

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



AlSi5 ve AlSi12 KAYNAK TELLERİYLE BİRLEŞTİRİLEN Al6061
ALÜMİNYUM ALAŞIMINDA İNDÜKSİYON ISIL İŞLEMİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

YUNUS EMRE MERCAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hakan ÇETİNEL (Tez Danışmanı)**
 Prof. Dr. Uğur ÇAVDAR (Eş Danışman)
 Doç. Dr. Alaaddin TOKTAŞ
 Dr. Öğretim Üyesi Seda ARABACI

BALIKESİR, HAZİRAN - 2024

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**AlSi5 ve AlSi12 Kaynak Telleriyle Birleştirilen Al6061 Alüminyum Alaşımında İndüksiyon Isıl İşlemi Etkilerinin İncelenmesi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Yunus Emre MERCAN

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından
(2023/058) nolu proje ile desteklenmiştir.**

ÖZET

**AlSi5 ve AlSi12 KAYNAK TELLERİYLE BİRLEŞTİRİLEN
Al6061 ALÜMİNYUM ALAŞIMINDA İNDÜKSİYON ISIL İŞLEMİ
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
YUNUS EMRE MERCAN
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. HAKAN ÇETİNEL)
(EŞ DANIŞMAN: PROF. DR. UĞUR ÇAVDAR)**

BALIKESİR, 2024

Günümüzde kullanım alanı oldukça yaygınlaşan Alüminyum alaşımlar, sahip olduğu özelliklerden dolayı havacılık, otomotiv, inşaat sektörü gibi alanlarda yoğun olarak kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları arasında oldukça fazla kullanım yeri olan Al6061, ısıtıl işlem uygulanabilmesi, kaynak kabiliyetinin ve mukavemet özelliklerinin iyi olması nedeniyle araştırma malzemesi olarak tercih edilmiştir.

Bu çalışmada Al6061 ve Al6061-T6 malzemeleri AlSi5 ve AlSi12 ilave kaynak telleri kullanılarak TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir ve ortaya dört farklı numune parametresi çıkmıştır (Al6061 – AlSi5, Al6061-T6 – AlSi5, Al6061 – AlSi12, Al6061-T6 – AlSi12). Kaynaklı numunelere farklı sıcaklık (185 °C, 350 °C) ve sürelerde (3 dk, 6 dk, 9 dk) indüksiyon ısıtıl işlemi uygulanmıştır. İndüksiyon işlemi ile kısa bir süre içerisinde yüksek sıcaklıklara çıkılarak numunelere ısıtıl işlem yapılmıştır. Yapılan bu işlemlerin farklı teller ile kaynaklanmış numunelere etkisi araştırılmak üzere SEM/EDX analizleri ve mikroyapı incelemesi yapıp mikrosertlik, eğme ve çekme testleri uygulanmıştır. Gerçekleştirilen bu inceleme ve testler neticesinde yaşlandırma ve indüksiyon ısıtıl işlemi uygulanmış numunelerin sertlik ve mukavemet değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: TIG Kaynak, Al6061, indüksiyon

Bilim Kod / Kodları : 91415, 91421

Sayfa Sayısı : 170

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF INDUCTION HEAT TREATMENT ON Al6061 ALUMINUM ALLOY JOINED WITH AlSi5 AND AlSi12 WELDING WIRES MSC THESIS

YUNUS EMRE MERCAN

BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. HAKAN ÇETİNEL)

(CO-SUPERVISOR: PROF. DR. UĞUR ÇAVDAR)

BALIKESİR, 2024

Aluminum alloys, which are widely used today, are used extensively in areas such as aviation, automotive and construction sectors due to their properties. Al6061, which has a wide range of applications among aluminum alloys, has been preferred as a research material due to its ability to heat treatments, having welding capability and good strength properties.

In this study, Al6061 and Al6061-T6 materials were joined by TIG welding method using AlSi5 and AlSi12 additional welding wires and four different sample parameters were determined (Al6061 – AlSi5, Al6061-T6 – AlSi5, Al6061 – AlSi12, Al6061-T6 – AlSi12). Induction heat treatments were applied to the welded specimens at different temperatures (185 °C and 350 °C) and durations (3 minutes, 6 minutes and 9 minutes). In induction heat treatment, the samples were heat treated by reaching high temperatures in a short durations. In order to investigate the effect of these processes on welded samples with different wires, SEM/EDX analyses, microstructure examination, microhardness tests, bending and tensile tests were performed. As a result of these examination and tests, it was observed that the hardness and strength values of the specimens subjected to aging and induction heat treatment increased.

KEYWORDS: TIG Welding, Al6061, induction
Science Code / Codes : 91415, 91421

Page Number :170

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ.....	ix
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖNSÖZ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI.....	3
2.1 Alüminyumun Genel Özellikleri.....	3
2.2 Saf Alüminyum Özellikleri.....	4
2.2.1 Mukavemet Özellikleri.....	5
2.2.2 Fiziksel Özellikleri.....	5
2.2.3 Soğuk ve Sıcak Şekil Değiştirme	6
2.2.4 Kimyasal Özellikleri	7
2.2.5 Korozyon Özellikleri.....	7
2.3 Alüminyum Kullanım Alanları	8
2.3.1 Marina Sanayi	9
2.3.2 Uçak ve Uzay Endüstrisi.....	9
2.3.3 Otomotiv Sektörü	10
2.3.4 Bina ve Konstrüksiyon	11
2.3.5 Mühendislik Uygulamaları.....	11
2.4 Al6061 Alaşımı.....	11
3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ TIG KAYNAĞI.....	14
3.1 Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti	15
3.2 Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynak Çeşitleri	17
3.3 TIG Kaynağı	20
3.3.1 TIG Kaynağında Kullanılan Ekipmanlar	20
3.3.2 TIG Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları	22
3.3.3 TIG Kaynak Uygulamaları.....	23
3.3.4 TIG Kaynağı Akım Türleri	24
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	26
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	35
5.1 Deneyde Kullanılan Al6061 Plakaların Hazırlanması	35
5.2 TIG Kaynak İşleminin Yapılması	36
5.3 Numunelerin İndüksiyon Isıl İşlemi	41
5.4 Mikro Sertlik Testi.....	43
5.5 Çekme Testi	45
5.6 Eğme Testi	45
5.7 Mikroyapı İncelenmesi	46
5.8 SEM / EDX Analizi	47

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	49
6.1 Mikrosertlik Deneyi Sonuçları.....	49
6.1.1 Al6061 – AlSi5 Kaynaklı Numunelerin Mikrosertlik Sonuçları	49
6.1.2 Al6061-T6 – AlSi5 Kaynaklı Numunelerin Mikrosertlik Sonuçları.....	53
6.1.3 Al6061 – AlSi12 Kaynaklı Numunelerin Mikrosertlik Sonuçları	57
6.1.4 Al6061-T6 – AlSi12 Kaynaklı Numunelerin Mikrosertlik Sonuçları.....	61
6.1.5 Numunelerin Mikrosertlik Testi Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	65
6.2 Mikroyapı İncelemesi Sonuçları	80
6.2.1 Al6061 – AlSi5 Numunelerinin Mikroyapı Sonuçları	80
6.2.2 Al6061-T6 – AlSi5 Numunelerinin Mikroyapı Sonuçları	91
6.2.3 Al6061 – AlSi12 Numunelerinin Mikroyapı Sonuçları	105
6.2.4 Al6061-T6 – AlSi12 Numunelerinin Mikroyapı Sonuçları	120
6.3 SEM / EDX Analizi Sonuçları	135
6.3.1 Al6061 – AlSi5 Numunelerinin SEM Sonuçları.....	135
6.3.2 Al6061-T6 – AlSi5 Numunelerinin SEM Sonuçları.....	137
6.3.3 Al6061 – AlSi12 Numunelerinin SEM Sonuçları.....	139
6.3.4 Al6061-T6 – AlSi12 Numunelerinin SEM Sonuçları.....	141
6.3.5 EDX Analizi Sonuçları	143
6.4 Çekme Deneyi Sonuçları	145
6.5 Eğme Testi Sonuçları	153
7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	162
8. KAYNAKLAR	165
ÖZGEÇMİŞ	170

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Saf alüminyumun soğuk çekilmesi [14].....	7
Şekil 2.2: Marine sanayinde alüminyum kullanımı	9
Şekil 2.3: Audi A8 modelinin alüminyum parçaları [16]	10
Şekil 2.4: Isı Kalkanı [16]	11
Şekil 3.1: Kaynaklı parçalardaki ısı bölgeleri [21]	14
Şekil 3.2: TIG Kaynak yönteminin şematik gösterimi [14].....	20
Şekil 3.3: Su soğutmalı TIG kaynak ekipmanının temel elemanları [22].....	21
Şekil 3.4: TIG Kaynak torcu ve elemanları [22].....	22
Şekil 3.5: Akım türlerine göre oluşan kaynak biçimleri a) DCEP b) Alternatif Akım c) DCEN [16].....	24
Şekil 5.1: Al6061 ve Al6061-T6 malzemeleri kaynaksız görseli	36
Şekil 5.2: Numunelere freze tezgahında kaynak ağzı açılması	36
Şekil 5.3: V Kaynak ağzı açılmış plakalar	37
Şekil 5.4: Lincoln Electric Square Wave TIG-355 kaynak makinesi	39
Şekil 5.5: TIG Kaynak işlemi a) öncesi ve b) sonrası	39
Şekil 5.6: TIG Kaynak ile birleştirilmiş numuneler a) Al6061 - AlSi5 b) Al6061-T6 - AlSi5 c) Al6061 – AlSi12 d) Al6061-T6 – AlSi12.....	40
Şekil 5.7: Kaynak işleminden sonra numune yüzeyi temizleme işlemi.....	40
Şekil 5.8: 10x10x110 mm Boyutunda ki numunelerin a) Şeması b) Görüntüsü	41
Şekil 5.9: İndüksiyon ısıtma işlemi cihazı	42
Şekil 5.10: İndüksiyon ısıtma işlemi yapımı.....	43
Şekil 5.11: Metkon marka zımparalama cihazı.....	43
Şekil 5.12: Vickers mikro sertlik testi ölçümü.....	44
Şekil 5.13: Sertlik testlerinin yapıldığı mikro sertlik cihazı	44
Şekil 5.14: Çekme testlerinin yapıldığı çekme cihazı.....	45
Şekil 5.15: Eğme testlerinin yapıldığı eğme cihazı.....	46
Şekil 5.16: Mikroyapı incelemesinin yapıldığı mikroskop	47
Şekil 5.17: SEM/EDX İncelemesinin yapıldığı cihaz.....	48
Şekil 6.1: TIG Kaynaklı numunenin bölgeleri.....	49
Şekil 6.2: Al6061- AlSi5- Isıl işlemsiz	50
Şekil 6.3: Al6061- AlSi5- 185 °C 3 dk	50
Şekil 6.4: Al6061- AlSi5- 185 °C 6 dk	51
Şekil 6.5: Al6061- AlSi5- 185 °C 9 dk	52
Şekil 6.6: Al6061- AlSi5- 350 °C 3 dk	52
Şekil 6.7: Al6061- AlSi5- 350 °C 6 dk	53
Şekil 6.8: Al6061-T6- AlSi5- Isıl işlemsiz	54
Şekil 6.9: Al6061-T6- AlSi5- 185 °C 3 dk	54
Şekil 6.10: Al6061-T6- AlSi5- 185 °C 6 dk	55
Şekil 6.11: Al6061-T6- AlSi5- 185 °C 9 dk	56
Şekil 6.12: Al6061-T6- AlSi5- 350 °C 3 dk	56
Şekil 6.13: Al6061-T6- AlSi5- 350 °C 6 dk	57
Şekil 6.14: Al6061- AlSi12- Isıl işlemsiz	58
Şekil 6.15: Al6061- AlSi12- 185 °C 3 dk	58
Şekil 6.16: Al6061- AlSi12- 185 °C 6 dk	59
Şekil 6.17: Al6061- AlSi12- 185 °C 9 dk	60

Şekil 6.18: Al6061- AlSi12- 350 °C 3 dk	60
Şekil 6.19: Al6061- AlSi12- 350 °C 6 dk	61
Şekil 6.20: Al6061-T6- AlSi12- Isıl işlemsiz	62
Şekil 6.21: Al6061-T6- AlSi12- 185 °C 3 dk	62
Şekil 6.22: Al6061-T6- AlSi12- 185 ° 6 dk	63
Şekil 6.23: Al6061-T6- AlSi12- 185 °C 9 dk	63
Şekil 6.24: Al6061-T6- AlSi12- 350 °C 3 dk	64
Şekil 6.25: Al6061-T6- AlSi12- 350 °C 6 dk	65
Şekil 6.26: Al6061-AlSi5 185 °C mikrosertlik değerleri.....	65
Şekil 6.27: Al6061-AlSi5 350 °C mikrosertlik değerleri.....	66
Şekil 6.28: Al6061-T6-AlSi5 185 °C mikrosertlik değerleri.....	67
Şekil 6.29: Al6061-T6-AlSi5 350 °C mikrosertlik değerleri.....	67
Şekil 6.30: Al6061-AlSi12 185 °C mikrosertlik değerleri.....	68
Şekil 6.31: Al6061-AlSi12 350 °C mikrosertlik değerleri.....	69
Şekil 6.32: Al6061-T6-AlSi12 185 °C mikrosertlik değerleri.....	69
Şekil 6.33: Al6061-T6-AlSi12 350 °C mikrosertlik değerleri.....	70
Şekil 6.34: Al6061-AlSi5 Isıl işlemsiz ve 185 °C indüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin mikrosertlik değerleri.....	71
Şekil 6.35: Al6061-AlSi5 350 °C indüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin mikrosertlik değerleri	72
Şekil 6.36: Al6061-AlSi12 Isıl işlemsiz ve 185 °C indüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin mikrosertlik değerleri.....	73
Şekil 6.37: Al6061-AlSi12 350 °C indüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin mikrosertlik değerleri	74
Şekil 6.38: Isıl işlemsiz numunelerin mikrosertlik değerleri	75
Şekil 6.39: 185 °C – 3 dk Isıl işlemli numunelerin sertlik değerleri.....	76
Şekil 6.40: 185 °C - 6 dk Isıl işlemli numunelerin sertlik değerleri	77
Şekil 6.41: 185 °C - 9 dk Isıl işlemli numunelerin sertlik değerleri	78
Şekil 6.42: 350 °C – 3 dk Isıl işlemli numunelerin sertlik değerleri.....	79
Şekil 6.43: 350 °C - 6 dk Isıl işlemli numunelerin sertlik değerleri	80
Şekil 6.44: Isıl işlemsiz a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü	83
Şekil 6.45: 185 °C 3 dk Isıl işlemli a) Geçiş bölgesi 50x b) Geçiş bölgesi 100x c) Kaynak bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü	85
Şekil 6.46: 185 °C 6 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.....	88
Şekil 6.47: 185 °C 9 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.....	91
Şekil 6.48: Isıl işlemsiz a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü	94
Şekil 6.49: 185 °C 3 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.....	96
Şekil 6.50: 185 °C 6 dk Isıl işlemli a) Geçiş bölgesi 50x b) Geçiş bölgesi 100x c) Kaynak bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü	98

Şekil 6.51: 185 °C 9 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.....	101
Şekil 6.52: 350 °C 3 dk Isıl işlemli a) Geçiş bölgesi 50x b) Geçiş bölgesi 100x c) Kaynak bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü	103
Şekil 6.53: 350 °C 6 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.....	105
Şekil 6.54: Isıl işlemsiz a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü	108
Şekil 6.55: 185 °C 3 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.....	110
Şekil 6.56: 185 °C 6 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.....	113
Şekil 6.57: 185 °C 9 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.....	115
Şekil 6.58: 350 °C 3 dk Isıl işlemli a) Geçiş bölgesi 50x b) Geçiş bölgesi 100x c) Kaynak bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü	117
Şekil 6.59: 350 °C 6 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.....	120
Şekil 6.60: Isıl işlemsiz a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü	122
Şekil 6.61: 185 °C 3 dk Isıl işlemli a) Geçiş bölgesi 50x b) Geçiş bölgesi 100x c) Kaynak bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü	124
Şekil 6.62: 185 °C 6 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.....	127
Şekil 6.63: 185 °C 9 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.....	129
Şekil 6.64: 350 °C 3 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.....	132
Şekil 6.65: 350 °C 6 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.....	135
Şekil 6.66: Isıl işlemsiz a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları	136
Şekil 6.67: 185 °C 6 dk Isıl işlemli a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x c) Esas metal bölgesi 1000x d) Esas metal bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.....	137
Şekil 6.68: Isıl işlemsiz a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları	137

Şekil 6.69: 185 °C 6 dk Isıl işlemli a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x c) Esas metal bölgesi 1000x d) Esas metal bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.....	138
Şekil 6.70: 350 °C 6 dk Isıl işlemli a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.....	139
Şekil 6.71: Isıl işlemsiz a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları	139
Şekil 6.72: 185 °C 6 dk Isıl işlemli a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x c) Esas metal bölgesi 1000x d) Esas metal bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.....	140
Şekil 6.73: 350 °C 6 dk Isıl işlemli a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.....	141
Şekil 6.74: Isıl işlemsiz a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları	141
Şekil 6.75: 185 °C 6 dk Isıl işlemli a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x c) Esas metal bölgesi 1000x d) Esas metal bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.....	142
Şekil 6.76: 350 °C 6 dk Isıl işlemli a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.....	143
Şekil 6.77: a) EDX Analizi yapılan alan b) Kaynak bölgesi EDX sonuçları c) Esas metal bölgesi EDX sonuçları.....	145
Şekil 6.78: Al6061-AlSi5 Numunelerinin çekme gerilmesi değerleri	147
Şekil 6.79: Al6061-T6-AlSi5 Numunelerinin çekme gerilmesi değerleri	148
Şekil 6.80: Al6061-AlSi12 Numunelerinin çekme gerilmesi değerleri	148
Şekil 6.81: Al6061-T6-AlSi12 Numunelerinin çekme gerilmesi değerleri	149
Şekil 6.82: Isıl işlemsiz numunelerin çekme gerilmesi değerleri	150
Şekil 6.83: 185 °C 3 dk İndüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin çekme gerilmesi değerleri. 150	
Şekil 6.84: 185 °C 6 dk İndüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin çekme gerilmesi değerleri. 151	
Şekil 6.85: 185 °C 9 dk İndüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin çekme gerilmesi değerleri. 151	
Şekil 6.86: 350 °C 3 dk İndüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin çekme gerilmesi değerleri. 152	
Şekil 6.87: 350 °C 6 dk İndüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin çekme gerilmesi değerleri. 152	
Şekil 6.88: Numunelerin çekme gerilmesi değerleri.....	153
Şekil 6.89: Al6061-AlSi5 Numunelerinin eğme testi değerleri.....	155
Şekil 6.90: Al6061-T6-AlSi5 Numunelerinin eğme testi değerleri	156
Şekil 6.91: Al6061-AlSi12 Numunelerinin eğme testi değerleri	156
Şekil 6.92: Al6061-T6-AlSi12 Numunelerinin eğme testi değerleri	157
Şekil 6.93: Isıl işlemsiz numunelerin eğme testi değerleri	158
Şekil 6.94: 185 °C 3 dk İndüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin eğme testi değerleri.....	158
Şekil 6.95: 185 °C 6 dk İndüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin eğme testi değerleri.....	159
Şekil 6.96: 185 °C 9 dk İndüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin eğme testi değerleri.....	159
Şekil 6.97: 350 °C 3 dk İndüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin eğme testi değerleri.....	160
Şekil 6.98: 350 °C 6 dk İndüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin eğme testi değerleri.....	161
Şekil 6.99: Numunelerin eğme testi değerleri.....	161

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Alüminyum Genel Özellikleri [12]	4
Tablo 2.2: Alüminyum Saflık Tasnifi [13]	4
Tablo 2.3: Saf alüminyumun oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri [14]	5
Tablo 2.4: Saf alüminyumda termal genleşme katsayısının (A) sıcaklık ile değişimi [12]..	6
Tablo 2.5: Saf alüminyumda ısı iletim katsayısının (k) sıcak ile değişimi [12]	6
Tablo 2.6: Al6061 alaşımının mekanik özellikleri [18].....	12
Tablo 3.1: Alüminyum ve alaşımlarının kaynak yöntemlerinde min. ve max. parça kalınlıkları [21]	19
Tablo 5.1: Al6061 Alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu	35
Tablo 5.2: Al6061 ve Al6061-T6 Alaşımının mekanik özellikleri	35
Tablo 5.3: AlSi12 ve AlSi5 kaynak tellerinin tipik analizi (%) [14].....	37
Tablo 5.4: AlSi12 ve AlSi5 Kaynak tellerinin mekanik özellikleri [14].....	38
Tablo 5.5: Kaynak parametreleri	38
Tablo 5.6: İndüksiyon ısıtma işlemi parametreleri	42
Tablo 6.1: Çekme deneyi sonuçları	146
Tablo 6.2: Eğme testi sonuçları	154

SEMBOL LİSTESİ

°C	: Derece santigrat
Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum oksit
DCEN	: Doğru akım elektro negatif
DCEP	: Doğru akım elektrot pozitif
GPa	: Gigapaskal
HV	: Vickers sertlik testi
ITAB	: Isı tesiri altındaki bölge
Mg	: Magnezyum
MIG	: Metal inert gaz
Si	: Silisyum
TIG	: Tungsten inert gaz
CMT	: Soğuk metal transfer

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca bana destek olan, değerli bilgi ve tecrübeleri ile yol gösteren Sayın Hocam Prof. Dr. Hakan ÇETİNEL'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmam süresince deney ve uygulamalarda benden desteğini esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Uğur ÇAVDAR, Doç. Dr. Mehmet AYVAZ, Dr. Öğr. Üyesi Türker TÜRKOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi olarak destekleyen ve yanımda olan sevgili Aileme sonsuz teşekkür ederim.

Balıkesir, 2024

Yunus Emre MERCAN



1. GİRİŞ

Alüminyum, günümüzde sahip olduğu çeşitli mekanik özelliklerden dolayı çelik alaşımlarının ardından en çok kullanım alanına sahip metallerdendir. Alüminyum bu kadar ekonomik ve ideal kılan; hafif olması, kolay işlenmesi ve şekil verilebilmesi, elektrik ve ısı iletkenliğinin oldukça iyi olması, korozyon direncinin iyi olması gibi özelliklere sahip olmasıdır [1]. Alüminyum sahip olduğu bu özelliklerin avantajlarından dolayı otomotiv, gıda, gemi inşa endüstrileri, inşaat ve mimari alanlarının dışında roket ve füze sistemlerinde farklı şekil ve oranlarda kullanılmaktadır [2]. Söz konusu alüminyum alaşımlarının kullanımının giderek artmasıyla birlikte işlenebilirlikleri de araştırılmaya devam etmektedir. Alüminyumun talaşlı imalat esnasında gösterdiği davranış ile diğer metallerin gösterdikleri davranışlar farklıdır. Alüminyum alaşımları ile işleme yapıldığında sıvanma davranışı ile karşılaşıldığından, kesici takımların üzerine yapışarak bu işlemi olumsuz etkilemektedir. Alüminyumun havacılık ve savunma sanayisinde ki kullanımına bakıldığında 2XXX ve 7XXX serisi alaşımlarının yanında, 6XXX serisi alaşımların kullanımı da oldukça ön plandadır [3].

Saf alüminyum oldukça yumuşak ve ısı iletkenliği iyi olan bir malzemedir. Alüminyuma az miktarda alaşım ilave etmek özelliklerini değiştirmek için yeterlidir [2]. Alüminyum soy olmayan bir metaldir ve oksijen ile birleşerek kısa zamanda Alimün (Al_2O_3) oluşur. Alüminyumun yüzeyinde oluşan bu tabaka sayesinde alüminyum alaşımları atmosferden gelen etkilere karşı direnç gösterir. Oluşan bu tabaka renksiz, amorf, ince ve su içerisinde kristalin yapısındadır. Tabakanın homojen ve sıkı olması korozyona karşı direnci artırmaktadır [4].

Alüminyum 6061 serisi alaşımlara bakıldığında kaynak yapılabilirliğin ve korozyon direncinin iyi olması sebebiyle kazan imalatında tercih edilmektedir. Diğer endüstriyel uygulamalarda ise denizcilik, otomotiv, spor aletleri, demiryolu vagon imalatında, hafifliğin ön planda olduğu perçin, kule ve boru gibi makine elemanlarının imalatında ve özellikle savunma ve havacılıkta yaygın olarak tercih edilmektedir [5].

Alüminyum kaynağı endüstri de yakıt depoları, basınç tankları, sıvılaştırılmış gaz bidonları, su tankları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında dikkat edilmesi gereken bazı durumlar vardır. Bunlardan biri, alüminyum ve alaşımlarının

yüzeyi ergime sıcaklığı (2050 °C) çok yüksek olan bir refrakter malzeme ile kaplıdır. Bu tabaka yüzeyi sıkı bir şekilde sarar ve oksitlenmenin önüne geçer. Yüzeyde bulunan bu oksit tabakası kaynak sıcaklığında ergimez ve kaynak bağlantısının dayanımını azaltır [4]. Dikkat edilmesi gereken problemlerden bir diğeri ise hava, hidrojen ve koruyucu gazların kaynak havuzunda sıkışmasıyla oluşan gözenekliliktir. Yüksek soğuma hızlarında bu gazların kaynak havuzundan çıkamamasıyla gözenek oluşur. Hidrojenin sıvı katı alüminyumlardaki çözünürlük farkı bunun nedeni olarak gösterilebilir [2].

Alüminyum ve alaşımlarının kaynağının çeliğin kaynağından ayıran fiziksel ve metalürjik özellikler vardır, bu nedenle bu alaşımların kaynağında bu özelliklere dikkat edilip önlem alınması gereklidir. Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında son yıllarda gazaltı kaynak yöntemleri daha fazla tercih edilmektedir. Bu malzemelere uygulanan TIG ve MIG kaynak yöntemleri, kaynak bölgesinin mikro yapı ve mekanik özellikleri açısından karşılaştırıldığında TIG kaynak yöntemi daha çok tercih edilmektedir. TIG kaynak yönteminde kaynak amperi, kaynak hızı, kaynak dolgu teli ve gaz debisi gibi parametrelerin kontrolü mekanik özellikleri etkilemektedir. Alüminyum ve alaşımlarının birleştirmesinde TIG kaynağının tercih edilmesinin bir diğer nedeni de ekonomik ve kolay uygulanabilir olmasıdır [6]. TIG kaynak yöntemi ısı iletimi yüksek olan alüminyum ve alaşımlarının birleştirmesinde oluşan çarpılmaları en aza indirmektedir [2].

Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirmek üzere ısıtıl işlem uygulanabilir. Isıl işlem, genelde kimyasal bileşimleri sabit tutulan metal ve alaşımlarının ısıtılıp soğutulmasıyla mekanik özelliklerini geliştirme işlemi olarak açıklanabilir. Alüminyum ve alaşımlarına yapılan ısıtıl işlemler ise malzemenin sertliğini ve mukavemeti artırmak için uygulanır ve çoğu zaman çökelme sertleştirme işlemleri ile sınırlıdır. Isıl işlemin ardından dayanımında ve sertliğinde artış görülmeyen alüminyum alaşımları soğuk deformasyon uygulanarak sertleştirilebilir [7]. Uygulanan ısıtıl işlemleriyle mekanik özellikleri artan bu alaşımların kullanım alanları da genişlemektedir [8]. Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan ısıtıl işlemlerden birisi de indüksiyon sinterleme işlemidir. Diğer yöntemler ile farklı bir yere sahip olan indüksiyon sinterleme işlemi, indüksiyon bobini ile manyetik parça üzerinden geçirdiği indüksiyon akımı sayesinde parçanın sıcaklığı artmaktadır. Bu sıcaklık değişimi çok kısa sürede gerçekleşmesi diğer yöntemlere göre tercih edilme nedenlerindendir [9].

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

2.1 Alüminyumun Genel Özellikleri

Alüminyumun, saflaştırması zor bir element olması nedeniyle 19. Yüzyılın başlarında keşfedilebilmiştir. Ayrıca alüminyum dünya üzerinde en çok bulunan ikinci metaldir. Resmi olarak keşfi 1825'te Danimarkalı Hans Christian Ørsted tarafından yapılsa da 1807 yılında İngiliz Humphry Davy, alüminyum elementinin dünya yüzeyinde var olduğu tahminin de bulunarak henüz keşfetmediği bu metale 'Aluminium' adını vermiştir. Alüminyum alaşımlar sahip olduğu yüksek korozyon direnci, hafifliği ve kaynak yapılabilirliği gibi özellikleri sayesinde metal sektöründe çelik kullanımına alternatif olmuşlardır. Çeliklerden sonra en çok kullanılan metallerden olmasının başlıca sebeplerinden biri yoğunluk olarak çeliğin yaklaşık 1/3'ü kadar olmasıdır. Alüminyum yoğunluğu 2.7g/cm³'tür. Çeliklerden yumuşak olmasına rağmen rijitlik ve özgül dayanım açısından çelik malzemelerle rekabet edebilmektedir [10].

Mukavemeti, iyi elektrik ve ısı iletkenliği, korozyona karşı dirençli olması gibi özelliklere sahip olan alüminyum otomotiv, inşaat, uzay ve havacılık birçok önemli sektörde kullanım yeri bulmaktadır. Alüminyumun saflık derecesi mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Sertlik değeri safiyet derecesine bağlı olarak 15 ile 24 Brinell değerleri arasında değişirken alaşımlarda bu değer 120 Brinell'e kadar çıkabilmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının üzerinde doğal olarak bulunan ve metali korozyon etkilerinden koruyan Alümina malzemesi de yine saflık derecesi ile doğru orantılıdır [10]. Ayrıca alüminyum oldukça iyi şekillendirme kabiliyetine sahiptir ve şekillendirmeden sonra üstün yüzey kalitesi elde edilebilir, bu nedenle mühendislik malzemesi olarak oldukça geniş kullanım yerine sahiptir [11].

Aşağıda alüminyum genel özelliklerini içeren Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: Alüminyum Genel Özellikleri [12].

Özellik	Değer
Sembol	Al
Atom No	13
Atom Ağırlığı	26.97 g/mol
Kristal Yapısı	YMK (a=4.091 Å)
Yoğunluğu (25 °C)	2.7 g/cm ³
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150-300 °C
Buharlaştırma Noktası	2450 °C
Ergime Noktası	660 °C
Isısal Genleşme	23.6x10.6 (20-100 °C)
Özgül Isı	0.224 cal/g (100 °C)
Ergime Gizli Isısı	94.5 cal/g
Elastik Modül	7.2
Kayma Modülü	2.7
Çekme Dayanımı	4-9 kg/mm ²
Akma Dayanımı	1-3 kg/mm ²
% Uzama	60
Kopma Uzaması	%30- 40
Çentik Darbe Tokluğu	10 kg/cm ²

2.2 Saf Alüminyum Özellikleri

Alüminyum saflığında belirli sınırlar olmamasına rağmen kullanılmakta olan tasnif Tablo 2.2’de verilmiştir [13].

Tablo 2.2: Alüminyum Saflık Tasnifi [13].

% Alüminyum Miktarı	Verilen İsim
99.50 – 99.79	Ticari Saflık
99.80 – 99.949	Yüksek Saflık
99.950 – 99.9959	Süper Saflık
99.9960 – 99.9990	Aşırı Saflık
+99.9990	Ultra Saflık

Demir, silisyum, titan, çinko ve bakır saf alüminyum özelliklerini en fazla etkileyen katkı maddeleridir. %99,50 ve daha fazla safiyet derecesine sahip alüminyum özellikleri aşağıda verilmiştir [13].

2.2.1 Mukavemet Özellikleri

Mukavemet açısından bakıldığında saf alüminyumun dinamik mukavemeti ile statik mukavemeti arasında yaklaşık olarak 0,4 ile 0,45'lik bir oran vardır. Eğer soğul şekil değiştirmiş bir alüminyum kaynaklarsa, geçiş bölgesinin mukavemeti düşer. Alüminyum metalinin saflığı azaldıkça sünekliği azalmakta ve mukavemeti artmaktadır. Metal sıcaklığı artış gösterdiğinde saf alüminyumun elastisite modülü ve akma mukavemeti azalır. Alüminyum alaşımlarının ve saf alüminyumun Poison oranı 0,33 ve elastisite modülleri 70 Gpa civarındadır [14].

Tablo 2.3: Saf alüminyumun oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri [14].

% Saflık	Akma Mukavemeti MPa	Çekme Mukavemeti MPa	% Uzama
99,99	10	45	50
99,8	20	60	45
99,6	30	70	43

Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler ile mukavemet, sertlik, tokluk gibi mekanik özellikler geliştirilebilir. Bu tarz işlemler ile mekanik özelliklerinin gelişmesi de alüminyum ve alaşımlarının daha fazla kullanılabilir olmasını sağlamaktadır [14].

2.2.2 Fiziksel Özellikleri

Kübik yüzey merkezli kafes yapısında katılaştıran alüminyumun, ergiyene kadar kafes yapısı değişmemektedir. Sahip olduğu KYM kafes yapısı sayesinde metal yüksek süneklik kazanmaktadır. Oda sıcaklığında 2,7 g/cm³ olan alüminyum yoğunluğu, ergime sıcaklığı olan 660 °C'de ise 2.37 g/cm³ olmaktadır. Bu durumda ergime derecesinden sonra sıcaklık arttıkça, sıvı alüminyumun yoğunluğunun azaldığı söylenebilir. Aynı zamanda saf alüminyumun sıcaklığı arttığında ısı iletim katsayısı azalırken elektrik iletkenliği ve termal genleşme katsayısı artmaktadır [12].

Tablo 2.4: Saf alüminyumda termal genleşme katsayısının (A) sıcaklık ile değişimi [12].

Sıcaklık (°C)	A 10^{-6} K^{-1}
20	23
77	24,1
127	24,9
227	26,5
327	28,2
427	30,4
527	33,5
627	37,3

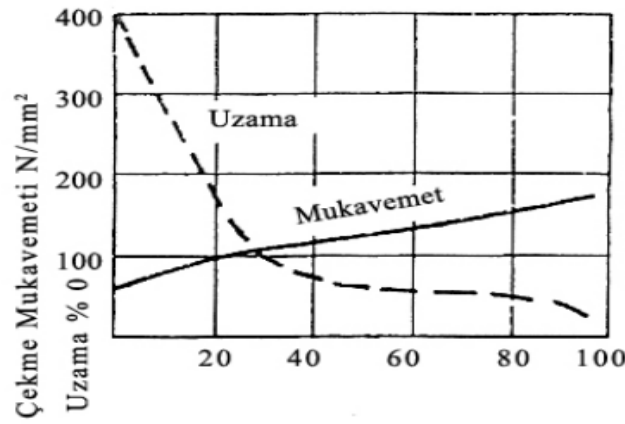
Tablo 2.5: Saf alüminyumda ısı iletim katsayısının (k) sıcak ile değişimi [12].

Sıcaklık (°C)	k $\text{W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
0	2,36
10	2,40
25	2,37
50	2,39
200	2,37
300	2,33
400	2,26
500	2,19
600	2,12
660	2,08

2.2.3 Soğuk ve Sıcak Şekil Değiştirme

Alüminyum ve alaşımlarına uygulanan haddeleme, dövme, döküm, ekstrüzyon, kesme ve eğme gibi işlemler ile kolayca şekillendirilebilir. Kolay şekil verilebilmesinde yüzey merkezli kübik yapıda olması da etkilidir. 0,007 mm Kalınlığa kadar üretilebilen alüminyum grubu alüminyum folyo olarak kullanılabilir. Toksik etkisi olmaması ve koku üretmemesi gibi özelliklerinden dolayı ürünlerin paketlemesinde tercih edilmektedir [15]. Oda sıcaklığında soğuk şekil değiştirdiğinde çekme ve akma mukavemeti yükselen alüminyumun, uzama miktarı ve şekil değiştirme becerisi azalır. Bu artma veya azalma da alüminyumun şekil değiştirme derecesinin etkisi vardır. Alüminyum sahip olduğu şekil değiştirme derecesi korozyon mukavemetini de etkilemektedir [14]. 10^{-6} K^{-1}

Alüminyumun sıcak şekil değiştirmesine profillerin, boruların ve sacların sıcak olarak bükülmesi örnek verilebilir. Alüminyuma 300 – 450 °C arası sıcak şekil değiştirme işlemi yapılabilir. Önce soğuk şekil değiştirmiş alüminyum parçaya daha sonra sıcak şekil değiştirme işlemi uygulanabilir fakat mukavemette düşüş görülür. Alüminyum ve alaşımları, soğuk şekil verme işlemi esnasında pekleşme gösterir. Şekil 2.1’de saf alüminyumun soğuk şekil değiştirme derecesine göre, uzama miktarı ve çekme mukavemetinde ki değişim verilmiştir [14].



Şekil 2.1: Saf alüminyumun soğuk pekleşmesi [14].

2.2.4 Kimyasal Özellikleri

Yüksek kimyasal aktiviteye sahip olan alüminyumun karbon, oksijen, halojenler ve kükürt ile bileşiklerinin oluşum enerjisi oldukça yüksektir. Havada ince fakat sıkı bir oksit tabakası ile kaplı olan alüminyum elektron mikroskobu ile incelendiğinde bu örtünün gözeneksiz olduğu görülmüştür ve bu tabaka malzemeye yüksek bir korozyon direnci kazandırmaktadır. Bu koruyucu tabaka yaklaşık olarak 0.2 mm kalınlığındadır. Alüminyum oksitlenmesi ergime noktasının üzerindeki sıcaklıklarda daha hızlıdır. Alüminyum ve alaşımlarında kalsiyum, magnezyum, silisyum, bakır ve sodyumun varlığı oksidasyon eğilimini artırır. Özellikle Al-Mg alaşımları ısıtıldığında kolaylıkla oksitlenir. Alüminyumun oksijen ile olan reaksiyonu oldukça kuvvetli bir ekzotermiktir ve çok fazla ısı vermektedir (400 kcal/g.mol) [12].

2.2.5 Korozyon Özellikleri

Alüminyumun oksijene olan ilgisinden dolayı kısa bir zaman da oksijen ile birleşir ve Alümin (Al₂O₃) oluşturur. Bu tabaka yaklaşık 635x10⁻⁹ cm kalınlığındadır ve yüzeyin gri

renkte görünmesine neden olur. Alüminyumun korozif etkilere karşı koruyan bu oksit tabakası su ile yıkama suretiyle çıkmaz. Alüminyumun yüzeyinde ki oksit tabakası kuvvetli bağ oluşturur ve çelikte olduğu gibi paslanma ve kabuk atma yapmaz [13].

Oksit tabakası sayesinde oluşan direncin yetersiz kaldığı durumlarda ise eloksal kaplama yapılır. Bu kaplama türü elektrokimyasal bir işlemdir ve genelde asitli çözeltilerde doğru akım kullanarak yapılmaktadır. Elokmal kaplamadan dolayı alüminyum alaşımlarının korozyon direncinin yanında aşınma dayanımında da artış görülmektedir. Alüminyum alaşımları klorürlü ortamla karşılaştığında yüzeyinde yerel bir korozyon türü olan çukurcuk oluşur. Alüminyum alaşımlara çökeltme sertleşmesi yapıldığında ise tane sınırları korozyonu görmek daha muhtemeldir [16]. Alüminyum alaşımlarında görülen diğer korozyon türleri ise aşağıda listelenmiştir.

- Genel Korozyon
- Çukurcuk Korozyonu
- Taneler Arası Korozyon
- Pul Pul Dökülme Korozyonu
- Gerilmeli Korozyon
 - Hidrojen Gevrekliği
 - Elektrokimyasal Yayılma
- Filiform Korozyon
- Aralık Korozyonu
- Kavite Korozyonu
- Erozyon Korozyonu
- Birikme Korozyonu [16].

2.3 Alüminyum Kullanım Alanları

Alüminyum ve alaşımları imalat sanayinin neredeyse her alanında, enerji, ulaşım, inşaat ve tarım sektöründe gün geçtikçe artan miktarlarda kullanılmaya devam etmektedir. Alüminyum özellikle bakır ve demir yerine, ağırlığın azalması nedeniyle çelik konstrüksiyonlarda, taşıt araçlarında, imalat sanayinde, elektrik endüstrisi gibi birçok alan tercih edilmektedir. Alüminyum, döküm ve yassı mamul ihtiyaçlarının oldukça fazla olduğu otomotiv ve uçak uzay sektörlerinde de talep edilen bir üründür [14].

2.3.1 Marina Sanayi

Gemi yapımında çelik yerine alüminyum alaşımlarını kullanmanın avantajlardan ilki yaklaşık %60'lık hafiflik sağlanmasıdır. Bu sayede yolcu kapasitesin arttırılabilir. Diğer avantajları ise manyetik olmaması ve korozyon direncinin iyi olmasıdır. Fakat dezavantaj olarak bakıldığında üretim ve yatırım maliyetinin yüksek olması gösterilebilir. Gelişen denizcilik endüstrisinde deniz nakliyesinde yüksek verimlilik ve hızlı yolcu gemileri istenmesi nedeniyle, 5XXX serisi alüminyum alaşımlarının gemi gövdelerinde kullanımı artmıştır. Alüminyum alaşımları düşük yoğunluğu nedeniyle teknenin kütle merkezini aşağıya çekmesiyle dengeli bir yapı oluşturmaktadır. Bu nedenle tekne yapımında oldukça tercih edilmektedir [16].



Şekil 2.2: Marine sanayinde alüminyum kullanımı.

2.3.2 Uçak ve Uzay Endüstrisi

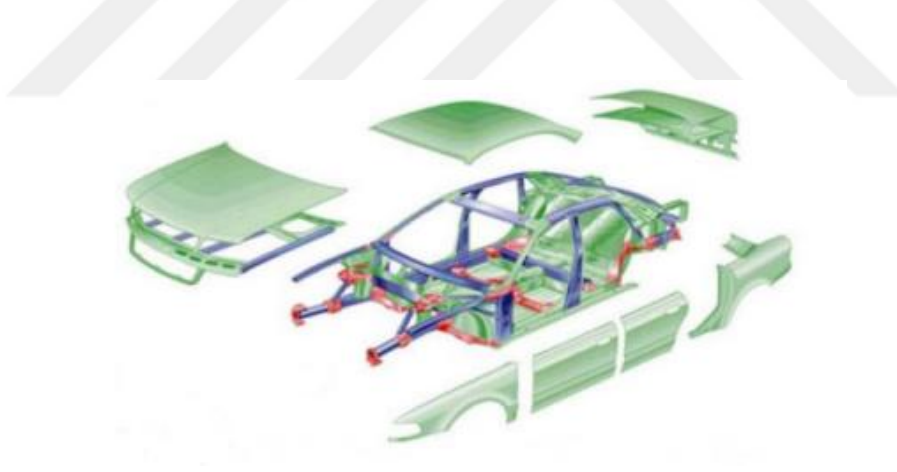
Uçak ve uzay endüstrisi diğer sektörlere göre daha hassas çalışılması gereken bir sektör olması nedeniyle, yüksek mukavemet, iyi korozyon direnci ve yüksek kırılma tokluğu özelliklerini gerektirir. Bu şartları sağlamak amacıyla farklı temper şartlarında oldukça fazla alaşım geliştirilmiştir. Bu alaşımların kullanım alanları aşağıda verilmiştir [17].

- Pervaneler: 2025
- Roket Tankları: 2195, 2219, 2419
- Kanat ve uçak gövdesi kaplamaları: 2024 ve kaplamalı 2024, 7050 levha veya ekstrüzyon ürünleri

- Motor bileşenleri: 2618
- Kanat Yapıları: 2197, 7049, 7175,7050
- Perçinler: 6053, 2117
- Uzay mekiği tankı benzeri kaynaklı yapılarda: 2195, 5456, 2219 [17].

2.3.3 Otomotiv Sektörü

Otomotiv sektöründe üreticiler karbon salınımı düşürmek için çalışmalar yürütmekte araçlarda hafiflik istenmektedir. Bu nedenle tercih edilen alüminyum alaşımlar sayesinde araçlarda hem yakıt tasarrufu sağlanmakta hem de emisyon salınımı azalmaktadır. Araçlarda şaside, taşıt kaportasında, güç aktarma organlarında ve gövde gibi bölümlerde kullanılarak sürüş dinamiklerinin artmasında rol oynamaktadır. Günümüzde araçlarda yolcu bölümünü kapsayan güvenlik kafesi, çarpışma esnasında yolcu güvenliği için önemli bir unsurdur. Bu nedenle çarpma sırasında araçta oluşan kinetik enerjiyi sönümleyip deforme olabilen alüminyum alaşımları kullanılmaktadır (Şekil 2.3). Enerjiyi sönümleme kabiliyeti çeliğe göre 3 kat fazla olan 5754 alüminyum alaşımı otomotiv sektöründe tercih edilmektedir [16].



Şekil 2.3: Audi A8 modelinin alüminyum parçaları [16].

Alüminyum alaşımları sahip olduğu özgül ısı kapasitesi, termal iletim katsayısı, yüksek yansıtıcı ve korozyon direnci özelliklerinden dolayı ısı kalkanı (Şekil 2.4) imalatında kullanım yeri bulmaktadır. Yine birçok otomotiv üreticisi bagaj ve ön kaput imalatında alüminyum alaşımlarını kullanmaktadır [16].



Şekil 2.4: Isı Kalkanı [16].

2.3.4 Bina ve Konstrüksiyon

Alüminyum inşaat iskelelerinde, merdivenlerde, çatı iskeletinde, binaların cephe kaplamalarında, çatılarında, kapı ve pençelerinde, köprü, kule gibi alanlarda oldukça fazla tercih edilmektedir. Çeliğe göre pahalı olmasının rağmen sağladığı hafiflik, korozyon direnci, yapılarda mimari tasarım gibi avantajları sayesinde kullanımı yaygındır. Alüminyum sağlam olmasının yanında kaplama ve boyama yapılabilmesi ile de inşaat sektöründe bir seçenek haline gelmiştir [12].

2.3.5 Mühendislik Uygulamaları

Kâğıt, lastik, petrol, kömür madeni gibi sanayi alanında kullanılan makine ve teçhizatla alüminyum oldukça fazla tercih edilmektedir. İyi korozyon direnci, kolay işlenebilmesi ve yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip olması alüminyumun, makine elemanları uygulamalarında kullanımını artırmaktadır. Yüksek toleranslarda işlenebilmesinden dolayı standart birimlerden büyük yapılar elde etmek mümkündür. Alüminyumun ekstrüzyonu sayesinde karmaşık parçalar üretilebilir. Alüminyumun döküm uygulamalarıyla ise motor blokları, silindir kafaları ve vites kutuları elde edilebilir. Krank mili yataklarının uzun ömürlü olması amacıyla alüminyum kullanılması son uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır [13].

2.4 Al6061 Alaşımı

Al6061 alaşımı, yoğunluğunun düşük olması, iyi korozyon direnci, çok iyi mukavemet ve yüksek tokluk gibi özelliklerinden dolayı uzay ve havacılık sektöründe oldukça popülerdir. Kaynak kabiliyetinin iyi olması sebebiyle kazan imalatında da kullanım yeri bulmaktadır

[18]. İşlenmiş yüzey kalitesinin iyi olması sayesinde otomotiv, spor aletleri, denizcilik gibi alanlarda tercih edilmektedir [5]. Al6061 alaşımının içerdiği bazı elementler ve bu elementlerin ortaya koyduğu etkileri aşağıda verilmiştir.

Magnezyum: Katı çözelti sertleşmesi meydana getirmesinin yanında Si-Al alaşımlarında kullanıldığında dayanımın artmasına yardımcı olur.

Silisyum: Alaşımdaki akışkanlığın artmasını sağlar.

Çinko: Tek başına yüksek miktarda kullanıldığında soğuk çekme ile birlikte sıcak çatlama oluşur. Diğer alaşım elementlerin de ilavesiyle dayanımın artmasında katkı sağlar.

Demir: Alaşıma eklenmesi gevreklik artışına sebep olurken aynı zamanda alaşımın dayanımının ve sertliğinin artmasını sağlar.

Bakır: Alaşıma %12 oranında eklendiğinde alaşımın dayanımını arttırırken, bu oran arttığında ise alaşım gevreklik gösterir.

Mangan: Tokluk ve sünekliği arttırdığı gibi demirle birlikte kullanıldığında dökülebilirliğin de artmasını sağlar [18].

Tablo 2.6’da Al6061 alaşımına ait mekanik özellikler verilmiştir.

Tablo 2.6: Al6061 alaşımının mekanik özellikleri [18].

Özellikler	Değer
Yoğunluk (g/cm ³)	2.713
Ergime noktası (°C)	660
Kaynama noktası (°C)	2519
Termal İletkenlik (W/(m°K))	167
Özgül ısı (J/(g°C))	0,896
Elastisite modülü (GPa)	69
Çekme dayanımı (MPa)	310
Akma dayanımı (MPa)	270

Sertlik (Brinel)

30-50

Poisson oranı

0,33

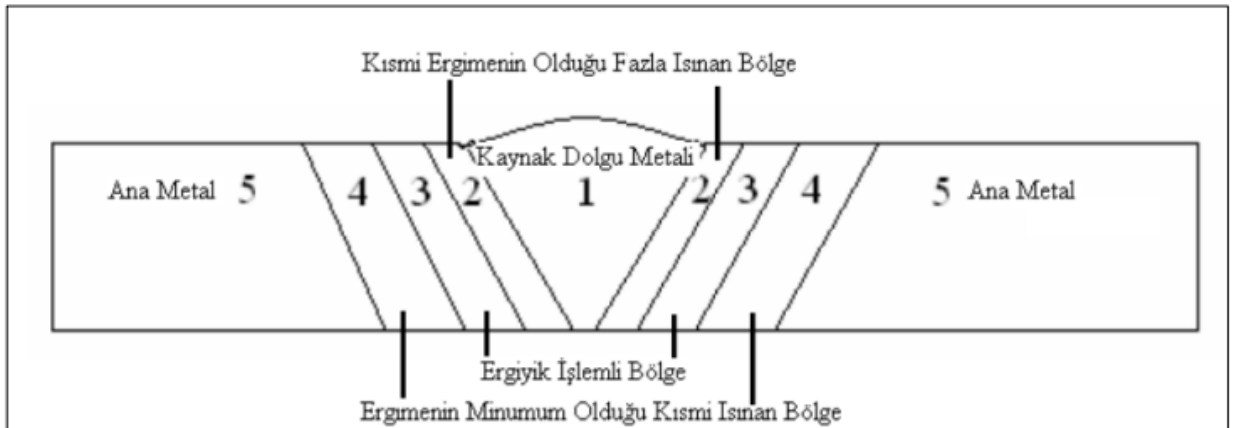
Al6061 Alaşımının bir diğer özelliği de çok yönlü ısıtım işlem görebilen bir alaşımdır. Aşağıda ise Al6061 alaşımdın ısıtım işlem gördüğünde aldığı isimlendirmeler verilmiştir [19].

- 6061-O: Tavlı (yumuşak veya bükülebilir durum.)
- Isıtım İşlem Görmüş 6061-T4 (doğal olarak eskitilmiş)
- Isıtım İşlem Görmüş 6061-T6 (yapay olarak yaşlandırılmış)
- Isıtım İşlem Görmüş 6061-T65 (yapay olarak yaşlandırılmış)
- Isıtım İşlem Görmüş 6061-T6511 (yapay olarak eskitilmiş) [19].

3. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ TIG KAYNAĞI

Endüstride oldukça fazla kullanılan alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmeleri, basınç esaslı ve ergitme esaslı olmak üzere iki yöntem ile yapılır. Yapılan birleşim işlemi sonrasında oluşan ITAB'daki metalürjik değişimler, oluşan yüksek ısıl genleşme nedeniyle çarpılma ve kalıntı gerilmeler ortaya çıkar [16]. Alüminyum ve alaşımlarının kaynak işlemi, çeliğin kaynak işlemine göre sorunlu ve oldukça zordur [20]. Bunların sonucunda ise alüminyum alaşımların kaynaklı birleştirmelerinde birçok problemle karşılaşılır.

Gaz altı kaynak işlemleriyle en kolay kaynak yapılabilen alüminyum malzemeler; 1 ,3 ve 5 serisi dövme alüminyumlardır. Ayrıca bu gruba ısıl işlem uygulanamamaktadır. Isıl işlemin uygulanabildiği 2 ve 4 serisinin kaynağı ise özel kaynak teknikleri kullanarak yapılabilmektedir. 7XXX Serisine ait, ısıl işlem yapılabilen 7075 ve 7178 alaşım malzemeler ise kaynak işleminin oldukça zor yapıldığı alaşımlardır. Bu alaşımların ITAB bölgesinde ki sertliği, ana metale kıyasla daha fazla olabilmektedir. Ayrıca kaynak işlemi yapıldığında yüksek sıcaklıktan dolayı çatlama meydana gelebilmektedir. Alüminyum alaşımlarının kaynağının zor olmasının temel nedenlerinden biri de, yapısal olarak farklı olan bölgelere sahip olmasıdır (Şekil 3.1'de). Bu bölgesel yapı farklılıklarının ortaya koyduğu tesiri ortadan kaldırmak oldukça zordur [21].



Şekil 3.1: Kaynaklı parçalardaki ısı bölgeleri [21].

Şekilde bahsedilen bölgelere açıklayacak olursak;

1. Kaynak dolgu malzemesi
2. Fazla ısınmış, kısmi ergimiş bölge

3. Ergiyik bölge
4. Sıcaklığın 200-300 °C'ye varabildiği ısıdan etkilenmiş bölge
5. Esas metal bölgesi [21].

3.1 Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti

Alüminyum ve alaşımlarının kaynağı sırasında, sahip olduğu özelliklerden dolayı bazı problemlerle karşılaşmaktadır. Bu problemlerin önüne geçmek adına birleştirme işlemi öncesinde, sırasında ve sonrasında önlem alınmalıdır. Alüminyumun kaynak kabiliyetini etkileyen faktörler aşağıda verilmiştir [14].

Alüminyum alaşımların ergitme esaslı birleştirme yönteminde, porozite ve çatlak oluşumu oldukça fazla görülür. Yaşlandırma sertleşmesi yapılmış ve dayanımı yüksek alüminyum alaşımlarda, ITAB bölgesinin fazla yaşlandırılması ve sertleştirme çökeltilerinin çözülmesi sebebiyle dayanımda düşüş görülür. Porozite oluşumunun en önemli nedeni ise, ergimiş sıvı haldeki alüminyum alaşımlarının hidrojen çözünürlüğü, katı çözeltiye kıyasla daha fazladır. Kaynak havuzuna kaynak telinden veya iş parçasından geçen hidrojen, birleştirme işlemi sırasında çözünür ve katılaşma esnasında gaz kabarcığı meydana getirerek gözenek oluşturur. Bu nedenle kaynak işleminin ardının dolgu teli temizlenmeli ve nemsiz ortamlarda muhafaza edilmelidir. Ayrıca alüminyum alaşımlarının termal iletkenlik katsayısı fazla olduğundan, kaynaklı birleştirmeleri esnasında nüfuziyeti ve yetersiz ergime problemleri görülebilir. Bunun önüne geçmek için ise ön tavlama yapılabilir [16]. Sıcak çatlaklar genelde katılaşma aralığında ve katılaşma çizgisinin üzerinde oluşur. Bu nedenle ilave metali seçilirken katılaşma aralığının dar olmasına dikkat edilmelidir. İlave metali seçimi, dikiş çatlamaşının ortaya çıkmasında oldukça önemlidir. Çatlamayı en aza indirmek için kullanılan ana metalden daha yüksek alaşıma sahip ilave metal kullanılabilir. Örnek verilecek olursa 6061 alaşımı, yine 6061 ilave metal ile kaynak edildiğinde çatlamaya oldukça duyarlı olur. Bunun yerine 4043 ilave metal kullanılırsa kaynak işlemi kolaylaşır [14].

Alüminyumun havadaki oksijenle temasıyla yüzeyinde oluşan oksit tabakası sayesinde çok iyi korozyon direncine sahip olur. Alüminyum ve alaşımları, içerdikleri alüminyum elementlerine göre farklılık gösterse de, genelde 660°C'de ergirler. Fakat yüzeyde oluşan bu oksit tabakasının ergime noktası ise 2050°C gibi yüksek bir değerdir ve havadaki nemi emmesi ile daha kalın bir hal alabilir. Daha kalın duruma geçen oksit tabakası kaynak işlemi

esnasında ergimiş banyonun üzerinde yüzme eğilimi gösterir. Nem hidrojen içerdiğinden, hidrojen kaynak meteline geçer ve gözenek oluşabilir [14].

Alüminyumun kaynağı sırasında esas metalin ergime sıcaklığına geldiği fark edilemez çünkü alüminyum ısıtıldığında oksit tabakası nedeniyle tav rengi vermez. Bundan dolayı kaynak işlemi sırasında malzeme ısıtılmaya devam ederse esas metal ergir ve akmaya başlar. Bu nedenle kaynak dikişinin oluşumu zorlaşır. Alüminyumun ısı iletimi çelikten 3 ile 5 kat daha hızlıdır ve bu neden alüminyum ergitildiğinde çok fazla enerji harcanır. Alüminyumun kaynağında kalın kesitli bölge mevcut ise ön tavlama gereklidir. Ön tavlama 204 °C'yi geçmemelidir ve uzun süre bu işlem yapılmamalıdır. Alüminyumun sahip olduğu yüksek ısıl iletkenliğinin avantajı ise kaynak işleminden sonra kaynak bölgesinin çabuk soğumasıyla kaynak metali hızlı bir şekilde katılaşmaktadır [14].

Alüminyumun ısıl genleşmesine bakıldığında ise çeliğe kıyasla iki kat fazladır ve ergimiş halden katı hale geçerken kaynak metali kendini hacimce %6 oranında çekmektedir. Böylece boyutlarda değişim görülür ve bundan dolayı çatlama ve açılmalara çarpılma ortaya çıkar. Çarpılmaların ortaya çıkmasında paso sayısı, kaynak ağız biçimi ve kaynak hızının önemi oldukça fazladır. Yavaş kaynak hızları ısı girdisini arttırdığı için, parçaların kaynak işlemi sırasında iyi bir şekilde sabitlenmesi ve ağızlarda kayma olmaması gerekmektedir. Alüminyum manyetik olmadığı için kaynak sırasında ark üfleme gibi problem oluşturmaz [14].

Kaynak esnasında yabancı maddelerin yüzeyden kaldırılması ve geri gelemeyecek kadar uzaklaştırılması gerekir. Temizlik alüminyum alaşımlarının kaynağında önemli bir etken olup, temizlik işleminin kaynak öncesi başlayıp, kaynak boyunca da devam etmesi gereklidir. Temizleme için farklı yöntemler vardır, bazı durumlarda bunların bir arada kullanılması gerekebilir. Egeleme, fırçalama, zımparalama, çelik yünle ovalama veya planyalama gibi işlemlerin bulunduğu mekanik temizleme metodu sayesinde yüzeye yapışan metal buharları ve yüzeyde bulunan oksit temizlenmektedir. Diğer bir yöntem olan çözücü ile temizleme, kirleticilerin yüzeye fazla yapışmadığı durumlarda gres, yağ ve kir gibi maddelerin temizlenmesini sağlar. Diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sonuçlar veren kimyasal temizlemede ise, hidrojen içeren oksitten kaçınmak adına kurutmaya dikkat edilmelidir [9]. Temizleme işleminde kuvvetli fakat zehirli gaz yaymayan alkol ve aseton

gibi çözücüler kullanılmalıdır. Kaynak dikişinde gözenek oluşumunun önüne geçmek için temizlik işlemi özenle yapılmalıdır [14].

3.2 Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynak Çeşitleri

Alüminyum ve alaşımlarının birleştirmesinde birçok kaynak yöntemi kullanılır. Kaynak yöntemi, kullanılan alüminyum çeşidine göre farklılık gösterir. Alüminyum alaşımının içeriğine göre en uygun birleştirme yöntemi ve ilave tel seçimi yapılarak sağlıklı bir kaynak işlemi gerçekleştirilir. Bu kaynak yöntemlerinden aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

Ergitme Kaynağı Çeşitleri;

TIG Kaynağı: Kalitesi yüksek, bütün pozisyonlarda kullanabilen ve ergimeyen elektrod ile yapılmakta olan kaynak çeşididir. Kaynak metali oluşturmak amacı ile tercihe göre tel kullanılabilir. Birleştirme işlemi otomatik olarak veya el ile mekanize yapılabilir. Dolgu oranının düşük olduğu durumlarda kızgın tel kullanarak dolgu oranı yükseltilebilir. Doğru veya ters kutuplama uygulanabilir [13].

MIG Kaynağı: Yüksek kaliteli, ergiyen elektrod ile tüm pozisyonlara uygun bir kaynak yöntemidir. Kaynak yöntemi otomatik veya el ile mekanize olarak yapılabilir. Dolgu oranı yüksek olsa da bu oranı yükseltmek için iki tel uygulanabilir. Doğru veya ters kutuplama yapılabilir [13].

Örtülü Elektrod ile Ark Kaynağı: Bu kaynak yöntemi sınırlı oranda uygulanmakta olup gerilmesiz veya az gerilmeli bağlantılar oluşturabilir. Diğer kaynak yöntemlerine kıyasla alüminyum alaşımlarının kaynaklı birleştirmesi için eskisi kadar ekonomik değildir [13].

Gaz Ergitme Kaynağı (Oksi-asetilen): Kalitesi düşük kaynak metali veren ve gerilmesiz bağlantılar oluşan bir kaynak yöntemidir. Alüminyum alaşımları için ekonomik bir kaynak yöntemi değildir ve tamir amaçlı kullanılmaktadır [13].

Elektron Işın Kaynağı: Hızlı, hassas ve yüksek kaliteli bir birleştirme yöntemidir. Hassas olmasından dolayı uzay ve havacılık gibi alanlarda kullanılmaktadır. Yatırım maliyeti yüksektir [13].

Lazer Işın Kaynağı: Hızlı, hassas ve yüksek kaliteli bir birleştirme yöntemidir. Diğer yöntemde olduğu gibi hassasiyet gereken elektronik ekipman, uzay ve havacılık gibi alanlarda kullanılmakta ve yatırım maliyeti yüksek olmaktadır [13].

Elektrogaz – Tozaltı Kaynağı: Uygulama alanları kısıtlıdır. Otobüslerin kaporta kısımlarının kaynağında kullanılabilmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında ekonomik değildir [13].

Ergitme – Basınç Kaynağı Çeşitleri;

Manyetik Alan ile Arka Alın Kaynağı: Bu kaynak yöntemi boruların alın kaynağında kullanılmakta olup, yakma alın kaynağına kıyasla yatırım maliyeti daha düşüktür. Ayrıca tam otomatik uygulama da yapılabilmektedir [13].

Elektrik Direnç Kaynak Çeşitleri;

Nokta ve Dikiş Kaynağı: Mutfak eşyaları yapımında, otomotiv, uzay ve havacılık sektörlerinde genelde ince saç uygulamalarında bindirme bağlantılarında kullanılmaktadır. Yüksek verimli ve aynı zamanda yatırım maliyetlidir [13].

Kombine Bağlantı (Nokta ve Yapıştırma) Kaynağı: Nokta kaynağının ve yapıştırmanın beraber kullanıldığı bindirme bağlantılarında uygulanır. Otomotiv sektöründe tercih edilmekte ve mükemmel yorulma mukavemeti vermektedir [13].

Yüksek Frekans Endüksiyon Kaynağı: Saçtan yapılmış dikişli boru kaynağının alın birleştirmelerinde kullanılmaktadır. Üretim hızı yüksektir ve yüksek yatırım maliyeti gerektirir [13].

Yakma Alın Kaynağı: Çubuk, içi boş kesitli parçalar ve saçların alın birleştirmelerinde kullanılır. Yatırım maliyeti yüksektir ve seri üretime uygundur [13].

Saplama Kaynağı Çeşitleri;

Ark ile Saplama Kaynağı: Saplama yarıçapı 6 mm'yi geçmez. Kullanım alanı olarak otomobil kaporta pimleri, izolasyon pimleri, elektrik temas elemanları ve tava tutucuları gösterilebilir [13].

Katı Faz Kaynağı Çeşitleri;

Sürtünme Kaynağı: Kare, dikdörtgen veya dairesel kesitli çubuk parçaların alın birleştirmelerinde kullanılır. Belirli hızlarda dönen parçaların birbirlerine basınç altında birleştirilmesiyle gerçekleşir. Ekipmanları yüksek fiyatlıdır [13].

Patlamalı Kaynak: Ulusal ve uluslararası bölgelerde boru hatlarının sahada kaynak edilmesinde kullanılır. Yüzey kaplama işlerinde de (zırhlama) tercih edilmektedir [13].

Ultrasonik Kaynak: Saç ve folyo gibi malzemelerin bindirme birleştirmelerinde tercih edilmektedir [13].

Alüminyum ve alaşımlarının kaynağında iyi bir sonuç elde etmek için, iyi bir öne hazırlık yapılmalı kaynak edilecek parça ve alaşımı iyi analiz edilmelidir. Birleştirme işleminde kullanılacak ilave metal, dekapan gibi değişkenler kaynağa uygun seçilmelidir. Oluşabilecek olumsuzluklar önceden tahmin edilip bunlara uygun tedbirler alınmalıdır. Aşağıda verilen tablo 3.1’de alüminyum ve alaşımlarının kaynak çeşitlerine göre kullanılan parça kalınlıkları verilmiştir [13].

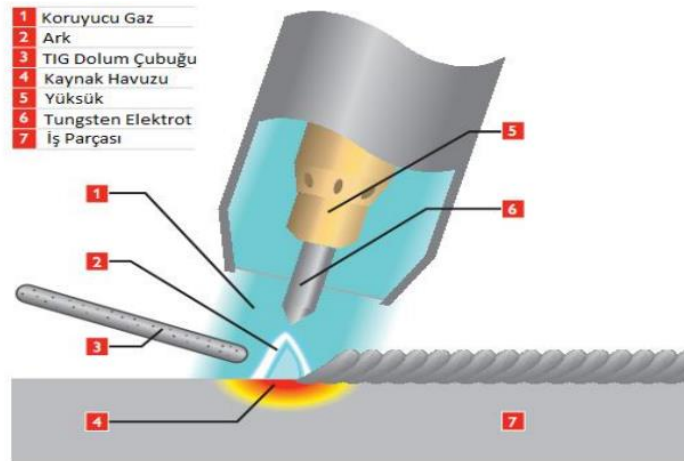
Tablo 3.1: Alüminyum ve alaşımlarının kaynak yöntemlerinde min. ve max. parça kalınlıkları [21].

Kaynak Yöntemi	Minimum Kalınlık (mm)	Maksimum Kalınlık (mm)
MIG	1.6	25
TIG	0.5	25
Oksi-asetilen	0.8	25
Örtülü Elektrod	3	25
Direnç Nokta	Folyo	4.75
Direnç Dikiş	0.25	4.75
Basınç Alım	0.4	20
Basınç Bindirme	Folyo	6
Ultrasonik	Folyo	3
Elektron Işın	0.6	160
Sert Lehimleme	0.15	2

3.3 TIG Kaynağı

TIG kaynağı ismini ‘Tungsten Inert Gas’ kelimelerinin baş harflerinden almış bir ark kaynağı şeklindedir. Alüminyum, titanyum, magnezyum gibi hafif metallerin birleştirilmesinde gayet uygun bir kaynak yöntemidir. Keşfi ikinci dünya savaşında Amerikan Havacılık Endüstrisinin alüminyum ve magnezyumdan oluşan parçaların birleştirmesini araştırması sonucuyla ortaya çıkmıştır. 1930 yılların sonlarına doğru Russel Meredith, magnezyum kaynağı için ilk TIG yöntemini gerçekleştirmiştir [14].

TIG kaynağı ilave metal verilerek yapılabilirdiği gibi ilave metal verilmeden de yapılabilen bir birleştirme yöntemidir. Kaynak torcundan çıkan gaz kaynak banyosunu, iş parçasını ve elektrotu atmosferden gelen zararlı etkilere korur. Bu kaynak yönteminde koruyucu gaz oldukça önemlidir. Kaynak bölgesinde koruma sağlanamadığı durumlarda kaynak metalinde hata görülebilir. Helyum ve argon gazları koruyucu gaz olarak tercih edilmektedir. Diğer yöntemlere kıyasla iyi kalitede kaynak dikişi alınan bu yöntemin şematik gösterimi şekil 3.2’de verilmiştir. TIG kaynak yönteminde enerji üreticinin ilk kutbu tungsten elektrotla bağlı iken diğer kutbu iş parçasına bağlıdır. Ark iş parçası ve tungsten elektrot arasında yanmaktadır. Aynı anda gaz memesinden püskürtülen koruyucu gaz yardımıyla ark banyosu korunur [14].



Şekil 3.2: TIG Kaynak yönteminin şematik gösterimi [14].

3.3.1 TIG Kaynağında Kullanılan Ekipmanlar

Güç Kaynağı

TIG kaynağında kullanılan güç kaynakları çoğu zaman düşük voltajlı ve sabit akımlıdır. TIG kaynağında hem alternatif hem de doğru akım kullanıldığı için akım üreteçleri bu iki akımı

The diagram illustrates the components and connections of a laser welding system. A gas cylinder (gaz tüpü) is connected to a gas inlet (gaz giriş) on the main unit, with a pressure gauge (manometre/debitmetre) in the line. The main unit, labeled 'DA veya A.A Güç ünitesi' (DA or A.A Power Unit), has a gas outlet (gaz çıkış) connected to a gas valve (gaz valfi). It also features a foot pedal (ayak pedali) and a work piece (iş parçası) held by a clamp (iş kısıkcısı). A torch (torç) is connected to the main unit via a cable (iş kablosu). The main unit is connected to a cooling unit (soğutma ünitesi) via a power cord (soğutma ünitesi güç kordonu). The cooling unit has a cooling inlet (soğutma giriş) and a cooling outlet (soğutma çıkış), which are connected to a cooling system (soğutma ünitesi) via an adaptor block (adaptör blok).

Şekil 3.3: Su soğutmalı TIG kaynak ekipmanının temel elemanları [22]

21



Şekil 3.4: TIG Kaynak torcu ve elemanları [22].

TIG Kaynak Elektrotu

TIG kaynak yönteminde ilave kaynak metali, elektrottan sağlanmamaktadır. Söz konusu bu elektrotlar erimeyen tip elektrotlardır ve ark oluşturmaya yararlar. Alaşımli elektrotlar, saf tungsten elektrotlar ve çizgili elektrotlar olarak üç gruba ayrılmaktadır. Düzgün bir ark oluşması için elektrotların uç kısımları son derece önemlidir ve aynı zamanda TIG kaynaktan iyi sonuç alınmasını sağlamaktadır. Elektrotlar farklı uç şekillerine sahip olabilirler bunlar; tam küresel biçim, yarı küresel biçim ve konik şekildir. Genellikle toryum alaşıma sahip tungsten elektrot imalatında konik uç kullanılmaktadır. Diğer tipler olan tam ve yarı küresel uçlar ise, saf ya da zirkonyum alaşıma sahip tungsten elektrot imalatında yer alır [22].

Dolgu Teli

Kaynak yapılacak metalin alaşımına ve cinsine göre seçimi yapılan dolgu teli, kaynağın sağlamlığı açısından oldukça önemlidir. Birleştirilen parçanın kaynak ağzını besleyerek verimli alaşım transferi olmasını sağlar. Farklı alaşım ve kalitelerde dolgu telleri bulunmaktadır [22].

3.3.2 TIG Kaynağının Avantajları ve Dezavantajları

Genel olarak bakıldığında TIG kaynağının avantajları şu şekildedir;

- Endüstride kullanılmakta olan neredeyse tüm metallerin kaynağında kullanılabilir.
- Punto kaynağı, aralıklarla kaynak veya sürekli kaynak dikişi istenildiği durumlarda hem manuel hem de otomatik olarak kullanılmaktadır.
- Pozisyon aralığı oldukça geniştir ve ince malzemelerin birleştirmesine elverişlidir.
- Kalitesi yüksek hata oranı az kaynak yapmak mümkündür.
- Dolgu teli kullanılarak veya kullanılmadan kaynak yapılabilir.
- Kaynak torcunun hafif olması sebebiyle çalışma imkânı rahattır.
- Cüruf veya çapak oluşmadığından birleştirme işleminden sonra temizliğe gerek yoktur.
- Farklı malzemelerin birleştirilmesine olanak sağlar [22].

Dezavantajları da şu şekilde sıralanabilir;

- Kalın kesitli parçaların birleştirmesinde yüksek maliyet ortaya çıkabilir.
- Metal yığılma hızı farklı birleştirme yöntemlerine göre daha düşüktür.
- Temiz yüzey gereklidir, bu nedenle kirliliklerin giderilmesi önemlidir.
- Koruyucu gaz gereklidir [22].

3.3.3 TIG Kaynak Uygulamaları

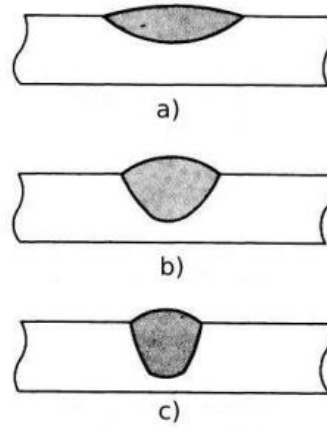
Kalın kesitli malzemelerin TIG kaynağı mümkün olsa da bu tür işlemler yüksek maliyet gerektirebilir. 5-6 mm kalınlıkta ki parçaların birleştirmesinde TIG kaynağı en uygun yöntemlerdendir. TIG kaynağı ile yüksek kalitede başarılı kaynaklar elde etmek mümkündür. Neredeyse tüm pozisyonlarda TIG kaynağı yapılabilir. Boru ve boru bağlantısı kaynakları için oldukça fazla tercih edilmektedir. Temiz ve kontrolü sağlanabilen bir işlem türüdür. Elle veya otomatik uygulanabilir [20]. TIG kaynağının kullanıldığı alanları bu şekilde sıralayabiliriz;

- Nükleer Endüstrisi
- Bakım ve Onarım İşleri
- Uçak Endüstrisi
- Otomobil Endüstrisi
- Gıda İşleme Endüstrisi
- Hassas Üretim Endüstrisi [20].

3.3.4 TIG Kaynağı Akım Türleri

TIG kaynağında temel olarak üç akım türü kullanılmaktadır.

- Alternatif Akım
- Doğru Akım Elektrot Pozitif (DCEP)
- Doğru Akım Elektrot Negatif (DCEN)



Şekil 3.5: Akım türlerine göre oluşan kaynak biçimleri a) DCEP b) Alternatif Akım c) DCEN [16].

Alternatif Akım

Alüminyum alaşımların TIG kaynaklı birleştirmelerinde kullanılan bu akım türü, kaynak sırasında olumsuz etkileri olan oksit tabakasını temizlemektedir. Bu tabakanın temizlenmesi diğer yöntemlerde daha maliyetlidir. Elektrot pozitifte döndükten sonra oksit tabakası ortadan kalkar ve sağlam kaynak dikişleri elde edilir [16].

Doğru Akım Elektrot Pozitif (DCEP)

Akım yönünün iş parçasından elektroda doğru olduğu akım türüdür. Isı yoğunlaşmanın %30'u iş parçasında gerçekleşirken geriye kalan %70'i elektrotta gerçekleşmektedir. Elektrot çapının kalın olması gereklidir. DCEN'ye göre kaynak hızı daha yavaştır. Diğer iki akım türüne göre yüzey temizliği en iyi akım türüdür [16].

Doğru Akım Elektrot Negatif (DCEN)

DCEN akım türünde akım yönü elektrottan iş parçasına doğrudur. Bu akım türünde ise ısı yoğunlaşmanın %70'lik kısmı iş parçasında oluşurken %30'u elektrotta oluşmaktadır. Küçük çaplı elektrotlar kullanılarak yüksek akımda kaynak yapma olanağı sunmaktadır. Kaynak hızı DCEP'ye göre daha fazladır [16].



4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışması süresince uygulanacak yöntemler, kullanılacak malzemeler ve yapılacak testler literatür taraması yapılarak incelenmiş olup oluşabilecek sorunlar kapsamlı olarak araştırılmıştır.

Haryadi ve diğerleri yürüttükleri çalışmalarında [23], Tıg kaynaklı Al6061 alaşımının mukavemetini artırmak üzere yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Al6061 plakalar ER4043 dolgu teli kullanılarak Tıg kaynak işlemi ile birleştirilmiştir. Kaynak işleminin ardından numunelere iki aşamadan oluşacak T6 yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Kaynaklı plakalar 1 saat 520 °C sıcaklıkta tutulduktan sonra 175 °C'ye indirilmiş ve sırasıyla 8, 18 ve 24 saat yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Mikroyapı sonuçlarına göre ortalama tane büyüklüğü T6 yaşlandırmanın artmasıyla azalma eğilimine geçmiştir. Kaynak sonrası ısıl işlem ile sertlik değerlerinin arttığı ve en yüksek değerin 24 saat yaşlandırma işleminde sırasıyla 114,4 HV ve 124 HV olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çekme testi ise sonuçları destekler niteliktedir.

Pratikno ve diğerleri [24], Al6061 alaşımlı numuneye 80 °C, 100 °C ve 120 °C'lerde ön ısıtma uyguladıktan sonra, ER 5356 ve ER 4043 ilave kaynak telleri kullanarak Tıg kaynak işlemi yapılmıştır. Ardından 180 °C ve 260 °C'lik de kaynak sonrası ısıl işlem uygulayarak numuneler yaşlandırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda yaşlandırma işleminin olumlu etkileri görülmüştür. En yüksek çekme mukavemeti 120 °C ve 260 °C'de yaşlandırılan numunede 246,7 MPa olarak belirlenmiştir. Mikroyapı sonuçlarına göre ise ön ısıtma ve yaşlandırma sıcaklığının artması Mg₂Si miktarını artırmıştır.

Perez ve diğerleri [25], Al6061-T6 alüminyum alaşımlı plakalar 1,2 mm çapında ER4043 dolgu metali kullanarak MIG kaynağı ile birleştirmiştir. Kaynaklı numunelere 530 °C'de 1 saat çözündürme işlemi yapıldıktan sonra 20°C'de hızlı soğutma yapılmıştır. Ardından 170°C'de 19 saat yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Mikrosertlik testleri neticesinde kaynak sonrası ısıl işlemin kaynak metali, ısı tesiri altındaki bölge ve esas metal bölgelerinde ki sertlik değerlerini arttırdığını görmek mümkündür. Bu sertleşme etkisi araştırmak üzere yapılan EDS işleminde ise kaynak metalinde Mg miktarının artışı ve Si miktarının azaldığı görülmüştür. Akma ve çekme mukavemetleri kaynaklı durum için ana

metale göre yüzde 50'den fazla azalmış ve çekme mukavemeti 175 MPa civarı seyretmiştir. Isıl işlem uygulanmış numune de ise çekme değerinin 310 MPa'a çıktığı gözlemlenmiştir.

Peng ve diğerleri [26], Al6061 alaşımına yaşlandırma işlemi uygulayarak mekanik özelliklerindeki değişimi ve mikroyapısal gelişimini incelemişlerdir. Kalınlığı 3 mm olan Al6061 plaka TIG kaynak kullanarak kaynaklanmıştır. Kaynak sonrası ısıl işlem olarak plaka, 175 °C'de 8 saat yaşlandırılmıştır. Isı girdisi ile birlikte geçiş bölgesinde ki tanelerin irileştiği dikkat çekmiştir. Yine ısı girdisinin artması ısı tesiri altındaki bölgenin sertliğinin azalmasına, geçiş bölgesinin sertliğini ise önce azaltmakta daha sonra ise arttırmaktadır. Düşük ısı girdisi kaynak bölgesinde bulunan gözenekler nedeniyle, kaynaklı bağlantıların çekme mukavemetinin düşük olmasına neden olmuştur.

Wang ve diğerleri yürüttüğü çalışmada [27], Al6061 alaşımına uyguladıkları ön ısıtma ve yaşlandırma işlemleri ile ısıl işlemlerin alüminyum alaşım üzerindeki etkisini araştırmıştır. 2 mm Kalınlıktaki Al6061-T6 alaşımı 1,2 mm çapında ER 5356 dolgu teli ile çift darbeli MIG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. 20 °C, 125 °C ve 230 °C olmak üzere ön ısıtma uygulanmıştır. Yapay yaşlandırma parametreleri ise 20 °C, 150 °C ve 280 °C'de 4, 8 ve 12 saat olarak seçilmiştir. Sertlik testlerine göre en yüksek sertlik değerinin 125 °C ön ısıtmalı 150 °C de 8 saat yaşlandırılmış numune de 76,51 HV olduğu görülmüştür. Çekme dayanımı yine aynı parametre de 257,41 MPa olarak ölçülmüştür. Tepki yüzeyi metodolojisi (RSM) kullanılmış ve 100,01 °C'lik ön ısıtma, 164,38 °C'lik yaşlandırma sıcaklığı ve 9 saatlik yaşlandırma süresinin, en iyi mukavemet, sertlik ve süneklik değerleri vereceği saptanmıştır.

Jie YI ve diğerleri [28], 6061 alüminyuma alaşıma uygulanan ısıl işlemin etkilerini araştırmışlardır. Al6061 alaşımı ER 5356 ilave teli kullanılarak çift darbeli MIG kaynak yöntemi ile kaynaklanmıştır. Ardından numuneler 140 °C, 160 °C, 180 °C ve 200 °C de 4, 8 ve 12 saat boyunca yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma sonucu sertlik değerleri, yaşlandırma sıcaklığı ile doğru orantılı olarak artmış ve yüksek değer 180 °C de 8 saat civarında 84 HV olarak ölçülmüştür. Sertlik testine bakıldığında ise sıcaklığın artması ile değerlerin yükseldiği ve en yüksek değer 180 °C ve 8 saat yaşlandırma süresinde olduğu görülmüştür. Isıl işlem sıcaklığı ve süresi artmasıyla birlikte dislokasyon yoğunluğunun da azaldığı görülmüştür.

Muzamil ve diğ erleri [29], TIG kaynaklı Al5182 alaşımına ısı ışlem uygulayarak mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemişlerdir. Esas metal olarak Al5182 kullanılan çalışmada dolgu metali olarak ısı ışlemden etkilenen Al6061 alaşımı tercih edilmiştir. Belirtilen alaşımlar ile TIG kaynak işlemi yapıldıktan sonra iki aşamada yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. 530  C de 2 saat çözeltiye alma işlemi yapıldıktan sonra ikinci aşama olarak 170  C, 200  C ve 230  C de olacak şekilde 4, 5 ve 6 saat yaşlandırma ısı ışlemi uygulanmıştır. Tepe yük değerlerine bakıldığında, yaşlandırma işlemi uygulanmayan numune de 10,78 kN iken, 170  C de 6 saat yaşlandırılan numune de en yüksek değer olan 14,06 kN'ye yükseldiği görülmüştür. Tepe yük değerlerine genel bir karşılaştırma yapıldığında ise, 4 saat üzeri yaşlandırma sürelerinde sadece 170  C de bir artış gözlemlenirken, 200  C ve 230  C de düşüş görmek mümkündür. Bu parametrenin yüksek mukavemet sağlama nedeni olarak sürekli bir  tektik Si ağı ile tane sınırının güçlendirilmesi ve matris içindeki Mg₂Si dağılımı gösterilmiştir.

Toktaş ve diğ erleri [30], Al6063 alaşımı malzemeyi farklı parametrelerde sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilerek yaşlandırma işlemi uygulamıştır. Uygulanan ısı ışlemin Al6063-T4 alaşımı üzerindeki mekanik ve mikroyapısal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kaynak işlemi için özel olarak üretilen alet ile 800 rpm, 1120 rpm ve 1600 rpm dönüşte, 200 ve 315 mm/dak kaynak hızlarında birleştirme işlemi yapılmıştır. Yaşlandırma işlemi ise 185  C de 7 saat olarak uygulanmıştır. Sonuçlara bakıldığında yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerde sertlik değerlerinde düşüş görülmüştür. F_{max} değerleri düşük kaynak hızında azalmış, yüksek kaynak hızında artmıştır. Uygulanan yaşlandırma işlemi sonucunda çekme kırılmaları kaynak merkezine yaklaşmıştır. Genel olarak bakıldığında yüksek çekme dayanımı, daha yüksek akma ve iyi bükme kuvvetleri sağlamasından dolayı yüksek kaynak hızı tavsiye edilmiştir.

Temmar ve diğ erleri [31], TIG kaynak ile birleştirildikten sonra yaşlandırma işlemi uygulanmış Al7075-T6 alaşımının mikroyapısını ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Kaynaklanmış numunelere 140  C de ve 10 saat süreyle yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Sertlik testi sonuçlarına bakıldığında kaynak bölgesinde 84 HV ve füzyon bölgesinde ise 95 HV değerlerine ulaşılmıştır. Akma ve çekme mukavemetleri kaynaklı numunede sırasıyla 404 MPa ve 508 MPa iken kaynak işleminde sonra bu değer düşerek 200 MPa ve 248

MPa'a gerilemiştir. Yapılan ısıt işlemler ise bu değeri arttırmış ve akma ve çekme mukavemetini 216 MPa ve 268 MPa olarak ölçmüşlerdir. Çarpma testlerinde ise ısıt işlem ile numunelerin füzyon bölgesinde ki enerjileri artar iken ısıdan etkilenen bölgedeki enerjilerinin düştüğünü ölçmüşlerdir.

Sokkalingam ve diğerleri [32], kaynak işlemi yapılmış Al2519-T87 alaşımına yapılan yaşlandırma işleminin etkilerini incelemişlerdir. TIG kaynak yapılan Al2519 alaşımına 175 °C de 12 saat yaşlandırma işlemi uygulamışlardır. Mikroyapı sonucunda ısıt işleme tabi tutulmuş numunelerin tane boyutunda bir değişiklik görülmemiştir. Akma ve çekme dayanımları sırasıyla 312 MPa ve 335 MPa iken kaynak sonrası ısıt işlem ile 329 MPa ve 358 MPa'a yükseldiğini belirtmişlerdir.

Malarvizhi ve diğerleri [33], Al2219 alaşımına kaynak sonrası yaşlandırma işlemi yaparak mikroyapısal ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Birleştirme işlemi elektron ışın kaynağı makinesi kullanılarak yapılmış ve ardından numuneleri 175 °C de 12 saat yaşlandırmışlardır. Yapılan mikrosertlik testinde kaynak bölgesi, ısı tesiri altındaki bölge ve esas metal bölgesinden alınan ölçümlerde, sertlik değerlerinin yaşlandırma işlemi etkisiyle arttığını görmüşlerdir. Akma ve çekme dayanımları kaynaklı numune de sırasıyla 220 MPa ve 238 MPa iken yaşlandırma ile bunların 233MPa ve 262 MPa'a çıktığını bildirmişlerdir. Isıt işlem öncesinde çökeltilerin süresiz olarak tane sınırına toplandığını, ısıt işlemden sonra çökeltilerin eşit olarak tane sınırları boyunca dağıldığı sonucuna varmışlardır.

Haryadi ve diğerleri [34], kaynak sonrası ısıt işlem uyguladığı Al6013-T4 alaşımının mikroyapısal ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Al5356 dolgu teli kullanılarak yapılan TIG kaynak işleminin ardından numuneler 420 °C de çözeltiye alınmıştır. Daha sonra 175 °C 6, 18 ve 24 saat yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Akma ve çekme dayanımı değeri karşılaştırıldığında en iyi sonucun 18 saat yaşlandırılmış numunelerde olduğunu görmüşlerdir. Yine en iyi uzamana değerine sahip numunenin %13,96 ile 18 saatlik yaşlandırmaya ait olduğunu söylemişlerdir. En düşük yorulma direncine sahip numunenin 6 saat yaşlandırılan numune, en yüksek ise 18 saat yaşlandırılan numune olduğunu bildirmişlerdir.

Malarvizhi ve diğerleri yürüttüğü çalışmada [35], Al2219 alaşımına üç farklı kaynak metodu uyguladıktan sonra yaşlandırma işlemi yapmış ardından mikroyapısal ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Farklı numunelere yapılan TIG, sürtünme karıştırma ve elektron ışın kaynağı birleştirme metotlarından sonra numunelere 175 °C de 12 saat yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. Numunelerin yorulma özelliklerine bakıldığında kaynaklı numuneye göre her üç kaynak yönteminde de yorulma değerlerinin düştüğü görülmüştür. Isıl işlemde önce en yüksek yorulma değeri 180 MPa ile sürtünme karıştırma kaynağında olurken daha sonra sırasıyla elektron ışın kaynağı ve TIG kaynağı geldi. Yaşlandırma sonrası sonuçlara bakıldığında sıralamada bir değişiklik görülmezken sürtünme karıştırma kaynak 190 MPa ile ilk sırada yer aldı. Akma ve çekme testleri sonuçlarına bakıldığında, numunelere yapılan yaşlandırma işlemi değerleri arttırmıştır. Yaşlandırma sonucu akma ve çekme değeri olarak karşılaştırıldığında ilk sırada yer alan sürtünme karıştırma kaynak yöntemi sırasıyla 344 MPa ve 382 MPa akma ve çekme değerlerine sahiptir. Yaşlandırma işlemi ile sertlik değerleri de artmış ve TIG kaynakta 100 HV, elektron ışın kaynağında 117 HV, sürtünme karıştırma kaynağında 124 HV olduğu sonuçlarına varmışlardır.

Balasubramanian ve diğerleri [36], TIG ve MIG kaynağı uyguladıkları Al7075 malzemelerin yaşlandırma sonrası mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemişlerdir. Kaynak işlemi Al5356 dolgu teli kullanılarak yapılmıştır. Daha sonra numunelere 125 °C’de 24 saatlik bir kaynak sonrası ısıl işlem uygulamışlardır. Yaşlandırma etkilerini araştırmak üzere yapılan yorulma testlerinde uygulanan ısıl işlemin olumlu sonuçlandığını ve en yüksek yorulma değerini 50 MPa olarak yaşlandırılmış TIG kaynaklı numune de almışlardır. Akma ve çekme sonuçlarında ise ısıl işlem ile değerlerin arttığı sonucuna varmışlardır. En yüksek değerleri yaşlandırılmış TIG kaynaklı numunede akma değeri 240 MPa ve çekme değeri 314 MPa olarak bulmuşlardır. Yaşlandırma işlemi sertlik değerlerini de arttırmış ve TIG kaynaklı numunenin kaynak bölgesinde ki sertlik değerini 100 HV’den 115 HV’ye yükseltmiştir.

Ayvaz ve Çetinel yürütmüş oldukları çalışmalarında [14], Al5083 ve Al6013 alaşımlarını TIG kaynak yöntemi kullanılarak birleştirmişler ve ardından bazı numunelere yaşlandırma işlemi uygulamışlardır. Elde edilen numunelerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemişlerdir. AlSi5 ve AlSi12 olmak üzere iki farklı kaynak teli kullanarak TIG kaynak yöntemi ile birleştirdikleri Al5083 ve Al6013 malzemelerini, önce 530 °C de 1 saat çözeltiye almışlardır. Daha sonra 200 °C de 2 saatlik kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmıştır. Yapılan

Vickers sertlik testlerinde, Al5083 malzemesine ısıtıl işlem yapılamamasından dolayı esas metalde bir değişiklik olmadığı, kaynak bölgesi ve ısı tesiri altındaki bölgede bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Diğer alaşım olan Al6013 de ise yaşlandırma işlemi ile sertlik değerlerinin arttığı saptanmıştır. AlSi12'nin AlSi5'e göre daha yüksek sertlik değeri vermesini içeriğinde daha fazla silisyum bulunmasına bağlamışlardır. Üç nokta eğme deneylerinde yaşlandırma işlemi ile maksimum kuvvetin arttığını belirtmişlerdir. Charpy darbe testinde ise AlSi12 ve AlSi5 kaynak metalllerinde tokluk değerinin düştüğünü bildirmişlerdir.

Atık ve diğerleri [37], TIG kaynak ile birleştirdikleri Al2024 alaşımının yaşlandırma etkileri araştırmışlardır. Kaynak işlemini ER4043 kaynak teli kullanarak TIG birleştirme yöntemi ile yapmışlardır. Kaynaklı numuneler 492 °C de çözeltiye alınmış ardından doğal ve yapay yaşlandırma olmak üzere iki tip ısıtıl işlem uygulanmıştır. Bazı numuneler oda sıcaklığında 1 hafta bekletilerek doğal yaşlandırılırken, bazıları da 125 °C de 22 saat ve 190 °C de 8,5 saat yapay yaşlandırılmıştır. Yapılan çentik darbe testi sonuçlarından çıkarılan sonuçlarda en yüksek dirence sahip prosesin doğal yaşlandırılmış numune de, en düşük değerin ise 190 °C de 8,5 saat yaşlandırılmış numune de olduğunu saptamışlardır. Akma ve çekme gerilmesi değerlerine bakıldığında en yüksek sonucun 190 °C de 8,5 saat yaşlandırılmış numuneye ait olduğunu bildirmişlerdir. Sertlik testlerinde esas metal, ITAB ve kaynak bölgesi arasında farkın en az olduğu numunenin doğal yaşlandırılmış örnekler olduğunu belirtmişlerdir.

Demirbaş ve diğerleri [2], kaynak işlemi uygulanmış Al1050 alaşımının mekanik özelliklerini ve mikroyapısını incelemiştir. TIG kaynak ile birleştirilen numunelerin kaynağında Cr4043 dolgu teli kullanmışlardır. Çekme testi yapılan numunelerin ortalama gerilmesi 62,23 MPa bulunmuştur. Uzama değerlerinin en yüksekini ise %15,38 olarak belirtmişlerdir. Sertlik değerlerinde en yüksek değerler kaynak bölgesinde görülürken, ITAB dan esas metal bölgesine doğru gidildikçe değerlerin düştüğünü saptamışlardır. Mikroskop görüntülerinde porozitelerin bulunduğunu ve bunların mukavemet ve sertlikte azalmalara yol açabileceğini bildirmişlerdir.

Kara ve diğerleri [4], Farklı kaynak yöntemleri ile birleştirdiğı Etial-30 alaşımının kaynak sonrası mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemişlerdir. Deney numunelerinin bir kısmına AlSi5 ilave telli TIG kaynağı, bir kısmına ilave telsiz TIG kaynağı ve bazı numunelere elektrik ark kaynağı yapmışlardır. Yapılan çekme deneyleri neticesinde en iyi

dayanımı ilave telsiz yapılan kaynak işleminde görmüşlerdir. Mikrosertlik testlerinde esas metal hepsinde aynı sertlikte olmasıyla birlikte ITAB da 78,4 HV ve kaynak bölgesinde 72,8 HV değerleri ile en iyi sonucu ilave metalsiz TIG kaynağı vermiştir. Elektrik ark kaynağında ısı girdisinin TIG kaynağına göre daha az olmasından dolayı tane boyutu TIG kaynaklı numunelere göre daha ince olduğunu belirtmişlerdir.

Yürük ve diğerleri [38], alüminyum alaşıma farklı parametrelerde MIG kaynak yaparak, birleştirmenin etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada Al5754 alaşımı ve ER5356 dolgu teli kullanarak kaynak işlemi yapılmıştır. Yapılan çekme testleri sonucunda kaynaklı numune değerleri ana malzeme değerlerine yakın çıkmıştır. Sertlik değerlerinde kaynak sonucu tane boyutunda büyüme görülmüş ve sertlik değerlerinin düştüğü belirtilmiştir. Darbe deneylerinde ana metalden kaynak metaline doğru gidildikçe darbe direncinin düştüğünü bildirmişlerdir. Mikroyapı çalışmalarında ise kaynak parametreleri değiştikçe ısı girdisinin değiştiği ve bunun sonucu tane boyutunun da değiştiğini saptamışlardır.

Başıyigit yaptığı çalışmada [39], alüminyum jant malzemeye TIG kaynak işlemi uygulamış ardından mikroyapısal ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Yapılan spektral analizler sonucu deneyde kullanılan jantın A356 alaşımına karşılık geldiği belirtilmiştir. Numuneye yapılan TIG kaynak işleminde ilave tel olarak S AlSi7Mg kullanılmıştır. Sertlik testleri sonucunda ana malzeme ile kaynak bölgesi sertlik sonuçlarının birbirine yakın çıktığı belirtilmiştir. Yapılan mikroyapısal testlerde hasar görmüş jantların kaynaklı tamirin mümkün olduğu ancak çok fazla zarar görmüş jantların tamiri yerine yenilerinin alınması tavsiye edilmiştir.

Kırsavaş ve diğerleri [15], farklı alüminyum alaşımlarına farklı parametrelerde ısıtım işlemi uygulamış ve mekanik özelliklere etkilerini araştırmışlardır. Deney malzemesi olarak Al1070, Al6060, Al6063 ve Al6082 alaşımları kullanılmıştır. Ardından numunelere 0, 6 ve 12 saat 185 °C de yaşlandırma işlemi uygulamışlardır. Yaptıkları testler sonucunda yaşlandırma süresi arttıkça sertlik ve kopma dayanımının da arttığını ve en iyi sertlik ve kopma dayanımının 12 saat yaşlandırılmış numunelerde olduğunu belirtmişlerdir. Uygulanan deneyler neticesinde uygulanan ısıtım işlemi ile beraber numunelerin sertlik ve akma dayanımlarında artış olduğunu da bildirmişlerdir. Yüksek mukavemet değerleri istendiğinde, daha az maliyetli olduğundan 6082 alaşımını diğer alaşımlara göre tercih edilebileceğini belirtmişlerdir.

İpekoğlu ve diğerleri [17], iki farklı alüminyum alaşıma kaynak işleminden sonra ısıtım işlemi uygulamış ve mikroyapısal ve mekanik özelliklere etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada Al6061 ve Al7075 alaşımlarına sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirme işlemi uygulamışlardır. Daha sonra ısıtım işlem parametreleri olarak, Al6061 alaşımını 530 °C de 4 saat çözeltiye aldıktan sonra 170 °C de 6 saat yaşlandırma işlemi uygulamışlardır. Al7075 alaşımını ise 485 °C 4 saat çözeltiye aldıktan sonra 140 °C de 6 saat yaşlandırma işlemi uygulamışlardır. Yapılan testler neticesinde uygulanan ısıtım işlem iki alaşım tipi numunelerinde de çekme dayanımı ve akma sınırında artış sağladığını bildirmişlerdir. Sertlik değerlerine bakıldığında kaynak bölgesi ile esas metal bölgesi arasında homojen bir dağılım olduğunu belirtmişlerdir. Al6061 alaşımının O-temper şartı ile T6-temper şartı benzer sonuçlar verirken, Al7075 alaşımında O-temper şartı T6-temper şartına göre daha iyi sonuç vermiştir.

Alıcı ve diğerleri [7], soğuk metal transferi yöntemiyle birleştirdiği alüminyum alaşımlarına kaynak sonrası ısıtım işlem yaparak mikroyapısal ve mekanik özelliklerindeki etkiyi araştırmışlardır. Al6061 ve Al5754 alaşımlarını CMT yöntemiyle farklı parametreler kullanarak birleştirmişlerdir. Ardından numuneleri 530 °C sıcaklıkta 1,5 saat çözeltiye almışlar ve 160 °C de 18 saat yaşlandırmışlardır. Numunelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde kaynak bölgelerinde tane irileşmesi olduğunu bildirmişlerdir. Isı girdisinin artmasıyla iç gerilme ve soğuma hızı düşer ve böylece sertlik değerleri de düşmektedir. EDS analizlerinde numunelerin Al5754 bölgelerinde magnezyum ve silisyum, Al6061 bölgelerinde ise çokça silisyum çökeltiğini gözlemlemişlerdir.

Tımaç ve diğerleri [13], farklı alüminyum alaşımlarına kaynak işlemi uygulanmış ve ardından mekanik ve mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Farklı özelliklere sahip Al2024, Al6061 ve Al7075 alaşımları TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Yapılan birleştirme işleminden sonra Al2024 alaşımının sertlik testlerinde ana metalden kaynak bölgesine gidildikçe sertlik değeri artmıştır. Çekme ve kopma mukavemetleri ise düşmüştür. Al6061 alaşımında ise sertlik değeri kaynaklı numunede daha fazla olduğu görülmüştür. Çekme deney sonuçlarında ise çekme ve kopma mukavemetlerinin arttığını bildirmişlerdir. Al7075 numunelerinde ise kaynak işleminden sonra sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Çekme ve kopma mukavemetleri kaynaklı numunelere göre düşmüştür. Al6061 numunesinin kaynak bölgesi incelendiğinde tane sınırlarının neredeyse kaybolduğunu belirtmişlerdir.

Kafalı ve diğerleri [40], Al6013-T6 alaşımına kaynak işlemi uygulamış ve malzemenin mekanik özelliklerini ve içyapıda ki değişikliklerinin incelemişlerdir. Alüminyum alaşımını sürtünme karıştırma kaynağı kullanarak birleştirmişlerdir. Ardından numuneler 550 °C 6 saat çözeltiye alınmış ve 175 °C 10 saat yaşlandırılmıştır. Yapılan testler neticesinde numuneler de kaynak bölgesinden ısıdan etkilenen bölgeye gidildikçe sertlik ve mukavemetin düştüğünü gözlemlemişlerdir. Yapılan yorulma deneylerinde ana malzemenin, kaynaklı malzeme ve yeniden ısıtılma işlemi görmüş malzemeden daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. SEM ile yapılan görüntüleme de ana ve kaynaklı malzemelerde sünek kırılmanın oluştuğunu bildirmişlerdir. ITAB bölgesinde çökelti partiküllerinin büyümeye devam etmesiyle aşırı yaşlanma ya da aşırı kabalaşma gösterdiğini saptamışlardır.

Bebekoğlu ve diğerleri [11], TIG kaynak ile birleştirdikleri alüminyum alaşımlarına yaşlandırma işlemi uygulayıp mikroyapısal ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmalarında Al2024-T351 ve Al7075-T651 alaşımlarını ER4043, AlSi5, ER5356 ve AlMg5 kaynak telleri kullanılarak TIG kaynak birleştirmişlerdir. Daha sonra numunelere yaşlandırma işlemi uygulamış ve test aşamasına geçmişlerdir. Çentik darbe deneyi sonuçlarında Al2024-T351 alaşımının Al7075-T651 alaşımına göre daha sünek ve esnek bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca alaşım fark etmeden tavlama işlemi malzemelerin mukavemetlerinin daha iyi olduğunu bildirmişlerdir. Eğme deneylerinde her iki alaşım tipinin de yaklaşık aynı değerler de koptuğunun söylemişlerdir. Yapılan sertlik testlerinde ITAB bölgesinin sertlik değerleri diğer bölgelere göre daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır. Mikrosertlik fotoğraflarının yorumunda ise kaynak noktasında çökeltilerinin minimum olduğu, esas malzeme bölgesine gelindiğinde ise çözelti miktarının arttığını saptamışlardır.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1 Deneyde Kullanılan Al6061 Plakaların Hazırlanması

Çalışmada deney malzemesi olarak Al6061 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Alüminyum alaşımı malzeme hem ısıtıl işlemsiz Al6061 hem de Al6061-T6 ısıtıl işlemlili malzeme olarak temin edilmiştir. Literatür araştırması yapılmış olup 6xxx serisi alüminyum alaşımların, kaynak kabiliyetinin iyi olması, ısıtıl işleme uygun olması ve iyi şekillendirilebilme özelliklerinden dolayı Al6061 malzeme tercih edilmiştir. Aşağıda Tablo 5.1’de deneyde kullanılan alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Tablo 5.1: Al6061 Alüminyum alaşımının kimyasal kompozisyonu.

Malzeme	Fe	Si	Cu	Zn	Mn	Mg	Cr	Ti	Al
Al6061	0,5	0,7	0,3	0,1	0,15	0,94	0,18	0,15	Kalan

Aşağıda verilen Tablo 5.2’de deneyde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 5.2: Al6061 ve Al6061-T6 Alaşımının mekanik özellikleri.

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (Brinel)
Al6061	125	55-124	26	30-50
Al6061-T6	270	310	20	95

Çalışmada kullanılan Al6061 ve Al6061-T6 malzemeleri 10x10x300 mm boyutlarında hazır olarak satın alınmıştır. Aşağıda verilen Şekil 5.1’de temin edilen malzemelerin görselleri verilmiştir.



Şekil 5.1: Al6061 ve Al6061-T6 malzemeleri kaynaksız görseli.

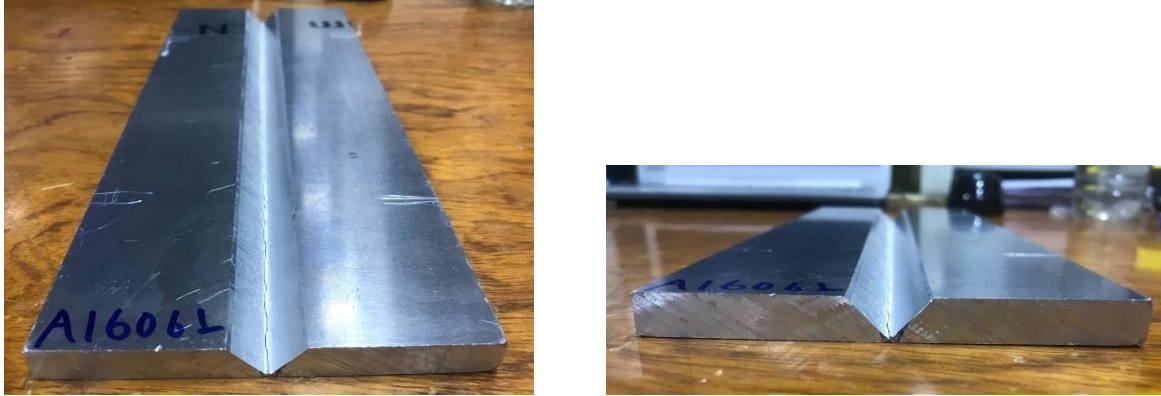
5.2 TIG Kaynak İşleminin Yapılması

Hazırlanan plakalara TIG kaynak işlemi yapılmak üzere V kaynak ağzı açılmıştır. Kaynak ağzı açma işleme freze tezgahında (Şekil 5.2) yapılmıştır ve numuneler kaynak işlemine hazırlanmıştır.



Şekil 5.2: Numunelere freze tezgahında kaynak ağzı açılması.

Kaynak ağzı açılmış plakaların görselleri aşağıda Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3: V Kaynak ağzı açılmış plakalar.

Kaynak ağzı açılmış plakalar AlSi5 ve AlSi12 kaynak telleri kullanılarak TIG kaynak metodu ile birleştirilmiştir. Aşağıda kaynak işleminde kullanılan değişken parametreleri verilmiştir;

- Esas metal olarak Al6061, kaynak teli olarak AlSi5 kullanılan numuneler:
Al6061 – AlSi5
- Esas metal olarak Al6061, kaynak teli olarak AlSi12 kullanılan numuneler:
Al6061 – AlSi12
- Esas metal olarak Al6061-T6, kaynak teli olarak AlSi5 kullanılan numuneler:
Al6061-T6 – AlSi5
- Esas metal olarak Al6061-T6, kaynak teli olarak AlSi12 kullanılan numuneler:
Al6061-T6 – AlSi12

Aşağıda da kaynak işleminde kullanılan AlSi5 ve AlSi12 ilave kaynak tellerinin analizi (Tablo 5.3) ve mekanik özellikleri (Tablo 5.4) verilmiştir.

Tablo 5.3: AlSi12 ve AlSi5 kaynak tellerinin tipik analizi (%) [14].

Elektrot	Si	Mn	Fe	Cu	Mg	Ti	Al
AlSi12	12	0,15	0-60	0,20	-	-	88
AlSi5	5	0,05	0,40	-	0,05	0,15	88

Tablo 5.4: AlSi12 ve AlSi5 Kaynak tellerinin mekanik özellikleri [14].

Elektrot	0.2 % Akma Mukavemeti [N/mm ²]	Çekme Dayanımı [N/mm ²]	Uzama [%]
AlSi12	>60	>130	>5
AlSi5	>40	>120	>8

TIG kaynak işlemi öncesi yüzey temizlendi. Aşağıda ki Tablo5.5’de verilen kaynak parametreleri ile 4 farklı plakaya AlSi5 ve AlSi12 kaynak telleri kullanılarak birleştirme işlemi yapıldı. Birleştirme işlemi öncesi düzgün bir kaynak işlemi için plakalar aparatlar kullanarak sabitlendi.

Tablo 5.5: Kaynak parametreleri.

Özellik	Değer
Kaynak Dolgu Teli Malzemesi	AlSi5 ve AlSi12
Kaynak Dolgu Teli çapı	2 mm
Kaynak Akımı	200 Amper
Kaynak Hızı	3 mm/sn
Akım Türü	Alternatif Akım
Koruyucu Gaz	Argon
Gaz Akış Debisi	8 lt/dk

TIG Kaynak işlemi Lincoln Electric Square Wave TIG-355 kaynak makinesi (Şekil 5.4) ile verilen kaynak parametrelerinde 4 plaka için ayrı ayrı yapılmıştır. Kaynak işleminin yapılışı ve yapıldıktan sonra numune görüntüleri aşağıda Şekil 5.5 de verilmiştir. Birleştirme işleminden sonra kaynaklı plakalar hava ortamında soğumaya bırakılmıştır.



Şekil 5.4: Lincoln Electric Square Wave TIG-355 kaynak makinesi.



a)



b)

Şekil 5.5: TIG Kaynak işlemi a) öncesi ve b) sonrası.

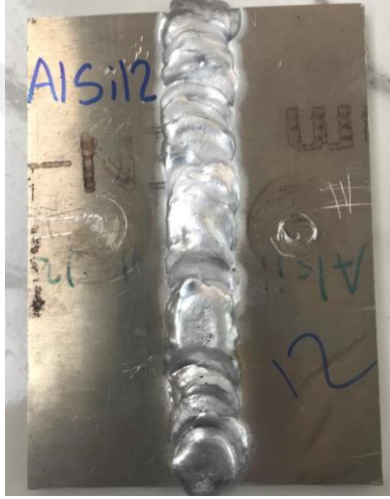
Kaynak işlemi yapılmış plakaların görüntüsü aşağıda verilmiştir (Şekil 5.6). Birleştirme işleminden sonra numunelere yüzey temizleme işlemi yapılmıştır (Şekil 5.7).



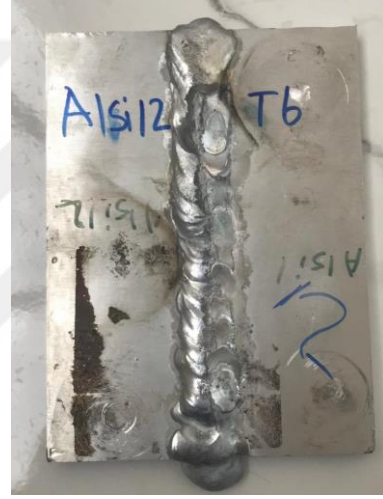
a)



b)



c)



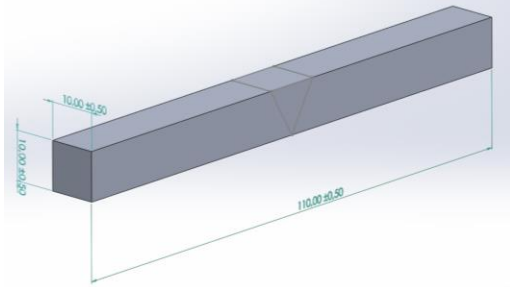
d)

Şekil 5.6: TIG Kaynak ile birleştirilmiş numuneler a) Al6061 - AlSi5 b) Al6061-T6 - AlSi5 c) Al6061 – AlSi12 d) Al6061-T6 – AlSi12.



Şekil 5.7: Kaynak işleminden sonra numune yüzeyi temizleme işlemi.

Kaynak işlemi tamamlanıp yüzeyi temizlenen plakalar, numune boyutu olan 10x10x110 mm ölçülerine getirilmek üzere CNC testere ile kesilmiştir. Boyutlandırılan numunelerin görüntüsü ve şeması Şekil 5.8 de verilmiştir.



a)



b)

Şekil 5.8: 10x10x110 mm Boyutunda ki numunelerin a) Şeması b) Görüntüsü.

5.3 Numunelerin İndüksiyon Isıl İşlemi

İndüksiyon sertleştirme işlemi malzemeye hızlı bir şekilde sertlik kazandırmak üzere, malzemenin yüzeyini yüksek sıcaklıklara çıkardıktan hemen sonra soğutma işlemidir. Uygulanan bu işlemde istenirse malzemenin belirli bir bölümü veya tümü talep edilen derinliğe kadar sertleştirilebilir. Yapılan bu işlemin çalışma prensibi ise bakır bobin üzerinden geçen elektrik akımı ile malzeme üzerinde manyetik bir alan oluşmaktadır. Oluşan bu manyetik alan sayesinde malzeme hızlı bir şekilde yüksek sıcaklıklara çıkabilmektedir.

İndüksiyon ısıtma işlemi İzmir Demokrasi Üniversitesinde bulunan indüksiyon cihazı (Şekil 5.9) ile yapılmıştır. TIG Kaynaklı numunelerin kaynak bölgesine Tablo 5.6 da verilen parametrelerde indüksiyon ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. İşlemin uygulanışı Şekil 5.10 da verilmiştir.



Şekil 5.9: İndüksiyon ısıtma işlem cihazı.

Tablo 5.6: İndüksiyon ısıtma işlemi parametreleri.

Numune Türü	Uygulanan İndüksiyon Isıl İşlem Sıcaklığı	Uygulanan İndüksiyon Isıl Süresi	İşlem
Al6061 - AlSi5	185 °C	3 dk	6 dk
	350 °C	3dk	6dk
Al6061-T6 - AlSi5	185 °C	3 dk	6 dk
	350 °C	3 dk	6 dk
Al6061 - AlSi12	185 °C	3 dk	6 dk
	350 °C	3 dk	6 dk
Al6061-T6 - AlSi12	185 °C	3 dk	6 dk
	350 °C	3 dk	6 dk



Şekil 5.10: İndüksiyon ısıtma işlemi yapımı.

5.4 Mikro Sertlik Testi

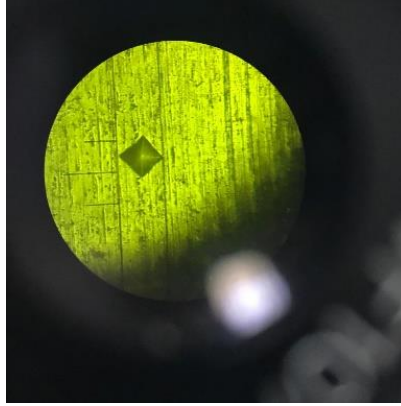
Sertlik testi yapılmadan önce numunelere zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Zımparalama 60, 240, 400, 800, 1000, 1200 kumlarda $\varnothing 200$ Metkon marka zımpara kullanarak kalın zımparadan ince zımparaya doğru yapılmıştır. Zımparalama da kullanılan Metkon marka zımparalama cihazı Şekil 5.11 de verilmiştir. Tüm numunelere zımparalama işlemi yapıldıktan sonra parlatma çuhası ile 1 mikron elmas pasta kullanılarak parlatma işlemi yapılmıştır.



Şekil 5.11: Metkon marka zımparalama cihazı.

Sertlik bir malzemenin kendinden daha sert bir malzemenin batmasına göstermiş olduğu direnç olarak açıklanabilir. Çalışmada numunelere Vickers Sertlik Testi uygulanmıştır. Ölçümler tepe açısı 136° olan elmas piramit uç ile yapılmıştır. Ölçüm süresi 10 sn. ve ölçüm

yükü 50 gr. olarak belirlenmiştir. Sertlik testi vuruş yapıldıktan sonra oluşan izin (Şekil 5.12) köşegenleri arasında ki mesafeyi ölçerek hesaplanmaktadır.



Şekil 5.12: Vickers mikro sertlik testi ölçümü.

Ölçümler kaynak merkezinden başlayıp ITAB ve esas metale doğru gidilerek 1 mm aralıklarla yapılmıştır. Sertlik testi Manisa Celal Bayar Üniversitesi'nde bulunan Future-Tech FM-700 cihazı ile yapılmış olup Şekil 5.13'da gösterilmiştir.



Şekil 5.13: Sertlik testlerinin yapıldığı mikro sertlik cihazı.

5.5 Çekme Testi

Malzeme de herhangi bir şekil değişikliği oluşturmak için gerekli kuvvetin hesaplanması mühendislikte önemli bir unsurdur. Malzemenin çalışma koşullarının belirlenmesinde bu testlere başvurulur. Çekme testi, statik yük altındaki malzemenin yük taşıma becerisinin ve şekil değiştirme özelliklerinin belirlendiği bir ölçüm yöntemidir.

Bu çalışmada kaynak ve ısıtıl işlemin uygulandığı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek üzere çekme testi yapılmıştır. Uygulanan testler Manisa Celal Bayar Üniversitesi'nde bulunan 100 kN kapasiteli SHIMADZU AG-IS test cihazında (Şekil 5.14) 1 mm/dak hız ile yapılmıştır.



Şekil 5.14: Çekme testlerinin yapıldığı çekme cihazı.

5.6 Eğme Testi

Eğme testi malzemenin mukavemeti hakkında bilgi edinmek için yapılan bir test çeşididir. Kaynak işlemi ile birleştirilmiş numunelerde kaynak kalitesi ve mukavemeti özelliklerini belirlemek üzere yapılmaktadır. Deney prensibi olarak iki sabit desteğe oturtulan deney numunesi üzerine, numunenin orta noktasından uygulanan kuvvet olarak açıklanabilir.

Bu çalışmada kaynaklı numunelere yapılan eğme testi, Balıkesir Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (BÜBTAM)' da bulunan 250 kN kapasiteli Zwick/Roel marka eğme cihazı ile yapılmıştır (Şekil 5.15).



Şekil 5.15: Eğme testlerinin yapıldığı eğme cihazı.

5.7 Mikroyapı İncelenmesi

Mikroyapı analizi, malzemenin iç yapısını inceleyerek tane boyutu, tane sınırı, yönlenmeler ve porozite gibi özelliklerin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Farklı büyütmelerde farklı bölgeler mikroskop kullanılarak incelenebilir.

Bu çalışmada, kaynak sonrası ısıtıl işlem yapılmış numunelere 60 kumdan 1200 kuma kadar zımpara yapıldıktan sonra elmas pasta parlatma işlemi uygulanmıştır. Ardından numunelere Keller Çözeltisi (95 ml saf su, 2,5 ml HNO₃, 1,5 ml HCl, 1,0 ml HF) ile dağlama işlemi yapılmıştır. Dağlanan numuneler Manisa Celal Bayar Üniversitesi'nde bulunan Nikon Eclipse LV150N marka mikroskop (Şekil 5.16) ile incelenmiştir. Mikroyapı incelemesi kaynak bölgesi, ITAB, geçiş bölgesi ve esas metal bölgesinde 50x, 100x ve 200x büyütmelerde yapılmıştır.



Şekil 5.16: Mikroyapı incelemesinin yapıldığı mikroskop.

5.8 SEM / EDX Analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), numune yüzeyinin mikro yapısını incelemek üzere kullanılmaktadır. Örnek yüzeyine odaklanan elektron demeti algılayıcılar tarafından toplanır ve bu toplanan sinyaller işlenerek görüntü elde edilir. Enerji dağılımı X-ışını spektroskopisi (EDX) ise, örnekten yayılan X ışınlarının enerji dağılımını analiz eder ve örnek bileşimini belirlemeyi sağlar. SEM/EDX analizi sayesinde, çalışılan örneğin hem yüzey morfolojini hem de numunenin kimyasal bileşimini belirlemek mümkündür.

Bu çalışmada numunelerin iç yapı görüntüleri Celal Bayar Üniversitesi Deneysel Fen Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (DEFAM)'da bulunan Zeiss Gemini 500 marka (Şekil 5.17) SEM/EDX cihazı ile incelenmiştir.

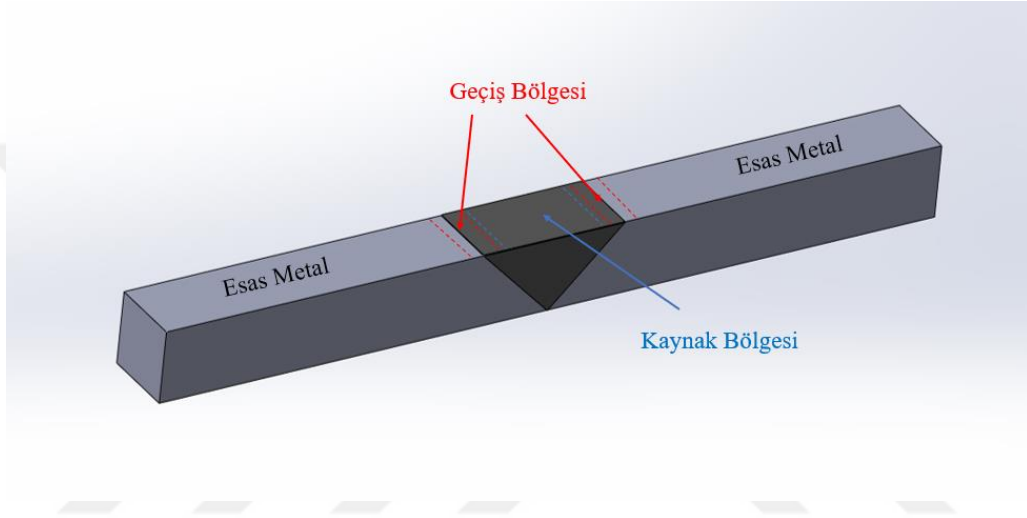


Şekil 5.17: SEM/EDX İncelemesinin yapıldığı cihaz.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1 Mikrosertlik Deneyi Sonuçları

Çalışmada mikrosertlik deneyleri 50 gr yük ve 10 sn. süre ile uygulanmıştır. Kaynak bölgesi – geçiş bölgesi – esas metal bölgelerine 1 mm aralık olacak şekilde toplamda 15 mm ölçüm yapılmıştır. Kaynaklı numunenin bölgeleri Şekil 6.1’de verilmiştir.

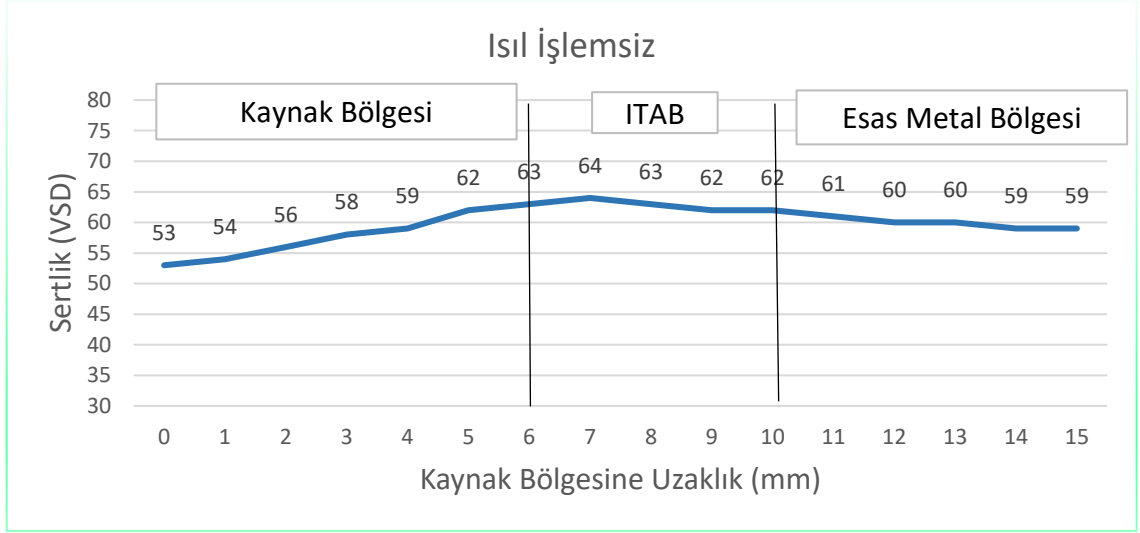


Şekil 6.1: TIG Kaynaklı numunenin bölgeleri.

Mikrosertlik testi sonuçları; kullanılan alüminyum malzeme, kaynak elektrot teli ve yapılan ısıtım işlem parametrelerine göre karşılaştırılmış ve sonuçlar aşağıda verilmiştir.

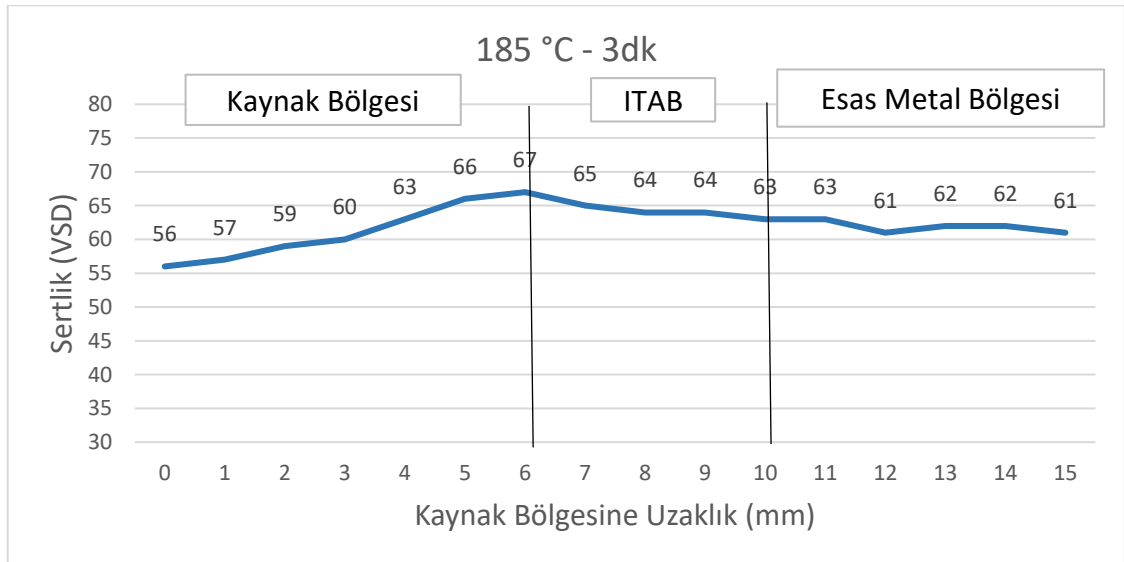
6.1.1 Al6061 – AlSi5 Kaynaklı Numunelerin Mikrosertlik Sonuçları

Aşağıda Şekil 6.2’de AlSi5 ilave tel ile birleştirilmiş indüksiyon ısıtım işlemi uygulanmamış numuneye ait sertlik değerleri verilmiştir. Kaynak bölgesinden esas metal bölgesine gidildikçe değerlerin arttığı ve ITAB’da maksimum değere ulaşım tekrar düşüşe geçtiği gözlemlenmiştir.



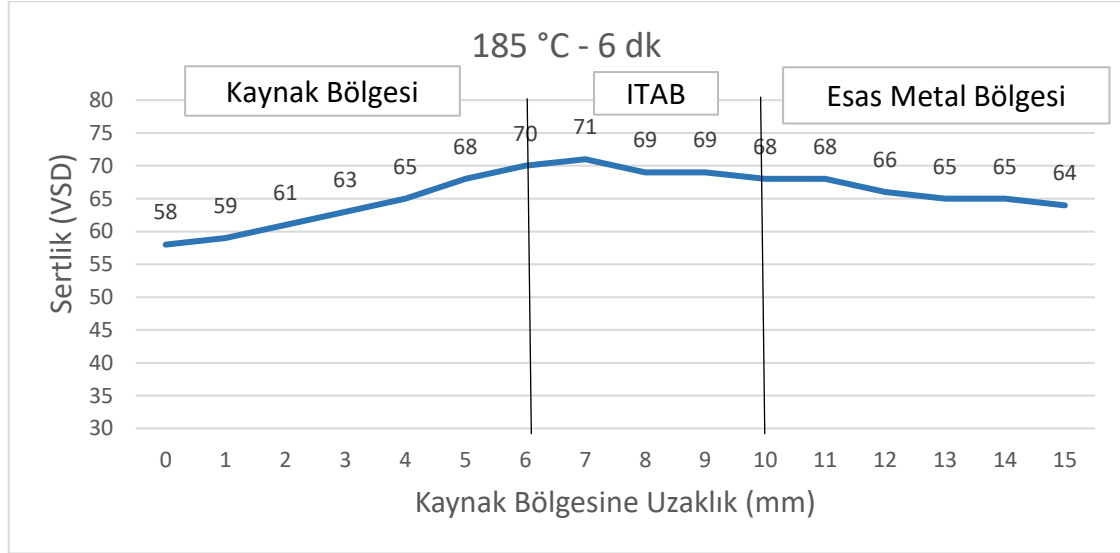
Şekil 6.2: Al6061- AlSi5- Isıl işlemsiz.

Şekil 6.3’de AlSi5 ilave teli ile birleştirilmiş Al6061 numunelerin, 185 °C’de 3 dk indüksiyon ısıtılması uygulanmış numunede ki mikrosertlik testi sonucu verilmiştir. Grafiğe bakıldığında numunenin sertlik değerlerinde ısıtılması numuneye göre genel bir artış olduğu gözlemlenmektedir. Diğer yandan kaynak bölgesinden esas metale doğru ilerlendiğinde, sertlik değerlerinin ITAB bölgesine kadar arttığı ve daha sonra düşme eğilimine geçtiği görülmüştür.



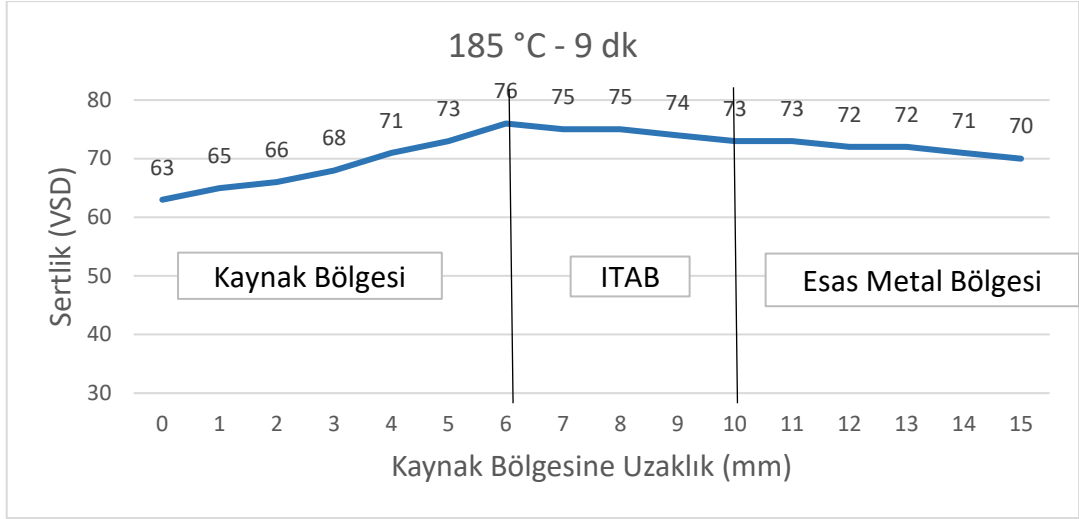
Şekil 6.3: Al6061- AlSi5- 185 °C 3 dk.

Aşağıda verilen Şekil 6.4’de 185 °C’de 6 dk. indüksiyon ısıtma işlemi uygulanmış numuneye ait mikrosertlik testi sonuçları verilmiştir. Bir önceki grafikte incelenen 3 dk. ısıtma işlemi uygulanmış numuneye göre sertlik değerlerinde bir miktar artış olduğu ve bölgesel olarak yine ITAB bölgesinde en yüksek değere sahip olduğu belirlenmiştir.



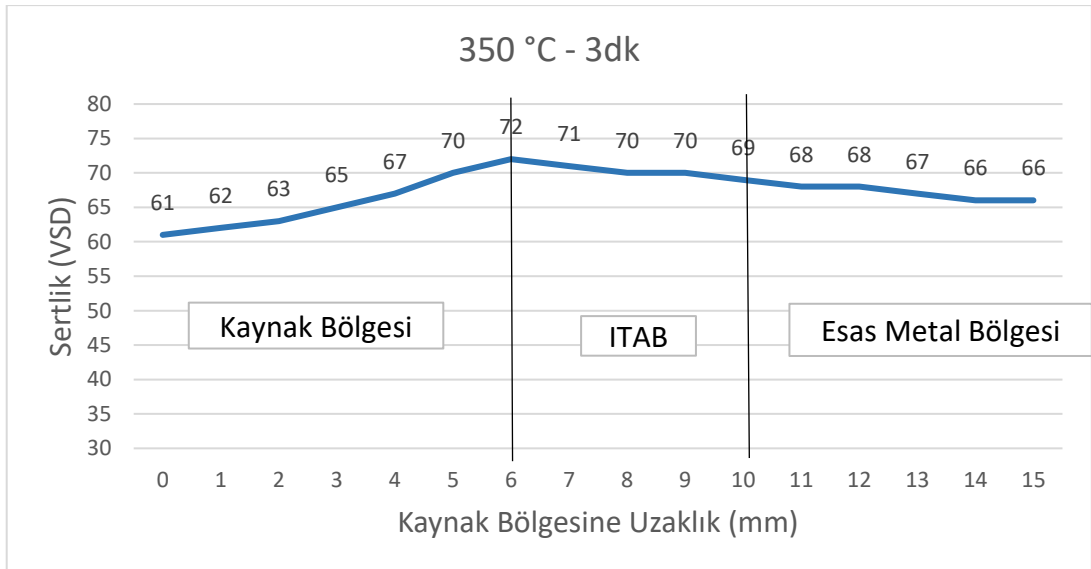
Şekil 6.4: Al6061- AlSi5- 185 °C 6 dk.

Şekil 6.5’de verilen grafikte AlSi5 elektrot teli ile birleştirilmiş ve 185 °C’de 9 dk ısıtma işlemi uygulanmış numuneye ait mikrosertlik testi sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde numunelere aynı sıcaklıkta uygulanan ısıtma işleminin uygulanma süreleri arttıkça sertlik değerlerinin doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. 185 °C’de uygulanan ısıtma işlemlerin en yüksek sertlik değerinin bu numunenin ITAB bölgesinde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.5: Al6061- AlSi5- 185 °C 9 dk.

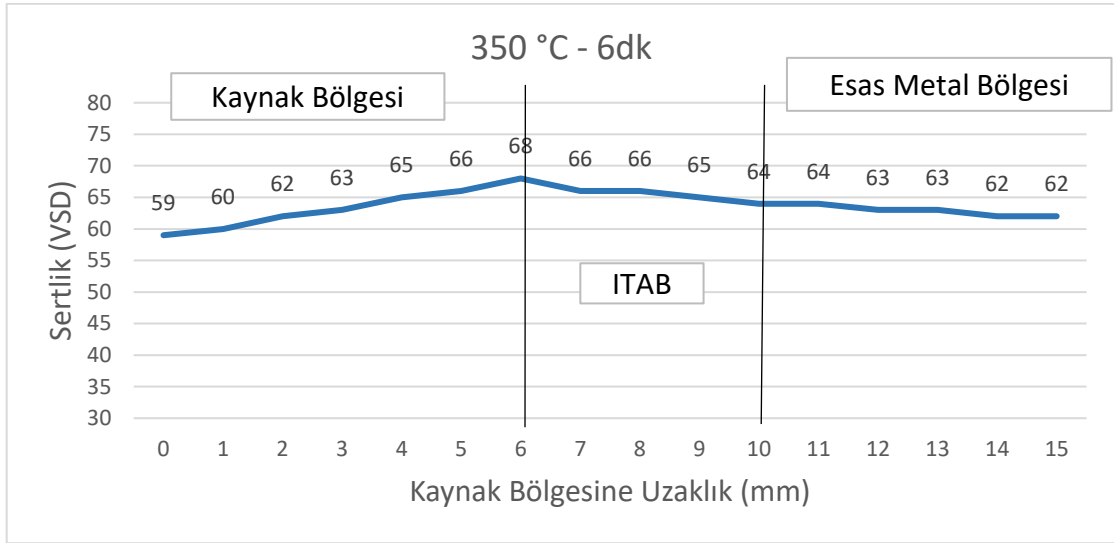
Aşağıda ki şekilde AlSi5 ilave teli ile kaynak yapılmış ve daha sonra 350 °C’de 3 dk indüksiyon ısıtma işlemi uygulanmış numunenin sertlik değerleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde kaynak bölgesinden ITAB’a geçişi sırasında sertlik değerinin en yüksek noktaya ulaştığı görülmüştür. Devamında esas metale doğru gidildiğinde sertliğin düştüğünü söylemek mümkündür. Ayrıca değerlere bakıldığında 185 °C’de ki sertlik değerlerinin altında kaldığı görülmüştür.



Şekil 6.6: Al6061- AlSi5- 350 °C 3 dk.

Aşağıda ki şekilde AlSi5 ilave teli ile birleştirilip 350 °C 6 dk indüksiyon ısıtma işlemi uygulanmış numuneye ait sertlik değerleri verilmiştir. Değerlere bakıldığında 350 °C 3 dk

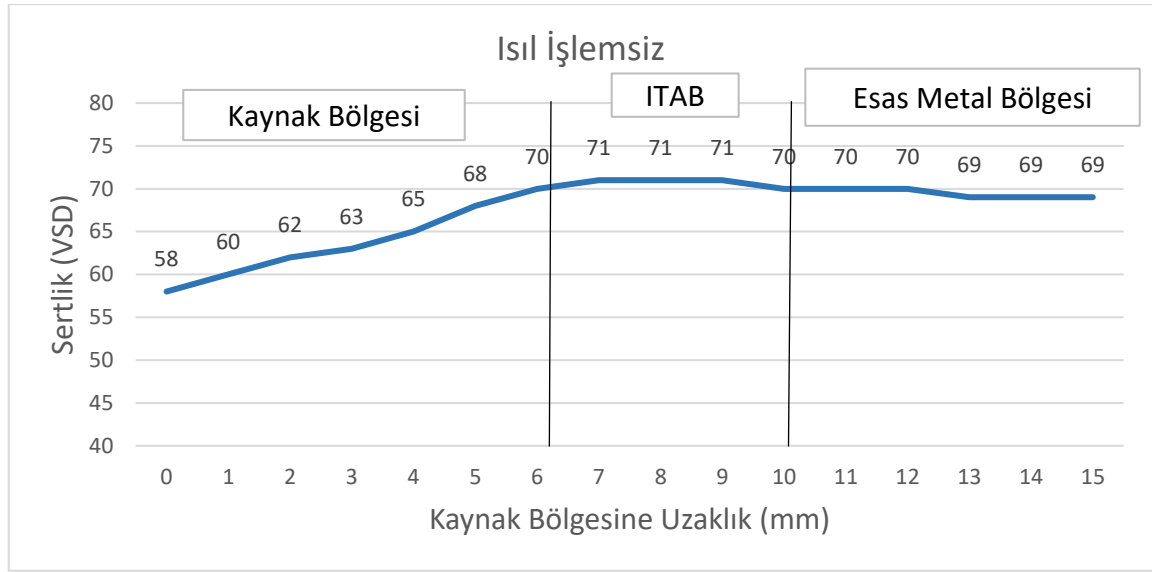
lık ısıtıl işlemin sertlik sonuçlarına göre genel bir düşüş olduğu görülmektedir. Esas metal ve kaynak bölgesinde birbirine yakın sonuçlar görülürken ITAB’da maksimuma ulaşmıştır.



Şekil 6.7: Al6061- AlSi5- 350 °C 6 dk.

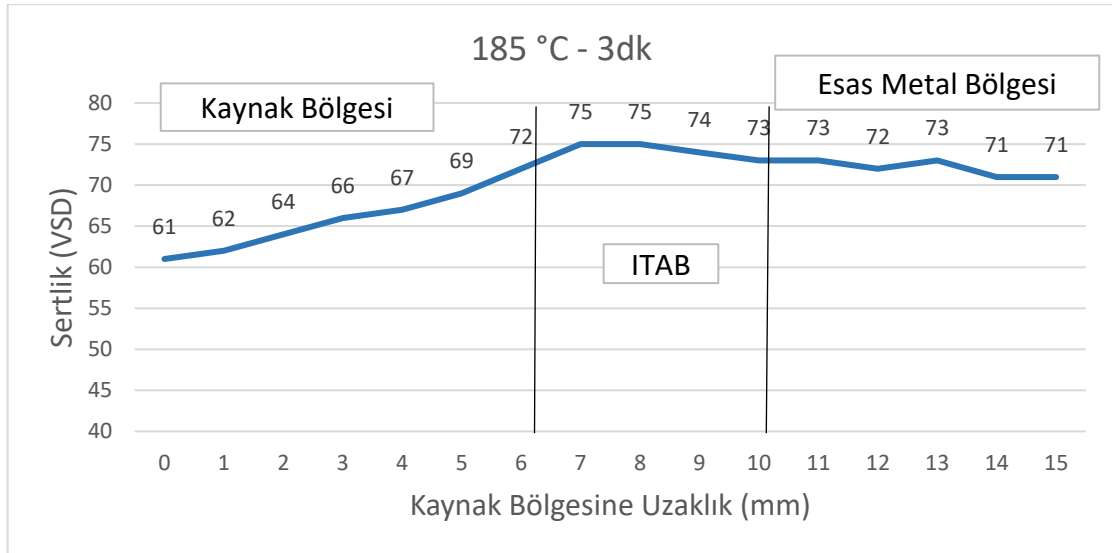
6.1.2 Al6061-T6 – AlSi5 Kaynaklı Numunelerin Mikrosertlik Sonuçları

Aşağıda Şekil 6.8’de verilen grafikte, AlSi5 ilave tel ile birleştirilmiş Al6061-T6 numunesinin mikrosertlik testi sonuçları verilmiştir. İndüksiyon ısıtıl işlemi uygulanmamış numunenin sonuçları değerlendirildiğinde, en düşük değerlerin kaynak bölgesinde olduğu ve esas metal bölgesindeki değerlerin daha yukarıda olduğu görülmektedir. En yüksek sonuçların ise ITAB bölgesinde elde edildiği saptanmıştır.



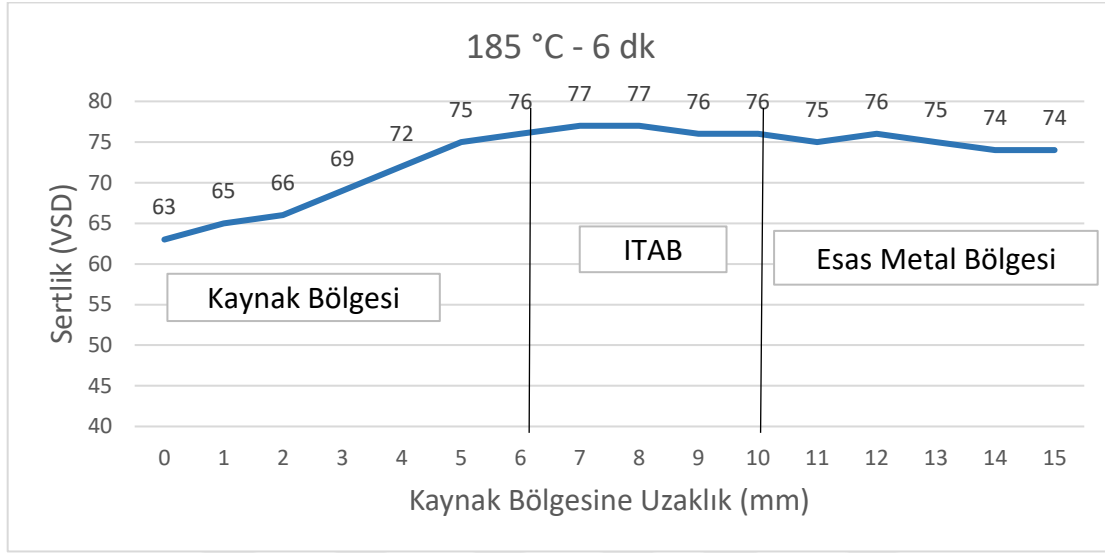
Şekil 6.8: Al6061-T6- AlSi5- Isıl işlemsiz.

Şekil 6.9’da verilen grafikte 185 °C’de 3 dk indüksiyon ısıtılma tabi tutulmuş numunenin sertlik testi sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde ısıtılma işlemi yapılmış numuneye göre sertlik değerlerinin tüm bölgelerde arttığı görülmüştür. Esas metal bölgesinde ki sertlik değerleri kaynak bölgesinin üstüne çıkmış ve en yüksek değer 75 HV ile ITAB bölgesinde elde edilmiştir.



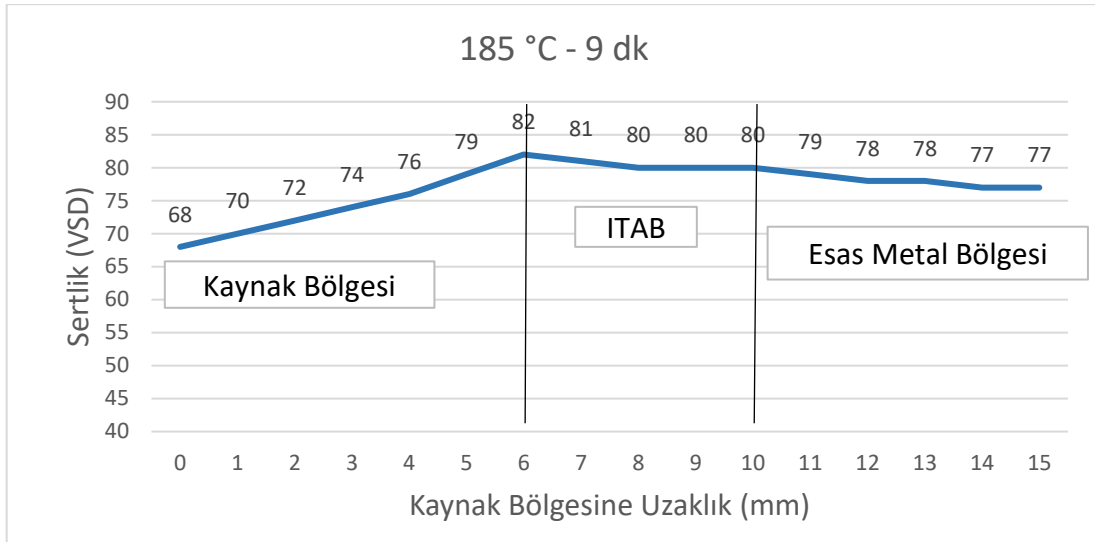
Şekil 6.9: Al6061-T6- AlSi5- 185 °C 3 dk.

Grafığı Şekil 6.10'da verilen 185 °C de 6 dk ısıtıl işlem görmüş numunenin mikrosertlik deneyi sonuçları incelendiğinde, indüksiyon işleminin süresinin artması ile birlikte numunenin sertlik değerlerinde de artışı görmek mümkündür. ITAB'dan esas metale doğru gidildiğinde değerlerin yumuşak bir geçişle düştüğü görülmekte ve en düşük değerler kaynak bölgesinde olduğu gözlemlenmektedir.



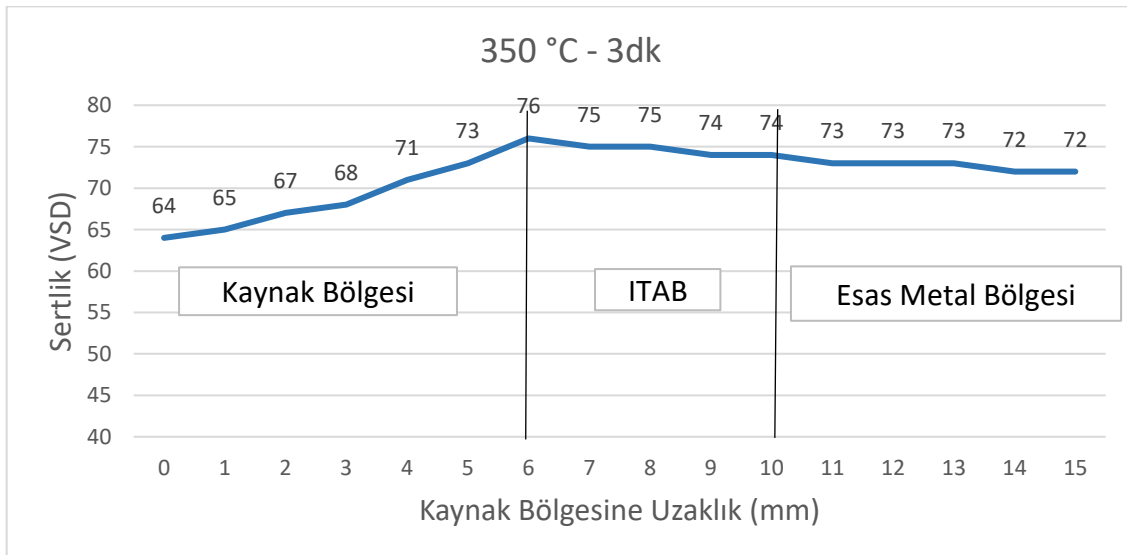
Şekil 6.10: Al6061-T6- AlSi5- 185 °C 6 dk.

Bir sonra ki şekilde 185 °C'de 9 dk boyunca ısıtıl işlem uygulanmış numunenin sertlik sonuçlarına yer verilmiştir. Sonuçlarda AlSi5 ile birleştirilmiş Al6061-T6 numunelerinin en yüksek sertlik değeri olan 82 HV değerine bu numunede ulaşılmıştır. 185 °C'de en uzun süre ısıtıl işlem uygulanmış bu numunenin kaynak bölgesinden ITAB'a doğru gidildikçe sertlik değerlerinin arttığı ve devamında esas metal bölgesine gelindiğinde değerlerin kaynak bölgesinin bir miktar üzerinde kalarak devam ettiği gözlemlenmiştir.



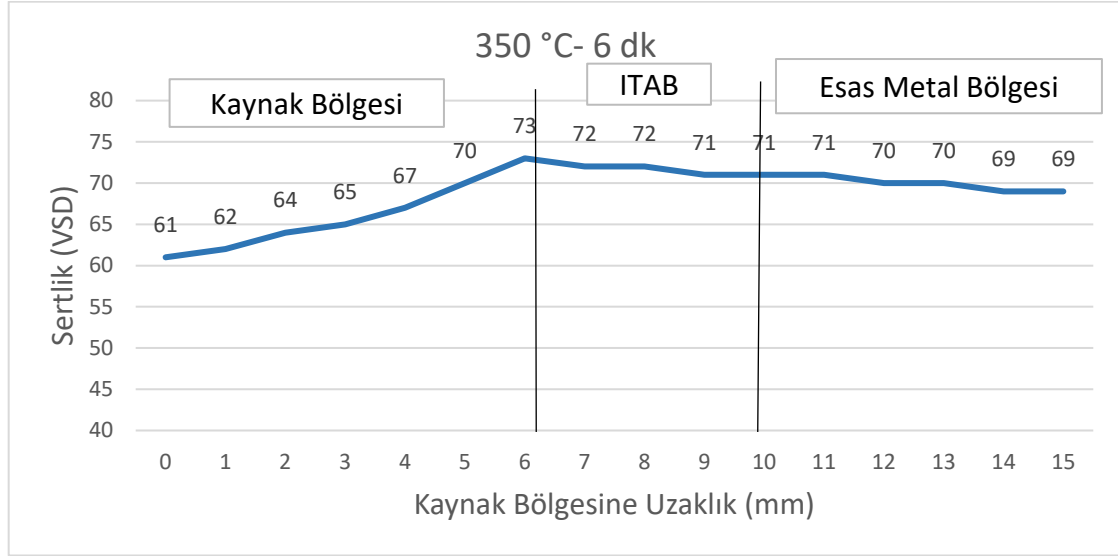
Şekil 6.11: Al6061-T6- AlSi5- 185 °C 9 dk.

Şekil 6.12’de 350 °C’de 3 dk indüksiyon ısıt işlemi uygulanmış numunelerin mikrosertlik değerleri verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde 185 °C 9 dk ısıt işlem yapılmış numunenin sertlik değerleri ile aşağıda verilen 350 °C 3 dk ısıt işlem uygulanmış numunenin sertlik değerleri karşılaştırıldığında, indüksiyon işleminde ki sıcaklığın artmasıyla beraber sertlik değerlerinin düştüğü görülmüştür. İncelenen bu numunede de en yüksek sertlik değeri ITAB bölgesindedir.



Şekil 6.12: Al6061-T6- AlSi5- 350 °C 3 dk.

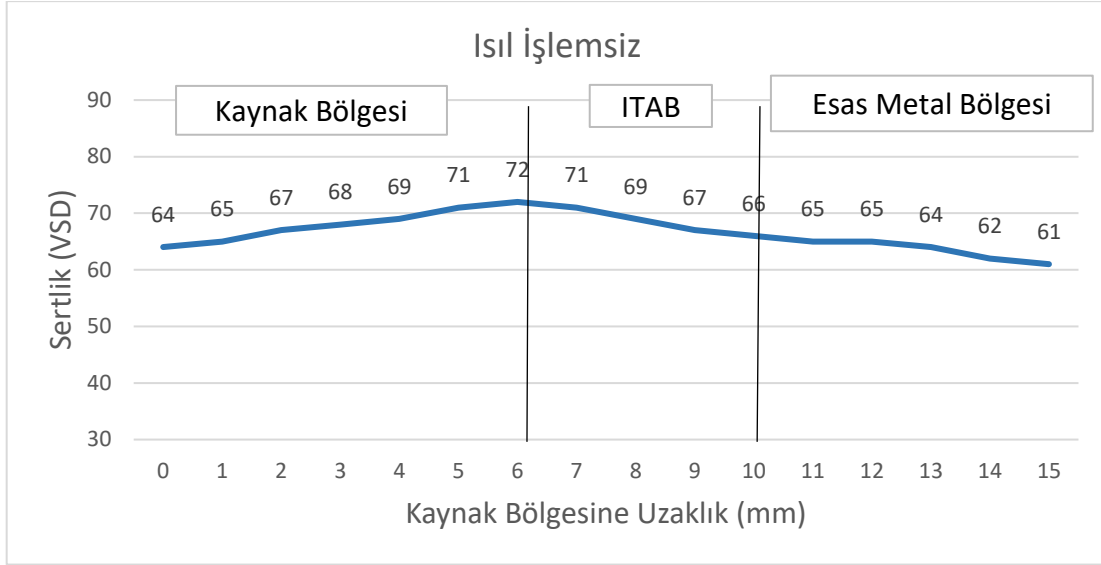
Aşağıda Şekil 6.13’de AlSi5 ile birleştirilmiş ve 350 °C’de 6 dk ısıtıl işlem uygulanmış numuneye ait sertlik deneyi sonuçları verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında 350 °C 3 dk indüksiyon işlemi yapılmış numuneye göre sertlik değerlerinin düştüğü görülmüştür. İndüksiyon süresinin artması ile tüm bölgelerde genel olarak bir gerileme olmasıyla birlikte kaynak bölgesinden ITAB’a gidildikçe değerlerin arttığı gözlemlenmiştir. Esas metalde bölgesinde ise sertlik değerlerinin düşüşte olduğu görülmektedir.



Şekil 6.13: Al6061-T6- AlSi5- 350 °C 6 dk.

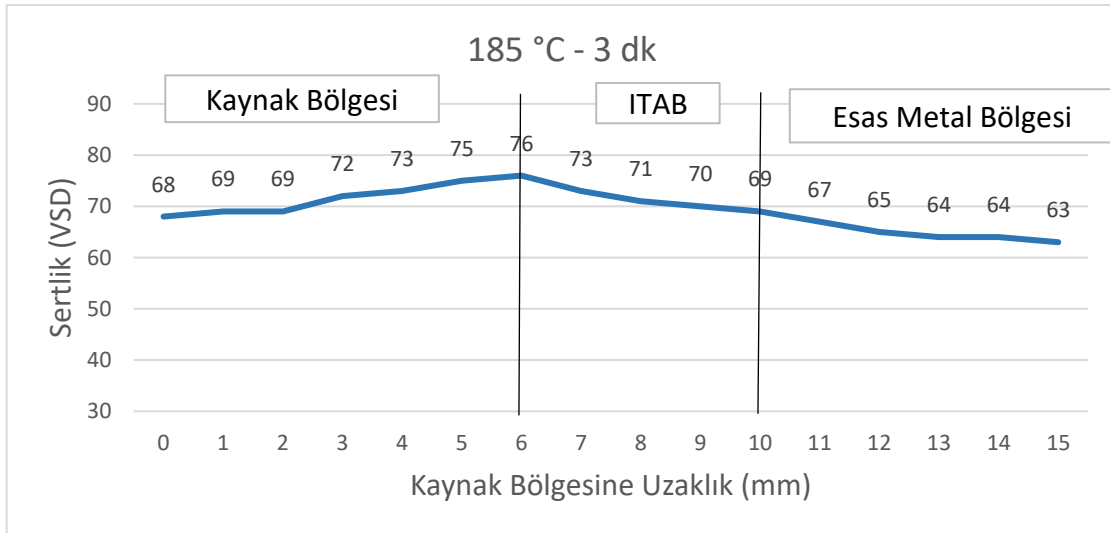
6.1.3 Al6061 – AlSi12 Kaynaklı Numunelerin Mikrosertlik Sonuçları

Aşağıda Şekil 6.14’de AlSi12 kaynak teli ile birleştirilmiş indüksiyon ısıtıl işlemi uygulanmamış Al6061 malzeme numuneye ait mikrosertlik testi sonucu verilmiştir. Grafik incelendiğinde numunenin ortalama sertlik değerlerinin AlSi5 ile birleştirilen numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Daha önce değerlendirilen numunelerde olduğu gibi kaynak bölgesi ve esas metal bölgesinde ki sertlik değerleri yakın olup, ITAB’da en yüksek sonuca ulaşılmaktadır.



Şekil 6.14: Al6061- AlSi12- Isıl işlemsiz.

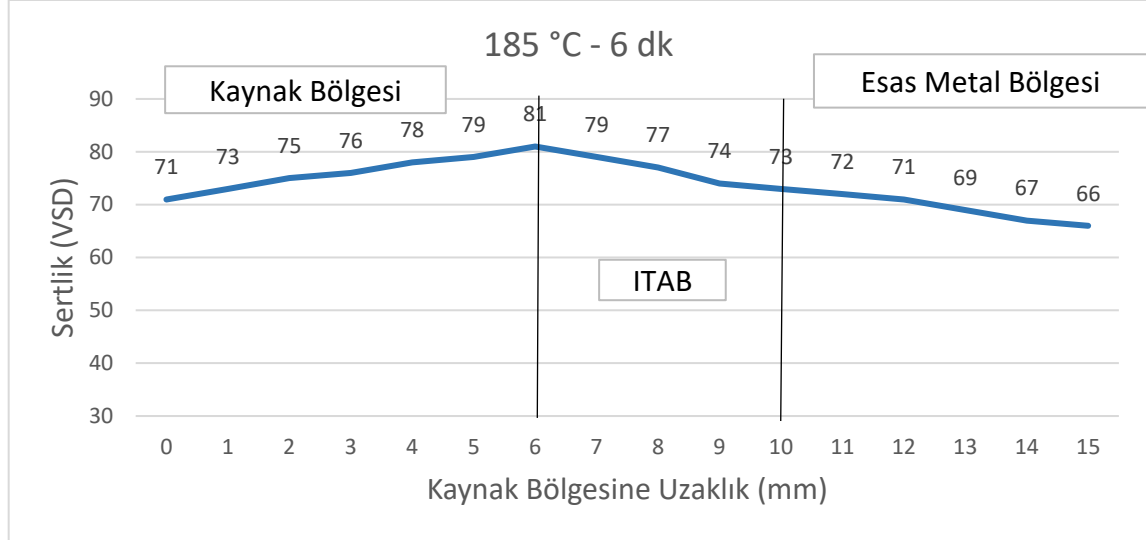
Şekil 6.15’de AlSi12 ile birleştirilen ve 185 °C’de 3 dk indüksiyon ısıt işlemin uygulanmış numunenin sertlik sonuçları verilmiştir. Sonuçlarda ısıt işlemin etkisi tüm bölgelerde sertlik değerlerinin yükselmesiyle görülmektedir. Kaynak bölgesinden ITAB’a gidildiğinde değerlerin yükselişe geçtiği görülmüş ve 76 HV ile ITAB’ da tepe noktaya ulaşmıştır.



Şekil 6.15: Al6061- AlSi12- 185 °C 3 dk.

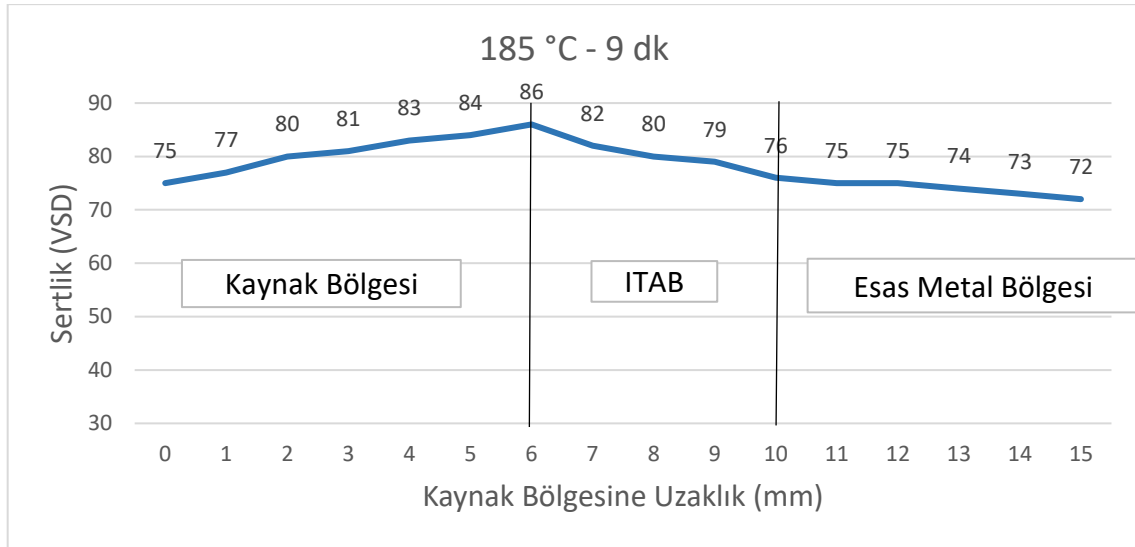
185 °C’de 6 dk İndüksiyon ısıt işlemin uygulanmış numunenin mikrosertlik testi sonuçları Şekil 6.16’da verilmiştir. 185 °C 3 dk Isıl işlem yapılmış numune ile karşılaştırıldığında elde

edilen sonuçlar sürenin uzamasıyla sertliğin artmasıdır. Kaynak bölgesinden esas metal bölgesine doğru gidildikçe ITAB'a kadar sertlik değerleri yükselmekte olup, ITAB'dan sonra ise sonuçlarda düşme olduğu görülmektedir.



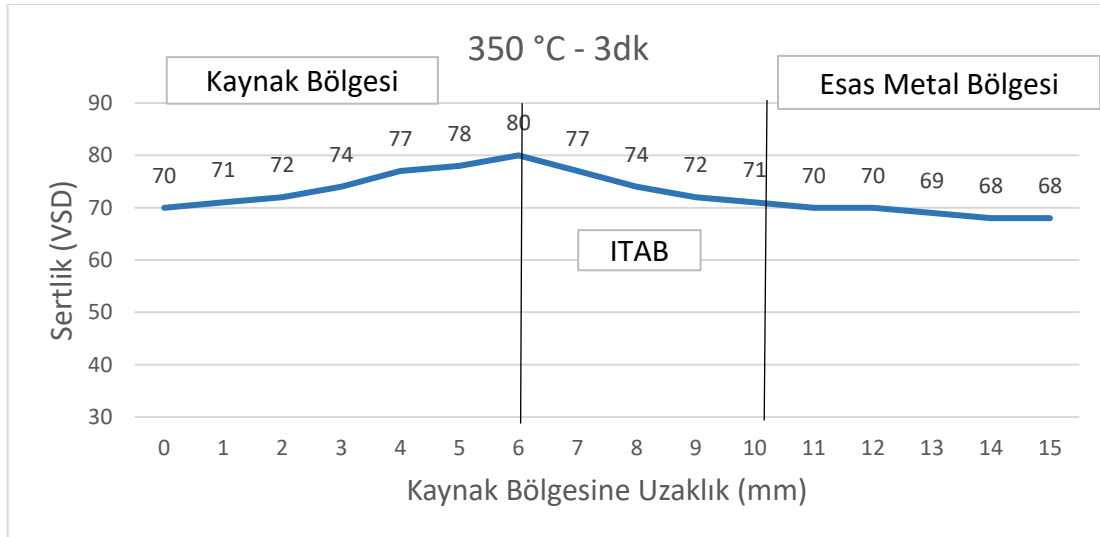
Şekil 6.16: Al6061- AlSi12- 185 °C 6 dk.

Aşağıda verilen Şekil 6.17'deki grafikte 185 °C 9 dk'lık indüksiyon ısıtma işlemi uygulanmış numune için sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir. AlSi12 Kaynak teli ile birleştirilmiş diğer numunelere göre karşılaştırıldığında en yüksek mikrosertlik değeri sonuçları bu numune de görülmektedir. Tüm bölgelerde ki sonuçlar en yüksek seviyededir. ITAB'da görülen 86 HV değeri Al6061- AlSi12 numunelerinde ki en üst sonucu oluşturmaktadır.



Şekil 6.17: Al6061- AlSi12- 185 °C 9 dk.

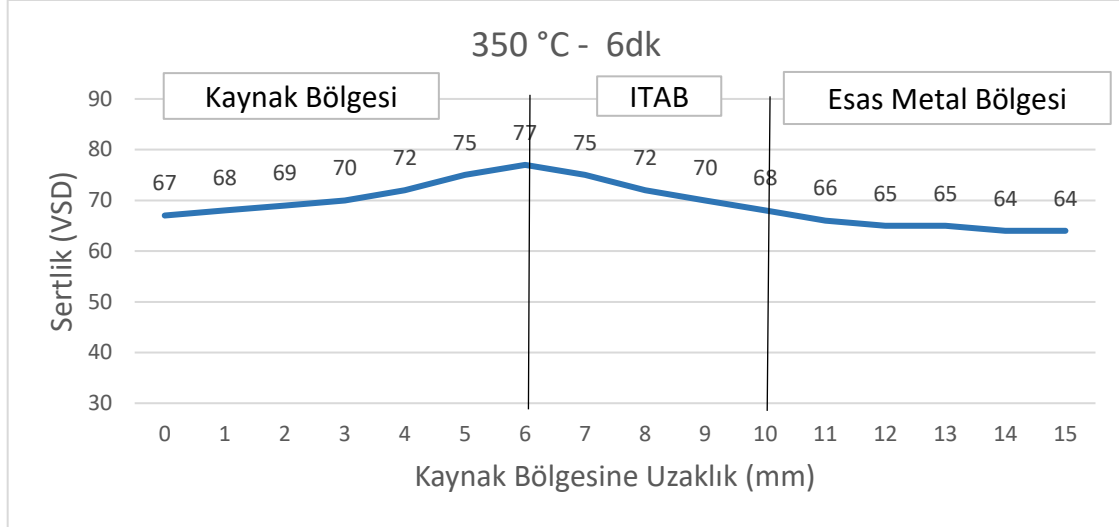
Şekil 6.18’de 350 °C’de 3 dk’lık ısıtıl işlem uygulanmış AlSi12 ile birleştirilmiş numunenin sertlik değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek sertlik değerine, diğer numunelerde olduğu ITAB’da ulaşılmıştır. Kaynak ve esas metal bölgesinde ki sonuçlar birbirine yakın olarak devam etmiştir. Sıcaklığın artması ile sertlik değerlerinde azalma görülmüştür.



Şekil 6.18: Al6061- AlSi12- 350 °C 3 dk.

Aşağıda Şekil 6.19’da 350 °C’de 6 dk boyunca uygulanan ısıtıl işlemli numuneye ait sertlik deneyi sonuçları gösterilmiştir. Isıl işlem sıcaklığının 350 °C’ye çıkması ile sertlik

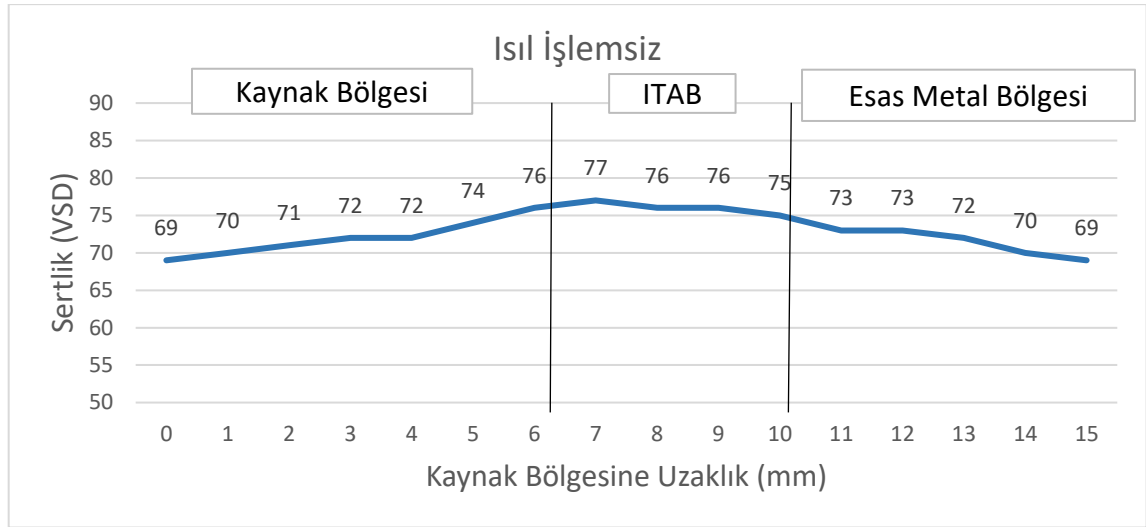
değerlerinde düşme görülürken sürenin artmasıyla bu düşüş daha fazla olmuştur. Kaynak bölgesinden esas metal bölgesine gidildikçe ITAB’da bir miktar yükselişe geçtiği ve daha sonra azalma eğiliminde olduğu görülmüştür.



Şekil 6.19: Al6061- AlSi12- 350 °C 6 dk.

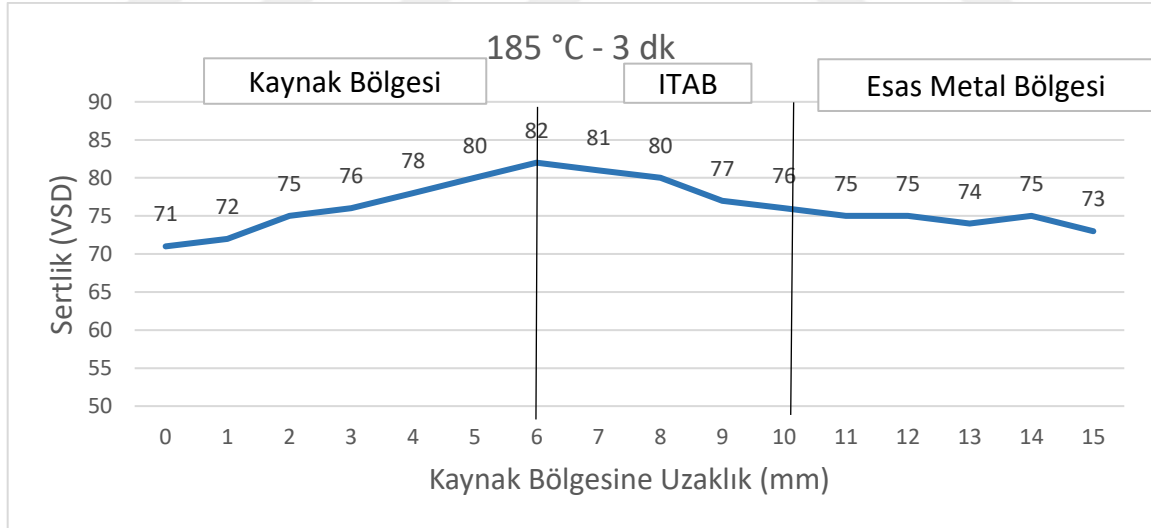
6.1.4 Al6061-T6 – AlSi12 Kaynaklı Numunelerin Mikrosertlik Sonuçları

Aşağıda verilen Şekil 6.20 de AlSi12 ilave kaynak teli kullanılarak birleştirilen Al6061-T6 malzemenin indüksiyon ısıtma işlemi uygulanmamış numunesine yapılan sertlik testine ait sonuçları verilmiştir. Grafik incelendiğinde T6 ısıtma işlemi görmemiş ısıtma işlemli numuneye göre sertlik sonuçlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. ITAB’da en yüksek değere ulaştığı ve esas metal bölgesi ile kaynak bölgesinin sertlik değerlerinin yakın olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.20: Al6061-T6- AlSi12- Isıl işlemsiz.

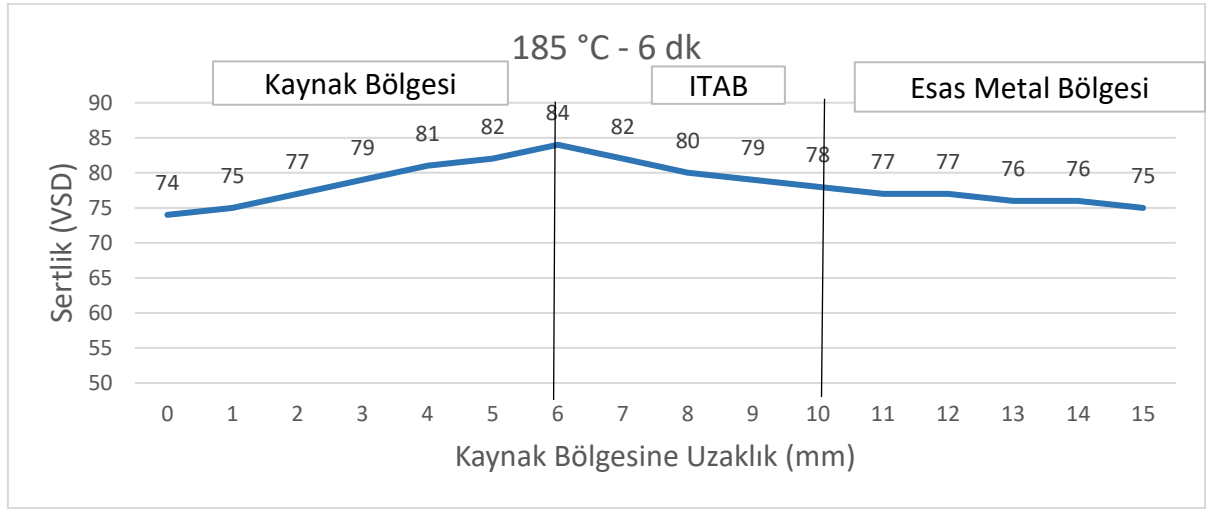
Şekil 6.21’de Al6061-T6- AlSi12’nin 185 °C 3 dk indüksiyon ısıt işlemleri görmüş numunenin sertlik deneyi sonuçları verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında kaynak bölgesi ve esas metal bölgesi sonuçlarının yakın olduğu görülmektedir. ITAB’da 82 HV ile en yüksek sertlik değerine ulaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.21: Al6061-T6- AlSi12- 185 °C 3 dk.

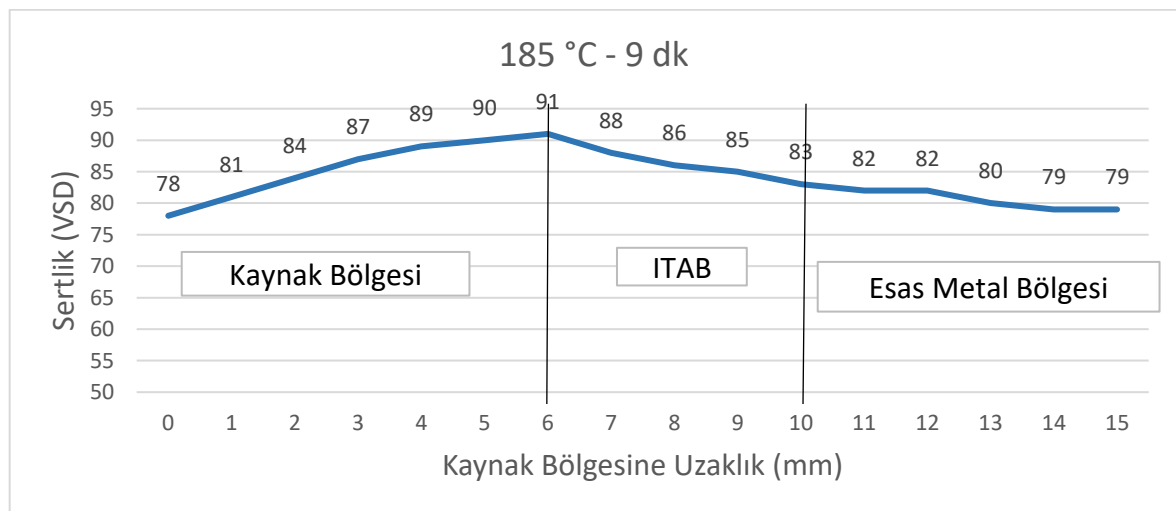
185 °C’de 6 dk İndüksiyon ısıt işlemleri görmüş numunenin mikrosertlik deneyi sonuçları Şekil 6.22’de verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde 185 °C 3 dk’lık ısıt işlemin sonuçlarının

biraz üzerinde değerler görülmüştür. Kaynak metalinden esas metal bölgesine gidildikçe daha doğrusal bir çizgi görülse de en yüksek sertlik değerine ITAB'da ulaşılmıştır.



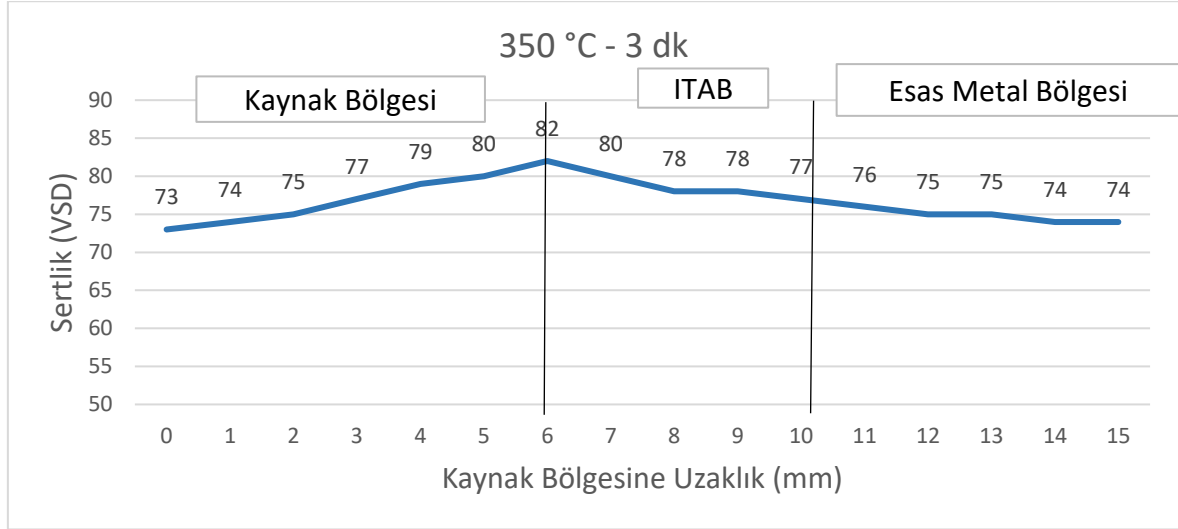
Şekil 6.22: Al6061-T6- AlSi12- 185 ° 6 dk.

Aşağıda ki Şekil 6.23'de 185 °C 9 dk ısıtıl işlem uygulanmış numuneye ait mikrosertlik değeri sonuçları verilmiştir. Grafik incelendiğinde diğer numunelere göre en yüksek değerler bu numuneye aittir. 91 HV sertlik değeri ile Al6061-T6- AlSi12 numunelerinin en yüksek sertlik değeri bu numunenin ITAB bölgesinde görülmüştür. Sıcaklık ve sürenin etkisi ile tüm bölgelerde sertlik değerlerinin arttığını görmek mümkündür.



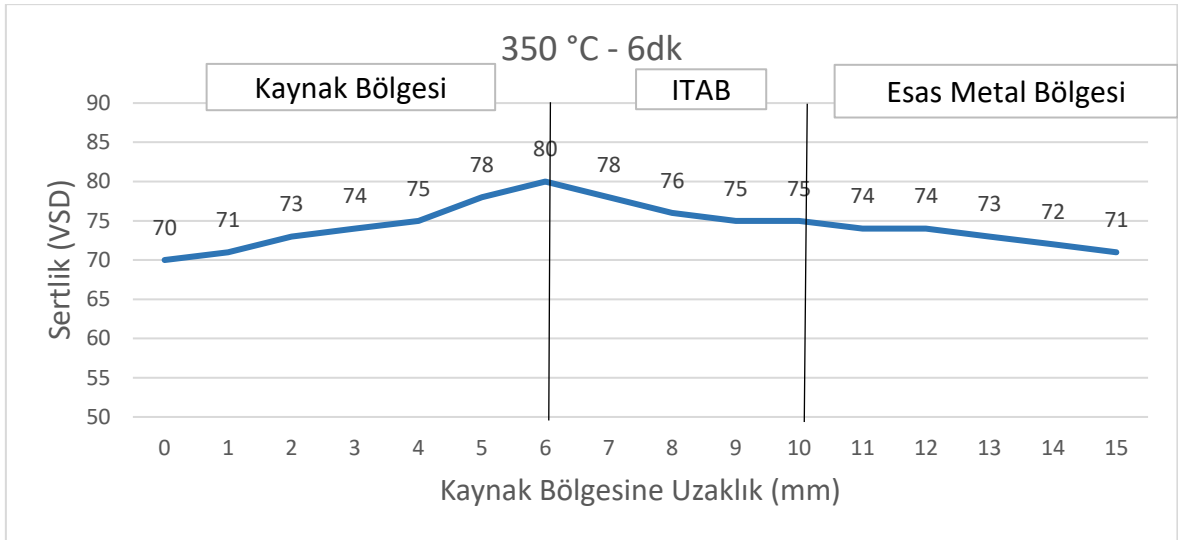
Şekil 6.23: Al6061-T6- AlSi12- 185 °C 9 dk.

Şekil 6.24’de 350 °C 3 dk’lık indüksiyon ısıt işleminin görmüş numunenin sertlik sonuçları verilmiştir. Grafiğe bakıldığında 185 ° 9 dk ya göre daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Diğer numunelerde olduğu gibi sıcaklığın artması ile sertlik değerleri düşmüştür. En yüksek değere ITAB’da ulaşılmıştır.



Şekil 6.24: Al6061-T6- AlSi12- 350 °C 3 dk.

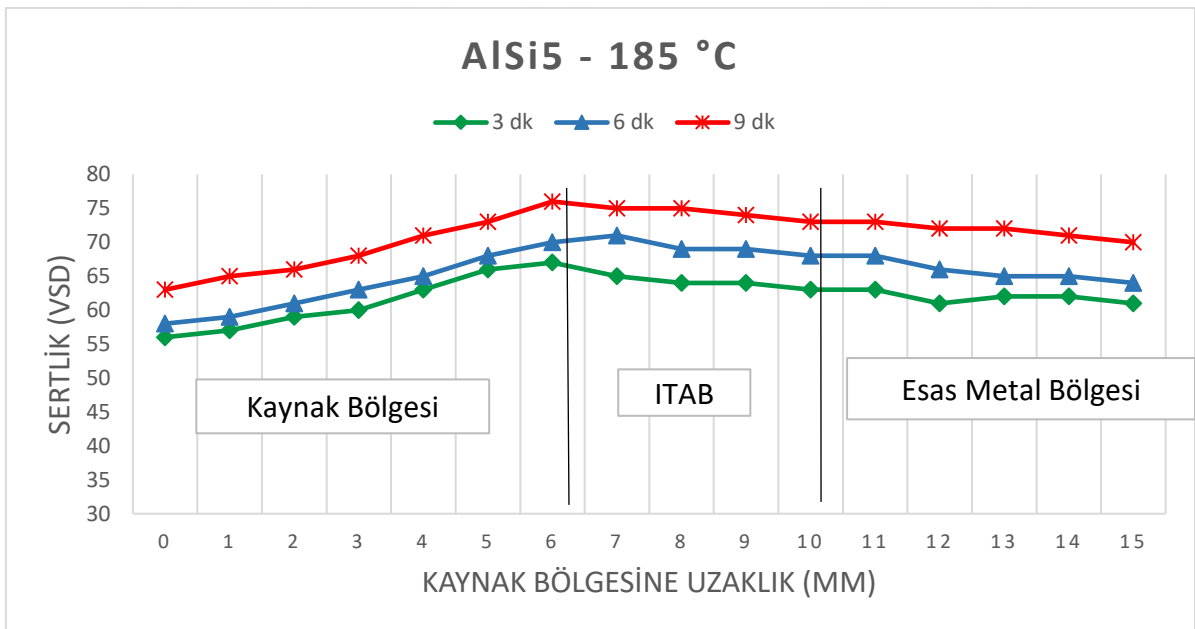
Aşağıda verilen Şekil 6.25’de AlSi12 teli ile birleştirilmiş ve 350 °C’de 6 dk indüksiyon ısıt işleminin uygulanmış numuneye ait sertlik testi sonuçları verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde aynı sıcaklıktaki 3 dk ısıt işleminin görmüş numuneye göre sertlik değerinin düştüğü görülmüştür. Kaynak bölgesi ve esas metal bölgesi sonuçlarının birbirine yakın ve ITAB’da ki değerlerin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6.25: Al6061-T6- AlSi12- 350 °C 6 dk.

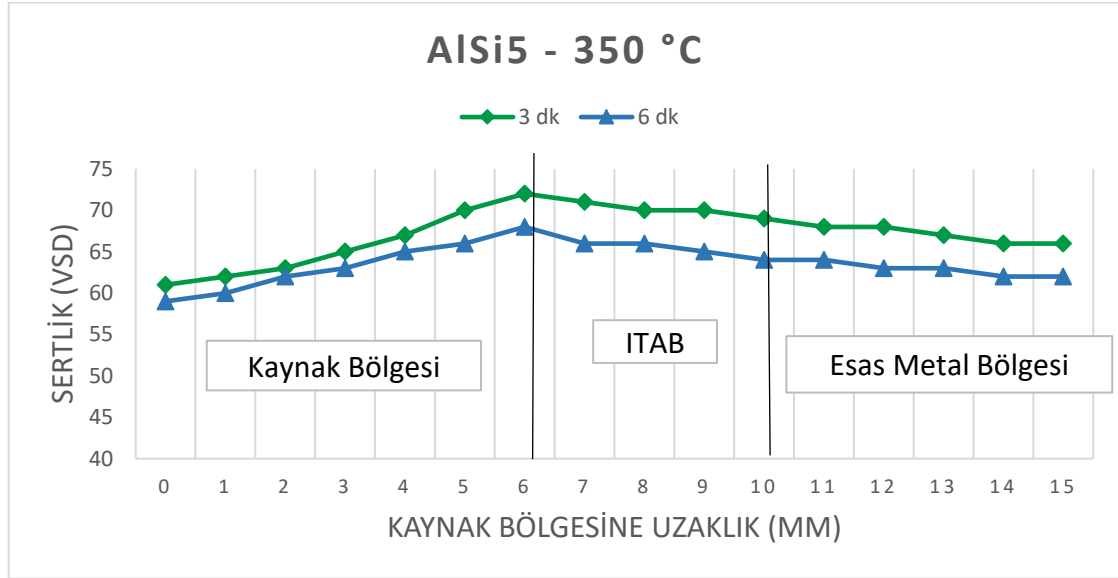
6.1.5 Numunelerin Mikrosertlik Testi Sonuçlarının Karşılaştırılması

Aşağıda verilen grafikte AlSi5 ilave teli ile kaynaklanmış ve 185 °C indüksiyon ısıl işlemi uygulanmış numunelerin sertlik değerleri verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde indüksiyon süresinin artması ile tüm bölgelerde ki sonuçların da arttığı görülmektedir.



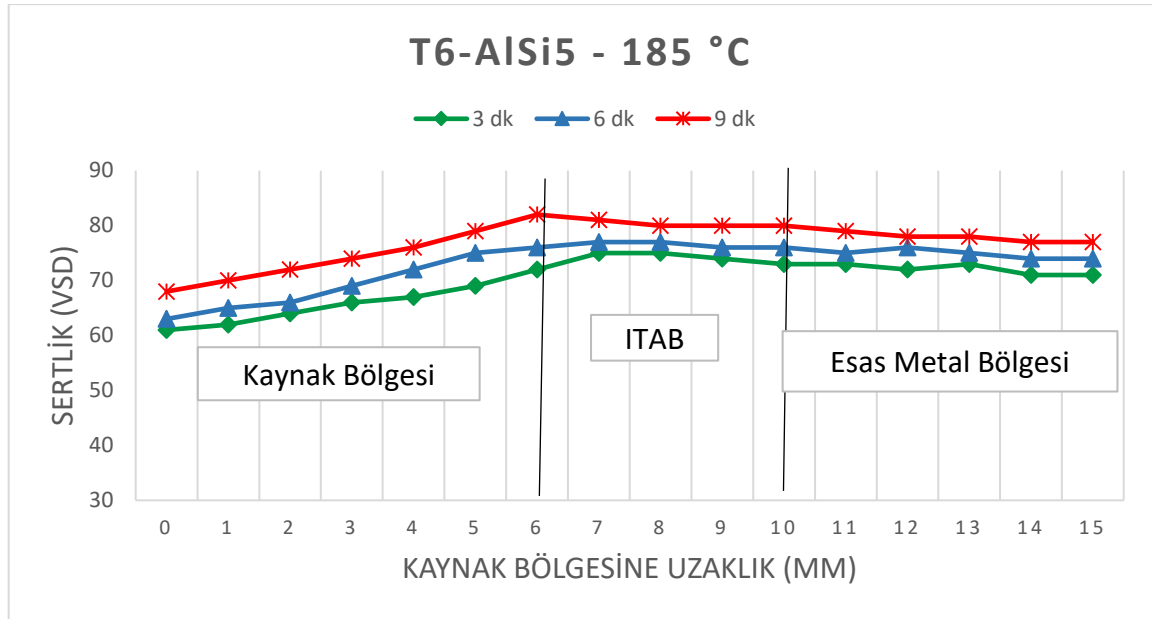
Şekil 6.26: Al6061-AlSi5 185 °C mikrosertlik değerleri.

Aşağıda ki şekilde AlSi5 ilave telli ve 350 °C de ısıt işlem görmüş numunelerin mikrosertlik değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde sürenin 3 dk'dan 6 dk'ya çıkmasıyla numunelerin tüm bölgelerinde ki sertlik değerlerinde düşüş olduğu görülmektedir. 185 °C de yapılan indüksiyon işlem etkisinin tersine sürenin artması sertlik sonuçlarını düşürmektedir.



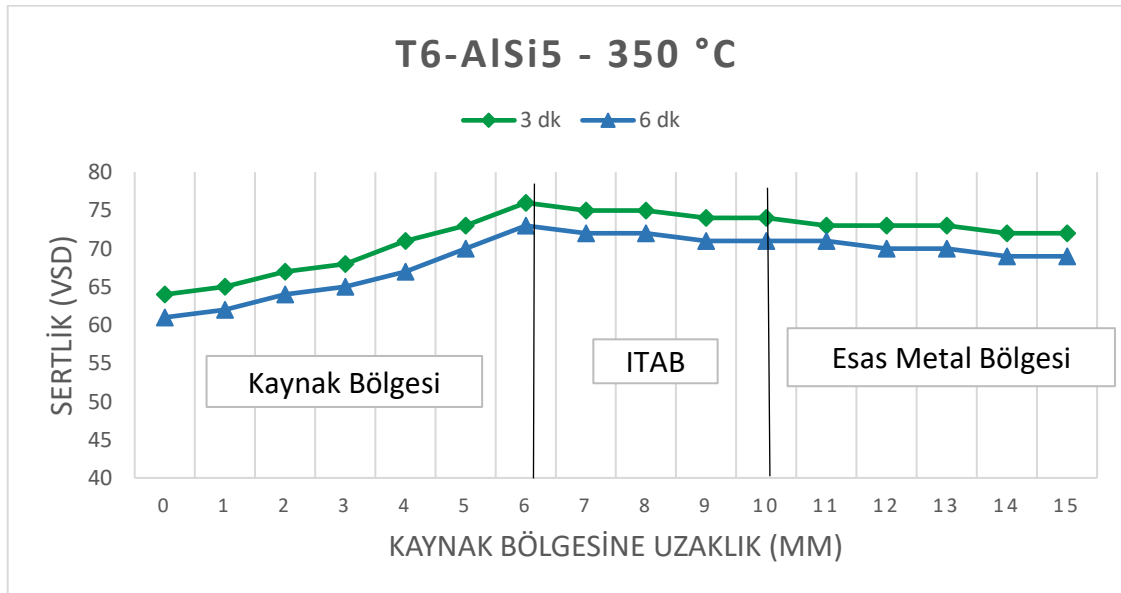
Şekil 6.27: Al6061-AlSi5 350 °C mikrosertlik değerleri.

Aşağıdaki grafikte T6-AlSi5 kaynaklı 185 °C de ısıt işlem görmüş numunelerin sertlik sonuçları verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında da yaşlandırmanın etkisi ile numunelerin sertlik değerlerinin yaşlandırma uygulanmamış numunelere göre arttığı görülmektedir. Süre etkisi değerlendirildiğinde ise, indüksiyon işlem süresinin artması ile numunelerin sertlik değerlerinin arttığı açıkça gözlemlenmektedir.



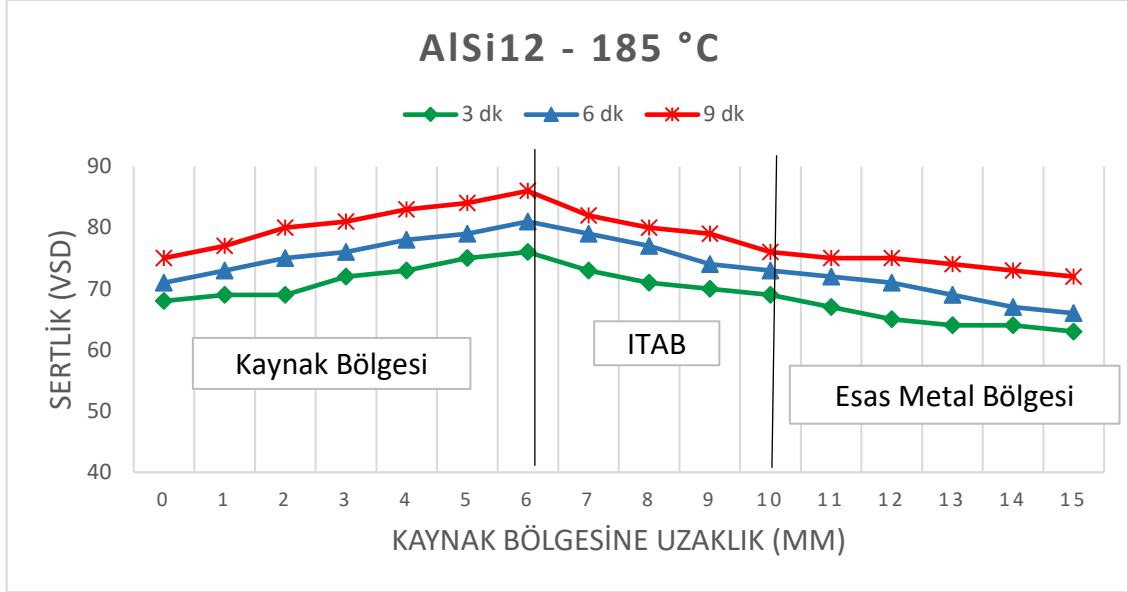
Şekil 6.28: Al6061-T6-AlSi5 185 °C mikrosertlik değerleri.

Aşağıdaki şekilde T6-AlSi5 teli ile kaynaklanmış ve ardından farklı sürelerde 350 °C indüksiyon ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin sertlik değerleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde indüksiyon süresinin artmasıyla birlikte sertlik değerlerinin düştüğü görülmüştür.



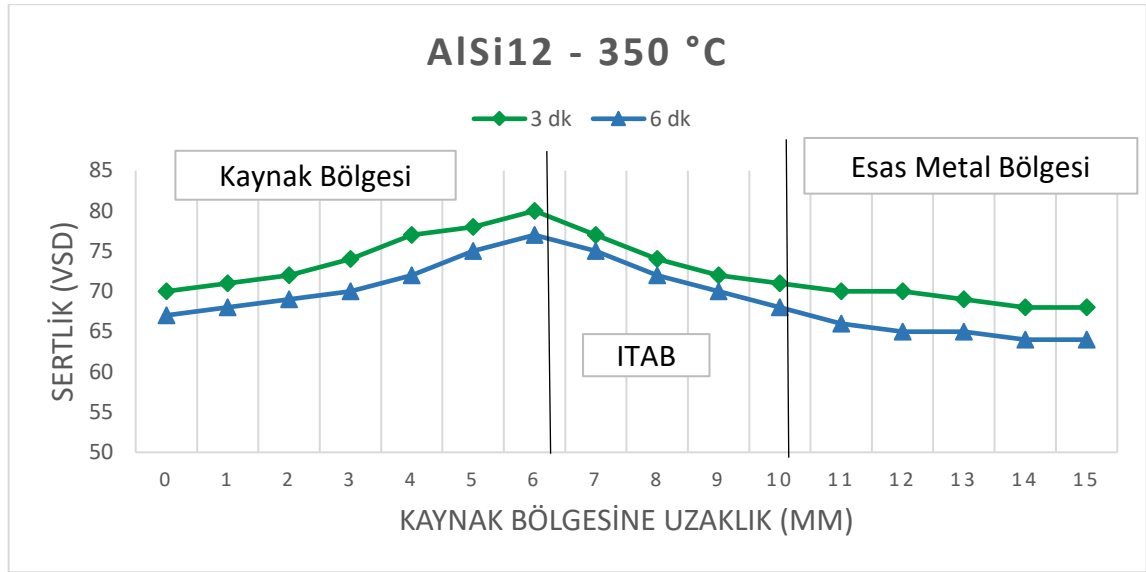
Şekil 6.29: Al6061-T6-AlSi5 350 °C mikrosertlik değerleri.

Aşağıda AlSi12 ilave teli ile birleştirilmiş ardından 185 °C’de indüksiyon ısıt işlemi uygulanmış numunelerin mikrosertlik değerleri verilmiştir. Verilen değerlere bakıldığında uygulanan ısıt işlem süresinin artması numunelerin sertlik değerlerini de arttırmıştır.



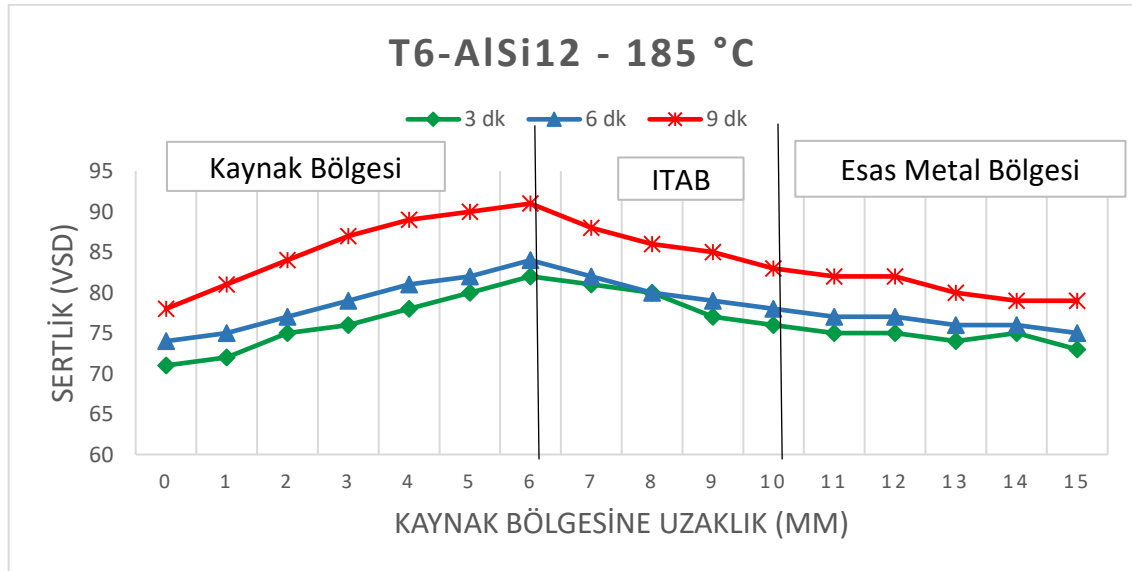
Şekil 6.30: Al6061-AlSi12 185 °C mikrosertlik değerleri.

Aşağıda AlSi12 ilave telli 350 °C de indüksiyon ısıt işlemi görmüş numunelerin sertlik değerleri gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde diğer 350 °C de ısıt işlem görmüş numunelerin sertlik değerlerinde olduğu gibi, bu numunelerinde sertlik değerleri sürenin artmasıyla düşüş göstermektedir.



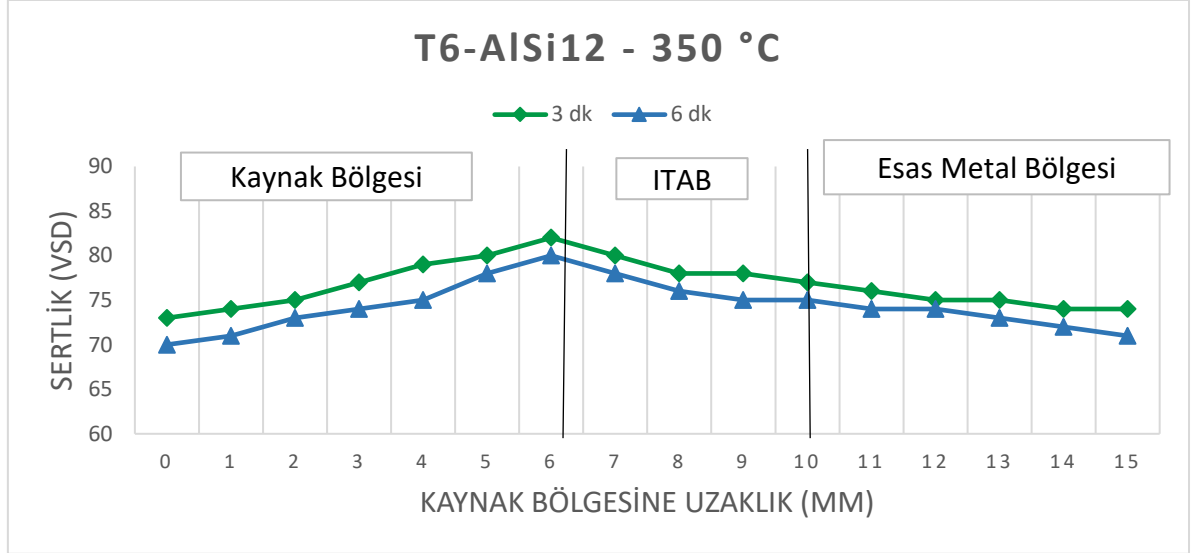
Şekil 6.31: Al6061-AlSi12 350 °C mikrosertlik değerleri.

Aşağıdaki şekilde T6-AlSi12 ilave teli ile kaynaklandıktan sonra 185 °C’de ısıtıl işlem görmüş numunelerin sertlik değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde indüksiyon süresinin artması ile numunelerin kaynak bölgesi, ısı tesiri altındaki bölge ve esas metal bölgelerindeki sertlik değerlerinde artış olduğu görülmektedir.



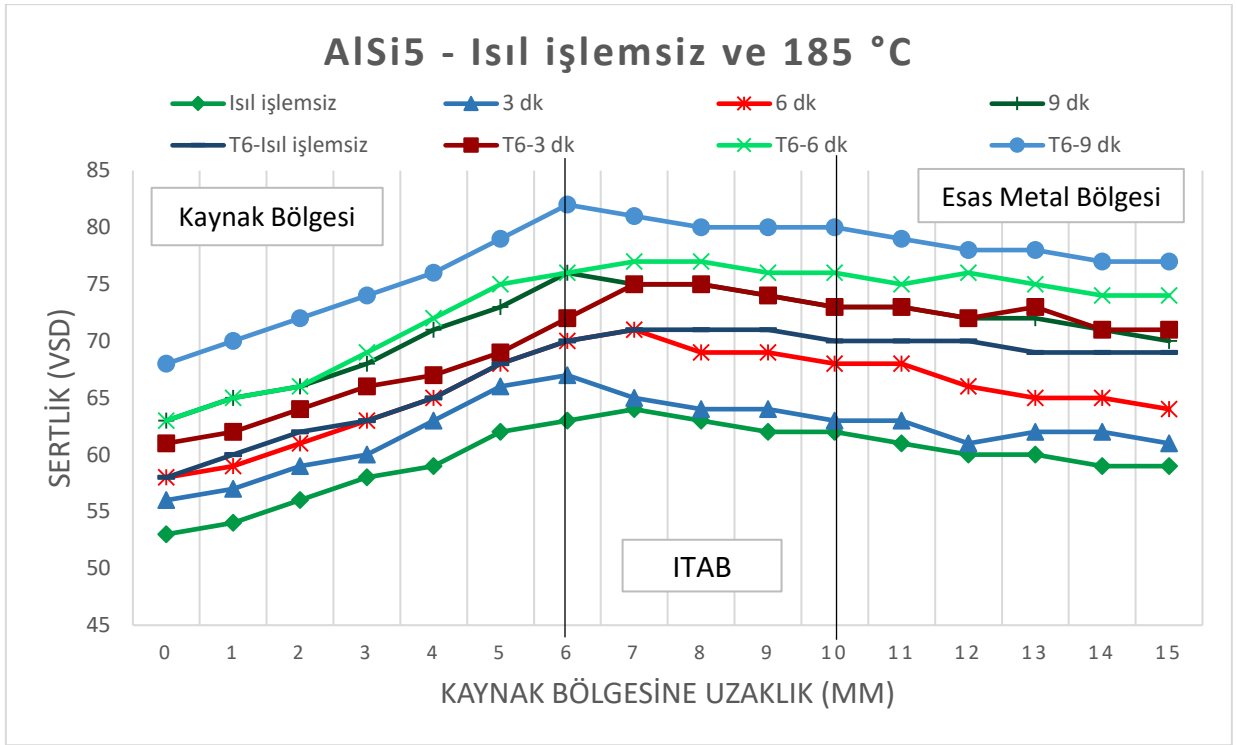
Şekil 6.32: Al6061-T6-AlSi12 185 °C mikrosertlik değerleri.

Aşağıda T6-AlSi12 ile kaynaklanmış ardından 350 °C de indüksiyon ısıt işlemleri görmüş numunelerin mikrosertlik değerleri verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında sürenin 3 dk'dan 6 dk'ya çıkması ile birlikte sertlik değerlerinin tüm bölgelerde düştüğü görülmektedir.



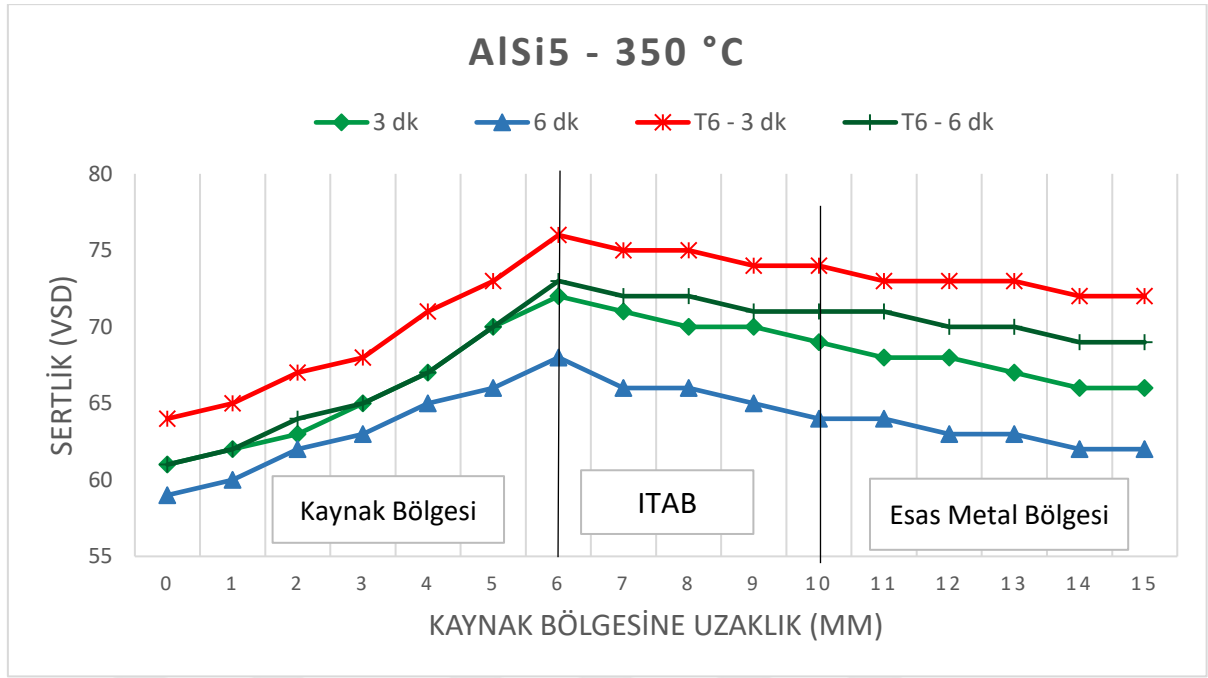
Şekil 6.33: Al6061-T6-AlSi12 350 °C mikrosertlik değerleri.

Aşağıdaki grafikte AlSi5 ilave kaynak teli kullanılarak birleştirilmiş numunelerin, ısıt işlemleri ve 185 °C'de indüksiyon ısıt işlemleri görmüş numunelerinin mikrosertlik sonuçları verilmiştir. Grafikte T6 yaşlandırma işlemi yapılmış numuneler ve yaşlandırma işlemi yapılmamış numuneler karşılaştırılmıştır. Sonuçlara bakıldığında indüksiyon işlemi ve süresi ile doğru orantılı olarak numunelerin sertlik değerleri artmaktadır. T6 Yaşlandırma işlemi görmüş numunelerin sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülse de, yaşlandırılmamış numunelere yapılan indüksiyon işlemi ile de bu değerlere yakın sonuçları elde etmek mümkündür.



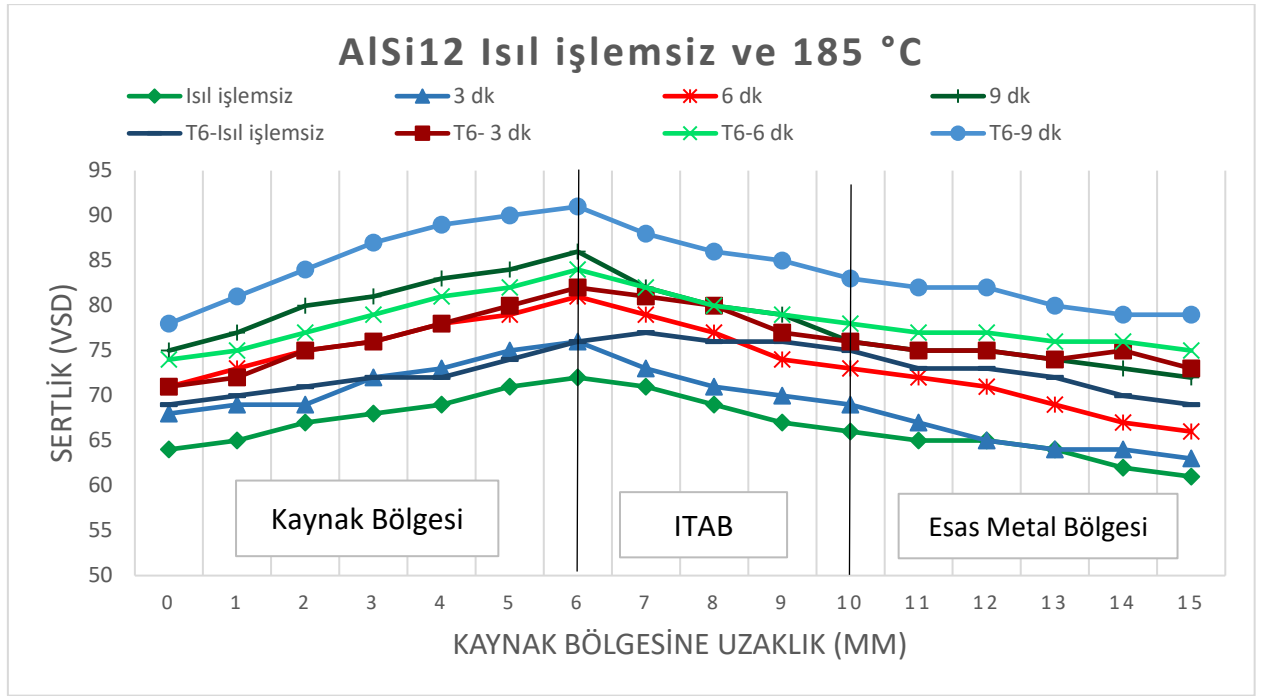
Şekil 6.34: Al6061-AlSi5 Isıl işlemsiz ve 185 °C indüksiyon ısıl işlemli numunelerin mikrosertlik değerleri.

Aşağıda AlSi5 kaynak teli ile kaynaklanmış ve ardından 350 °C indüksiyon ısıl işlemi uygulanmış numunelerin sertlik sonuçları verilmiştir. Grafiğe bakıldığında T6 yaşlandırma işlemi görmüş numunelerin sertlik sonuçları daha yüksek olsa da, indüksiyon süresi arttıkça her iki parametrede de sertlik değeri düşmektedir.



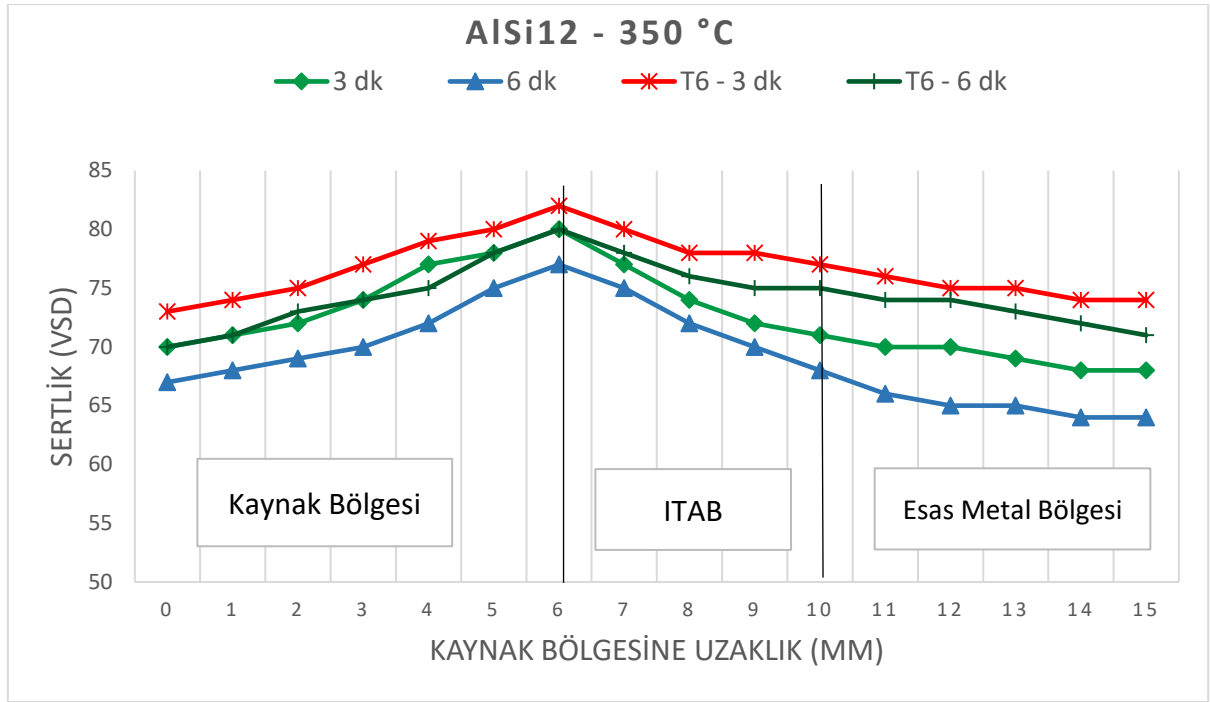
Şekil 6.35: Al6061-AlSi5 350 °C indüksiyon ısıtılmalı numunelerin mikrosertlik değerleri.

Aşağıda verilen şekilde AlSi12 ilave teli ile kaynaklanmış örneklerin, ısıtılmalı işlem uygulanmamış ve 185 °C’de indüksiyon ısıtılmalı işlemi uygulanmış numunelerinin sertlik sonuçları gösterilmiştir. Verilen sertlik sonuçları ile T6 yaşlandırma işleminin etkilerini görmek mümkündür. Uygulanan indüksiyon ısıtılmalı işlemi ile numunelerin sertlik değerleri artmaktadır. T6 Yaşlandırma uygulanmış numunelerin sonuçları uygulanmayanlara göre yukarıda olsa da, yaşlandırma işlemi uygulanmamış numunelere yapılan indüksiyon işlemi sayesinde bu sonuçlara yakın sonuçlar elde edilmiştir.



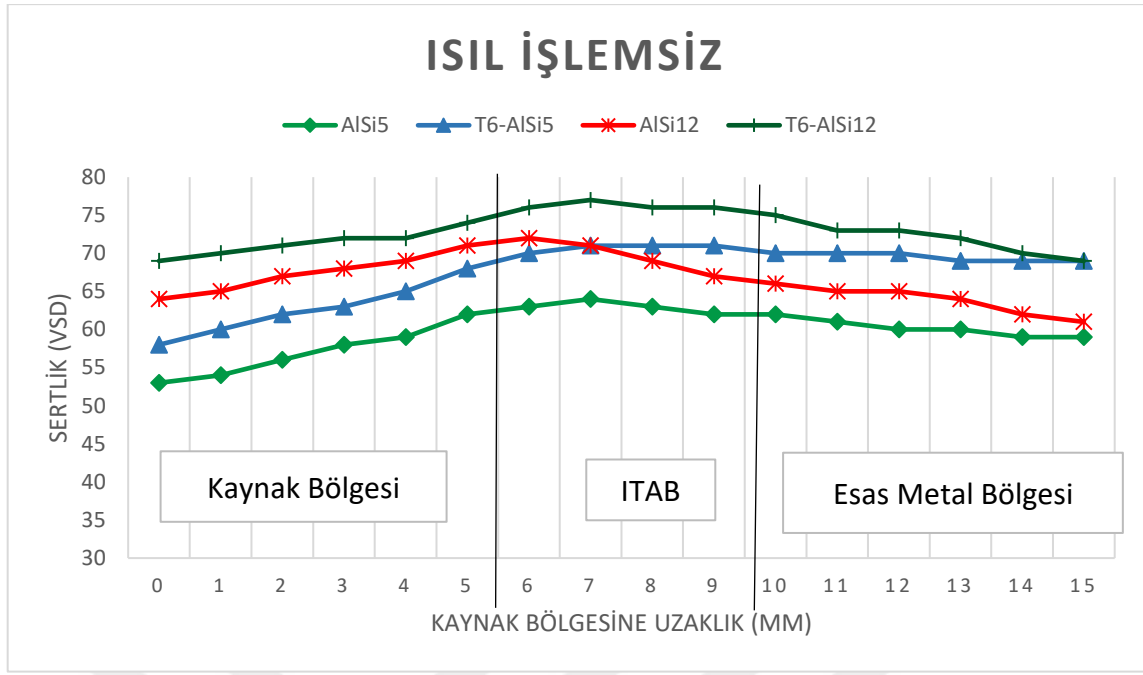
Şekil 6.36: Al6061-AlSi12 Isıl işlemsiz ve 185 °C indüksiyon ısıtılmalı numunelerin mikrosertlik değerleri.

Aşağıda AlSi12 kaynak teli kullanılarak birleştirilmiş ve sonrasında 350 °C’de indüksiyon ısıtılmalı işlemi uygulanmış numunelerin mikrosertlik sonuçları gösterilmiştir. Verilen sonuçlar incelendiğinde T6 yaşlandırma işlemi görmüş numunelerin sertlikleri daha yukarıdadır. Isıl işlem süresinin 3 dk’dan 6 dk’ya çıkmasıyla her iki numune türünde de sertlik değerleri düşüş göstermektedir.



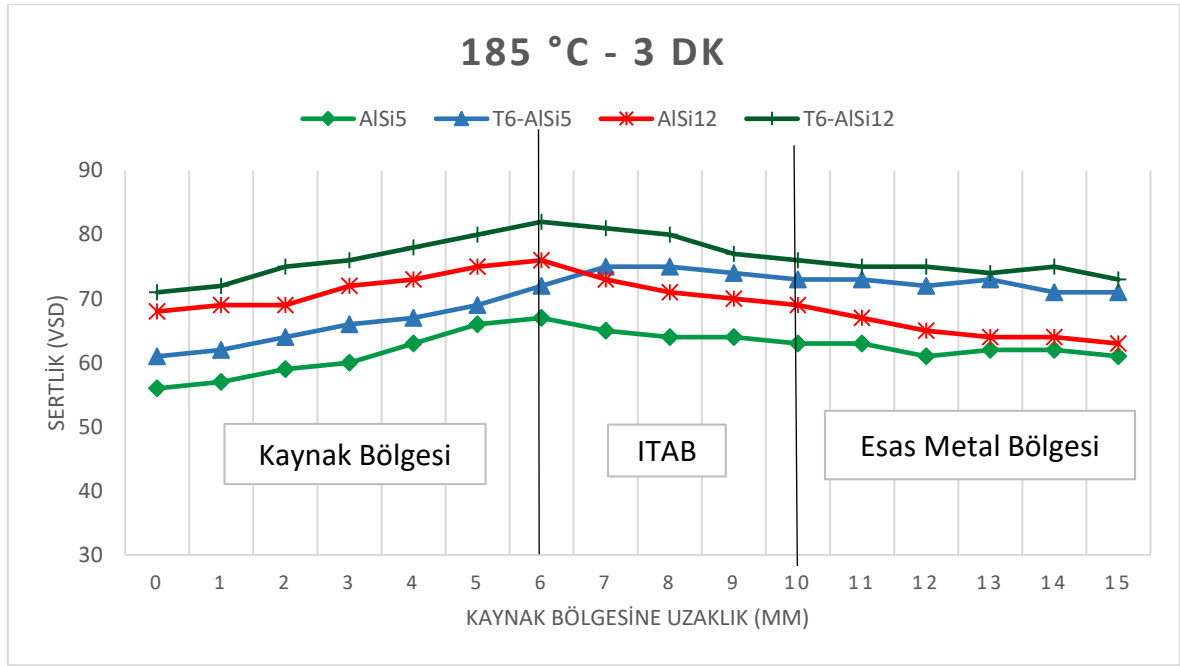
Şekil 6.37: Al6061-AlSi12 350 °C indüksiyon ısıtılmış numunelerin mikrosertlik değerleri.

Aşağıda verilen Şekil 6.38’de farklı malzeme gruplarının ve farklı kaynak telleri ile birleştirilmiş numunelerin, indüksiyon ısıtılması uygulanmamış örneklerinin mikrosertlik testlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Grafik incelendiğinde kaynak bölgesinde ve ITAB’ın başlarında AlSi12 ilave teli ile birleştirilmiş numunelerin sertlik değerinin AlSi5 ilave teli ile kaynak edilen numunelere göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. T6 Yaşlandırma işleminin etkisine bakılacak olursa, yaşlandırılmış numunelerde ki sertlik değerleri yaşlandırma işlemi uygulanmamış numunelere göre yüksek olduğu tespit edilmiştir. Özellikle esas metal bölgesinde bu fark daha da belirginleşerek AlSi5 ile AlSi12 numunesi ve AlSi5-T6 ile AlSi12-T6 numunesinin değerleri birbirine oldukça yaklaşmıştır.



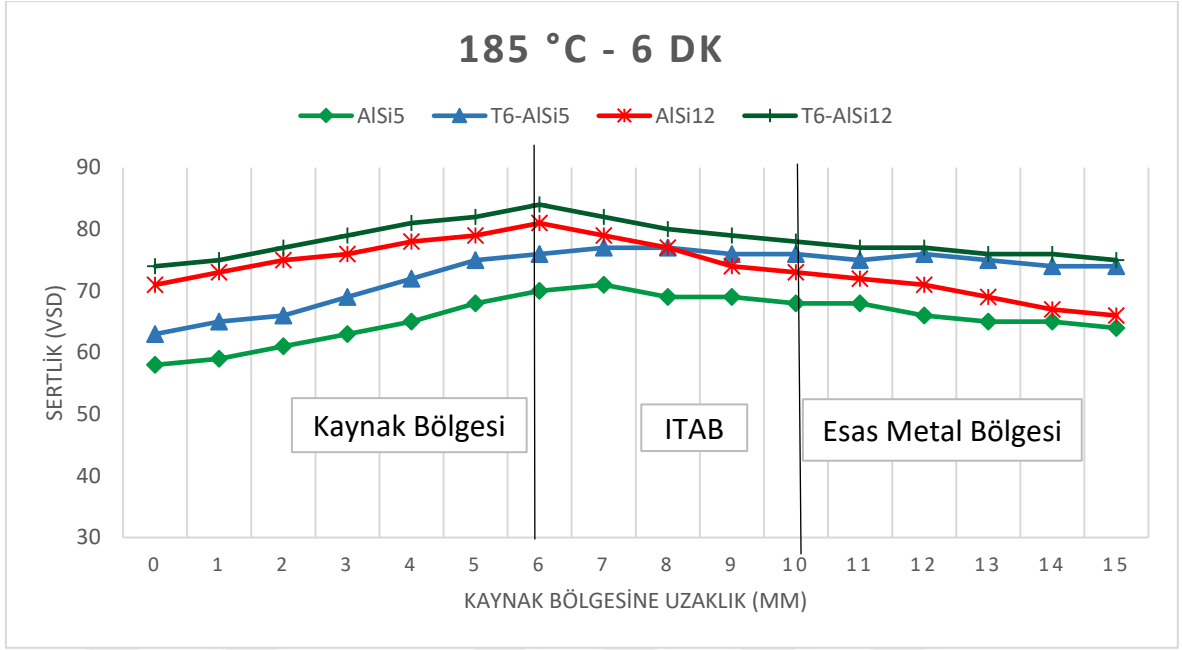
Şekil 6.38: Isıl işlemsiz numunelerin mikrosertlik değerleri.

Şekil 6.39’da 185 °C’de 3 dk indüksiyon ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin tüm parametrelerde ki örneklerinde yapılmış olan mikrosertlik testinin sonuçları verilmiştir. Grafiğe bakıldığında, ısıtma işlemsiz numunelerin sertlik değerleri ile karşılaştırıldığında yapılan indüksiyon işleminin etkisiyle sertliklerin yukarıya çıktığı görülmektedir. AISi5 ile birleştirilen numunelerin sertlik değerlerinin AISi12 ilave telli numunelerin altında olduğu gözlemlenmektedir. Numunelerin sertlik değerleri ITAB’ın başlangıcında maksimuma ulaşıldıktan sonra esas metal bölgesine doğru gidildikçe T6 yaşlandırma işlemi uygulanan numuneler üstte kalırken, T6 yaşlandırma uygulanmayan numuneler daha aşağıda kalmıştır.



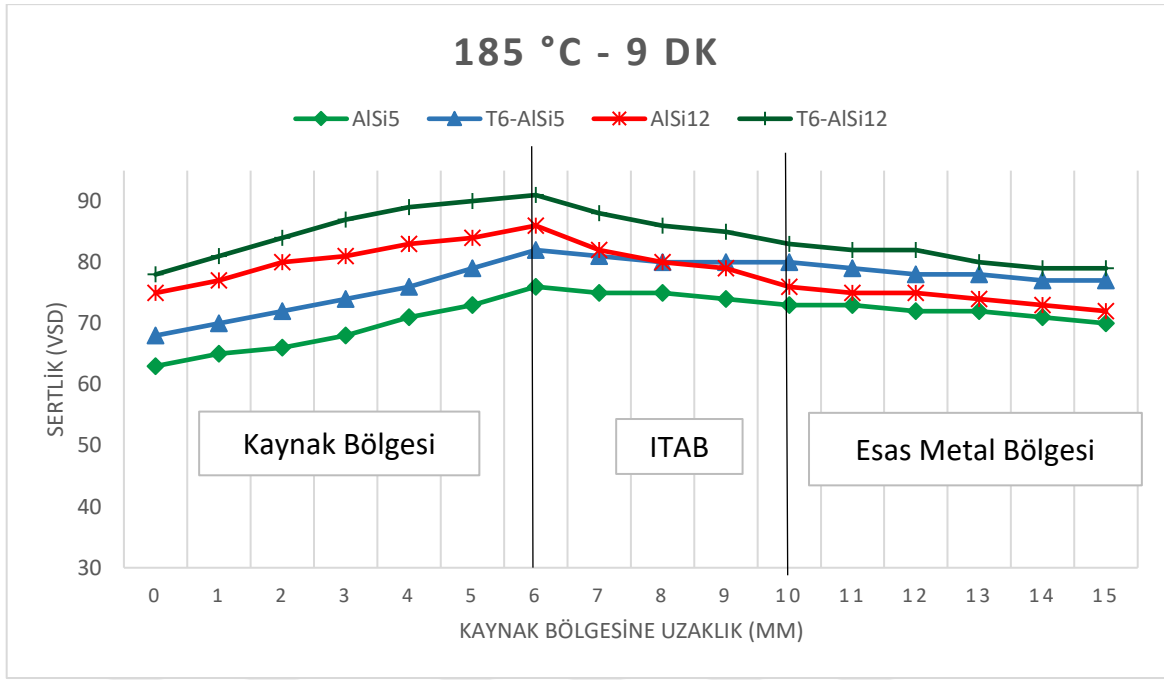
Şekil 6.39: 185 °C – 3 dk Isıl işlemli numunelerin sertlik değerleri.

Aşağıda ki Şekil 6.40’da 185 °C’de 6 dk indüksiyon ısıtma işlemi görmüş numunelere ait mikrosertlik değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde 185 °C 3 dk’ya göre sürenin artması ile tüm numunelerde ki sertlik değerleri artmıştır. T6 Yaşlandırma işlemi görmüş numunelerin sertlikleri daha yukarıda olduğu görülmektedir. Kaynak işleminde kullanılan ilave tel olarak karşılaştırıldığında ise, AISi12’li numuneler AISi5’li numunelere göre daha yüksek sonuçlar vermişlerdir. Yine esas metal bölgesine gelindiğinde T6 yaşlandırma işleminin farkı ortaya çıkmıştır.



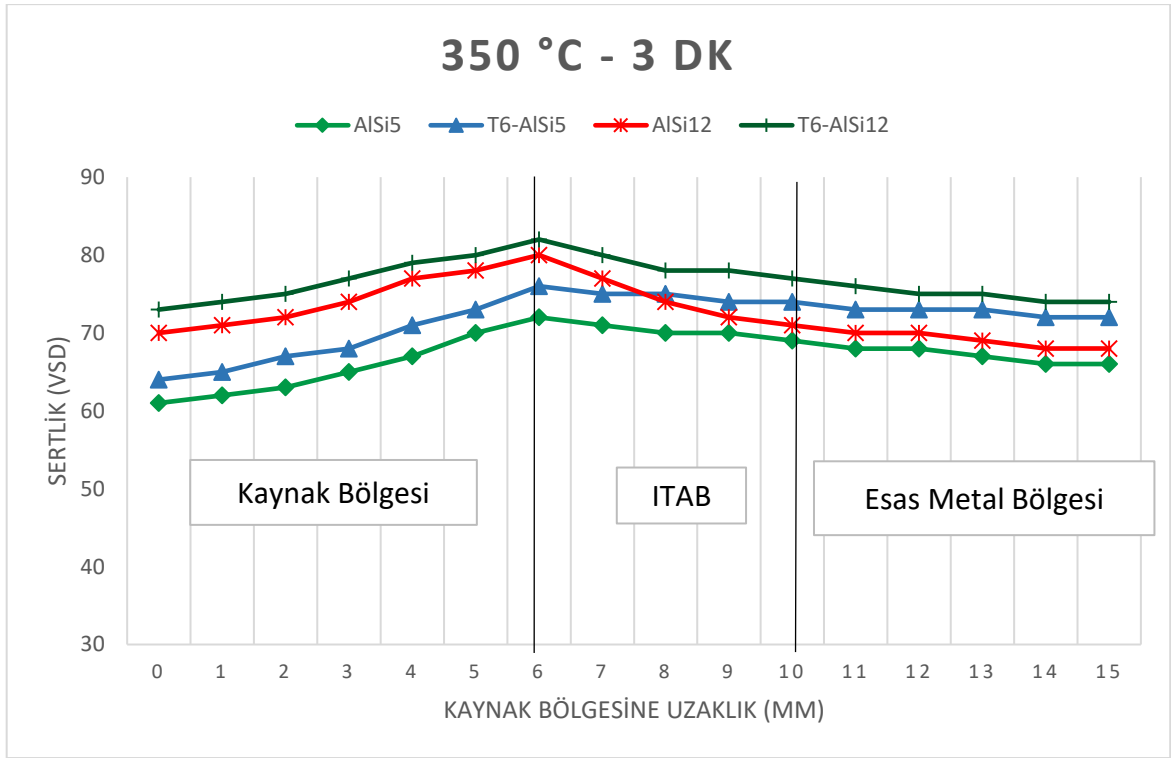
Şekil 6.40: 185 °C - 6 dk ısıtılmış numunelerin sertlik değerleri.

Şekil 6.41’de 185 °C’de 9 dk ısıtılmış numunelerin mikrosertlik değerleri gösterilmektedir. Verilen görsel incelendiğinde tüm numunelerin diğer indüksiyon işlemi parametrelerine göre en yüksek sertlik değerlerini verdiği görülmüştür. Uygulanan ısıtma süresinin numunelerin sertlikleri ile doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek sertlik değerlerini Al6061-T6-AISI12 numunesi verirken, AISi12’li numunelerin AISi5’li numunelere göre daha sert olduğu sonucuna varılmıştır. T6 Yaşlandırmanın da özellikle esas metal bölgesinde sertlik değerlerini arttırmada olumlu etkisi görülmüştür. 185 °C’de yapılan indüksiyon işleminin en başarılı süresi bu numunelerdedir.



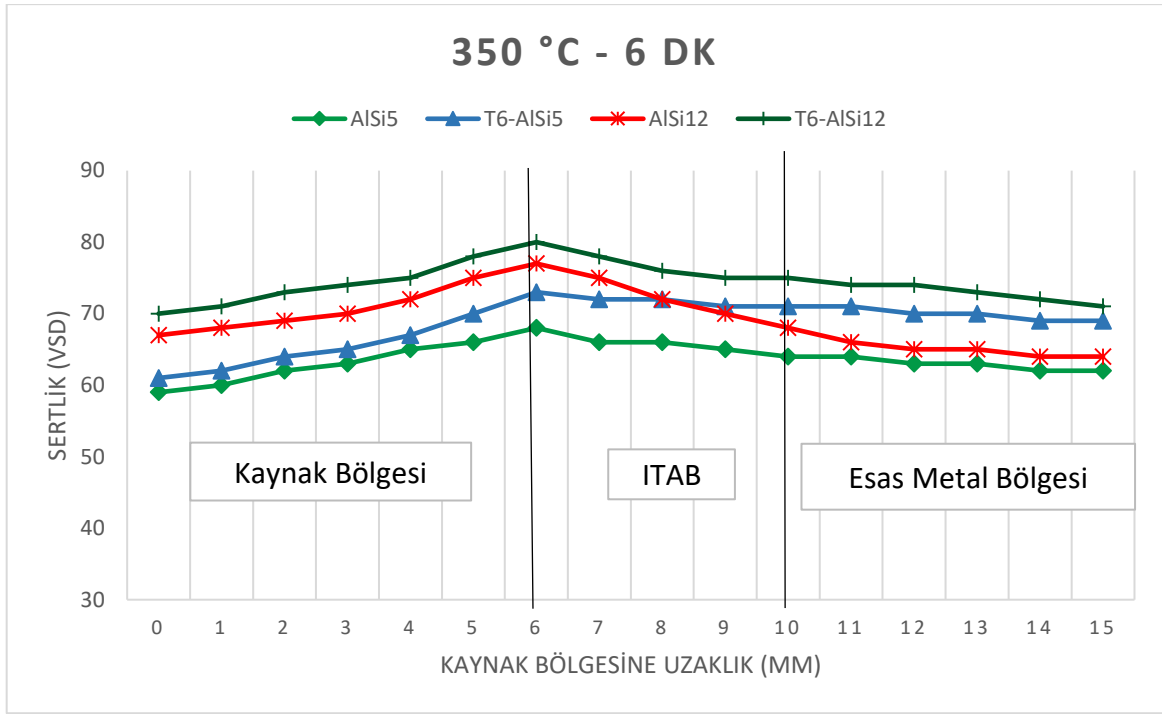
Şekil 6.41: 185 °C - 9 dk Isıl işlemlili numunelerin sertlik değeri.

Aşağıda verilen Şekil 6.42’de 350 °C 3 dk ısıtıl işlem görmüş numunelerin sertlik değeri verilmiştir. Grafiğe bakıldığında bir önceki grafikte incelediğimiz 185 °C 9 dk indüksiyon işlemine göre sertliklerin düştüğü belirlenmiştir. Numunelerin esas metale doğru gidildikçe yaşlandırma durumuna göre, sertlik sonuçlarının birbirine yaklaştığı görülmüştür. ITAB’da Al6061-T6-AlSi12 numunesinin diğerlerinden daha yüksek sonuç verdiği, kaynak bölgesinde ise Al6061-AlSi5 numunesinin diğer sonuçların altında kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6.42: 350 °C – 3 dk Isıl işlemli numunelerin sertlik değerleri.

Şekil 6.43’de 350 °C 6 dk indüksiyon ısıl işlemi görmüş numunelerin mikrosertlik testi sonuçları verilmiştir. Sonuçlarda, 350 °C de yapılan indüksiyon işlemi için süre arttığında sertlik değerlerinin düştüğü görülmüştür. Grafik incelendiğinde kaynak bölgesinde Al6061-AlSi5 numunesinin diğer numunelere göre daha düşük seviyede kaldığı gözlemlenmektedir. Numuneler en yüksek değerlerine ITAB’da ulaşmış ve ardından esas metale doğru gidildiğinde sertlik değerleri düşmüştür.



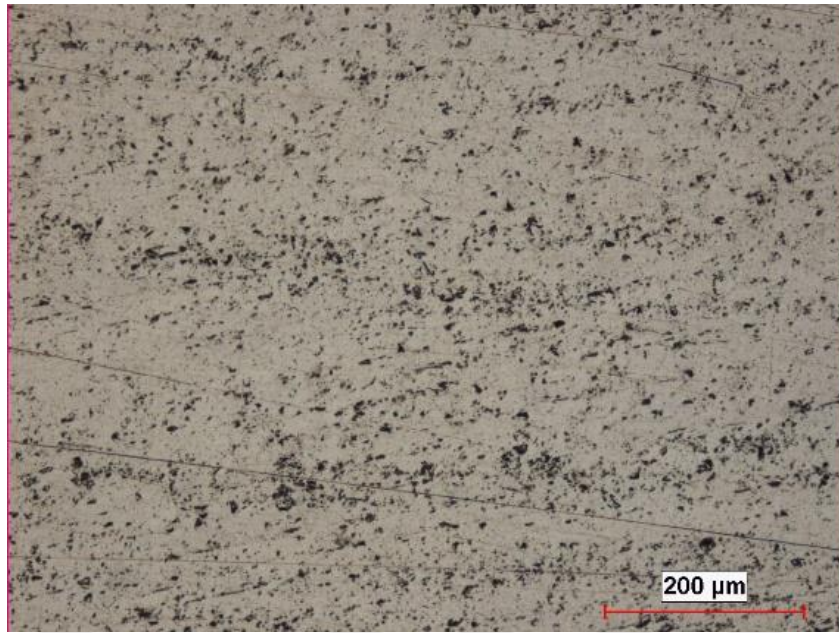
Şekil 6.43: 350 °C - 6 dk ısıtılmış numunelerin sertlik değerleri.

6.2 Mikroyapı İncelemesi Sonuçları

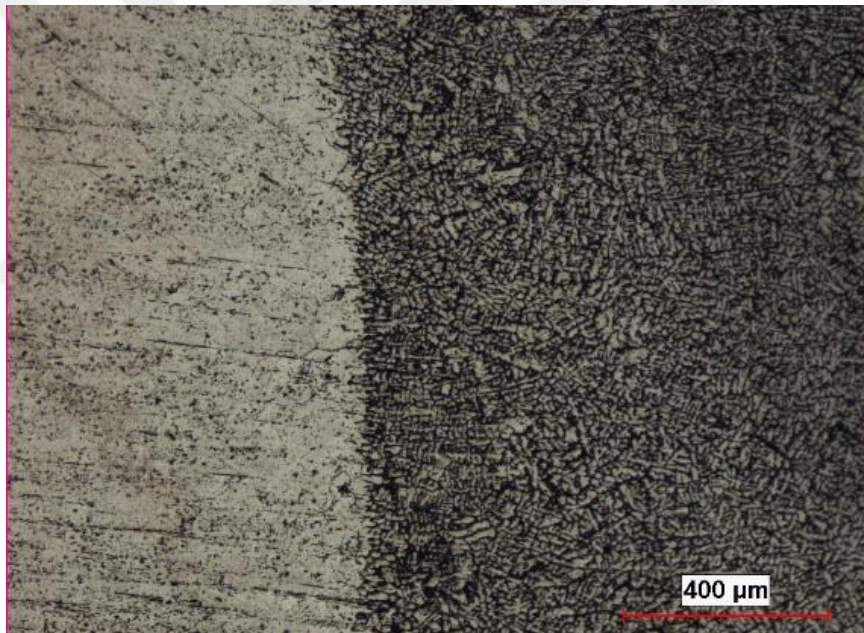
Numunelerin yüzeylerine zımparalama ve parlatma işlemi yapıldıktan sonra Keller Reaktif ile dağlama yapılmıştır. Ardından numunelerin Kaynak Bölgesi, Geçiş Bölgesi ve Esas Metal Bölgesi mikroskop yardımıyla 50x, 100x ve 200x büyütme ile incelenmiştir. Mikroyapı görüntüleri kullanılan malzeme ve ilave tel çeşidine göre aşağıda verilmiştir.

6.2.1 Al6061 – AISi5 Numunelerinin Mikroyapı Sonuçları

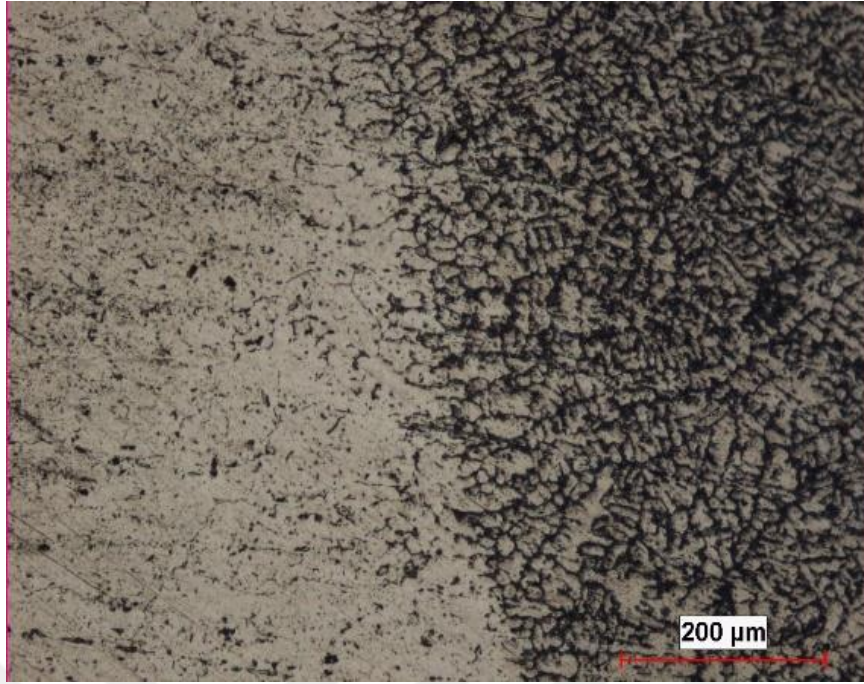
Aşağıda Al6061 – AISi5 ısıtılmış numunenin geçiş, kaynak ve esas metal bölgelerine ait farklı büyütme mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Verilen görüntülere bakıldığında geçiş bölgesinde başlayan dentrit tane yapısı kaynak bölgesinde daha fazla yoğunlaşmıştır.



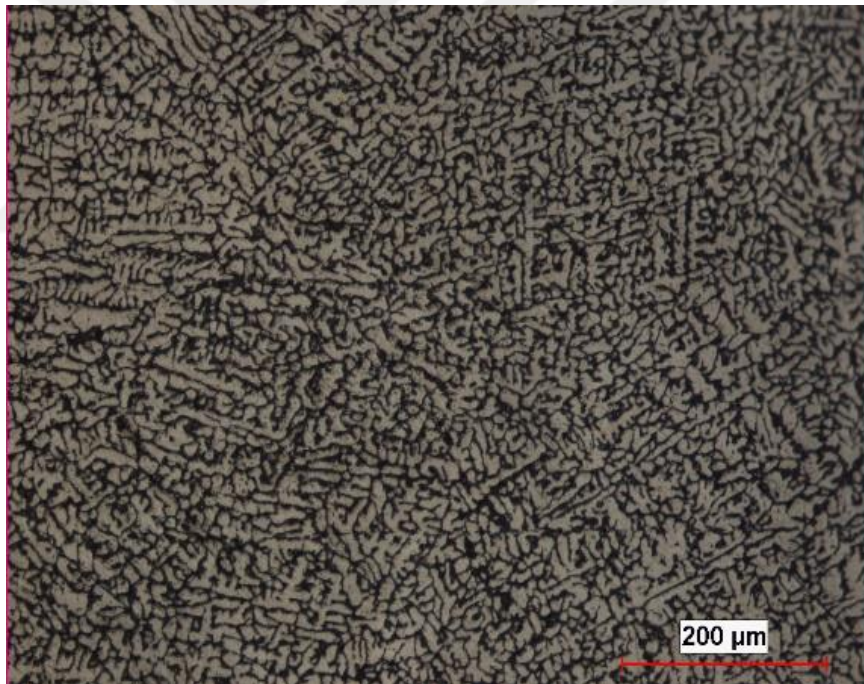
a)



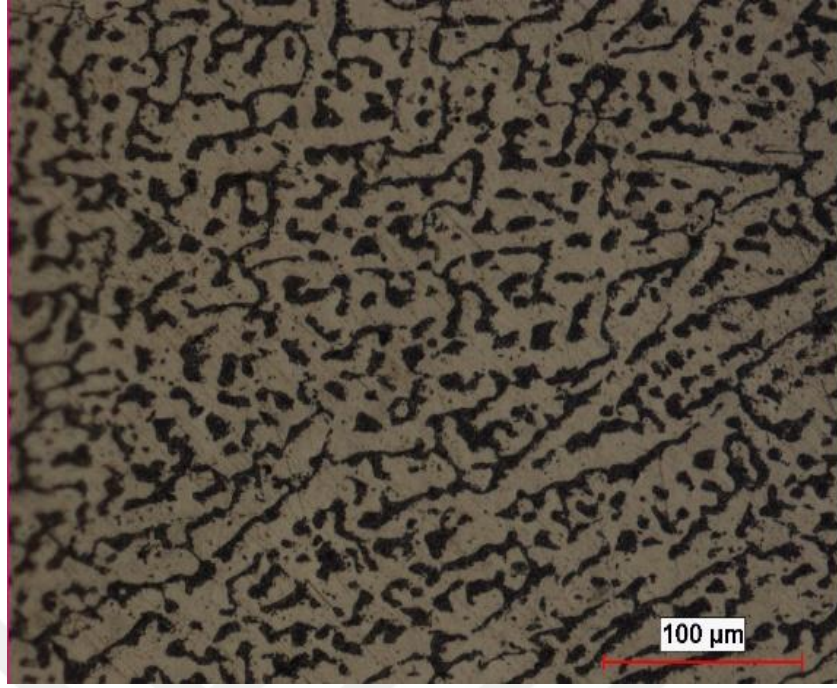
b)



c)



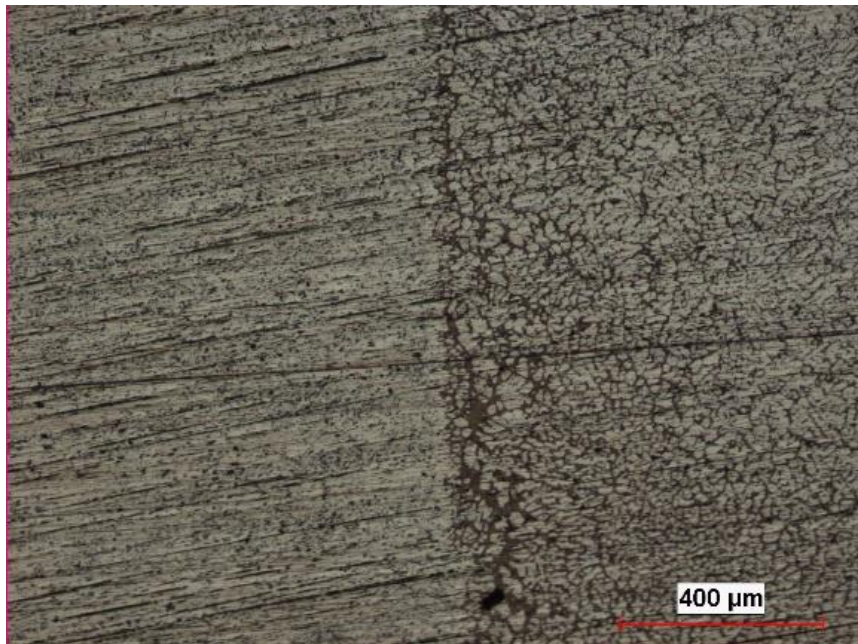
d)



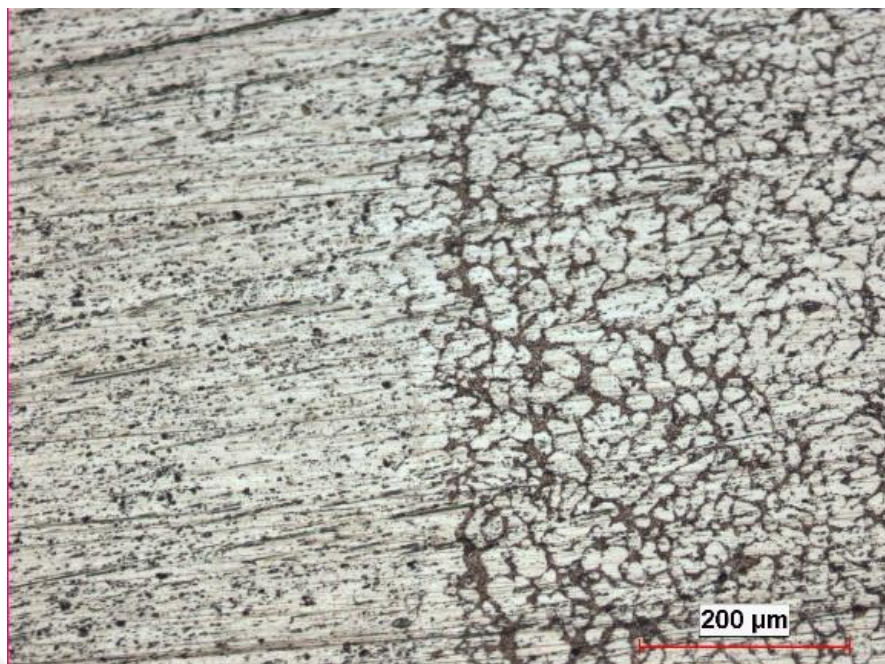
e)

Şekil 6.44: Isıl işlemsiz a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

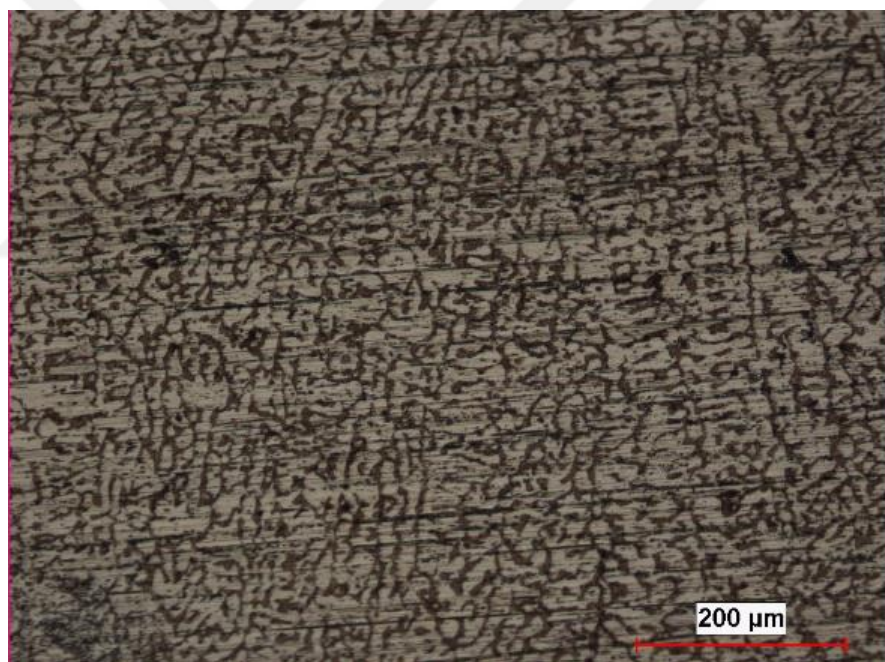
Aşağıda Al6061- AlSi5 malzemesinin 185 °C’de 3 dk indüksiyon ısıl işlemi uygulanmış numunesinin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde ısıl işlemin etkisiyle daha çok kaynak bölgesinde ki tanelerde irileşme görülmüştür.



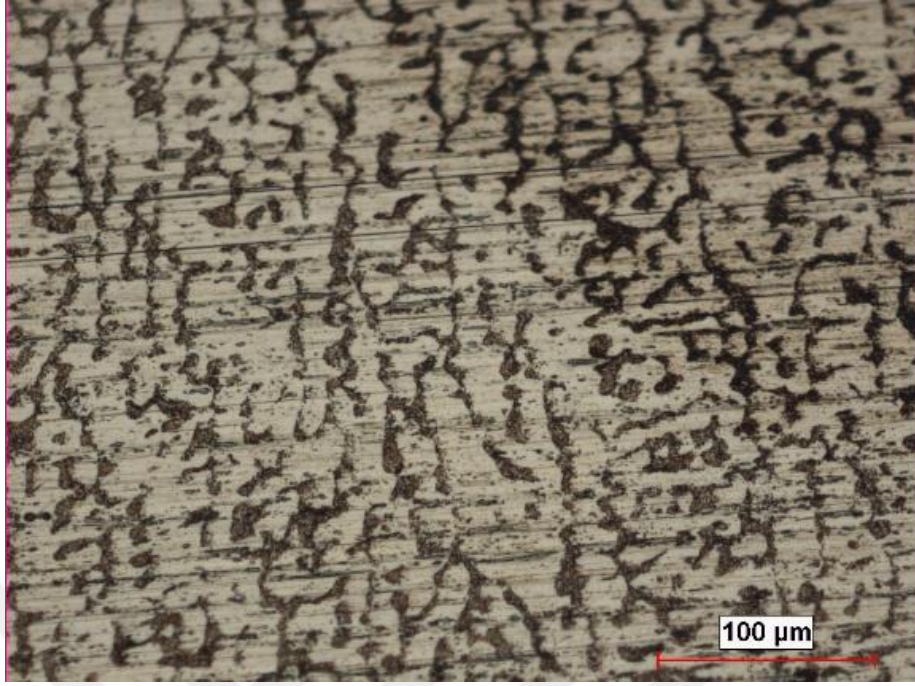
a)



b)



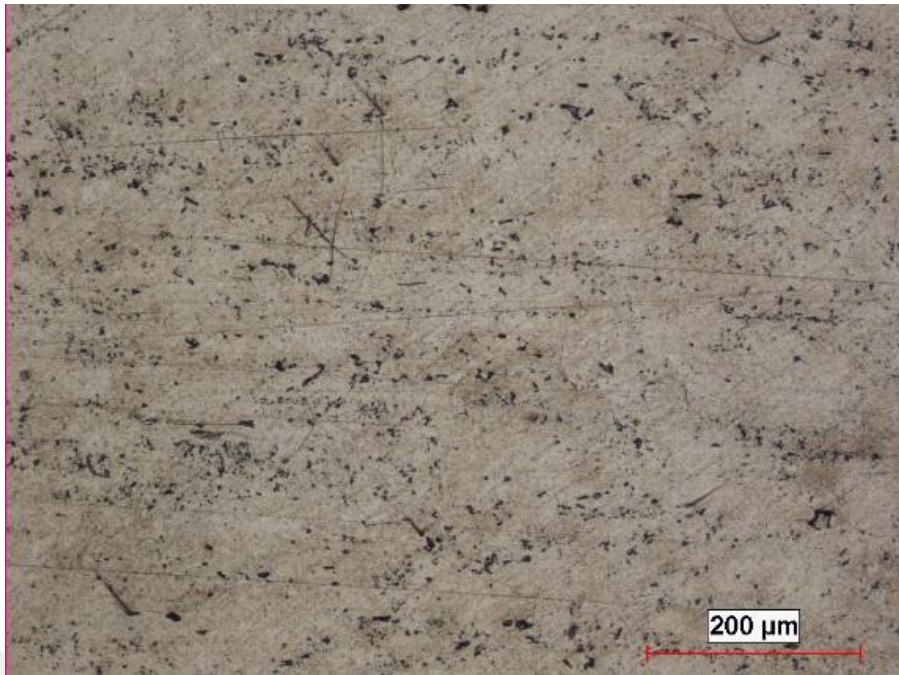
c)



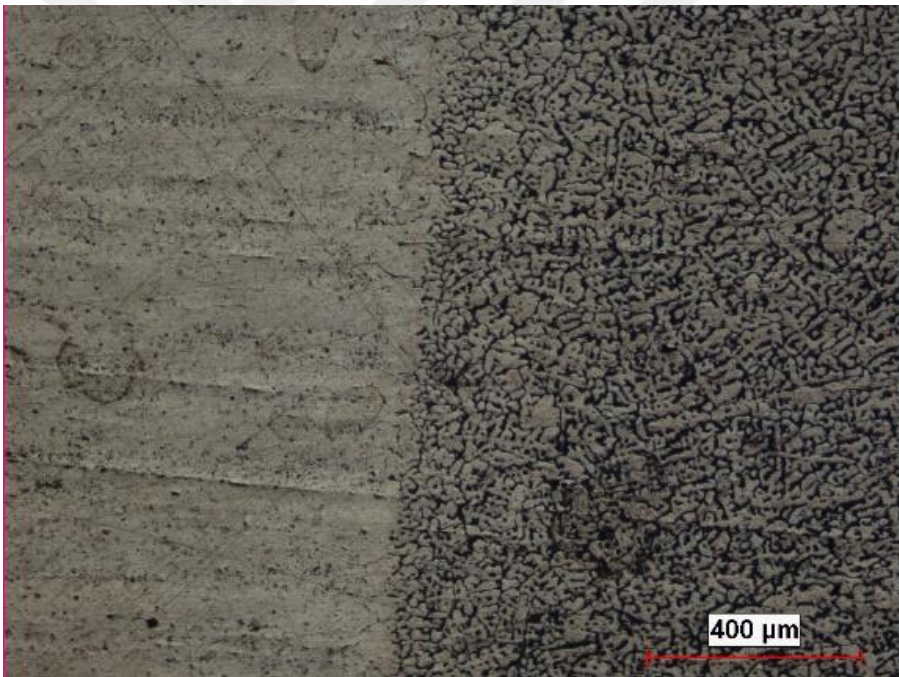
d)

Şekil 6.45: 185 °C 3 dk Isıl işlemli a) Geçiş bölgesi 50x b) Geçiş bölgesi 100x c) Kaynak bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

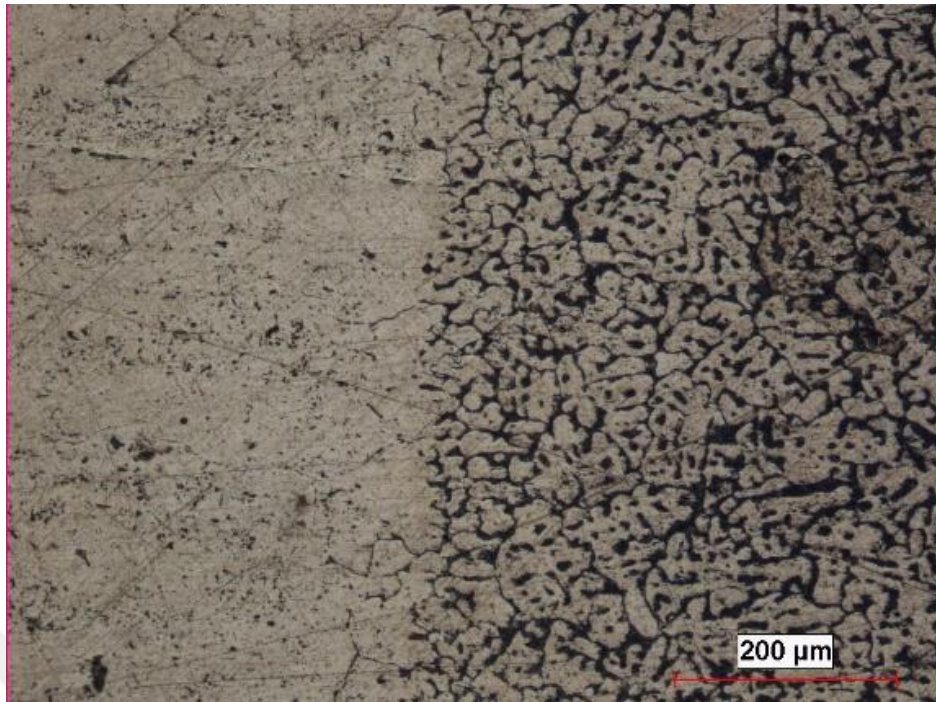
Aşağıda Şekil 6.46’da verilen Al6061 – AlSi5 TIG kaynaklı malzemenin 185 °C 6 dk indüksiyon ısıtma işlemi uygulanmış numunesinin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, ısı tesiri altında ki bölgede ki ince tanelerin, kaynak bölgesine gidildikçe irileştiği görülmektedir.



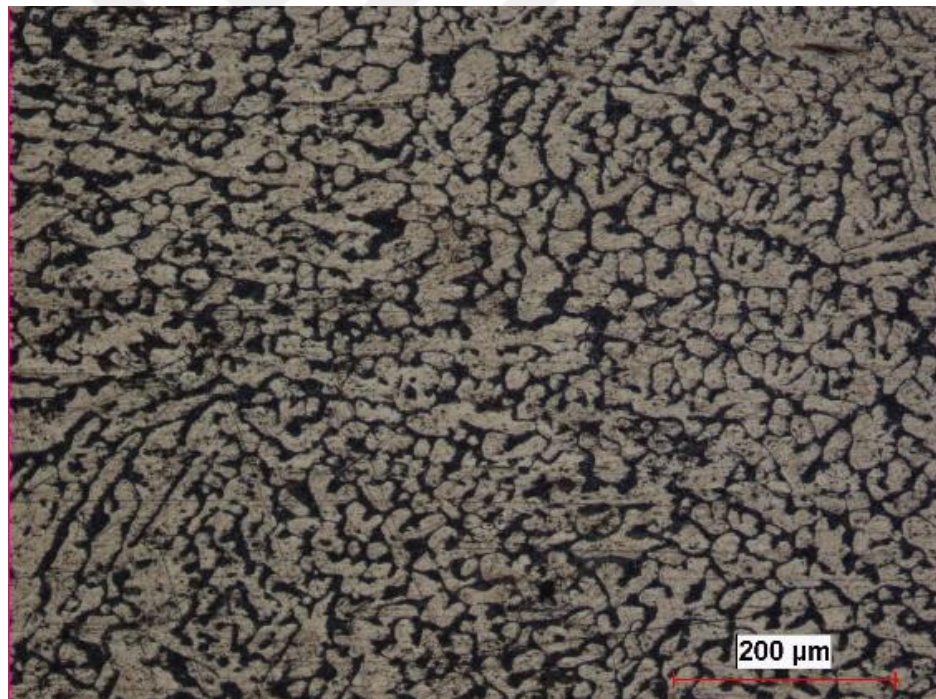
a)



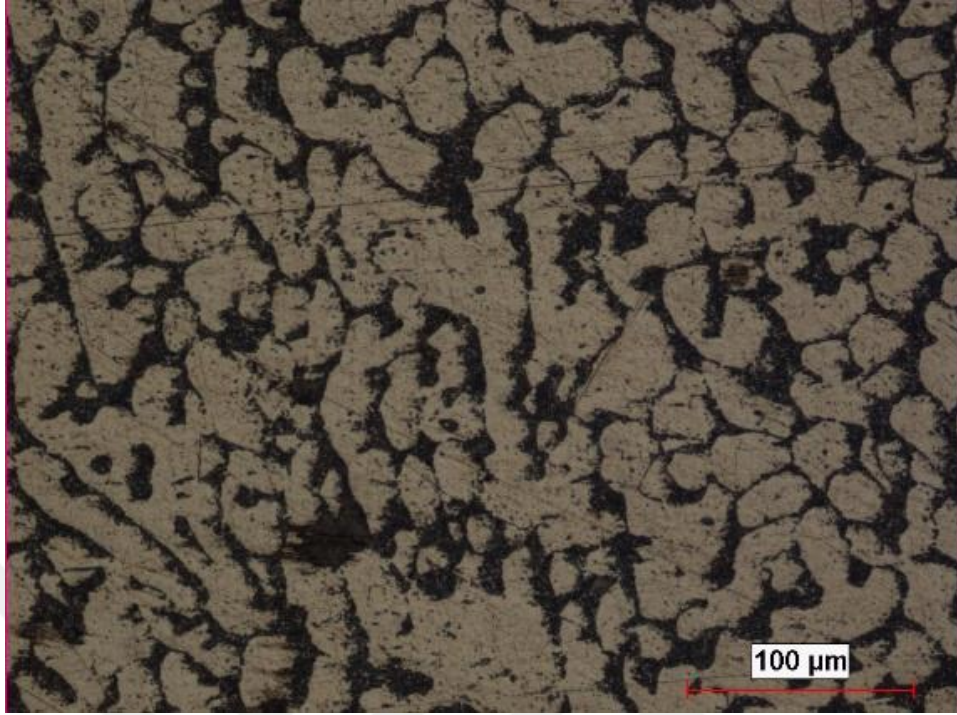
b)



c)



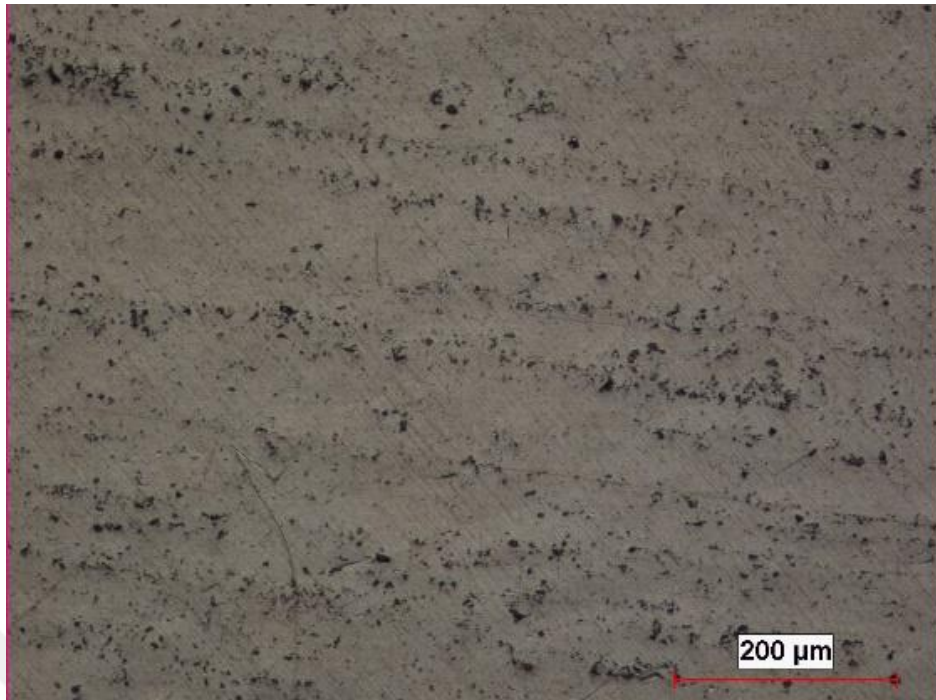
d)



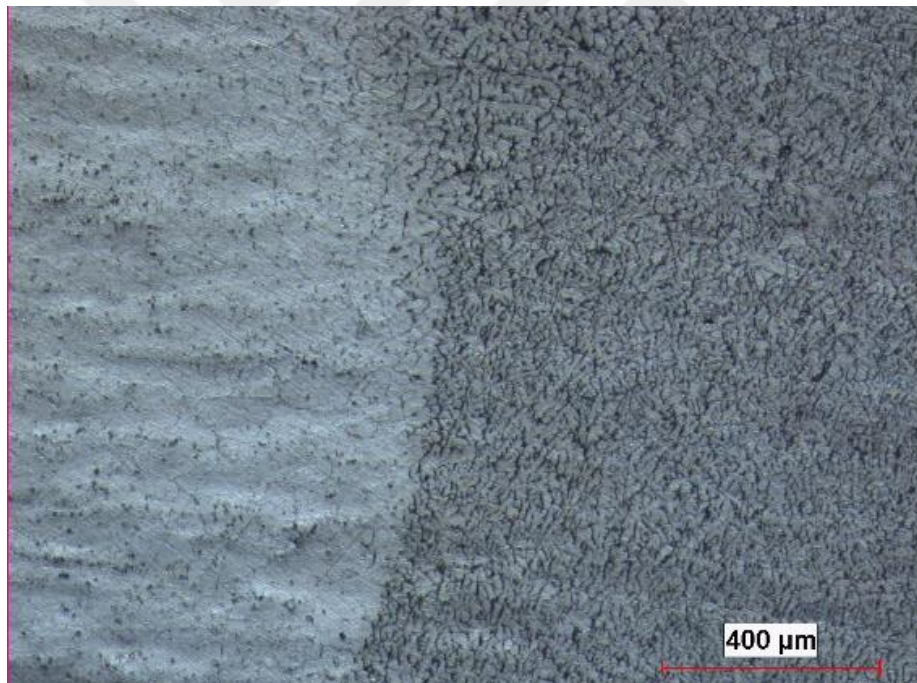
e)

Şekil 6.46: 185 °C 6 dk Isıl işlemlı a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütölmüş mikroyapı görüntüsü.

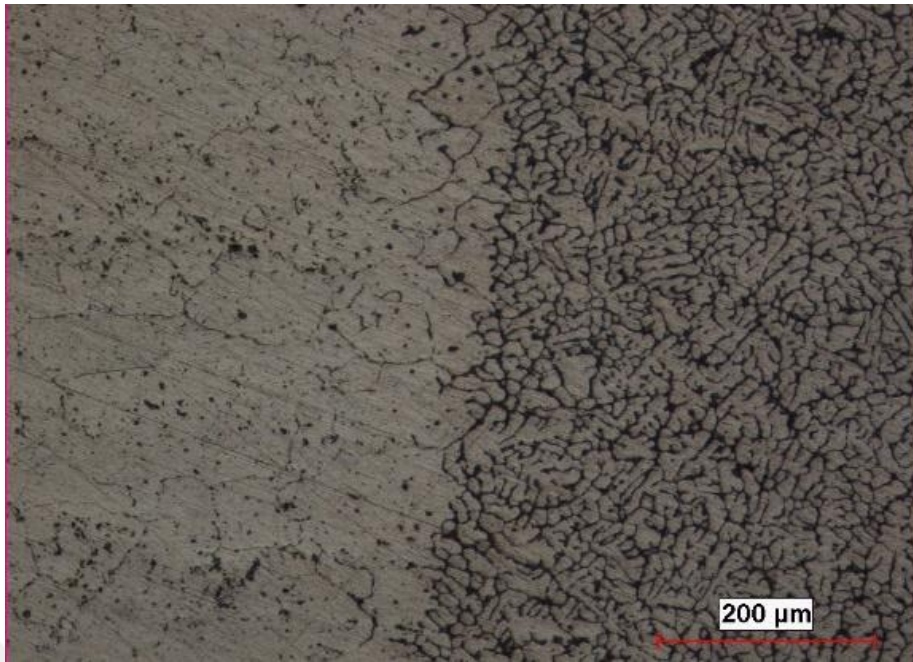
Aşağıda Al6061- AlSi5 ile birleştışırilen ve 185 °C’de 9 dk ısıı işlem uygulanan numuneye ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görüntölere bakıldığında esas metalden kaynak bölgesine doğru gidildikçe taneli yapıdan dentritik yapıya bir geçiş olduğu gözlemlenmektedir.



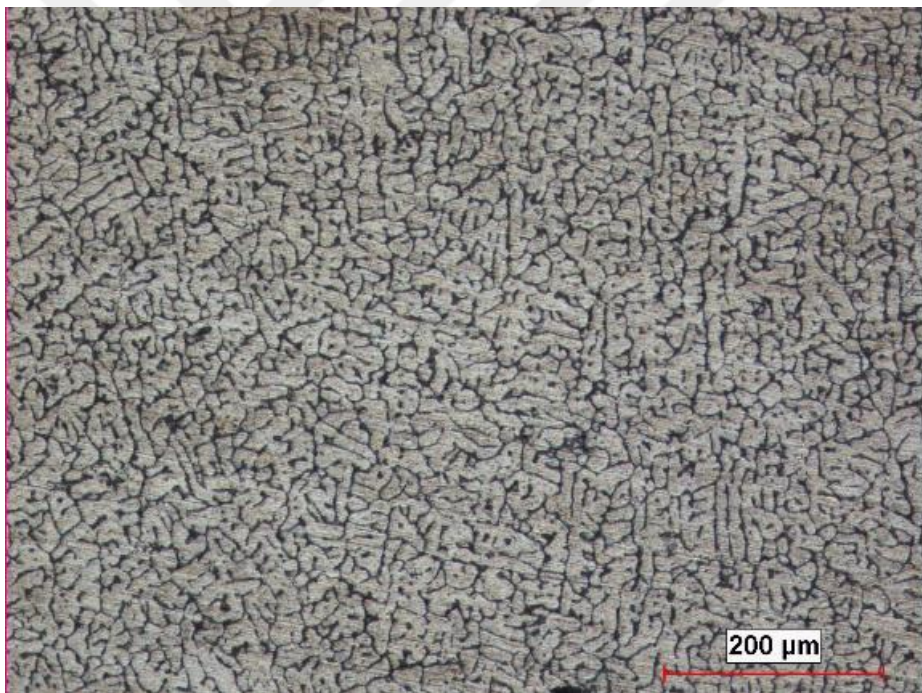
a)



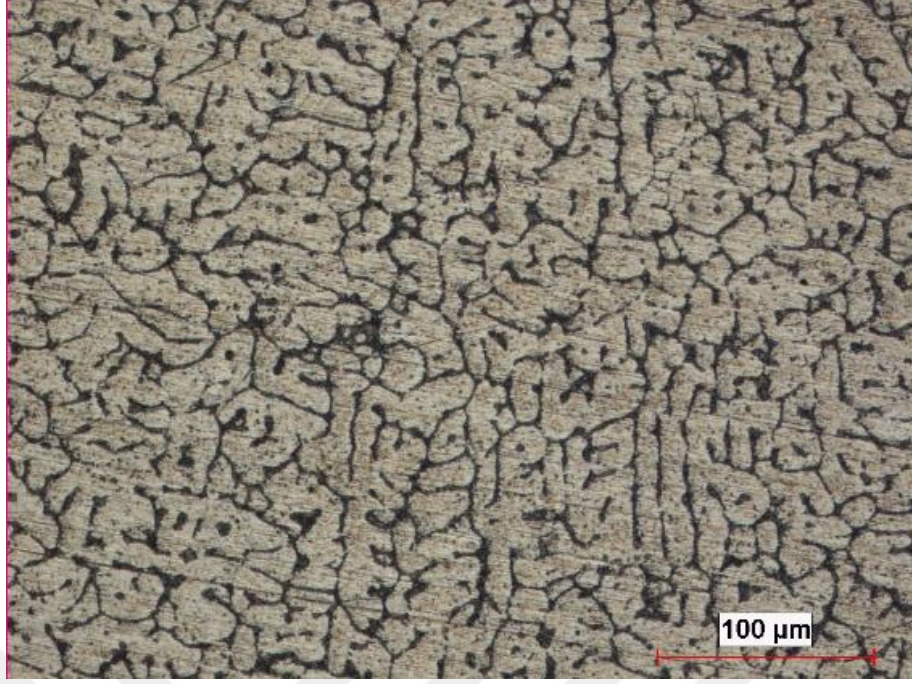
b)



c)



d)

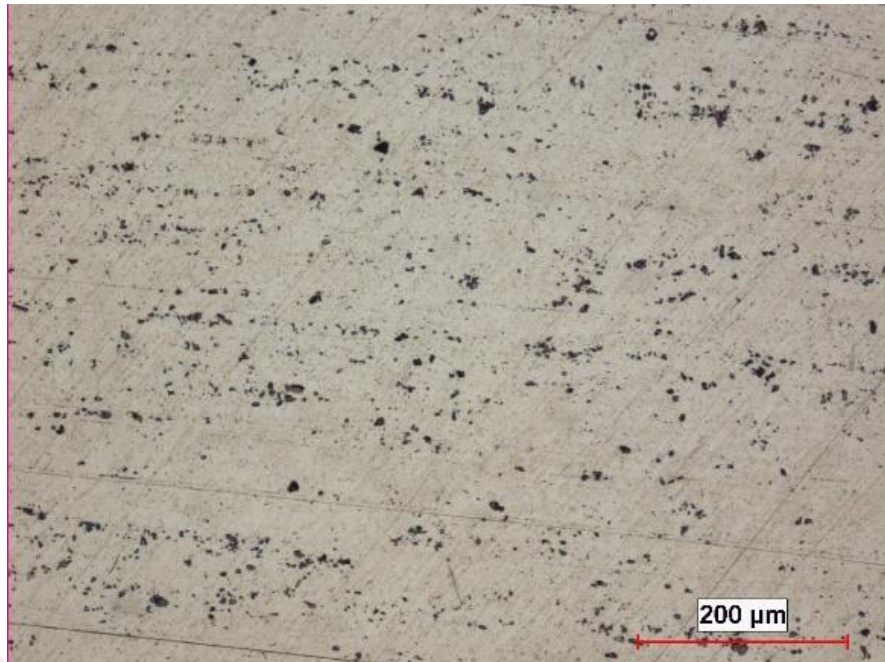


e)

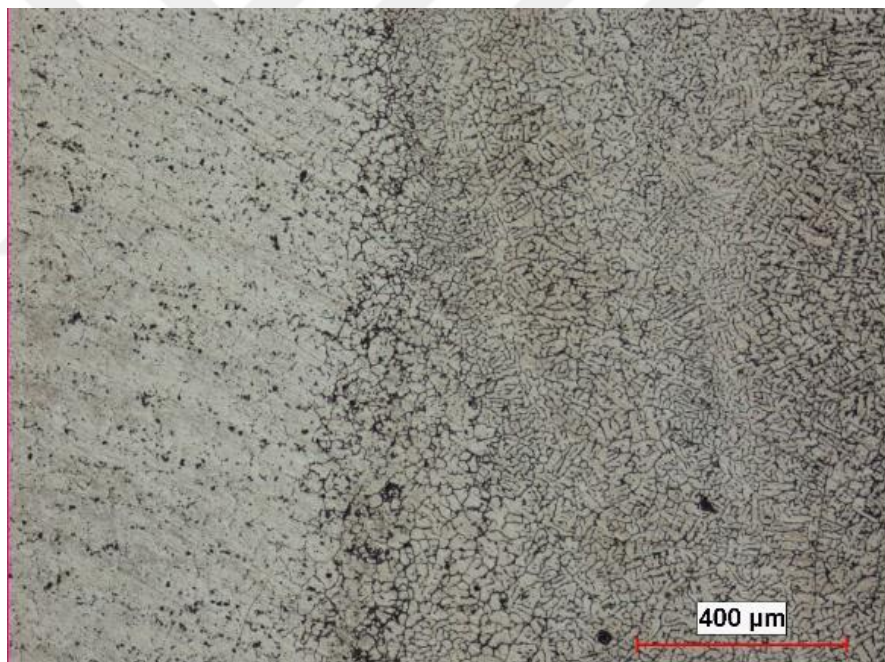
Şekil 6.47: 185 °C 9 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

6.2.2 Al6061-T6 – AlSi5 Numunelerinin Mikroyapı Sonuçları

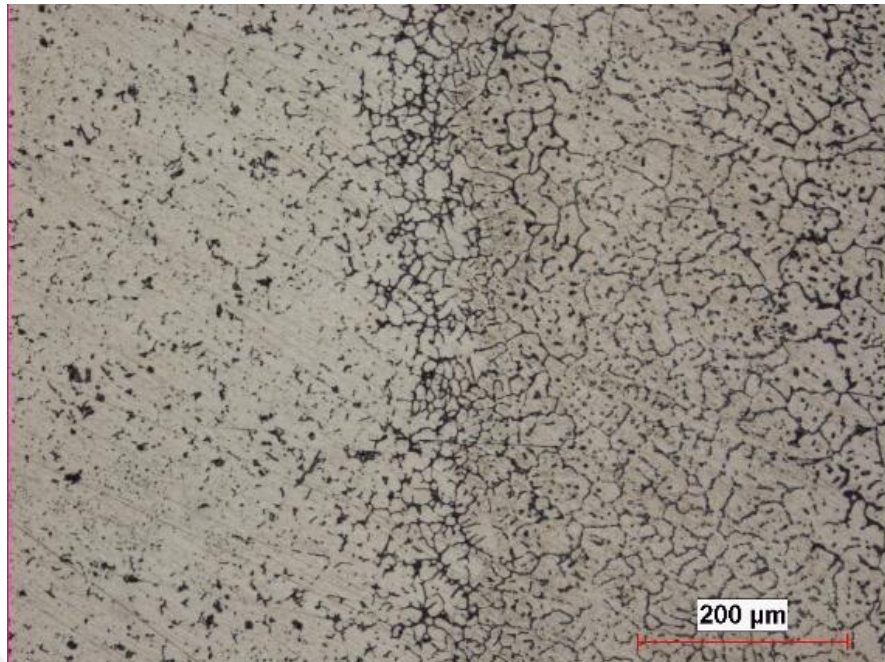
Aşağıda A6061-T6 – AlSi5 malzemesinin ısıt işlem uygulanmamış numunesinin farklı bölgelerine ait ve çeşitli büyütme oranlarında ki mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Şekilde verilmiş olan bu görüntüler incelendiğinde esas metal bölgesinde görülmeyen ve geçiş bölgesinde ortaya çıkıp kaynak bölgesinde devam eden bir dentrit yapı görülmektedir.



a)



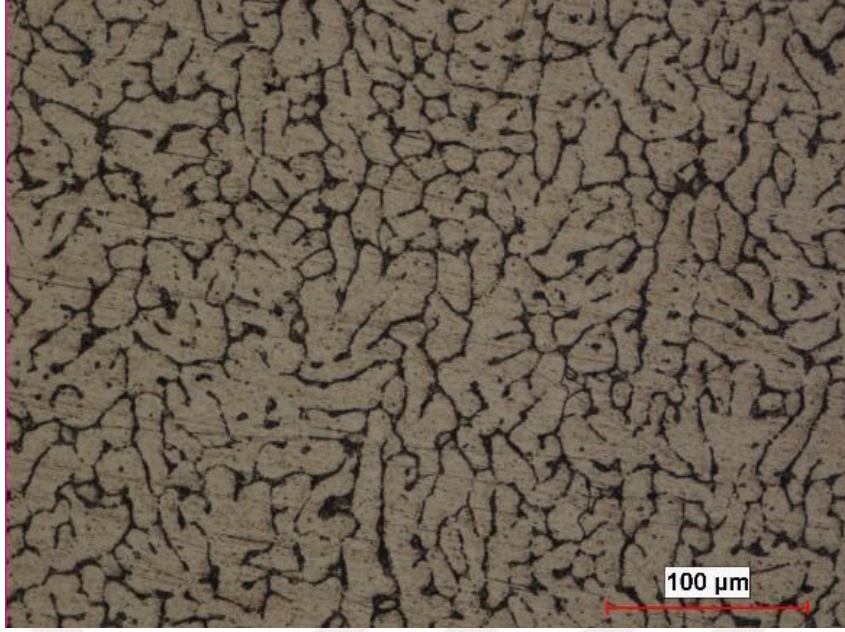
b)



c)



d)



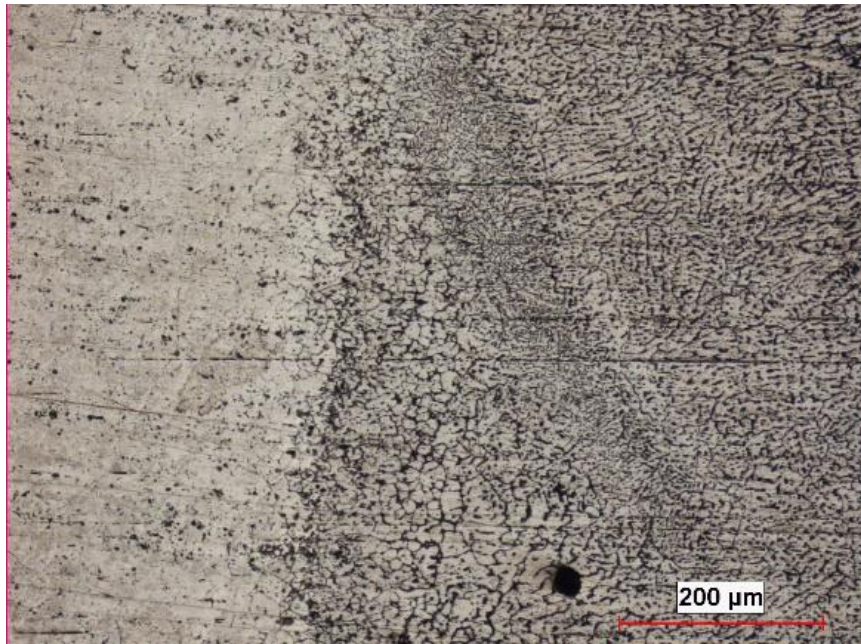
e)

Şekil 6.48: Isıl işlemsiz a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

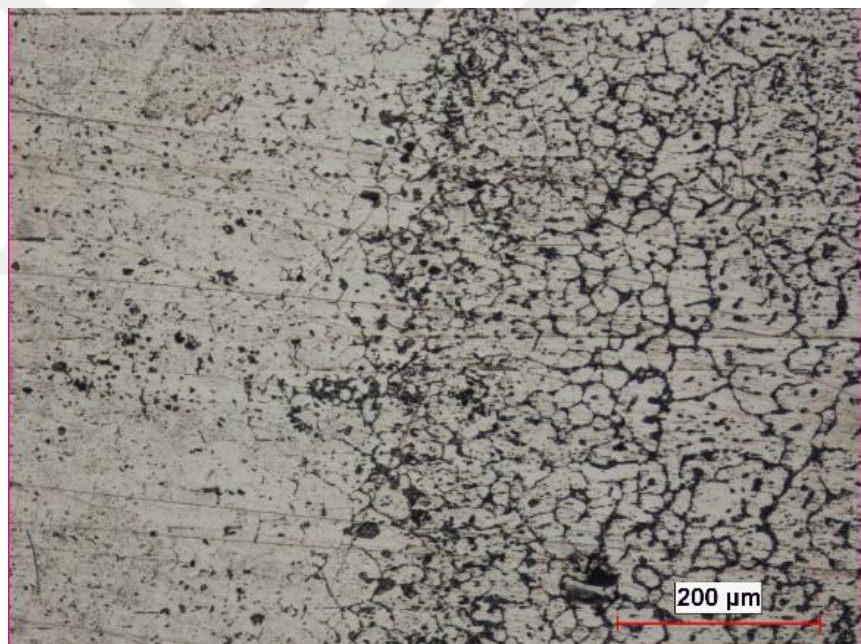
Aşağıda Al6061-T6 -AlSi5 malzemesinin 185 °C 3 dk indüksiyon ısıtma işlemi uygulanmış numunesinin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.49'a bakıldığında kaynak bölgesinde ki tanelerde yönelme görülmektedir.



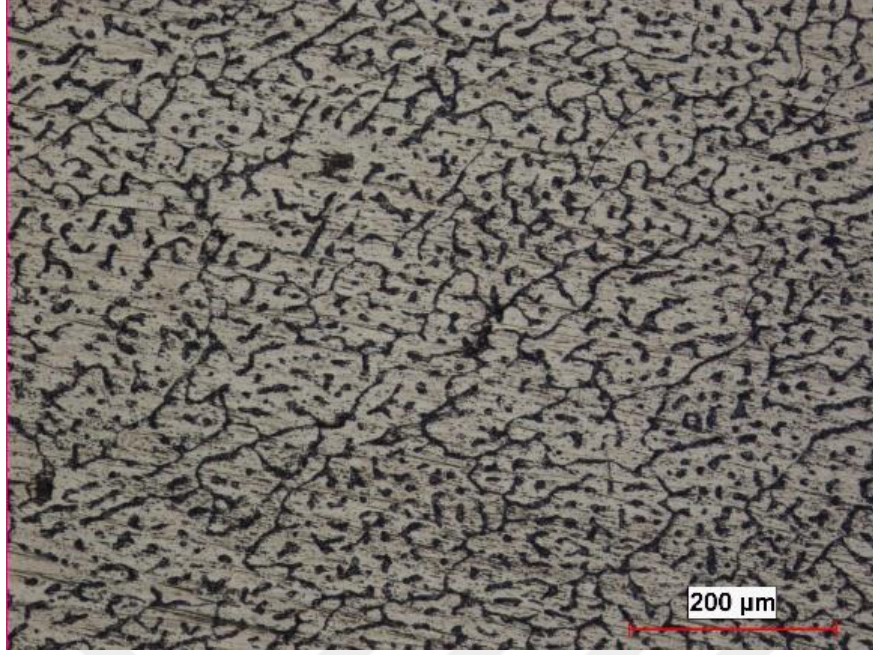
a)



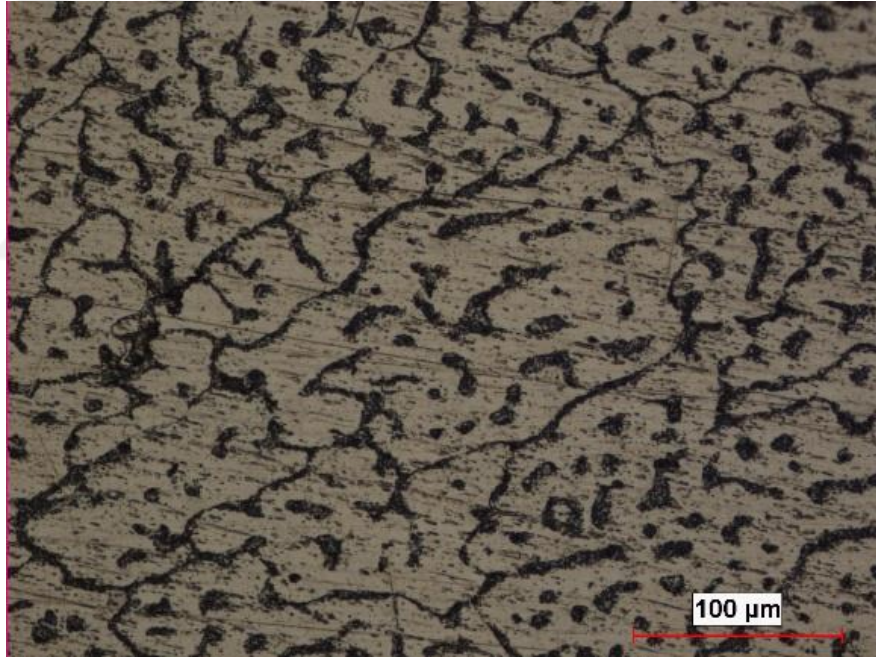
b)



c)



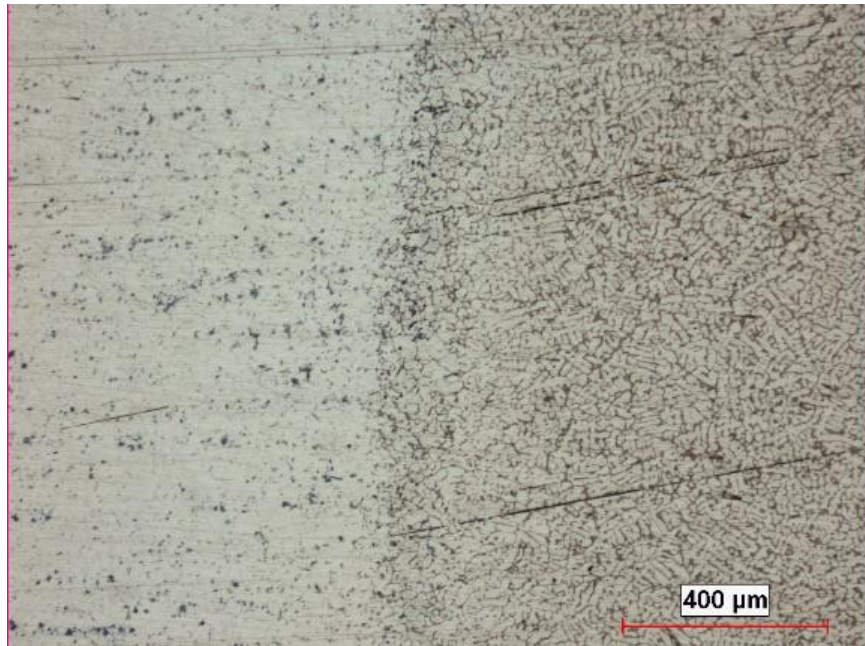
d)



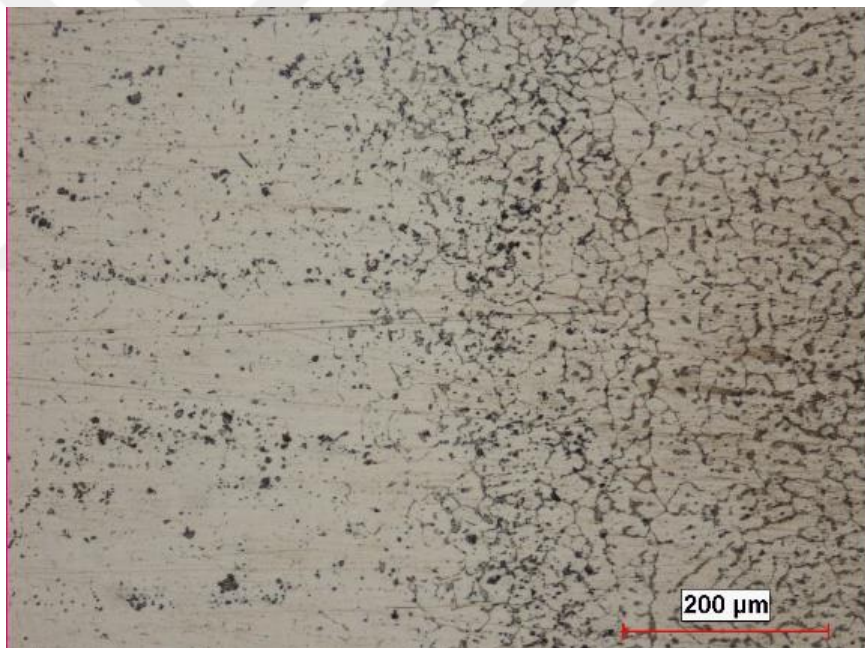
e)

Şekil 6.49: 185 °C 3 dk ısıtılmış a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

Aşağıda Al6061-T6- AlSi5 ve 185 °C’de 6 dk ısıtılmış numuneye ait mikroyapı görüntüleri gösterilmiştir. Görüntülere bakıldığında uygulanan ısıtma işlemi ve sıcaklığında etkisiyle kaynak bölgesinde ki taneler de irileşme olduğu gözlemlenmektedir.



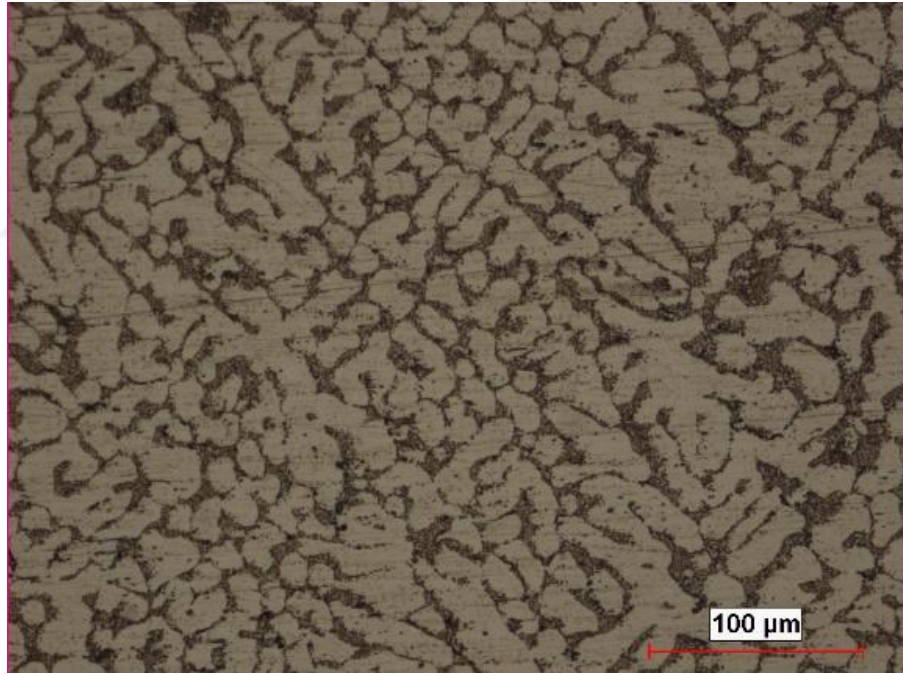
a)



b)



c)



d)

Şekil 6.50: 185 °C 6 dk Isıl işlemlı a) Geçiş bölgesi 50x b) Geçiş bölgesi 100x c) Kaynak bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 200x Büyütölmüş mikroyapı görüntüsü.

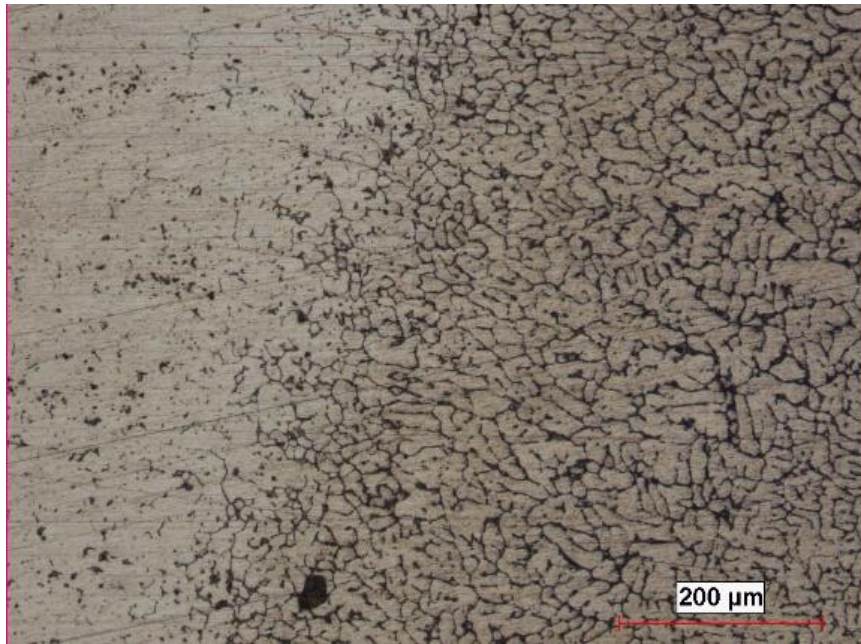
Aşağıda Şekil 6.51’de gösterilen görsellerde Al6061-T6 – AlSi5 malzemesinin 185 °C 9 dk indüksiyon ısıı işlemlı uygulanmış numunesinin mikroyapı görüntöleri verilmiştir. Verilen şekil incelendiğinde geçiş bölgesinden kaynak bölgesine gidildiğinde taneli yapıdan dentrit yapıya geçiş olduğu gözlemlenmiştir.



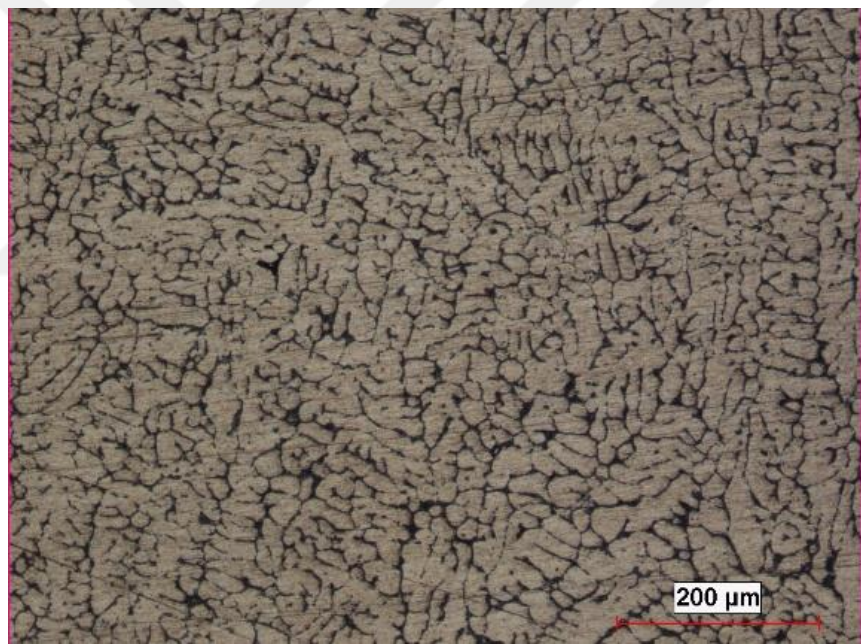
a)



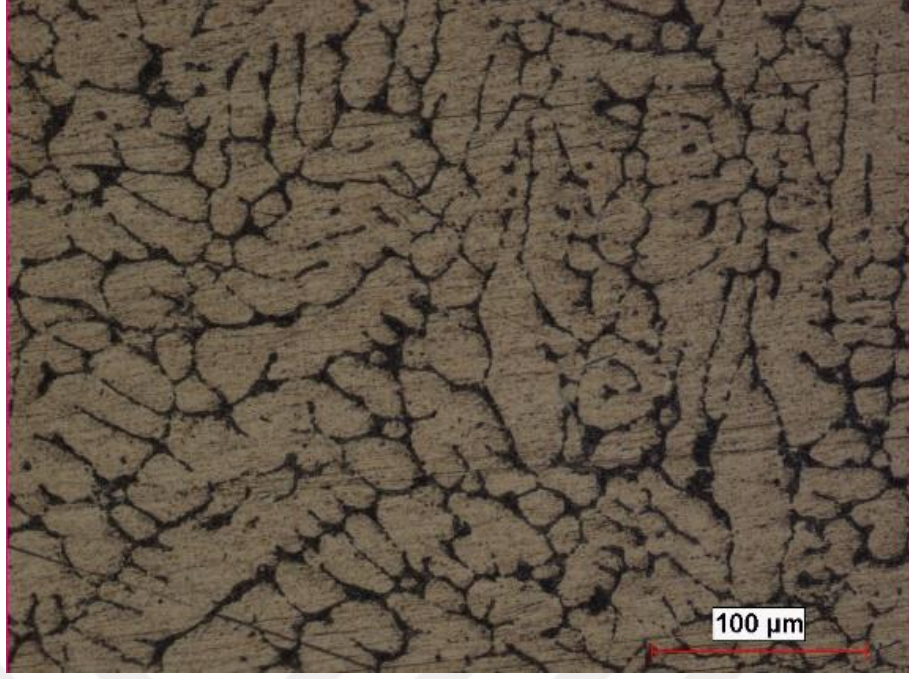
b)



c)



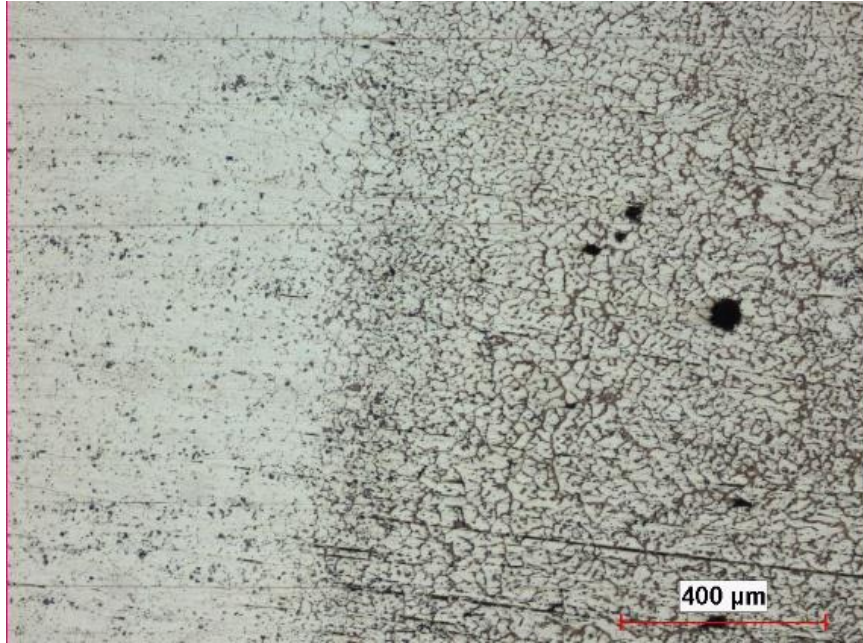
d)



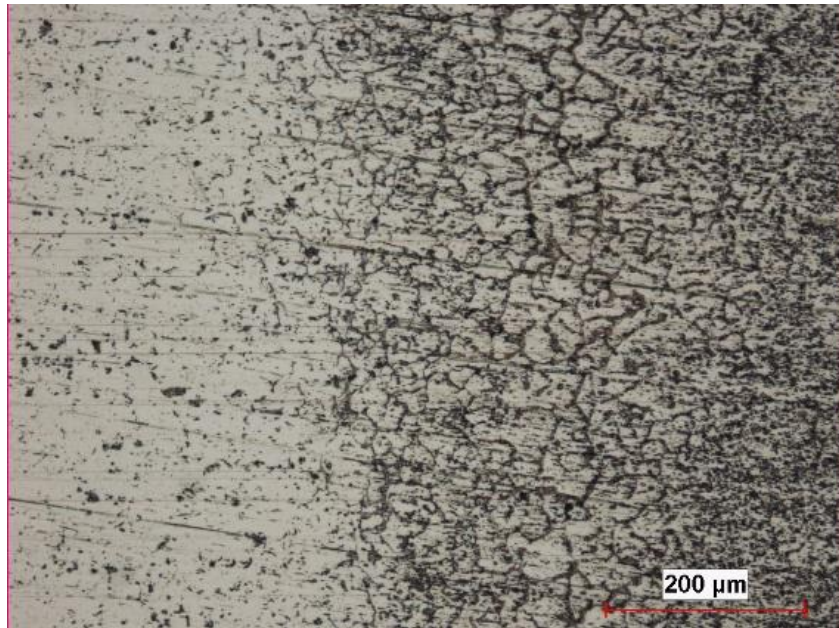
e)

Şekil 6.51: 185 °C 9 dk ısıtılmış a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

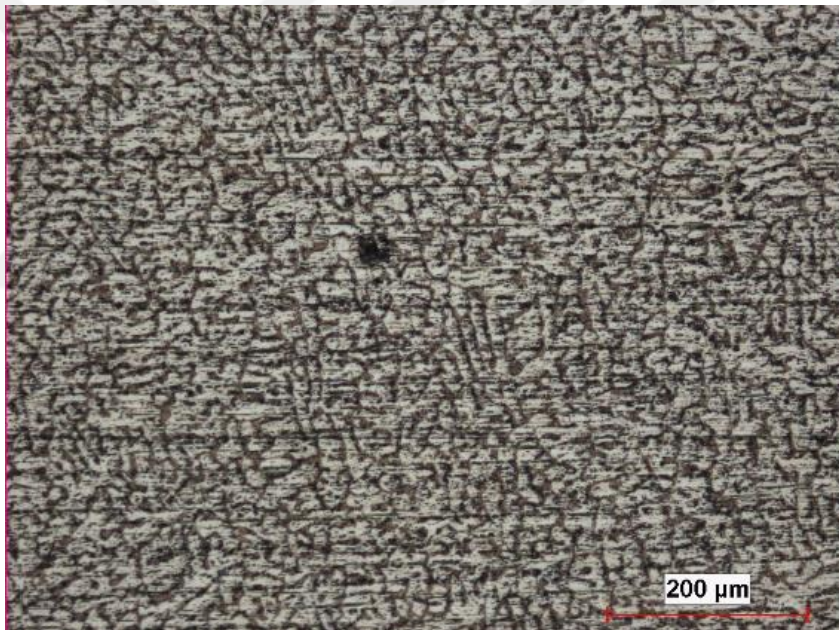
Aşağıda Al6061-T6 – AlSi5 malzemesinin 350 °C 3 dk indüksiyon ısıtılması uygulanmış numunesine ait mikroyapı görselleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde düzensiz bir iç yapı olduğu ve tane şekilleri arasında farklılık olduğu gözlemlenmiştir.



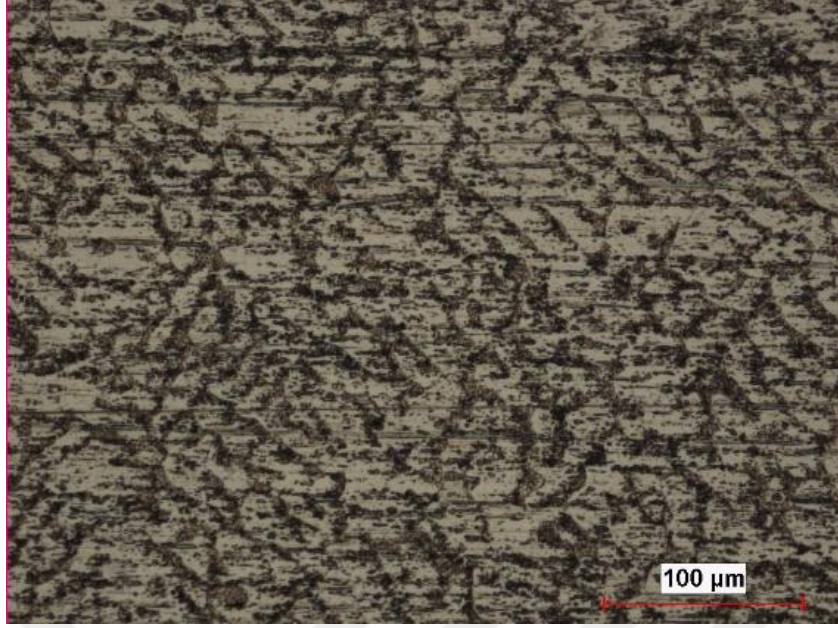
a)



b)



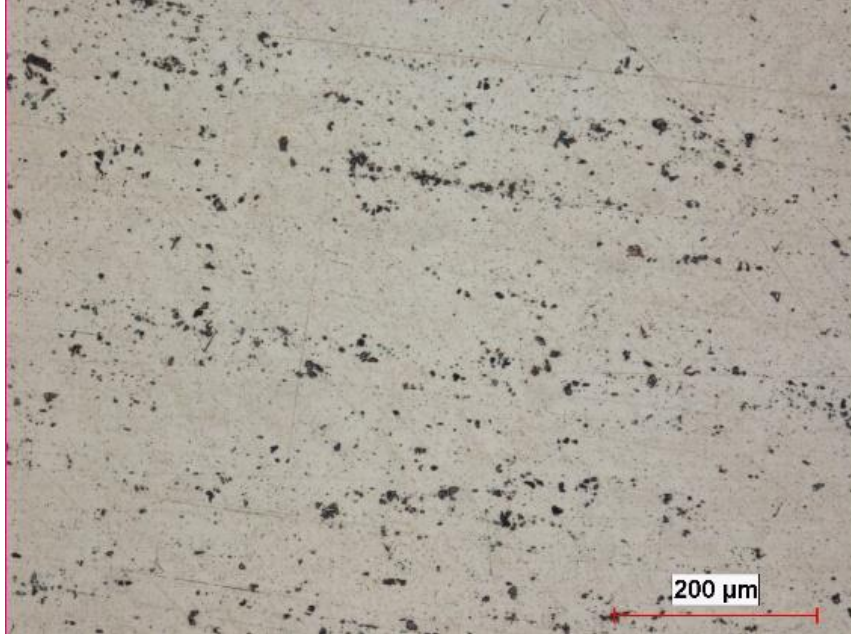
c)



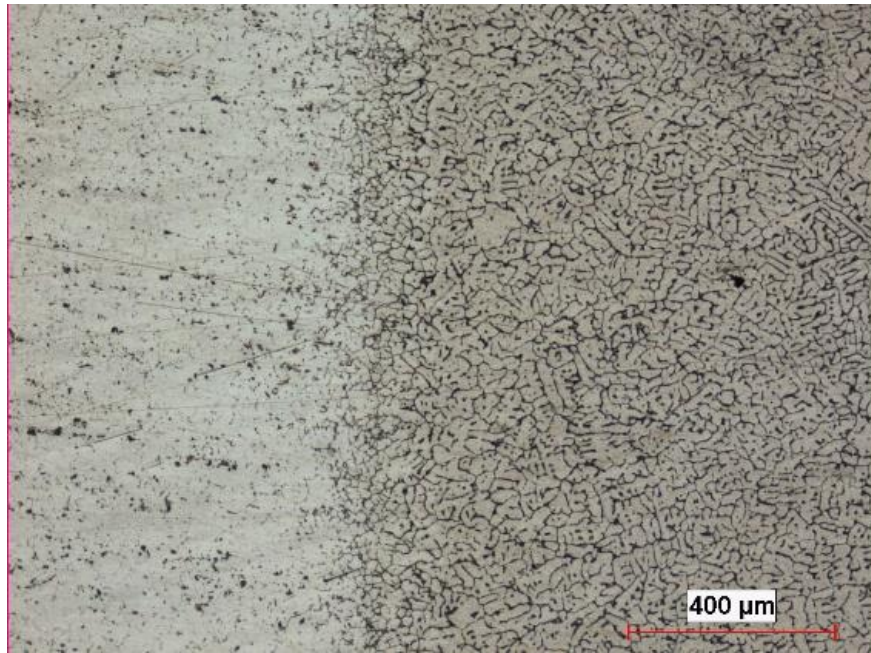
d)

Şekil 6.52: 350 °C 3 dk ısıtılmış a) Geçiş bölgesi 50x b) Geçiş bölgesi 100x c) Kaynak bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

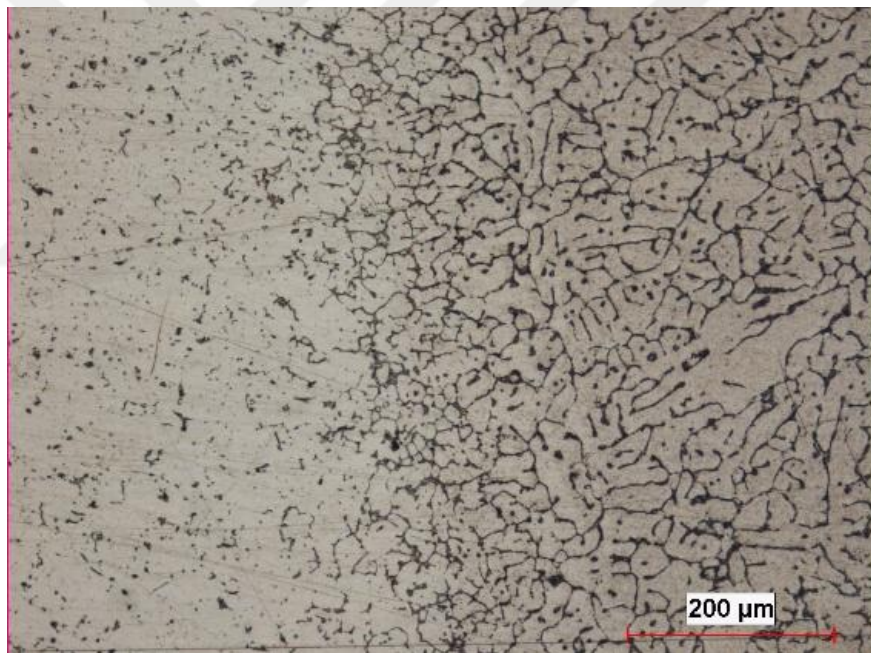
Aşağıda verilen şekilde Al6061-T6 – AlSi5 malzemesinin 350 °C 6 dk ısıtılmış numunesinin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Verilen görüntüler incelendiğinde ısı girdisinin artması ile tanelerde kabalaşma olduğu görülmüştür.



a)



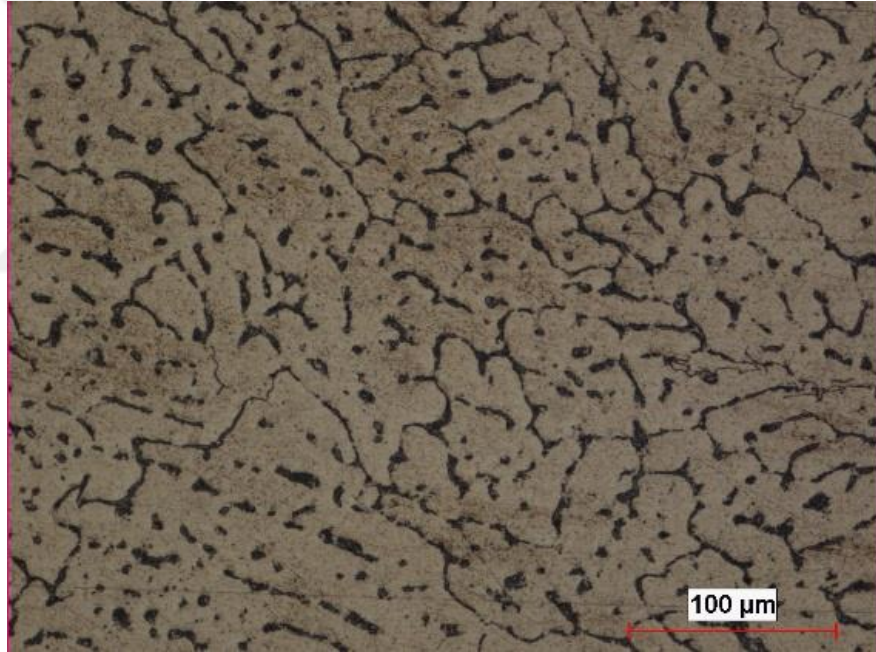
b)



c)



d)

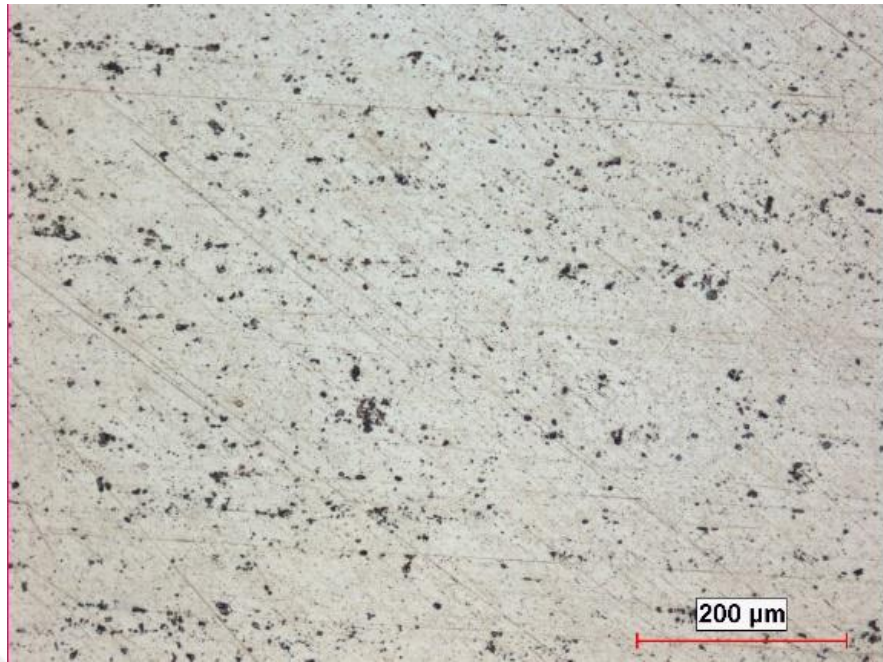


e)

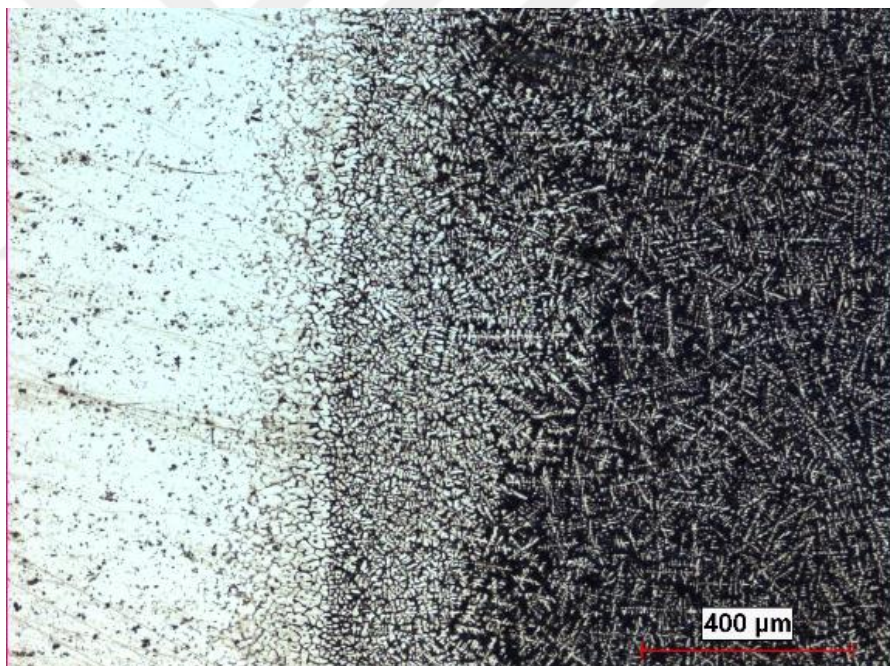
Şekil 6.53: 350 °C 6 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

6.2.3 Al6061 – AlSi12 Numunelerinin Mikroyapı Sonuçları

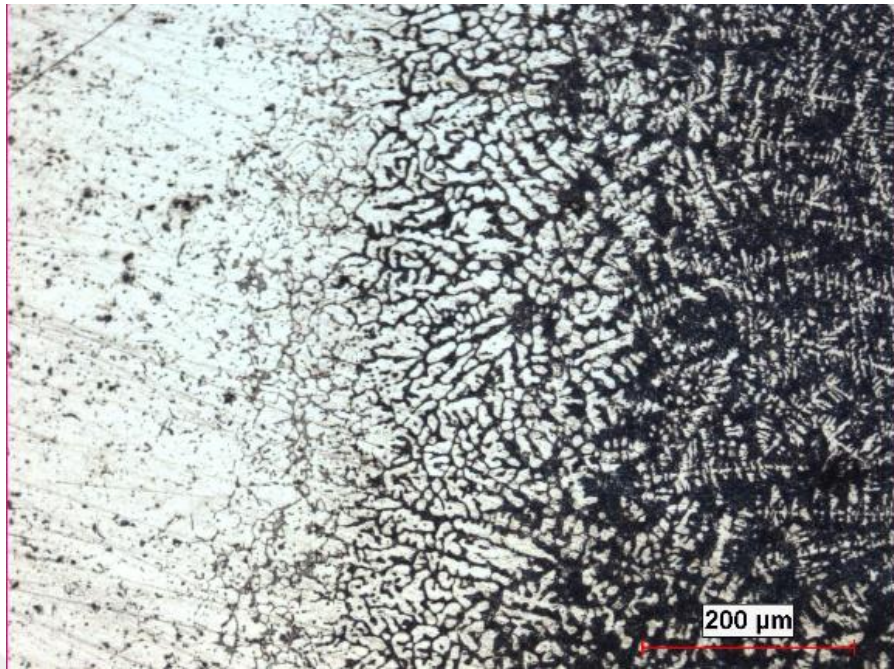
Aşağıda Al6061 malzemesinin AlSi12 kaynak teli ile birleştirilmiş ve indüksiyon ısıtılması uygulanmamış numunesinin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde AlSi5 kaynak telli numunelere göre daha küçük tane yapısı olduğu görülmektedir.



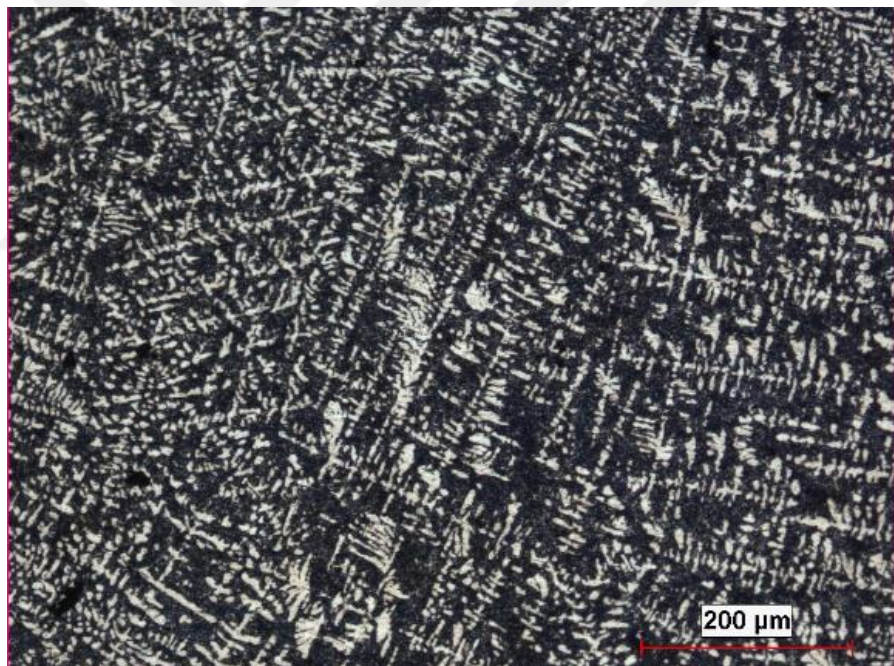
a)



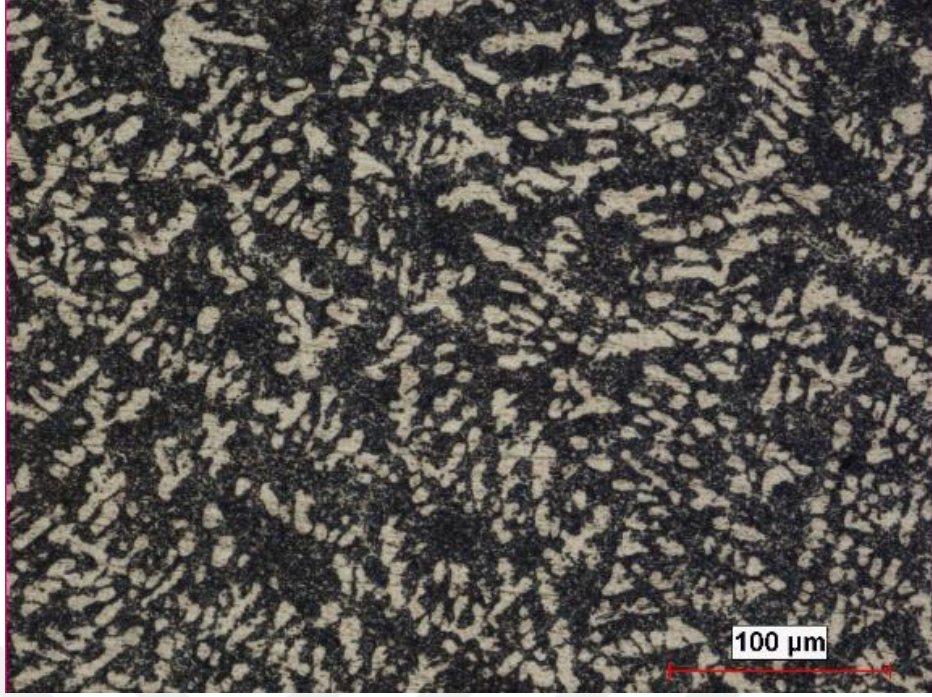
b)



c)



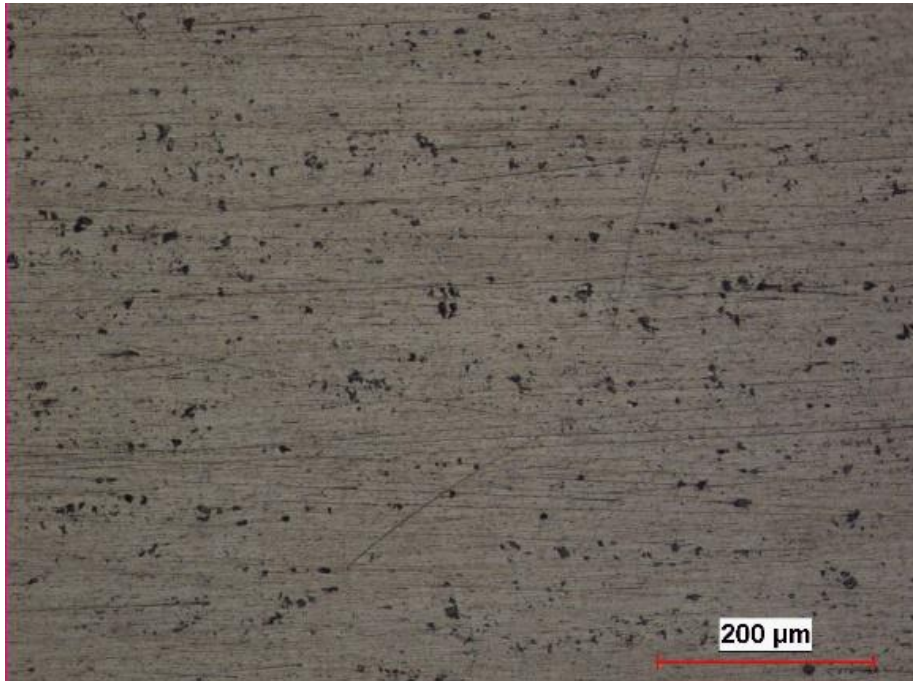
d)



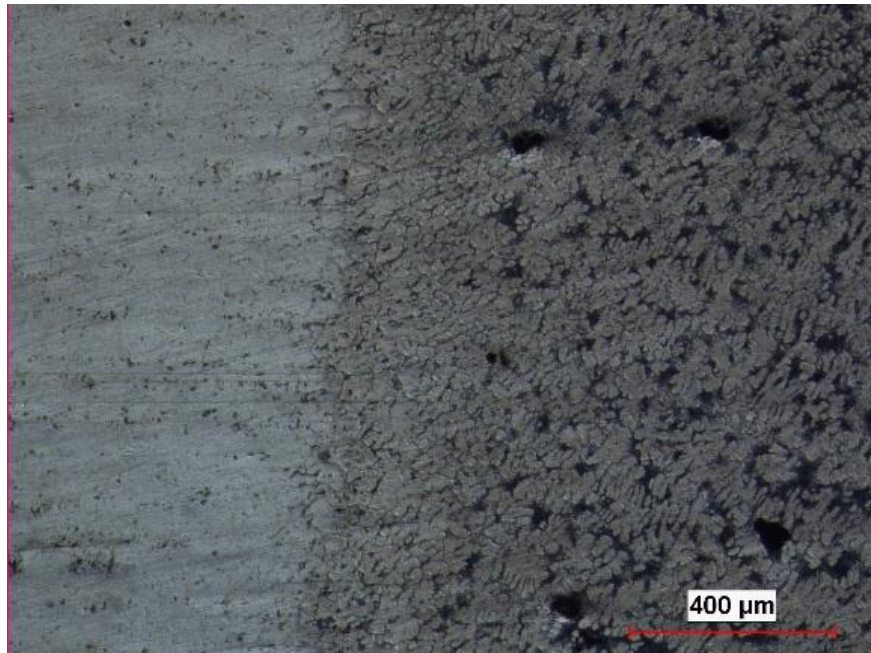
e)

Şekil 6.54: Isıl işlemsiz a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

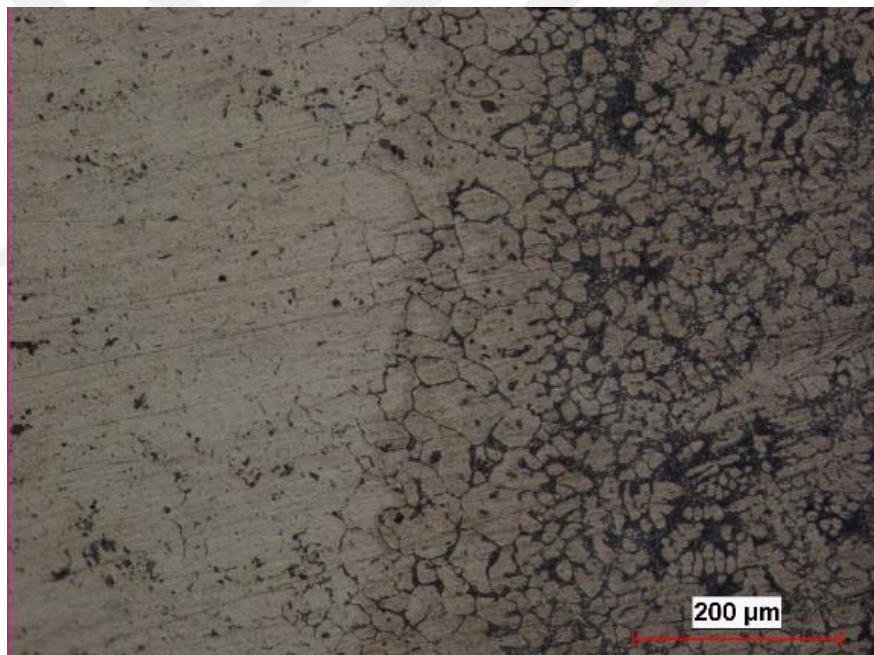
Aşağıdaki Şekil 6.55’de Al6061 – AlSi12 malzemesinin 185 °C 3 dk ısıtım uygulanmış numunesinin mikroyapı fotoğrafları gösterilmiştir. Görüntüler incelendiğinde ısıtımın etkisiyle tanelerde irileşme görülmüştür.



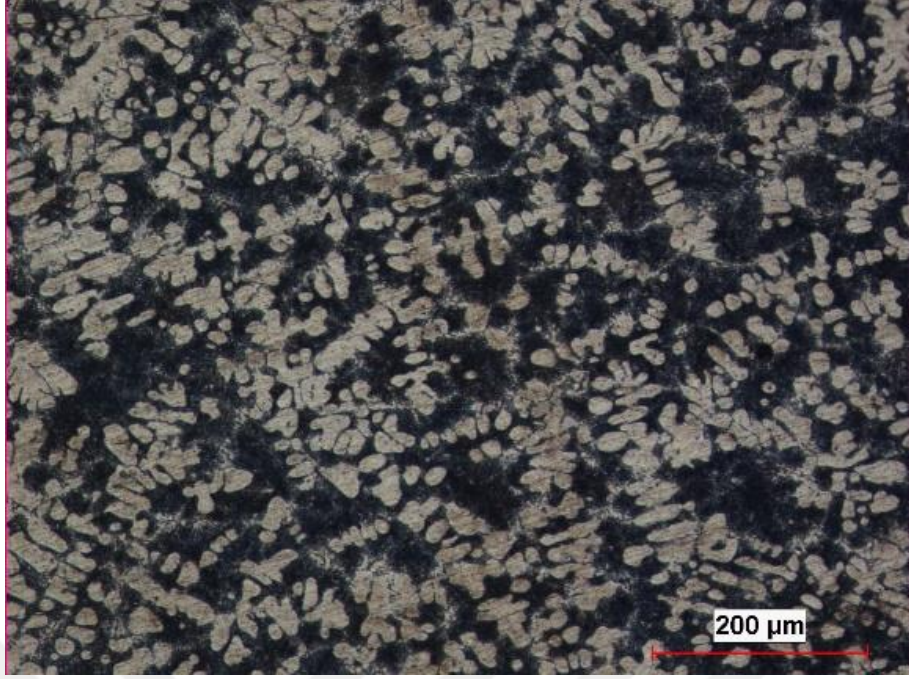
a)



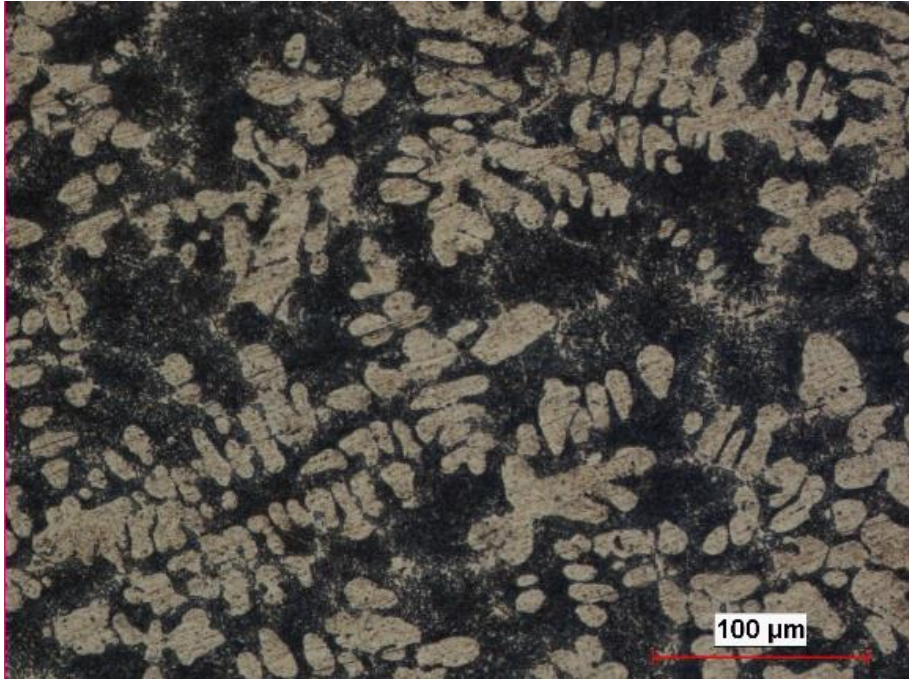
b)



c)



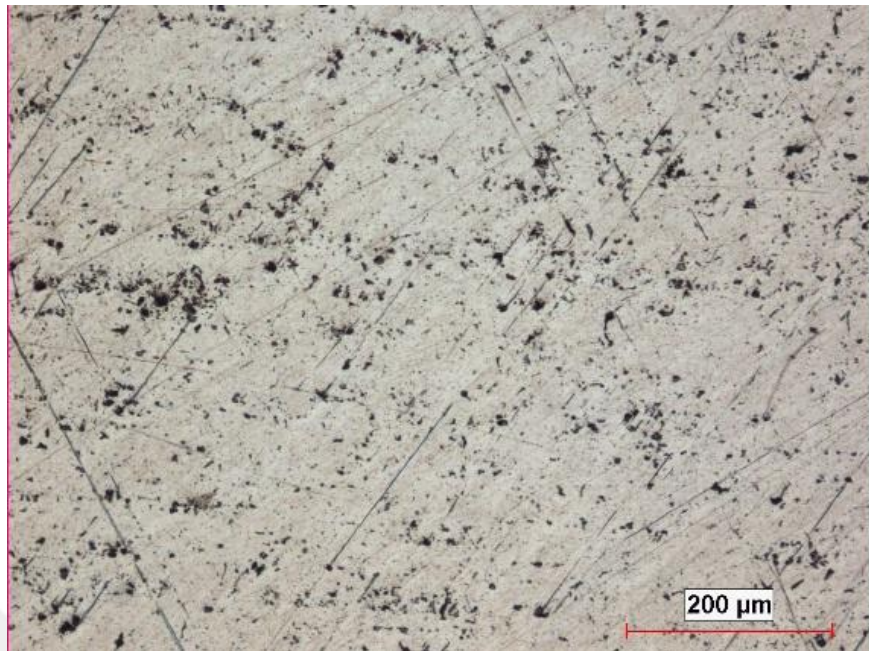
d)



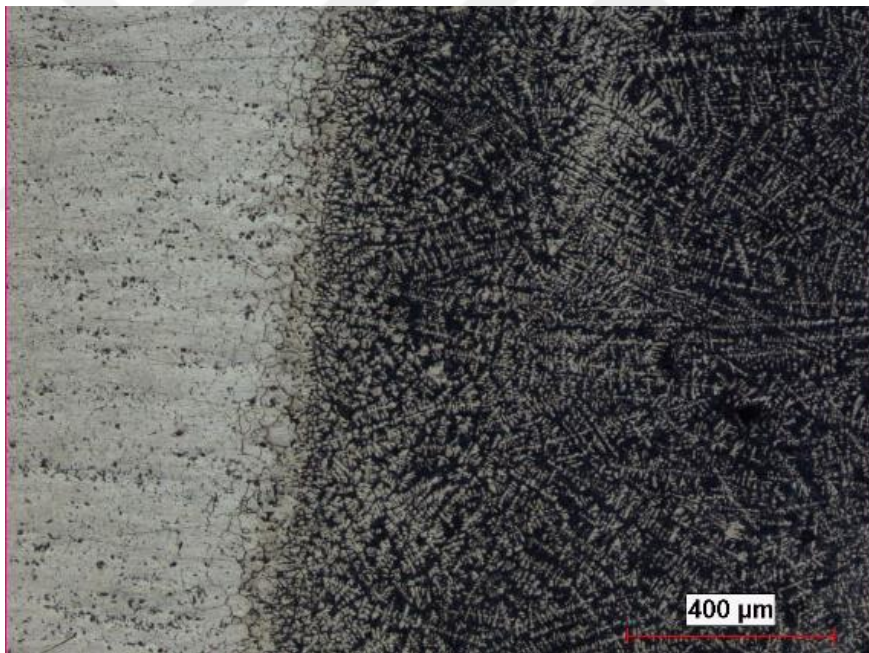
e)

Şekil 6.55: 185 °C 3 dk ısıtılmış a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

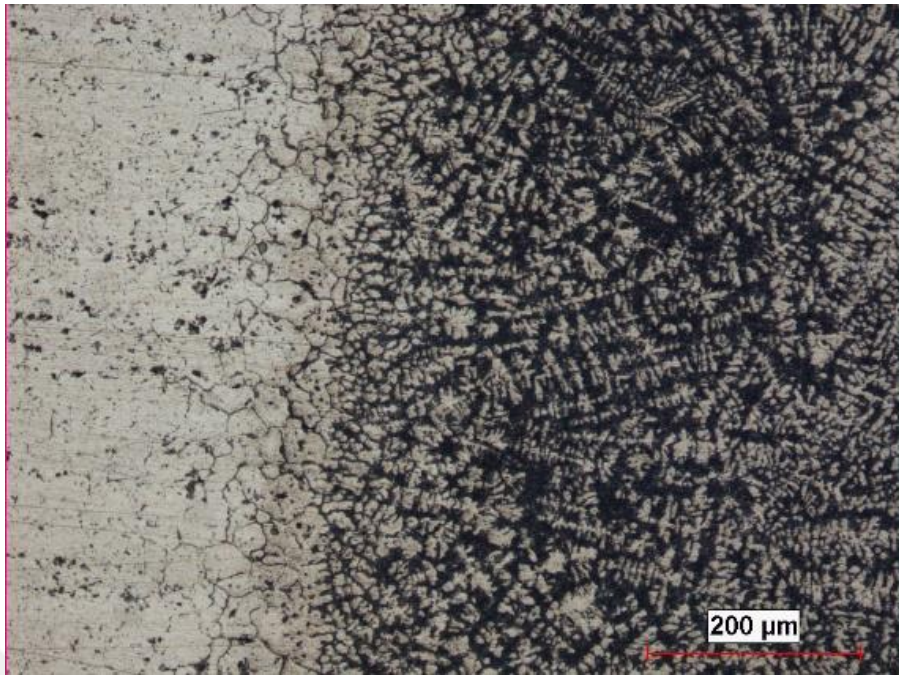
Aşağıda Al6061 – AlSi12 malzemesinin 185 °C 6 dk ısıtılmış numunesine ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde geçiş bölgesinde başlayan ve kaynak bölgesinde devam eden dentrit yapı dikkat çekmektedir.



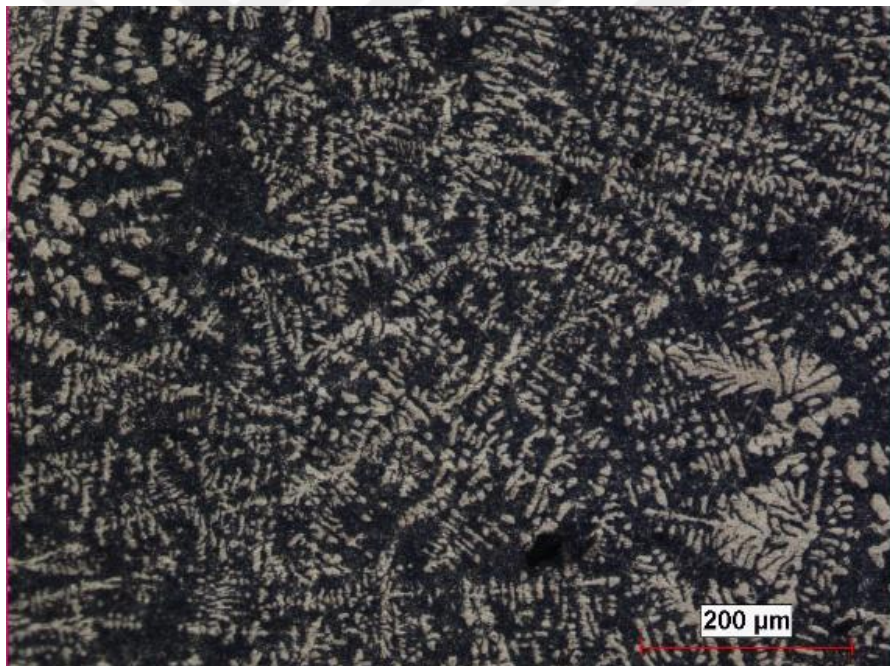
a)



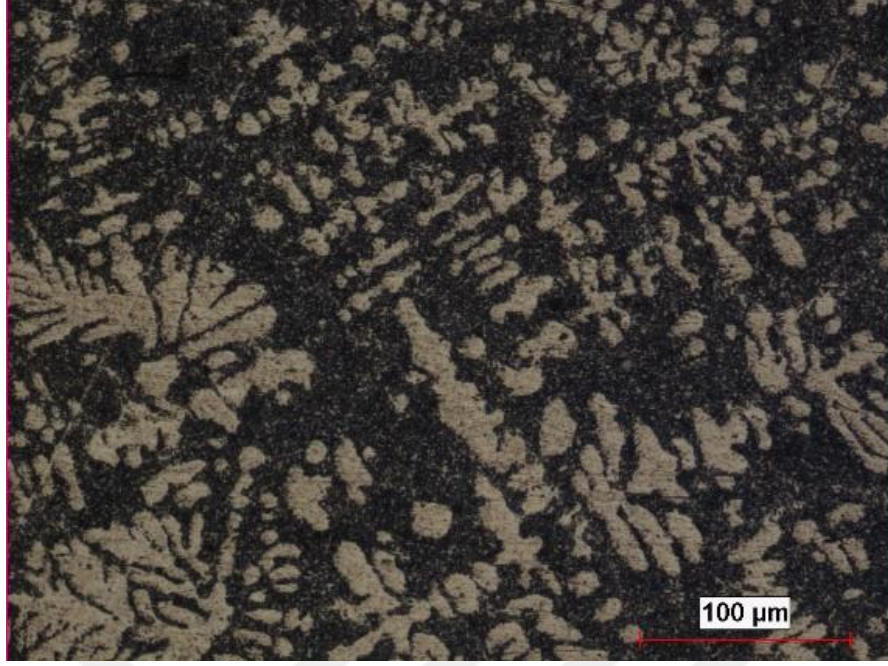
b)



c)



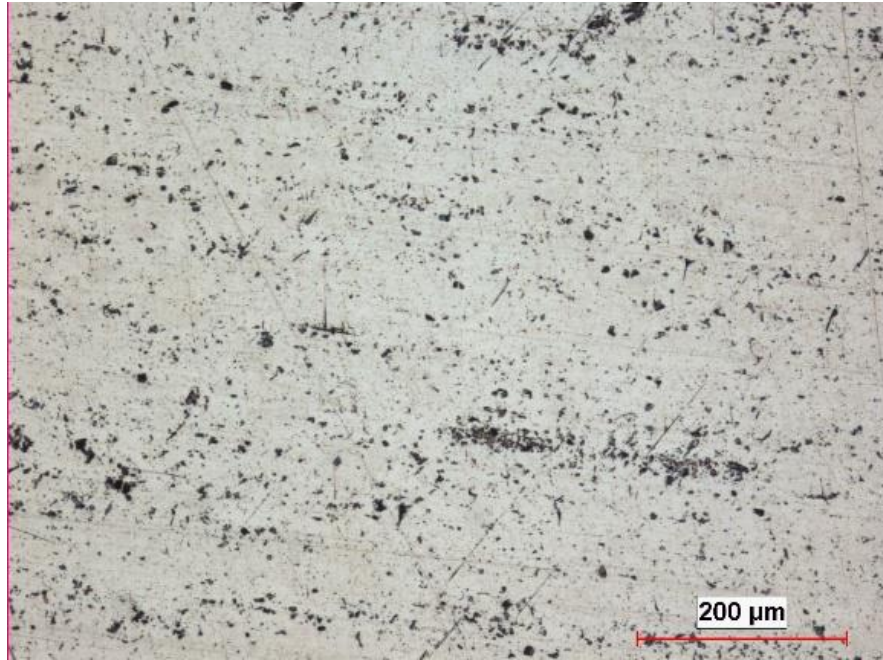
d)



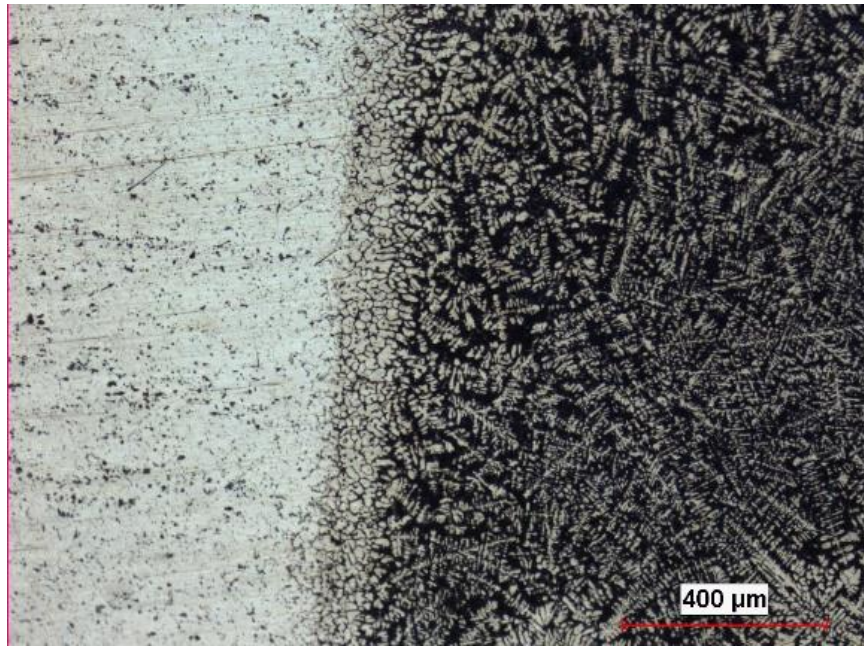
e)

Şekil 6.56: 185 °C 6 dk ısıtılmış a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

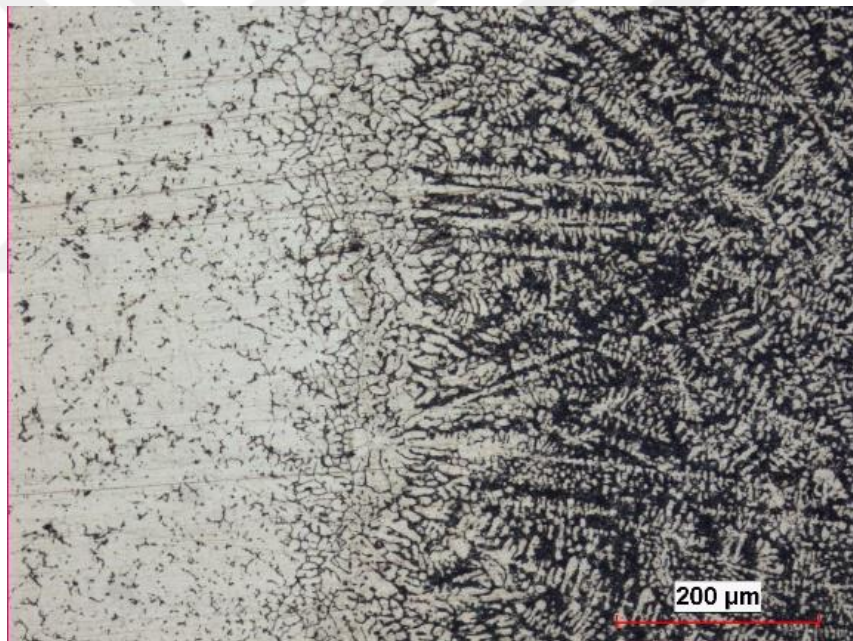
Aşağıda Al6061 – AlSi12 malzemesinin 185 °C 9 dk indüksiyon ısıtılması görmüş numunesinin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Verilen görüntülere bakıldığında esas metal bölgesinden kaynak bölgesine gidildikçe taneli yapıdan dentrit yapısına geçildiği görülmüştür.



a)



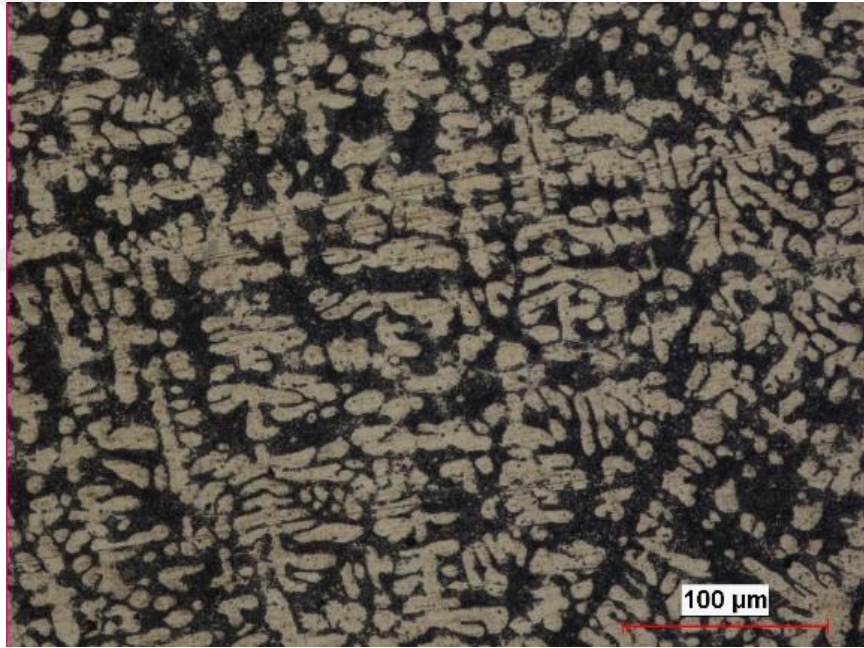
b)



c)



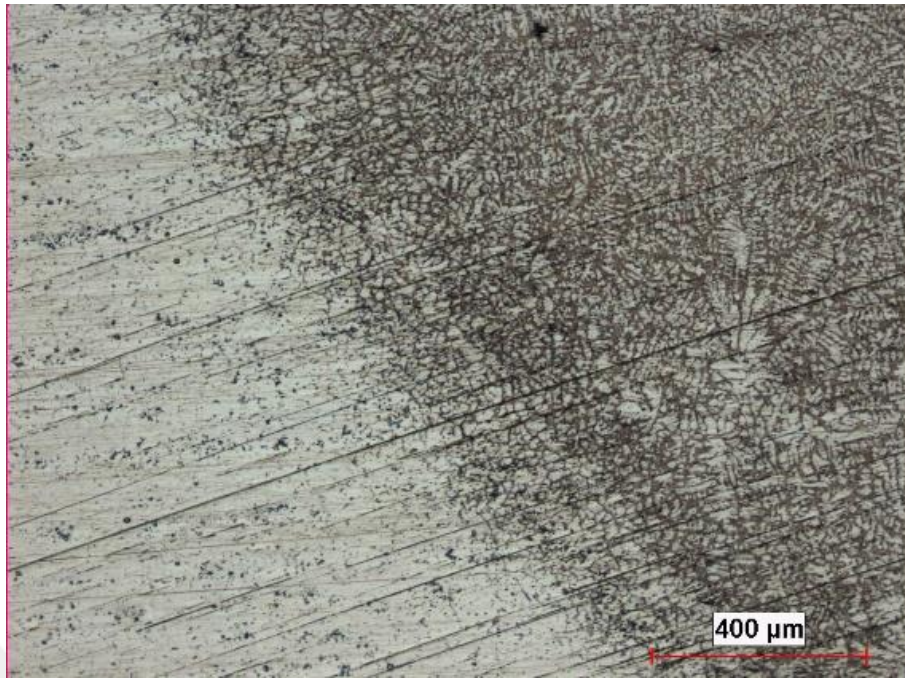
d)



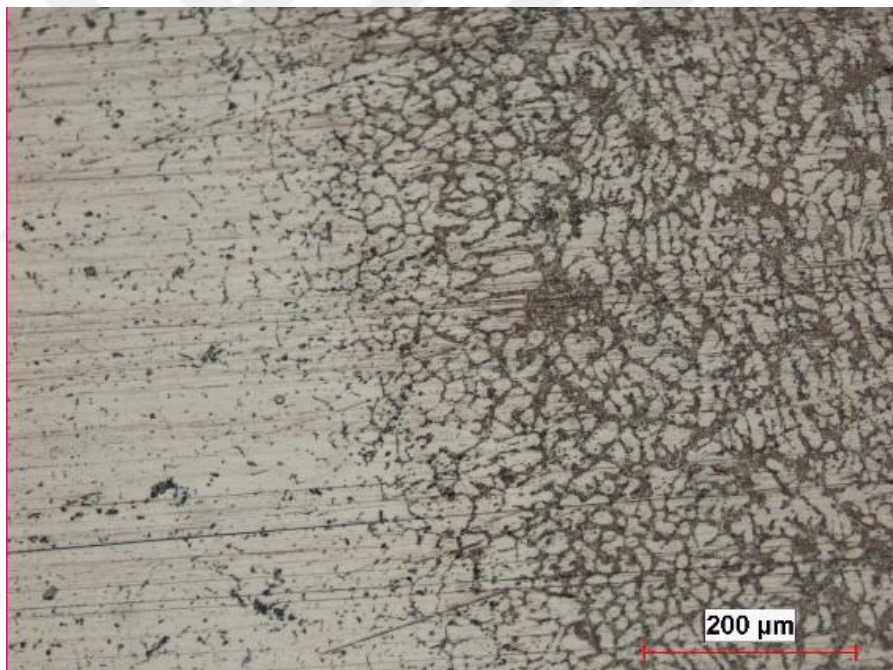
e)

Şekil 6.57: 185 °C 9 dk ısıtılmış a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

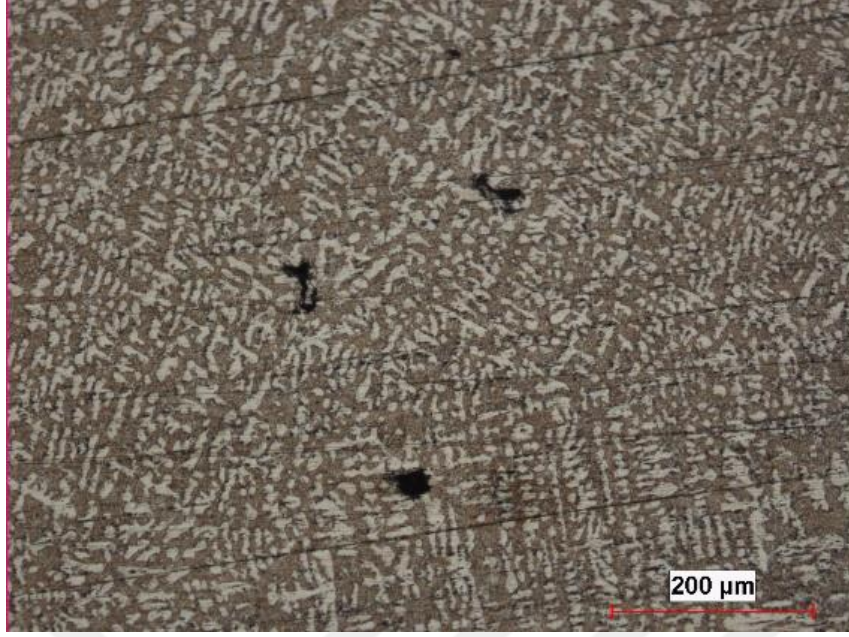
Aşağıda ki Şekil 6.58’de Al6061 – AlSi12 numunesinin 350 °C’ de 3 dk ısıtılmış örneğinin iç yapı görüntüleri verilmiştir. Görseller incelendiğinde geçiş ve kaynak bölgesinde ki tanelerde yönelme olduğu gözlemlenmiştir.



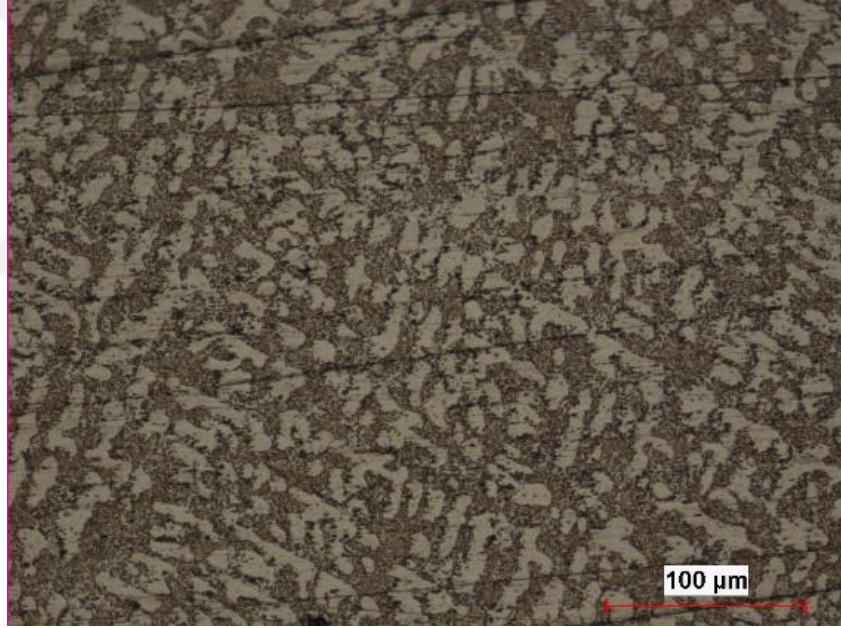
a)



b)



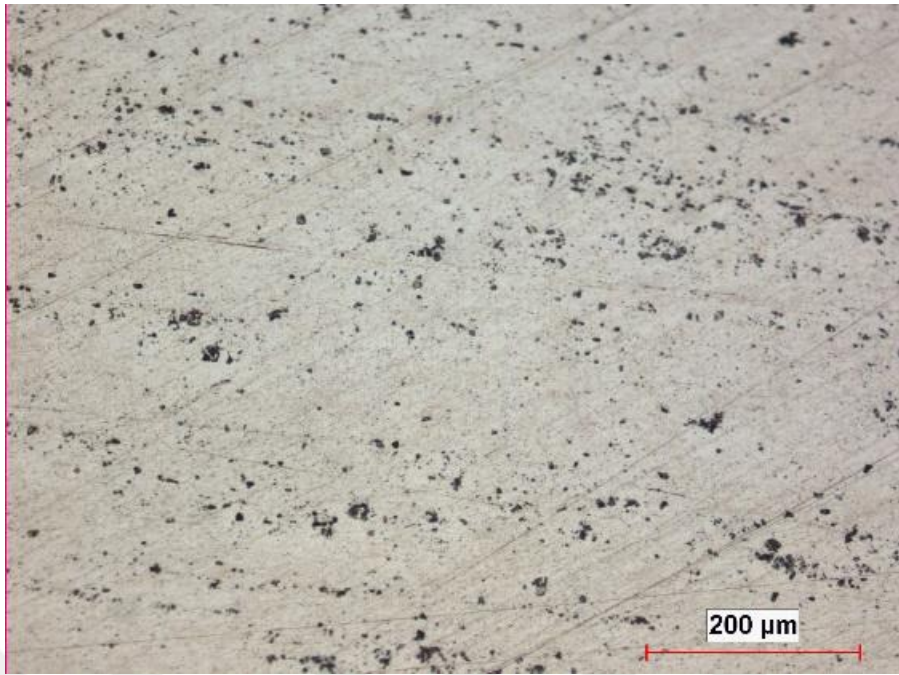
c)



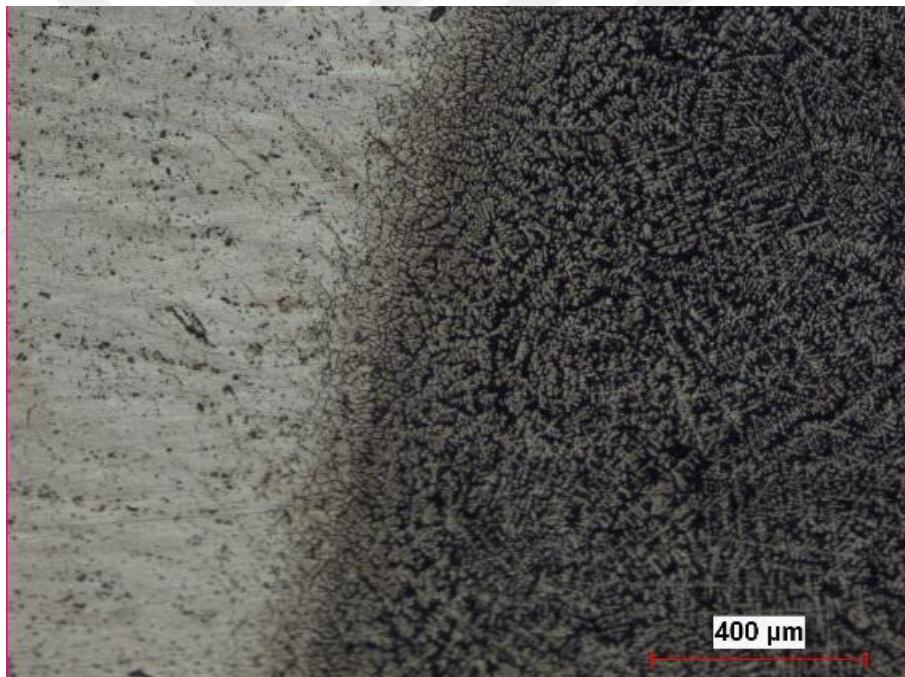
d)

Şekil 6.58: 350 °C 3 dk ısıtılmış a) Geçiş bölgesi 50x b) Geçiş bölgesi 100x c) Kaynak bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

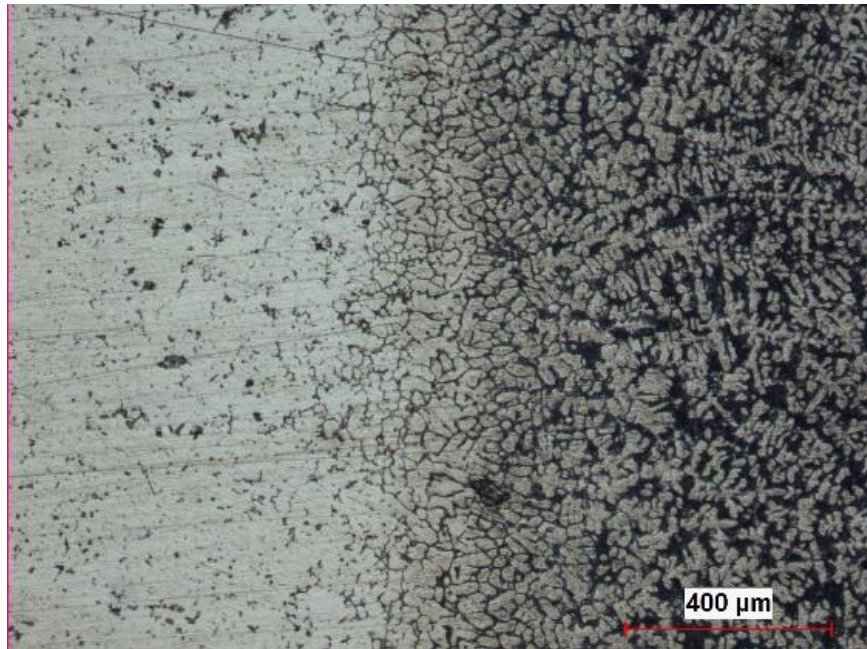
Aşağıda Al6061 – AlSi12 malzemesinin 350 °C 6 dk indüksiyon ısıtılması görmüş numunesine ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde ısıtılma sıcaklığı ve süresinin artması ile tanelerde irileşme meydana geldiği gözlemlenmiştir.



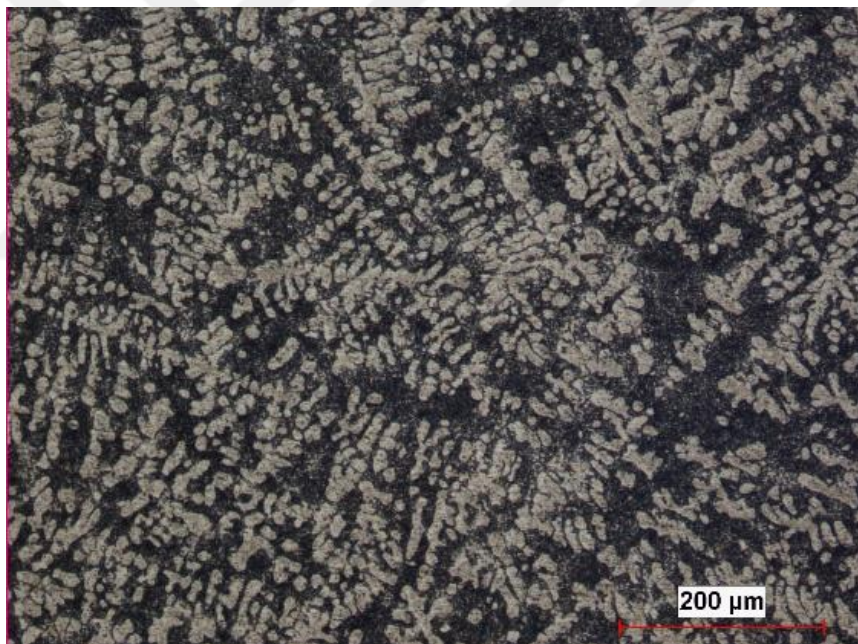
a)



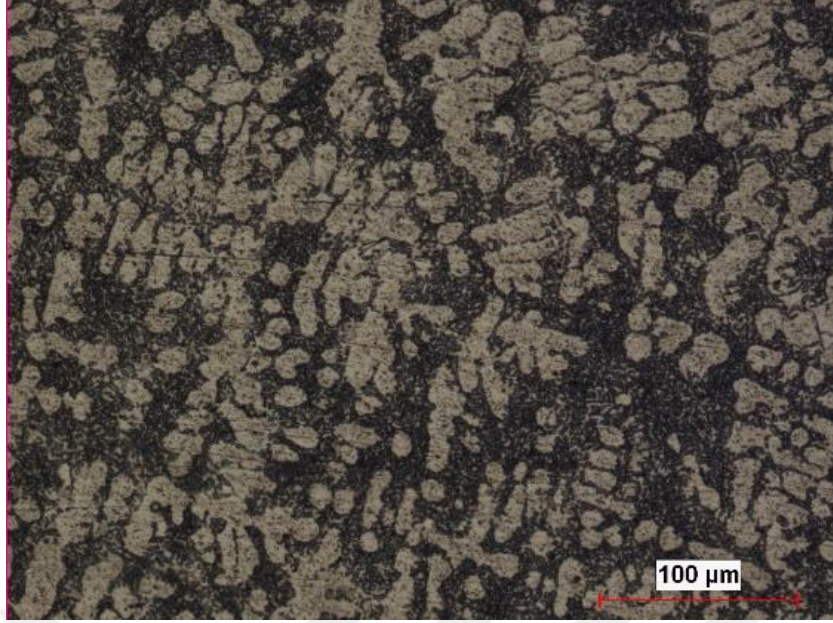
b)



c)



d)

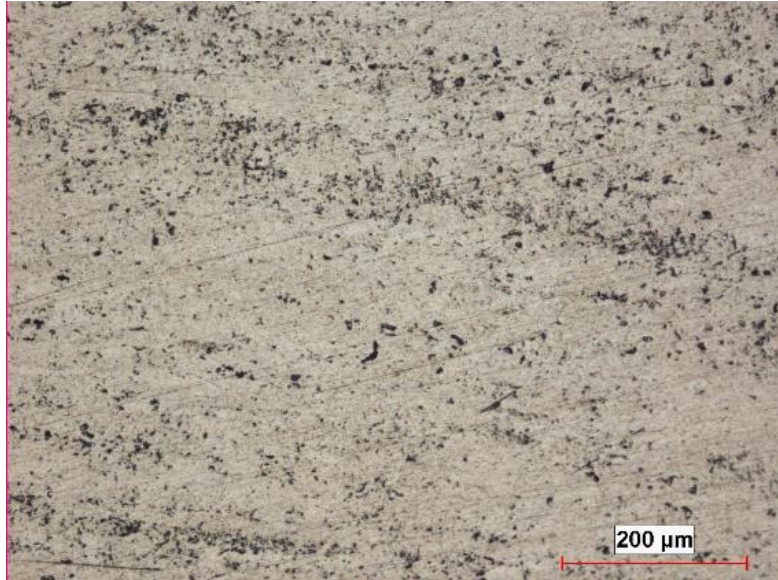


e)

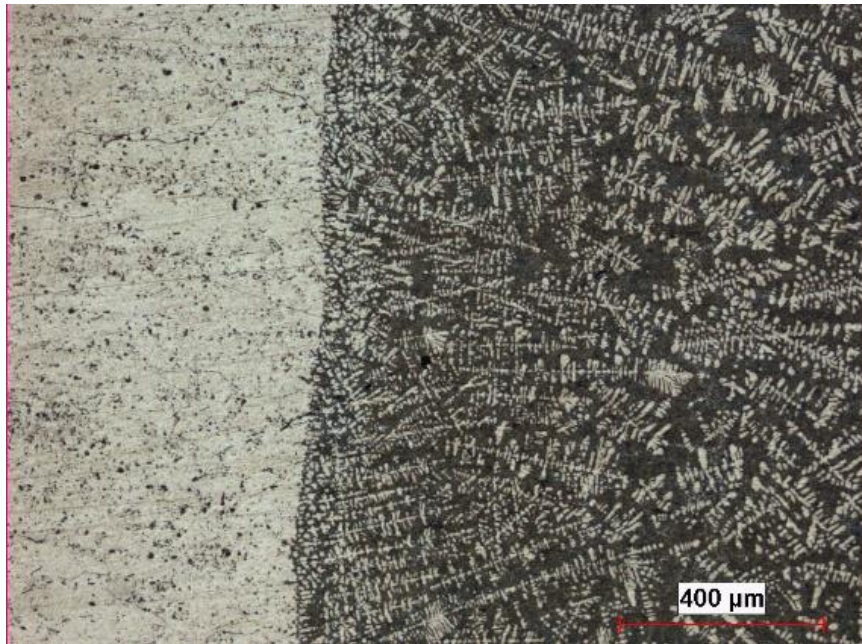
Şekil 6.59: 350 °C 6 dk ısıtılmış a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

6.2.4 Al6061-T6 – AlSi12 Numunelerinin Mikroyapı Sonuçları

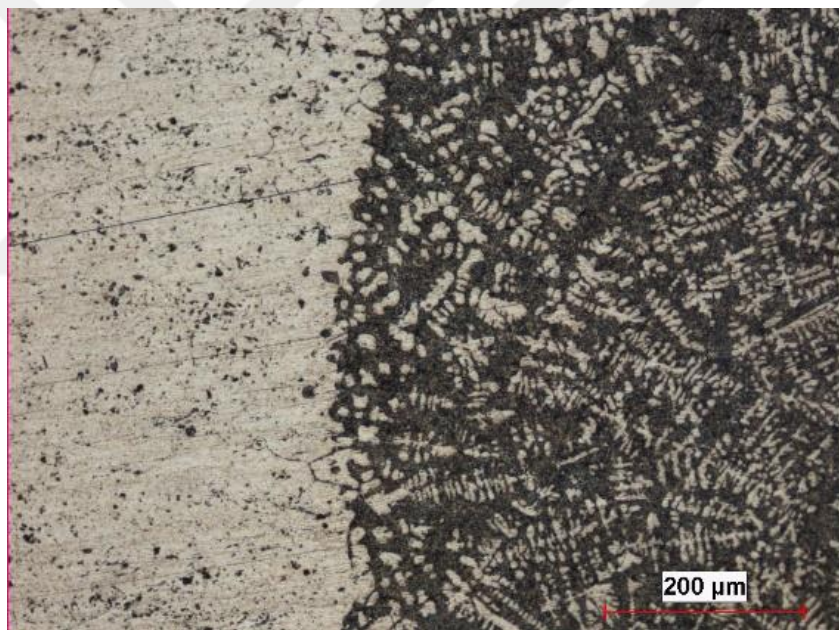
Aşağıdaki şekilde Al6061-T6 – AlSi12 malzemesinin ısıtılmış numunesine ait mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Görseller incelendiğinde geçiş bölgesinde ki ve kaynak bölgesinde dentrit yapı olduğu dikkat çekmektedir.



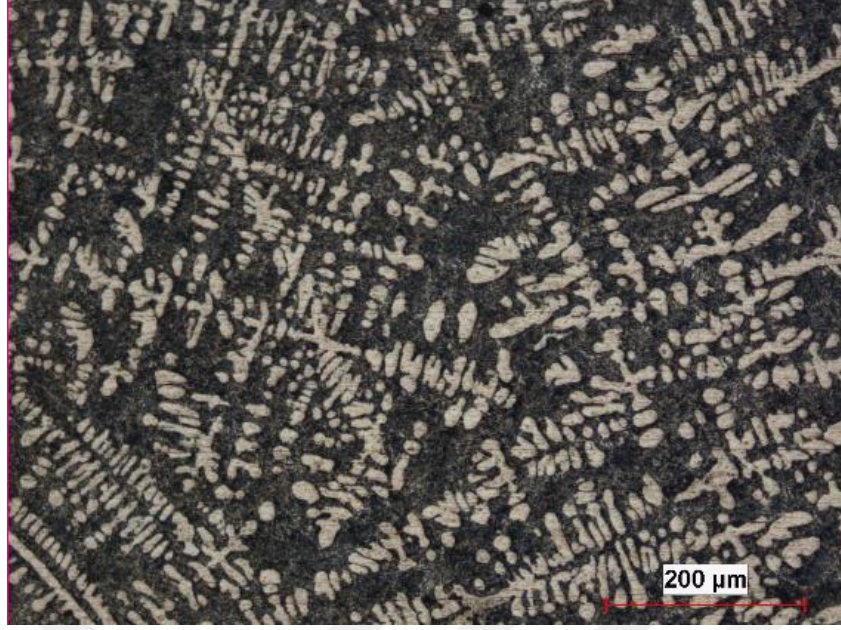
a)



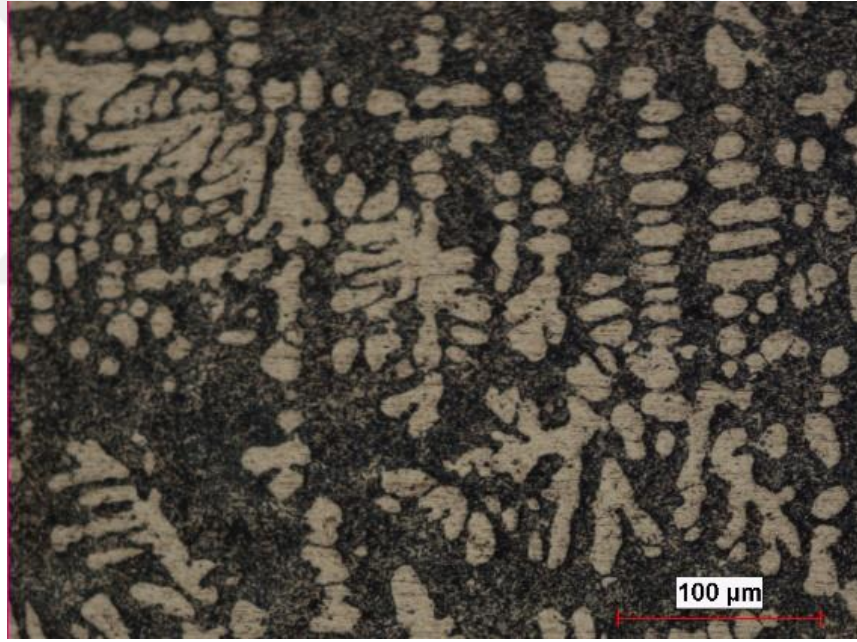
b)



c)



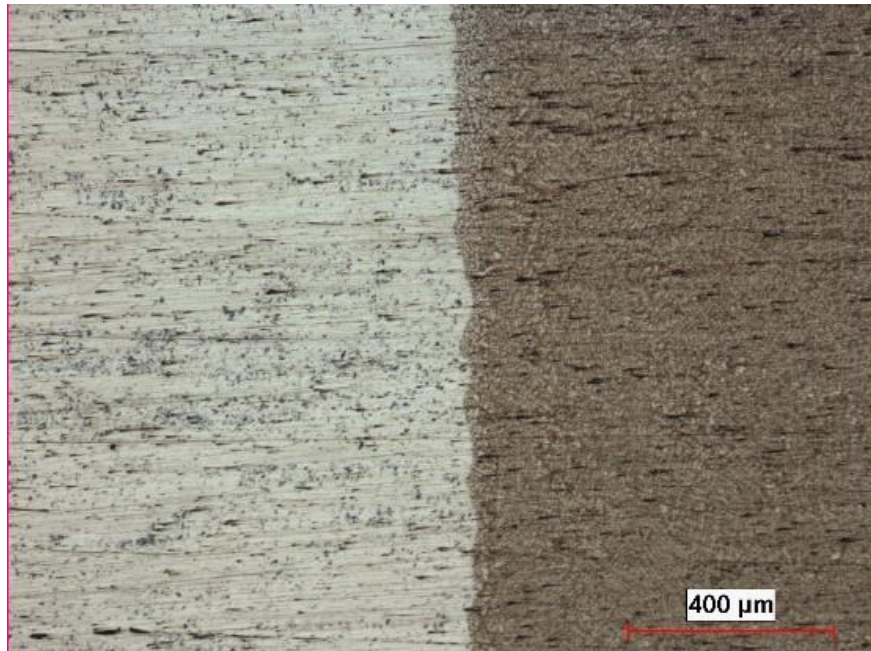
d)



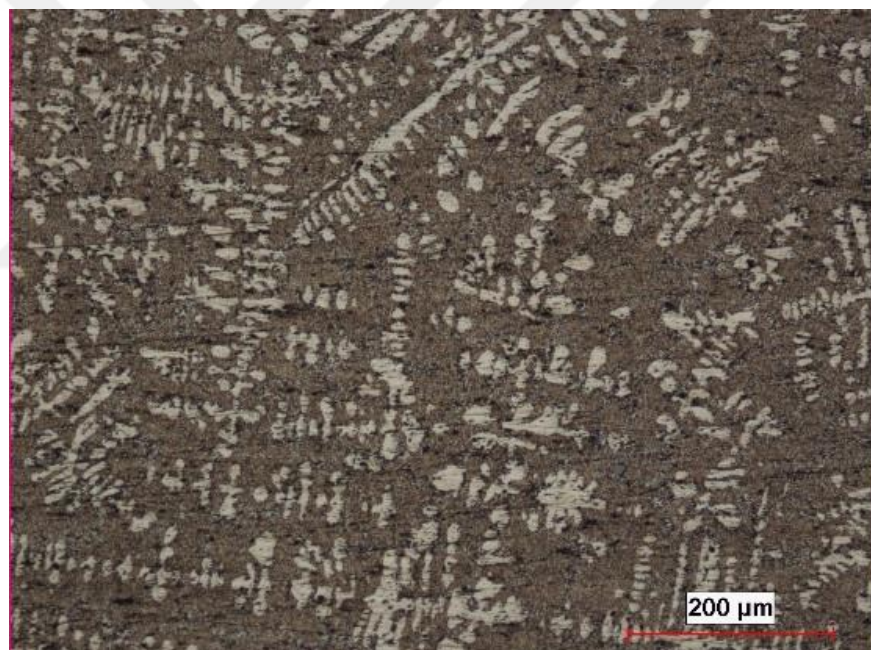
e)

Şekil 6.60: Isıl işlemsiz a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

Aşağıda Al6061-T6 – AlSi12 ve 185 °C’3 dk ısıtıl işlem görmüş numunesinin iç yapı görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde ısıtıl işlem etkisiyle tanelerin büyüdüğü gözlemlenmiştir.



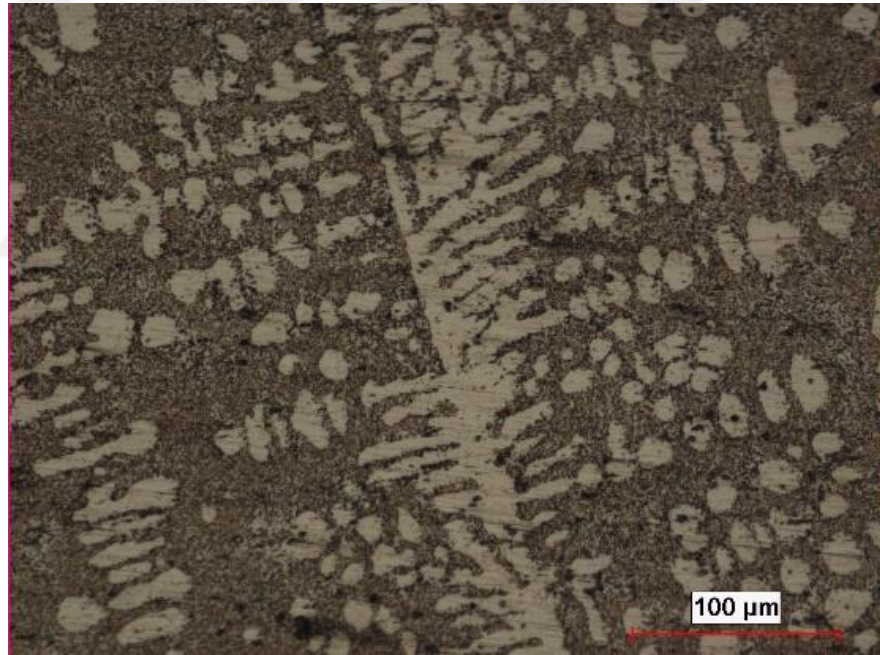
a)



b)



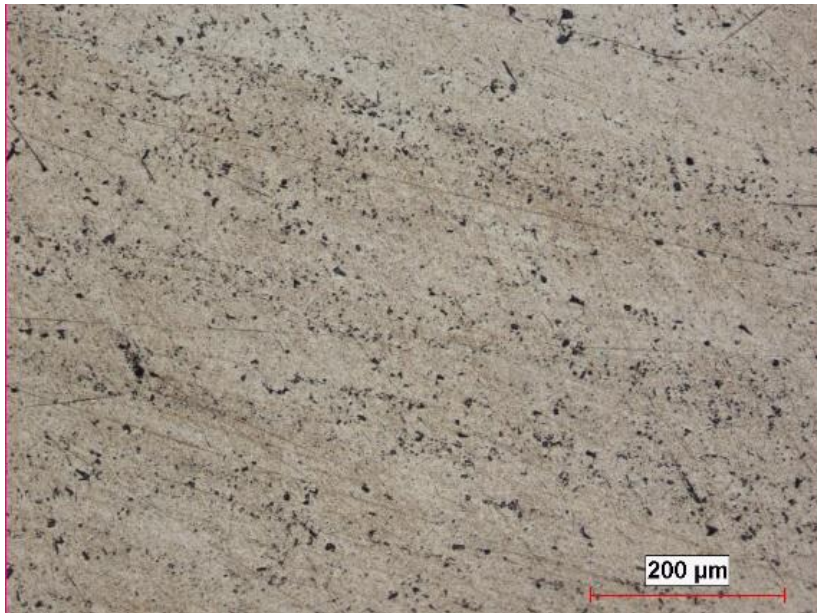
c)



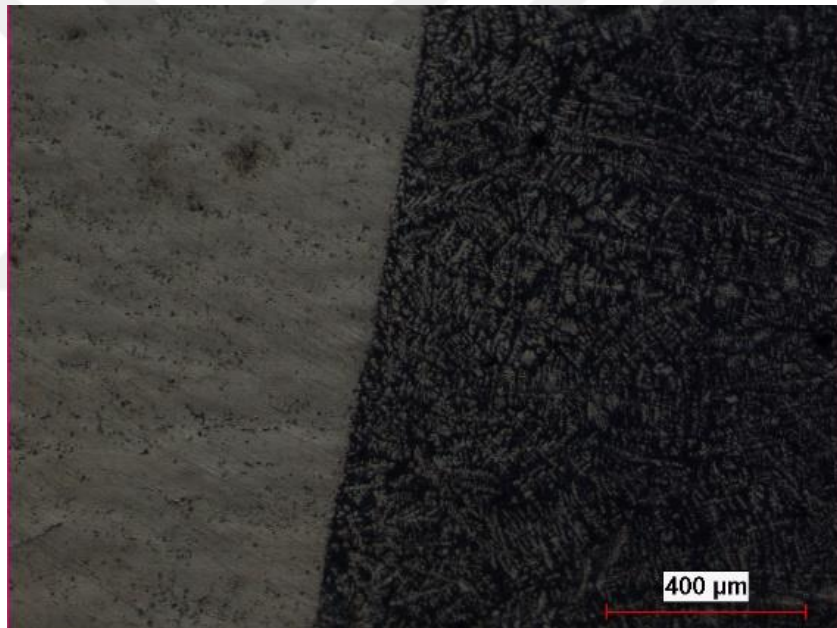
d)

Şekil 6.61: 185 °C 3 dk Isıl işlemlı a) Geçış bölgesi 50x b) Geçış bölgesi 100x c) Kaynak bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 200x Büyütölmüş mikroyapı görüntüsü.

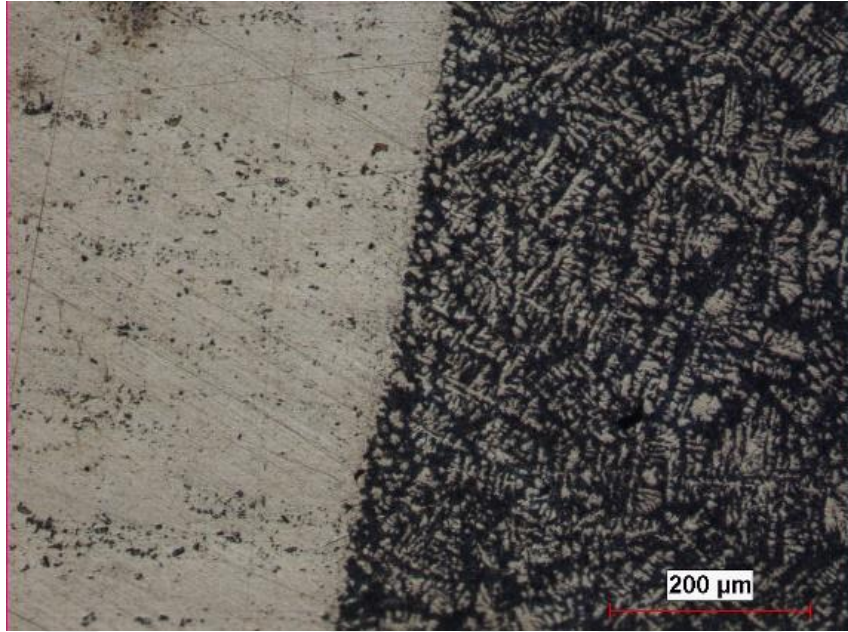
Aşağıda Al6061-T6 – AlSi12 malzemesinin 185 °C 6 dk indüksiyon ısıı işlem görmüş numunesine ait farklı bölge ve çeşitli büyötmelerde mikroyapı görüntöleri verilmiştir. Verilmiş olan görüntüler incelendiğinde geçış bölgesinde ve kaynak bölgesinde tanelerin sıklaştığı ve dentrit yapının yoğunlaştığı görölmektedir.



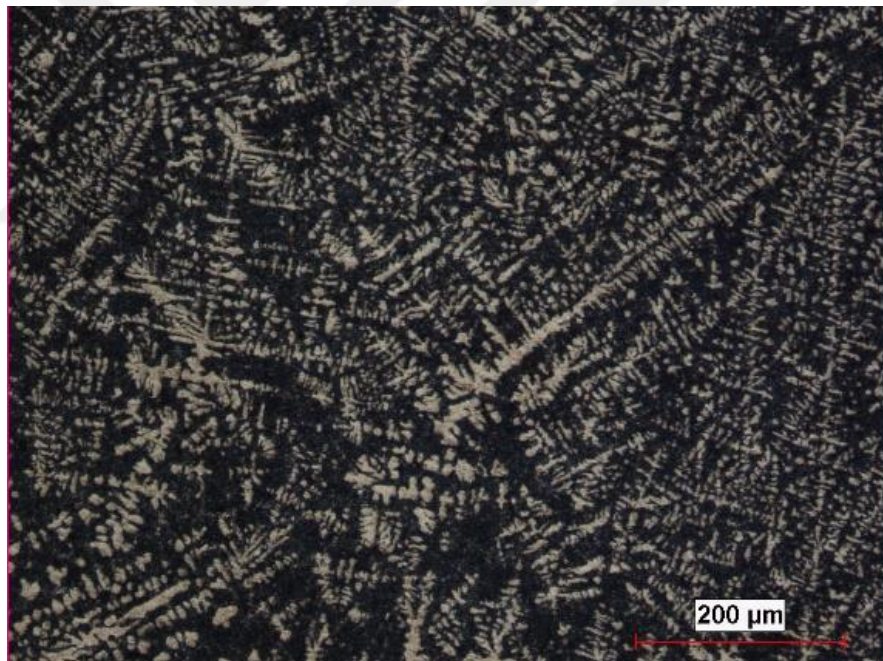
a)



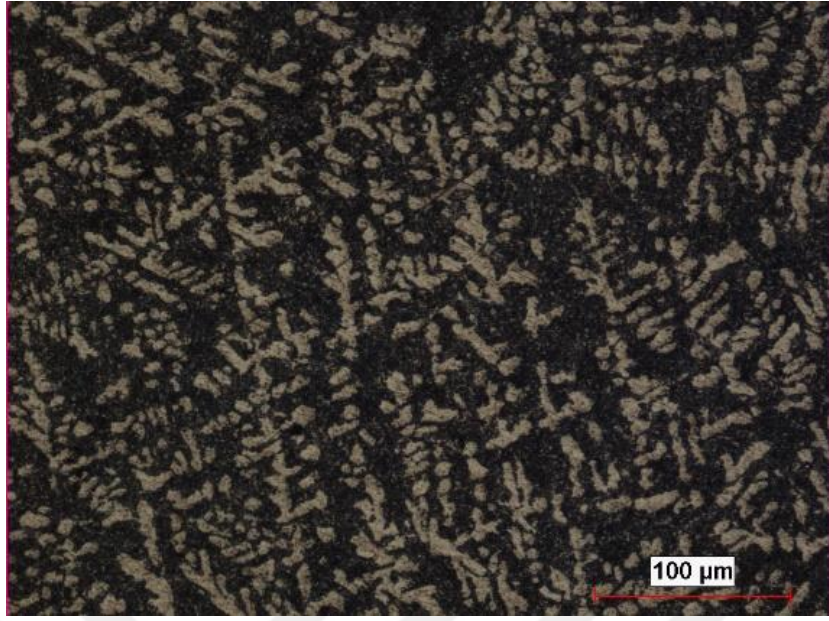
b)



c)



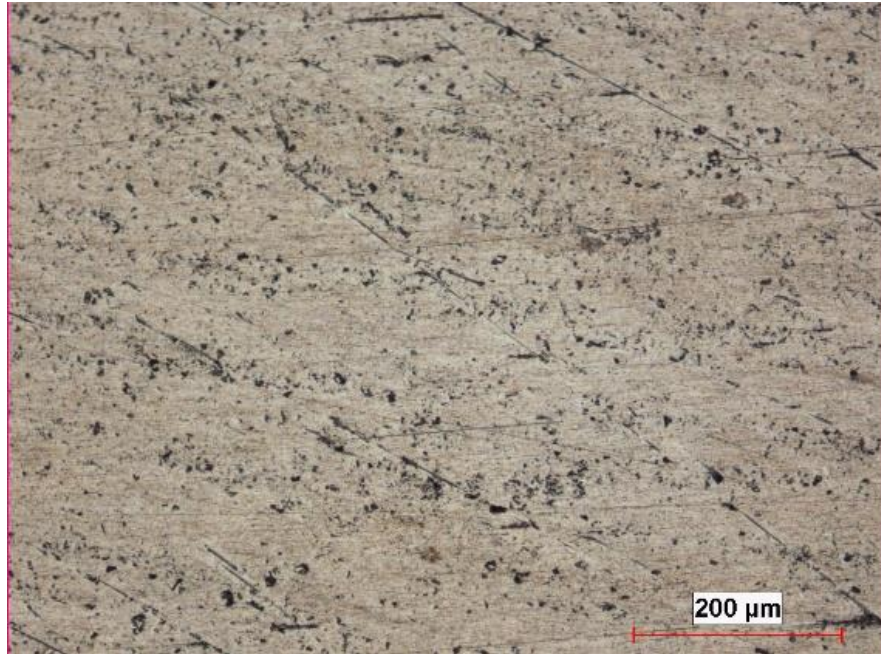
d)



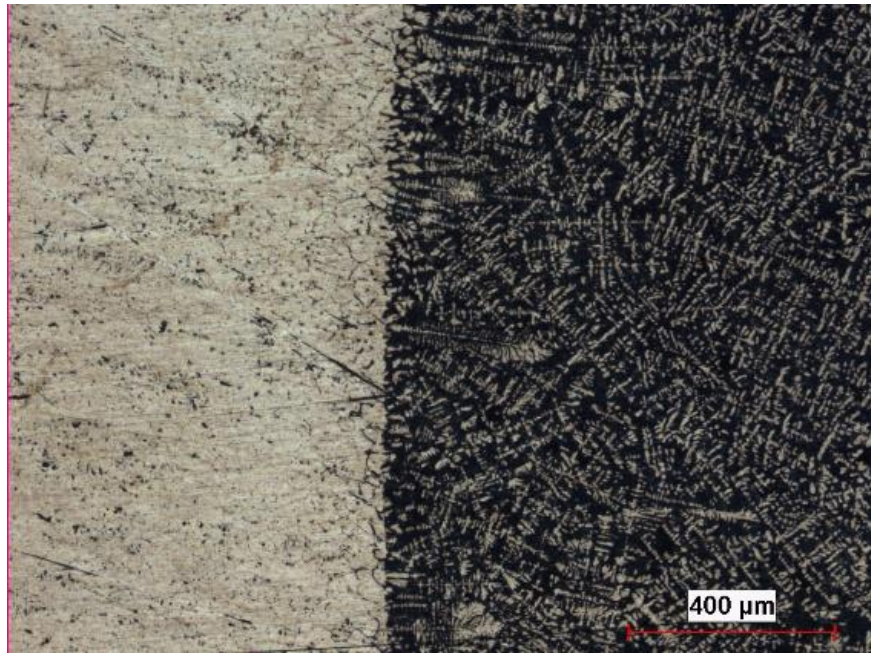
e)

Şekil 6.62: 185 °C 6 dk Isıl işlemlı a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütölmüş mikroyapı göröntüsü.

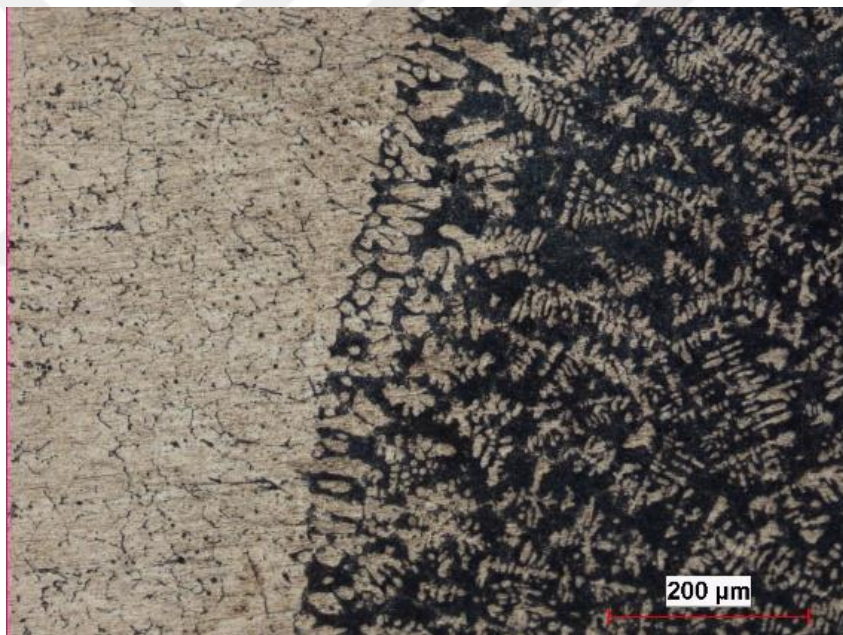
Aşağıda A6061-T6 – AlSi12 ve 185 °C 9 dk indüksiyon ısıı işlemlı görmüş numunesıne ait mikroyapı görseıleri verılmıştır. Burada 6 dk'lık ısıı işleme göre tanelerın irileştığı ve dentrit yapının devam ettiğı gözlemlenmıştır.



a)



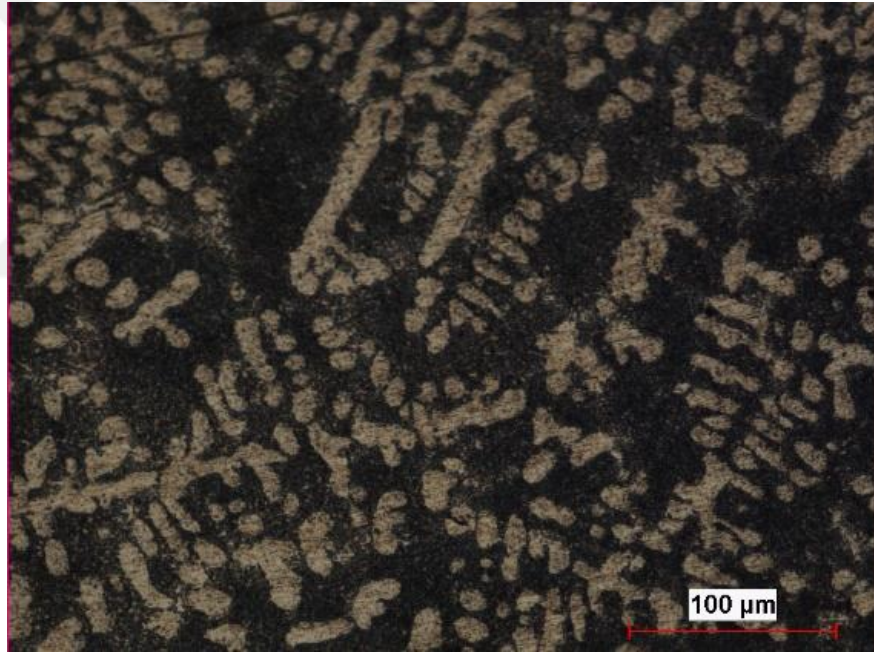
b)



c)



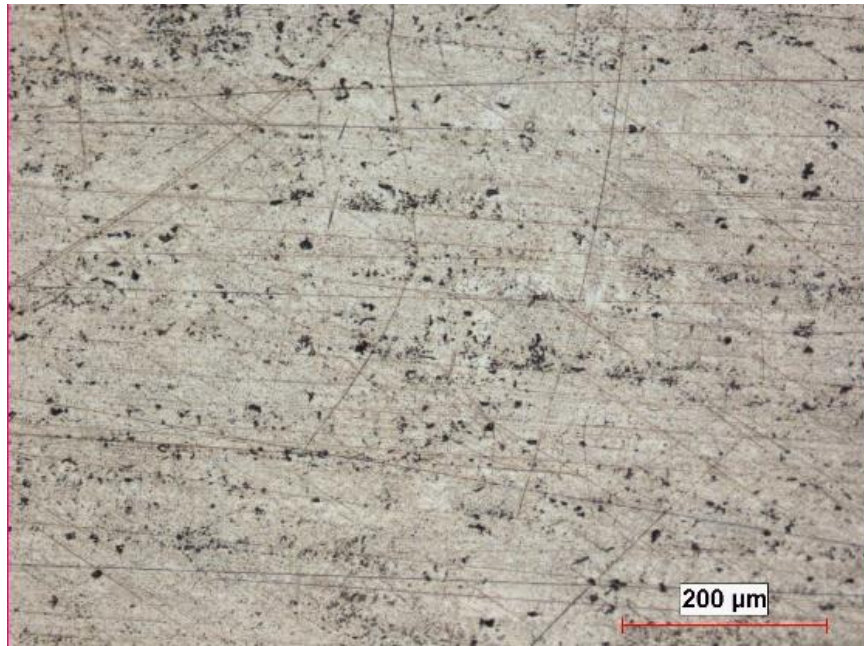
d)



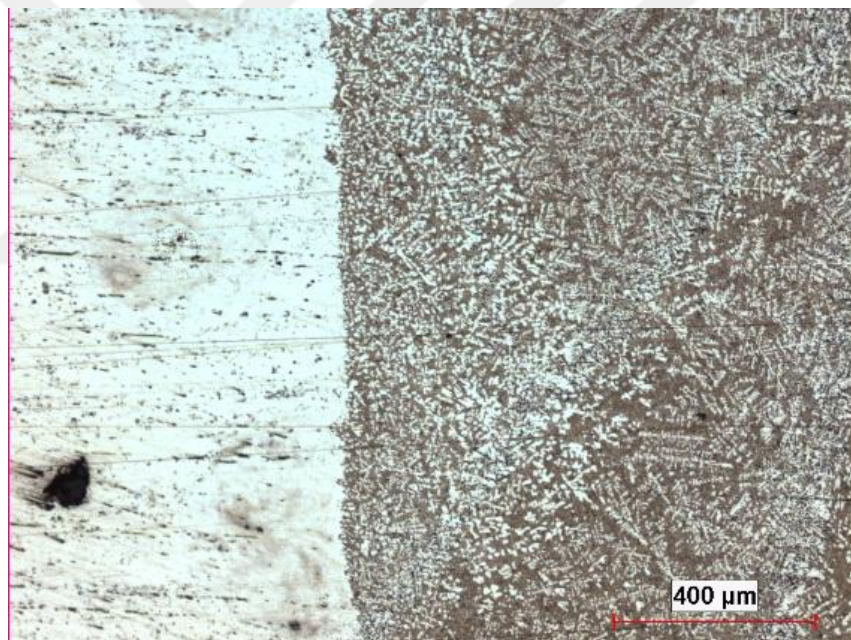
e)

Şekil 6.63: 185 °C 9 dk Isıl işlemlı a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütölmüş mikroyapı görüntüsü.

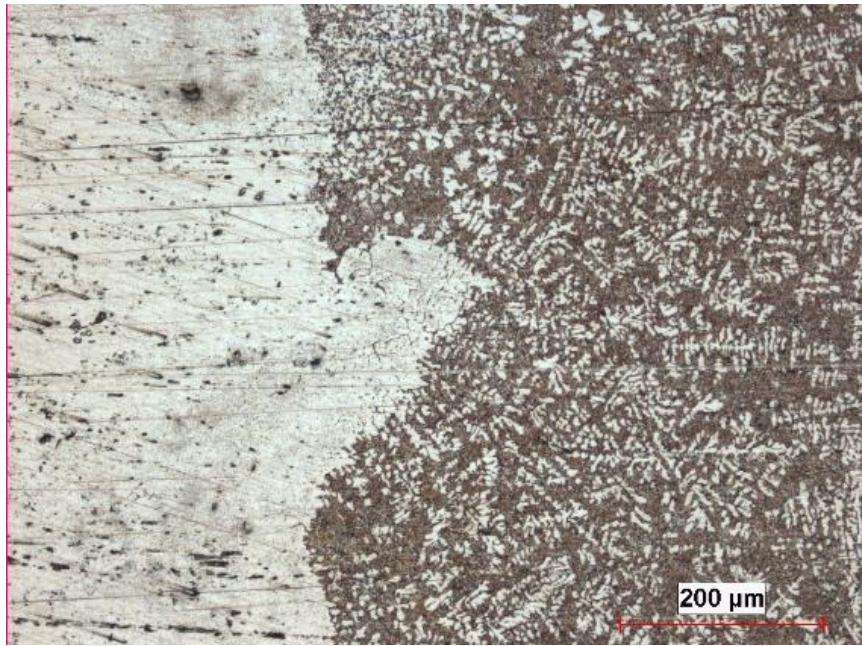
Aşağıdaki Şekil 6.64’de Al6061-T6 – AlSi12 ve 350 °C 3 dk indüksiyon ısıı işlemlı görmüş numunenin mikroyapı görselleri gösterilmiştir. Verilmiş olan görseller incelendiğinde esas metalden kaynak bölgesine gidildikçe taneli yapıdan dentrit yapıya geçildiği görölmüşür.



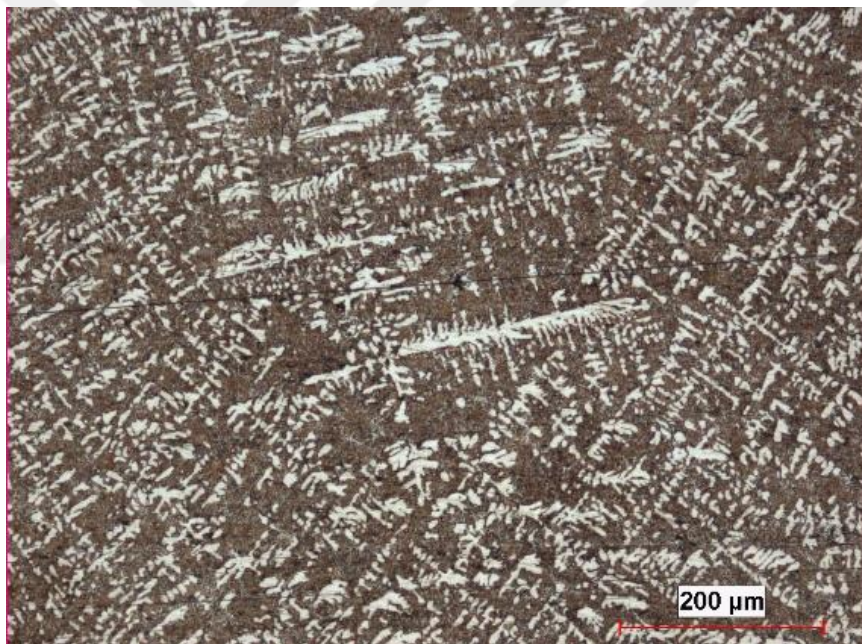
a)



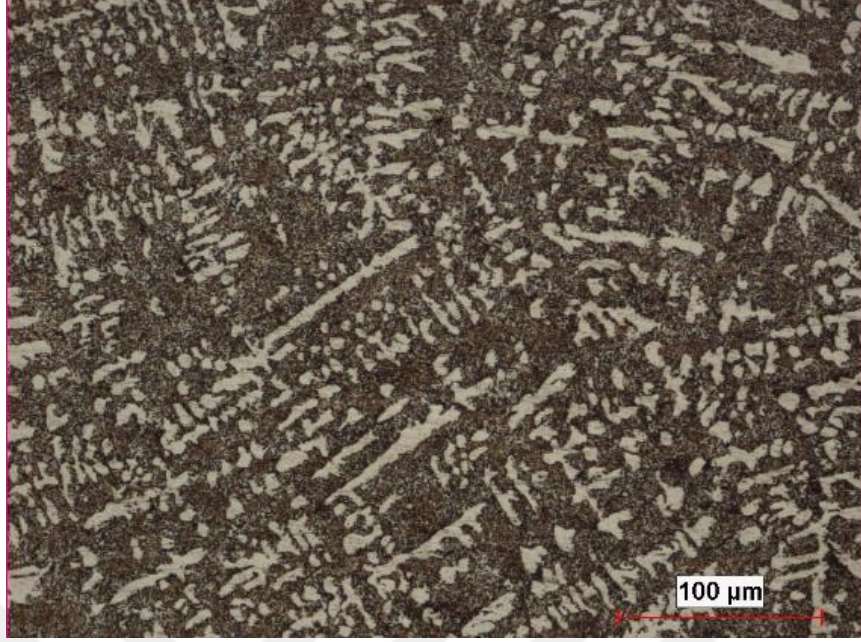
b)



c)



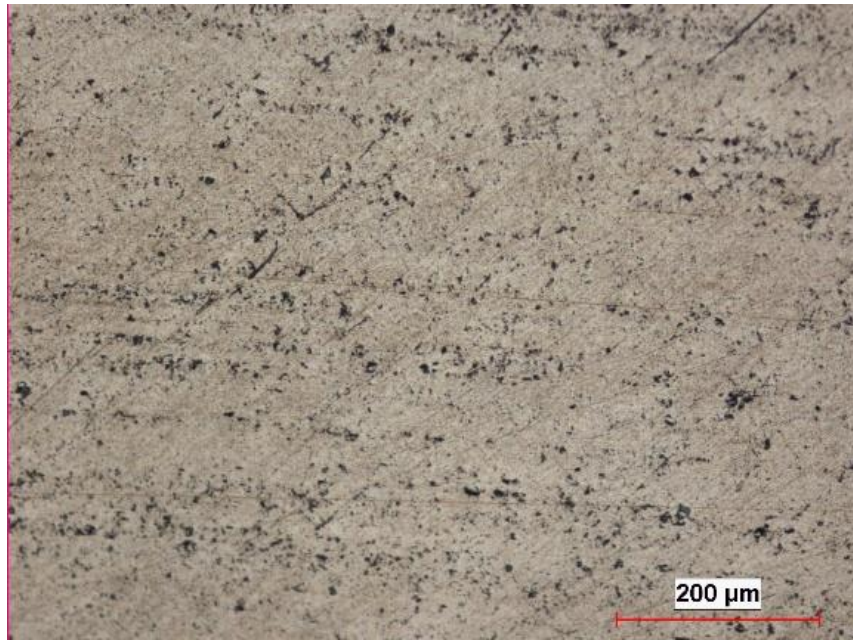
d)



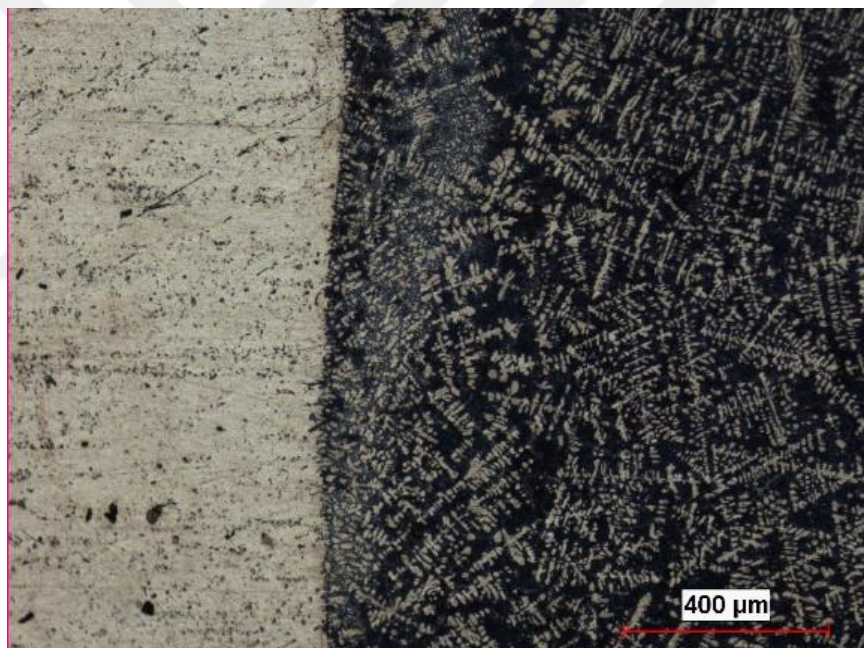
e)

Şekil 6.64: 350 °C 3 dk Isıl işlemli a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

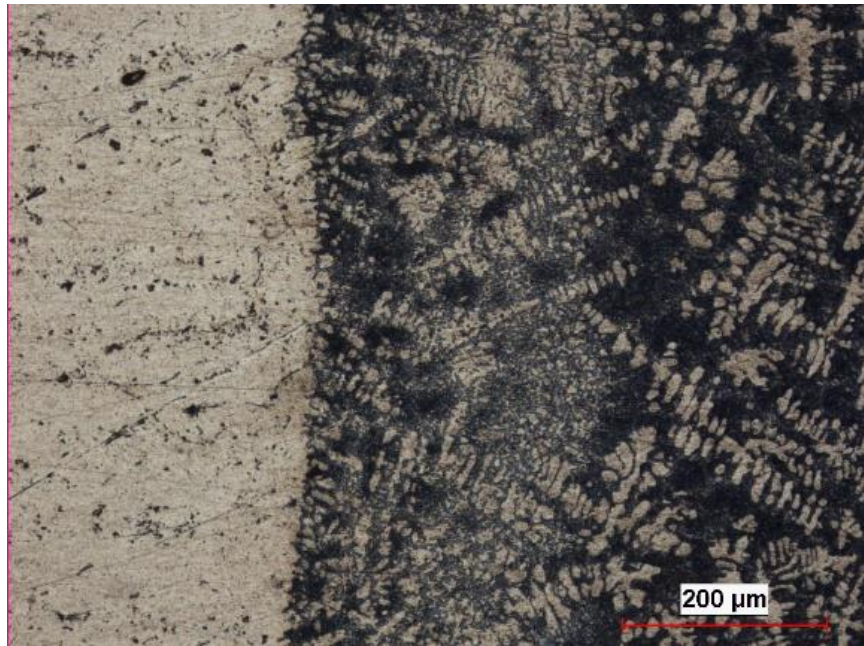
Aşağıda Al6061-T6 – AlSi12 malzemesinin 350 °C 6 dk indüksiyon ısıtılması görmüş numunesinin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Verilen görüntüler incelendiğinde esas metalde daha çok taneli yapı görülmektedir. Geçiş bölgesi ve kaynak bölgesinde ise dentrit yapıya geçilmiştir. Kaynak bölgesinde ısının da etkisiyle tanelerin az miktar da olsa büyüdüğü gözlemlenmiştir.



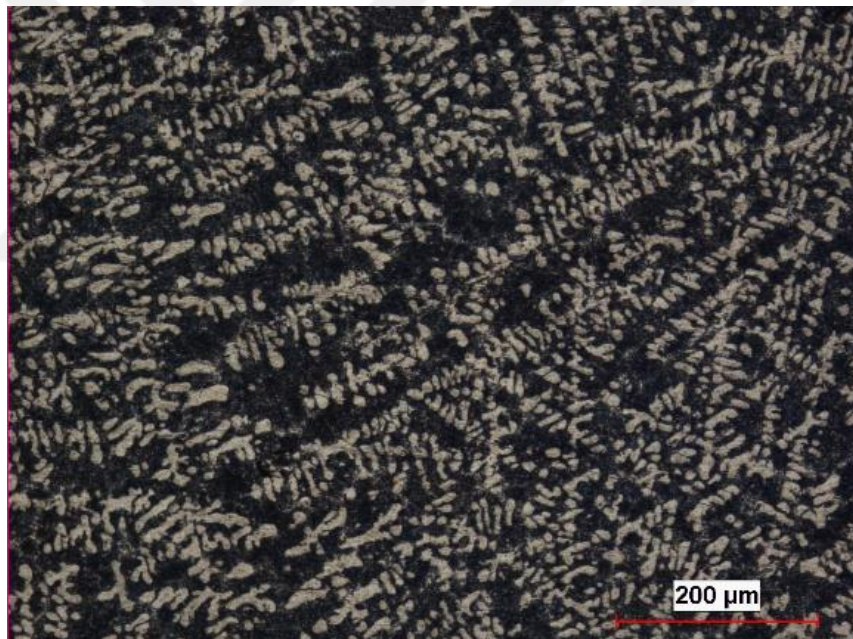
a)



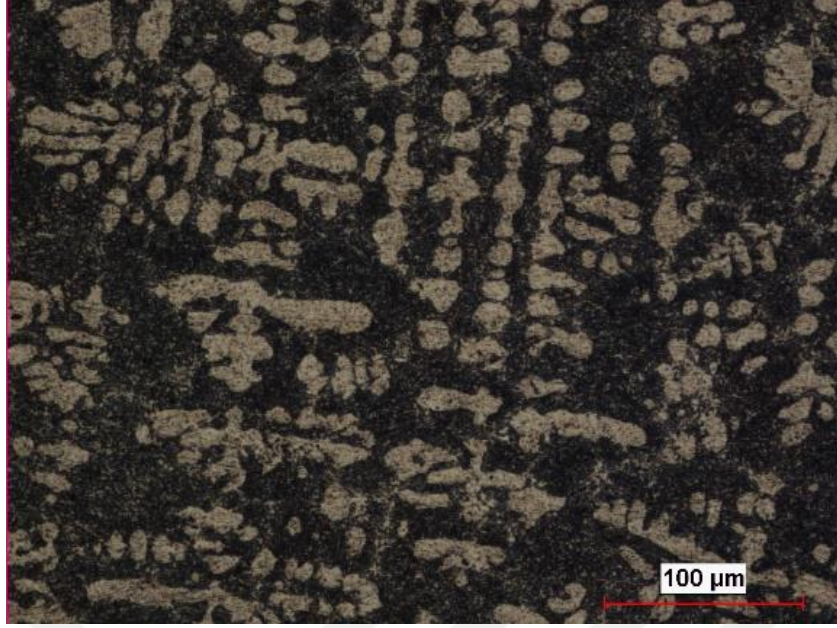
b)



c)



d)



e)

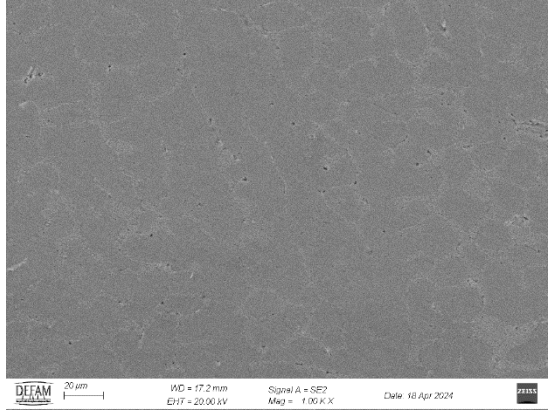
Şekil 6.65: 350 °C 6 dk ısıtılmış a) Esas metal 100x b) Geçiş bölgesi 50x c) Geçiş bölgesi 100x d) Kaynak bölgesi 100x e) Kaynak bölgesi 200x Büyütülmüş mikroyapı görüntüsü.

6.3 SEM / EDX Analizi Sonuçları

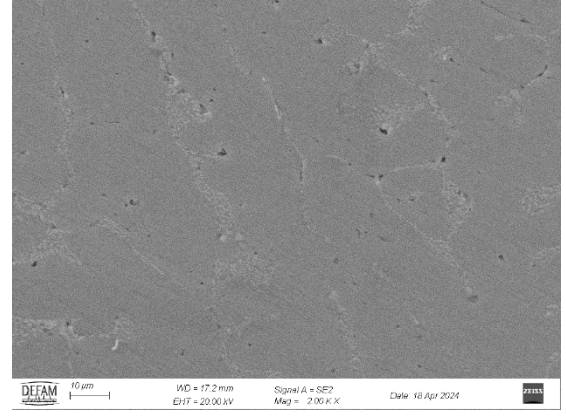
SEM Yüzey görüntüleme işlemi ısıtılmış numunelerin kaynak bölgesine, 185 °C 6 dk indüksiyon ısıtılmış numunelerin kaynak bölgesine ve esas metal bölgesine, 350°C 6 dk indüksiyon ısıtılmış numunelerin ise sadece kaynak bölgesine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

6.3.1 Al6061 – AlSi5 Numunelerinin SEM Sonuçları

Aşağıda Al6061 – AlSi5 malzemesine ait ısıtılmış numunenin kaynak bölgesinin SEM sonuçları verilmiştir.



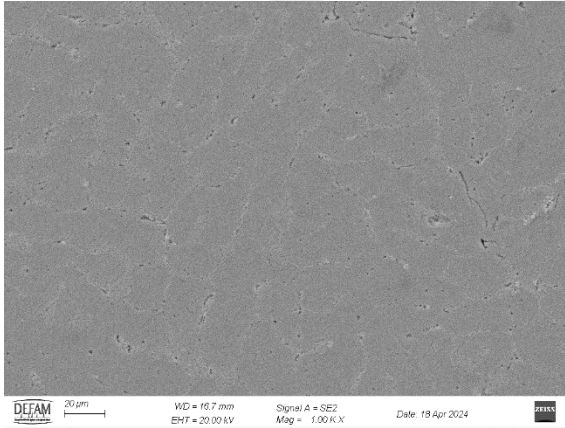
a)



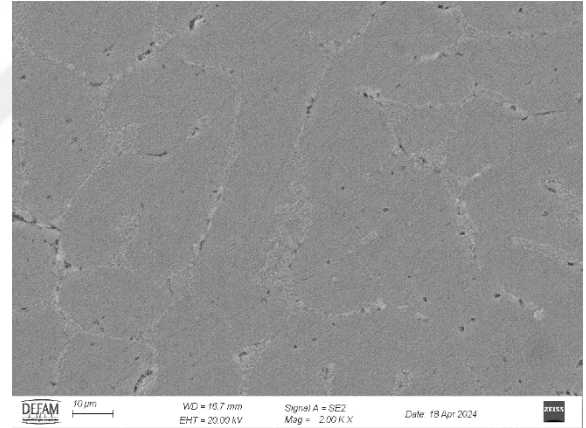
b)

Şekil 6.66: Isıl işlemsiz a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.

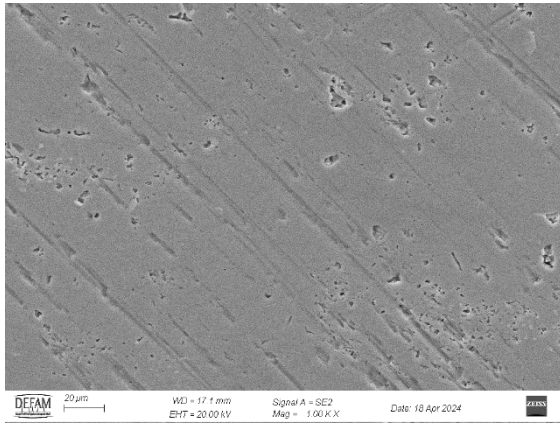
Aşağıda Al6061-AlSi5 kaynaklı malzemenin 185 °C 6 dk indüksiyon ısıl işlemi uygulanmış numunesinin esas metal ve kaynak bölgesinin SEM sonuçları verilmiştir.



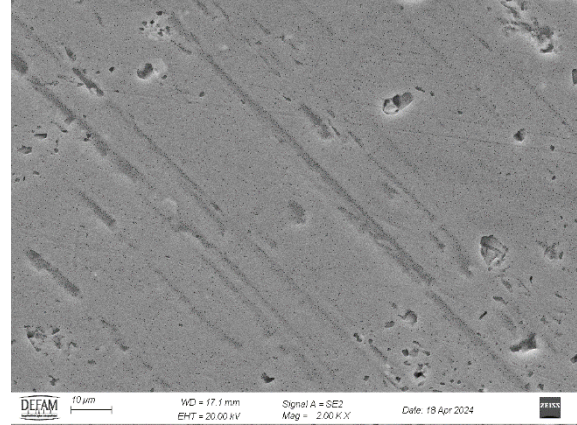
a)



b)



c)

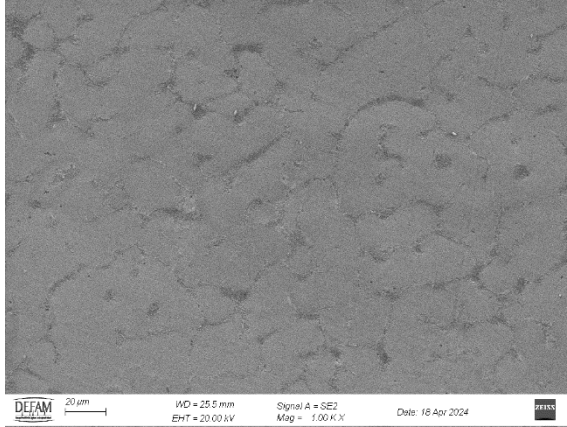


d)

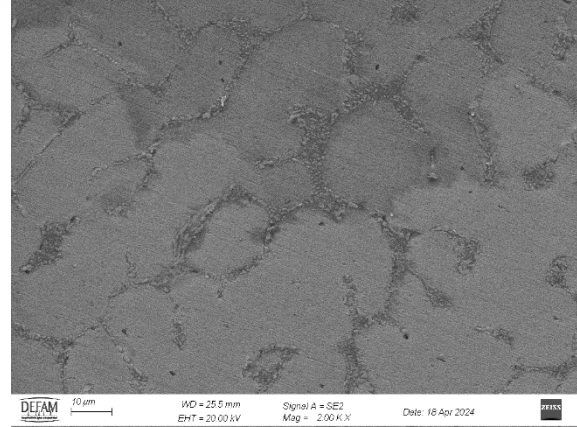
Şekil 6.67: 185 °C 6 dk ısıtılmış a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x c) Esas metal bölgesi 1000x d) Esas metal bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.

6.3.2 Al6061-T6 – AlSi5 Numunelerinin SEM Sonuçları

Aşağıda Al6061-T6-AlSi5 kaynaklı parçaların ısıtılmış numunesine ait kaynak bölgesinin SEM sonuçları verilmiştir.



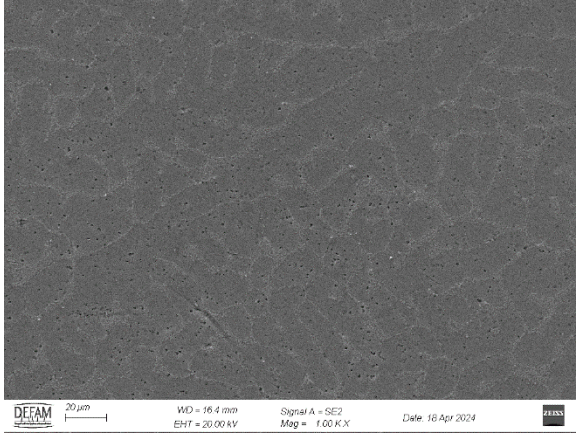
a)



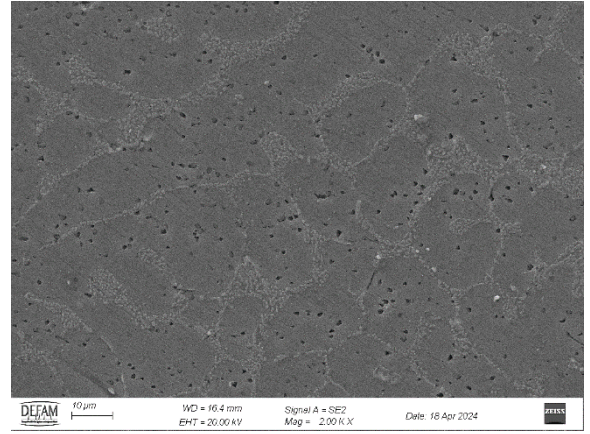
b)

Şekil 6.68: Isıtılmış a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.

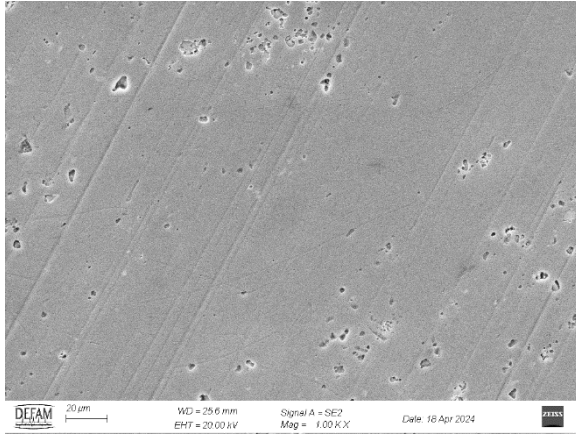
Aşağıda 185 °C 6 dk indüksiyon ısıtılmış numunenin esas metal ve kaynak bölgesinin SEM sonuçları verilmiştir.



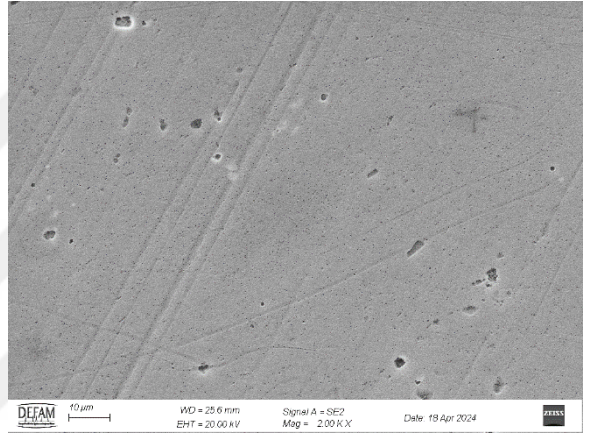
a)



b)



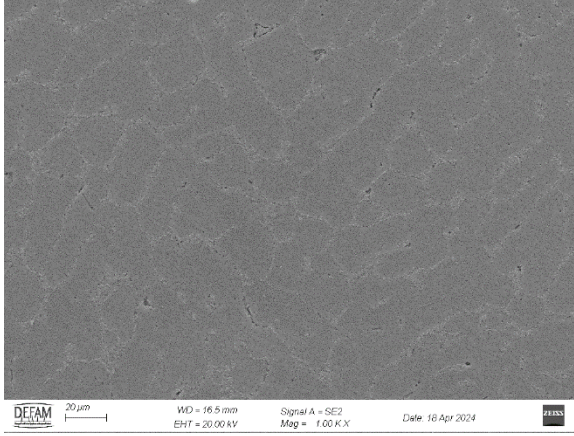
c)



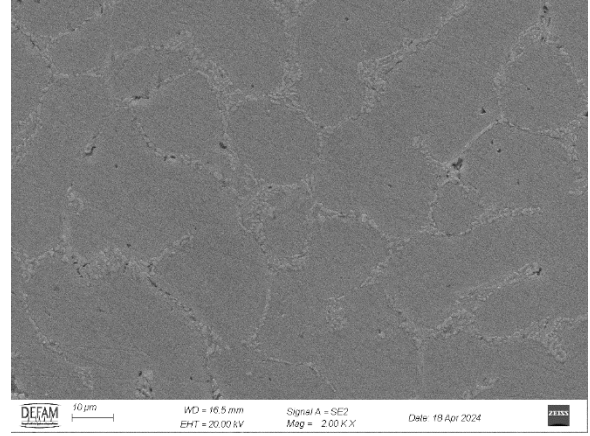
d)

Şekil 6.69: 185 °C 6 dk ısıtılmış a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x c) Esas metal bölgesi 1000x d) Esas metal bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.

Aşağıdaki Şekil 6.70’de 350 °C 6 dk indüksiyon ısıtılmış numunenin kaynak bölgesine ait SEM sonuçları verilmiştir.



a)

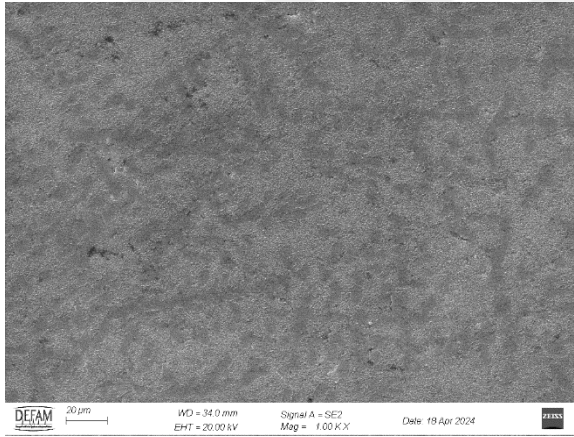


b)

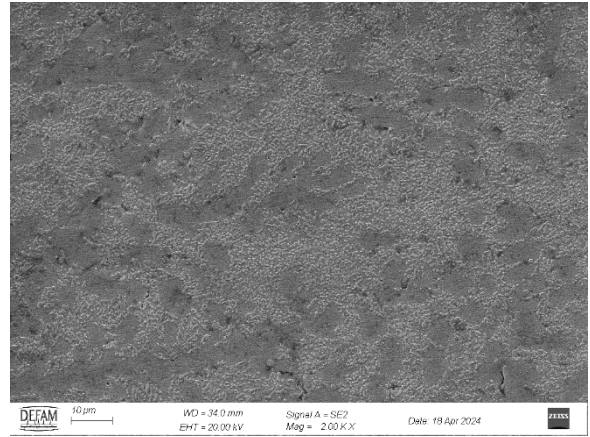
Şekil 6.70: 350 °C 6 dk Isıl işlemli a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.

6.3.3 Al6061 – AlSi12 Numunelerinin SEM Sonuçları

Aşağıda Al6061-AlSi12 malzemeleri kullanılarak TIG kaynak işlemi yapılmış örneklerin ısıtıl işlem uygulanmamış numunesinin kaynak bölgesine ait SEM sonuçları verilmiştir.



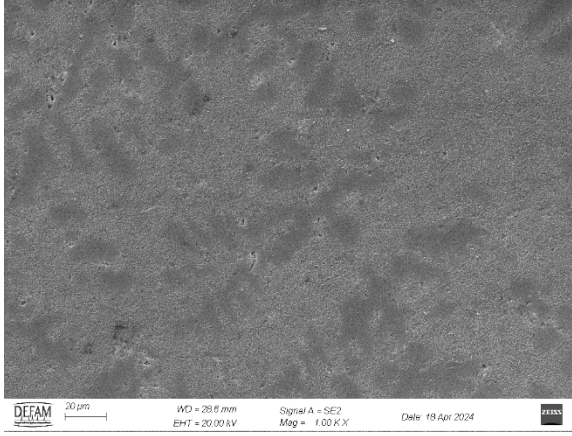
a)



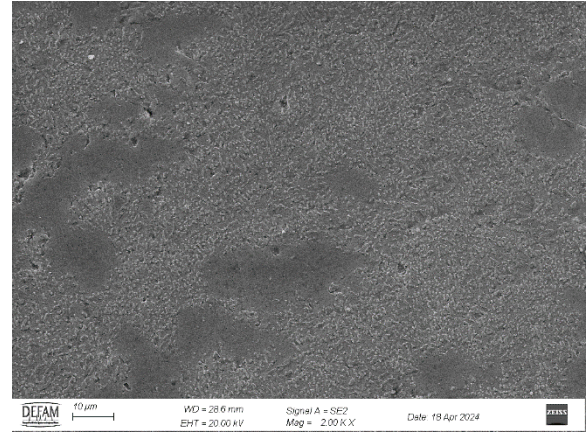
b)

Şekil 6.71: Isıl işlemsiz a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.

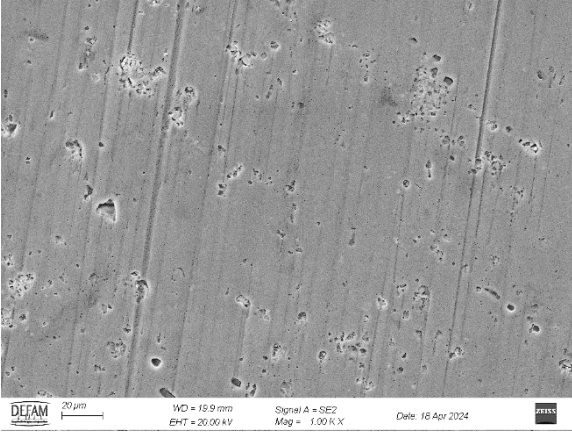
Aşağıda 185 °C 6 dk indüksiyon ısıtıl işlemi uygulanmış numunenin kaynak bölgesine ve esas metal bölgesine ait SEM sonuçları verilmiştir.



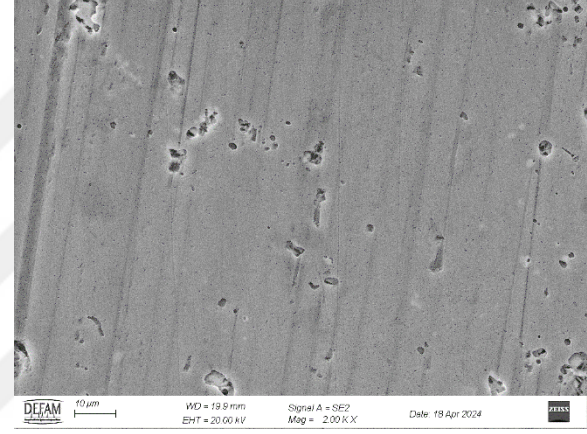
a)



b)



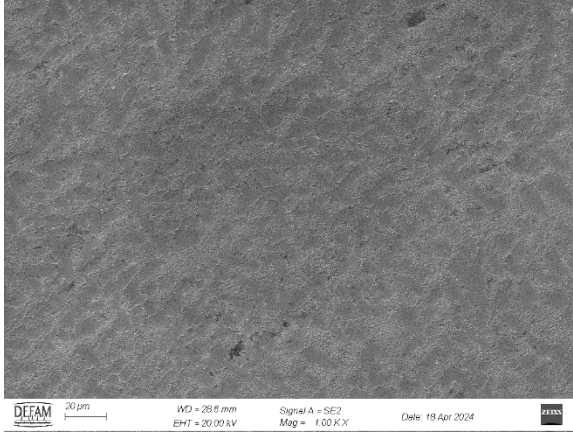
c)



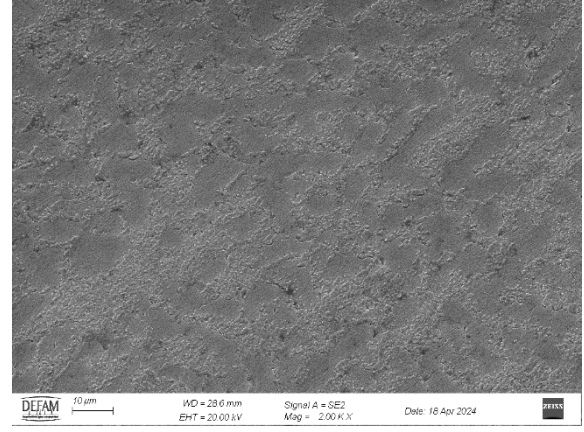
d)

Şekil 6.72: 185 °C 6 dk ısıtılmış a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x c) Esas metal bölgesi 1000x d) Esas metal bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.

Aşağıdaki Resim 6.73’de 350 °C 6 dk ısıtılmış numunenin kaynak bölgesinin SEM görüntüleri verilmiştir.



a)

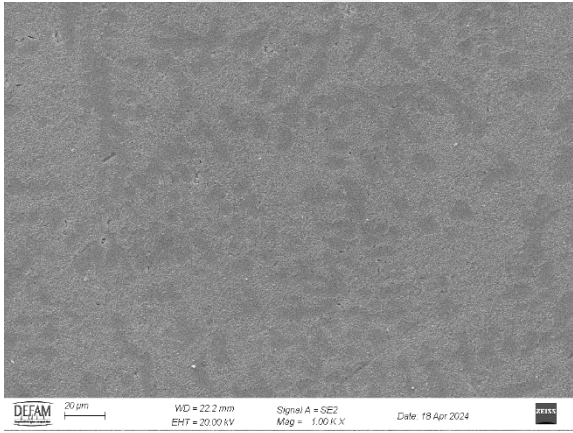


b)

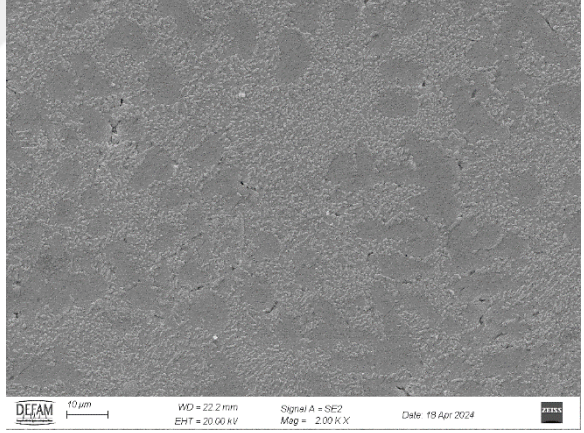
Şekil 6.73: 350 °C 6 dk Isıl işlemlı a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütölmüş SEM sonuçları.

6.3.4 Al6061-T6 – AlSi12 Numunelerinin SEM Sonuçları

Aşağıda Al6061-T6-AlSi12 malzemeleri ile kaynatılmış numunelerin ısıl işlemsiz örneğinin kaynak bölgesine ait SEM sonuçları verilmiştir.



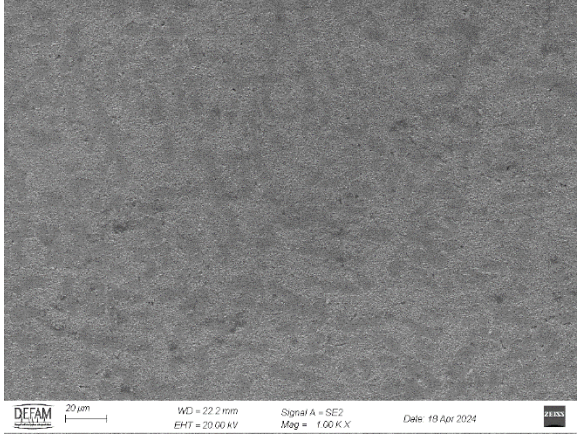
a)



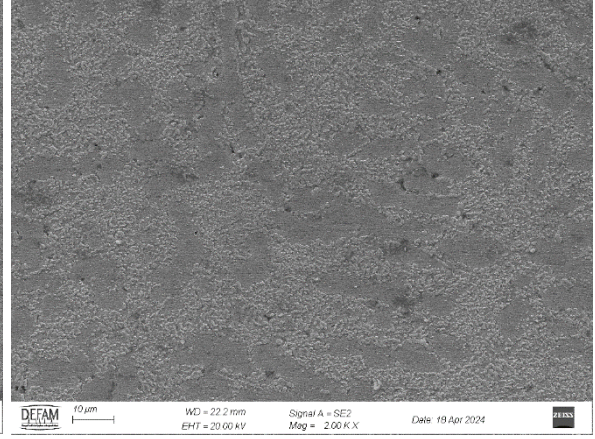
b)

Şekil 6.74: Isıl işlemsiz a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütölmüş SEM sonuçları.

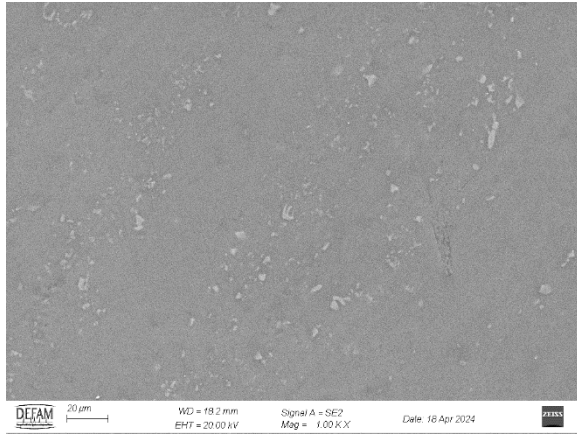
Aşağıdaki Resim 6.75’de 185 °C’de 6 dk ısıl işlem görmüş numunenin kaynak ve esas metal bölgelerinin SEM sonuçları verilmiştir.



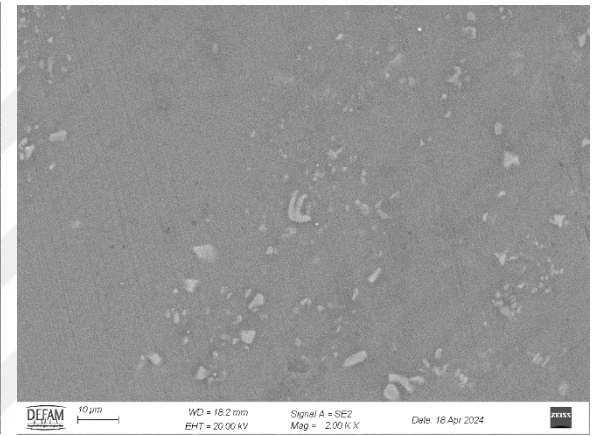
a)



b)



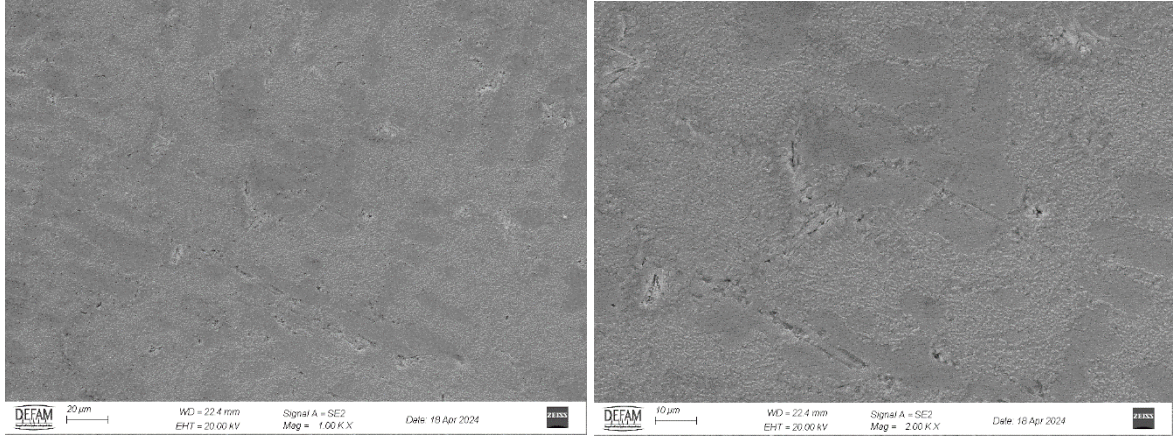
c)



d)

Şekil 6.75: 185 °C 6 dk Isıl işlemlili a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x c) Esas metal bölgesi 1000x d) Esas metal bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.

Aşağıda ki resimde 350 °C'de 6 dk indüksiyon ısııl işlemlili görmüş numunenin kaynak bölgesine ait SEM sonuçları verilmiştir.



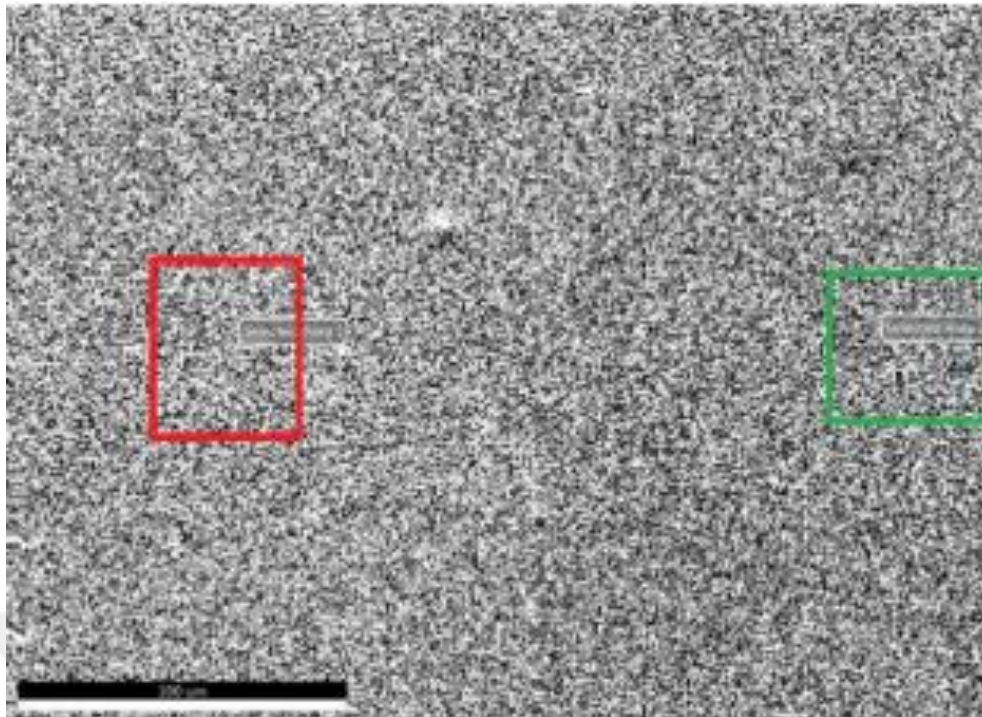
a)

b)

Şekil 6.76: 350 °C 6 dk Isıl işlemli a) Kaynak bölgesi 1000x b) Kaynak bölgesi 2000x Büyütülmüş SEM sonuçları.

6.3.5 EDX Analizi Sonuçları

EDX Analizi Al6061-T6 – AlSi12 malzeme kullanılarak TIG kaynak işlemi yapılan örneğin 185 °C’de 6 dk indüksiyon işlemi uygulanmış numunesine yapılmıştır. EDX geçiş bölgesinde yapılmış olup kaynak bölgesini ve esas bölgesini kapsamaktadır (Şekil 6.77). Şekilde de görüldüğü üzere işaretli alan içerisinde analiz yapıp sonuçları grafikte verilmiştir. Grafiklere bakıldığında esas metal bölgesinde yaklaşık %98 oranında Alüminyum bulunurken yaklaşık %2 oranında da Magnezyum elementi görülmüştür. Analizin kaynak bölgesi kısmına bakıldığında ilave metal kullanılmasından dolayı %11 civarında Silisyum, yaklaşık %78 oranında Alüminyum, %10 oranında Karbon ve yaklaşık %1 oranında ise Oksijen elementlerine rastlanmıştır.

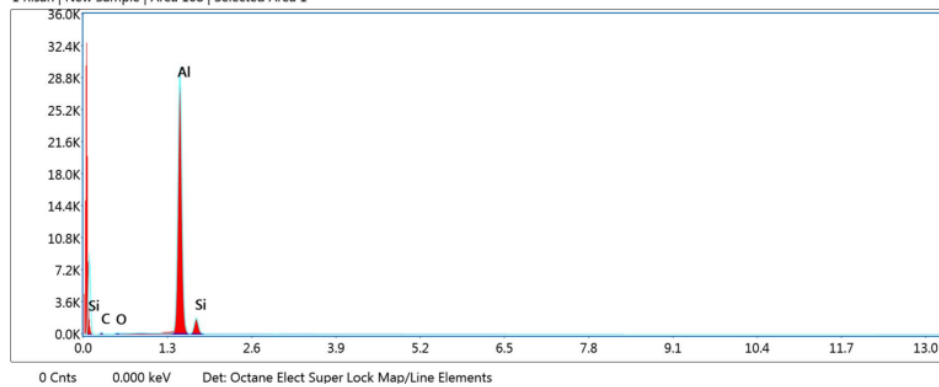


a)

Selected Area 1

kV: 20 Mag: 250 Takeoff: 43.3 Live Time(s): 20 Amp Time(μs): 3.84 Resolution:(eV) 127.2

1 nisan | New Sample | Area 108 | Selected Area 1



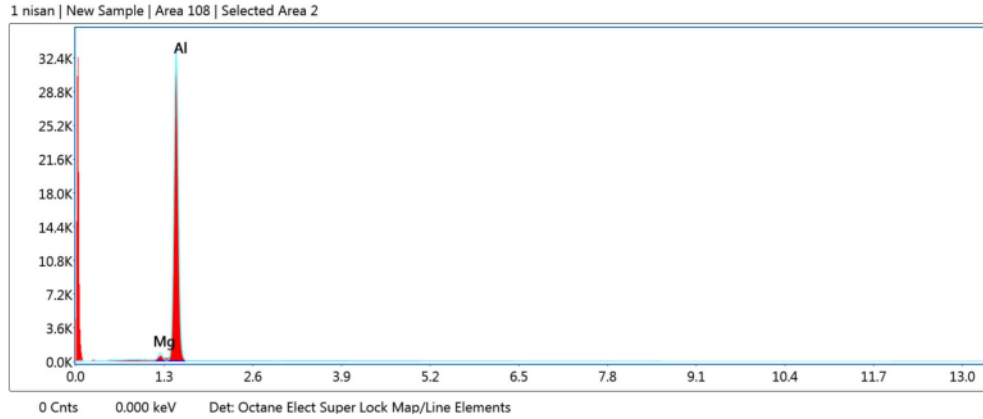
Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
C K	10.59	20.97	53.19	14.54	0.0108	1.1436	0.0888	1.0000
O K	0.92	1.37	27.61	16.94	0.0024	1.0962	0.2391	1.0000
Al K	77.65	68.47	11133.17	1.42	0.7414	0.9772	0.9754	1.0016
Si K	10.84	9.18	720.57	7.53	0.0490	0.9989	0.4528	1.0003

b)

Selected Area 2

kV:20 Mag: 250 Takeoff: 43.3 Live Time(s): 20 Amp Time(μs): 3.84 Resolution:(eV) 127.2



Smart Quant Results

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
MgK	2.16	2.40	281.87	3.72	0.0213	1.0372	0.9369	1.0117
AlK	97.84	97.60	12513.32	1.50	0.9442	0.9992	0.9659	1.0000

c)

Şekil 6.77: a) EDX Analizi yapılan alan b) Kaynak bölgesi EDX sonuçları c) Esas metal bölgesi EDX sonuçları.

6.4 Çekme Deneyi Sonuçları

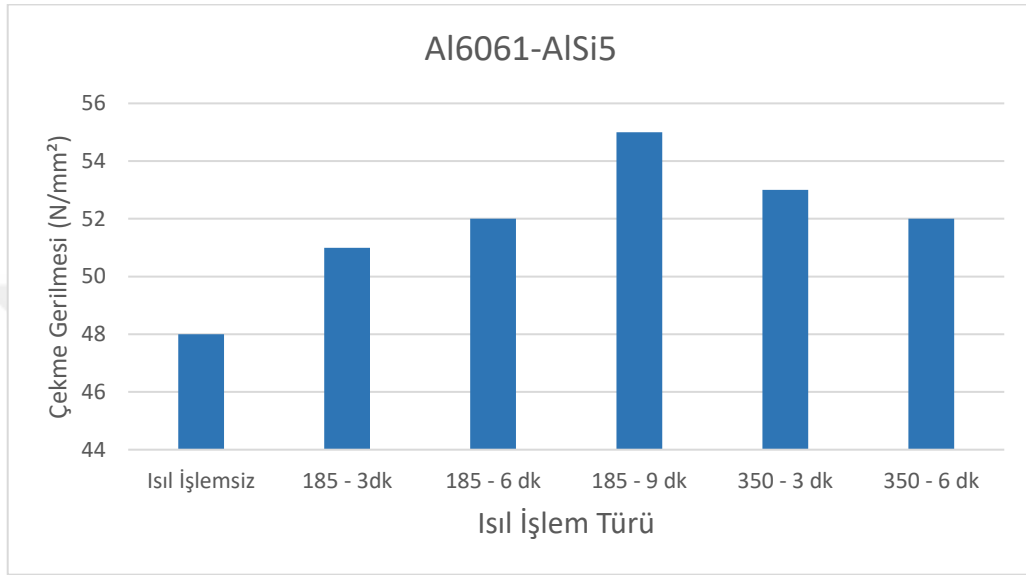
Aşağıda Tablo 6.1’de çekme deneyi sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde AlSi12 ilave teli kullanılarak birleştirilmiş numunelerin çekme gerilmeleri AlSi5 ilave telli numunelere göre daha yüksektir. Yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerin çekme gerilmelerinin, yaşlandırma işlemi uygulanmamış numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Uygulanan indüksiyon işlemi ile numunelerin çekme gerilmesi değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Fakat 185 °C indüksiyon işleminden 350 °C’ye geçildiğinde çekme gerilmelerinde düşüş olduğu görülmüştür. Numunelerin kopma bölgeleri beklenildiği gibi kaynak metalinde olmuştur. Uzama değerlerinde ise AlSi5 ilave telli numunelerin uzama değerlerinin AlSi12 ilave telli numunelere göre yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Tablo 6.1: Çekme deneyi sonuçları.

Numune Adı	Uygulanan İndüksiyon Isıl İşlemi	Çekme Gerilmesi (N/mm ²)	Uzama (%)	Kopma Bölgesi
Al6061-AlSi5	Isıl İşlemsiz	48	5,4	Kaynak Metali
Al6061-AlSi5	185 °C - 3 dk	51	4,7	Kaynak Metali
Al6061-AlSi5	185 °C - 6 dk	52	4,4	Kaynak Metali
Al6061-AlSi5	185 °C - 9 dk	55	4,2	Kaynak Metali
Al6061-AlSi5	350 °C - 3 dk	53	4	Kaynak Metali
Al6061-AlSi5	350 °C - 6 dk	52	3,9	Kaynak Metali
Al6061-T6-AlSi5	Isıl İşlemsiz	52	5,1	Kaynak Metali
Al6061-T6-AlSi5	185 °C - 3 dk	54	4,5	Kaynak Metali
Al6061-T6-AlSi5	185 °C - 6 dk	56	4,1	Kaynak Metali
Al6061-T6-AlSi5	185 °C - 9 dk	58	3,8	Kaynak Metali
Al6061-T6-AlSi5	350 °C - 3 dk	55	3,6	Kaynak Metali
Al6061-T6-AlSi5	350 °C - 6 dk	53	3,4	Kaynak Metali
Al6061-AlSi12	Isıl İşlemsiz	59	3,9	Kaynak Metali
Al6061-AlSi12	185 °C - 3 dk	62	3,4	Kaynak Metali
Al6061-AlSi12	185 °C - 6 dk	65	3,2	Kaynak Metali
Al6061-AlSi12	185 °C - 9 dk	66	3,1	Kaynak Metali
Al6061-AlSi12	350 °C - 3 dk	64	2,8	Kaynak Metali
Al6061-AlSi12	350 °C - 6 dk	63	2,6	Kaynak Metali
Al6061-T6-AlSi12	Isıl İşlemsiz	63	3,6	Kaynak Metali
Al6061-T6-AlSi12	185 °C - 3 dk	66	3	Kaynak Metali
Al6061-T6-AlSi12	185 °C - 6 dk	68	2,8	Kaynak Metali
Al6061-T6-AlSi12	185 °C - 9 dk	71	2,7	Kaynak Metali
Al6061-T6-AlSi12	350 °C - 3 dk	67	2,4	Kaynak Metali
Al6061-T6-AlSi12	350 °C - 6 dk	65	2,2	Kaynak Metali

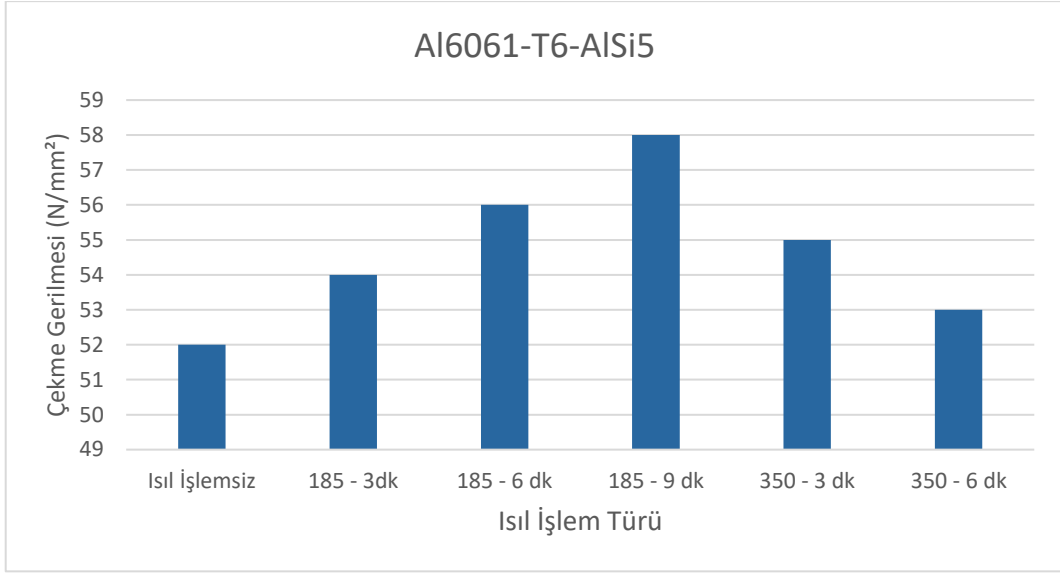
Aşağıda ki bölümde, Tablo 6.1’de verilen sonuçlar grafikler üzerinde değerlendirilmiştir.

Aşağıda ki grafikte AlSi5 ilave telli numunelerin uygulanan indüksiyon işlem türüne göre çekme gerilme değerleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde indüksiyon işleminin uygulanması ile numunelerin gerilmelerinin arttığı görülmektedir. 185 °C’de sürenin artması ile doğru orantılı artan sonuçlar görülürken, 350 °C’de tam tersi olarak sürenin artması ile gerilme değerlerinin düştüğü görülmektedir.



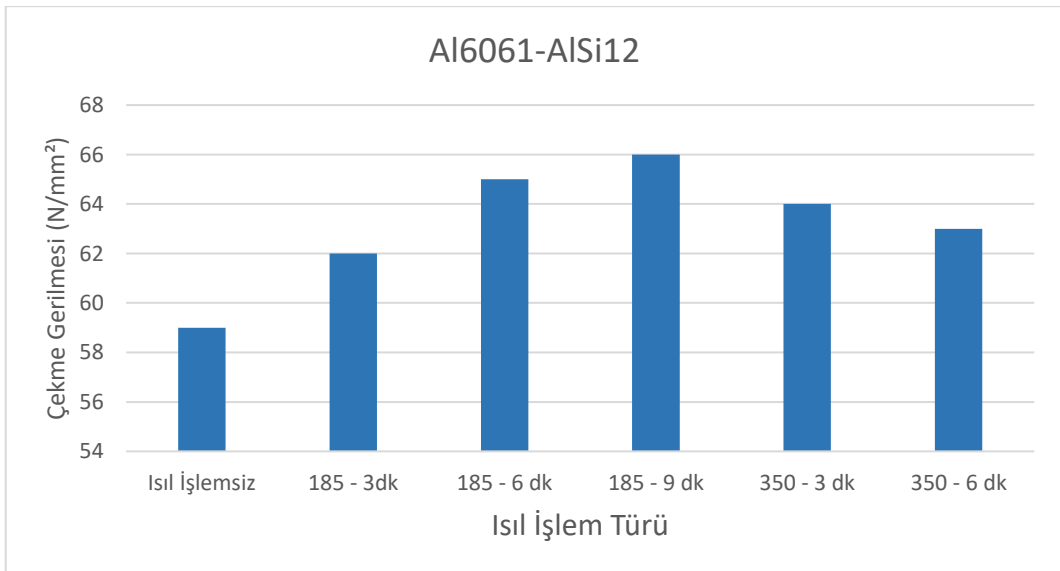
Şekil 6.78: Al6061-AlSi5 Numunelerinin çekme gerilmesi değerleri.

Aşağıda ki şekilde yaşlandırılmış alüminyumun AlSi5 ile birleştirilmiş numunelerinin çekme testi sonuçları verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında yaşlandırma işleminin etkisi ile numuneler, yaşlanmamış numunelere göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. İndüksiyon ısı işlemi etkisi ile gerilmeler artmıştır ancak 350 °C’ye gelindiğinde düşüşe geçmiştir. 350 °C’de sürenin artması ile değer daha da düşmektedir.



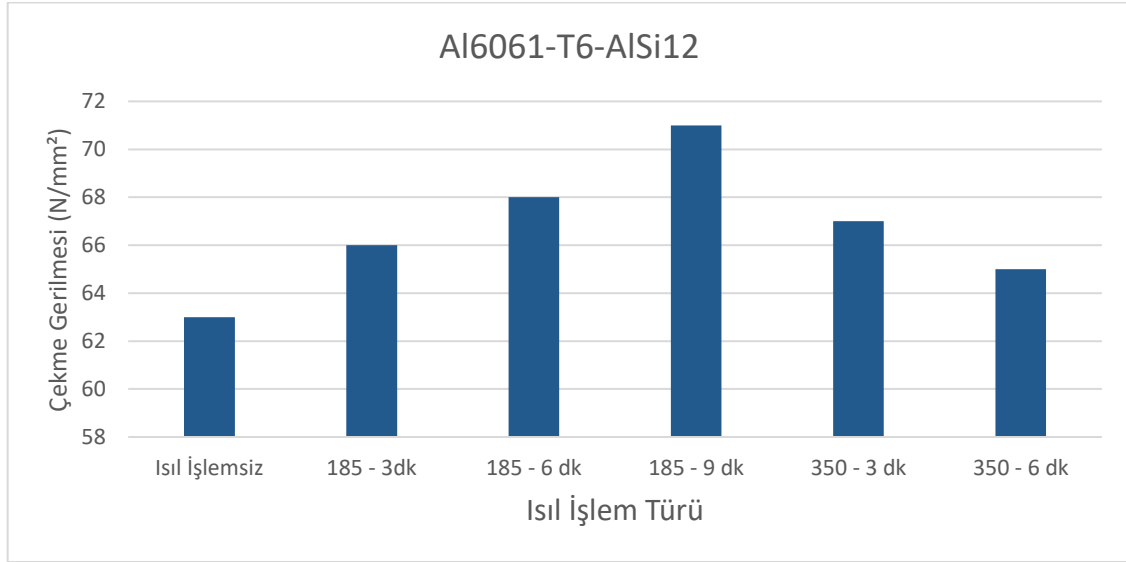
Şekil 6.79: Al6061-T6-AlSi5 Numunelerinin çekme gerilmesi değerleri.

Aşağıda AlSi12 ilave teli ile birleştirilmiş numunelerin farklı indüksiyon parametrelerine ait çekme testi sonuçları verilmiştir. Grafik değerlendirildiğinde uygulanan ısıtma işlemi etkisi ile sonuçlar yükselmekte, ancak 185 °C’den 350 °C’ye gelindiğinde aşağıya doğru eğilim görülmektedir. AlSi12’li numunelerin gerilme değerleri AlSi5’li numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



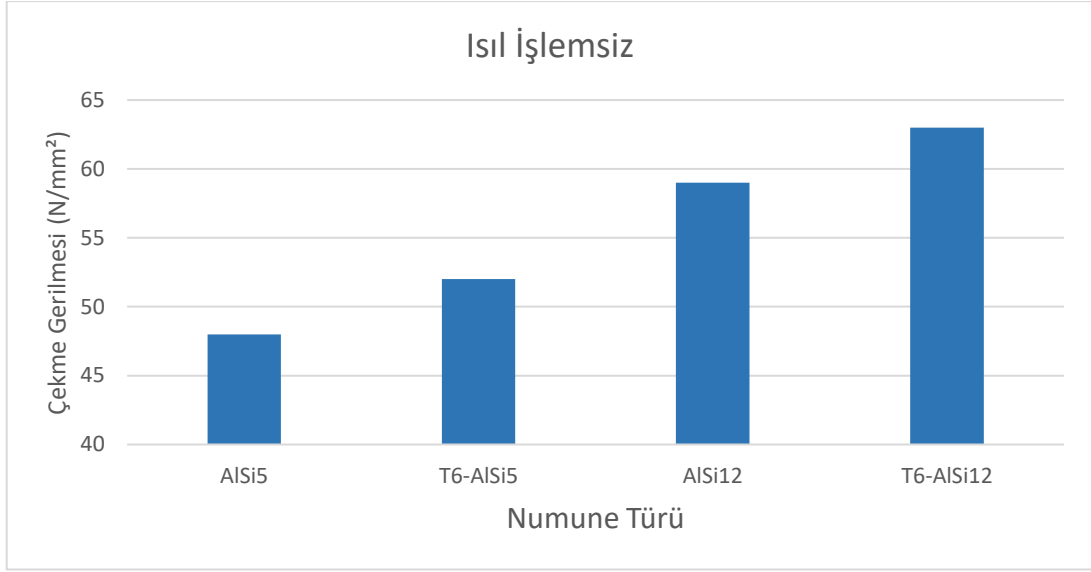
Şekil 6.80: Al6061-AlSi12 Numunelerinin çekme gerilmesi değerleri.

Yaşlandırılmış numunelerin AlSi12 ilave teli ile birleştirilip indüksiyon işlemi uygulanmış numunelerine ait çekme gerilmesi değerleri aşağıda ki grafikte verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde yaşlandırma işleminin etkisi ile değerler artmaktadır. Ayrıca uygulanan indüksiyon işlemi ile gerilme değerleri yükselmiş olup 185 °C 9 dk ısıtıl işlemi uygulanmış numunede en yüksek sonuca ulaşılmıştır.



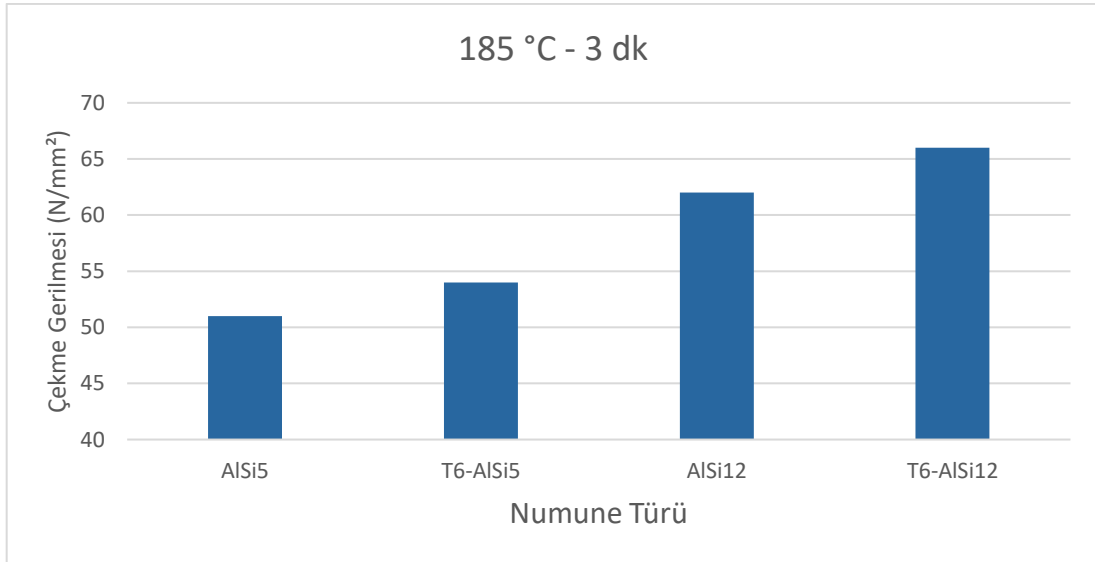
Şekil 6.81: Al6061-T6-AlSi12 Numunelerinin çekme gerilmesi değerleri.

Aşağıda verilen grafikte farklı metaller ve ilave teller kullanılarak birleştirilmiş ve indüksiyon ısıtıl işlemi uygulanmamış numunelerin çekme gerilmeleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde T6 ısıtıl işlem numunelerin gerilme değerleri arttığı görülmektedir. Ayrıca kullanılan ilave metal olarak karşılaştırıldığında AlSi12’li numuneler AlSi5’li numunelere göre daha yüksek sonuçlar vermiştir.



Şekil 6.82: Isıl işlemsiz numunelerin çekme gerilmesi değerleri.

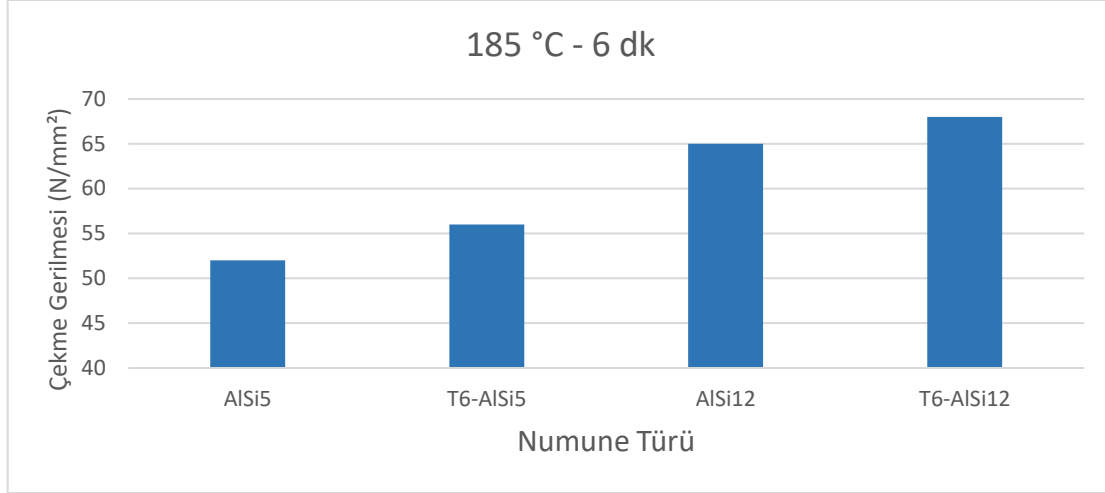
Aşağıdaki grafikte 185 °C 3 dk indüksiyon ısıtılması görmüş numunelerin çekme gerilmesi değerleri verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ısıtılması işlemsiz numunelere göre değerlerin arttığını söylemek mümkündür. Yaşlandırmanın ve AISi12 ilave teli kullanmanın etkisi ile en yüksek değere T6-AISi12 numunesinde ulaşılmıştır.



Şekil 6.83: 185 °C 3 dk İndüksiyon ısıtılması işlemsiz numunelerin çekme gerilmesi değerleri.

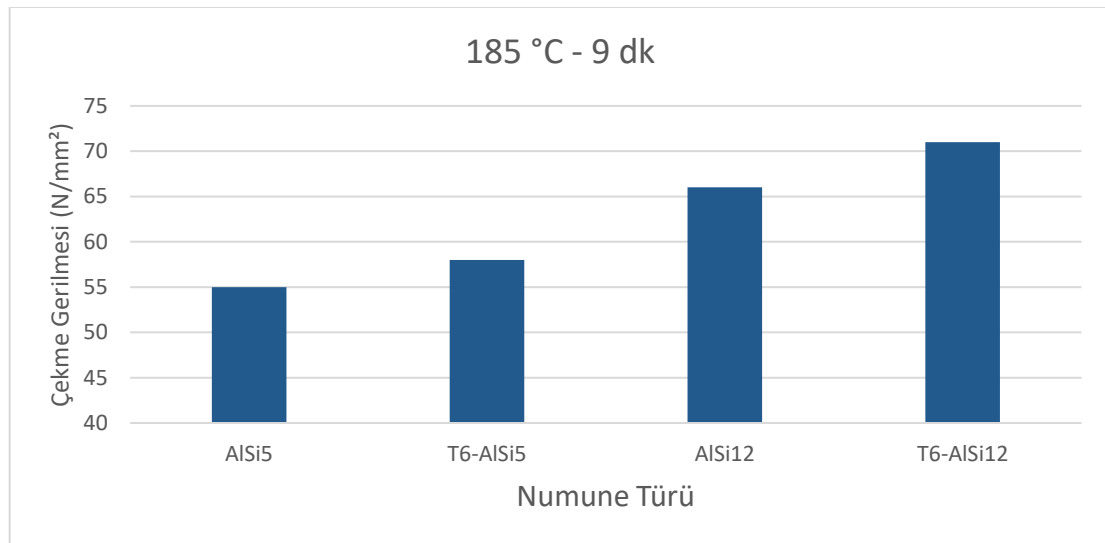
Aşağıda verilen grafikte 185 °C’de 6 dk indüksiyon ısıtılması işlemi görmüş numunelerin çekme gerilmesi değerleri verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde 185 °C’de sürenin artması ile

değerler de artmaktadır. Diğer numunelerde olduğu gibi yaşlandırılmış numunelerin değerleri daha yüksektir. İlave tel olarak bakıldığında AlSi12li numuneler daha yüksek değerlere sahiptir.



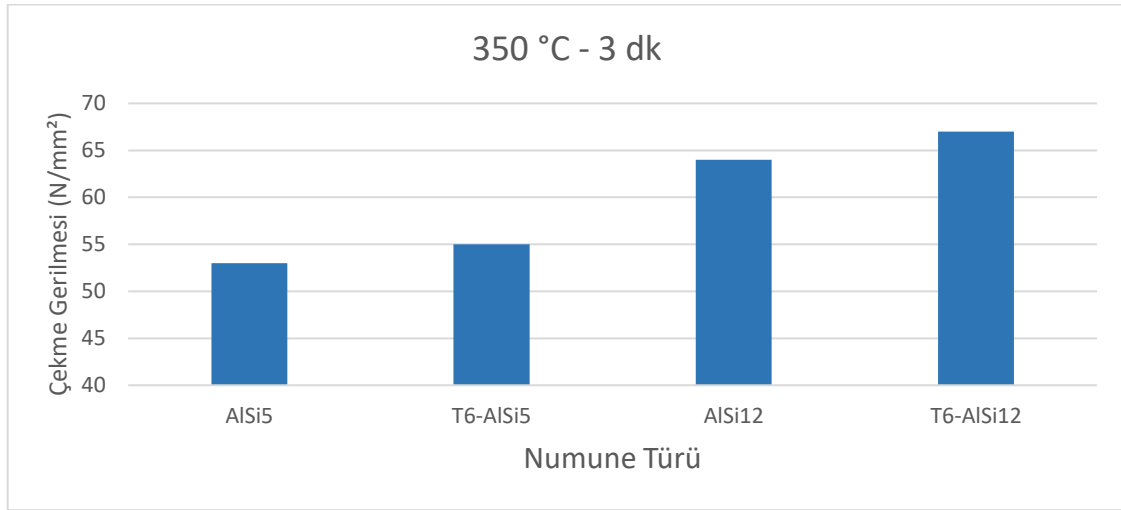
Şekil 6.84: 185 °C 6 dk İndüksiyon ısıtma işlemli numunelerin çekme gerilmesi değerleri.

Aşağıda ki grafikte 185 °C 9 dk indüksiyon işlemi uygulanmış numunelere ait çekme gerilmesi değerleri verilmiştir. Verilen değerler incelendiğinde 185 °C'deki en yüksek çekme gerilmeleri bu numunelerde görülmüştür. Sürenin artması ile sonuçlarda artarken yaşlandırılmış ve AlSi12 ilave teli kullanılmış numunelerin değerlerinin daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



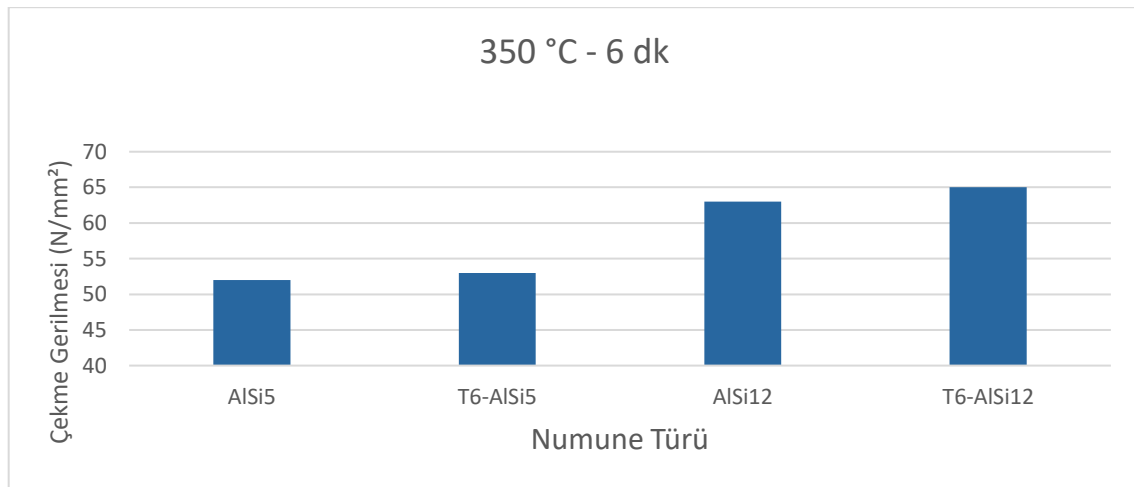
Şekil 6.85: 185 °C 9 dk İndüksiyon ısıtma işlemli numunelerin çekme gerilmesi değerleri.

350 °C 3 dk İndüksiyon ısıt işlemleri uygulanmış numunelerin çekme gerilmesi sonuçları aşağıda ki grafikte gösterilmiştir. Verilen grafiğe bakıldığında 185 °C 9 dk indüksiyon işlemi görmüş numunelere kıyasla gerilme değerlerinin düştüğü görülmektedir. Yaşlandırma ve AlSi12 ilave teli etkisi bu grafikte de görülmektedir.



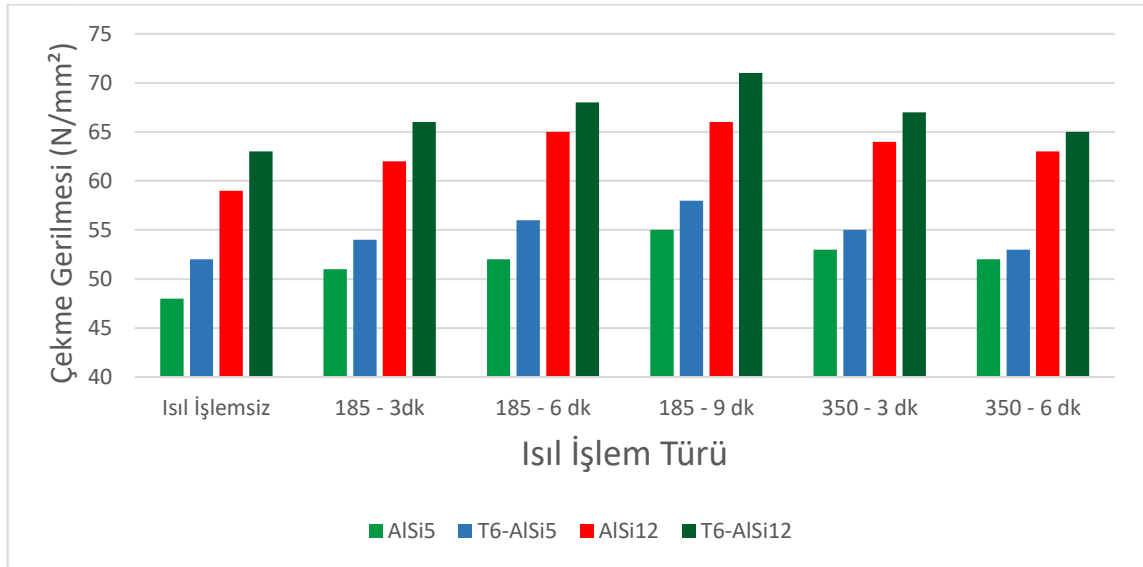
Şekil 6.86: 350 °C 3 dk İndüksiyon ısıt işlemleri uygulanmış numunelerin çekme gerilmesi değerleri.

Aşağıda verilen grafikte 350 °C 6 dk indüksiyon ısıt işlemleri görmüş numunelerin gerilme testi sonuçları verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında 350 °C 3 dk'ya göre sürenin artmasıyla değerlerin düştüğü görülmektedir. Yaşlandırılmış AlSi12 ilave telli numune diğer sonuçlarda olduğu gibi en yüksek değere sahip olan numune olmaktadır.



Şekil 6.87: 350 °C 6 dk İndüksiyon ısıt işlemleri uygulanmış numunelerin çekme gerilmesi değerleri.

Aşağıda ki grafikte farklı kaynak parametrelerine sahip örneklerin tüm indüksiyon ısıtma işlemlerine ait çekme testi sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde indüksiyon ısıtma işleminin etkisiyle numunelerin gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir. 185 °C’de Yapılan ısıtma işlemlerinde sürenin artması ile gerilme değerleri de artış göstermektedir. 350 °C İndüksiyon işlemi uygulanmış numunelere bakıldığında 185 °C 9 dk’ya göre daha düşük sonuçlar elde edilmiştir ve sürenin artması ile değerler düşmektedir. T6 Yaşlandırma işlemi ise numunelerin gerilme değerlerinde artış sağlamıştır. İlave tel olarak karşılaştırıldığında AlSi12 ilave teli kullanılmış numuneler, AlSi5 ilave teli kullanılmış numunelere göre daha iyi gerilme değerleri vermiştir.



Şekil 6.88: Numunelerin çekme gerilmesi değerleri.

6.5 Eğme Testi Sonuçları

Aşağıda ki Tablo 6.2’de numunelere uygulanan eğme testi sonuçları verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında uygulanan indüksiyon ısıtma işlemi ile numunelerin maksimum gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir. 185 °C’de yapılan indüksiyon işleminde bu değer süre ile doğru orantıda artırdıkça artarken 350 °C’de ise süre arttıkça maksimum gerilme düşmektedir. T6 yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerin maksimum gerilmeleri uygulanmayan numunelere göre daha yüksektir. Kaynak işleminde kullanılan ilave teller karşılaştırıldığında AlSi12 ilave teli kullanılan numunelerin AlSi5 ilave teli kullanılan

numunelere göre daha yüksek değerler verdiği gözlemlenmiştir. Tabloda verilen deformasyon oranı aşağıda verilen Denklem 6.1 ile hesaplanmıştır.

$$\varepsilon = 6.Y.H / L^2 \quad [41] \quad (6.1)$$

ε : Deformasyon oranı

Y: Eğilme miktarı (mm)

H: Numune kalınlığı (mm)

L: Mesnetler arası mesafe (mm)

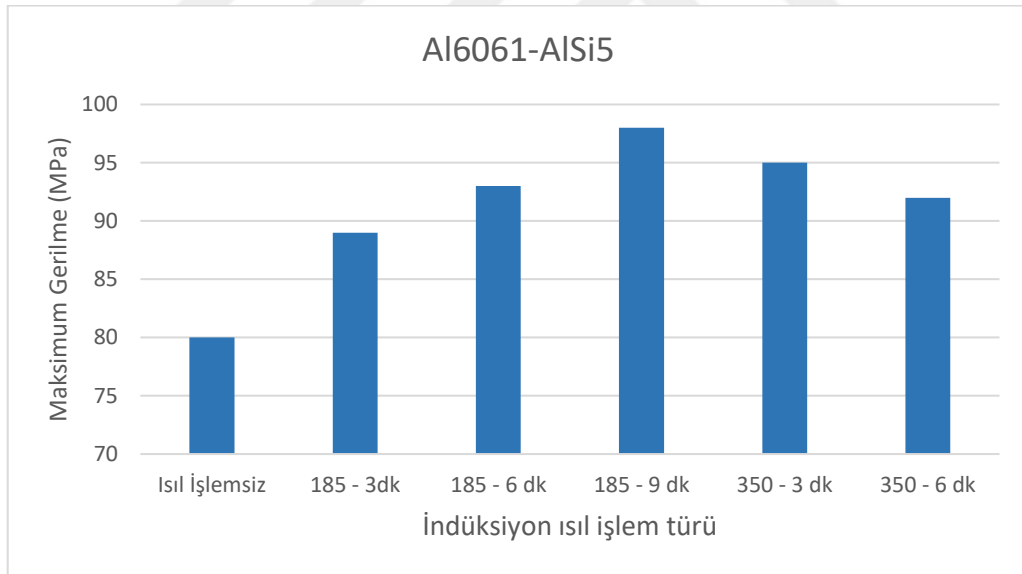
Tablo 6.2: Eğme testi sonuçları.

Numune Adı	Uygulanan İndüksiyon Isıl İşlemi	Maksimum Gerilme (Mpa)	Deformasyon (%)
Al6061-AlSi5	Isıl İşlemsiz	80	4,1
Al6061-AlSi5	185 °C - 3 dk	89	3,6
Al6061-AlSi5	185 °C - 6 dk	93	3,5
Al6061-AlSi5	185 °C - 9 dk	98	3,3
Al6061-AlSi5	350 °C - 3 dk	95	3
Al6061-AlSi5	350 °C - 6 dk	92	2,9
Al6061-T6-AlSi5	Isıl İşlemsiz	90	3,8
Al6061-T6-AlSi5	185 °C - 3 dk	102	3,4
Al6061-T6-AlSi5	185 °C - 6 dk	106	3,2
Al6061-T6-AlSi5	185 °C - 9 dk	111	3
Al6061-T6-AlSi5	350 °C - 3 dk	104	2,8
Al6061-T6-AlSi5	350 °C - 6 dk	101	2,6
Al6061-AlSi12	Isıl İşlemsiz	121	3,1
Al6061-AlSi12	185 °C - 3 dk	133	2,7
Al6061-AlSi12	185 °C - 6 dk	139	2,5
Al6061-AlSi12	185 °C - 9 dk	143	2,4
Al6061-AlSi12	350 °C - 3 dk	136	2,1
Al6061-AlSi12	350 °C - 6 dk	134	2

Al6061-T6- AlSi12	Isıl İşlemsiz	134	2,8
Al6061-T6- AlSi12	185 °C - 3 dk	146	2,5
Al6061-T6- AlSi12	185 °C - 6 dk	150	2,2
Al6061-T6- AlSi12	185 °C - 9 dk	155	2,1
Al6061-T6- AlSi12	350 °C - 3 dk	148	1,8
Al6061-T6- AlSi12	350 °C - 6 dk	144	1,6

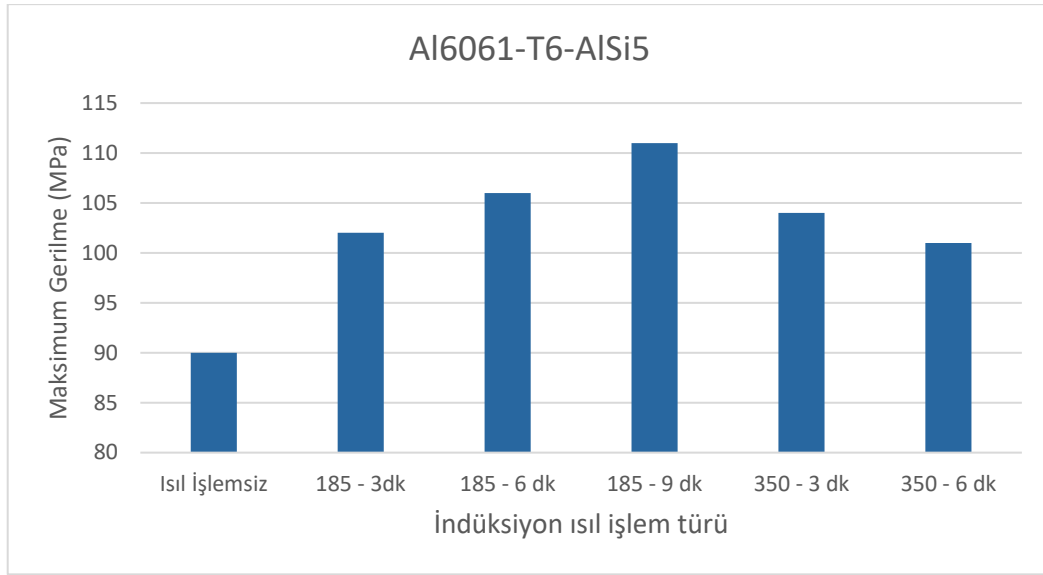
Tablo 6.2’de verilen sonuçlar aşağıdaki bölüm de grafikler üzerinden karşılaştırılmıştır.

Aşağıda ki grafikte AlSi5 ilave teli ile birleştirilmiş numunelerin farklı indüksiyon ısıtma işlemlerine ait eğme testi sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde indüksiyon ısıtma işlemin etkisiyle numunelerin maksimum gerilmesi artmaktadır. 185 °C İndüksiyon işlemi uygulanmış numunelerde değerler süre ile doğru orantılı artarken, 350 °C indüksiyon işlemi uygulanmış numunelerde ise ters orantı mevcuttur. 350 °C’deki numunelerde sürenin artması ile maksimum gerilme değerinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir.



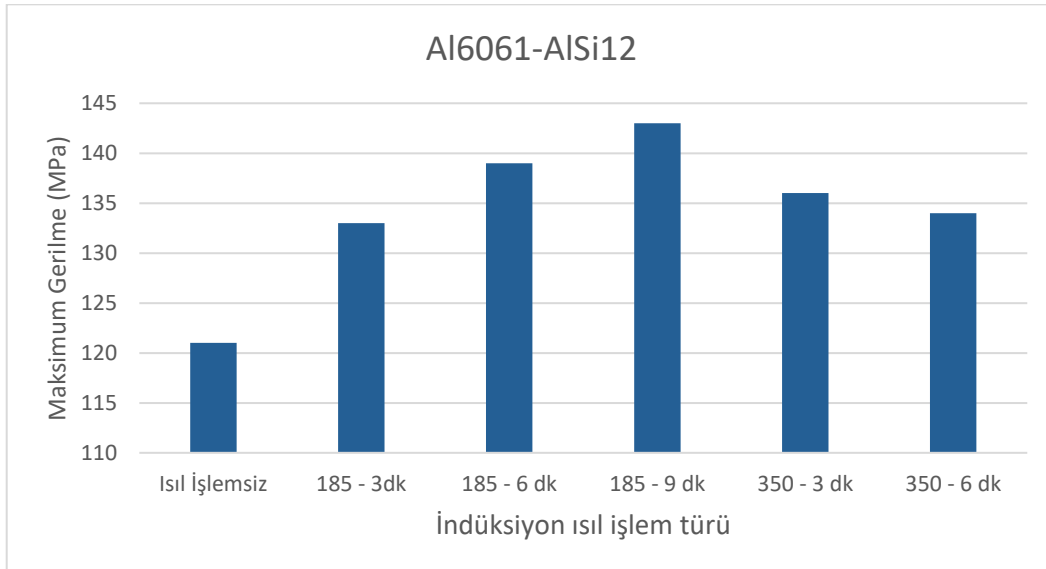
Şekil 6.89: Al6061-AlSi5 Numunelerinin eğme testi değerleri.

Aşağıdaki grafikte T6 yaşlandırma işlemi uygulanmış ve AlSi5 ilave teli ile kaynaklanmış numunelerin eğme testi sonuçları verilmiştir. Sonuçlara bakıldığında T6 yaşlandırma işlemi uygulanmamış numunelere göre daha yüksek değerler görülmektedir. İndüksiyon işleminin etkisi ile maksimum gerilme yükselmektedir ve en yüksek sonuç 185 °C 9 dk ısıtma işlemi uygulanmış numunede elde edilmiştir.



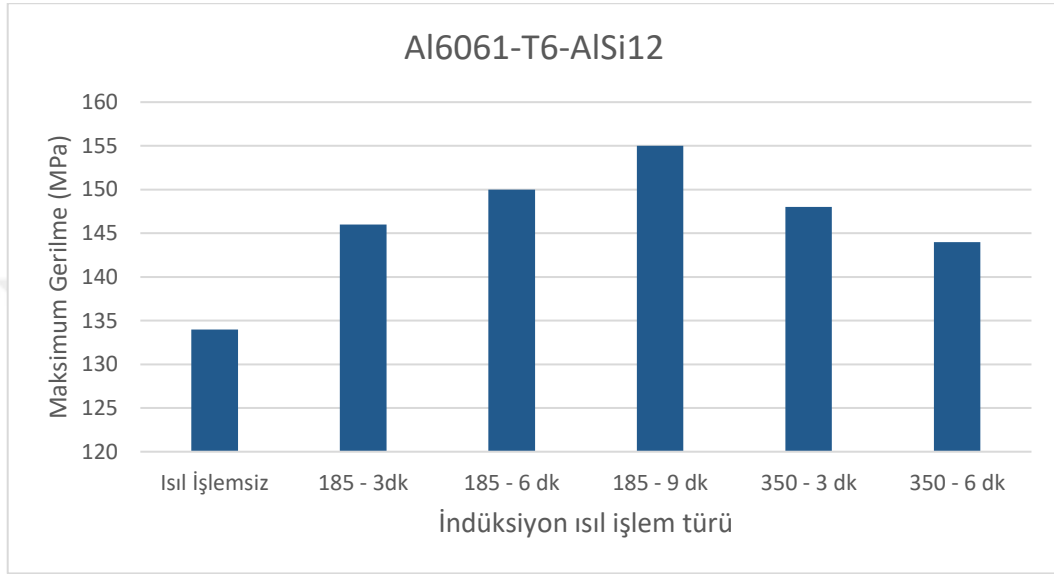
Şekil 6.90: Al6061-T6-AlSi5 Numunelerinin eğme testi değerleri.

Aşağıda verilen şekilde AlSi12 kaynak teli ile birleştirilmiş numunelerin maksimum gerilme değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde AlSi5 ilave metalli numunelere göre değerlerin arttığı görülmektedir. Öte yandan uygulanan indüksiyon ısıtım işlemin etkisiyle maksimum gerilme yükselmektedir. 185 °C’de sürenin artmasıyla değerler artarken, 350 °C’de sürenin artmasıyla maksimum gerilme değerleri düşmektedir.



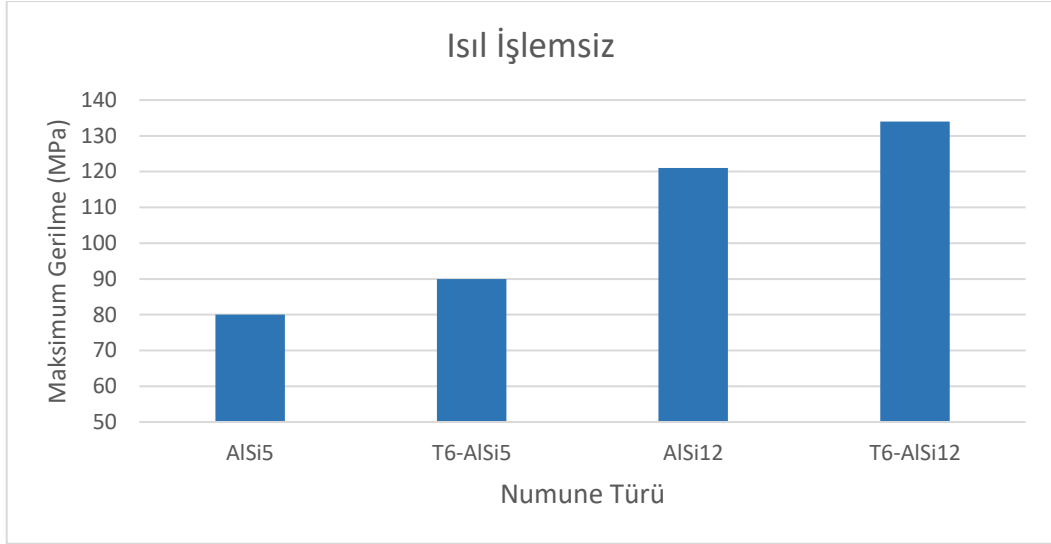
Şekil 6.91: Al6061-AlSi12 Numunelerinin eğme testi değerleri.

Aşağıda ki şekilde T6 yaşlandırma işlemi uygulanıp ardından AlSi12 ilave teli ile kaynaklanmış numunelerin eğme testi sonuçları verilmiştir. Grafik incelendiğinde en yüksek sonuçların bu numunelerde olduğu görülmektedir. Yaşlandırma ve AlSi12 ilave telin etkisi ile numunelerin maksimum gerilme değerleri yükselmiştir. Uygulanan indüksiyon işleminin de etkisiyle değerler artmış olup en yüksek değere 185 °C 9 dk'da ulaşılmıştır.



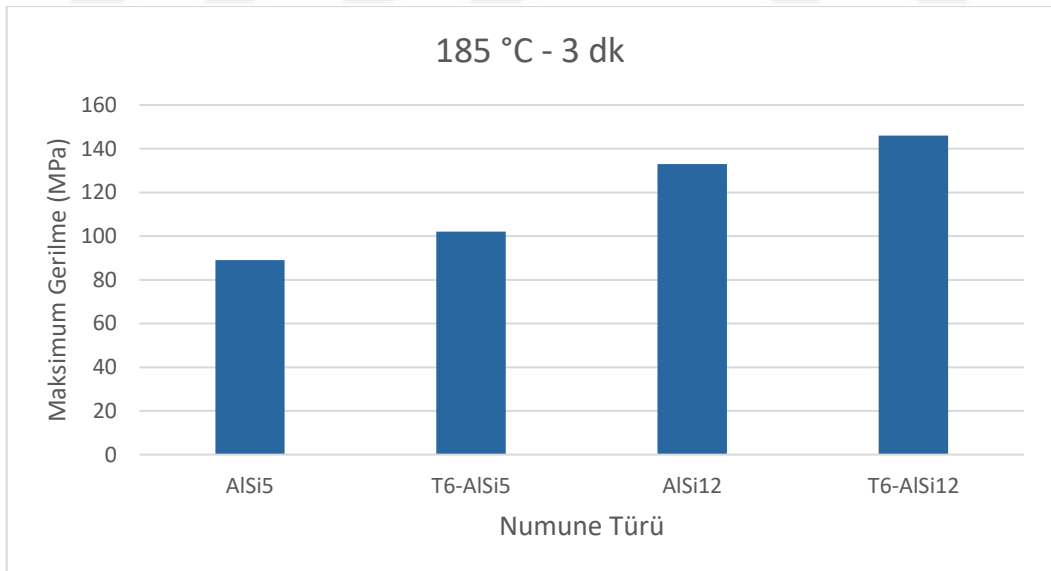
Şekil 6.92: Al6061-T6-AlSi12 Numunelerinin eğme testi değerleri.

Aşağıda verilen şekilde kaynak işleminin ardından indüksiyon ısıtım işlemi uygulanmamış numunelerin eğme testi sonuçları verilmiştir. Grafik incelendiğinde yaşlandırma ve kaynak telinin etkisi ile en iyi sonucun T6-AlSi'li numunede olduğu görülmektedir. AlSi5 Numunesi ise en düşük maksimum gerilme değerine sahip numunedir.



Şekil 6.93: Isıl işlemsiz numunelerin eğme testi değerleri.

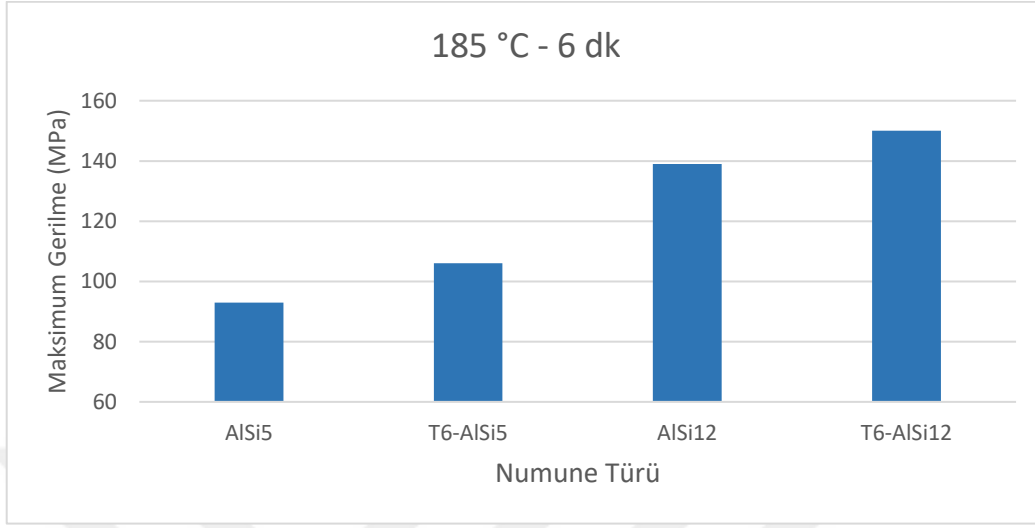
Aşağıda ki grafikte 185 °C 3 dk indüksiyon ısıtma işlemi görmüş numunelerin eğme testi sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ısıtma işlemi görmüş numunelere göre maksimum gerilmenin tüm numunelerde arttığı ve T6 yaşlandırılmış numunelerin daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 6.94: 185 °C 3 dk İndüksiyon ısıtma işlemli numunelerin eğme testi değerleri.

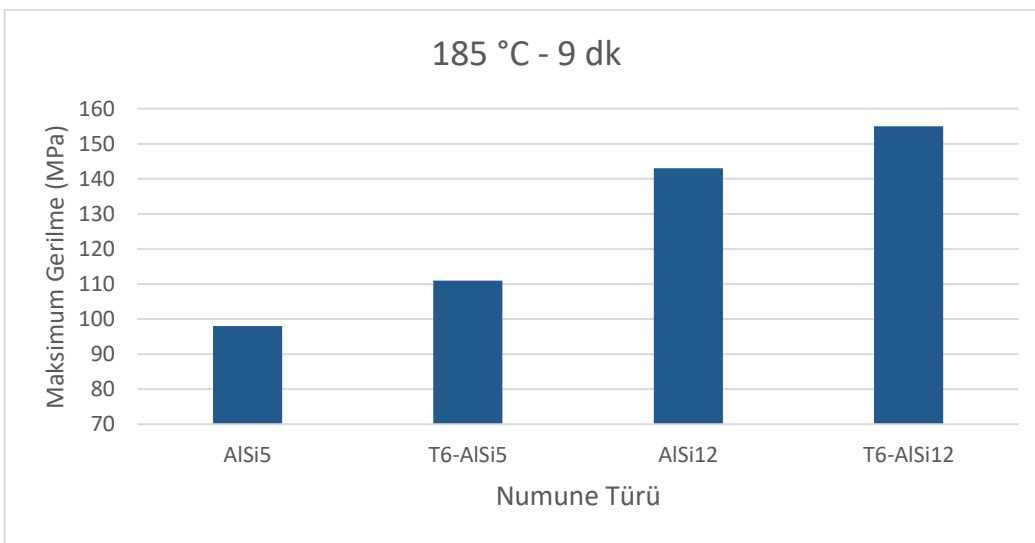
Aşağıda verilen şekilde 185 °C 6 dk indüksiyon ısıtma işlemi görmüş numunelerin eğme testi sonuçları gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde sürenin artması ile 3 dk'da yapılan ısıtma

işleme göre maksimum gerilme değerleri de artmaktadır. AlSi12 İlave telli numuneler AlSi5 ilave telli numunelere göre daha yüksek değerlere sahiptir.



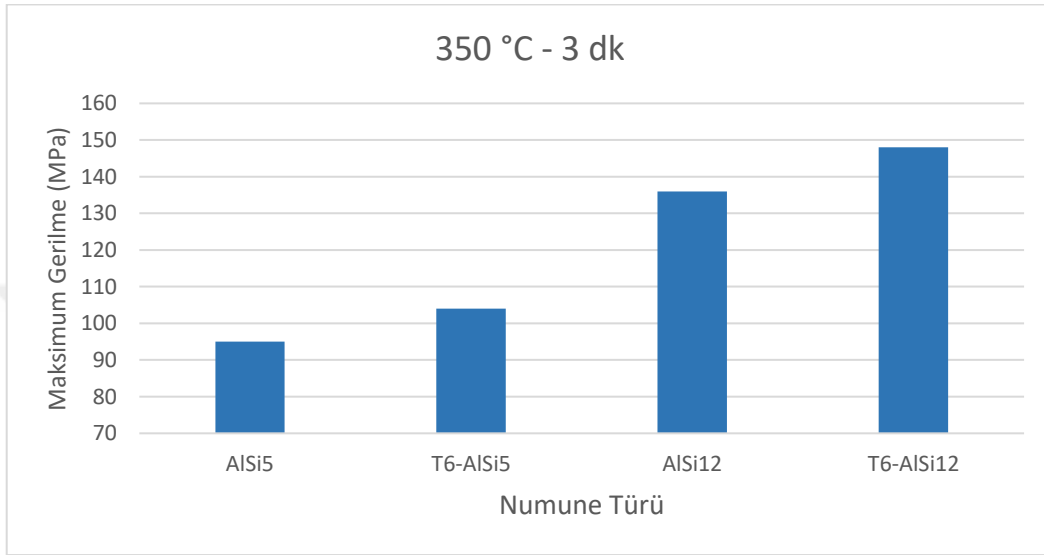
Şekil 6.95: 185 °C 6 dk İndüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin eğme testi değerleri.

Aşağıda ki grafikte 185 °C 9 dk indüksiyon işlemi uygulanmış numunelerin maksimum gerilme değerleri karşılaştırılmıştır. Diğer indüksiyon işlemleri ile kıyaslandığında en yüksek değerlere 185 °C 9 dk ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin sahip olduğu gözlemlenmektedir. Yaşlandırılmış ve AlSi12 ilave teli kullanılmış numunelerin maksimum gerilmeleri daha yüksektir.



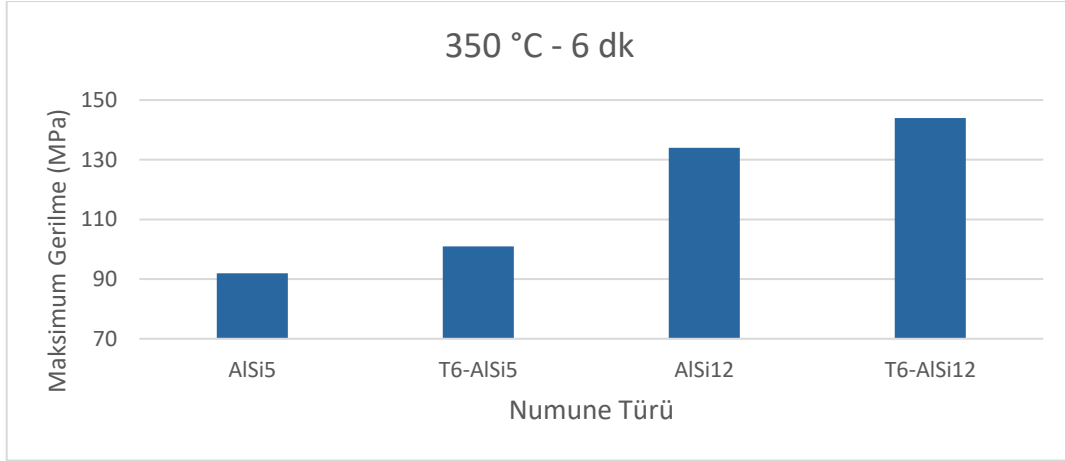
Şekil 6.96: 185 °C 9 dk İndüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin eğme testi değerleri.

Aşağıda ki şekilde kaynak işleminden sonra 350 °C 3 dk indüksiyon ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin eğme testi sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde 185 °C 9 dk ısıtma işlem görmüş numunelere göre değerlerin düştüğü görülmektedir. Diğer grafiklerde olduğu bu grafikte de yaşlandırma ve kullanılan ilave telin etkisi ile T6-AlSi12 numunesi en yüksek maksimum gerilme değerine sahip olan numune olmaktadır.



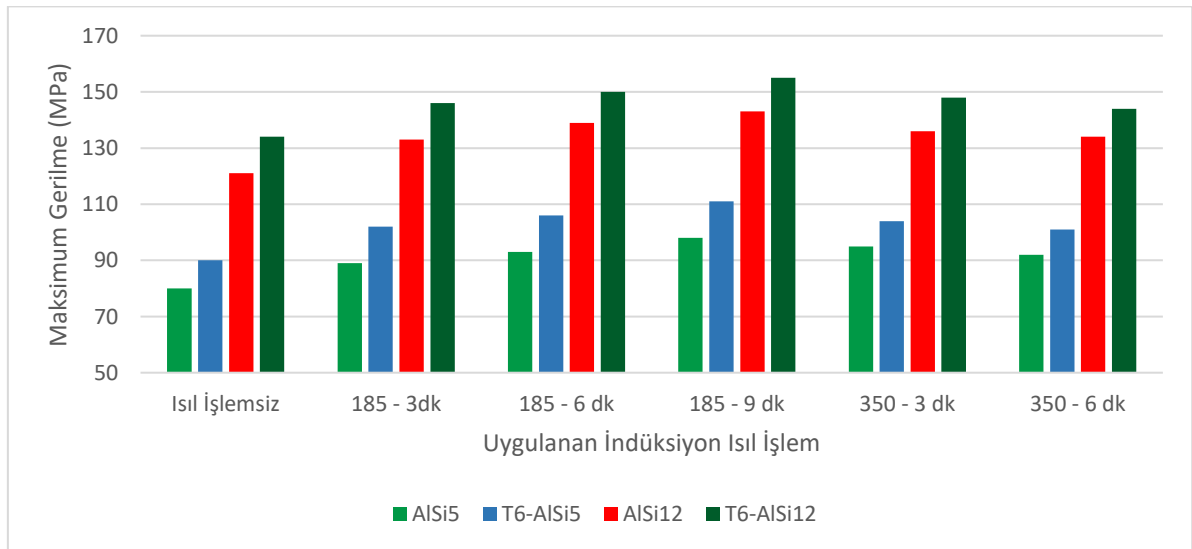
Şekil 6.97: 350 °C 3 dk İndüksiyon ısıtma işlemli numunelerin eğme testi değerleri.

350 °C 6 dk İndüksiyon ısıtma işlemi uygulanmış numunelerin eğme testi sonuçları aşağıda ki şekilde verilmiştir. Grafik incelendiğinde 350 °C 3 dk ısıtma işlem uygulanmış numuneye göre maksimum gerilme değerlerinin tüm numunelerde düştüğü görülmektedir. T6 Yaşlandırma ve AlSi12 ilave tel kullanımının etkisi ile T6-AlSi12 numunesi en yüksek değere sahipken, AlSi5 numunesi en düşük değere sahip olmaktadır.



Şekil 6.98: 350 °C 6 dk İndüksiyon ısıtıl işlemli numunelerin eğme testi değerleri.

Aşağıda ki şekilde farklı metaller ve ilave telleri kullanılarak kaynaklanmış numunelerin tüm indüksiyon ısıtıl işlem parametrelerine ait eğme testi sonuçları verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerin maksimum gerilme değerleri uygulanmayan numunelere göre daha yukarıda kalmaktadır. Numunelere uygulanan indüksiyon ısıtıl işlemler ile maksimum gerilme değerleri artmaktadır. 185 °C’de uygulanan ısıtıl işlemlerde sürenin artmasıyla maksimum gerilme değerleri de artış göstermektedir. Diğer ısıtıl işlem sıcaklığı olan 350 °C’de ise sürenin artması maksimum gerilmenin düşmesine neden olmaktadır. Kaynak işleminde kullanılan ilave teller karşılaştırıldığında AISi12’li numuneler AISi5’li numunelere göre daha yüksek sonuçlar vermektedir.



Şekil 6.99: Numunelerin eğme testi değerleri.

7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada Al6061 ve Al6061-T6 alaşımları TIG kaynak yöntemi ile AlSi5 ve AlSi12 ilave kaynak telleri kullanılarak birleştirilmiştir. Birleştirmenin ardından numunelere, kısa sürede yüksek sıcaklıklara çıkılabilen indüksiyon ısıtma işlemi uygulanmıştır. Uygulanan bu ısıtma işlemi farklı sıcaklık ve sürelerde yapılmıştır. İndüksiyon işleminin kaynaklı numuneler üzerinde ki etkisini incelemek üzere elde edilen örneklerle SEM/EDX ve mikroyapı inceleme işlemleri yapılmıştır. Ardından mekanik özelliklerini belirlemek üzere mikrosertlik, eğme ve çekme testleri uygulanmıştır ve sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

Yapılan mikrosertlik testleri sonuçlarına bakıldığında Al6061-T6 malzeme kullanılan numunelerin sertlik değerleri, Al6061 malzeme kullanılarak kaynaklanan numunelerden daha yüksek çıkmaktadır. Özellikle esas metal bölgesinde oldukça belirginleşen bu farkı indüksiyon ısıtma işlemi yapılmamış numunelerde de görmek mümkündür. Kullanılan ilave kaynak teli fark etmeksizin yaşlandırma ısıtma işleminin numunelerin mikrosertlik değerlerini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Uygulanan indüksiyon işleminin etkisi mikrosertlik sonuçları açısından karşılaştırıldığında, ısıtma işlemin uygulandığı numunelerin sertliklerinin arttığı açıkça görülmüştür. Isıtma işlemleri yapılmamış numuneler ile karşılaştırıldığında indüksiyon uygulanmış numunelerin sertlik değerlerinin bazı bölgelerde yaklaşık 15 HV arttığı gözlemlenmiştir. 185 °C’de yapılan indüksiyon işlemlerinde sürenin artması ile sertlik değerleri de doğru orantılı artmıştır. En yüksek sertlik sonuçları 185 °C’de 9 dk süre ile yapılan indüksiyon işlemleri numunelerin ITAB bölgelerinde görülmüştür. Bu değerler Al6061-AlSi5 numunesinde 76 HV, Al6061-T6-AlSi5 numunesinde 82 HV, Al6061-AlSi12 numunesinde 86 HV, Al6061-T6-AlSi12 numunesinde 91 HV olarak ölçülmüştür. Sıcaklığın artırılıp 350 °C’de indüksiyon ısıtma işlemi yapılan numunelerin sertlik değerlerinin ise 185 °C 9 dk’ya göre daha düşük olduğu görülmüştür. 350 °C İndüksiyon işleminde süre arttığında mikrosertlik değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Kaynak işleminde kullanılan ilave teller açısından karşılaştırıldığında, içerisinde bulundurduğu Silisyum miktarının fazla olmasından dolayı AlSi12 ilave teli kullanılarak birleştirilen numunelerin sertlik değerleri, AlSi5 ilave teli kullanılarak birleştirilen numunelerin sertlik değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür. İndüksiyon ısıtma işlemi

ile her iki ilave telinin de bulunduğu numunelerin sertlik değęlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

Mikrosertlik testinin sonuçları bölgesel olarak incelendiğinde, numunelerin ITAB'ları en yüksek sertlik değęlerine sahiptir. Kaynak bölgesinin sertlik değęleri ile esas metal bölgesinin sertlik değęlerinin birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Numunelerin bölgelere göre değişen tane yapıları sertlik değęlerinde ki farklılığın başlıca nedenlerindendir.

Numunelerin mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, esas metal bölgesinde taneli bir yapı ile karşılaşılırken, geçiş bölgesi ve kaynak bölgesine doğru gidildikçe dentritik bir yapıya geçiş olduğu görölmektedir. ITAB'da ki tanelerin kaynak bölgesine göre daha ince yapıda olduğu gözlemlenmiştir ve sertlik testlerinin sonuçlarında da bu bölgelerin diğer bölgelere göre daha sert olması bunu desteklemektedir. SEM/EDX sonuçları ise mikroyapı görüntülerini destekler nitelikte olup sıcaklık arttığında kaynak bölgesinde tanelerin büyüdüğu gözlemlenmiştir. Ayrıca numunelere uygulanan ısıl işlemler ile sertlik ve mukavemet değęlerinin artması, bizlere GP bölgelerinin olduğunu, sıcaklığın artmasıyla sertlik ve mukavemet değęlerinin düşmesi ise aşırı yaşlanma etkisi olduğunu göstermektedir.

Yapılan çekme ve eğme testlerinin sonuçları incelendiğinde AlSi12 ilave telli numuneler, AlSi5 ilave telli numunelere göre mukavemet ve dayanım açısından daha yüksek sonuçlar vermiştir. Uygulanan indüksiyon ısıl işlemi ile maksimum gerilme artmıştır. 185 °C'de yapılan indüksiyon işleminde sürenin artmasıyla çekme gerilmesi ve maksimum gerilme artarken, sıcaklığın 350 °C'ye çıkmasıyla değęler düşme eğilimine geçmiştir. 350 °C'de İndüksiyon işlemi uygulanmış numunelerin değęlerinin düşmesinin nedeni aşırı yaşlanma olarak açıklanabilmektedir ve literatürde de örnekleri bulunmaktadır.

İndüksiyon ısıl işlemi diğer yaşlandırma yöntemleri ile kıyaslandığında süre ve maliyet açısından avantaj sağlamaktadır. Bu işlem sayesinde kısa sürede yüksek sıcaklıklara çıkmak mümkündür. İndüksiyon ısıl işleminin kaynaklı numunelere uygulanabilmesi, numunelerin sertlik ve mukavemetlerini arttırması, oldukça ekonomik ve pratik olması nedeniyle diğer ısıl işlem yöntemlerine alternatif olarak gösterilebilir. Ayrıca T6 yaşlandırma işlemi uygulanmış numuneler ile yaşlandırma işlemi uygulanmamış numunelerin indüksiyon işleminden sonraki sertlik ve gerilme değęlerinin birbirine yakın olması, yaşlandırma işlemi

uygulanmadan sadece indüksiyon işlemi ile mukavemeti ve dayanımı yüksek malzemelerin elde edilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir.



8. KAYNAKLAR

- [1] Gökçe, Azim, Fehim Fındık, and Ali Osman Kurt. "Alüminyum ve alaşımlarının toz metalurjisi işlemleri." *Mühendis ve Makina* 58.686 (2017): 21-47..
- [2] Demirbaş, Kübra, and Sinem ÇEVİK. "TİG Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmiş Alüminyum 1050 Alaşımının Mekanik Ve Mikroyapı Özellikleri." *Academic Platform-Journal of Engineering and Science* 8.3 (2020): 471-477..
- [3] Pul, M. "7075, 6061 ve 2024 alüminyum alaşımlarının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının karşılaştırılması." *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi* 9.2 (2017): 65-75..
- [4] Rıza, K. A. R. A., et al. "TIG ve Elektrik Ark Kaynağı ile Birleştirilen Alüminyum Plakaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi." *El-Cezeri* 4.2 (2017): 274-281..
- [5] Pul, Muharrem, and Hacı Bekir Özerkan. "The effect of cutting depth and cutting tool geometry on surface roughness and tool wear behavior in the machining of Al 6061 alloy." *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 37.4 (2017): 1-10..
- [6] Durgutlu, AHMET. "Alüminyumun TIG kaynağında akım türünün kaynak metali mikroyapısı ve darbe dayanımına etkisi." *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 24.1 (2009): 155-160..
- [7] Türköz Alici, Melis. Soğuk metal transferi kaynağı ile birleştirilmiş 6061 ve 5754 alüminyum alaşımlarının kaynak sonrası ısıtılma işlemi. MS thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019..
- [8] Akyüz, Birol, and Safa Şenaysoy. "Alüminyum alaşımlarında yaşlandırma işleminin mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerindeki etkisi." *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 1.1 (2014): 1-9..
- [9] Çavdar, Uğur, and Pınar SARI ÇAVDAR. "DEMİR ESASLI TOZ METAL MALZEMELERİN ULTRA-YÜKSEK FREKANSLI İNDÜKSİYON SİSTEMİ İLE SİNERGİLEME SICAKLIĞI OPTİMİZASYONU." *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 8.1 (2019): 378-383..
- [10] Güven, Bertuğ. Kaynak ağzı açısı ve geometrisinin zırh uygulamalarında kullanılan AW 5083 ve AW 6061 alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri üzerine etkisi. MS thesis. Başkent Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, 2022..

- [11] Bebekoğlu, Sunay. Havacılık sanayinde kullanılan, 2024 ve 7075 alüminyum alaşımlarının, TIG kaynak yöntemi ile birleştirilmesi, makro ve mikro yapı ile mukavemet özelliklerinin incelenmesi. MS thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019..
- [12] Şafak, Sencer Ali. "Uçak endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının elektrik direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi." (2011)..
- [13] Tımaç, Gökhan. Uçak endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının TIG kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğinin incelenmesi. Diss. Marmara Üniversitesi (Turkey), 2006..
- [14] Ayvaz, Mehmet. İki farklı alüminyum alaşımının, tıg kaynak yöntemi kullanılarak, iki farklı elektrot teli ile kaynatılması ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. MS thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü..
- [15] Kırsavaş, Çağatay. Farklı yapay yaşlandırma sürelerinin 6XXX serisi alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine etkisi. MS thesis. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, 2021..
- [16] Çüngür, Ragib. Kaynaklı ve kaynaklı 5754 alüminyum alaşımının korozyon ortamlardaki çekme davranışı. MS thesis. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2021..
- [17] İpekoğlu, Güven. "Kaynak sonrası ısıtılma işleminin sürtünme karıştırma kaynaklı AA6061 ve AA7075 alüminyum alaşımı levhalarda içyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi." (2011)..
- [18] Demir, Metehan. İndüksiyonla Sıcak İşlemin Grafen ve/veya Si₃N₄/B₄C Takviyeli Al6061 Esaslı Kompozitlerin Mekanik, Tribolojik Özelliklerine ve Mikroyapısına Olan Etkisi. 2022.
- [19] <https://aydinlarmakinametal.com.tr> (Erişim Tarihi: 30.03.2024).
- [20] Karabulut, Taha Yasin. AA5005 alüminyum alaşımının lazer ve TIG kaynak yöntemi kullanılarak kaynaklanabilirliğinin araştırılması. MS thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019..
- [21] Atkaya, Murat. Alüminyum 6061 T6 Özelliğindeki Malzemenin Elektrot Işın Kaynağı Yöntemi ile Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi. 2021.

- [22] Saritepeci, Bekir. AZ31B-H24 magnezyum alaşımının tıg kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi. MS thesis. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2019..
- [23] Haryadi, Gunawan Dwi, et al. "Investigation of post-weld heat treatment (T6) and welding orientation on the strength of TIG-welded AL6061." *Open Engineering* 10.1 (2020): 753-761..
- [24] Pratikno, Herman, Tin Rachmatullah, and Hasan Ikhwan. "Influence of pre-weld heat treatment and aging post-weld heat treatment on tensile test and microstructure of aluminium 6061 weld joint." *International Journal of Offshore and Coastal Engineering (IJ*.
- [25] Pérez, Javier Serrano, et al. "Recovery of mechanical properties of a 6061-T6 aluminum weld by heat treatment after welding." *Metallurgical and Materials Transactions A* 47 (2016): 3412-3422..
- [26] Peng, Dong, et al. "Effects of aging treatment and heat input on the microstructures and mechanical properties of TIG-welded 6061-T6 alloy joints." *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials* 20 (2013): 259-265..
- [27] Wang, Jianing, et al. "Effect of preheat & post-weld heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6061-T6 aluminum alloy welded sheets." *Materials Science and Engineering: A* 841 (2022): 143081..
- [28] Jie, Y. I., et al. "Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of welded joints of 6061-T6 aluminum alloy." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 29.10 (2019): 2035-2046..
- [29] Muzamil, Muhammad, et al. "The response of heat-treatable filler on non-heat-treatable aluminum alloy substrate against age hardening cycle for intelligent development of surface welded joints using TIG welding process." *Journal of the Brazilian Society o*.
- [30] Toktaş, Alaaddin, and Gülcan Toktaş. "Effect of welding parameters and aging process on the mechanical properties of friction stir-welded 6063-T4 Al alloy." *Journal of materials engineering and performance* 21 (2012): 936-945..
- [31] Temmar, M., M. Hadji, and T. Sahraoui. "Effect of post-weld aging treatment on mechanical properties of Tungsten Inert Gas welded low thickness 7075 aluminium alloy joints." *Materials & Design* 32.6 (2011): 3532-3536..

- [32] Sokkalingam, R., et al. "Effect of Post Weld Aging Treatment on Tensile Properties Of GTAW Welded Armour Grade AA2519-T87 Aluminium Alloy Joints." *Int J Res Sci Eng* 3.11 (2014): 316-320..
- [33] Malarvizhi, S., K. and Raghukandan, and N. Viswanathan. "Effect of post weld aging treatment on tensile properties of electron beam welded AA2219 aluminum alloy." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 37 (2008): 294-301..
- [34] Haryadi, Gunawan Dwi, and Seon Jin Kim. "Influences of post weld heat treatment on fatigue crack growth behavior of TIG welding of 6013 T4 aluminum alloy joint (Part 1. Fatigue crack growth across the weld metal)." *Journal of mechanical science and techno.*
- [35] Malarvizhi, S., and V. Balasubramanian. "Effects of welding processes and post-weld aging treatment on fatigue behavior of AA2219 aluminium alloy joints." *Journal of Materials Engineering and Performance* 20 (2011): 359-367..
- [36] Balasubramanian, V., V. Ravisankar, and G. Madhusudhan Reddy. "Effect of postweld aging treatment on fatigue behavior of pulsed current welded AA7075 aluminum alloy joints." *Journal of Materials Engineering and Performance* 17 (2008): 224-233..
- [37] Enver, A. T. İ. K., Cevdet Meriç, and Atilla Şahan. "TIG KAYNAK YÖNTEMİYLE BİRLEŞTİRİLMİŞ 2024 ALUMİNYUM ALAŞIMININ KAYNAK BÖLGESİNİN ÇÖKELME SERTLEŞMESİ BAKIMINDAN İNCELENMESİ." *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 3..
- [38] Yürük, Ali, K. A. Y. A. Yakup, and Nizamettin KAHRAMAN. "Alüminyum alaşımlarının MIG kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi." *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 4.1 (2021): 42-52..
- [39] Başyigit, Aziz Barış. "Alüminyum Esaslı Taşıt Jantlarının TIG Kaynak Yöntemi ile Tamiri Sonrası Kaynak Bölgesinin Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi." *International Journal of Engineering Research and Development* 12.2 (2020): 388-395..
- [40] Kafalı, Haşim. Sürtünme karıştırma kaynağıyla birleştirilmiş al 6013-t6 alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. Diss. Anadolu University (Turkey), 2011..

[41] <http://w3.bilecik.edu.tr/makine> (Erişim Tarihi : 20.05.2024).



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Yunus Emre MERCAN

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Lisans	Amasya Üniversitesi/ Makine Mühendisliği	2021
Lise	Balıkesir Anadolu Lisesi	2016