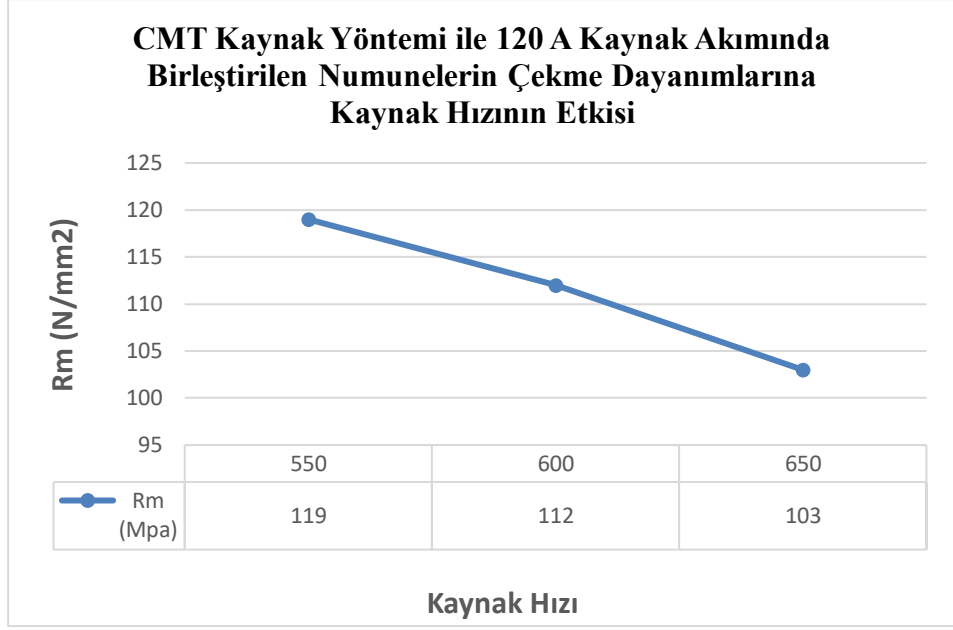
Şekil 8.27: M7, M8 ve M9 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları



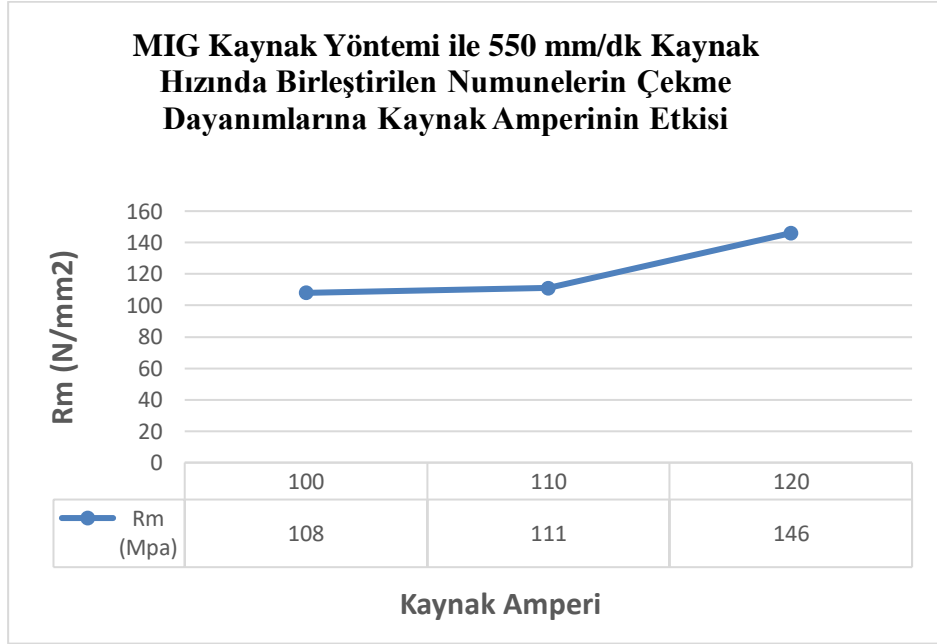
Şekil 8.28: C1, C2 ve C3 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları



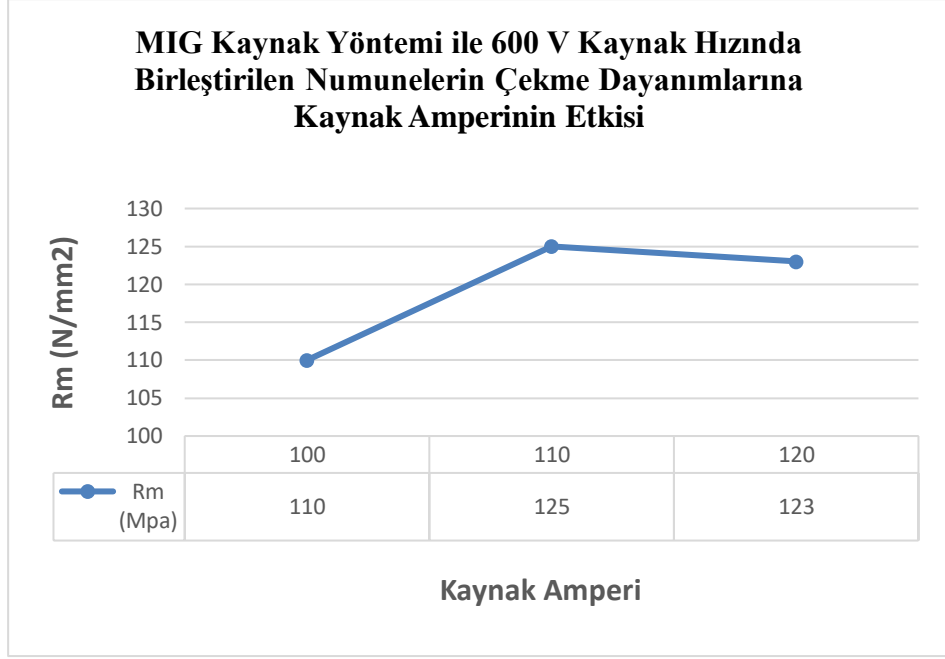
Şekil 8.29: C4, C5 ve C6 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları



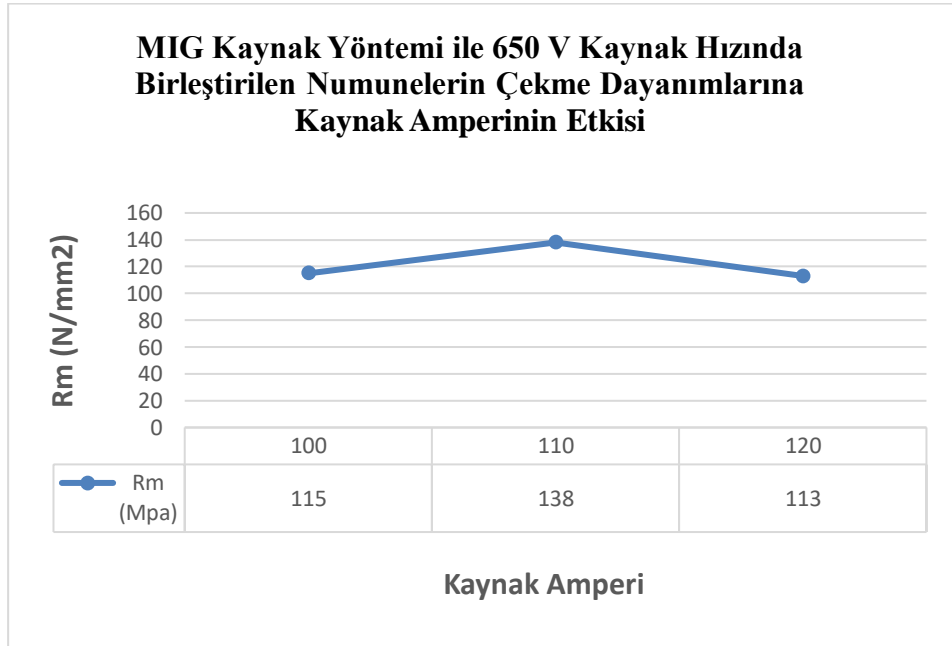
Şekil 8.30: C7, C8 ve C9 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları



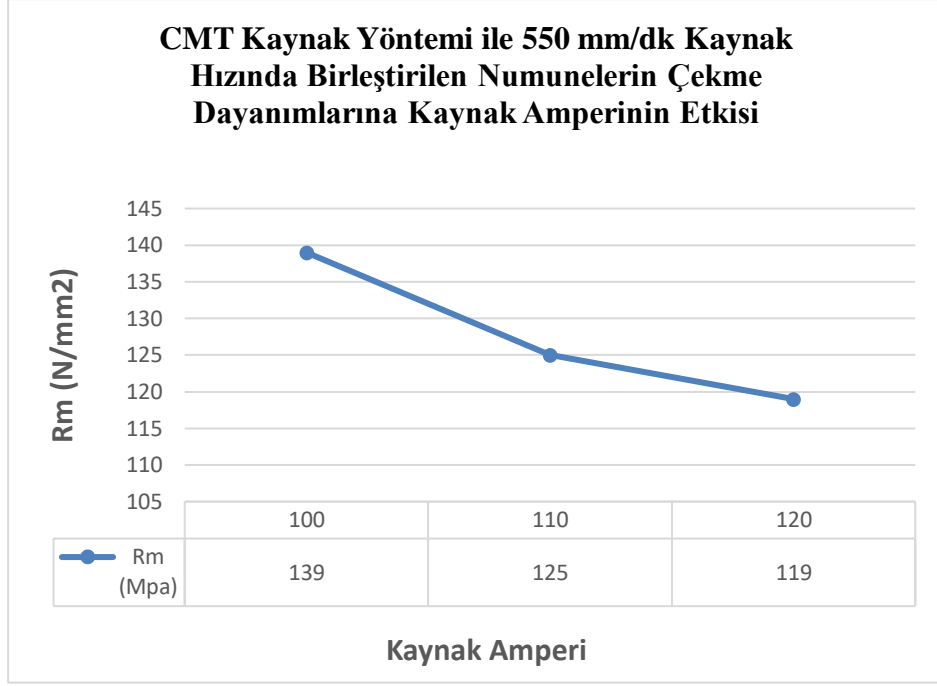
Şekil 8.31: M3, M6 ve M9 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları



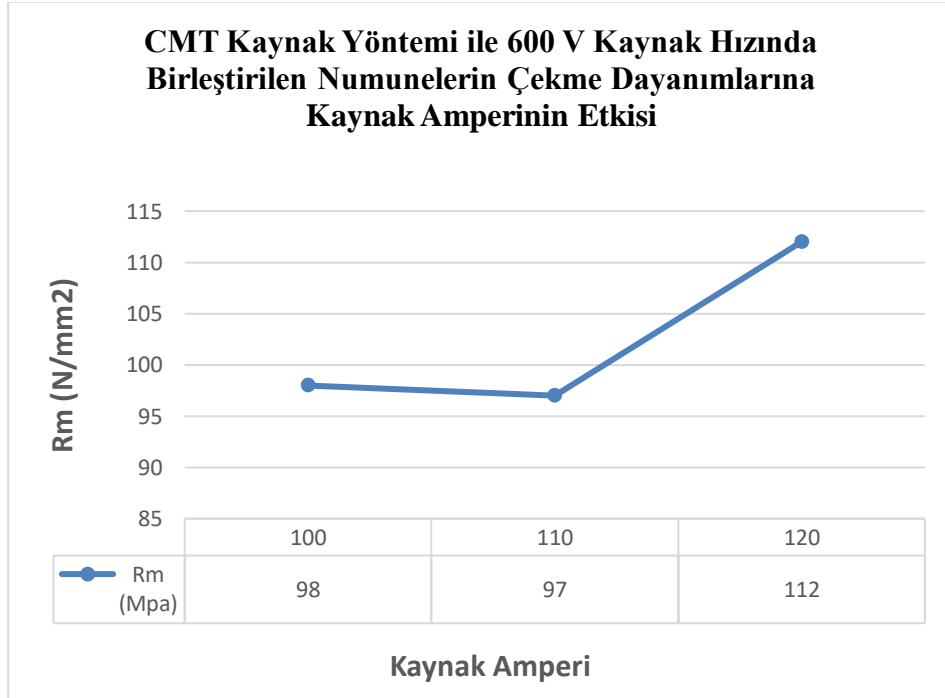
Şekil 8.32: M2, M5 ve M8 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları



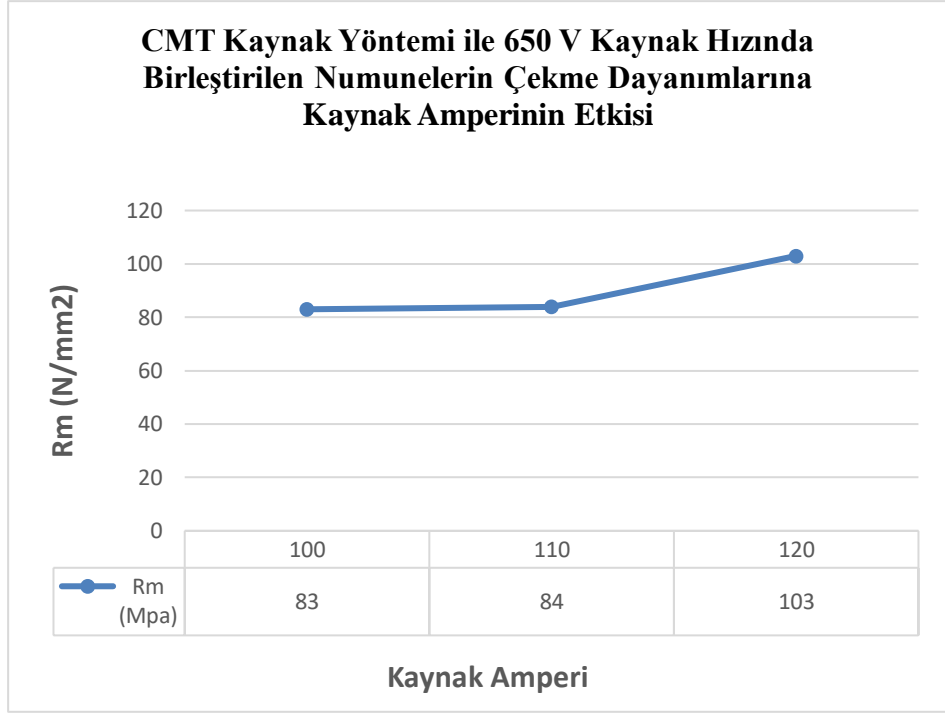
Şekil 8.33: M1, M4 ve M7 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları



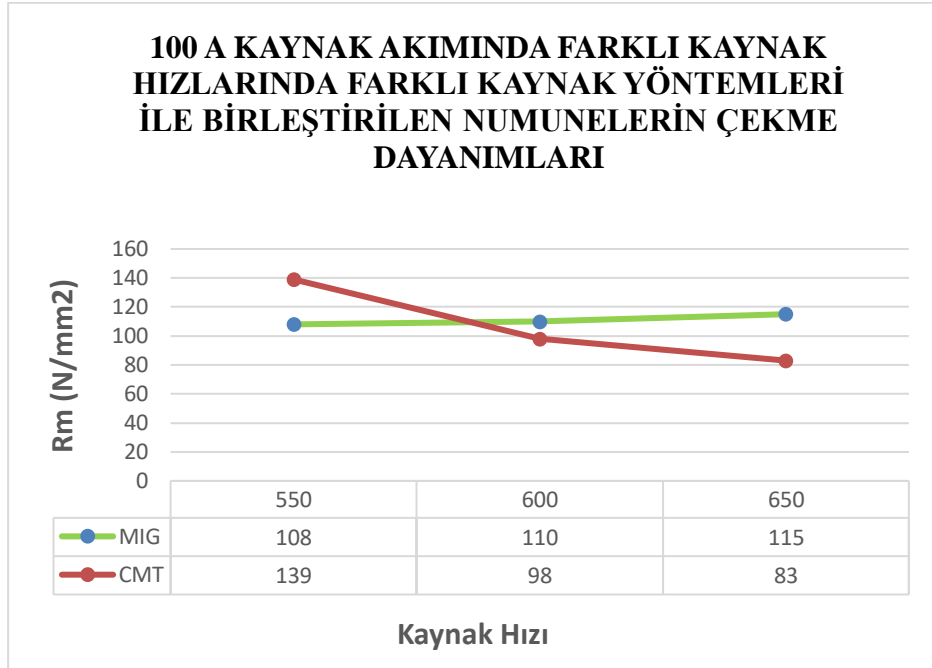
Şekil 8.34: C3, C6 ve C9 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları



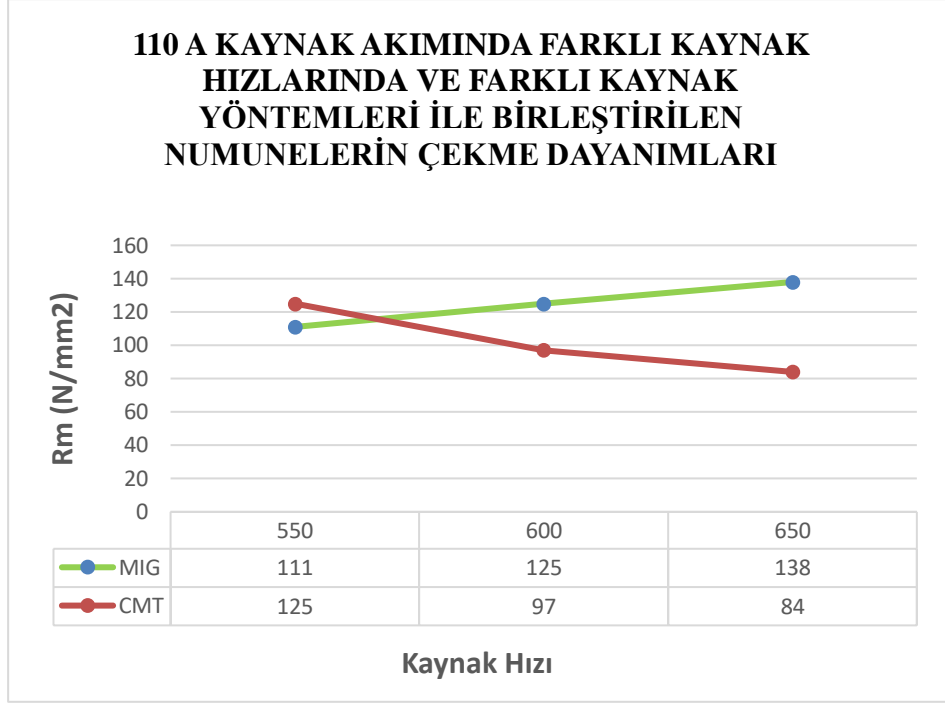
Şekil 8.35: C2, C5 ve C8 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları



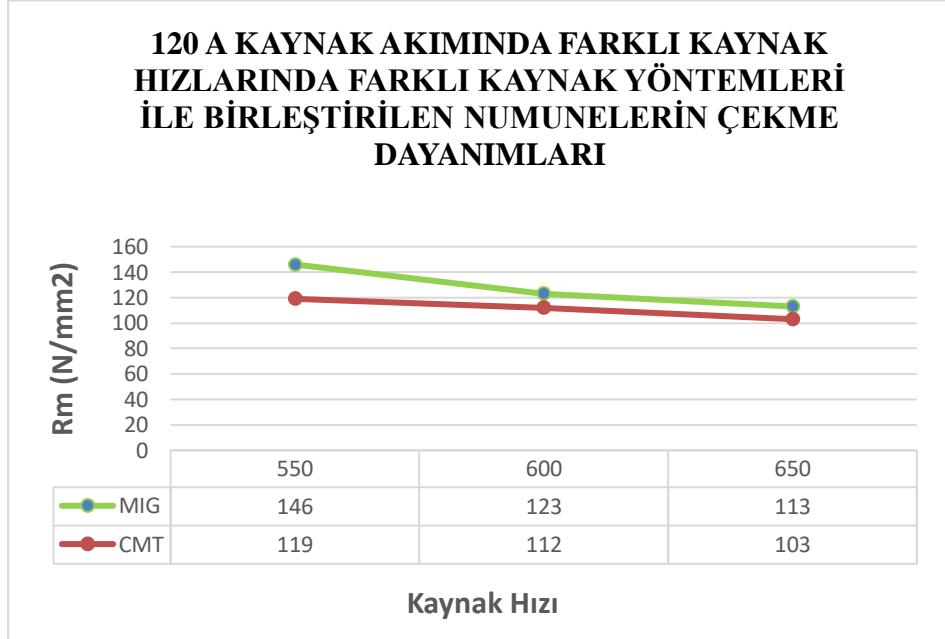
Şekil 8.36: C1, C4 ve C7 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları



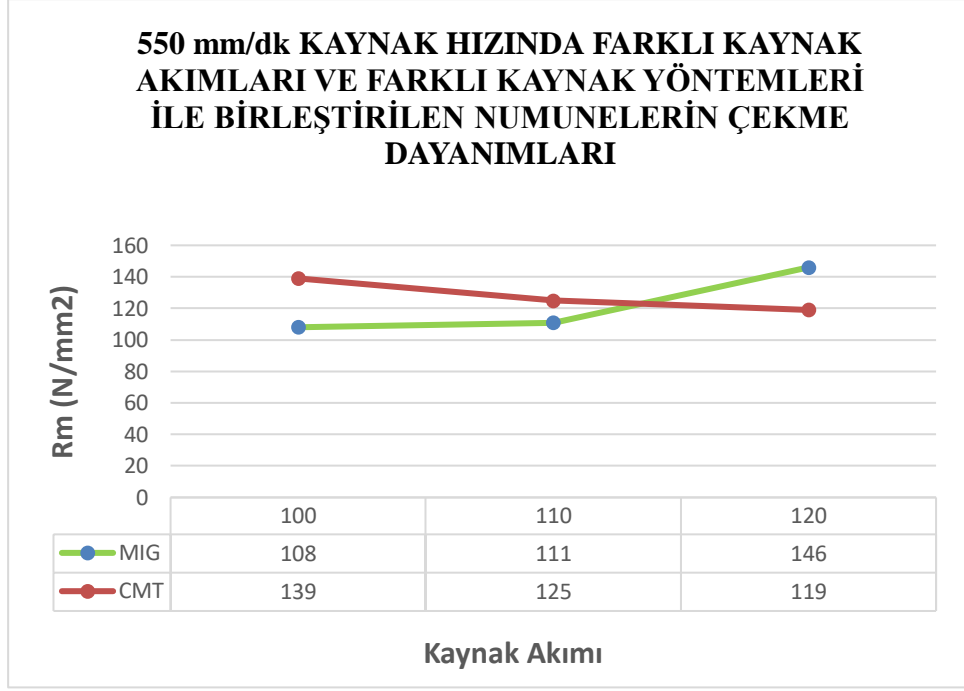
Şekil 8.37: C1, C2, C3, M1, M2 ve M3 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları



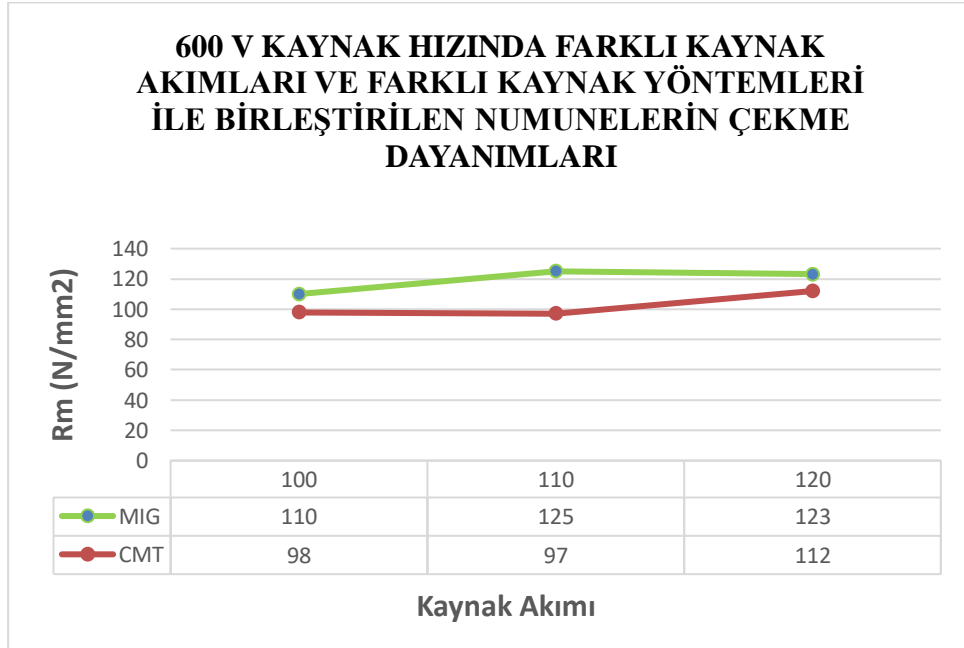
Şekil 8.38: C4, C5, C6, M4, M5 ve M6 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları



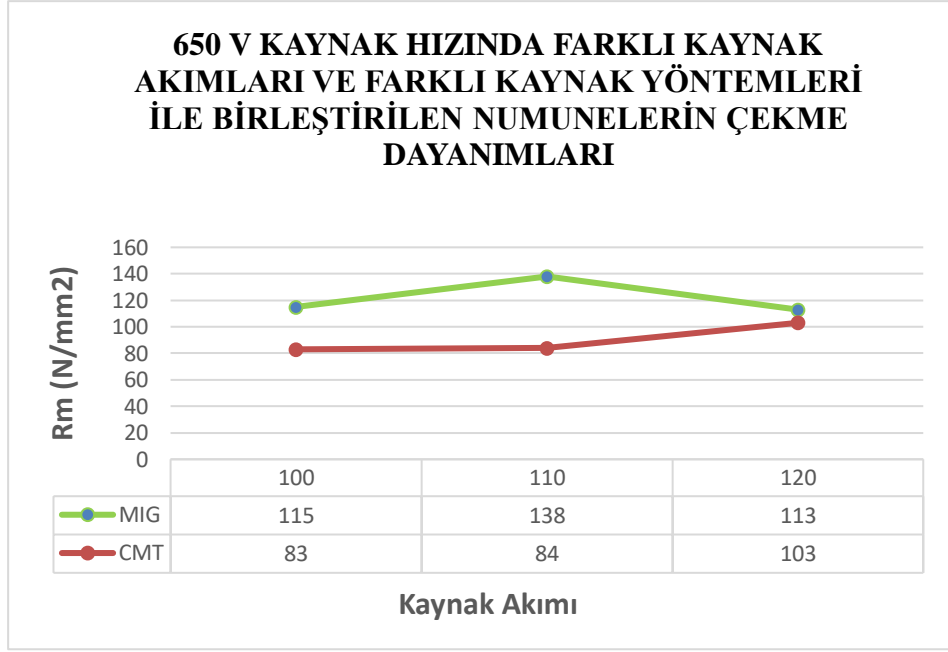
Şekil 8.39: C7, C8, C9, M7, M8 ve M9 kodlu numunelerin farklı kaynak hızlarındaki çekme dayanımları



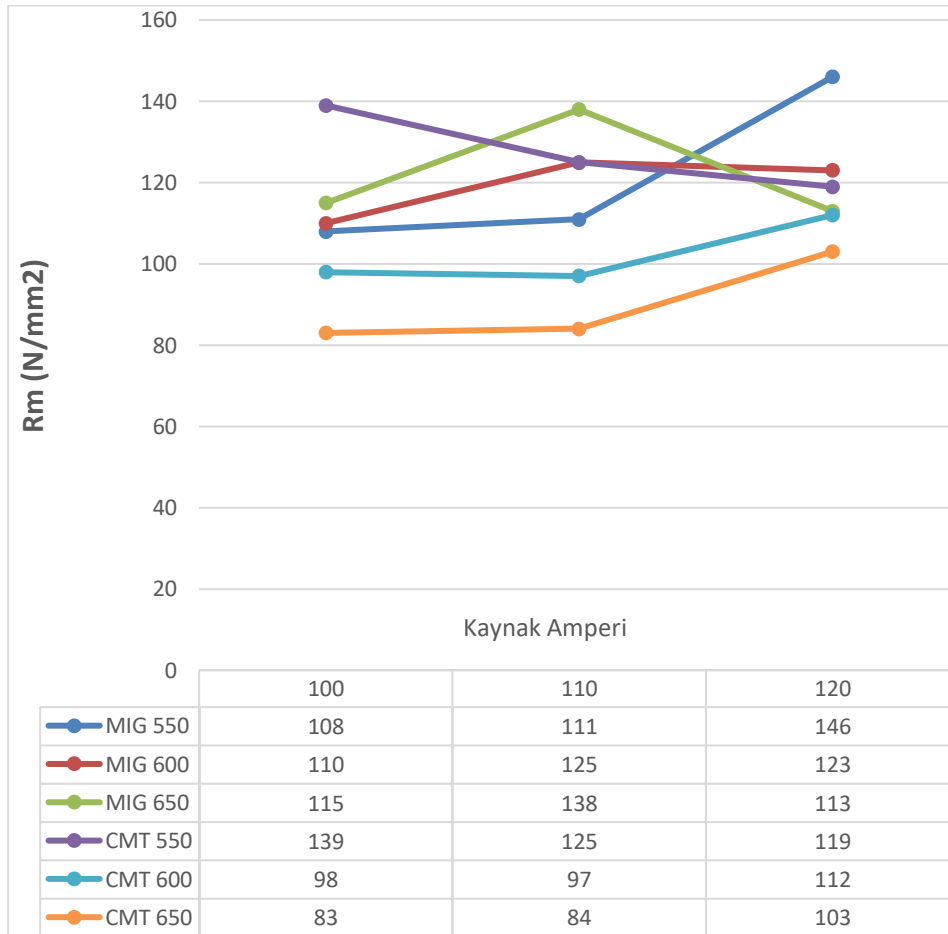
Şekil 8.40: C3, C6, C9, M3, M6 ve M9 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları



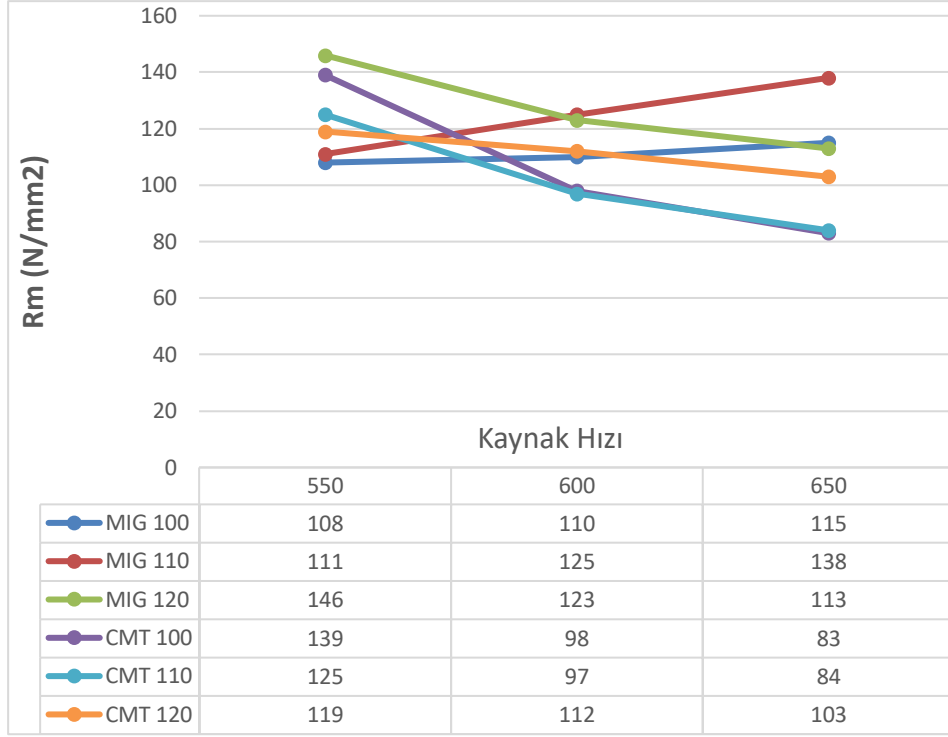
Şekil 8.41: C2, C5, C8, M2, M5 ve M8 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları



Şekil 8.42: C1, C4, C7, M1, M4 ve M7 kodlu numunelerin farklı kaynak akımlarındaki çekme dayanımları



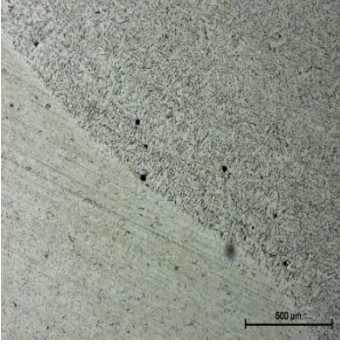
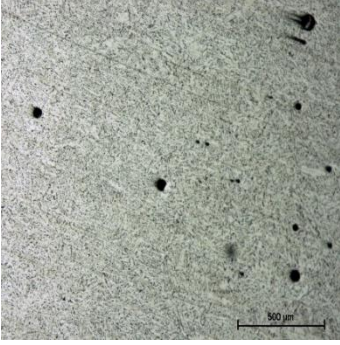
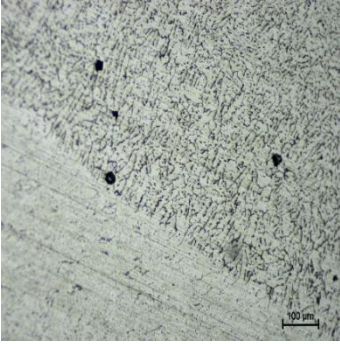
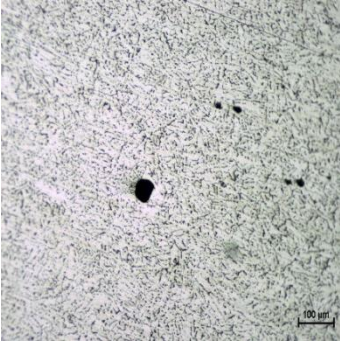
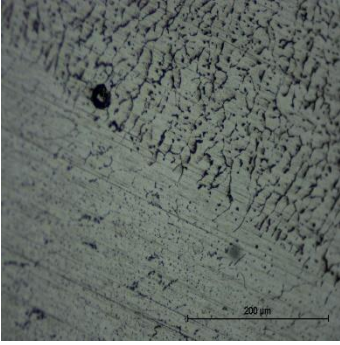
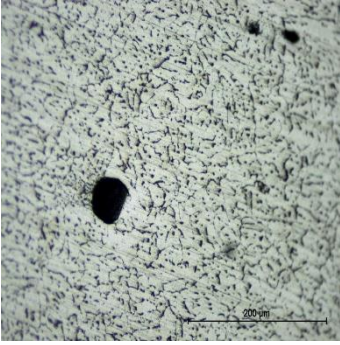
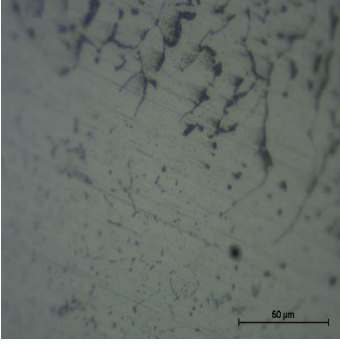
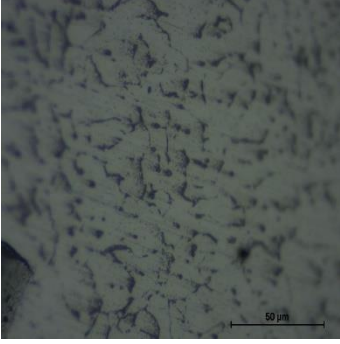
Şekil 8.43: Farklı kaynak hızları ve farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımlarına kaynak akımının etkisini gösteren grafik



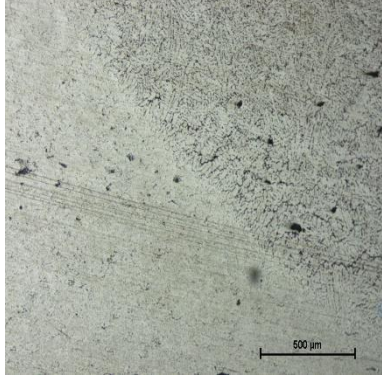
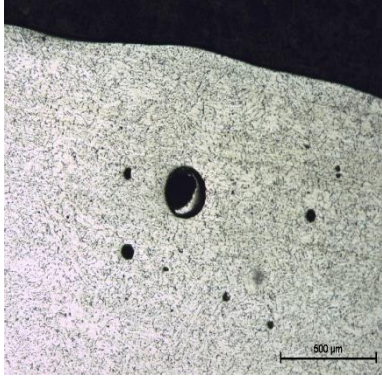
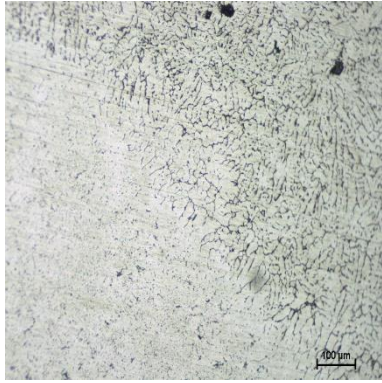
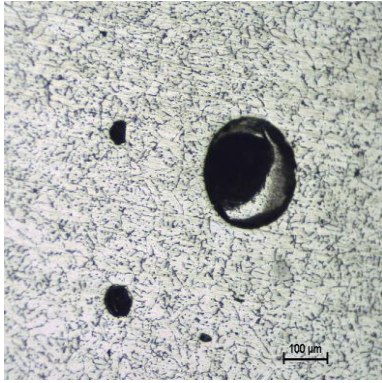
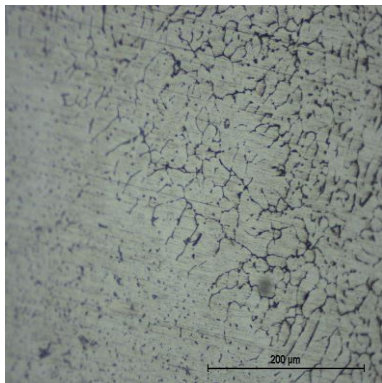
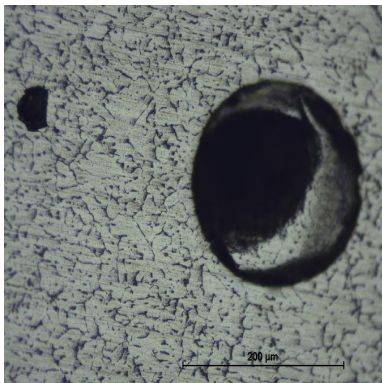
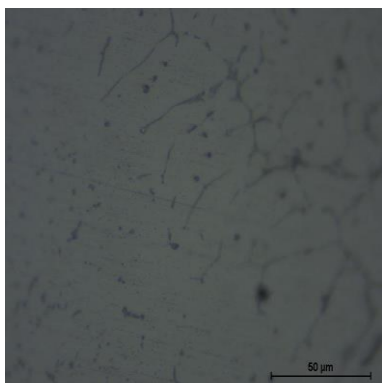
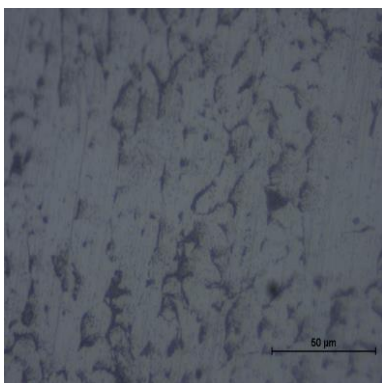
Şekil 8.44: Farklı kaynak akımları ve farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilen numunelerin çekme dayanımlarına kaynak hızının etkisini gösteren grafik

8.2 MIG ve CMT Kaynak Yöntemleri ile Gerçekleştirilen Birleştirmelerin Farklı Boyutlardaki Mikroyapı ve Makroyapı Görüntüleri

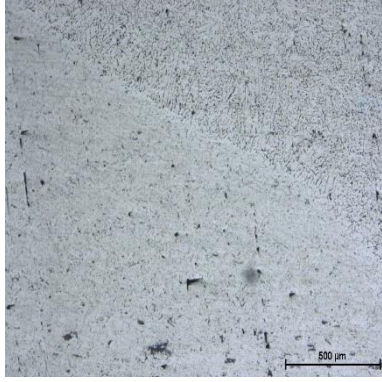
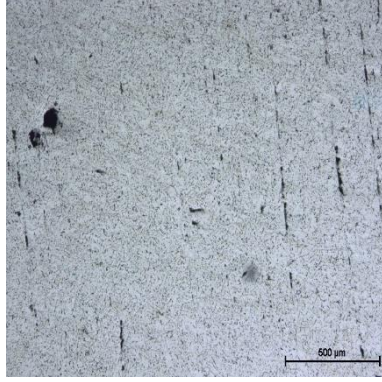
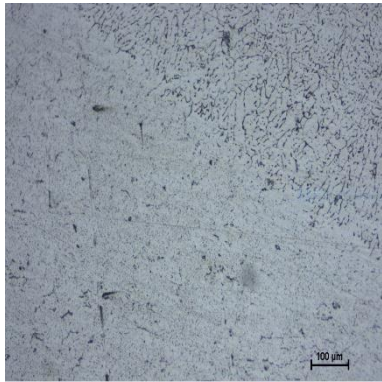
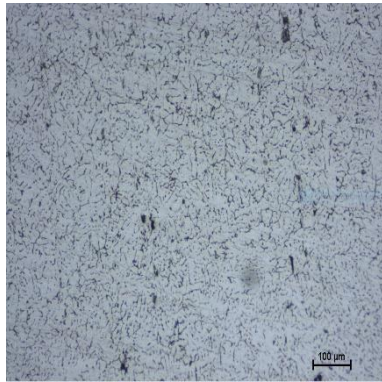
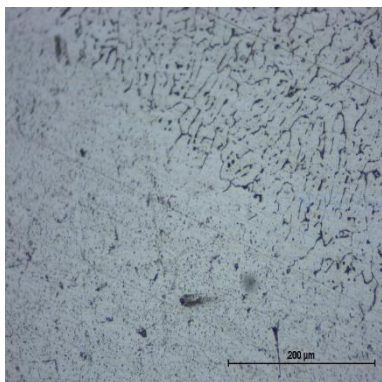
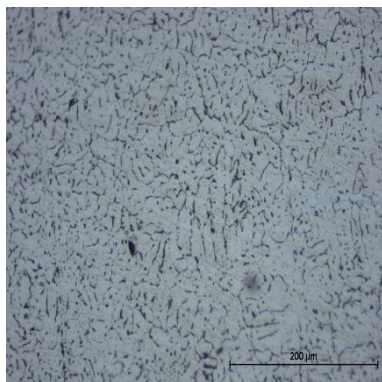

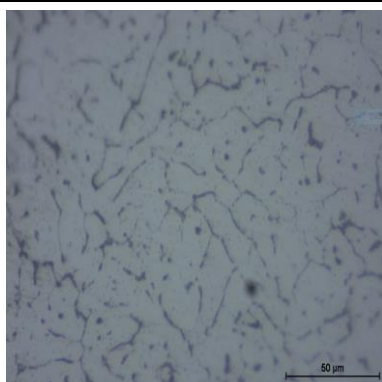
Tablo 8.11: M1 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| M1 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

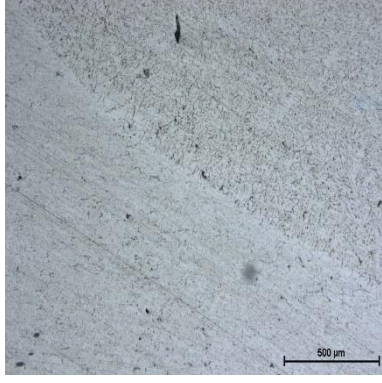
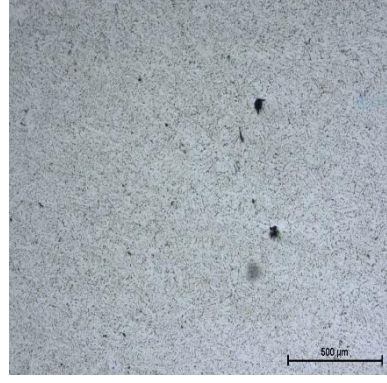
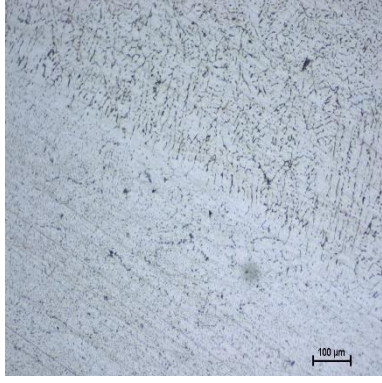
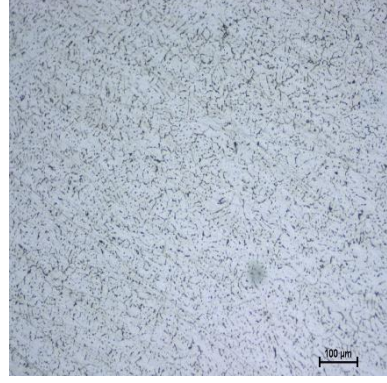
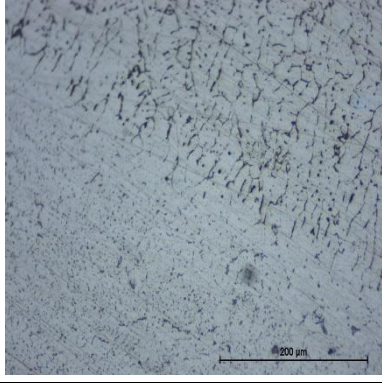
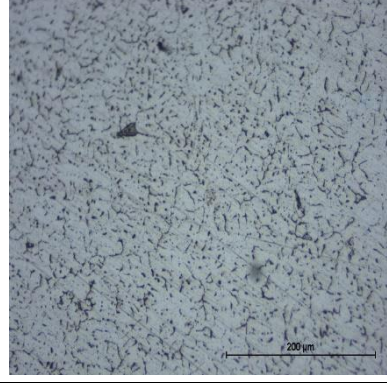
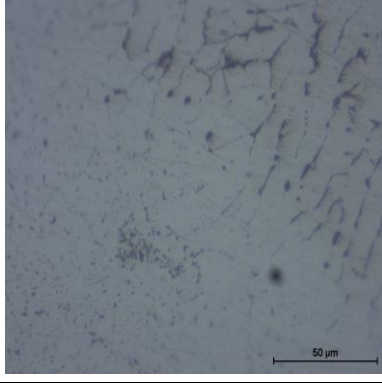
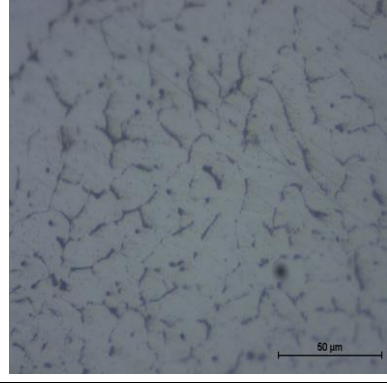
Tablo 8.12: M2 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| M2 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

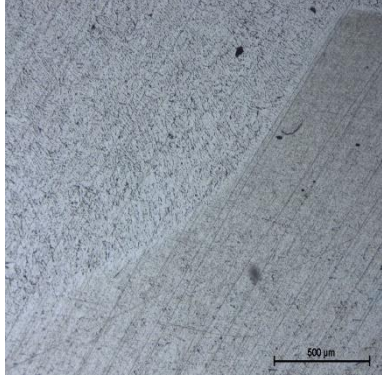
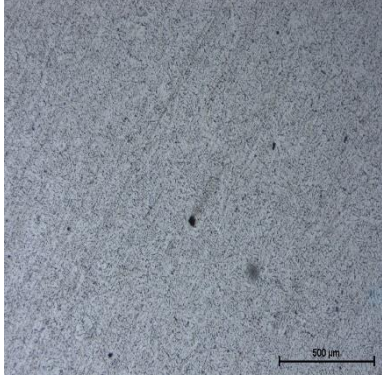
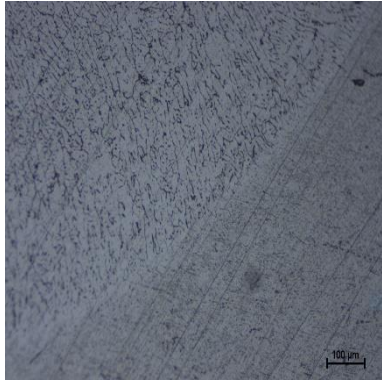
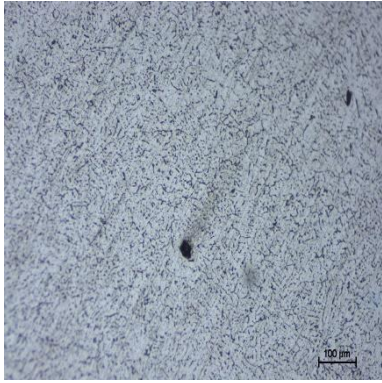
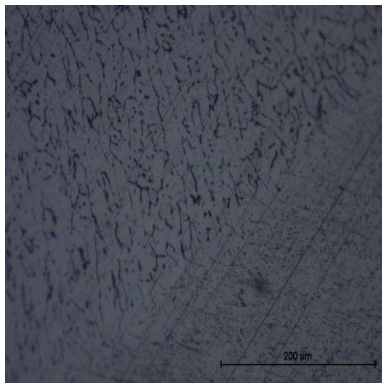
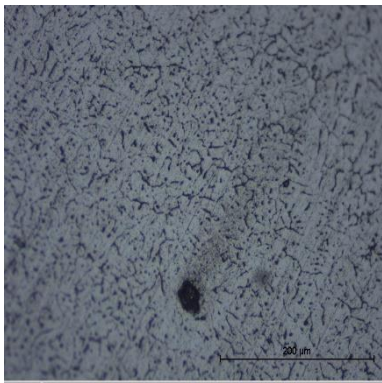
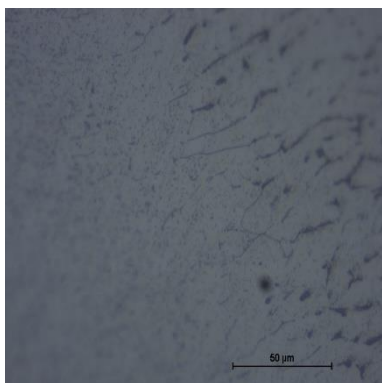
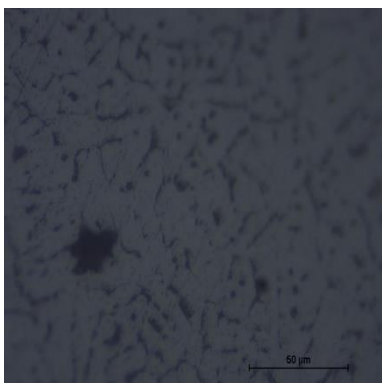
Tablo 8.13: M3 kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| M3 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

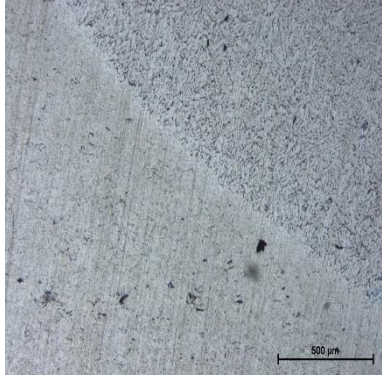
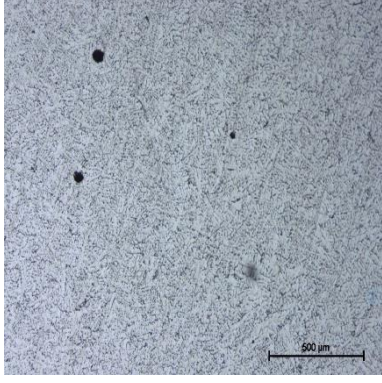
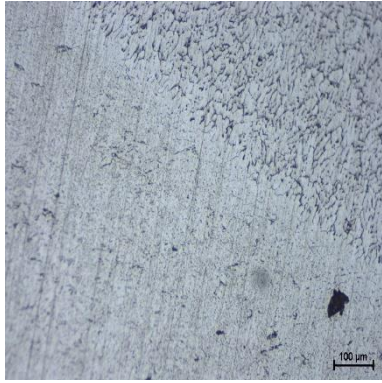
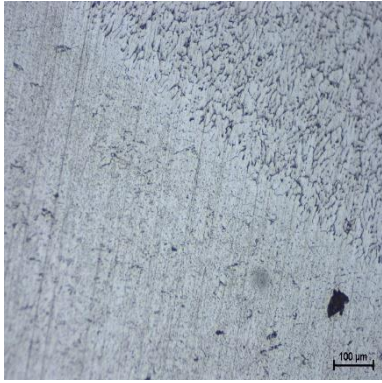
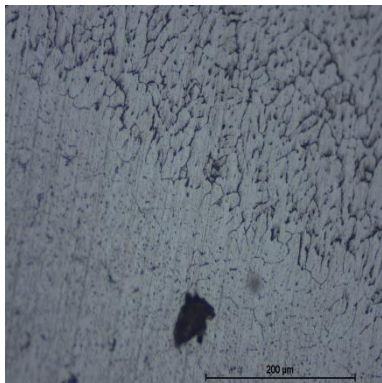
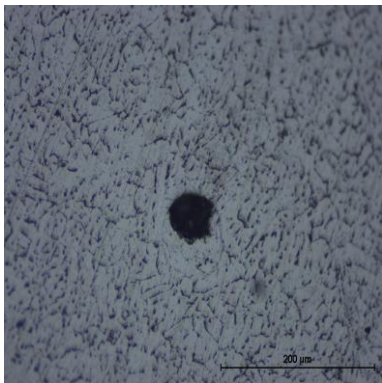
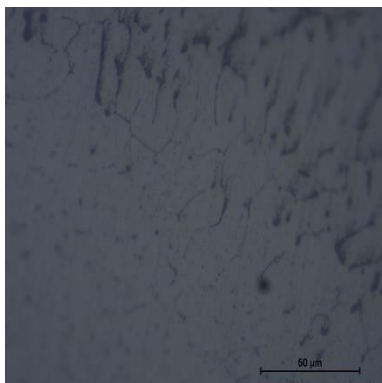
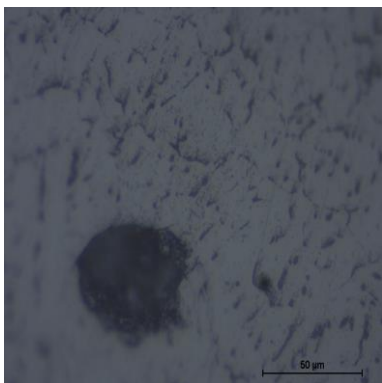
Tablo 8.14: M4 kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| M4 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

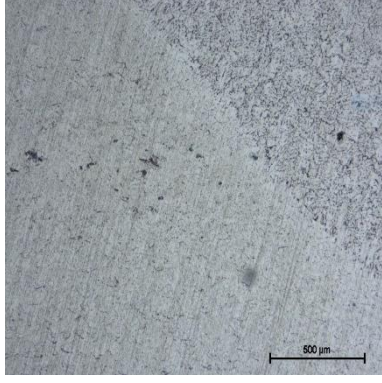
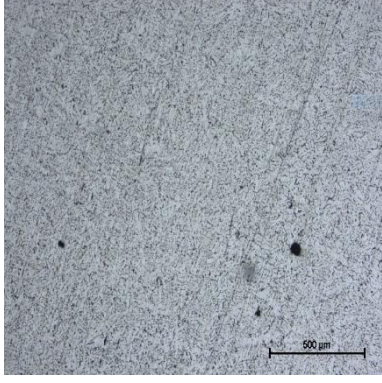
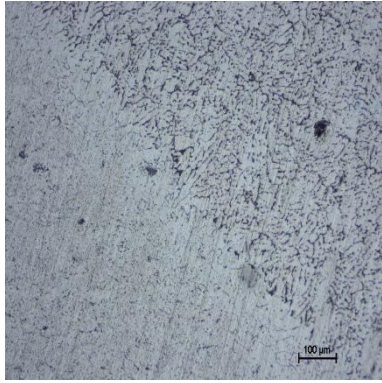
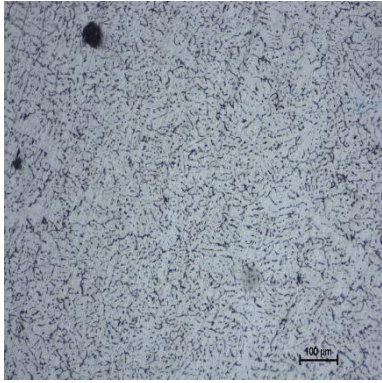
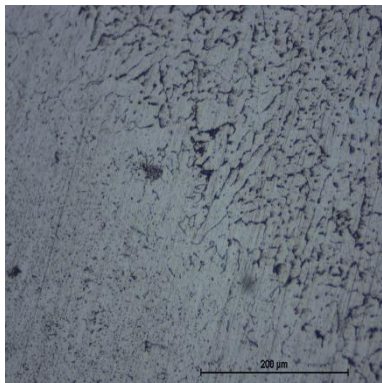
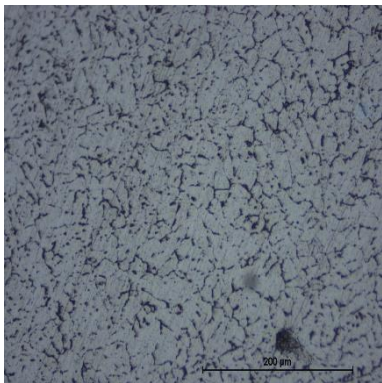
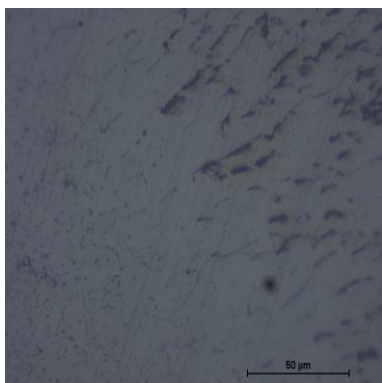
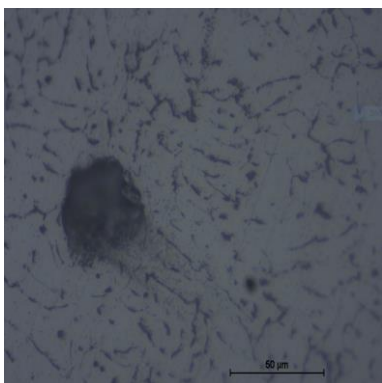
Tablo 8.15: M5 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| M5 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

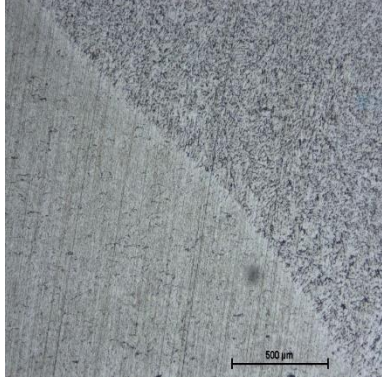
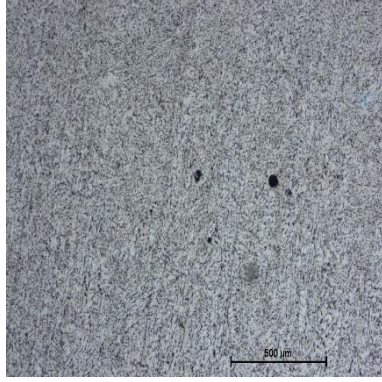
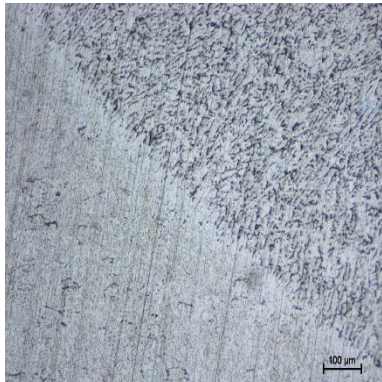
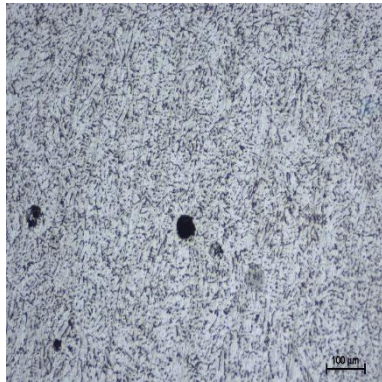
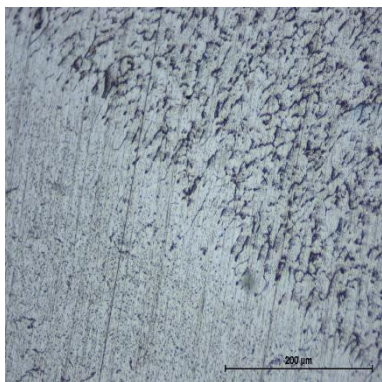
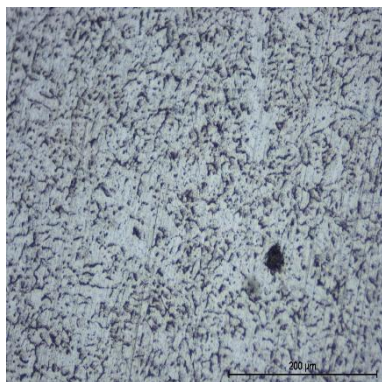
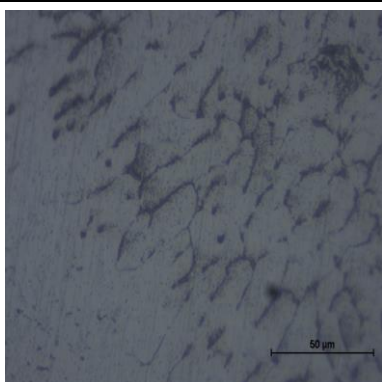
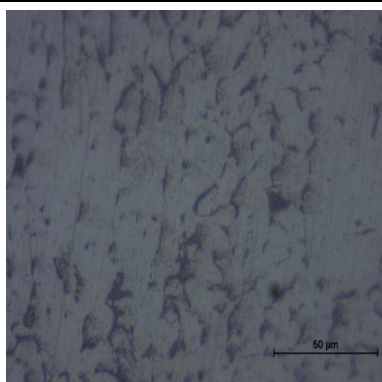
Tablo 8.16: M6 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| M6 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

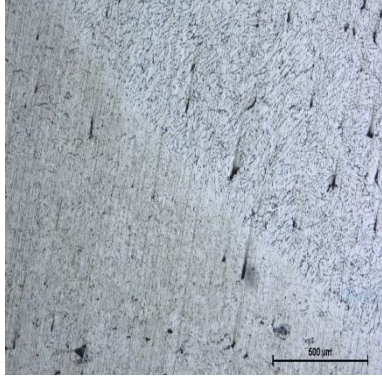
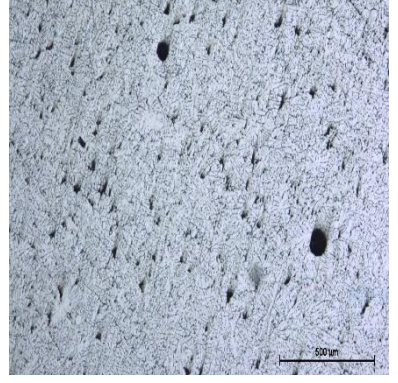
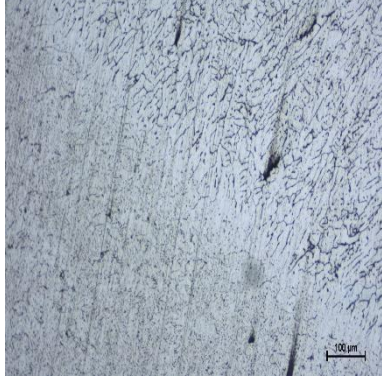
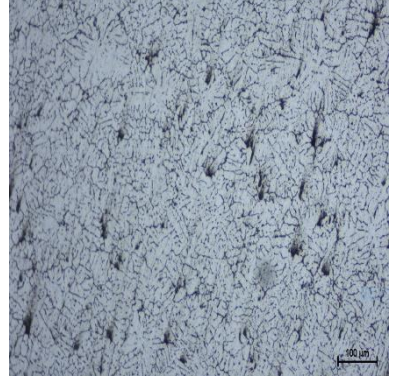
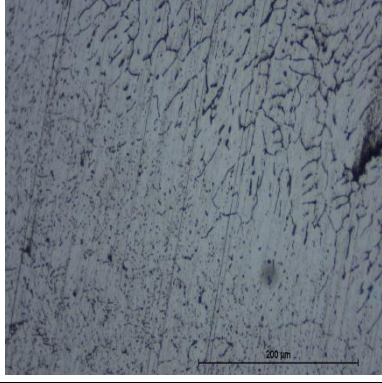
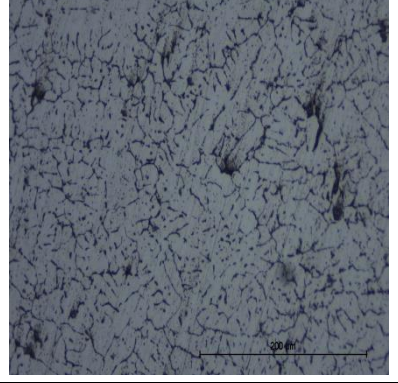
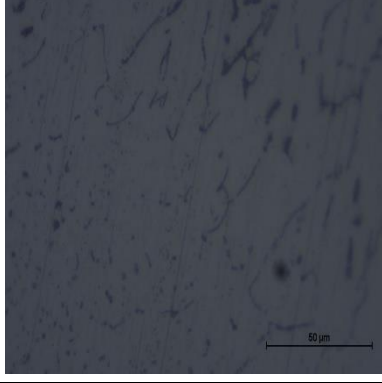
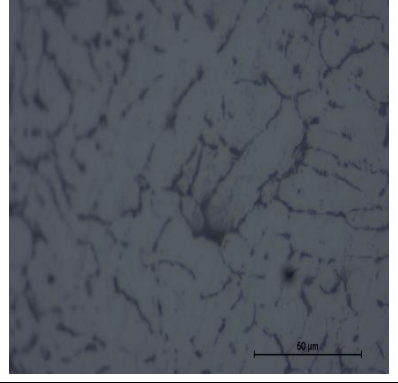
Tablo 8.17: M7 kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| M7 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

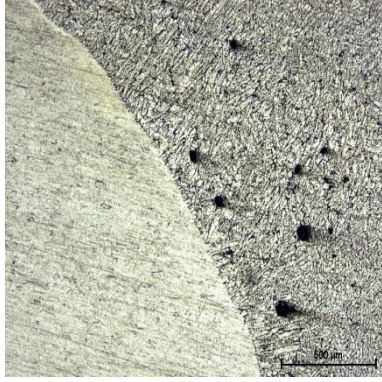
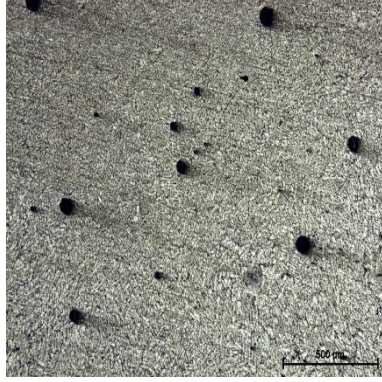
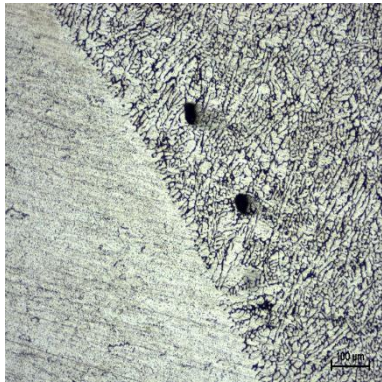
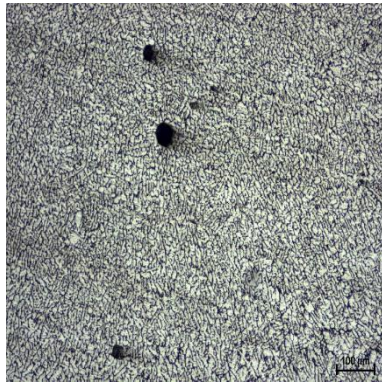
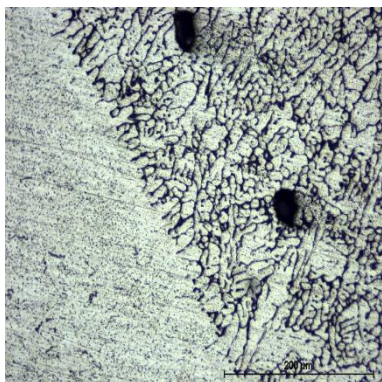

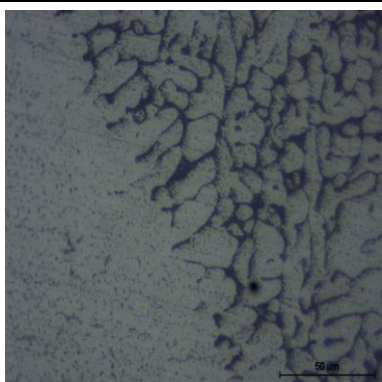
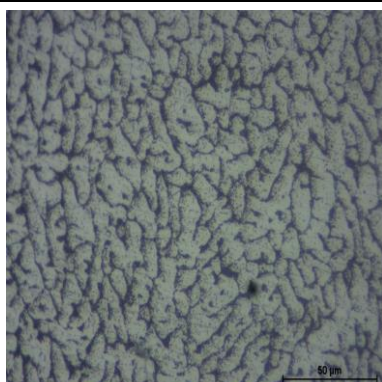
Tablo 8.18: M8 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| M8 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

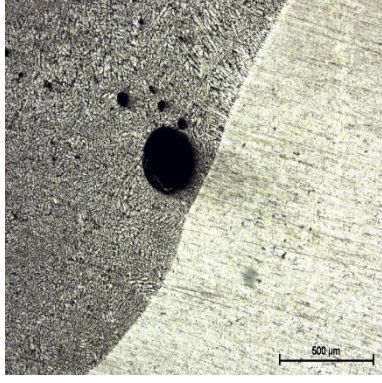
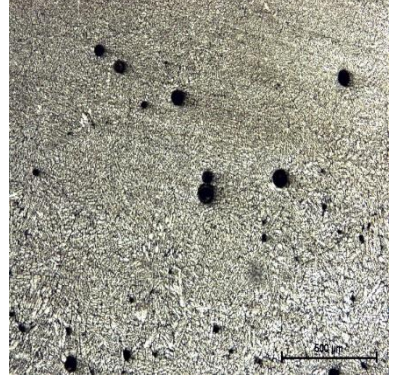
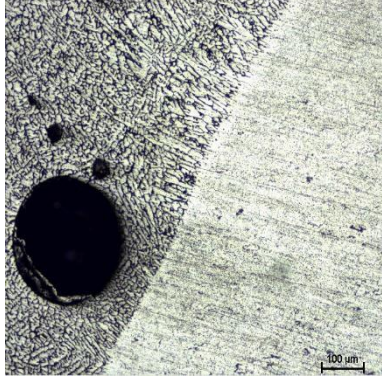
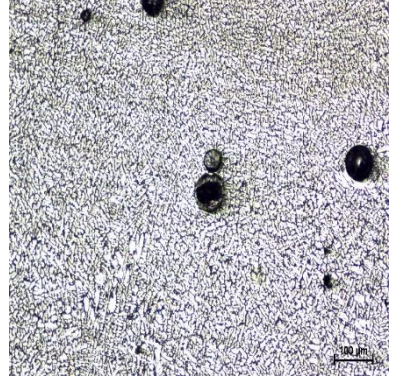
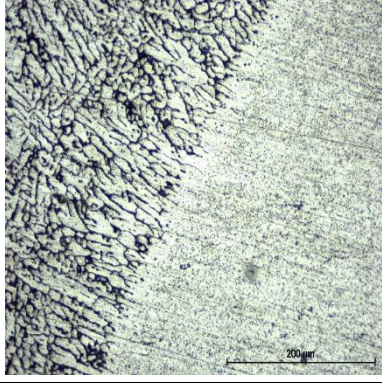
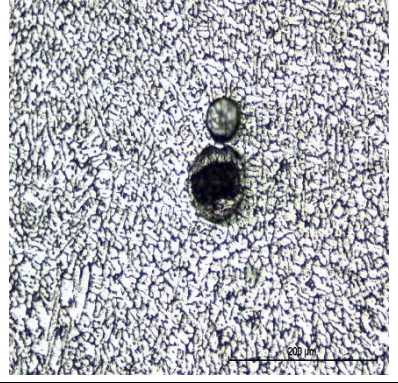
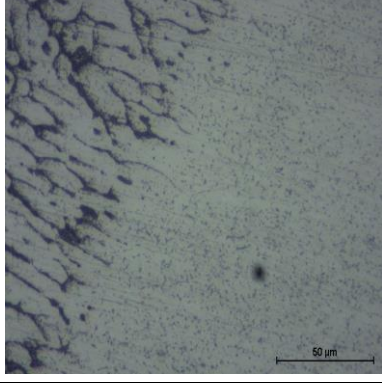
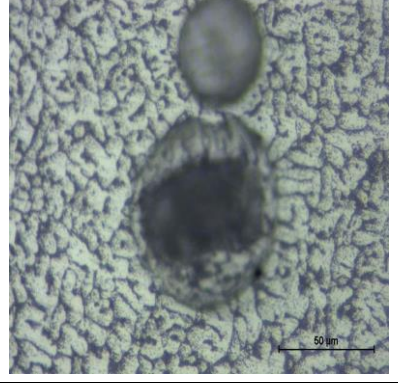
Tablo 8.19: M9 kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| M9 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

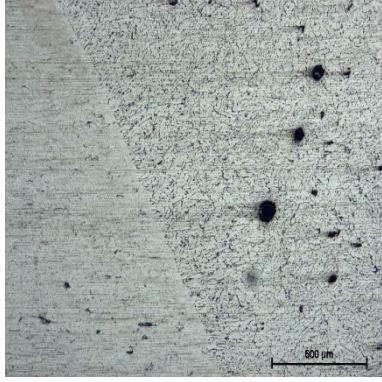
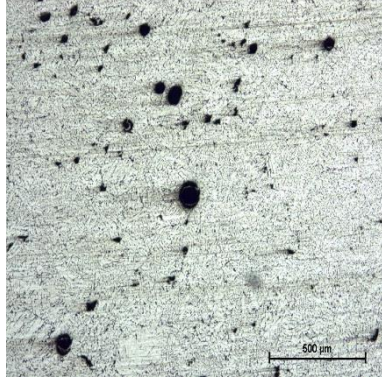
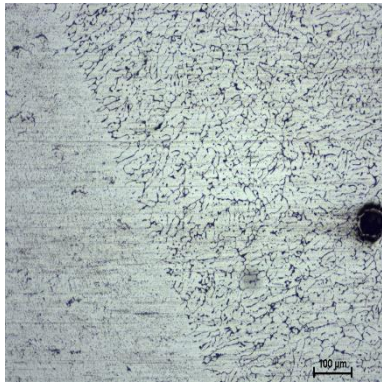
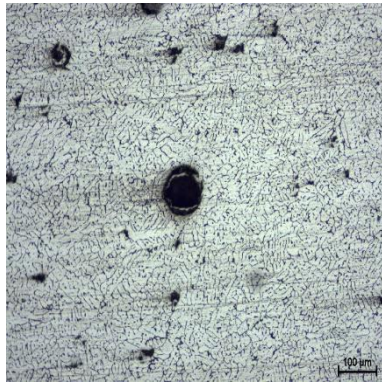
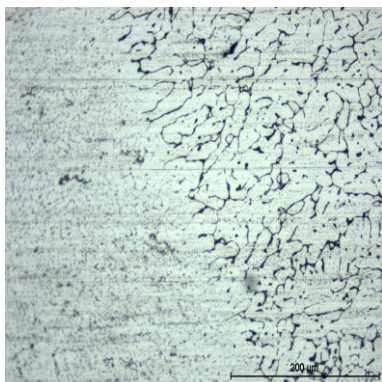
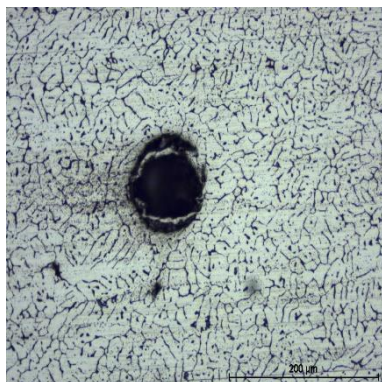
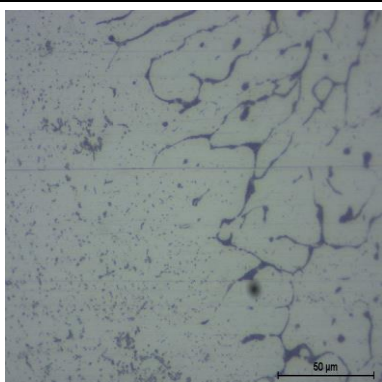
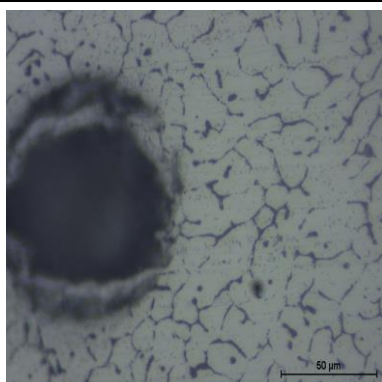
Tablo 8.20: C1 kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| C1 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

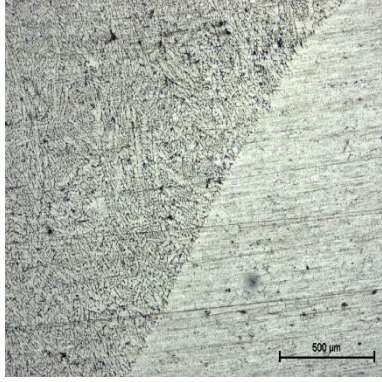
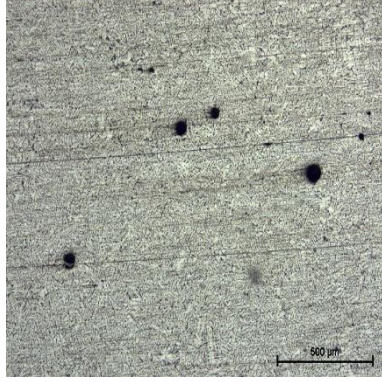
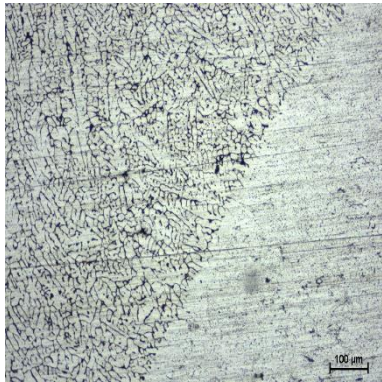
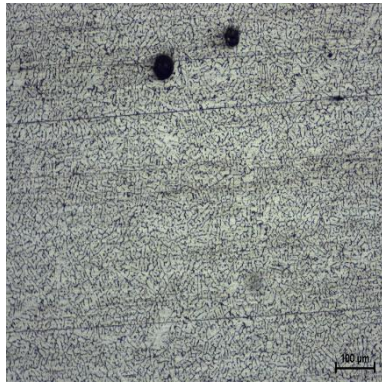
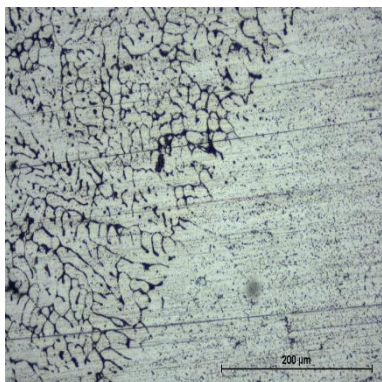
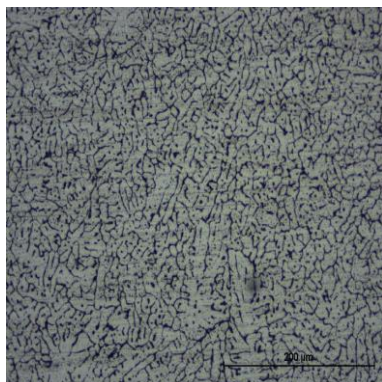
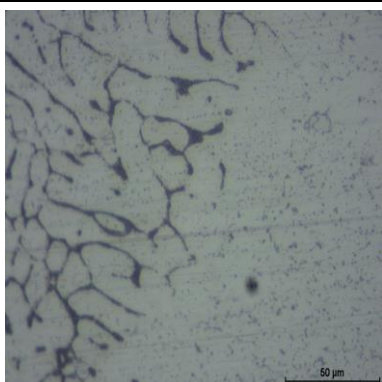
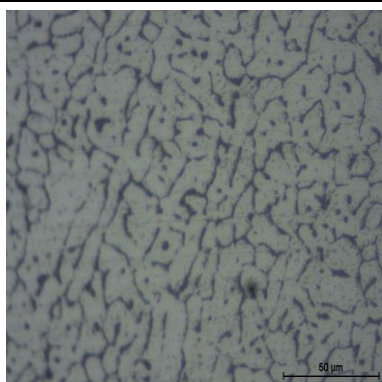
Tablo 8.21: C2 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| C2 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

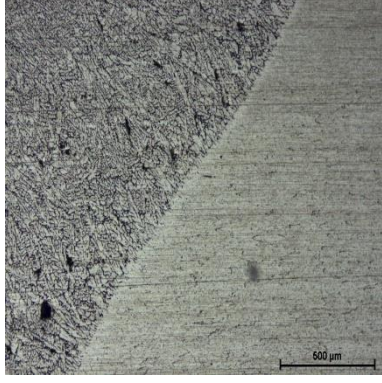
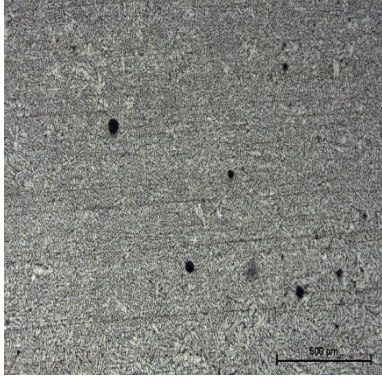
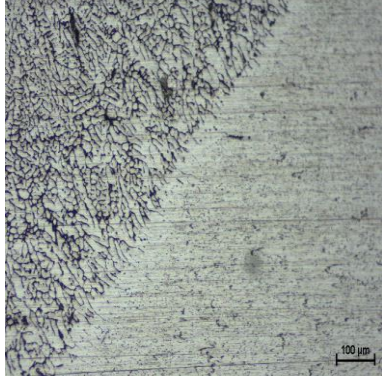
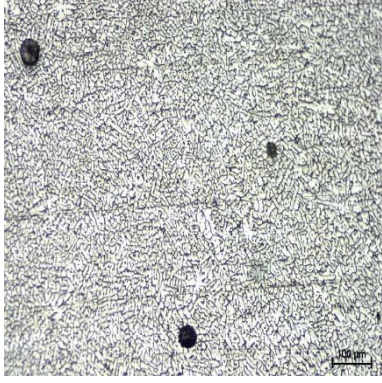
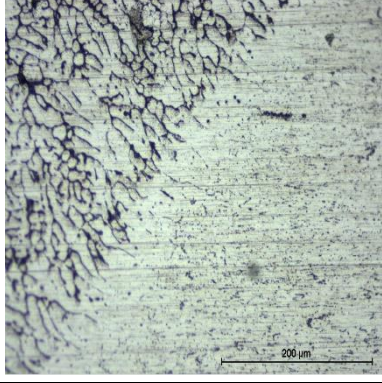
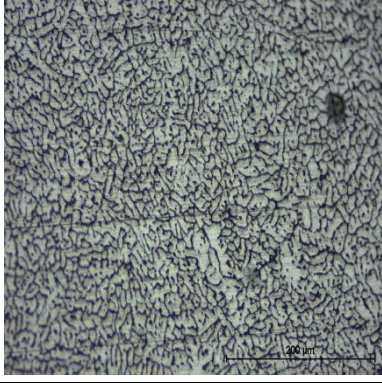
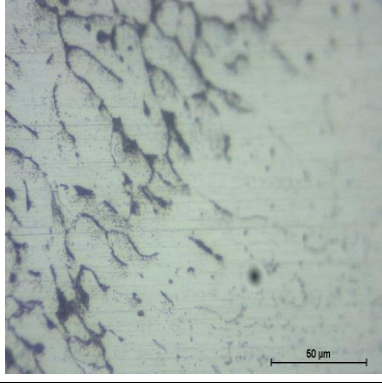
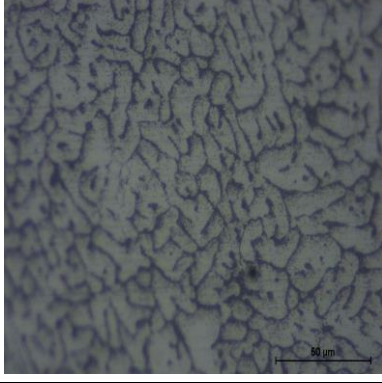
Tablo 8.22: C3 kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| C3 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

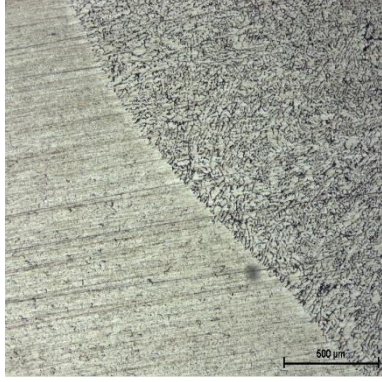
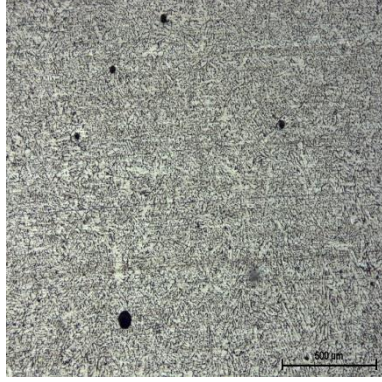

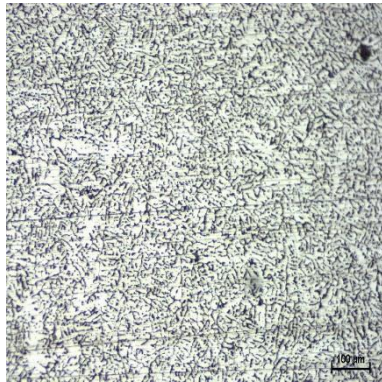
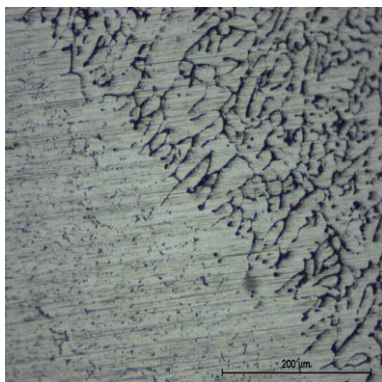

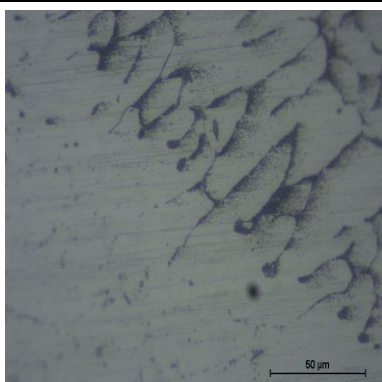
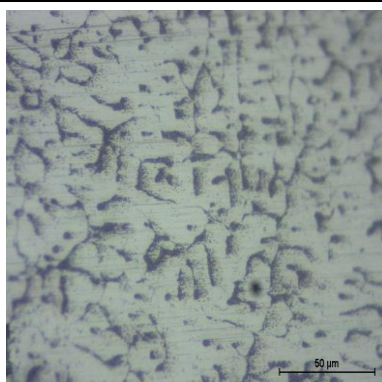
Tablo 8.23: C4 kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| C4 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

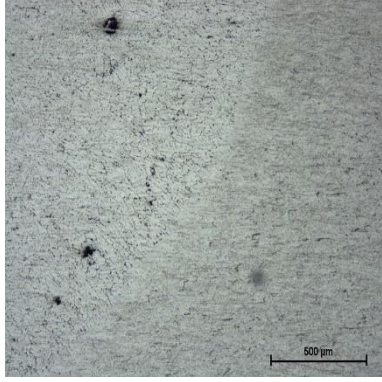
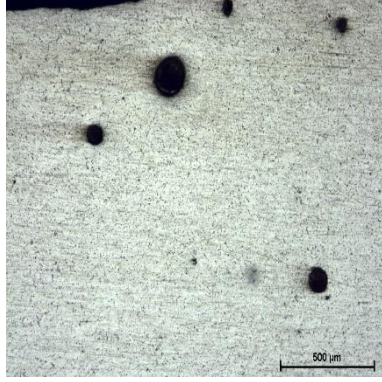
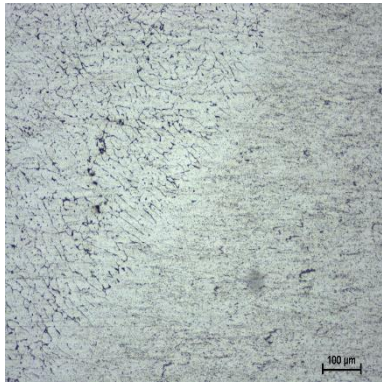
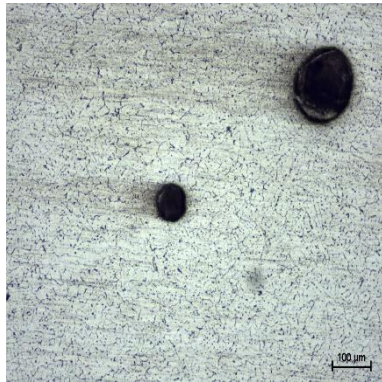
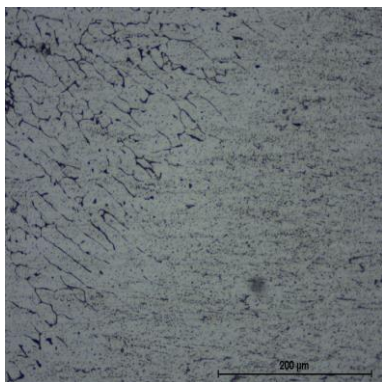
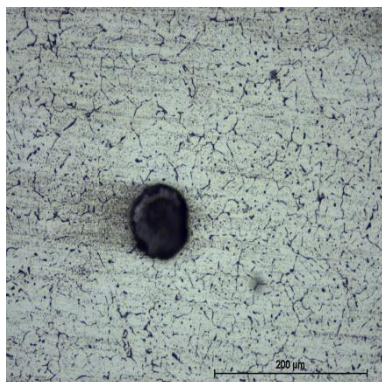
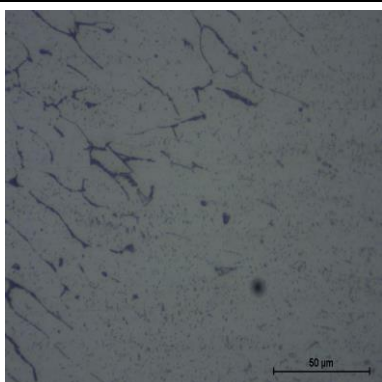
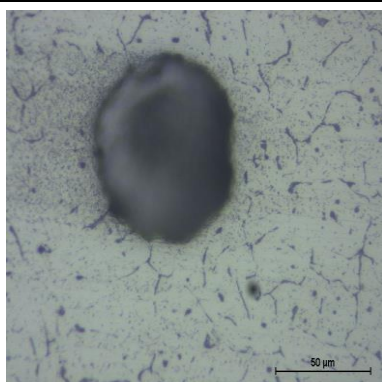
Tablo 8.24: C5 kodlu numunenin farklı büyütmelelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| C5 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

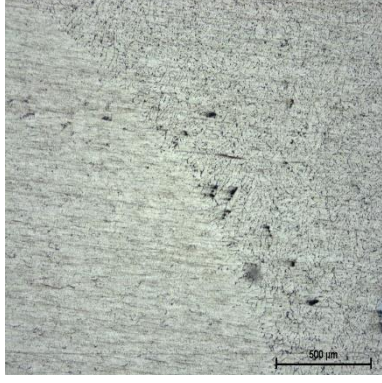
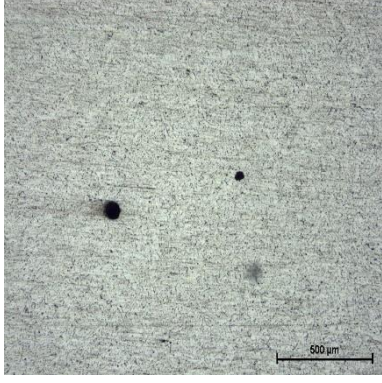
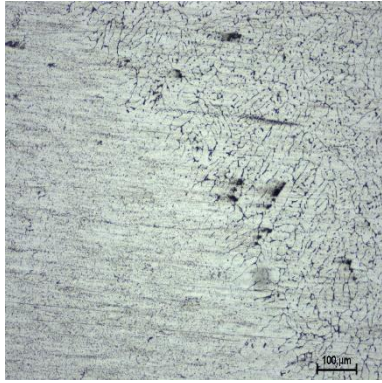
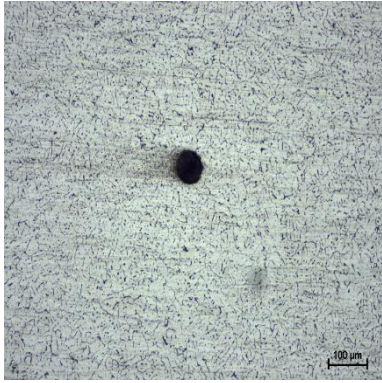
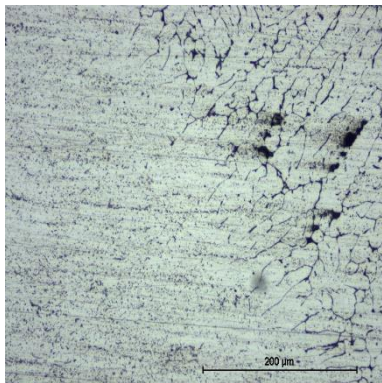
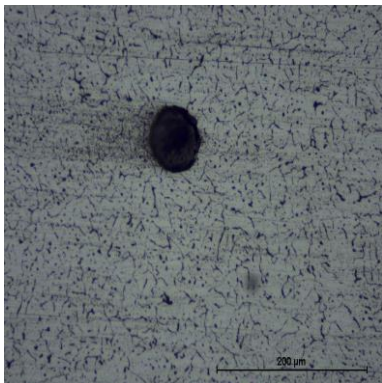
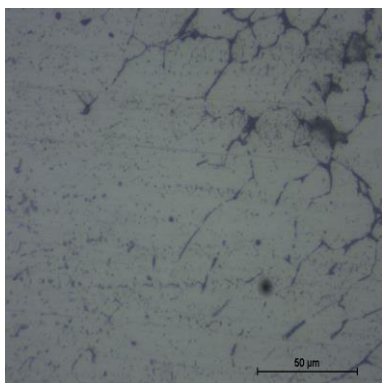
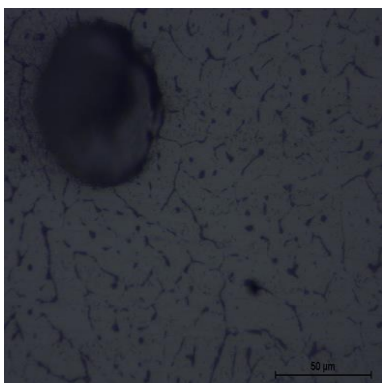
Tablo 8.25: C6 kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| C6 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

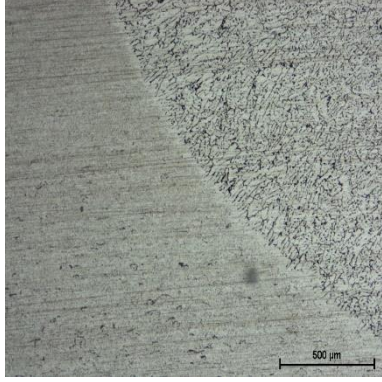
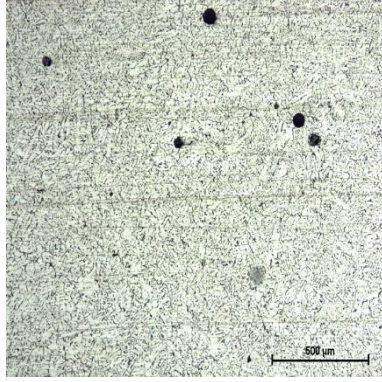
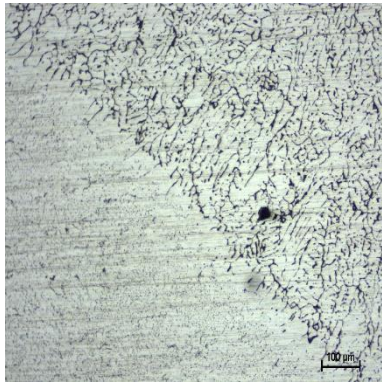
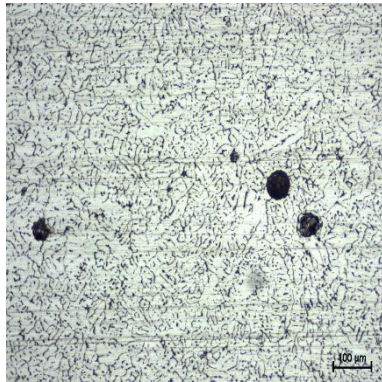
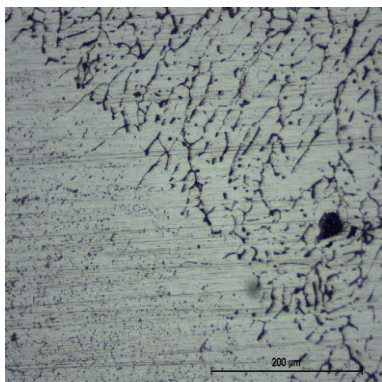
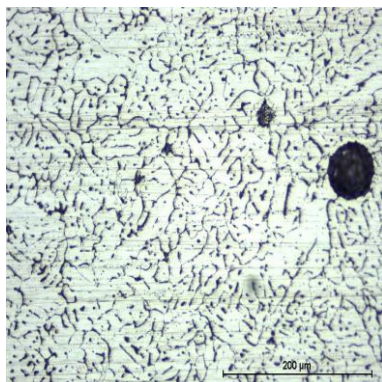
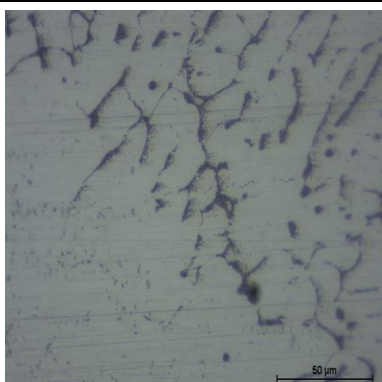

Tablo 8.26: C7 kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| C7 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

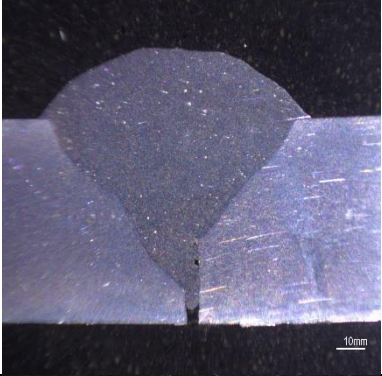
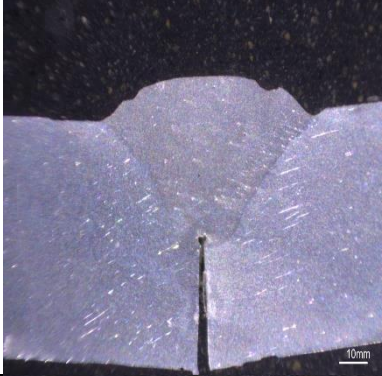
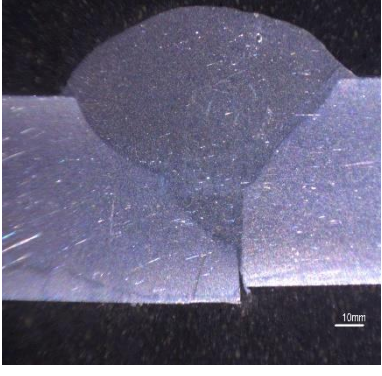
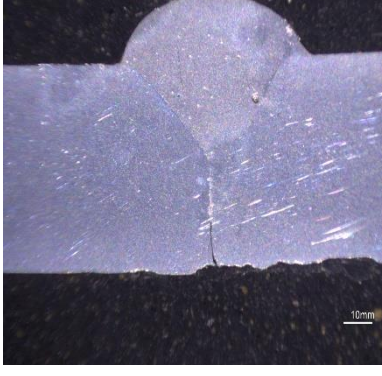
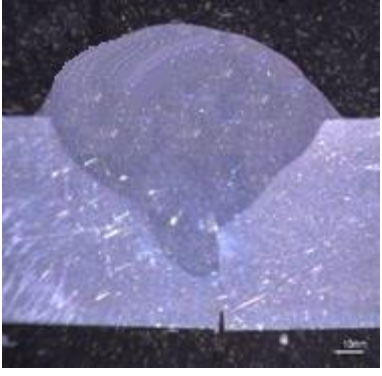
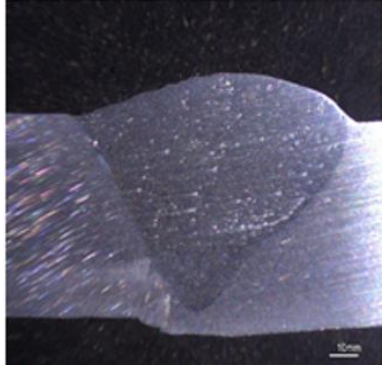
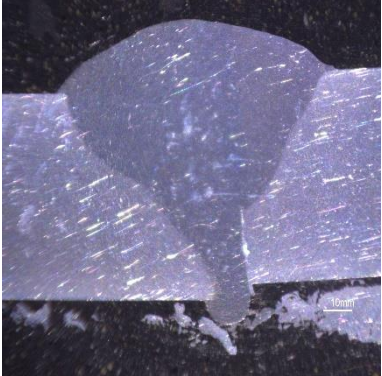
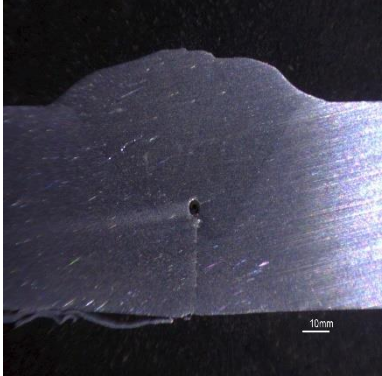
Tablo 8.27: C8 kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri

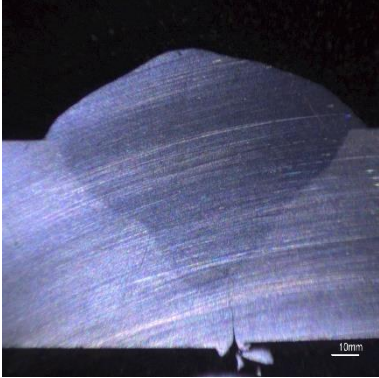
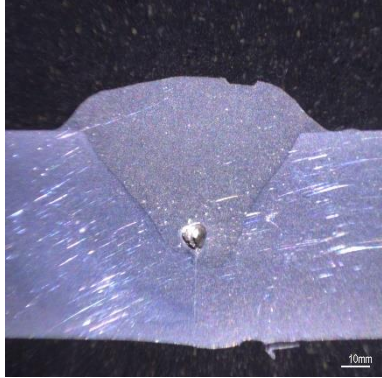
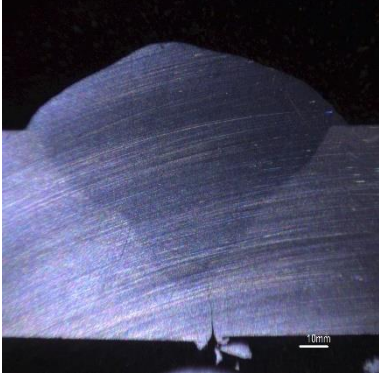
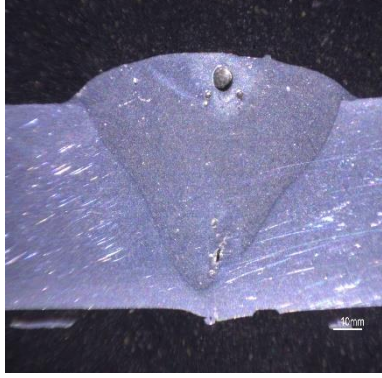
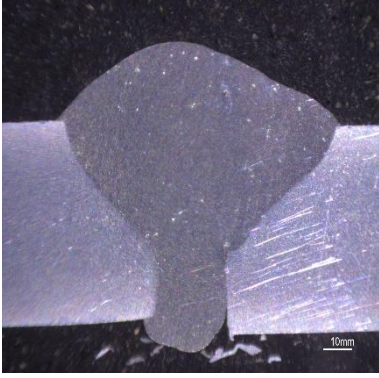
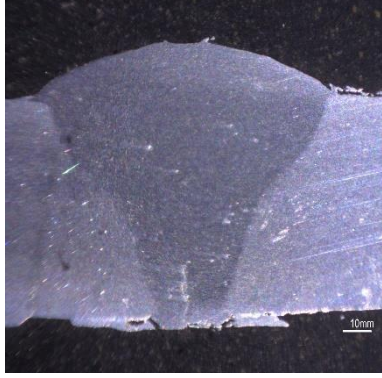
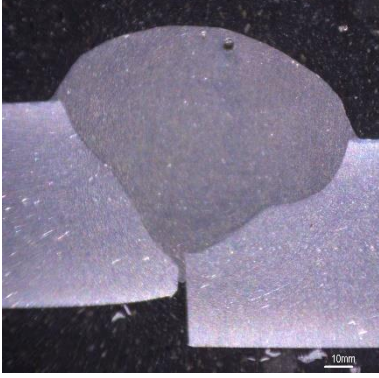
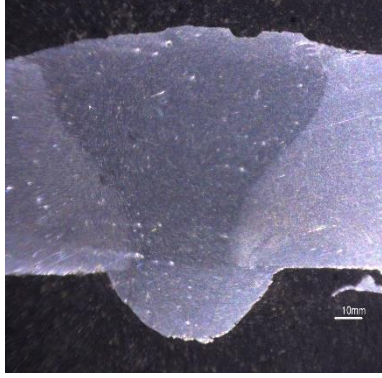
| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| C8 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

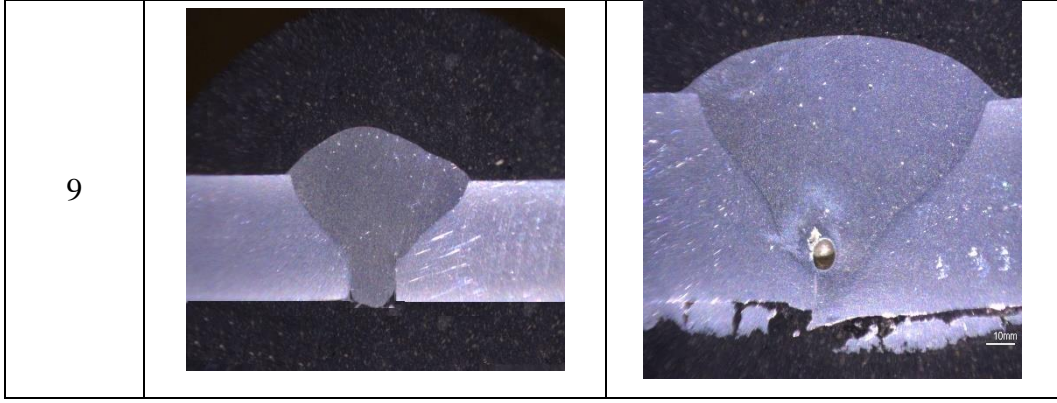
Tablo 8.28: C9 kodlu numunenin farklı büyütmelerdeki mikroyapı görüntüleri

| Numune No | Büyütme | Geçiş Bölgesi | Kaynak Bölgesi |
|-----------|---------|---|---|
| C9 | 50X |  |  |
| | 100X |  |  |
| | 200X |  |  |
| | 500X |  |  |

Tablo 8.29: MIG ve CMT kaynak yöntemleri ile birleştirilen numunelerin 1x büyütmedeki makro görüntüleri

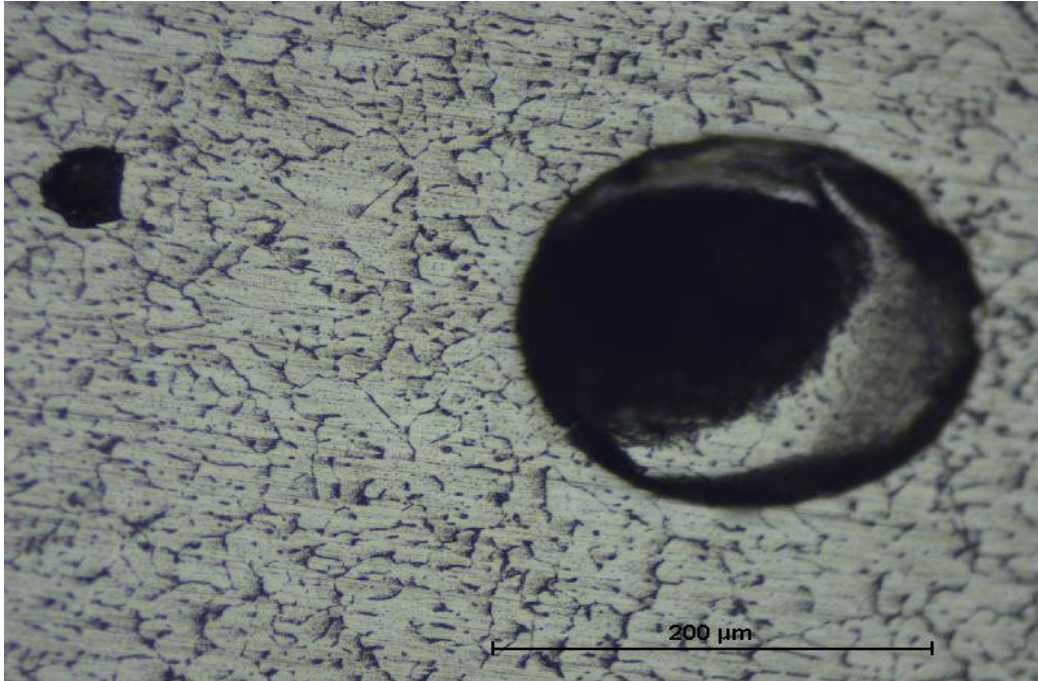
| Numune No | MIG | CMT |
|-----------|---|--|
| 1 |  Macro view of MIG weld joint for sample 1. The weld is a semi-circular shape with a central vertical groove. The metal surface is dark with some light-colored scratches. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner. |  Macro view of CMT weld joint for sample 1. The weld is a semi-circular shape with a central vertical groove. The metal surface is dark with some light-colored scratches. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner. |
| 2 |  Macro view of MIG weld joint for sample 2. The weld is a semi-circular shape with a central vertical groove. The metal surface is dark with some light-colored scratches. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner. |  Macro view of CMT weld joint for sample 2. The weld is a semi-circular shape with a central vertical groove. The metal surface is dark with some light-colored scratches. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner. |
| 3 |  Macro view of MIG weld joint for sample 3. The weld is a semi-circular shape with a central vertical groove. The metal surface is dark with some light-colored scratches. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner. |  Macro view of CMT weld joint for sample 3. The weld is a semi-circular shape with a central vertical groove. The metal surface is dark with some light-colored scratches. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner. |
| 4 |  Macro view of MIG weld joint for sample 4. The weld is a semi-circular shape with a central vertical groove. The metal surface is dark with some light-colored scratches. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner. |  Macro view of CMT weld joint for sample 4. The weld is a semi-circular shape with a central vertical groove. The metal surface is dark with some light-colored scratches. A 10mm scale bar is visible in the bottom right corner. |

| | | |
|---|---|--|
| 5 |  |  |
| 6 |  |  |
| 7 |  |  |
| 8 |  |  |



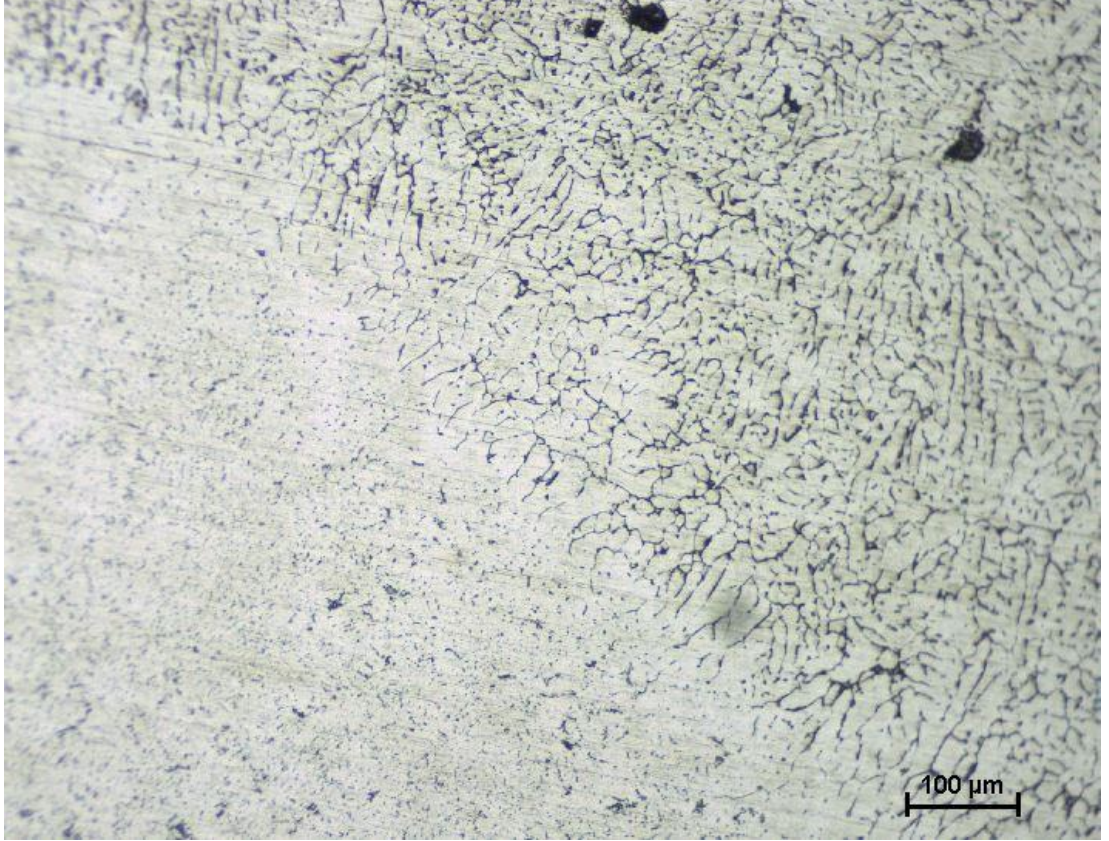
8.3 SEM Çalışmaları ve EDS Analizleri

Şekil 8.45’de MIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiş M9 kodlu numunenin kaynak ergime bölgesi gösterilmektedir. Buna göre kaynak bölgesi genel olarak dentritik/ yarı dentritik bir yapı oluşturmuştur. Bu da kısmen hızlı soğumanın bir göstergesidir. Tane kenarlarında siyah olarak çeşitli ikincil fazlar meydana gelmiştir. Bu fazlar kaynak elektrot metalinde bulunan Si ve kaynak malzemesinde bulunan Mg’dır. Mg₂Si tane sınırlarında ikincil faz olarak yerleşebilmektedir. Si ise tek başına çökeltme de yapabilmektedir. Bu durumda Si materyal içerisinde adacıklar şeklinde bulunmaktadır.

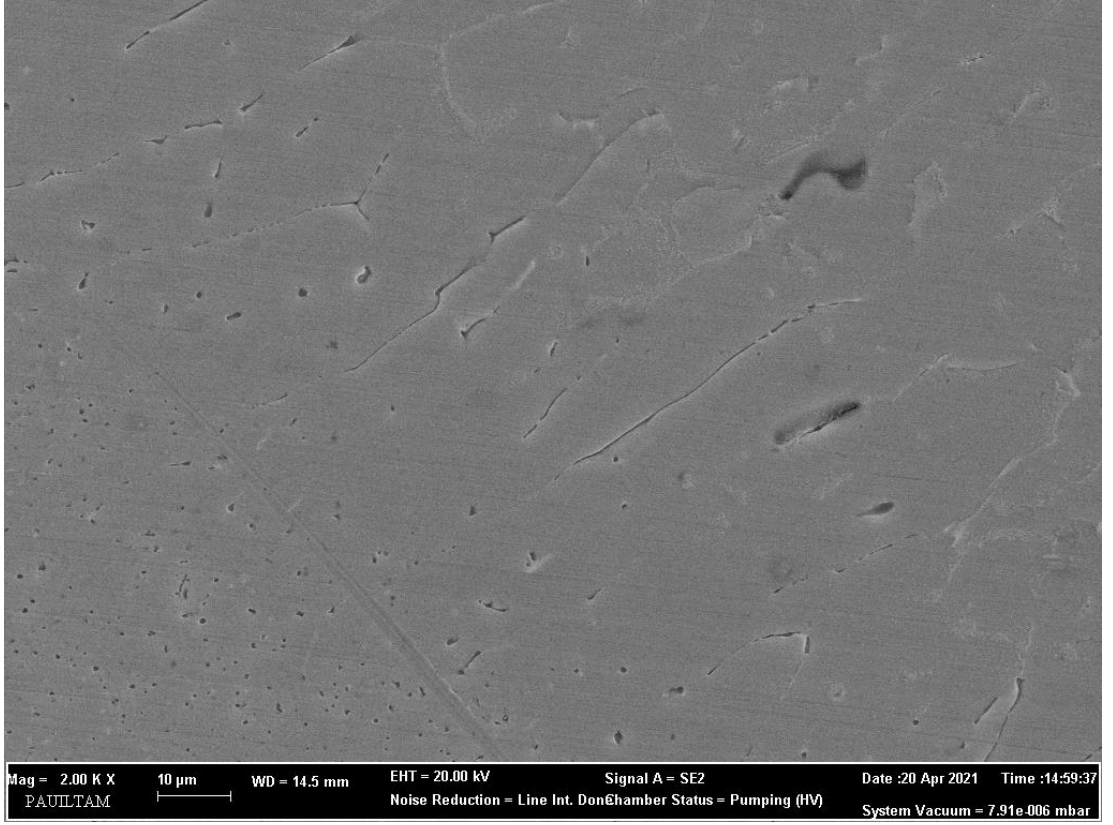


Şekil 8.45: Çekirdek (Kaynak Bölgesi)

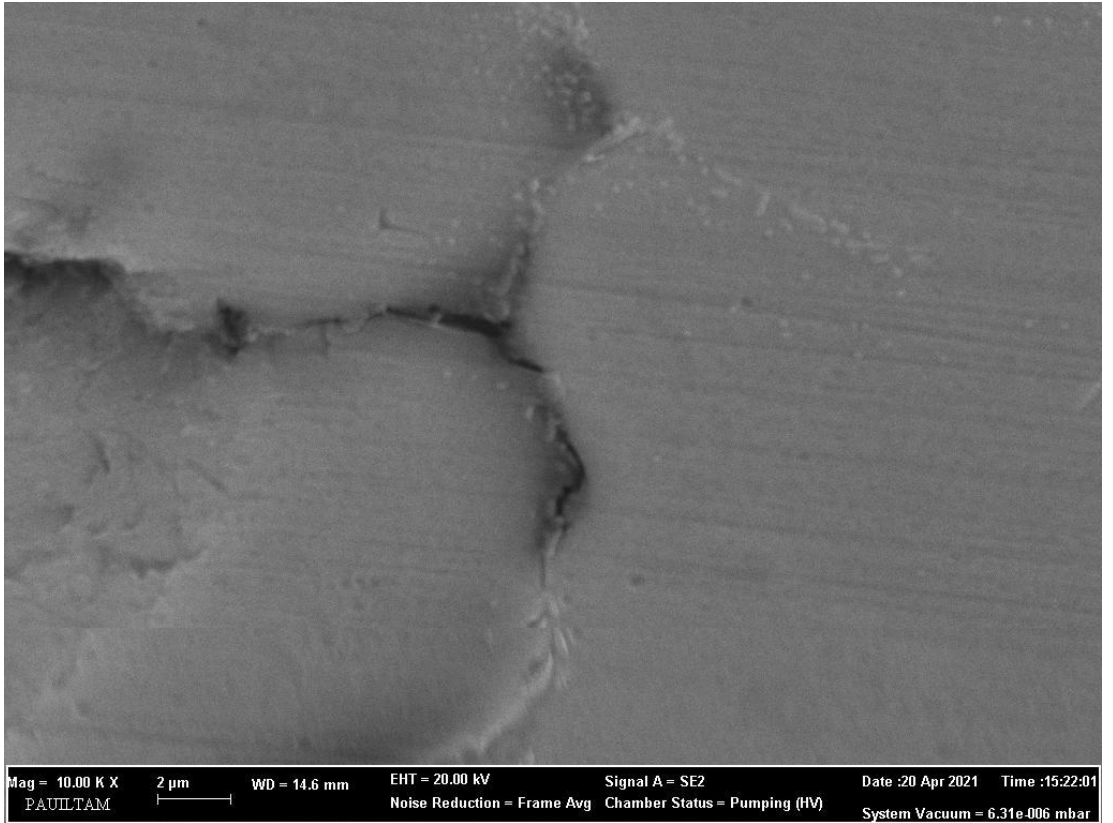
MIG kaynak yöntemi ile birleştirilen ITAB ve ergime bölgesi Şekil 8.46'da gösterilmektedir. Buna göre, tane kenarlarında bulunan çökelmelerin ergiyen bölgede olduğu gözlemlenmektedir. Çökelmelerin ergimiş bölgede bulunmalarının ana sebebi, çökelme esas elementi olan Si'nin elektroda ancak ve ancak ergime yoluyla difüze olmasıdır. Yüksek sıcaklıklarda difüzyonun hızlı olması ITAB bölgesine işleyememesinin ana sebebidir.



Şekil 8.46: Geçiş

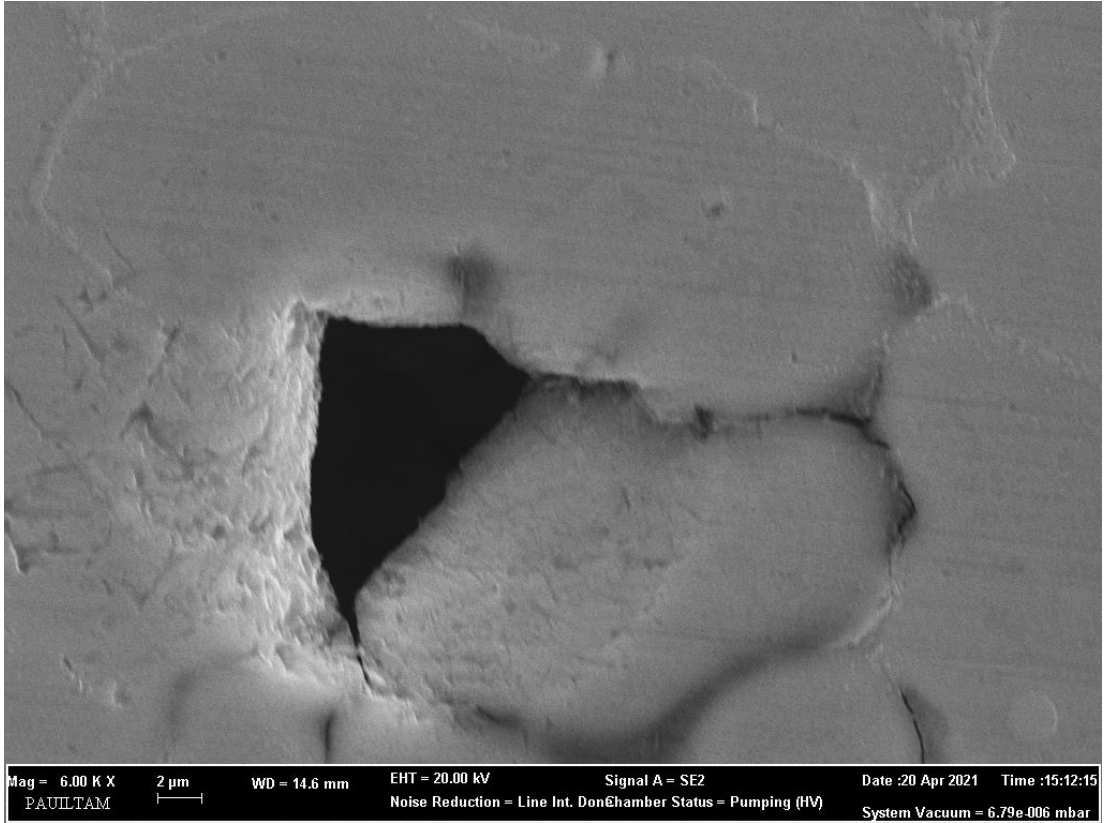


Şekil 8.47: M9 numaralı numunenin 2000 x büyütmedeki geçiş bölgesi görüntüsü

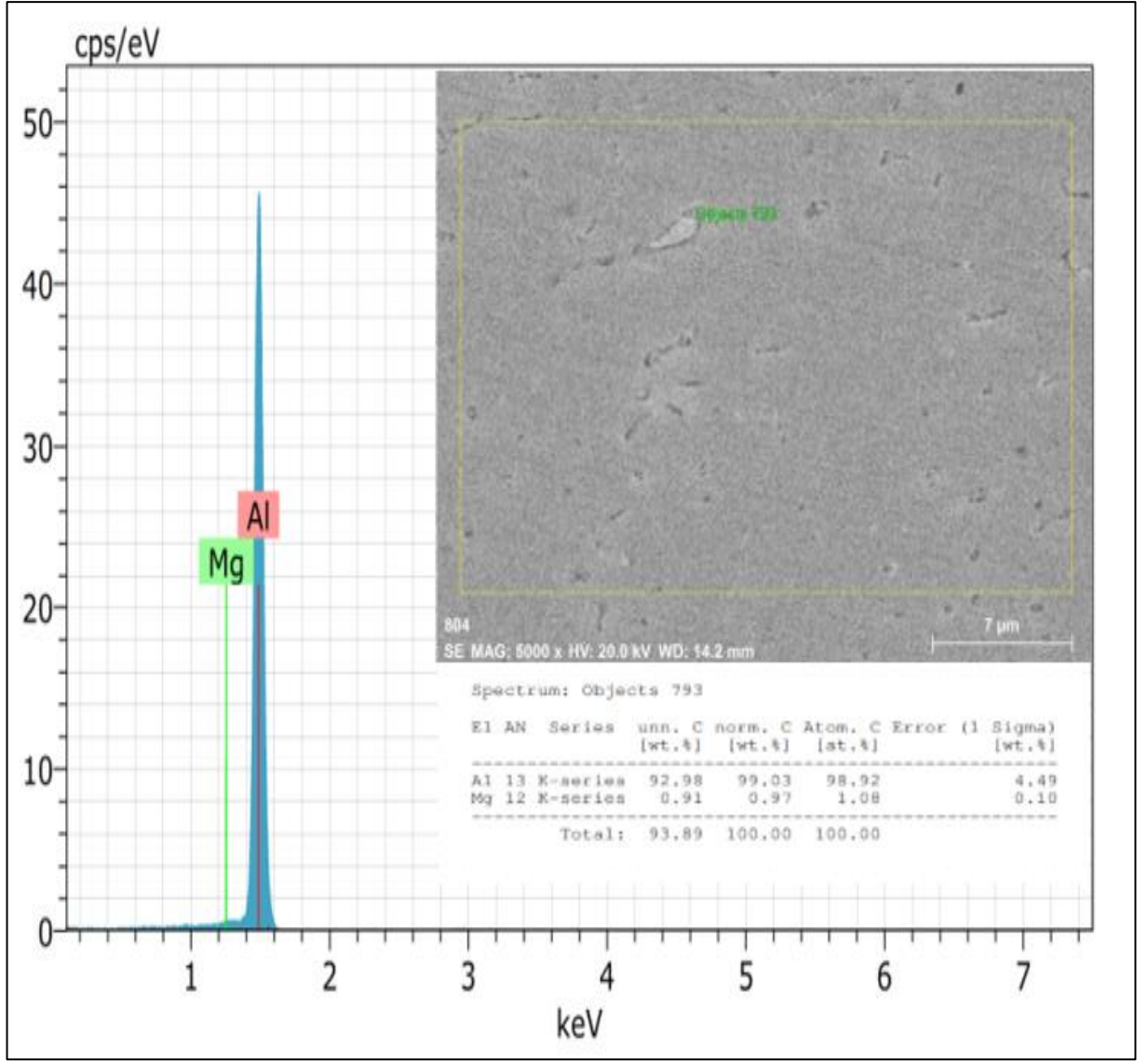


Şekil 8.48: M9 numaralı numunenin 10000 x büyütmedeki görüntüsü

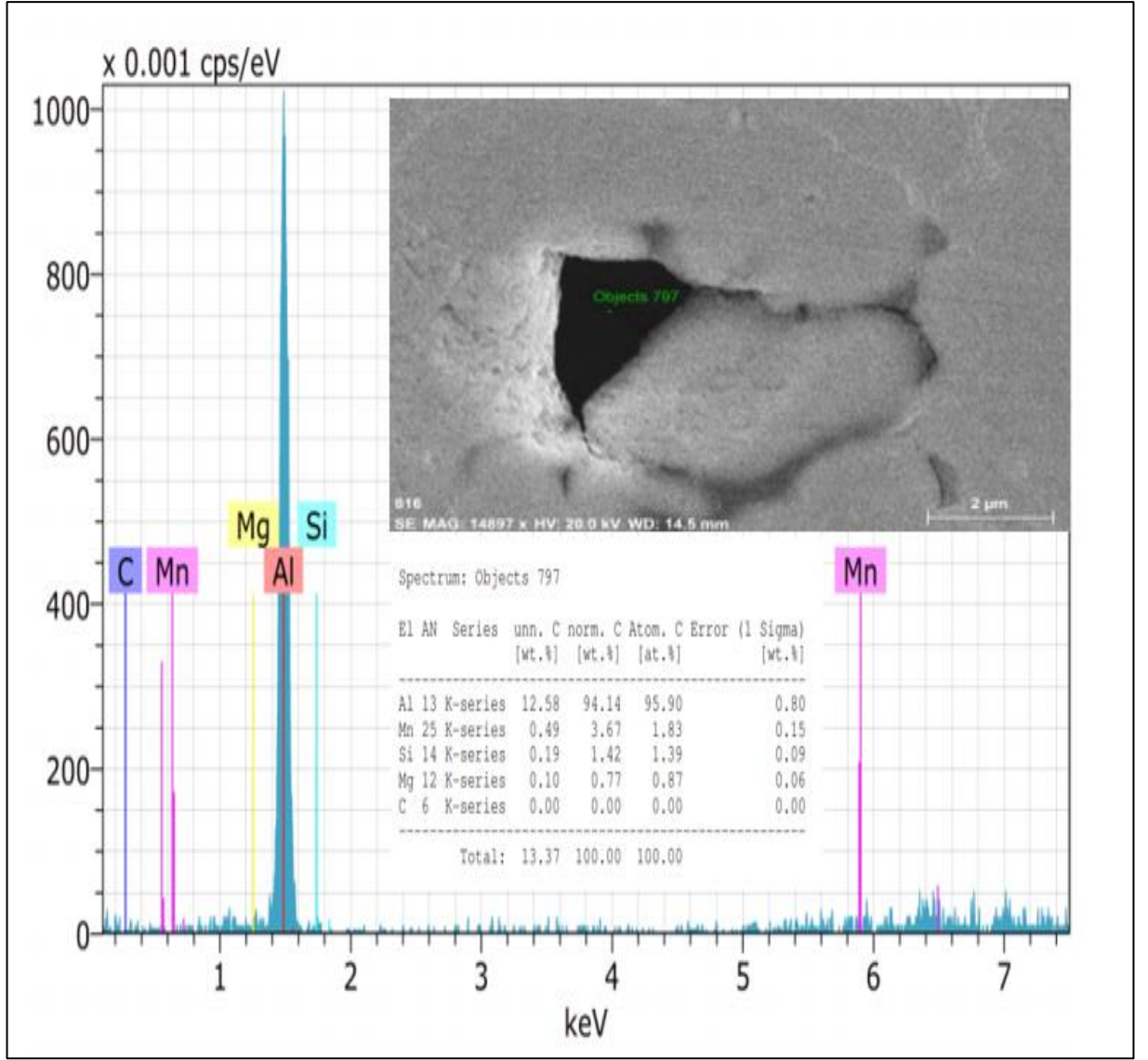
Şekil 8.48’de ITAB-Kaynak bölgesinden alınan SEM görüntüsü ve detay görüntüsü görülmektedir. Buna göre, taneler arası çökelmeler ve boşluklar, ergime sınırında sona ermektedir. ITAB bölgesine girildiğinde ise taneler içerisinde çeşitli gözenek şeklinde çökelmelerin oluştuğu görülmektedir. ITAB’ ın maruz kaldığı ısı, atomların difüzyonuna belirli miktarda izin verir. Ayrıca, yapı içerisindeki elementler de bunu hızlandırarak çeşitli çökelmeler oluşturmuştur.



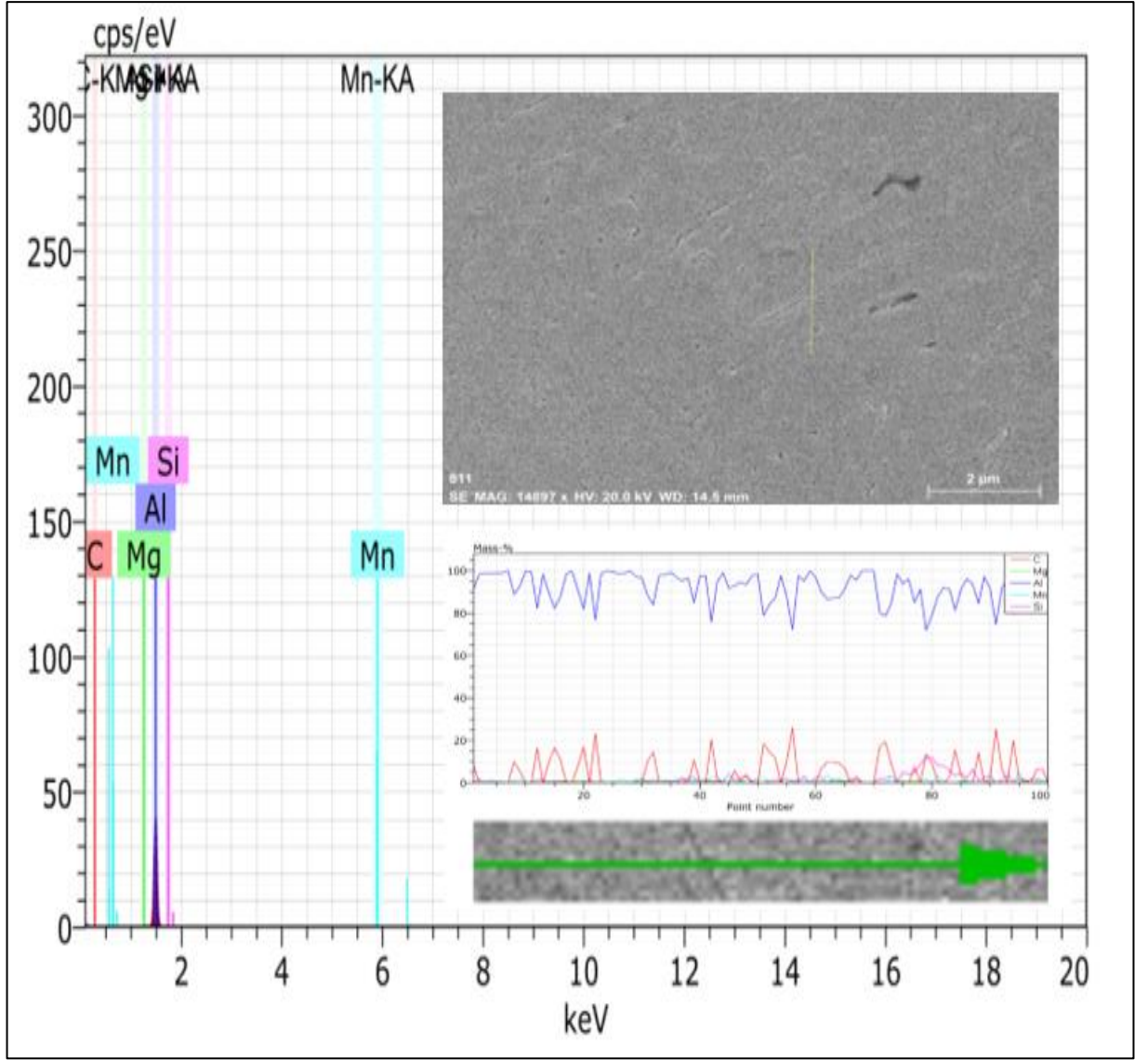
Şekil 8.49: M9 numaralı numunenin 6000 x büyütmedeki görüntüsü



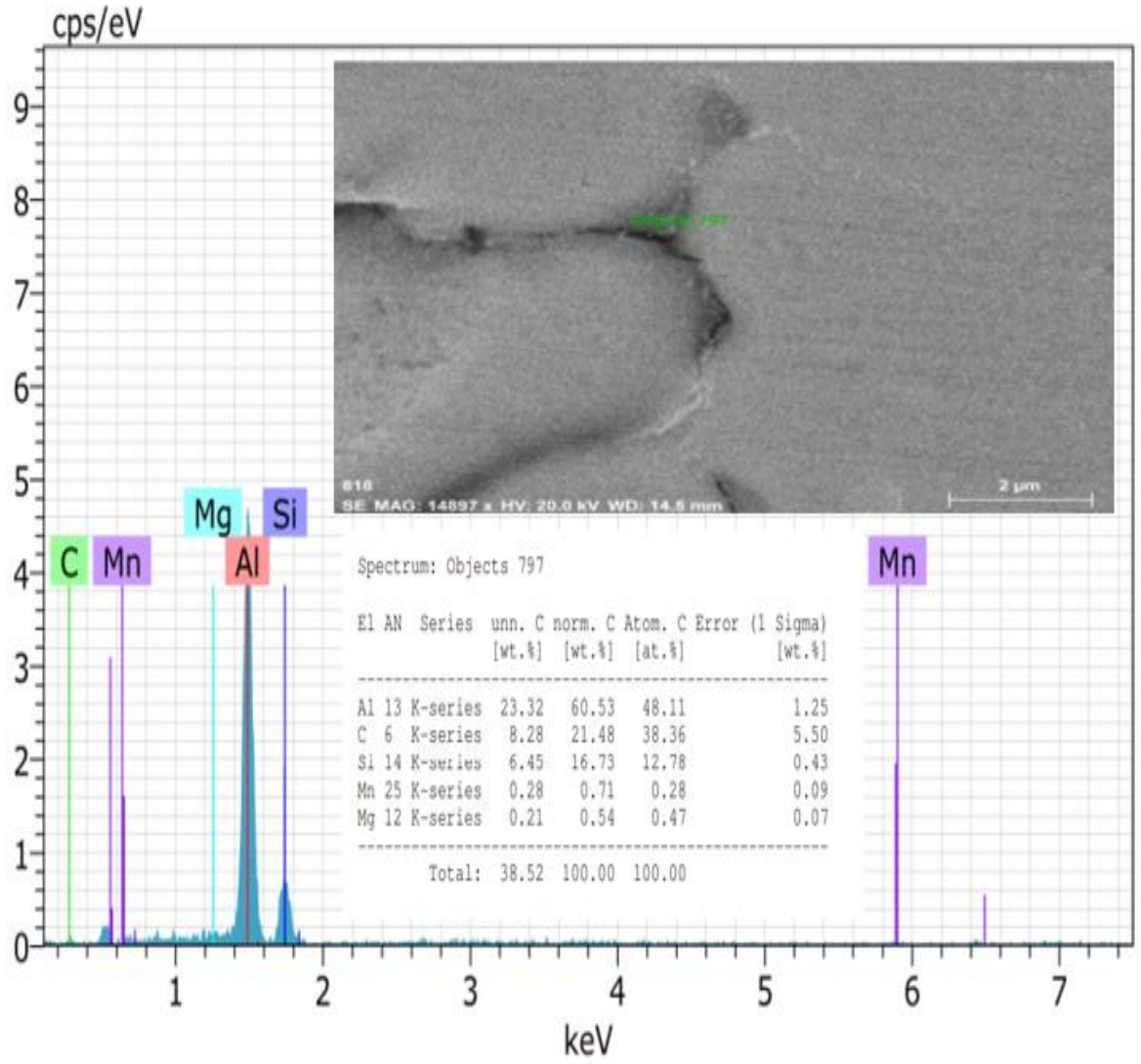
Şekil 8.50: M9 kodlu numunenin ana metal kısmı EDS analizi



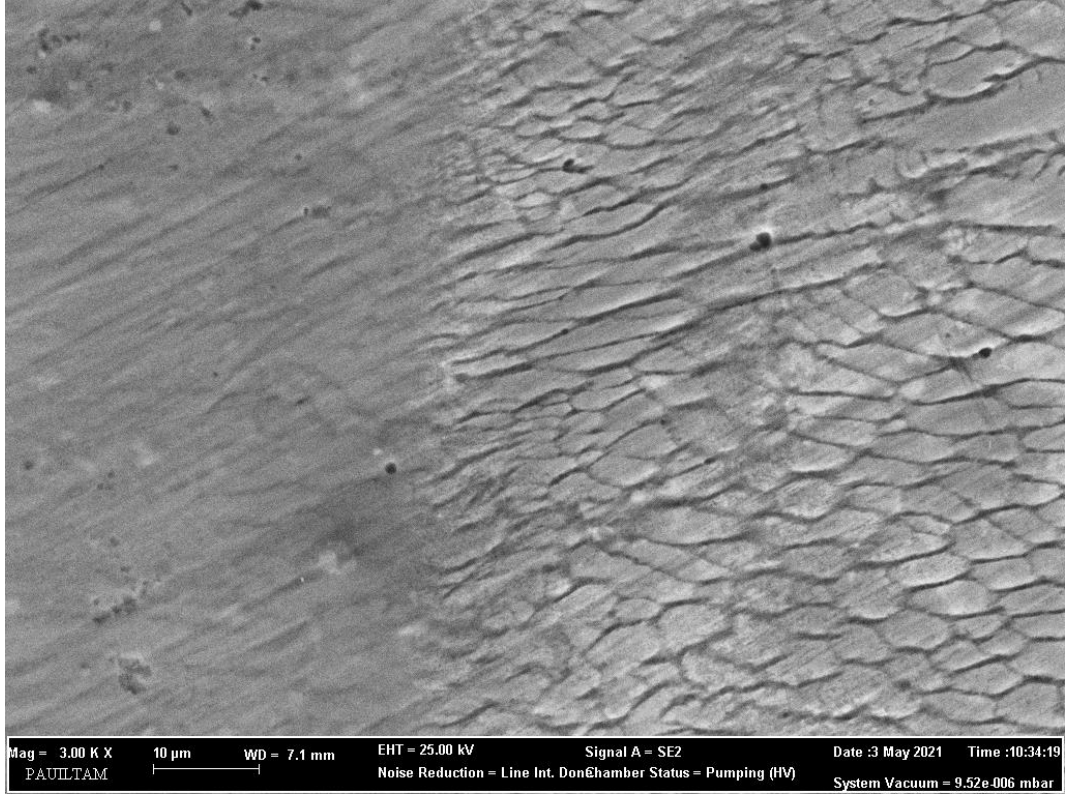
Şekil 8.51: M9 kodlu numunenin boşluk kısmı 1 EDS analizi



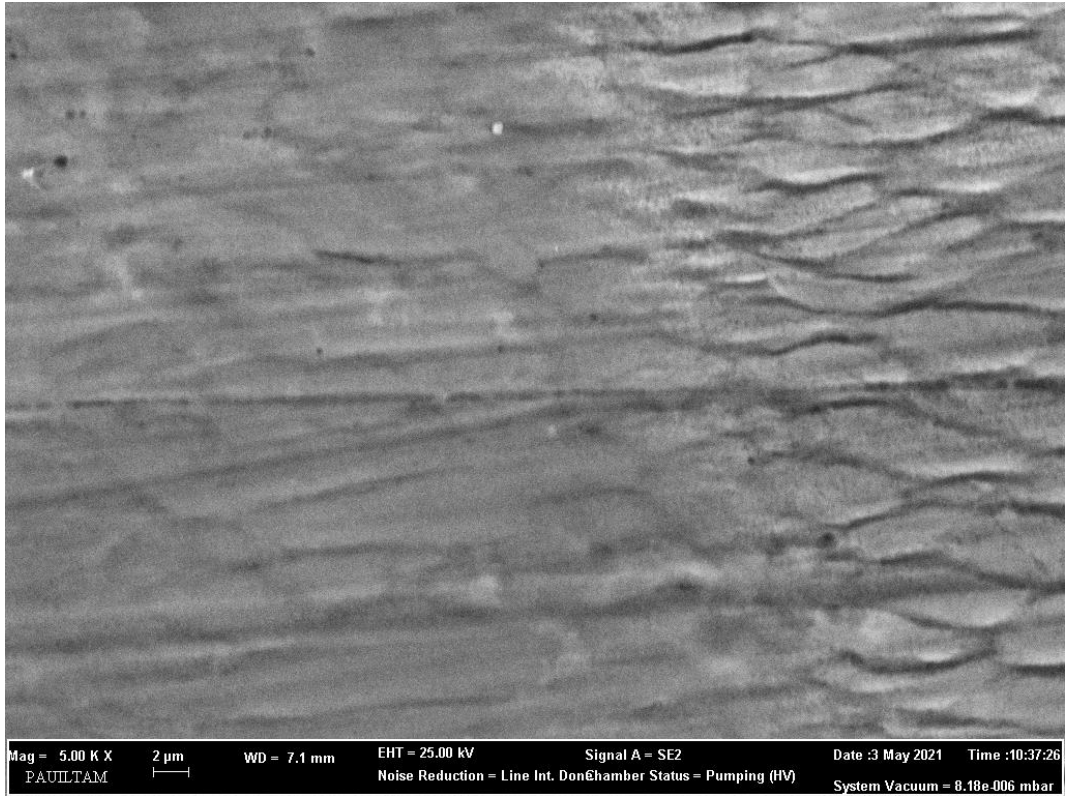
Şekil 8.52: M9 kodlu numunenin çatlak kısmı EDS analizi



Şekil 8:53 M9 kodlu numunenin tane sınırının EDS analizi



Şekil 8.54: C3 numaralı numunenin 3000 x büyütmedeki ana geçiş bölgesi görüntüsü



Şekil 8.55: C3 numaralı numunenin 5000 x büyütmedeki ITAB-Çekirdek Bölgesi

Şekil 8.55’ de CMT kaynak yöntemi ile birleştirilen ITAB/Ergime bölgesinden alınan SEM görüntüsü gösterilmektedir. CMT kaynak yöntemi ile birleştirilen ergime bölgesinde düşük ısı girdisi sebebiyle ikincil faz oluşumu görülmemiştir. Ergime bölgesi tamamıyla dentritik bir yapı sergilemiştir.

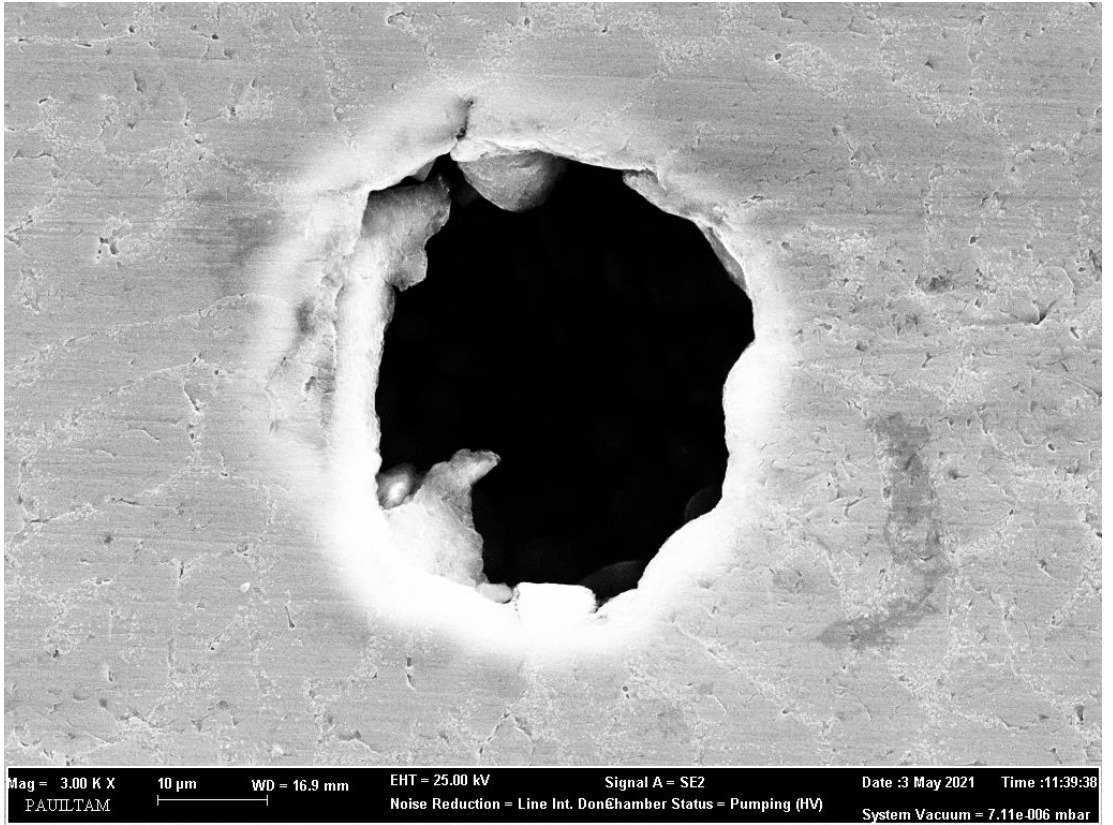
Mikroyapıda ITAB bölgesinde çeşitli yuvarlak şekillerde boşluklar ve boşluk kenarlarında çökelmeler gerçekleşmiştir. Şekil 8.56 ve Şekil 8.57’de bu boşluk ve çökelmelerin SEM görüntüleri gösterilmektedir. Buna göre, CMT işleminin doğası gereği tekrarlı uygulanan ısı girdisi Al₄C₃ ve Mg₂Si çökelmelerini tekrarlı bir şekilde büyütür. Çok yüksek hızlarda kaynak telinin ark oluşturması nedeniyle uygulanan tekrarlı ısı girdi ITAB bölgesinin çekirdek kısmına yakın bölgelerini tekrarlı olarak tavlur. Böylece Mg₂Si çökelmeleri kararlı olarak büyür.



Şekil 8.56: C3 numaralı numunenin 500 x büyütmedeki geçiş bölgesi görüntüsü

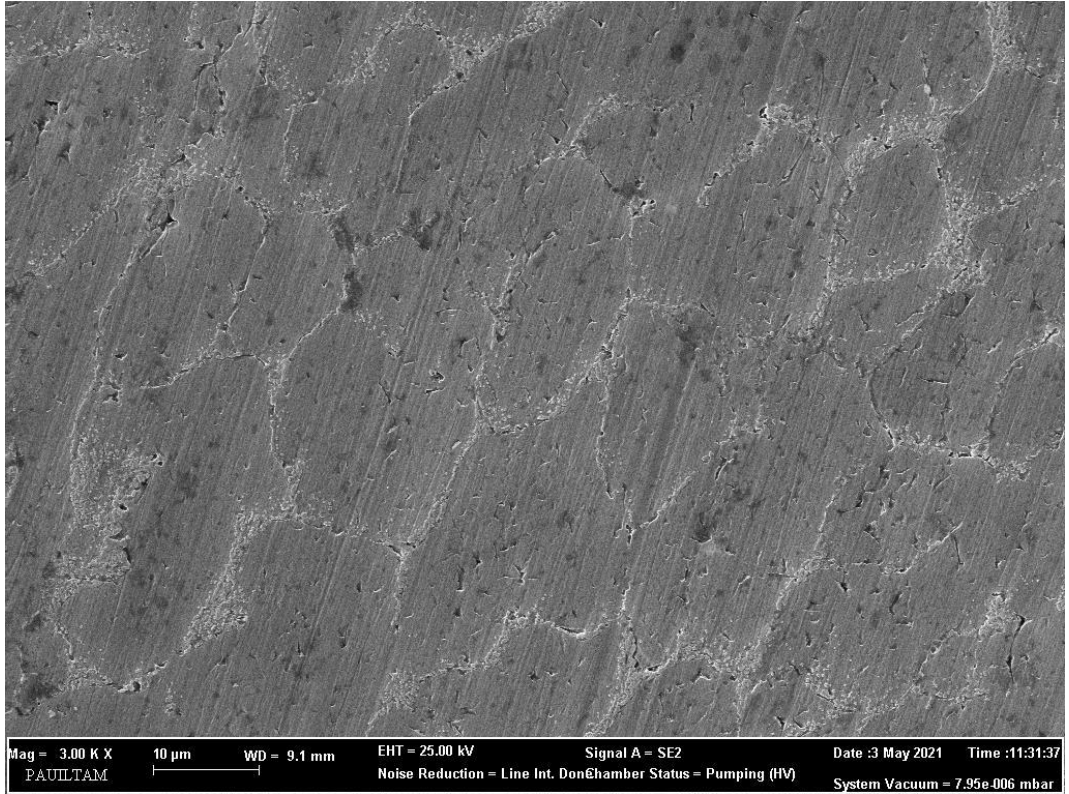


Şekil 8.57: C3 numaralı numunenin 1000 x büyütmedeki ITAB bölgesi Mg₂Si oluşumu

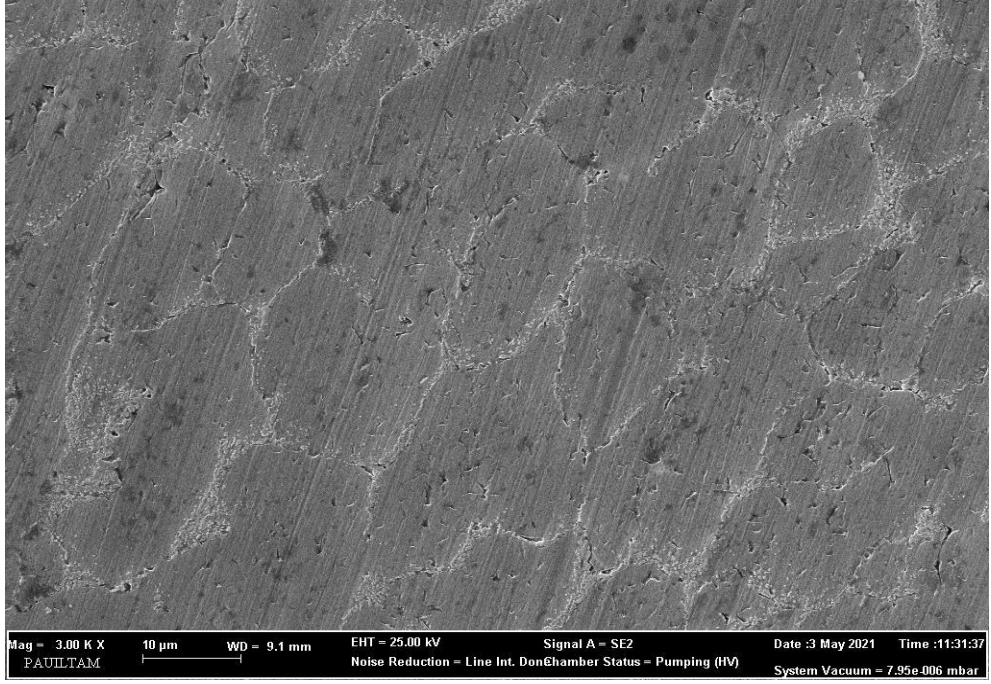


Şekil 8.58: C3 numaralı numunenin 3000 x büyütmedeki çökelme bölgesinden alınan SEM görüntüsü

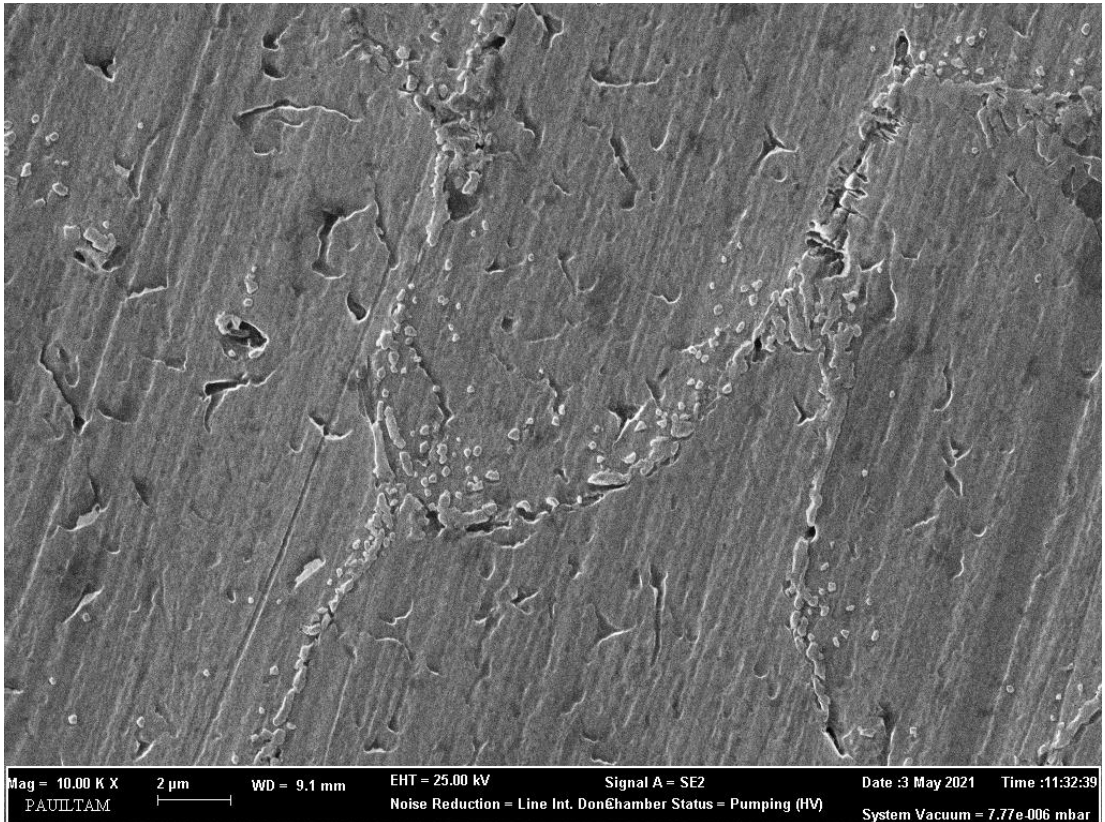
Şekil 8.57’da çökeltme bölgesinden alınan detay resmi gösterilmektedir. Buna göre boşluk kenarlarında bulunan açık renk bu bölgede alüminyumun varlığının az olduğunun bir kanıtıdır. Bu durum genelde Al_3C_4 veya Mg_2Si oluşum karakteristiğine uymaktadır. Ayrıca, tane kenarlarında bulunan Al-Cu çökelmeleri, boşluk kenarlarına kadar hiçbir yoğunluğunu bozmamıştır. Bu durum, boşluk kenarındaki fazın Cu ile ilişiği olmadığını bir ıspatıdır.



Şekil 8.59: C3 numaralı numunenin 3000 x büyütmedeki kaynak bölgesi görüntüsü



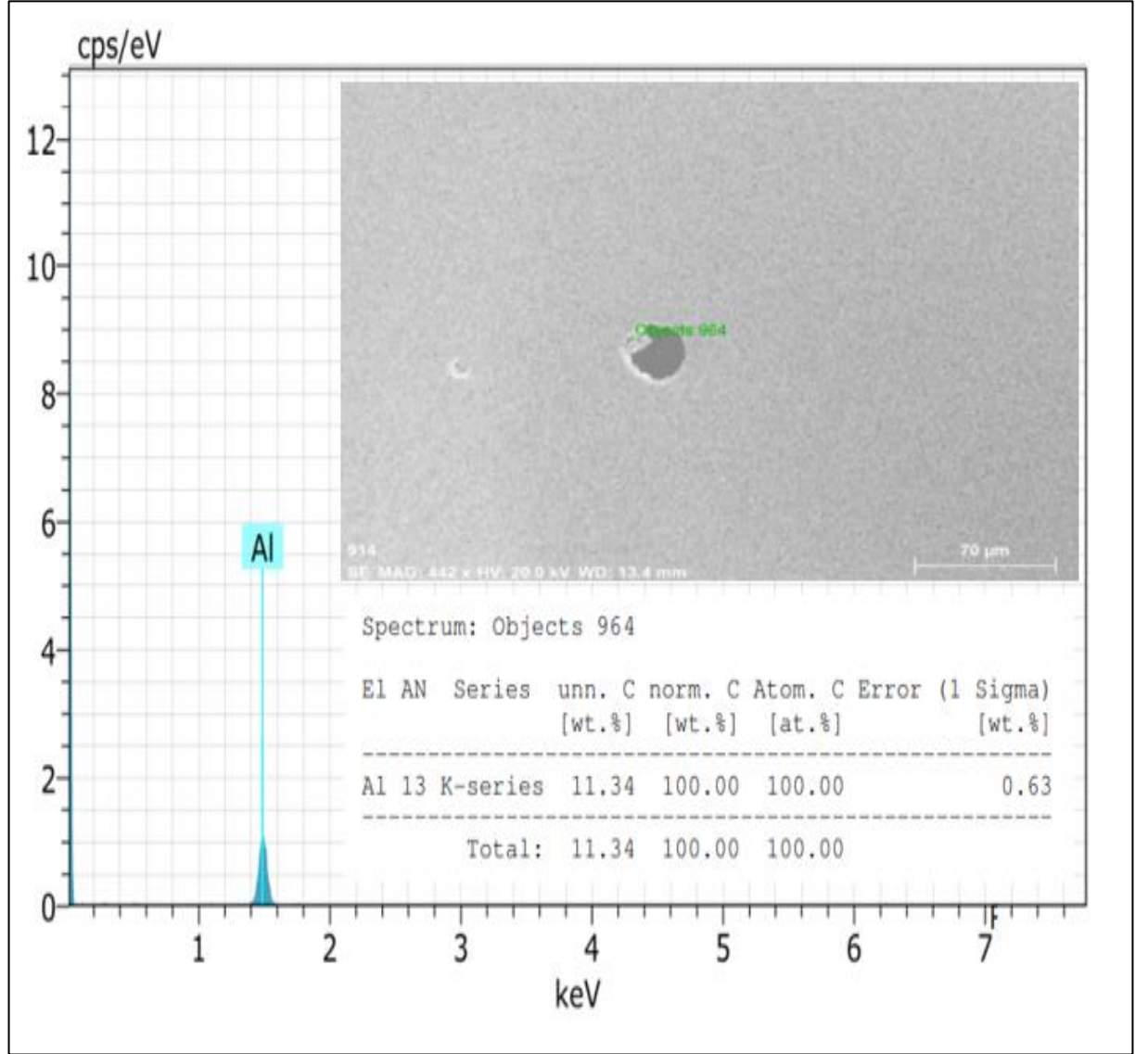
Şekil 8.60: C3 numaralı numunenin 3000 x büyütmedeki kaynak bölgesi görüntüsü



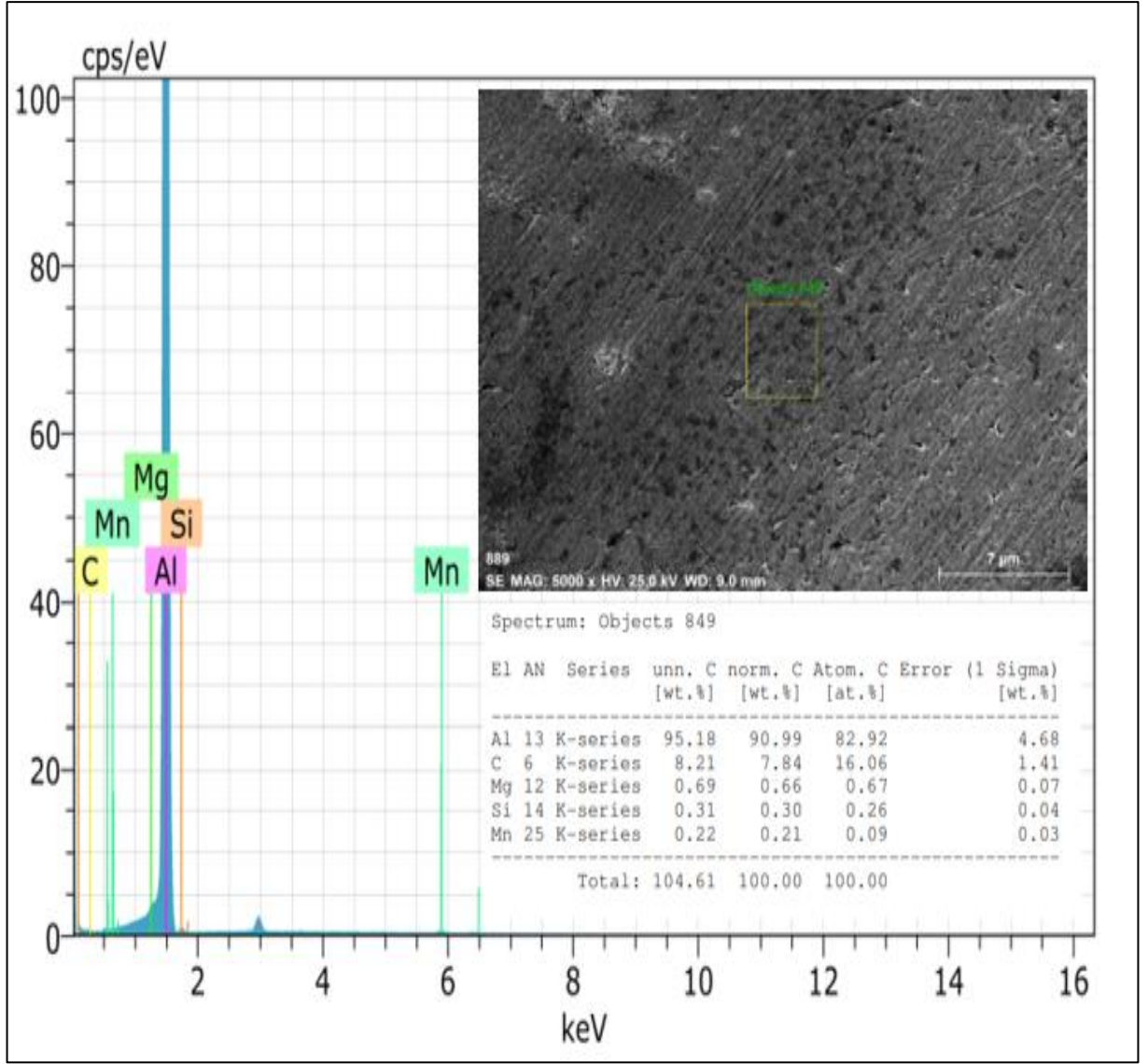
Şekil 8.61: C3 numaralı numunenin 10000 x büyütmedeki ITAB bölgesi Al-Cu çökelmeleri

Şekil 8.61' de ITAB bölgesinde Cu'nun tane kenarlarında çöktüğü SEM görüntüsünde tespit edilmiştir. Normalde ısıl işlem ile belli bir süre tavlayarak elde ettiğimiz bu yapı,

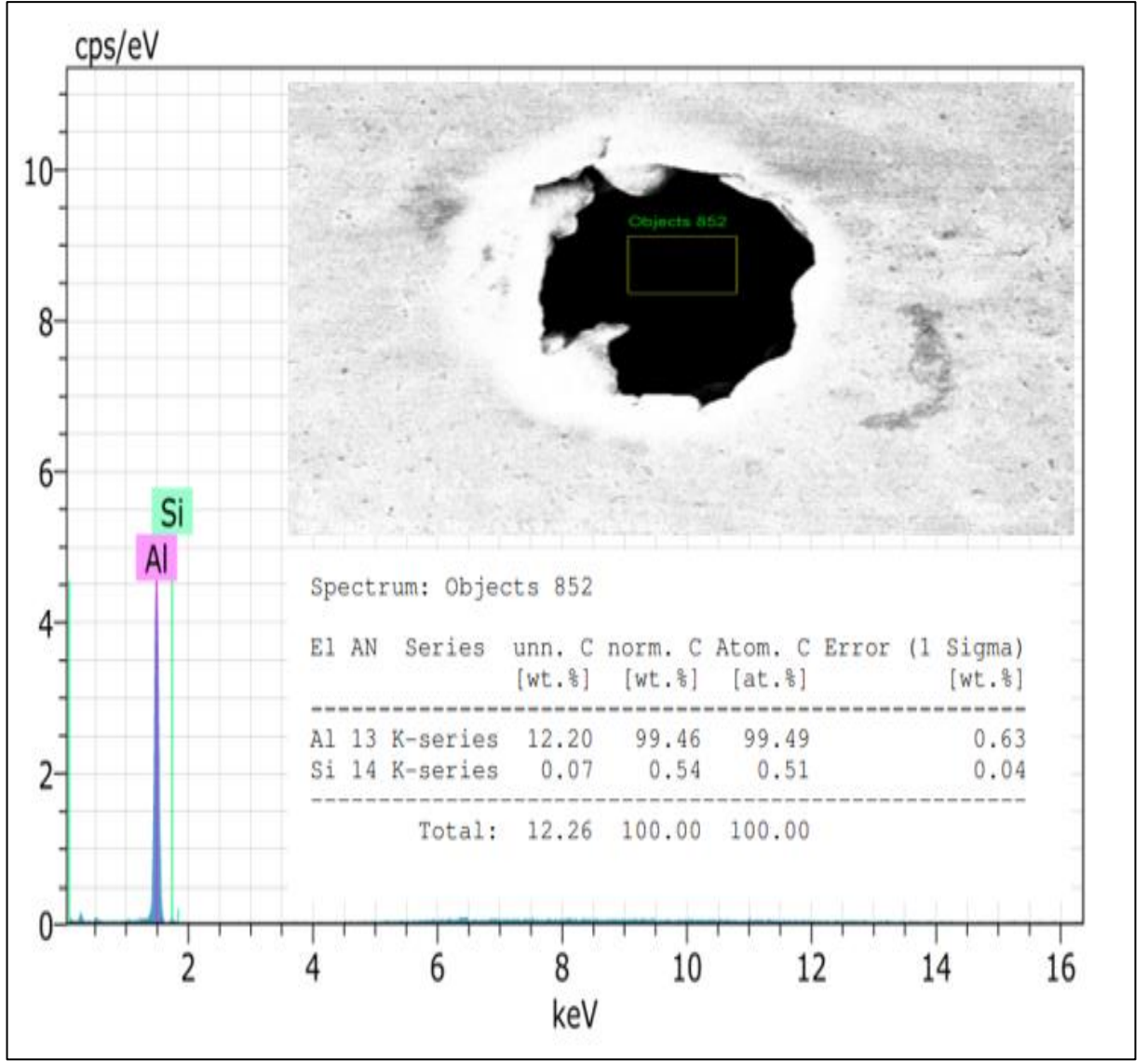
kaynak ısı girdisinin etkisi ile kendini göstermiştir. Gerekli ısı girdisinin yüksek oluşu, tavlanan bölgenin sertliğini de arttırmıştır. Sertlik ölçümlerinde bu bölgede beklenen sertlik artışı, aynı zamanda Cu elementinin ne kadar çökelediğinin bir göstergesidir.



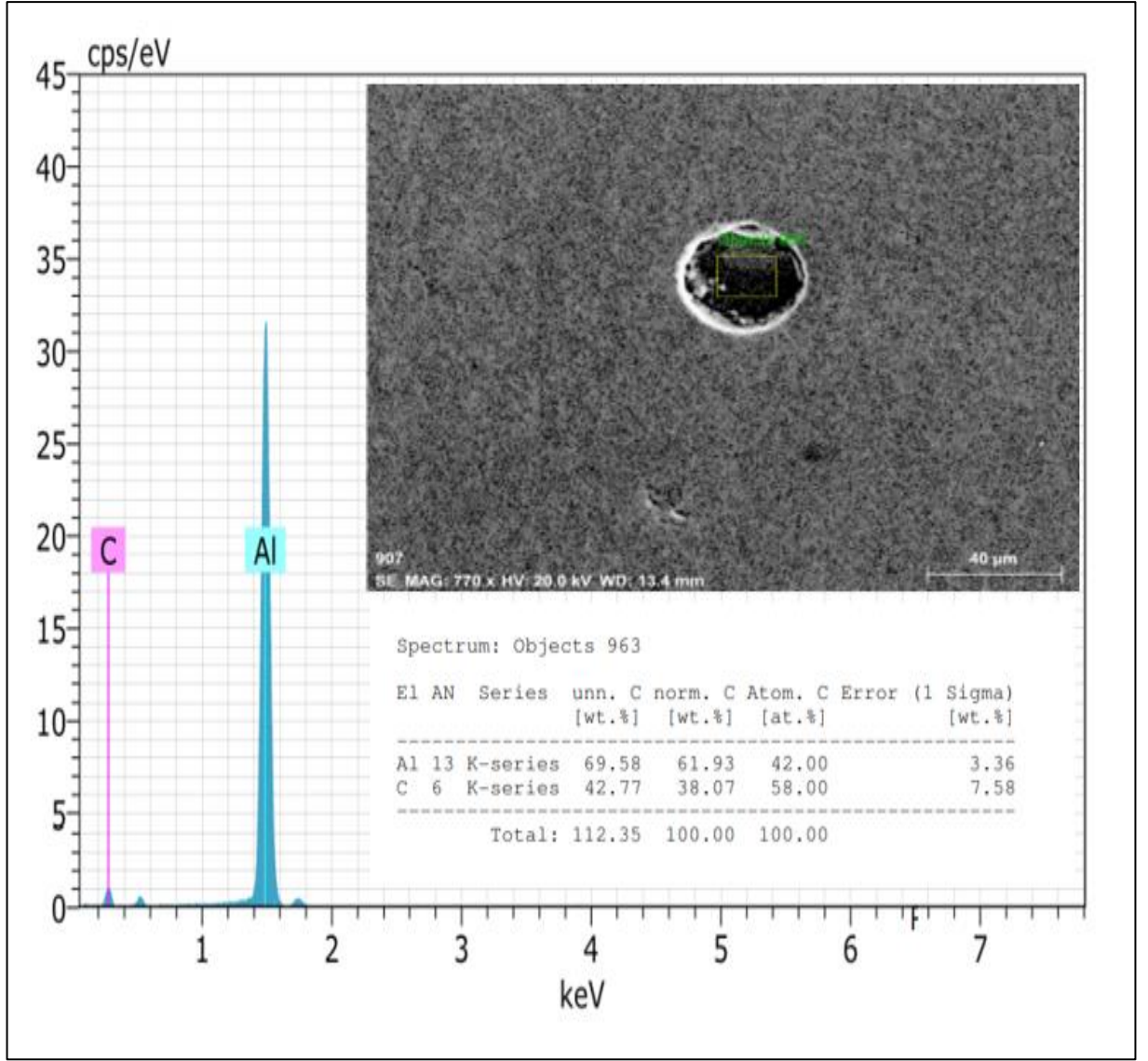
Şekil 8.62: C3 kodlu numunenin boşluk kısmı EDS analizi



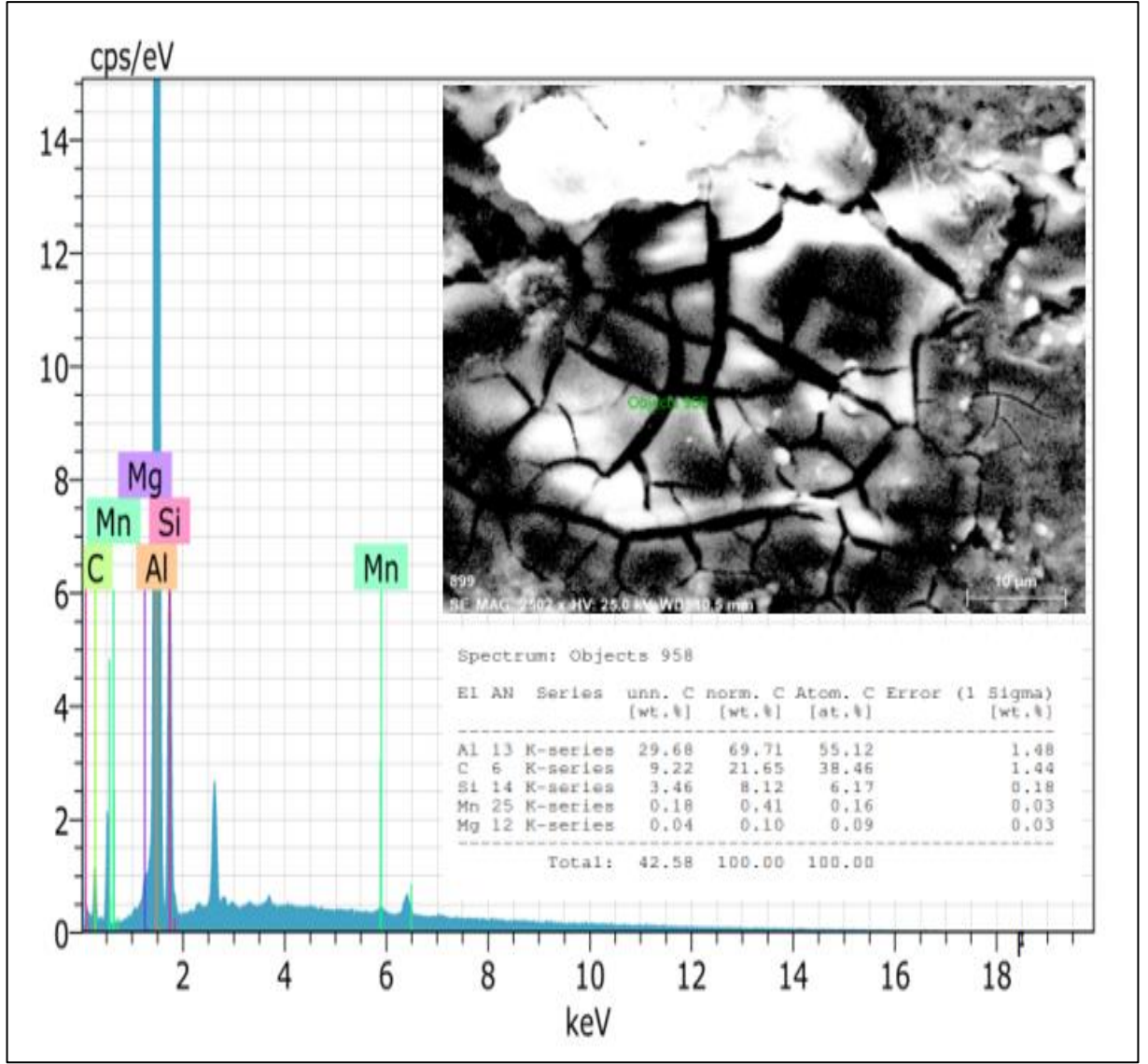
Şekil 8.63: C3 kodlu numunenin geçiş bölgesi EDS analizi



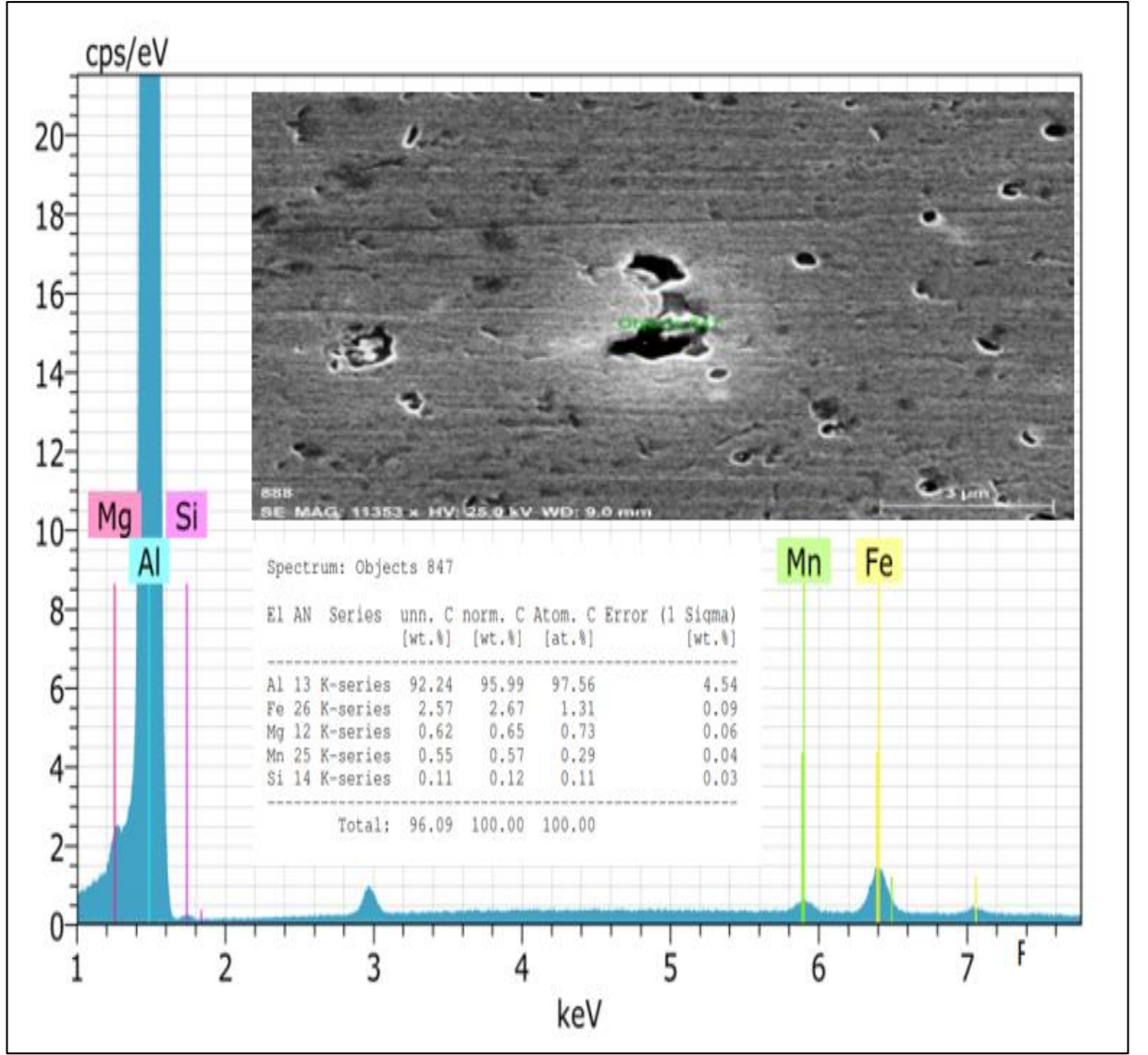
Şekil 8.64: C3 kodlu numunenin kaynak bölgesi EDS analizi



Şekil 8.65: C3 kodlu numunenin kaynak bölgesi EDS analizi



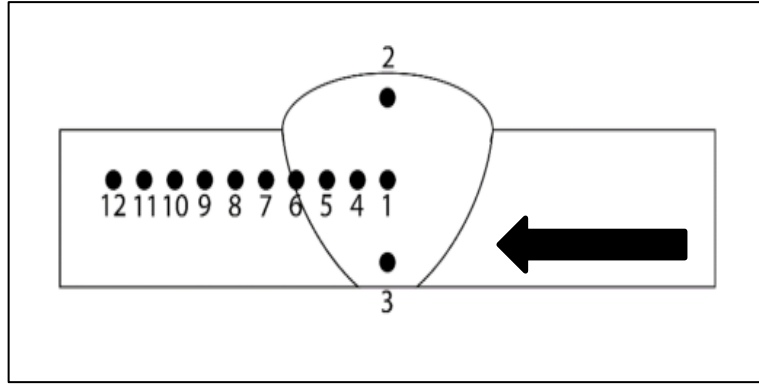
Şekil 8.66: C3 kodlu numunenin kırık yüzey EDS analizi



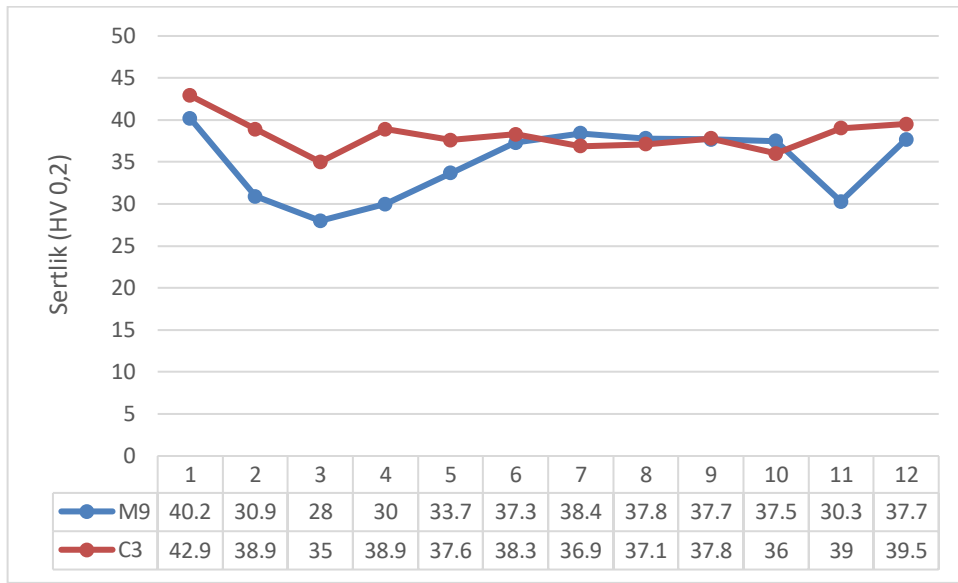
Şekil 8.67: C3 kodlu numunenin ana malzeme EDS analizi

8.4 Sertlik Deneyi Sonuçları

Sertlik deneyi MIG kaynak yöntemi ile 550 mm/dk kaynak hızı ve 120 A kaynak akımı kullanılarak birleştirilen numuneye (M9) ve CMT kaynak yöntemi ile 550 mm/dk kaynak hızı ve 100 A kaynak akımı kullanılarak birleştirilen numuneye (C3) uygulanmıştır. 12 ayrı noktadan alınan ölçümlerin konumları şekil 8.71' de ve sertlik değerleri şekil 8.72' de verilmektedir.



Şekil 8.68: Sertlik deneyinde ölçüm yapılan noktaların sırasıyla gösterimi



Şekil 8.69: M9 ve C3 kodlu numunelerin sertlik değerleri

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada 3005 serisi alüminyum alaşımı plakalar MIG ve CMT kaynak yöntemleri ile 550 mm/dk, 600 mm/dk ve 650 mm/dk kaynak hızları ve 100 A, 110 A ve 120 A kaynak akımları kullanılarak birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin tümünde 4043 kaynak teli kullanılmıştır. MIG kaynak yöntemiyle birleştirilen numuneler M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9 ve CMT kaynak yöntemiyle birleştirilen numuneler C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9 olarak kodlanmıştır. Tüm numunelerde, ısı girdisinin farklı olmasından dolayı mikroyapı ve mekanik özellikler farklılık göstermektedir. Mikroyapı ve çekme deneyi sonuçları karşılaştırıldığında, ısı girdisinin artması ile kaynak bölgesindeki tanelerin küçüldüğü, çökeltilerin azaldığı ve çekme dayanımı değerlerinin artış gösterdiği gözlemlenmiştir. MIG kaynak yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirmelerde ısı girdisinin artmasıyla çekme dayanımının arttığı, CMT kaynak yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirmelerde ise çekme dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Numunelere uygulanan mekanik deneyler ve mikroyapı analizler sonucunda optimum kaynak parametreler tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda belirtilmektedir.

- 1) MIG kaynak yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirmelerde elde edilen en yüksek çekme dayanımı 146 MPa olarak M9 kodlu (120 A kaynak akımı ve 550 mm/dk kaynak hızı) numunede elde edilmiştir.
- 2) CMT kaynak yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirmelerde elde edilen en yüksek çekme dayanımı 139 MPa olarak C3 kodlu (100 A kaynak akımı ve 550 mm/dk kaynak hızı) numunede elde edilmiştir.
- 3) Numunelerde gözlemlenen kaynak geçiş bölgesindeki çökeltilerde SEM ve EDS analizleri sonucunda karbon oranının yüksek olduğu düşünülmektedir. Yapılan literatür araştırmasında bu tespiti Al_4C_3 bileşiğinin kırılma bir faz oluşturmasının neden olduğu saptanmıştır. Ayrıca Al_4C_3 bileşiğinin kaynak bölgesinde çatlak ve kırılma yapılarına neden olduğu ve gevrek kırılmaların yaşanabileceği literatür bilgisiyle örtüşmektedir.
- 4) Sertlik deneyi sonucunda M9 kodlu (120 A kaynak akımı ve 550 mm/dk kaynak hızı) numunede en yüksek sertlik değeri 40,2 HV olarak kaynak bölgesinde ölçülmüştür. En düşük sertlik değerinin (28 HV)

- kaynak bölgesinin kök kısmında olduğu ve kaynak bölgesinden ana metale doğru ilerledikçe sertlik değerinin düştüğü saptanmıştır. M9 kodlu numunede kaynak bölgesinde ölçülen sertlik değerlerinin ana malzemeden (38,5 HV) yüksek olduğu saptanmıştır.
- 5) Sertlik deneyi sonucunda C3 kodlu (100 A kaynak akımı ve 550 mm/dk kaynak hızı) numunede en yüksek sertlik değeri 42,9 HV olarak kaynak bölgesinde ölçülmüştür. En düşük sertlik değerinin (35 HV) kaynak bölgesinin kök kısmında olduğu ve kaynak bölgesinden ana metale doğru ilerledikçe sertlik değerinin düştüğü saptanmıştır. C3 kodlu numunede kaynak bölgesinde ölçülen sertlik değerlerinin ana malzemeden (38,5 HV) yüksek olduğu saptanmıştır.
 - 6) SEM ve EDS analizlerinden elde edilen verilere göre M9 numunesinin kaynak bölgesinde sert bir yapıya sahip olduğu bununda tane sınırlarına çökelen Mg₂Si kalıntılarıyla ve Si çökelmeleriyle olduğu gözlemlenmiştir. Si'nin çökmesinin sebebi kaynak teli ve ana malzemede yüksek oranda bulunması ve bununla birlikte ITAB' da meydana gelen ısı ile tamamının difüzyon yoluyla homojen dağılamaması yani Si bakımından bölgenin doymuş katı eriyiği oluşturmasından olduğu söylenebilir.
 - 7) CMT kaynak yöntemi ile birleştirilen C3 numunesinin ergime bölgesinde düşük ısı girdisi sebebiyle ikincil faz oluşumu görülmemiştir. Ergime bölgesinin tamamıyla dentritik bir yapıdan oluştuğu saptanmıştır.
 - 8) C3 numunesinde oluşan boşluk ve çökelmelerin SEM ve EDS analizlerinde CMT işleminin doğası gereği tekrarlı uygulanan ısı girdisi Al₄C₃ ve Mg₂Si çökelmelerini kademeli ve sürekli bir şekilde büyüttüğü saptanmıştır. Bölgede oluşan tekrarlı ısı ve soğuma sebebiyle bölgenin sürekli tavlınmaya maruz kalacağı ve bu nedenle de Mg₂Si çökelmelerinin kararlı olarak büyüdüğü gözlemlenmiştir.
 - 9) Çökme oluşan bölgeler incelendiğinde boşluk ve bu boşluğun çevresinde açık renkli bir alanın olduğu görülmüş ve boşluk kenarlarında bulunan açık renk bu bölgede alüminyumun varlığının az olduğu EDS analiziyle belirlenmiştir. Çökelmelerin eş eksenli bir yapı oluşturduğu SEM analizlerinde saptanmış olup oluşan yapının Al₃C₄

veya Mg₂Si oluşum karakteristiğine uyduğu literatür araştırmasıyla uyuşmaktadır.

- 10) Homojen olarak tane kenarlarına dağılan çökelmelerin Al-Cu çökeltilerinin olduğu literatür incelemesiyle örtüşmektedir. Oluşan bu çökeltilerin normalde tavlamayla oluşmasına rağmen kaynakta elde edilen ısı girdisiyle kendini gösterdiği düşünülmektedir.
- 11) Isı girdisinin yüksek oluşu, tavlanan bölgenin sertliğini de arttırmıştır. Sertlik ölçümlerinde bu bölgede beklenen sertlik artışı, aynı zamanda Cu elementinin ne kadar çökeldiğinin bir göstergesidir.
- 12) Otomotiv sektörü soğutma sistemlerinde kullanılan 3000 serisi Al alaşımlarının birleştirilmesinde CMT yönteminin kullanılması MIG yöntemine göre çok fazla üstünlük sağlamadığı ve CMT yönteminin kurulum maliyetinin yüksek olmasıyla birlikte geleneksel MIG yönteminin kullanımının hem daha ekonomik hem de daha kolay olacağı bu çalışma sonrasında ortaya çıkmıştır.
- 13) Bütün bu numunelerden elde edilen SEM ve EDS analizlerine ek XRD analizi ile tüm yapılar desteklenebilir.
- 14) Farklı ısı girdilerine sahip kaynaklı numuneler hazırlanıp ısı girdisinin oluşturduğu farklılıklar daha detaylı incelenebilir.
- 15) Bu çalışmaya TIG kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerde eklenerek daha fazla kaynak yönteminin karşılaştırılması yapılabilir.

10. KAYNAKLAR

Ak, M., “AA206 Alüminyum Döküm Alaşımında Empürite Demirin Mekanik Özelliklere Etkilerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2012).

Akça, H., “TIG Kaynak Yöntemiyle Kaynak Edilen Alüminyum ve Alaşımlarının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2006).

Akgül, H., “Çeşitli Alüminyum Alaşımlarının Ekstrüzyon Kalıplarında Şekillendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2007).

Alan, G., “Alüminyum Alaşımlarının Karışım Asal Gaz Ortamında TIG Yöntemiyle Kaynaklanması, Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2013).

Alıcı, M., “Soğuk Metal Transferi Kaynağı ile Birleştirilmiş 6061 ve 5754 Alüminyum Alaşımlarının Kaynak Sonrası Isıl İşlemi”, Yüksek Lisans Tezi, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, (2019).

Alper, M.G., “Alüminyum Sürekli Döküm Yöntemi İle Üretilmiş 5052-5182 Alüminyum Alaşımlarının Şekillendirilebilirlik Kabiliyetlerinin Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2003).

Altuntaş, M., “AISI Paslanmaz Çeliğin MIG ve TIG Kaynak Yöntemleriyle Birleştirilmesinde Kaynak Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2015).

Anderson, T., “The Advancement of Al Within the Welding Fabrication Industry and Its Many Product Desing Applications, Svetsaren, 2, 3-5, (2000).

Apelian, D., “Aluminum Cast Alloys: Enabling Tools for Improved Performance”, *North American Die Casting Association*, Wheeling, Illinois, (2009).

Arıcı, K., “Ticari Safılıkta 5xxx ve 7xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Lazer Kaynağında Kaynak Değişkenlerinin Kaynaklı Birleştirmenin Mekanik ve Metalurjik Özellikleri Üzerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2019).

Ataşen, U., “Soğuk Haddelenmiş 3003, 3105, 3005, Alüminyum Alaşımlarında Alaşım Elementi Olarak Magnezyumun Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2015).

Aydın, A., “Sürtünme Karıştırma Kaynağı (FSW) İle Kaynak Edilmiş Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Ömrünün Arttırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2017).

Balta, B., “Sürtünme Kaynağı ve MIAB Kaynağı İle Birleştirilmiş Boruların Mikroyapısal ve Mekanik Karakterizasyonu”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2016).

Başer, T.A., “Alüminyum Alaşımı ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı”, *Mühendis ve Makine*, 53, (635), 52-53, (2012).

Bebekoğlu, S., “Havacılık Sanayinde Kullanılan, 2024 ve 7075 Alüminyum Alaşımlarının, TIG Kaynak Yöntemi İle Birleştirilmesi, Makro ve Mikro Yapı İle Mukavemet Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Arel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2019).

Boyer, H.E., Gall, T.L., *Aluminium Metals Handbook Desk Edition*, ABD: American Society For Metals Park, 6, 1-3, (1998).

Büyükarslan, S., “Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş Alüminyum Alaşımlarının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2006).

Cai, C., Zhang, W., “The influences of Ar-He shielding gas mixture on welding characteristics of fiber laser-MIG hybrid welding of aluminum alloy”, *Optics And Laser Technology*, 113, 37-45, (2019).

Choudhay, N.K., Aluminium & Recycling – An Economic & Ecofriendly Concept, USA: Indal, (1998).

Cornacchia, G., “A comparative study of mechanical properties of metal inert gas (MIG)-cold metal transfer (CMT) and fiber laser-hybrid welds for 6005A T6 extruded sheet”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-017-0914-9, (2017).

Çam, G., “Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK): Al-alaşımaları İçin Geliştirilmiş Yeni Bir Kaynak Teknolojisi”, *TMMOB Mühendis ve Makine Dergisi*, 46, (541), 30-39, (2005).

Çetin, H., “Alüminyum Alaşımı Hafif Metal Levhaların Prizmatik Derin Çekmede Biçimlendirilebilirlik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2005).

Çetinel, H., Ayvaz, M., “Farklı Alüminyum Alaşımalarının TIG Kaynak Yöntemi İle Kaynatılması ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 7.1, 39-46, (2011).

Çetkin, E., “TIG, MIG ve FSW Yöntemleri Kullanılarak Birleştirilen AA7075/AA5182 Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Batman, (2018).

Demir, B., “AA 5083-H111 Alüminyum Alaşımının Mig Kaynağında Farklı Akım Türlerinin Mekanik ve Mikroyapıya Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Düzce, (2019).

Demircioğlu, P., “Alüminyum Alaşımalarının Dökümünde Gaz Oluşumu ve Gaz Giderme Tekniklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2002).

Domke, W., “Malzeme Bilgisi ve Malzeme Muayenesi”, Çev. M. Y. Gürleyik, Trabzon, (1988).

Durgutlu, A., Kahraman, N., Gülenç, B., Taskın, M., “An investigation into the effect of welding current on the plasma arc welding of pure titanium”, *Materials and Design*, 48, (3), 1-6, (2010).

Ediz, Ç., “Alüminyumun Geri Dönüşüm Süreci ve Süreçte Kullanılan Malzemelerin Alüminyum Bileşenlerine Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Bilecik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bilecik, (2011).

Eroğlu, G., Şahiner, M., “*Dünyada ve Türkiye’de Alüminyum*”, Ankara: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 7-11, (2018).

Ersoy, U., “Savunma Sanayisinde CMT Uygulamalarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya, (2019).

Gnedenkov, A.S., “Effect of Microstructure on the Corrosion Resistance of TIG Welded 1579 Alloy”, *Materials*, 12, 2615, (2019).

Güngör, B., “AW 5083-H111 ve AW 6082-T651 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma (FSW) ve Robotik CMT-MIG Kaynak Yöntemleri İle Kaynağında Mekanik ve Metalürjik Özelliklerin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2013).

Imoudu, N.E., “The Characteristic of Cold Metal Transfer (CMT) and Its Application For Cladding”, Yüksek Lisans Tezi, *The Arctic University of Norway Faculty of Technology*, Tromsø, (2017).

Işık, Ş., “6XXX Alüminyum Alaşımlarının Soğuk Metal Transferi İle Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2017).

Kaçar, U., “CMT: Cold Metal Transfer (Soğuk Metal Transferi)”, *Kaynak Teknolojisi VIII. Ulusal Kongre ve Sergisi*, (Oturum 1B), 101-110, (2011).

Kahraman, F., Gençer, G.M., Yolcu, C., Kahraman, A.D., Dilbaz, M.E., “Soğuk Metal Transfer (CMT) ve Darbeli Soğuk Metal Transfer (Darbeli CMT) Kaynak İşlemleri İle Birleştirilmiş AA5754 Alüminyum Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi”, *Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20, (59), 635-646, (2018).

Karadağ, A., “Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Dikiş Geometrisine ve Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2011).

Kasaplar, G., “Alüminyum Yüzeyindeki Oksit Tabakasının Okzalik Asit Anodizing Yöntemiyle Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, (2007).

Kırlı, S., “Alüminyum Malzemelerin MIG Kaynağında Kaynak Parametrelerinin Dikiş Geometrisine ve Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2011).

Koca, E., “TIG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2010).

Kocabıçak, G., “Malzeme Seçiminde Bilgi Tabanlı Sistemler ve Alüminyum Döküm Alaşımlarına Uygulanması”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (1996).

Konar, M., “DP600-8XXX Serisi Alüminyum Alaşımının CMT Tekniği İle Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2017).

Köşker, A., “Alüminyum Alaşımlarının Asal Gaz Ortamında Kaynaklanması ve Mekanik, Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2011).

Magmaweld, “Tawers Kaynak Robotlarının Genel Yapısı”, <https://www.magmaweld.com.tr/robotik-sistemler/panasonic-tawers-kaynak-robotlari/r/67>, (2016).

Malyer, E., “Sürtünme Karıştırma Kaynağı İle Birleştirilen 5000 Serisi Alüminyum Alaşımlarında Kaynak Parametrelerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, (2010).

Mathers, G., *The Welding of Aluminium and its alloys*, Cambridge: Woodhead Publishing Limited, (2002).

Mercan, E., “5XXX-6XXX Alüminyum Alaşımlarının Otomatik Mig Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2018).

Meyveci, A., “Yaşlandırılmış 2xxx ve 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Bilim Uzmanlığı Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2007).

Mustafa, Ö., “Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demir / AISI 1040 Çelik Çiftinin Sürtünme Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Adıyaman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adıyaman, (2019).

Oğuz, B., *Demirdışı Metaller Kaynağı Metalurji-Uygulama*, İstanbul: Oerlikon, (1990).

Onar, V., “Tig Kaynağında Azot Gazının Alüminyum Yüzey ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2010).

Öz, Ö., “Yaşlandırma Isıl İşleminin AA 7075 Malzemeli Dikdörtgen Plağın Burkulma Yüğü Üzerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, (2007).

Pakdil, M., “Determination Of The Mechanical Properties and Fatigue Crack Propagation Of The Laser Welded New Generation Aluminum Alloys”, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2005).

Parlak, A., “Geçiş Levhası Kullanarak Çeliklerin Alüminyum Alaşımlarına Kaynak Edilebilirliği”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2019).

Quan, G., “An investigation on plasma-MIG hybrid welding of 5083 aluminum alloy”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98, 1433-1440, (2018).

Reddy, A. D., “Characterization of mechanical properties and study of microstructures of friction stir welded joints fabricated from similar and dissimilar alloys of aluminum”, Master Thesis, *University Of Missouri Faculty of the Graduate School*, Columbia, (2007).

Seygen, C., “Alüminyum Alaşımının Kaynağında Dikkat Edilecek Hususlar”, *Kaynak Teknolojisi 3. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*, İstanbul 256-264, (2001).

Shavanas, S., “Weldability of AA 5052 H32 aluminium alloy by TIG welding and FSW process – A comparative study”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, doi:10.1088/1757-899X/247/1/012016, (2017).

Shen, J., “Effect of TIG current on microstructural and mechanical properties of 6061-T6 aluminium alloy joints by TIG-CMT hybrid welding”, *Journal of Materials Processing Tech.*, 255, 161-174, (2018).

Shu, F.Y., “Microstructure and Impact Mechanical Properties of multi-layer and multi-pass TIG Welded Joints of Al-Zn-Mg Alloy Plates”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 29, (12), 2496-2505, (2019).

Sirel, Z., “İkiz Merdane Döküm Yöntemiyle Üretilen AA5XXX ve AA6XXX Serisi Alüminyum Alaşımında Segregasyonların Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gebze, (2008).

Smith, W.F., “Material Science & Engineering”, *University of Central Florida*, USA, (2001).

Şen, Y., “DP600, DP800, MS1200, MS1400 Tipi Yüksek Mukavemetli Sacların CMT Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesi ve Mekanik/Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Düzce, (2019).

Taban, E. ve Kaluç, E., “EN AW-5083-H321 Alüminyum Alaşımının MIG, TIG ve Sürtünen Eleman ile Birleştirme (FSW) Kaynaklı Bağlantılarının Mekanik ve Mikroyapısal Özellikleri”, *Mühendis ve Makine*, 46, (541), 40-41, (2005).

Taban, E., “5XXX Serisi Alüminyum Alaşımının TIG, MIG ve Sürtünen Eleman ile Birleştirme Kaynaklı Bağlantılarının Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2004).

Talalaev, R., Veinthal, R., Laansoo, A., Sarkans, M., “Cold Metal Transfer (CMT) Welding of Thin Sheet Metal Products”, *Estonian Journal of Engineering*, 18, (3), 243-250, (2012).

Tımaç, G., “Uçak Endüstrisinde Kullanılan Alüminyum Alaşımlarının TIG Kaynak Yöntemi İle Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2006).

TMMOB: Metalurji Mühendisleri Odası Alüminyum Komisyonu, “Alüminyum Raporu”, *Metalurji*, (137), 1-2, (2006).

Totten, E.G., Mackenzie, D.S., *Handbook of Aluminium “Physical Metallurgy and Processes”*, 1, New York: Marcel Decker Inc., (2003).

Tunçel, O., “Sürtünme Karıştırma Nokta Kaynağı İle Birleştirilen AA6082 - T6 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, (2015).

Turhan, S., “Alüminyumun Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Magnezyum ve Silisyumun Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2002).

Tülbentçi, K., *MIG – MAG Eriyen Elektrod İle Gaz Altı Kaynağı*, İstanbul: Gedik Eğitim Vakfı, (1990).

Uzun, M., “MIG Kaynağı ile Birleştirilen A 5000 Serisi Malzemenin Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2014).

Ünel, E., “CMT-MIG Kaynaklı Alüminyum ve Çelik Bağlantılarının Özellikleri ve Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2016).

Yağcıgil, H., Alüminyum Mamülleri Sanayi, *Türkiye İş Bankası A.Ş. Genel Müdürlük: İktisadi Araştırma ve Planlama Müdürlüğü*, Ankara, (1997).

Yalçın, E.D., “AA7075 ve AA5754 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi İle Kaynak Edilebilirliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, (2010).

Yan, K., “Effects of helium gas flow rate on arc shape, molten pool behavior and penetration in aluminum alloy DCEN TIG welding”, *Journal of Materials Processing Tech.*, 255, 696-702, (2017).

Yıldız, N., “TIG/MIG Hibrit Kaynağının 1050 Çeliğinin Kaynağında Ön Tavlama Etkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kastamonu, (2019).

Yılmaz, R., Özyürek, D., Kibar, E., “Yeniden Çözeltiye Alma Parametrelerinin 7075 Alüminyum Alaşımlarının Sertlik ve Aşınma Davranışlarına Etkisi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 27, (2), 429–439, (2012).

Yılmaz, Ş., Şen, U., “Alaşımların Yapı ve Özellikleri”, *Sakarya Üniversitesi Yayınları* 18, 54-57, Adapazarı, (1996).

Zhimin, L., “Comparison of Al-Zn-Mg Alloy P-MIG Welded Joints Filled with Different Wires”, *High Temp. Mater. Proc.*, (in press) (2019).