

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

**AL₂O₃ NANO PARTİKÜL TAKVİYELİ AL MATRİSLİ KOMPOZİT
MALZEMENİN FARKLI KAYNAK AKIMLARI VE TÜRLERİNDE
OLUŞAN MİKROYAPI VE SERTLİK ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SÜLEYMAN AYTEKİN

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2021

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



**AL₂O₃ NANO PARTİKÜL TAKVİYELİ AL MATRİSLİ KOMPOZİT
MALZEMENİN FARKLI KAYNAK AKIMLARI VE TÜRLERİNDE
OLUŞAN MİKROYAPI VE SERTLİK ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SÜLEYMAN AYTEKİN

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2021

Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (BAP) tarafından 20FEBE040 nolu proje ile desteklenmiştir.

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

Süleyman AYTEKİN

ÖZET

**AL₂O₃ NANO PARTİKÜL TAKVİYELİ AL MATRİSLİ KOMPOZİT
MALZEMENİN FARKLI KAYNAK AKIMLARI VE TÜRLERİNDE
OLUŞAN MİKROYAPI VE SERTLİK ÖZELLİKLERİNİN ANALİZİ**
YÜKSEK LİSANS TEZİ
SÜLEYMAN AYTEKİN
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ
(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. ARZUM İŞİTAN)

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2021

Bu çalışmada, karıştırmalı döküm yöntemi ile üretilen farklı takviye oranlarına sahip (%0-0,5-1) 15 nm tane boyutundaki Al₂O₃ nano partikül takviyeli AA 6013 matrisli kompozit malzemelerin, farklı kaynak yöntemlerinde ve parametrelerinde kaynaklanabilirliği araştırılmıştır. Farklı takviye oranlarındaki kompozit malzemeler, ER5183 ve ER4043 kaynak telleri kullanılarak 110 A ve 120 A akım şiddetinde CMT ve PMC kaynak yöntemlerinde birleştirilmiştir. Numunelerin, makroyapı ve mikroyapıları incelenerek farklı kaynak yöntemi ve parametrelerin kaynak yapılarına ve içyapılarına olan etkisi karşılaştırılmıştır. Mekanik özelliklerin tespiti için çekme ve sertlik testleri gerçekleştirilerek mukavemet, akma sınırı, uzama ve sertlik değerleri ölçülmüştür. Kaynak işleminde CMT ve PMC yöntemlerinin kullanılması düşük ısı girdisi sağlamış ve kaynak bölgesinde geleneksel ark kaynak yöntemlerine göre daha dar bir ITAB oluşarak iyi bir içyapı elde edilmesini sağlamıştır. Düşük ısı girdisi, kaynak bölgesi ve esas malzeme arasında homojen bir sertlik dağılımı sağlamıştır. Takviye oranının artması mukavemeti artırmıştır. En iyi mekanik özellikler CMT yöntemi, 120 A akım, ER5183 kaynak teli ile kaynak işlemi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzeme elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Alüminyum nano kompozit, Al₂O₃, CMT, PMC

ABSTRACT

**ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE AND HARDNESS
PROPERTIES OF ALUMINUM MATRIX COMPOSITE
MATERIAL REINFORCED WITH NANO AL₂O₃ PARTICLES USING
DIFFERENT CURRENTS AND FORMS OF
WELDING**

MSC THESIS

SÜLEYMAN AYTEKİN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

AUTOMOTIVE ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. ARZUM İŞİTAN)

DENİZLİ, AUGUST 2021

In this thesis, the weldability of AA 6013 matrix composite materials reinforced with 15 nm particle sized Al₂O₃ nanoparticles, with different reinforcement weights (0-0.5-1%) produced by the stirred casting method, were studied in different welding methods and parameters. Composite materials with different reinforcement ratios were joined by CMT and PMC welding methods with 110 A and 120 A current intensity using ER5183 and ER4043 welding wires. By examining the macrostructure and microstructure of the samples, the effects of different welding methods and parameters on the weld structures and internal structures were compared. In order to determine the mechanical properties, tensile and hardness tests were performed and strength, yield limit, elongation and hardness values were measured. The use of CMT and PMC methods in the welding process provided low heat input and a narrower HAZ in the weld area compared to conventional arc welding methods, resulting in a good internal structure. Low heat input provided a homogeneous hardness distribution between the weld zone and the base material. Raising the reinforcement ratio increased the strength. The best mechanical properties were obtained in 0.5% reinforced composite material welded with CMT method, 120 A current and ER5183 welding wire.

KEYWORDS: Aluminum nano composite, Al₂O₃, CMT, PMC

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ	ix
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı	4
1.2 Tezin Özgün Değeri	6
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	8
3. KOMPOZİT MALZEMELER	31
3.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	31
3.1.1 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler	32
3.1.2 Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler	32
3.1.3 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler	33
3.2 Nano Kompozitler	34
3.3 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	35
3.3.1 Katı Faz Üretim Yöntemleri	35
3.3.1.1 Difüzyon Bağı ile Üretim.....	35
3.3.1.2 Toz Metalürjisi (T/M) ile Üretim.....	35
3.3.2 Sıvı Faz Üretim Yöntemleri.....	36
3.3.2.1 Sıvı Metal İnfiltrasyonu ile Üretim	36
3.3.2.2 Püskürtme Yöntemi ile Üretim	36
3.3.2.3 Kompo Döküm ile Üretim	36
3.3.2.4 In-Situ Yöntemi ile Üretim	37
3.3.2.5 Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi ile Üretim.....	37
3.3.2.6 Karıştırmalı Döküm Yöntemi ile Üretim	37
3.3.3 Buhar Faz Üretim Yöntemleri	39
3.3.3.1 Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi ile Üretim	39
4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN KAYNAKLI BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ.....	40
4.1 Sıvı Hal Kaynak Yöntemleri	42
4.1.1 Ark Kaynağı.....	42
4.1.2 Elektron Işın Kaynağı	43
4.1.3 Lazer Işın Kaynağı.....	44
4.1.4 CMT Kaynağı	44
4.1.5 PMC Kaynağı	47
4.2 Katı Hal Kaynak Yöntemleri.....	49
4.2.1 Difüzyon Kaynağı.....	49
4.2.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı	49
5. MALZEME VE YÖNTEM	51
5.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	51
5.1.1 Matris Malzemesi	51

5.1.2	Takviye Malzemesi.....	52
5.2	Alüminyum Matrisli Nano Alüminyum Oksit Takviyeli Kompozit Malzemenin Üretimi.....	53
5.2.1	Kalıbın Hazırlanması	53
5.2.2	Matris Malzemesinin Ergitilmesi.....	54
5.2.3	Takviye Malzemesi İlavesi	55
5.2.4	Döküm İşlemi	56
5.3	Alüminyum Matrisli Nano Alüminyum Oksit Takviyeli Kompozit Malzemenin Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi.....	56
5.3.1	Kaynak Yöntemi ile Birleştirme için Numune Hazırlanması	56
5.3.2	Kaynak Yöntemi ile Birleştirme	57
5.4	Makroyapı ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi	60
5.5	Mekanik Özelliklerin İncelenmesi	60
6.	DENEYSEL SONUÇLAR.....	64
6.1	Makroyapı ve Mikroyapı Sonuçları.....	64
6.2	Çekme Testi Sonuçları	81
6.3	Sertlik Ölçüm Sonuçları	90
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER	98
8.	KAYNAKLAR.....	104
9.	ÖZGEÇMİŞ.....	114

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3-1: Takviye Malzemesinin Şekline Göre Kompozit Malzemeler (Zweben 1998).....	31
Şekil 4-2: CMT kaynak yönteminin çevrimi (Tapiola 2017).....	45
Şekil 4-3: CMT kaynak yöntemine ait akım-zaman, gerilim-zaman ve tel sürme hızı-zaman eğrileri (Kahraman ve diğ. 2018)	46
Şekil 5-4: Kalıp hazırlama işlemi.....	54
Şekil 5-5: Döküm ocağı ve malzemenin ergitilmesi	55
Şekil 5-6: Takviye malzemesinin hazırlanması	55
Şekil 5-7: Döküm işlemi ile üretilen kompozit malzemeler	56
Şekil 5-8: Freze tezgahında talaş kaldırma işlemi	57
Şekil 5-9: Testere ile kesim işlemi	57
Şekil 5-10: Kaynak yöntemi ile numunelerin birleştirilmesi	60
Şekil 5-11: Mikroyapı ve makroyapı incelemesinin yapılması.....	60
Şekil 5-12: Çekme testi için hazırlanan kaynaklı birleştirmelerin numune boyutları	61
Şekil 5-13: Çekme testi için hazırlanan numuneler	61
Şekil 5-14: Sertlik testi için ölçüm noktaları.....	62
Şekil 5-15: (a) Mikrosertlik cihazı, (b) çekme testi cihazı.....	63
Şekil 5-16: Çekme testi sırasındaki ekran görüntüsü.....	63
Şekil 6-17: Takviyesiz alaşım SEM görüntüleri, (a) 100 µm, (b) 10 µm	64
Şekil 6-18: %0,5 takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri, (a) 100 µm, (b) 10 µm.....	64
Şekil 6-19: %1 takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri, (a) 100 µm, (b) 10 µm	65
Şekil 6-20: Takviyesiz alaşım FESEM nokta analizi.....	66
Şekil 6-21: %0,5 takviyeli kompozit malzemenin FESEM nokta analizi.....	67
Şekil 6-22: %1 takviyeli kompozit malzemenin FESEM nokta analizi.....	68
Şekil 6-23: CMT kaynağı ile 110 A'de ER4043 teli ile birleştirmesi yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımının makroyapı görüntüleri	69
Şekil 6-24: CMT kaynağı ile 110 A'de ER4043 teli ile birleştirmesi yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımının mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi	69
Şekil 6-25: CMT kaynağı ile 120 A'de ER4043 teli ile birleştirmesi yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımının makroyapı görüntüleri	70
Şekil 6-26: CMT kaynağı ile 120 A'de ER4043 teli ile birleştirmesi yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımının mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi	70
Şekil 6-27: CMT kaynağı ile 120 A'de ER4043 teli ile birleştirmesi yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımının SEM görüntüleri, (a) 100x geçiş bölgesi, (b) 1000x geçiş bölgesi, (c) 100x kaynak bölgesi, (d) 1000x kaynak bölgesi.....	71
Şekil 6-28: CMT kaynağı ile 110 A'de ER4043 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri	72

Şekil 6-29: CMT kaynağı ile 110 A'de ER4043 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi	72
Şekil 6-30: CMT kaynağı ile 110 A'de ER4043 teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri, (a) 100x geçiş bölgesi, (b) 1000x geçiş bölgesi, (c) 100x kaynak bölgesi, (d) 1000x kaynak bölgesi.....	72
Şekil 6-31: CMT kaynağı ile 120 A'de ER4043 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri	73
Şekil 6-32: CMT kaynağı ile 120 A'de ER4043 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi	73
Şekil 6-33: CMT kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri	74
Şekil 6-34: CMT kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi	74
Şekil 6-35: CMT kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri	74
Şekil 6-36: CMT kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi	75
Şekil 6-37: CMT kaynağı ile 120 A'de ER5183 teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri, (a) 100x geçiş bölgesi, (b) 1000x geçiş bölgesi, (c) 100x kaynak bölgesi, (d) 1000x kaynak bölgesi.....	75
Şekil 6-38: CMT kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri	76
Şekil 6-39: CMT kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi.....	76
Şekil 6-40: CMT kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri	76
Şekil 6-41: CMT kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi.....	77
Şekil 6-42: CMT kaynağı ile 120 A'de ER5183 teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri, (a) 100x geçiş bölgesi, (b) 1000x geçiş bölgesi, (c) 100x kaynak bölgesi, (d) 1000x kaynak bölgesi.....	77
Şekil 6-43: PMC kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri	78
Şekil 6-44: PMC kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi	78

Şekil 6-45: PMC kaynağı ile 110 A'de ER5183 teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri, (a) 100x geçiş bölgesi, (b) 1000x geçiş bölgesi, (c) 100x kaynak bölgesi, (d) 1000x kaynak bölgesi.....	78
Şekil 6-46: PMC kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri	79
Şekil 6-47: PMC kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi	79
Şekil 6-48: PMC kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri	80
Şekil 6-49: PMC kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi.....	80
Şekil 6-50: PMC kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri	80
Şekil 6-51: PMC kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi.....	81
Şekil 6-52: Tüm numunelerin çekme mukavemeti değerlerinin karşılaştırılması	83
Şekil 6-53: Isı girdisi - çekme mukavemeti arasındaki ilişki.....	83
Şekil 6-54: Tüm numunelerin akma sınırı değerlerinin karşılaştırılması.....	84
Şekil 6-55: Tüm numunelerin uzama (%) karşılaştırması.....	84
Şekil 6-56: 110 A ve 120 A akım değerlerindeki CMT kaynağının çekme mukavemetleri.....	85
Şekil 6-57: 110 A ve 120 A akım değerlerindeki CMT kaynağının akma sınırları	85
Şekil 6-58: 110 A ve 120 A değerlerindeki PMC kaynağının çekme mukavemetleri.....	86
Şekil 6-59: 110 A ve 120 A akım değerlerindeki PMC kaynağının akma sınırları	87
Şekil 6-60: 110 A akım değerinde CMT ve PMC kaynak yöntemleri ile elde edilen numunelerin çekme mukavemetleri	88
Şekil 6-61: 120 A akım değerinde CMT ve PMC kaynak yöntemleri ile elde edilen numunelerin çekme mukavemetleri	88
Şekil 6-62: %0,5 takviyeli kompozit malzemenin CMT yönteminde farklı kaynak telleri ile birleştirilmesi sonucu elde edilen çekme mukavemetleri	89
Şekil 6-63: Tüm numunelere ait sertlik değişimleri.....	90
Şekil 6-64: CMT kaynak yöntemi ile birleştirmesi yapılan numunelerin sertlik değişimi	92
Şekil 6-65: PMC kaynak yöntemi ile birleştirmesi yapılan numunelerin sertlik değişimi	93
Şekil 6-66: CMT yöntemi, 110 A akım değerindeki birleştirmesi yapılan numunelerin sertlik değişimi.....	94
Şekil 6-67: CMT yöntemi, 120 A akım değerindeki birleştirmesi yapılan numunelerin sertlik değişimi.....	94
Şekil 6-68: PMC yöntemi, 110 A akım değerindeki birleştirmesi yapılan numunelerin sertlik değişimi.....	95

Şekil 6-69: PMC yöntemi, 120 A akım değerindeki birleştirmesi yapılan numunelerin sertlik değişimi.....	95
Şekil 6-70: CMT yöntemi, 110 A değerinde farklı kaynak tellerinin sertlik değişimine etkisi.....	96
Şekil 6-71: CMT yöntemi, 120 A değerinde farklı kaynak tellerinin sertlik değişimine etkisi.....	97

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1: Çeşitli Kaynak Türlerinin Avantaj ve Dezavantajları (Guo 2012)..	41
Tablo 5.2: AA 6013 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu.....	52
Tablo 5.3: AA 6013 Alüminyum Alaşımının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	52
Tablo 5.4: Al ₂ O ₃ Takviye Malzemesinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	53
Tablo 5.5: ER5183 Telinin Kimyasal Kompozisyonu	58
Tablo 5.6: ER4043 Telinin Kimyasal Kompozisyonu	58
Tablo 5.7: Kaynak parametreleri.....	59
Tablo 6.8: Döküm işlemi sonrasında elde edilen kaynaksız numunelerin çekme, akma ve uzama değerleri	82
Tablo 6.9: Farklı kaynak yöntemi ve parametrelerindeki numunelerin çekme, akma ve uzama değerleri	82
Tablo 7.10: Çekme mukavemeti ve akma sınırı değerlerine göre belirlenen optimum parametreler	102

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

MMK	:	Metal Matrisli Kompozit Malzeme
MIG	:	Metal Inert Gas
TIG	:	Tungsten Inert Gas
ITAB	:	Isı Tesiri Altındaki Bölge
TMEB	:	Termomekanik Olarak Etkilenen Bölge
HAZ	:	Isıdan Etkilenen Bölge
CMT	:	Cold Metal Transfer
PMC	:	Pulse Multi Control
SKK	:	Sürtünme Karıştırma Kaynağı
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	:	X-Ray Diffraction
IACS	:	Uluslararası Tavlı Bakır Standardı
GPa	:	Gigapascal
MPa	:	Megapascal
HV	:	Hardness Vickers
R_m	:	Çekme Mukavemeti
R_e	:	Akma Sınırı
İ.H.	:	İlerleme Hızı
N	:	Newton
A	:	Amper
V	:	Gerilim
W	:	Watt
kW	:	Kilowatt
l	:	Litre
dak	:	Dakika
s	:	Saniye
mm	:	Milimetre
nm	:	Nanometre
j	:	Joule
dev	:	Devir
g	:	Gram
mg	:	Miligram
µm	:	Mikron
K	:	Kelvin
°C	:	Santigrat
%	:	Yüzde
Ø	:	Çap
α	:	Alfa
~	:	Yaklaşık İşareti
η	:	Verim

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca desteğini her zaman hissettiğim, bilgi ve tecrübesini her fırsatta aktaran ve yol gösteren tez danışmanım Doç. Dr. Arzum İŞİTAN'a, uygulama aşamasındaki uzun ve yorucu çalışmalar sırasında yanımda olan ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Volkan ONAR'a saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Numunelerin kaynak işlemlerinin gerçekleştirildiği Fronius İstanbul Elektronik, Ticaret ve Servis Ltd. Şti. ve çalışanlarına katkıları için teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmayı 20FEBE040 proje numarasıyla destekleyen Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Son olarak, tüm eğitim hayatım boyunca göstermiş oldukları fedakârlık, özveri ve gayretleri ile bugüne gelmemi sağlayan anneme, babama ve abime şükranlarımı sunarım. Tez çalışması boyunca hep yanımda olan, cesaretlendiren ve motivasyonumu sürekli canlı tutarak çalışmanın tamamlanmasında büyük emeği olan eşime ve tez çalışmamın başında kavuştuğumuz, çalışma boyunca enerjimin kaynağı olan canım kızıma sevgilerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemeler, diğer kompozit malzemelerde olduğu gibi bileşenlerinin tek başına sağlayamadığı özelliklerin elde edilebilmesi amacı ile bir araya getirilmiş, fiziksel ve kimyasal olarak farklı en az iki malzemedendir. Matris fazı ve takviye fazından oluşan kompozit malzemelerin matris fazının metal esaslı malzemedendir olması durumunda metal matrisli kompozit malzeme olarak adlandırılmaktadır.

Teknolojinin gelişimi ile birlikte geleneksel malzemelerin sağlayamadığı özelliklerin sağlanabilmesi ve ticari taleplerin karşılanabilmesi için kompozit malzemelere olan ilgi artmıştır. Metal matrisli kompozit malzemeler, takviyesiz metal alaşımlarına ve diğer kompozit malzemelere göre bazı avantajlar sağlamaktadır. Takviyesiz metal alaşımlarına göre daha yüksek mukavemet/ağırlık oranı sağlaması ile daha hafif olması, üstün boyutsal kararlılığa sahip olması (örneğin Al alaşımına kıyasla SiC takviyeli Al matrisli kompozit malzeme), daha yüksek sürünme direnci ve daha üstün yorulma özellikleri gibi avantajları ile öne çıkmaktadır. Aynı zamanda polimer matrisli kompozit malzemelere göre de daha yüksek mukavemet ve sertlik, daha yüksek kullanım sıcaklıkları, daha yüksek elektrik iletkenliği ve ısı iletkenlik ile daha gelişmiş birleştirme özellikleri sunmaktadır (Chawla ve Chawla 2006).

Metal matrisli kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak alüminyum alaşımları yoğun olarak kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımları, düşük yoğunluğa sahip olması (demir ve çeliğe göre yaklaşık 3 kat daha hafif), yüksek korozyon dayanımı, sönümlenme özelliği, yüksek elektrik ve ısı iletkenlik ve kolay işlenebilirlik özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir (Başer 2012). Seramik malzemeler ise düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı ve yüksek sürünme direnci gibi mekanik özelliklere sahiptir. Al matrisli kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak seramik malzemeler yoğunlukla kullanılmakta ve Al₂O₃ ile SiC en çok tercih edilen malzemeler arasında yer almaktadır.

Kompozit malzemelerdeki gelişmeler sonucu nano boyuttaki takviye malzemeleri de uygulamada kendine yer bulmuş ve bu malzemeler nano kompozitler olarak adlandırılmıştır. Takviye malzemesinin nano boyutta olması, yüzey/hacim oranını artırmakta, tane boyutunu azaltmakta ve kafes gerilimini azaltarak diğer kompozit malzemelere göre daha üstün mekanik özellikler sağlamaktadır (El-Mahallawi ve diğ. 2012).

MMK malzemelerin kullanım alanları çok çeşitlidir. Yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip olmaları ve geleneksel malzemelere göre geliştirilebilen mekanik ve termal özellikleri bu malzemelerin çeşitli alanlarda kullanılmasını cazip kılmaktadır. Havacılık, ulaştırma (otomotiv ve demiryolu), elektronik ve ısı iletkenliğinin önemli olduğu uygulamalar, iletken mıknatıslar, güç aktarma organları, eğlence ürünleri ve spor gereçleri ile aşınmaya dayanıklı malzemelerde kullanılması gibi endüstri ve günlük kullanımda karşımıza çıkmaktadır (Evans ve diğ. 2003).

Otomotiv endüstrisinde MMK malzemeler farklı parça ve işlevlerde kullanılmaktadır. İlk ve başarılı uygulamalardan biri Toyota'nın dizel motorlarında kullanılan takviyeli alüminyum pistonlarıdır. Alüminyumun basınçlı dökümü sırasında segman yuvasına alümina-silika takviyesi eklenerek aşınma direncinin artırılması sağlanmıştır (Donomoto ve diğ. 1983). SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemeler de başta drag yarışı arabaları olmak üzere piston uygulamalarında kullanılmıştır. Burada da geleneksel alüminyum alaşımına göre kompozit malzemenin düşük termal genleşme katsayısına sahip olması piston ve silindir duvarı arasındaki boşlukların azaltılmasını sağlamıştır. Otomotiv sektöründeki metal matrisli kompozit malzeme uygulamalarındaki ilk örneklerden bir diğeri ise Honda Prelude modelinde uygulanan hibrit partikül takviyeli Al matrisli kompozit silindir gömleğidir. Al-Si matrisli alaşıma, aşınma direncinin artırılması için %12 takviye oranlı Al_2O_3 ve kayganlığı artırması için %9 oranında karbon takviyesi eklenmiştir. Motor bloğu ile bütünleşik olarak dökümü yapılan kompozit malzeme gelişmiş soğutma verimliliğine sahip ve aynı motor bloğuna sahip olarak %50 daha hafif şekilde imal edilmiştir. İlk olarak Honda Prelude 2.3 L motorunda uygulanan konsept daha sonra Honda S200, Toyota Celica ve Porsche Boxster motorlarında da uygulanmıştır (Hunter ve Miracle 2001). Geleneksel malzemelerin geliştirilerek kompozit malzemelerin kullanıldığı bir diğeri ise Al matrisli kompozit malzemenin imal edilen biyel koludur. Biyel

kolu, 150 °C'ye ulaşan sıcaklıklarda yüksek yorulma direnci gerektirmektedir. Daha hafif bir biyel kolu, ikincil sarsılma kuvvetinde %12-20 arası azalma, hafif bir piston ve pim ile yakıt tüketiminde %0,5-1 arası azalma, yüksek devirlerde %15-20 arası artış, azaltılmış bir yatak genişliği ve artırılmış yatak ve krank mili dayanımını sağlayacaktır. Corvette marka araçlarda kullanılan AA 6061 matrisli %20 Al₂O₃ takviyeli kompozit aksların özgül çekme katsayısı çelik malzemelere göre %36 artmıştır (Chawla ve diğ. 2002). Partiküllü MMK ve özellikle Al esaslı MMK'ların fren kampanaları ve fren rotorlarında dökme demirden elde edilen malzemeler yerine kullanımı sonucu yaklaşık %50-60 ağırlık tasarrufu sağlanmış, yüksek aşınma direnci ve termal iletkenlik ile birlikte tercih sebebi olmuştur (Hunt ve Miracle 2001).

Metal matrisli kompozit malzemelerin kaynaklı birleştirme yöntemlerinde sıvı hal ve katı hal birleştirme yöntemleri uygulanabilmektedir. Kaynak yönteminin seçiminde ise malzemenin fiziksel ve metalürjik özelliklerinin yanı sıra kullanım amacı, parçanın şekli, ekonomik faktörler gibi unsurlar önem arz etmektedir. Katı hal kaynak teknikleri aynı veya farklı iki malzemenin uygun basınç ve sıcaklık altında birleştirilmesi prensibine dayanırken sıvı hal kaynak tekniklerinde ısı etkisiyle kaynak bölgesinin ergitilmesi ve dolgu malzemesi kullanılarak birleşme bölgesinin dayanımının artırılması esastır. Kaynak işleminde kaynak bölgesinin ergimesi, kaynak bölgesindeki matris-takviye malzemesi dağılımını değiştirmekte, homojen dağılımın kaybolmasına, segregasyona, kontrolsüz katılaşmaya, poroziteye ve istenmeyen reaksiyonlara neden olmakta, bu mikro ve makro hatalar kaynak kabiliyetini düşürmektedir (Kalaiselvan 2021). Dolayısıyla sıvı hal kaynak yöntemlerinde parametrelerin doğru seçimi çok önemlidir. Katı hal kaynak yöntemleri bu eksiklerin tamamlanması için geliştirilmiştir. Ancak, kaynak işlemlerinin esnek olmaması, ekipmanların pahalı olması ve kaynak işleminde kullanılan sarf malzemelerin çabuk aşınması gibi sebeplerden dolayı sıvı hal kaynak yöntemlerine olan ilgi devam etmiştir.

Alüminyum alaşımlarında en fazla tercih edilen birleştirme yöntemi MIG kaynak tekniğidir ve sanayide geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Bunda karmaşık yapıları parçalara uygulanabilme ve farklı pozisyonlarda kullanılabilme serbestliği, daha hızlı çalışma, ısıl iletkenliğin ve ergime gücünün daha iyi olması ve robotik kullanım imkanı gibi etkenler rol oynamaktadır (Kurşun 2006). MMK'ların MIG kaynak tekniği ile gerçekleştirilen birleştirme işlemlerinde ise istenmeyen bazı durumlar ortaya

çıkılmaktadır. Kaynak bölgesindeki ergimiş alüminyumun takviye malzemesi ile reaksiyona girmesi, ısı tesiri altındaki bölgede takviye malzemesi dağılımının homojen yapı göstermemesi gibi mikroyapıda farklılıklar oluşmaktadır. Bu durum birleşme bölgesinin sertlik dağılımının farklılaşmasına ve içyapının gözenekli olmasına sebep olmakta ve malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir (Uluköy ve diğ. 2015). Bu sebeple alüminyum matrisli kompozit malzemelerin MIG kaynağı ile birleştirilmesinde kaliteli bir kaynaklı birleştirme işlemi yapılabilmesi için optimum kaynak parametreleri seçilmelidir. İnce levhaların kaynak işlemlerinde istenen kaynak kalitesi sağlanamamakta ve kaynak işlemindeki ısı girdisinin azaltılması gerekmektedir. Isı girdisinin azaltılabilmesi için MIG kaynak yöntemine entegre edilmiş CMT (Cold Metal Transfer) ve PMC (Pulse Multi Control) adı verilen soğuk ark kaynağı yöntemleri geliştirilmiştir (Kahraman 2018).

1.1 Tezin Amacı

Teknolojinin gelişimi, sanayinin talep ve ihtiyaçlarını şekillendirerek geleneksel uygulama ve malzemelerin yerine alternatif malzemelere olan yönelimi artırmıştır. Bunun bir sonucu olarak kompozit malzemeler üzerine yapılan çalışmalar ağırlık kazanmış ve geleneksel malzemelere göre daha üstün malzemeler endüstrinin kullanımına sunulmuştur. Al alaşımları, metal matrisli kompozit malzemelerde kullanılan önemli bir matris malzemesidir. Aynı zamanda seramik malzemeler takviye elemanı olarak tercih edilmekte ve Al_2O_3 (alümina) yaygın olarak kullanılmaktadır. Nano teknolojinin gelişmesi ile birlikte, nano takviye elemanlarının kompozit malzeme içerisinde takviye fazı olarak kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Farklı malzeme özelliklerinin birleşimini sağlayan kompozit malzemeler, geliştirilmeye açık yapıda olmasından dolayı çok çeşitli alanlarda uygulama alanı bulmuştur. Havacılık ve uzay, savunma sanayi, otomotiv, inşaat gibi önemli sektörlerde kullanımı artarak global ekonomik gelişime katkı sağlamaktadır.

Otomotiv sektöründeki Ar-Ge faaliyetlerinin önemli bir kısmını taşıt ağırlıklarının azaltıp yakıt ekonomisini artırmak oluşturmaktadır. Kompozit malzemelerin sağlamış olduğu düşük yoğunluğa karşın yüksek aşınma direnci, yorulma direnci ve düşük termal genişleme gibi üstün mekanik özellikler, sektörde

kompozit malzemelere olan ilgiyi ve talebi artırmaktadır. Ayrıca otomotiv sektörünün kompozit malzemelerden beklentisi düşük maliyet, seri üretime uygunluk, tasarım ve üretim kolaylığı gibi ekonomik ve endüstriyel kullanıma uygun olmasıdır.

Metal matrisli kompozit malzemeler sıvı hal ve katı hal kaynak yöntemleri ile birleştirilebilmektedir. Kaynak yöntemlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Malzemenin kullanım amacı, istenen özellikleri ve kaynak işleminin gerçekleştirileceği işletmenin/kuruluşun sahip olduğu altyapı ve işlemin ekonomik olmasına göre uygun kaynak yöntemi belirlenmektedir. Katı hal kaynak yöntemleri ile birleştirme, üstün metalürjik özellikler gösterse de kaynak işleminin uzun sürmesi, ilk yatırım maliyetinin yüksekliği gibi dezavantajları mevcuttur. Sıvı hal ile birleştirme yöntemleri ise imalat sanayisinde yoğun bir kullanıma sahiptir. Bunda seri üretime uygunluk, ekonomiklik, kaynak işleminde parça sınırlamasının olmaması, kaynak işleminin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi gibi özellikler etkindir. Ancak sıvı hal kaynak yöntemleri ile gerçekleştirilen birleştirme işlemlerinde kaynak bölgesinde bazı istenmeyen hata oluşumları gözlenmektedir. Bu durum mekanik özellikleri düşürmektedir. Bundan dolayı, sıvı hal kaynak yöntemlerinde optimum parametrelerin belirlenmesi önemlidir.

Bu çalışmanın amacı, Al_2O_3 nanopartikül takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin sıvı hal kaynak yöntemlerinden olan, MIG kaynak yönteminin geliştirilmiş ve işlemci kontrolü ile kullanıcı hatalarını minimuma indirgeyen CMT ve PMC kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde optimum kaynak parametrelerini tespit edebilmektir. Kaynak bölgesinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin farklı kaynak akım ve türlerindeki değişimi incelenerek uygun değerlerin bulunması hedeflenmektedir. Böylece, nanokompozitlerin kaynaklanabilirliği ile ilgili literatüre katkı sağlanarak, otomotiv sanayinin kullanımına uygun alternatif bir malzeme üretilecek, imalat sanayinde yaygın olarak kullanılan ark kaynak yöntemlerinin yeni ve teknolojik olarak gelişmiş bir versiyonu olan CMT ve PMC kaynağı ile kaynaklanabilirliği ortaya konulup ekonomik bir yöntem sunulması amaçlanmıştır.

1.2 Tezin Özgün Değeri

Alüminyum alaşımlarının sahip olduğu hafiflik, yüksek kırılma tokluğu gibi avantajlarına rağmen yüksek sıcaklıklarda düşük dayanım göstermesi, seramik malzemelerin ise yüksek sıcaklık dayanımı ve iyi sürünme direncine sahip olmakla birlikte kırılma toklukları ve termal şok dirençlerinin zayıf olması sonucu, alüminyum matrisli ve seramik takviyeli kompozit malzemeler otomotiv sanayisinde kendine kullanım alanı bulmuş olup daha iyi termal ve mekanik özellik gösteren malzemelerin üretilebilmesi için çalışmalar yapılmaktadır.

Takviye elemanının boyutu küçüldükçe, toplam yüzey alanı artar ve bu durum matristen takviye elemanına daha fazla yük aktarılabilmesini sağlar. Böylelikle malzeme dayanımı artmış olur. Daha küçük tane boyutları, tane sınırları alanını artırdığı için dislokasyon hareketlerini zorlaştırmaktadır. Bu durum da malzemenin mukavemetini artırır. Bundan dolayı nano kompozitler, kompozit malzemelere nazaran daha üstün mekanik özellikler sağlamaktadır.

Bu çalışmada, Al_2O_3 nano partikül takviyeli Al matrisli kompozit malzemeler karıştırılmalı döküm yöntemi ile üretilerek ark kaynak yöntemlerinden olan CMT ve PMC kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde optimum kaynak parametreleri tespit edilecektir. Kompozit malzemelerin üretimi ve farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi hakkında literatürde son yıllarda gerçekleştirilen araştırmalar artmıştır. Ancak nano malzemelerin takviye fazı olarak kullanımını geliştirilmeye açık bir konudur. Ayrıca, kompozit malzemelerin kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde katı hal kaynak teknikleri ile başarılı sonuçlar elde edilmekte ancak imalat sanayinde yaygın kullanım ve düşük maliyetten dolayı ark kaynak yöntemlerine olan ilgi devam etmektedir. Kompozit malzemelerin ergitmeli kaynak yöntemleri ile birleştirilmelerinde kaynak işlemi sırasında yüksek ısı girdisi olması kaynak kalitesini ve malzemenin mekanik özelliklerini düşürmektedir. Dolayısıyla kaynak işleminde ısı girdisinin azaltılması etkin bir kaynak işlemi için önemlidir. CMT ve PMC yöntemlerinde ise işlemci tel elektrodun hareketini kontrol ederek ısı girdisinin diğer ergitmeli kaynak yöntemlerine göre daha az olmasını sağlamaktadır. Çalışmanın hem nano kompozit malzeme üretimi hem de yeni bir teknoloji olan CMT ve PMC kaynak yöntemleri ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması yönüyle özgün bir çalışma olacak

ve literatüre katkı sağlayacaktır. Kullanılacak kaynak yöntemlerinin seri üretime uygun olması ve nano kompozit bir malzemenin üretilip kaynaklı birleştirmelerinin mikro yapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi ile başta otomotiv sanayi olmak üzere imalat sanayinin kullanımına uygun alternatif bir çalışma sunulacaktır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

El-Labban ve Mahmoud (2015), gerçekleştirdikleri çalışmada, 6028 serisi alüminyum alaşımı ve ağırlıkça %2 nano Al_2O_3 takviyeli kompozit malzemenin dört farklı dolgu malzemesi ile gaz tungsten ark kaynağında (GTAW) kaynaklanabilirliğini incelemişlerdir. Kaynak işleminde ilk dolgu malzemesi olarak Al-%12 Si piston alaşımı kullanılmış olup, sonraki alaşımlar farklı yüzdelerdeki (%1, 2 ve 3) Al-Ti5-B1 ana alaşımının eklenmesiyle üretilen TiB_2 ve Al_3Ti nano bileşenleriyle güçlendirilmiş Al-%6 Si bazlı maddelerdir. Baz ve kaynak bölgelerinin mikro yapıları, optik mikroskop ve EDX analizörü ile donatılmış taramalı elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Temel malzemenin ve kaynak bölgesinin mikro sertliği, bir mikro sertlik test cihazı kullanılarak değerlendirilmiştir. Tüm kaynak bağlantıları, herhangi bir çatlak, büyük gözenek veya katılma çatlakları olmaksızın başarıyla kaynaklanmıştır. Al-12% Si piston alaşımının dolgu metali olarak kullanıldığı durumda, kaynak metali, AA 6028 alaşımı ve nanokompozit baz metalleri için iyi dendritik ötektik yapı gösterdiği görülmüştür. Kaynak bölgesinin sertliği, baz metallerin hemen hemen iki katı kadar artmıştır. Al-Ti5-B1 ana alaşımı ile işlem görmüş dolgu metalleri için kaynak bölgesi yapısı ise, AA 6028 baz metalin kaynak bölgesi içinde dağılmış TiB_2 ve $TiAl_3$ çökeltilerine ek olarak α -Al tanecikleri gözlenmiş ve iyi bir dendritik ötektik yapı gözlenmiştir. Nanokompozit baz metalde ise, kaynak metali, değişmiş ötektik yapıya sahip iyi ve eş eksenli tanelerden oluşmuş ve TiB_2 çökeltileri ve in-situ $TiAl_3$ katkıları gözlenmiştir. Kaynak bölgesi içindeki sertlik dağılımları neredeyse homojen bir şekilde ana metale göre iki kat daha yüksektir. Dolgu metalinde Al-Ti5-B1 ana alaşımı miktarı arttıkça sertliğin artacağı sonucuna varılmıştır.

Kianezhad ve Raouf (2019), çalışmasında kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini iyileştirmek için sürtünme karıştırma işlemi uygulayarak 30 nm tane büyüklüğünde nano- Al_2O_3 parçacığı içeren kaynak dolgu malzemesi üretmiştir. 5083 serisi alüminyum alaşımı plakalara kaynak ağzı açılıp, gaz tungsten ark kaynağı kullanılarak tek geçişli kaynak işlemi uygulamışlardır. Nanopartiküllerin homojen dağılımını sağlamak için, kaynak bölgesine sürtünme karıştırma işlemi uygulamışlardır. Nanopartiküllerin eşit dağılımı, kaynak kusurlarının giderilmesi ve tane boyutunun iyileştirilmesi, kaynak bölgesinin gerilme özelliklerinde ve sertliğinde önemli iyileştirmelere yol açtığı sonucuna varmışlardır.

Hossein-Zadeh ve diğ. (2012), alüminyum matris içine nano boyuttaki Al_2O_3 parçacıklarının eklenmesi sonucu ortaya çıkan mikroyapı ve mekanik özelliklerin değişimini araştırmışlardır. Bu amaçla, Al_2O_3 tozu, bilyalı değirmende 20 saat öğütülmüş, ardından ergimiş alüminyuma ağırlıkça %1 Al_2O_3 tozu ilave edilmiştir. Daha sonra üretilen kompozit malzemenin mikroyapı, toz karakterizasyonu, mekanik ve aşınma özellikleri incelemiştir. 40 μm boyutundaki Al_2O_3 partiküllerinin öğütme işleminin ardından, nano boyuta indirildiğini gözlemiştir. Alüminyum matris üzerine az miktarda Al_2O_3 parçacıklarının dağıtımının, matrisin tane boyutunu küçülttüğüne ulaşmışlardır. Al_2O_3 parçacıklarının sert ve daha küçük tane boyutu nedeniyle, Al matrisli Al_2O_3 takviyeli kompozit malzemenin sertliğinin, akma mukavemetinin ve aşınma direncinin önemli ölçüde arttığı sonucuna varmışlardır.

Singh ve diğ. (2019), gerçekleştirdikleri çalışmada 2,5 mm kalınlığındaki AA 6061-T6 alüminyum matrisli nanokompozit plakaların sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) ile kaynaklanabilirliğini araştırmışlardır. Külçe bölgesinin (NZ) mikro yapısını inceltmek ve ısıdan etkilenen bölgede (HAZ) tanecik büyümesini sınırlamak için alüminyum matrise Al_2O_3 nanopartiküller eklemiştir. Al_2O_3 nanopartikül ilavesinin tane yapısı değişimi ve sürtünme karıştırma kaynaklı alüminyum matrisin çeşitli mekanik davranışları üzerindeki etkilerini incelemiştir. Al_2O_3 nanopartiküllerinin eklenmesinin, külçe bölgesinin (NZ) yapısını inceltmesi sonucu, sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) sırasında durdurma etkisiyle yeniden kristalleşme sonucu ortaya çıkan tane büyümesini önlemiş ve tane boyutunda önemli bir azalmayı sağladığına ulaşmışlardır. Külçe bölgesine (NZ) Al_2O_3 partikülleri eklenen numunede ise nanopartikül içermeyen numuneye kıyasla gerilme mukavemeti, mikro sertlik ve aşınma özelliklerinde önemli bir artış kaydetmişlerdir. 1800,2000 ve 2200 dev/dak devirlerde ve 60,70 80 mm/dak hızlarda kaynak işlemi uygulamışlardır. 2000 devir ve 70/80 mm/dak hızlarda birleştirilen numunelerde daha yüksek gerilme özelliklerine ulaşmışlardır. Aynı zamanda, tek FSW geçişinin kullanılması, istenmeyen bir Al_2O_3 nanopartikül dağılımına ve ısı tesiri altındaki bölgede Al-matris ile Al_2O_3 nanopartikülleri arasındaki arayüzde boşluklu yapıya sebep olmuş bunun sonucu olarak da çekme yüklemesi sırasında numunenin erken kırılmasına sebep olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Chen ve Yan (2015), Mg tozu ve alt tip çok frekanslı ultrasonik vibrasyon yöntemiyle özel olarak hazırlanmış nano boyuttaki Al_2O_3 (Al_2O_{3np}) takviyeli Al 7075 matrisli kompozit malzeme üretmişlerdir. Al_2O_{3np} 'ün, geleneksel tekniklere göre kıyaslandığında matris malzemesine etkin bir şekilde dağıldığını görmüşlerdir. Mikro yapı incelemesi sonucunda Al_2O_{3np} ilavesi tane incelmeye neden olmuştur. 800 °C 'de üretilen ağırlıkça %1,5 Al_2O_{3np} içeren kompozit malzemenin, alüminyum alaşımına kıyasla gerilme ve bası dayanımı sırasıyla %59,6 ve %42,6 artmıştır. Geçirimli elektron mikroskobu analizinde ise taneciklerde yüksek yoğunluklu dislokasyonlar ve partikül-matris arasında net arayüzlerin bulunduğunu görmüşler ve mekanik özelliklerinin artışı, matris alaşımının dislokasyon tipi güçlendirilmesine ve matristen sert nanopartiküllere yük transferine bağlamışlardır.

Su ve diğ. (2012), geleneksel karıştırmalı döküm tekniği ile üretilen nano boyutlu seramik partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzemelerde karşılaşılan yüksek gözeneklilik ve nano partiküllerin zayıf dağılımı durumundan dolayı nano Al_2O_3 takviyeli Al 2024 matris malzemenin üretiminde ultrasonik işleme birlikte katı-sıvı karışık döküm yöntemini denemişlerdir. Elde edilen kompozit malzemenin, ince taneli mikro yapı, matris malzemesinde makul ölçüde Al_2O_3 nanopartikül dağılımı ve düşük gözeneklilik özelliklerine sahip olduğunu görmüşlerdir. Katı-sıvı karışık döküm tekniğinin, matriste nanopartiküllerin aglomerasyonunu engellemede etkili olmasını sağladığına ulaşmışlardır. Katılma sırasında kompozit eriyik üzerine ultrasonik titreşim uygulanması matrisin hem tanecik yapısını iyileştirmiş hem de nano boyutlu takviye malzemesinin dağılımını da iyileştirmiştir. Matris malzemesine kıyasla, ağırlıkça %1 nano- Al_2O_3 / 2024 kompozit malzemenin gerilme mukavemetinin ve akma mukavemetinin sırasıyla %37 ve %81 arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca gerilme özelliklerinin daha iyi olmasını, kompozit malzemedeki uniform takviye dağılımına ince taneli yapıya bağlamışlardır.

Mazahery ve Ostadshabani (2011), çalışmalarında, hacimce %0,75, 1,5, 2,5, 3,5 ve 5 alümina nano partiküllerini mekanik bir karıştırıcı ile A356 alüminyum alaşımı ile karıştırarak 800 ve 900 °C'lerde döküm işlemi gerçekleştirerek silindirik numuneler elde etmişlerdir. Mikroyapı incelemesinde nano kompozit numunelerin uniform takviye dağılımı, matrisin tane inceltmesi ve minimum gözenek yapısı sonuçlarına ulaşmışlardır. Mekanik özelliklerin karakterizasyonunda ise nanopartikül

takviyesinin her iki döküm sıcaklığında da çekme ve bası gerilimini artırdığını görmüşlerdir. En yüksek bası gerilimine hacimce %2,5 takviyeli Al₂O₃ nanopartiküle sahip kompozit malzemede ulaşmışlardır. Hacimce %5 takviyeli Al₂O₃ nanopartiküle sahip kompozit malzemede ise deformasyon miktarı ve döküm sıcaklığına bakılmaksızın akış geriliminin azaldığını gözlemlemişlerdir. Nano-Al₂O₃ takviyesinin, alüminyum matrisin sünekliğini korurken %0,2 oranında akma dayanımı ve çekme gerilmesini iyileştirdiğine ulaşmışlardır.

Ma ve diğ. (2017), gerçekleştirdikleri çalışmada sıcak presleme ve ardından sıcak ekstrüzyon yöntemi ile Al₂O₃ nanopartikül takviyeli Al-12Si (%88 Al, %12 Si) matrisli kompozit malzeme üretmişlerdir. Ağırlıkça farklı oranlardaki 50 nm boyutundaki Al₂O₃ nanopartiküllerin kompozit malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Toz Al-12Si ve Al₂O₃ planet öğütücüde 150 dev/dak devirde ve oda sıcaklığında 2 saat boyunca karıştırılarak uniform karışım elde edilmiştir. Ağırlıkça %2 ve %5 Al₂O₃ içeren kompozitlerde takviye malzemesinin dağılımı homojen bir şekilde gerçekleşmiştir. Ağırlıkça %10 Al₂O₃ içeren kompozit malzemede ise önemli ölçüde aglomerasyon olmuştur. Ağırlıkça %5 Al₂O₃ içeren kompozit malzemede maksimum sertlik, akma dayanımı ve gerilme dayanımı sırasıyla yaklaşık %11, %23 ve %26 artış göstermiştir. Uzama miktarı ise yaklaşık %30 artış göstermiştir. Orowan güçlendirmesi (dislokasyon eğilmesi), termal uyumsuzluk güçlendirmesi ve yük transferi güçlendirmesi gibi farklı mekanizmaların katkısını analiz etmişlerdir. Kompozitlerin güçlendirilmesinde termal uyumsuzluk güçlendirmesinin Orowan ve yük transferi güçlendirme mekanizmalarına göre daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır.

Sajjadi ve diğ. (2011), yaptıkları çalışmada çevirmeli ve karma döküm yöntemlerini kullanarak, A356 Al alaşımı ve ağırlıkça farklı oranlarda 50 nm ve 20 µm boyutlarındaki Al₂O₃ takviye malzemeleri ile kompozitler üretmişlerdir. Mikro ve nano partiküller, grafit potalı indüksiyon ocağına argon gazı ile ergiyik alüminyuma ilave edilmiştir. Ağırlıkça %1, 3, 5 ve 7,5 oranında mikro alümina ve %1, 2, 3 ve 4 nano alümina takviye oranına sahip kompozit malzemeler elde edilmiştir. Pota, alttan karıştırılmalı şekilde dizayn edilmiştir. Çevirmeli dökümde döküm sıcaklığı 700 °C ve karma döküm yönteminde 610 °C olmuştur. Çevirmeli dökümde homojen karışım elde edilmesi için 30 dakika boyunca karıştırma yapılmıştır. 650 °C’de karıştırma yapılmış

olup karıştırıcı 300 dev/dak de dönmüştür. Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopu ile mikro yapı özellikleri incelenmiştir. Çekme, sertlik ve bası testleri ile de mekanik yapıları incelenmiştir. Mikro yapı incelemesinde numunelerin, mikro ve nano partikül ilavesinin düzgün partikül dağılımında olduğunu, ince taneli yapı ve düşük gözenekli olduğunu görmüşlerdir. Alümina takviyesinin ise akma, gerilme, bası ve sertlik değerlerinde iyileşme sağladığı sonuçlarına ulaşmışlardır. En iyi mekanik özellik sonuçlarında karma döküm yönteminde ağırlıkça %3 nano- Al_2O_3 ve ağırlıkça %5 mikro- Al_2O_3 kompozit malzemede ulaşılmış olup, çevirmeli döküm işleminde ise ağırlıkça %2 nano- Al_2O_3 ve ağırlıkça %5 mikro- Al_2O_3 takviye malzemesine sahip kompozit malzemede ulaşılmıştır. Ağırlıkça daha fazla Al_2O_3 partiküllerinin olduğu durumlarda ise mukavemet değerlerinin düştüğü sonucuna ulaşmışlardır.

Reihani (2006), çalışmasında sıkıştırırmalı döküm yöntemi ile Al 6061 matrisli, hacimce %30 oranında, 16 ve 22 μm tanecik boyutlu SiC içeren takviye malzemesi içeren kompozit malzeme üretmiştir. Süreç, preform olarak SiC hazırlanması ve Al 6061 alaşımının dökümünden oluşmuştur. SiC preformu, SiC partiküllerinin kömür olarak silika ile harmanlanması ve 1000 °C'de 4 saat boyunca sinterlenmesiyle yapılmıştır. 300 °C'de ön ısıtması yapılan SiC preformları, sıkıştırma döküm işleminde 800 °C'de ergiyik Al 6061 alaşımına 100 Mpa yükte uygulanmıştır. 530 °C'de 3 saat homojenleştirme işlemi uygulanmış, sonrasında 557 °C'de 2 saat boyunca çözündürme işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak yaşlandırma işlemi 175 °C'de gerçekleştirilerek kompozit malzeme üretilmiştir. Kompozitlerin mikroyapı özellikleri, yaşlanma davranışı, mekanik özellikleri ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Sıkıştırırmalı döküm yöntemi ile kompozit malzemede SiC partiküllerinin dağılımı hemen hemen gözeneksiz ve homojen şekilde elde edilmiştir. Kompozit malzemede takviyesiz alüminyum alaşımına göre daha yüksek mukavemet ve daha düşük aşınma oranları gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, SiC partiküllerinin eklenmesi sünekliği azaltmıştır. Hacimce %30, 22 μm partikül büyüklüğüne sahip kompozit malzemenin elastisite modülü 70 GPa'dan 83 GPa'ya yükselmiştir. Akma mukavemeti ve maksimum çekme mukavemeti 110 ve 144 MPa'dan 172 ve 194 MPa'ya yükselmiştir. Alüminyum alaşımının yaşlanma davranışını takviye malzemesinin etkilediğini gözlemlemiştir, yani T6 işleminde pik sertliği elde etme süresi, takviye edilmemiş malzemeye göre kompozitler için daha düşük olduğu sonucuna ulaşmıştır. Çekme deneyinde, takviyesiz ve kompozit numunelerin kırılma yüzeylerinde çukur yüzeyler görülmüştür.

Alüminyum alaşımının aşınma direnci, SiC parçacıkları takviyesiyle artırılmış ve alaşımsız perlitik dökme demir ile karşılaştırılabileceği sonucuna varmıştır.

Akbari ve diğ. (2013), çalışmalarında matris malzemesi içinde nanopartiküllerin aglomerasyonunu önlemek için Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemelerin imal edilmesinde yeni bir yaklaşımda bulunmuşlardır. Al_2O_3 nanopartikülleri, farklı öğütme sürelerinde alüminyum ve bakır tozları ile ayrı ayrı öğütürerek karıştırmalı döküm yöntemi ile A356 alaşımına dahil etmişlerdir. Öğütme işleminin ve öğütme süresinin kompozitlerin mekanik özelliklerine etkilerini sertlik, çekme ve basma testleri ile değerlendirmişlerdir. Al_2O_3 nanopartiküllerin metalik karışık tozlarla güçlendirildiği bazı kompozitler, saf Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozite kıyasla daha yüksek mekanik performans gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır. Mikroyapı incelemesinde mekanik özellikteki iyileşmelerin nanopartiküllerin üniform dağılımı ve matris malzemesinin tane incelmesinin sonucu olduğu bulgusuna ulaşmışlardır. Ayrıca, öğütme süresindeki artışın, numunelerin sertlik, çekme ve bası performansında kademeli bir düşüşe yol açtığını sonucuna da ulaşmışlardır. Öğütme süresinin artması ile metalik tozların oksidasyona uğraması ve bunun da cüruf kalıntılarına dönüşmesi sonucu mekanik performanslarının düşmüş olabileceğini düşünmüşlerdir. Kırılma yüzeylerini incelediklerinde matris malzemesinin çökmesinin kırılmaya yol açtığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca kırılma yüzeylerindeki dendritler incelendiğinde aglomere nanopartikülleri gözlemlemişlerdir. Fraktografi sonuçlarında alüminyum tozları ile öğütülmüş Al_2O_3 nanopartikül takviyeli kompozit malzemede dendritlerde aglomere nanopartiküller gözlemlenmiştir. Bakır tozları ile öğütülen Al_2O_3 nanopartiküllü malzemenin mekanik ve mikroyapı özellikleri dikkate alındığında yalnızca Al_2O_3 takviyeli ve alüminyum tozlar ile öğütülen Al_2O_3 metalik tozların alaşım etkileri dikkate alınması gerektiğini ve metal tozlarının muhtemel alaşımlanma etkisine karşın öğütme işlemi optimize edilmesinin sonraki çalışmalar için önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Bharath ve diğ. (2014), gerçekleştirdikleri çalışmada, matris malzemesi olarak Al 6061 ve takviye malzemesi olarak da Al_2O_3 kullanarak karıştırmalı döküm yöntemi ile kompozit malzeme üreten malzemenin mekanik ve aşınma davranışlarını incelemişlerdir. Ağırlıkça %3, 6 ve 9 oranında $125 \mu m$ tane boyutundaki Al_2O_3 takviye malzemesi kullanılarak üç farklı kompozit malzeme üretilmiştir. Her kompozit

malzemenin hazırlanmasında takviye partiküllerinin ıslatılabilirliğini artırmak ve uniform dağılımı sağlayabilmek için 200 °C'ye ön ısıtma yapılarak ergimiş alüminyuma üç adımda eklemiştir. Her adımda eklenen partiküller 10 dakika boyunca 200 dev/dak'de çevrilmiştir. 750 °C'de döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizinin daha doğru sonuç vermesi için dökümü gerçekleştirilen parçaların orta bölümünden 12 mm çapında ve 10 mm et kalınlığında numuneler alınmıştır. Takviyesiz ve takviyeli numunelerin analizini yaparak partiküllerin sertlik ve gerilme değerlerindeki etkisini ölçmüşlerdir. Mikroyapı analizinde partiküllerin homojen dağılım gösterdiğini ve tane yapısının incelendiğini gözlemişlerdir. Takviyesiz numuneye göre takviyeli kompozit malzemenin sertlik ve çekme dayanımı değerlerinin daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlar ve takviye oranının arttıkça mekanik özelliklerin iyileştiğini belirtmişlerdir. Sertlik testinde 20 N kuvvet uygulanmış ve takviyesiz numunede 100 HV değeri okunmuştur. Takviye oranı arttıkça sertlik değeri de artmıştır. Çekme değeri %3, 6 ve 9 takviye oranına sahip numunelerde takviyesiz numuneye göre sırasıyla %12,12, 15,92 ve 29,18 oranında artmıştır. Aşınma dayanımı takviye oranı arttıkça artmıştır. En iyi aşınma direncini %12'lik takviyeli numunede 19,62 N sabit yük ve 300 dev/dak dönme hızında elde etmişlerdir.

Edalati ve diğ. (2014), Yüksek basınç burulması ile güçlendirilmiş saf alüminyum ve Al-Al₂O₃ kompozitlerinin aşınma direnci ve tribolojik özelliklerini araştırmışlardır. Yüksek basınç burulması (HPT) kullanılarak tozların soğuk konsolidasyonu ile ultra ince taneli Al alaşımı ve hacimce %10 ve %20 Al₂O₃ içeren kompozitler üretilmişlerdir. Alüminyumun bilyeli disk aşınma direnci, H24 muamelesi ile işlenmiş (soğuk haddeleme ve ardından düşük sıcaklık tavlama) kaba taneli muadili ile karşılaştırıldığında HPT ile geliştirildiğini tespit etmişlerdir. Al matrisine Al₂O₃ eklenmesiyle aşınma genişliğinin azaldığını, aşınma derinliği ve aşınma hacminin arttığını bulmuşlardır.

Storjohann ve diğ. (2005), gerçekleştirdikleri çalışmada, 76x19x4 mm ölçülerinde, %20 Al₂O₃ takviyeli Al 6061 alaşımı ve %20 SiC partikül takviyeli Al 2124 malzemeleri ayrı ayrı sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirmişlerdir. %20 SiC partiküllü AA 2124 malzeme 500 dev/dak takım dönme hızı ve 50 mm/dak.'lık kaynak ilerleme hızında SKK yapılmıştır. Mikroyapı incelemelerinde ana

metalin SiC whiskerlerin x yönü boyunca yönlendiği görülmüştür. Karışım bölgesi SiC whisker kümelerine doğru hafif bir eğim göstererek ana metale benzer bir özellik göstermiştir. Termomekanik etkilenen bölge (TMEB)/karışım bölgesi sınır bölgelerinde kaynak yönü boyunca SiC whiskerlerin büyük eksenli sıra görüntüsü vardır. Mikro yapılar, iki farklı yönlerdeki hegzagonal kristal yapılı whiskerlerin var olduğunu göstermiştir. Birincisi; x eksenli boyunca SiC whiskerlerin çoğunun büyük eksenli sıralandığı, ikincisi; SiC whiskerler z yönü boyunca x-y yüzeyine dik sıralanmışlardır. Neredeyse tüm SiC whiskerlerin kaynak yönü boyunca (z yönü) sıralandığı görülmüştür. Dislokasyon yoğunluklarındaki farklılıklardan dolayı, ITAB'daki sertliğin, kaynak merkezindeki sertlikten biraz daha az olduğu belirtilmiştir.

Wert (2003), çalışmasında AA 2024 60x240x4mm ölçülerinde Al alaşımı ile 36x240x4 mm ölçülerindeki %20 Al₂O₃ partikül takviyeli AA 2014 metal matrisli kompozit (MMK) levhalara sürtünme karıştırma kaynağında (SKK) küt alın kaynağını uygulamıştır. AA 2024 Al alaşımı ve AA 2014 % 20 Al₂O₃ partikül takviyeli MMK malzemenin SKK tekniğindeki mikro yapılarında her bir malzemenin en dar tabakasının 0,1 mm civarında olduğunu, böylece malzemenin orjinal şeklini muhafaza ettiğini, sert malzeme takımın dönme yönünde olursa daha kolay malzeme taşınımı olacağını ve bunun da iki metal arasındaki sertliği etkileyeceğini, yapılan kaynaklarda ötektik erimenin olduğunu (505-577 °C), sıvı fazın termomekanik etkilenen bölgede (TMEB) tane sınırları filmlerinde oluştuğunu, partikül şeritlerinin ve liflerinin kırılma bölgelerinin olduğunu ve bunun ötektik erimeden kaynaklanabilmiş olacağını ortaya koymuştur.

Cavaliere ve diğ. (2004), tarafından 7 mm kalınlığında %20 Al₂O₃ partikül takviyeli Al 6061 ve %10 Al₂O₃ partikül takviyeli 7005 metal matrisli kompozit malzemeler (MMK) T6 koşulunda ısıtılma işlemi gördükten 800 dev/dak takım dönme hızı ve 56 mm/dak takım ilerleme hızında sonra sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) küt alın kaynağı yapılmıştır. Her iki kompozitin başarılı bir şekilde birleştirilebildiğini, hem %20 Al₂O₃ partikül takviyeli Al 6061 hem de %10 Al₂O₃ partikül takviyeli Al 7005 MMK malzemelerin birleştirme işlemlerinde maksimum sertlik değerlerinin karışım bölgesinde olduğunu (104 ve 127 HV), birleştirme esnasında malzeme akışıyla karışım bölgesinde tipik soğan halkaları oluştuğunu, termomekanik etkilenen bölgede

(TMEB) ve ana metal karşılaştırıldığında karışım bölgesindeki soğan halkalı yapılarda partikül kırılmalarının olduğunu belirtmişlerdir.

Pramanik ve diğ. (2009), yapmış oldukları çalışmada 6-18 µm boyutlarında 6061 Al alaşımı matrisli %20 SiC parçacık takviyeli kompozit malzemenin işlenebilirliğini incelemişlerdir. Dört farklı ilerleme (0,1, 0,15, 0,2 ve 0,25 mm/rev) ve kesme derinliği (0,25, 0,5, 1,0 ve 1,5 mm) ile 100, 200, 400, 600 ve 800 m/min kesme hızlarında 10 saniye süreyle kesme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Her bir deney parametresi için kesme kuvveti ölçümü yaparak, deneylerde elde edilen talaşların kalınlıklarını mikrometre yardımıyla ölçmüşlerdir. Ayrıca, Al esaslı SiC ve Al₂O₃ parçacık takviyeli metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin işlenmesi sırasında oluşan kuvvetleri tahmin etmek için mekanik bir model geliştirmişlerdir. Ortaya çıkan kesme kuvvetinin talaş oluşumu kuvveti, kazıma kuvveti ve parçacık kırılması ve yer değiştirmesi kuvvetlerinden oluştuğunu belirtmişlerdir. Talaş oluşum kuvveti, Merchant'ın kesme düzlemi analizi, kazıma kuvveti, kayma çizgisi alan teorisi, parçacık kırılması ve yer değiştirmesi kuvveti ise Griffith teorisi esas alınarak çözümlenmiştir. Modelleme sonucunda talaş oluşumundan kaynaklanan kuvvetin, kazıma ve parçacık kırılmasından kaynaklanan kuvvetlere göre daha yüksek çıkmıştır. Modelleme ve deneysel sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir.

Yu ve diğ. (2003), gerçekleştirdikleri çalışmada, Al₂O₃ takviyeli Al matrisli kompozit malzemenin ıslatılabilirliğini araştırmışlardır. Al₂O₃ partiküllerinin Y₂O₃ ile kaplanmasının ıslatılabilirlik üzerine etkisini incelemek için Al₂O₃ partikülleri ve Y₂O₃ kaplanmış Al₂O₃ altlıklar üzerinde ergiyik alüminyumun ıslatılabilirliğini belirlemede durağan damla testini kullanmışlardır. Sıcaklığın ve sürenin artması ile temas açısının azaldığını ortaya koymuşlardır. Al₂O₃ partiküllerin Y₂O₃ ile kaplanmasının malzemenin ıslatılabilirliğini iyileştirildiğini bulmuşlardır.

Shorowordi ve diğ. (2003), gerçekleştirdikleri çalışmada, hacimce %0-20 aralığında 40 µm boyutundaki B₄C, 32 µm boyutundaki SiC ve 40 µm Al₂O₃ takviyeli Al matrisli kompozit malzemenin mikroyapı ve ara yüz özelliklerini araştırmışlardır. Kompozit malzemeler, karıştırma döküm yöntemi ve sonrasında sıcak ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Döküm işlemi öncesinde SiC ve Al₂O₃ 1 ve 2 saat 900 °C'de, B₄C ise 175 °C'de 2 saat boyunca ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Sonrasında ergiyik

alüminyuma ilave edilmiştir. Dökülen malzemedeki boşlukları azaltmak ve uniform partikül dağılımını sağlamak için 420 °C’de 27 ekstrüzyon oranı ile ve 1 m/dak hızda sıcak ekstrüzyona sokulmuştur. Daha sonra ekstrüzyon etkisini ortadan kaldırabilmek için 400 °C’de 2 saat boyunca fırının içinde bırakılmıştır. SiC takviyeli ve Al₂O₃ takviyeli kompozitlere kıyasla B₄C takviyeli kompozitlerde partikül dağılımının daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır.

Uluköy ve diğ. (2015), gerçekleştirdikleri çalışmada SiC takviyeli AA 2014 matrisli kompozit malzemenin sıvı faz kaynak yöntemleri ile kaynak edilebilirliğini araştırmıştır. MIG kaynak yöntemi seçilerek farklı parametrelerde kaynak işlemleri gerçekleştirmişlerdir. Kaynak işleminde AlSi5 kaynak teli kullanılmış olup manuel ve pulse kaynak akımlarında kaynaklanan numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. AA 2014 alaşımı ve %12 oranında 9 µm boyutundaki SiC partiküllerin karıştırarak döküm yöntemi ile kompozit malzeme üretmişlerdir. Döküm sonucu çıkan malzemeyi 150x50x5 mm ölçülerinde hazırlayarak MIG ve MIG Sinerjik Pulse kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Her iki kaynak yönteminde 90 ve 100 A akım şiddeti kullanıp, 150 mm/dak hızında kaynak işlemi gerçekleştirmişlerdir. Kaynaklı numuneleri, metalografik numune hazırlama işlemlerinin ardından mikro yapı ve sertlik ölçüm işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. Mikroyapı analizi sonucu, pulse akım ile birleştirmede manuel akıma göre daha az ısı girdisi olmuş ve bu durum kaynak bölgesindeki mikroyapının daha homojen olmasını sağladığına ulaşmışlardır. Pulse akımda kaynak bölgesinde takviye malzemesinin aglomerasyon ve partikül çökmesi görülmediğine ulaşmışlardır. Manuel akımda çözünmüş SiC partikülleri interdentritik porozite oluşturmuştur. Çökme en fazla ve SiC partiküllerinin en büyük boyutta olduğu durumun manuel akım ve 100 A akım değerinde olduğuna ulaşmışlar ve ısı girdisindeki artışın takviye malzemesinin yüzeye yönlendirilerek difüzyon ile Al₄C₃ fazına dönüşüp topaklanıp çökmeye neden olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Sertlik analizi sonucunda en düşük sertliğin pulse akım, 90 A değerinde elde edilmiş olup yüksek ısı girdisinin etkisiyle takviye malzemesinin özellikle geçiş bölgesinde difüzyonla yönlendirilerek istenmeyen sertlik artışına sebep olduğuna ulaşmışlardır. Pulse akımda daha az ısı girdisiyle daha homojen bir sertlik geçişi elde etmişlerdir.

Lean ve diğ. (2003), çalışmalarında Al-5Mg (ER5356) ve Al-5Si (ER4043) kaynak tellerini kullanarak takviyesi AA 6082 alüminyum alaşımı ve hacimce %25 1-

8 µm tane boyutlarındaki SiC takviye malzemesi içeren AA 6092 alüminyum alaşımlı kompozit malzemenin kaynaklanabilirliğini incelemişlerdir. Kaynak havuzu ve füzyon hattı içinde ergimiş alüminyum matris ve SiC partiküllerinin tepkimeye girerek Al₄C₃ oluşumunu azaltabilmek için maksimum ısı girişini düşürmeyi hedeflemişlerdir. Bunun için pulse akımlı MIG kaynağı ile birleştirme işlemini gerçekleştirmişlerdir. Kaynak işleminde bir ve iki dolgu metali kullanılarak “I”, “V” ve “X” kaynak şeklini kullanmışlardır. Mekanik özellikler incelendiğinde tüm kaynaklı bağlantıların gerilme mukavemetlerinin benzer ve 223 MPa’ya yakın olduğunu ve bunun da AA 6082-T6 alaşımının yaklaşık %65’i olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Tüm kaynak şekillerinde takviyesiz alaşımın ısı tesiri altındaki bölgesinde (ITAB) çökme görülmüş olduğunu ve kaynak sonrası ısıl işlem uygulanmasının takviyesiz ana alaşımın gerilme mukavemeti azalmasını engellediğini belirtmişlerdir.

Zhang ve diğ. (2008), çalışmalarında 200x200x10 mm boyutlarındaki AZ31 Mg alaşımının yüzeyinde 100 ve 200 A akım değerlerinde ve 150 mm/dak ilerleme hızında darbeli akımlı (pulse) TIG kaynağı ile 20-40 ve 60 µm tane boyutlarında SiC partiküllerini 5-10 ve 15 mg/san hızında ilave ederek kompozit tabaka üretmişler ve 4 noktalı eğilme testine tabi tutmuşlardır. Darbeli akımın, sıvı akışını artırdığını, ısıyı dağıttığını ve kaynak havuzunun boyutu ve şeklinin daimi ve düzgün şekilde olmasını sağladığını ve bu durumun kompozit tabakadaki katılaşmanın düzgün olmasını sağladığını belirtmişlerdir. Tane incelmesinin kompozit tabakanın eğilme dayanımında kayda değer bir artışı sağladığına ulaşmışlardır. Daha düşük tarama hızına sahip kompozit tabakalar daha yüksek eğilme dayanımına sahip olduğunu ve aynı zamanda alt tabaka ile "iyi" metalurjik bağa sahip olduğunu görmüşler ve daha yüksek tarama hızlarına göre daha iyi mekanik davranış sergilediğini bulmuşlardır. SiC partiküllerinin hacimce artışının aşınma oranını doğrusal olarak azalttığı, aşınma direncinin ise takviye malzemesinin boyutunun karesiyle ters orantılı olarak değiştiği sonucuna ulaşmışlardır. Daha Yüksek elastisiteye sahip kompozit tabakalar, daha küçük gerilmeye, daha küçük gerilme enerjisine ve dolayısıyla daha iyi aşınma direncine sahip olduğunu bulmuşlardır. Aşınma mekanizması, düşük uygulanan yüklerde oksidasyona, yüksek uygulanan yük seviyelerinde ise adhezyona uğramıştır.

Lei ve diğ. (2007), çalışmalarında 6061 Al matrisli, hacimce %10 6 µm tane boyutlu SiC takviyeli kompozit malzemenin kaynaklanmasında, 0,4 ve 0,8 mm kalınlığındaki, 60 mm uzunluğundaki Ti dolgu malzemesi kullanarak plazma ark kaynağı ile 60x20x3 mm boyutlarındaki numuneleri 80 ve 100 A akımlarda birleştirmişlerdir. Kaynaklı bölgenin mikro yapısını optik mikroskop ile incelemişlerdir. SiC takviyeli Al matrisli malzemenin kaynak edilmesinde karşılaşılan iğne benzeri oluşan Al₄C₃ fazının Ti dolgu malzemesi kullanılarak gerçekleştirilen in-situ plazma ark kaynağı ile ortadan kaldırıldığına ulaşmışlardır. Takviye malzemesi ve matris arasındaki ıslanma özelliği iyileştirilmiş, stabil bir kaynak birikintisi elde edilmiş ve TiN, AlN ve TiC katkılı kaynakla birleştirilmiş yni bir kompozit malzeme üretilmiştir. Ti kullanımı ile kaynaklı bağlantıların gerilme mukavemeti ve işlenebilirliği iyileştirilmiş olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Alaneme ve Bodunrin (2011), çalışmalarında AA 6063 matrisli alümina takviyeli kompozit malzemenin hacimce farklı oranlarda ve ısıl işlem uygulanması durumlarındaki tuzlu su, bazik ve asidik ortamların korozyon davranışına etkisini incelemişlerdir. Hacimce % 6, 9, 15 ve 18 oranlarında 28µm tane boyutlarında alümina içeren AA 6063 - Al₂O₃ parçacıklı kompozit malzemeleri, iki aşamalı karıştırılmalı döküm kullanarak üretmişlerdir. Takviye malzemesi alüminyum alaşım ile ıslatılabilirliğini artırmak amacıyla döküm öncesi 5 dakika boyunca 250 °C'de ön ısıtmaya tabi tutulmuştur. Alüminyum alaşımı külçeler, gazla çalışan potalı fırına eklenmiş ve alaşımın sıvılaşma sıcaklığının üzerinde olan 750 °C ± 30 °C sıcaklığa artırılmıştır. Sonrasında sıcaklık, fırının içinde yarı katı faz sıcaklığı olan 600 °C'ye indirilmiştir. Ön ısıtılmış alümina eklenerek 5 dakika boyunca manuel olarak karıştırılmıştır. Daha sonra sıcaklık 720 °C'ye çıkarılarak mekanik karıştırıcı ile 300 dev/dak devirde 10 dakika boyunca alümina dağılımını iyileştirmek için karıştırılmalı döküm yönteminde karıştırılmıştır. Kum kalıba döküm yapılarak külçeler imal edilmiştir. Kompozitlerin korozyon davranışını değerlendirmek için kütle kaybı ve korozyon hızı ölçümlerini kriter olarak kullanmışlardır. AA 6063 - Al₂O₃ kompozit malzemeleri NaCl ortamında, NaOH ve H₂SO₄ ortamına göre daha iyi korozyon direnci sergilediğini görmüşlerdir. NaCl ve NaOH ortamında takviyesiz alaşımın, kompozitlerden biraz daha üstün korozyon direnci sergilediği, ancak kompozitlerin H₂SO₄ ortamında daha iyi korozyon direncine sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca, ısıl işlem uygulanmasının hem kompozitler hem de takviyesiz alaşım için

korozyon direncini artırdığı, hacimce alümina artışının ise korozyon direnci üzerindeki tutarlı bir etki göstermediği sonuçlarına ulaşmışlardır.

Şenel ve Gürbüz (2018), yaptıkları çalışmada alüminyum alaşımına ağırlıkça %0 ile %30 arasında SiC takviye malzemesini ekleyerek takviye malzemesi eklenmesinin yoğunluğa, sertliğe ve mikro yapıya etkisini incelemiştir. 10 µm boyutundaki alüminyum tozları ile 45 µm boyutundaki SiC tozları toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiştir. Kompozit malzeme üretiminde ağırlıkça %1, 3, 6, 9, 12, 15, 18,21, 25, 30 oranında SiC takviye malzemesi olarak kullanılmıştır. Alüminyum tozları ve SiC tozları etanol içerisinde mekanik karıştırıcıyla karıştırılmış ve karışım öğütme haznesi içinde bilyalı değirmende öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Filtreleme yapılarak karışımdaki etanol uzaklaştırılmıştır. Toz karışım, etüv fırınında 50 °C'de kurutulmuştur. Al-SiC karışımı, 600 MPa basınçtaki tek eksenli preste disk şeklinde ham numuneler üretilmiştir. Ham kompozit numuneler son olarak 630 °C'de 180 dakika boyunca fırında sinterleme işlemi uygulanarak kompozit numunelere son hali verilmiştir. Numunelere, zımparalama ve parlatma işlemi uygulanarak oksit tabaka temizlenmiştir. Üretilen numunelere, Arşimet terazisiyle yoğunluk ölçümü yapılmış olup, Vickers sertlik ölçüm cihazıyla ise sertlikleri ölçülmüştür. Numunelere 1.961 N'luk yük 15 saniye boyunca uygulanarak numunelerde oluşan iz çapları ölçülerek sertlik değerleri bulunmuştur. Mikro yapıları ise SEM mikroskopu ve XRD cihazı ile incelenmiştir. SiC katkısı arttıkça kompozit malzemenin yoğunluğunun arttığı sonucuna ulaşmışlardır. SiC katkısı arttıkça kompozit malzeme hacimsel küçülme meydana gelmiş, %18'lik SiC katkısından daha fazla katkılı kompozit malzemelerde ise hacimsel küçülmenin azaldığını görmüşlerdir. Bu durumun SiC takviye malzemesinin topaklanmasından kaynaklandığını düşünmüşlerdir. SiC katkısı arttıkça numunelerin sertlik değerleri artmıştır. Katkısız alüminyum alaşımı yaklaşık 28 HV iken %15 SiC katkılı numunenin sertliği 67,9 HV'ye ulaşmış ağırlıkça %30 SiC katkısında ise 79,3 HV sertlik değerine ulaşılmıştır. Mikroyapı incelemesinde ise kompozit malzemedeki SiC takviye elemanlarında homojen dağılım sağlandığını gözlemlemişlerdir. SiC partiküllerinin dislokasyon hareketini engelleyerek mekanik özelliklerde iyileşme sağladığını düşünmüşlerdir. Kompozit malzemelerde Al₄C₃ gibi istenmeyen ikincil fazların oluşmadığını gözlemişlerdir.

Toktaş ve Tayanç (2006), gerçekleştirdikleri çalışmada 6063-T4 alüminyum alaşımının farklı parametrelerdeki sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmesinin alaşımın iç yapısına ve mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. 3,70 mm kalınlığında ve 75 mm genişliğindeki levhalar, ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiştir. 520 °C’de ekstrüzyondan çıkan levhalar soğumaya bırakılmış ve oda sıcaklığında doğal yaşlandırma yapılmıştır. 800, 1120 ve 1600 dev/dak takım devirlerinde ve 200 ve 315 mm/dak ilerleme hızlarında sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirmişlerdir. SKK işlemi için 45 HRc sertlik ve 18 mm çapında omuz ve M6x0,75 mm hatveli HSS-E hava çeliğinden karıştırıcı uç imal edilmiştir (omuz/uç oranı 3). Kaynak yönüne dik kesitten iç yapı incelemesi için numune alınmış olup zımpara ve parlatma işlemleri uygulamışlardır. Kaynak çekirdeği, termomekanik etki altındaki bölge, ısı tesiri altındaki bölge ve esas metal bölgelerinden de numune alarak incelemiştir. Kaynak işlemleri 439 ile 513 °C sıcaklıkları arasında gerçekleştirilmiş olup ilerleme hızı artıp takım devri azaldığında maksimum kaynak sıcaklıklarının azaldığı gözlenmiştir. Esas metal ile kaynak bölgesi arasında sertlik çok fazla değişmemiş ve homojen dağılım gözlenmiştir. Farklı kaynak parametreleri ve kaynak işlemi uygulanmamış numunelerde yaklaşık çekme dayanımı değerleri ölçülmüştür (146 MPa). Çekme deneylerindeki kırılmalar ise genellikle kaynağın geri çekilme bölgesi etrafındaki esas metal bölgelerinde oluşmuştur.

Akyel (2020), çalışmasında 5 mm kalınlığındaki AA 5083 – H111 alüminyum alaşımı levhaların sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile kaynak parametrelerinin optimizasyonunu araştırmıştır. SKK işleminde 600, 1200 ve 1600 dev/dak takım devri ve 50, 100, 150 mm/dak kaynak hızları denenmiştir. Omuz çapı 15 mm, pim çapı 5 mm olan uç ile kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Taguchi yöntemiyle kaynak parametresi optimizasyonu yapılmıştır. Kaynak kalitesi, iç yapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. SKK yöntemi ile birleştirmeden dolayı çarpılmanın az olduğu gözlenmiştir. Takımın giriş ve çıkışının uçlardan olduğu kaynaklarda uç bölgelerde yırtılmalar oluşmuş, takımın üstten girip parçanın sonuna kadar gidilmediği parçalarda ise giriş bölgesinin düzgün olduğu çıkışında ise pim çapı kadar anahtar deliği olduğu görülmüştür. Kaynak dikişi boyunca eşit aralıklı yarım daireler oluşmuş, takım devrinin sabit olduğu kaynak hızının ise azaltıldığı durumlarda daireler arasındaki mesafenin azaldığı görülmüştür. Kaynak bölgesinin merkezine olan uzaklık arttıkça tane büyüklüğü artmıştır. Kaynak bölgesindeki mikro sertlik incelemesinde çok farklı

bir sertlik düşüşü meydana gelmemiştir. Alaşımın mikrosertliği 150-160 HV, kaynak bölgesindeki sertlik değeri ise kaynak parametrelerine bağlı olarak 180 ile 270 HV arasındaki değişen değerlerden oluşmuştur. 1200 dev/dak takım devrine kadar sertlik artmış üzerinde ise azalmıştır. Çekme deneyinde ise tüm çatlaklar kaynak merkezinde oluşmuş, en yüksek mukavemet değeri ise 600 dev/dak ve 50 mm/dak parametresinde 170,94 MPa değeri ile elde edilmiştir. Takım devri ve ilerleme hızı arttıkça mukavemet değeri düşmüştür.

Gündoğan ve Özseri (2019), çalışmalarında basınçlı infiltrasyon yöntemi ile AA 2024 ve AA 6061 matrisli, B₄C ve SiC takviyeli kompozit malzeme üreterek miroyapı, mekanik ve ısı iletkenlik özelliklerine basıncın etkisini incelemiştirlerdir. 48 µm B₄C ve 37 µm boyutlarındaki SiC tozlarının çelik borular içinde 50x8 mm ölçülerindeki preformları oluşturulmuştur. 800 °C ve 7-8 bar basınçlarda ergiyik alüminyum preformlara infiltre edilerek kompozit malzeme üretilmiştir. SEM incelemesinde homojen dağılım gözlenmiştir. Alkol içeren daldırılmalı askı aparatlı hassas terazide yapılan porozite analizinde basıncın artmasının porozite hacmini azalttığına ulaşılmıştır. Porozite iki takviye elemanında da takviye elemanı ve matris ara yüzeyi etrafında oluşmuştur. Basınç miktarının artması, sertlik dayanımı ve basma mukavemetinde %80'e varan artışlar görülmüştür. Mekanik özelliklerde B₄C, SiC takviyeli kompozit malzemelere göre daha iyi sonuç vermiştir.

Önal (2019), çalışmasında AA 1050 alüminyum matrisli, ağırlıkça %1.5 ve %3 oranlarında SiO₂ takviyeli kompozit malzeme üreterek mekanik ve şekillendirilebilirlik özelliklerini incelemiştir. Döküm ocağında 700 °C'de yer ocağında ergitilmiş alüminyuma, tanelerin rekristalizasyonu ve gerilme giderme tavını sağlamak için TiB ilave edilmiş ve pik kalıplara döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Döküm işlemi sonrası numuneler tek ve çift yönlü olarak haddelenmiştir. Haddelenen numunelere 350 °C'de 90 dk boyunca homojenleştirme ve 460 °C'de 240 dk gerilme giderme işlemi yapılmıştır. Alüminyum alaşımına nano SiO₂ ilavesi eksenel çekme mukavemetini artırmıştır. %1,5 oranına sahip kompozit malzemede homojen yapı görülürken, %3'lük malzemede topaklanma görülmüştür. Maksimum çekme dayanımına %14,4'lük artış ile %1,5 SiO₂ katkılı rekristalizasyon tavsız ve tek yönde haddelenmiş 1,50 mm kalınlıktaki numunede ulaşılmıştır. %1,5 katkılı kompozit malzemenin %3 katkılı malzemeye göre daha iyi mekanik özellikler göstermesi

numunelerdeki homojen dağılım farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Uzama miktarında önemli bir farklılaşma görülmemiştir. Katkılı malzemenin alaşım malzemeye göre sıvama testlerinde belirgin bir farklılık gözlenmemiştir. AA 4000 serisi ile AA 1050 SiO₂ katkı malzeme karşılaştırıldığında maliyetlerinin yakın olduğu ancak şekillendirilebilirliğin kompozit malzeme daha iyi olmasından dolayı alternatif bir malzeme olarak tercih edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Çalışkan (2019), çalışmada mekanik öğütme yöntemiyle A356 Al matrisli nano Al₂O₃ katkı kompozit malzeme üreterek aşınma davranışlarını incelemiştir. A356 Al alaşım tozlarına ağırlıkça farklı oranlarda nano Al₂O₃ tozları ilave edilmiş ve 1, 2, 3 ve 4 saat olmak üzere mekanik öğütme işlemi yapılmıştır. Optimum öğütme süresini belirlemek için MA/MÖ yönteminin mekanik ve mikro yapıya olan etkisi incelenmiştir. 30 N yük, 500, 1000, 1500 ve 2000 kayma mesafelerinde ve 1 ms⁻¹ kayma hızında aşınma testleri yapılmıştır. Öğütme süresi arttıkça gözenek miktarında artış olduğu görülmüş, en yüksek sertlik ve en düşük aşınma kaybı 1 saat mekanik öğütme yöntemiyle üretilmiş numunelerde ölçülmüştür. Optimum öğütme süresinde %0,25, 0,5, 1 ve 2 takviyeli kompozit malzemeler 520 MPa'da ön şekillendirme yapılmış ve 550 °C'de 10⁻⁶ mbar vakum altında sinterlenerek kompozit malzeme üretilmiştir. Mikro yapı incelemesinde takviye malzemesinin artmasının poroziteyi artırdığı gözlenmiştir. Alaşımın sertliği 46 HV olarak ölçülmüş, en yüksek sertlik ve en düşük ağırlık kaybı %1 takviyeli numunede ölçülmüş ve 74 HV bulunmuştur.

Baydemir (2018), gerçekleştirdiği çalışmada ağırlıkça %0, 5, 10, 15, 20 Al₂O₃ içeren takviye malzemesi ile AA 6061 alüminyum alaşımını sıcak presleme yöntemi ile üreterek değişken takviye malzemesi oranlarının ve alaşımın mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. 3 boyutlu karıştırıcıda hazırlanan alüminyum alaşımı ve takviye malzemesi tozlarına sıcak presleme kalıbında 450 °C'de 100 ve 200 MPa basınç altında 30 dakika sıcak presleme işlemi uygulanmış ve sonrasında F ısıl işlemi ve T6 suni yaşlandırma ısıl işlemi uygulanarak numuneler üretilmiştir. Al₂O₃ parçacıkların matris içindeki dağılımı ve ıslatma durumu taramalı elektron mikroskobu ile incelemiştir. Takviye malzemesinin değişiminin ve basınç farklılığının sertlik değişimine etkisi araştırılmıştır. Çekme dayanımı, çapraz kırılma dayanımı, çentik darbe dayanımı ve aşınma özellikleri mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla incelemiştir. Presleme basıncının yüksek olduğu numunelerin deneysel yoğunlukları

daha yüksek olarak bulunmuştur (En yüksek yoğunluk, 450 °C, 200 MPa basınç, T6 yaşlandırma ısıl işlemi takviyesiz AA 6061). En düşük gözeneklilik 450 °C, 200 MPa basınç, T6 yaşlandırma ısıl işleminde bulunmuştur. En yüksek sertlik, darbe enerjileri, çekme dayanımları 200 MPa basınç yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerde görülmüştür. Takviye elemanının yüzdesi arttıkça gözenek oranı artmış bu durum çapraz kırılma dayanımlarını düşürmüştür. %5 ve %10 takviye oranlarında çekme dayanımı artmış ancak daha yüksek takviye oranlarında dayanım azalmıştır.

Ansal (2008), çalışmasında Al matris malzemesi ile SiC ve FeB_x takviye malzemelerini ağırlıkça farklı oranlarda kullanarak toz metalürjisi yöntemi ile kompozit malzeme üretmiştir. Al 99 tozları matris malzemesi olarak seçilmiş, takviye malzemesi ise FeB_x ağırlıkça %5, 10, 15, 20, 30, 40 oranlarında SiC ise %2,5, 5, 7,5, 10, 15, 15 ve 20 olarak kullanılmıştır. Takviye malzemesi tozları ve matris malzemesi tozları bilyalı değirmende 1 saat karıştırılarak homojen karışım sağlanmıştır. 400 MPa'da preslenip, 600 °C'de 1 saat sinterlenmiştir. Numuneler TIG kaynağı ile 85 A akımda darbeli kaynak yöntemi ile birleştirilerek mikroyapı incelemeleri ve mekanik özellikleri incelenmiştir. %30 FeB_x içeren kompozit numunelerde kısmi kaynama görülürken %40 FeB_x içeren numunelerde kaynaklı birleştirme elde edilememiştir. Mikrosertlik incelemesinde ana malzemeye göre kaynak bölgesinde daha sert değerler ölçülmüştür. Takviyesiz Al alaşımında 25 HV sertlik elde edilirken kaynak bölgesinde 50 HV sertlik elde edilmiştir. Sertlik artışının ilave kaynak metalinin bileşiminden olduğu düşünülmüştür. Takviye malzeme oranı arttıkça kaynak bölgesinin sertliğinin arttığı görülmüştür. Takviyeli numunelerin çekme dayanımının daha fazla olmuştur. Gerilme değerleri 40-60 MPa arasında bulunmuştur. Üç nokta eğme testinde ise FeB_x oranı arttıkça eğme dayanımı düşmüş, SiC oranı arttıkça ise dayanım artmıştır.

Akkaş (2012), çalışmasında 5x200x200 mm boyutlarındaki AA 6013 alaşımı levhaları sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile alın altına birleştirme işlemi uygulayarak mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Kaynak parametrelerinde 900 dev/dak ve 1400 dev/dak devirlerde ve her devir parametresi için de 125, 250 ve 315 mm/dak ilerleme hızları uygulanmıştır. Yüksek ilerleme hızlarında kaynak yüzeyleri daha düzgün çıkmıştır. Kaynak bölgesinde devir düştükçe mukavemet değerleri azalmıştır. Sabit hızda devir artırılınca kaynak yüzeyindeki sertlik azalmıştır. Devir arttıkça ısının artmasının bu duruma sebep olduğu sonucuna

ulaşmıştır. Çekme deneylerinde ise kopmalar düşük devirlerde yeniden kristalleşen bölgelerde meydana gelirken yüksek devirlerde ise ısı tesiri altındaki bölgelerde meydana gelmiştir. Mikroyapıda ise düşük devirde boşluklu yapı gözlenmiştir. İlerleme hızı arttıkça tane yapısı küçülmüş ve homojen bir yapı gözlenmiştir. SEM görüntülerinde ise düşük devirlerde gevrek kırılma olduğu gözlenmiş yüksek devirde ise sünek kopma görülmüştür.

Kırcı (2012), çalışmasında 1,5 mm kalınlığındaki 150x300 mm boyutlarındaki AW-5005 alüminyum alaşımı levhaları bindirme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirme işlemi uygulayarak takım profilinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemiştir. Üçgen, kare profilli ve pimsiz takım kullanılmıştır. Sürtünme karıştırma kaynağında karıştırıcı takımın omuz çapı 10 mm olarak seçilmiştir. Üçgen karıştırıcı uç profilinde 2478 dev/dak takım dönme hızı ve 200 mm/dak ilerleme hızı, kare karıştırıcı uç profilinde 2478 dev/dak takım dönme hızı ve 200 mm/dak ilerleme hızı, pimsiz takımda ise 2925 dev/dak takım dönme hızı ve 98 mm/dak ilerleme hızı seçilerek birleştirme işlemleri uygulanmıştır. Üç farklı takımla gerçekleştirilen bağlantı dikişlerinin kök ve yüz bölgelerinde bir kusura rastlanmamış, eğme deneyinde de kaynak dikişlerinde çatlama ya da hasar meydana gelmemiştir. En yüksek çekme mukavemet değeri ise kare profilli karıştırıcı takımla elde edilmiştir. Pimsiz profilli takımla yapılan bağlantıların yorulma mukavemeti diğer takımlar ile yapılan birleştirme işlemine göre daha üstün olmuştur. SEM görüntülerinde gevrek kırılma meydana geldiği görülmüş, pimsiz takımlı bağlantıların kırılma yüzeyinde ise daha tabakalı kırılma olmuştur.

Mercan (2018), çalışmasında AA 5754 ve AA 6013 alüminyum alaşımlarını MIG kaynak yöntemi ile birleştirerek mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Birleştirme işlemini argon gazı ile üç farklı akım ve üç farklı ilerleme hızında gerçekleştirmiştir. Kaynak teli olarak 1,2 mm çapında AWS A510: ER5356 seçilmiştir. Çekme testlerinin kopma, farklı parametrelere göre yarı sünek davranış ve ITAB'da ve gevrek kırılma tipinde kaynak metali ve ITAB'da gerçekleşmiştir. Sabit akımda kaynak hızı arttıkça mukavemet değerlerinde düşüş gözlenmiştir. Kaynak bölgesindeki en yüksek tokluk değeri AA 5754 ana metalinde ölçülürken, kaynak metali ve AA 6013 ITAB'larında benzer değerler görülmüştür. Akım ve hız değişimi tokluk değerlerinde bir farklılığa yol açmamıştır. Kaynaklı birleştirmelerdeki en

yüksek sertlik 93-105,1 HV ile AA 6013 ITAB'ından en düşük sertlik değeri ise 60,2-71,5 HV ile AA 5754 ITAB'ında ölçülmüştür. Mikroyapı incelemelerinde ise tüm kaynak metali yapılarının dentritik olduğu, tanelerin ise ergime sınırından kaynak merkezine doğru sütunsal olarak yönlendikleri gözlenmiştir.

Sandal (2009), çalışmasında alümina takviyeli alüminyum matrisli kompozit malzeme üreterek takviyesiz Al alaşımı ile difüzyon kaynak yöntemi ile kaynaklanabilirliğini araştırmıştır. Ağırlıkça %10 oranında alümina içeren tozlar 2 saat süre ile mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuş ve 500 MPa'lık sabit presleme basıncında preslenerek Ø10x15 mm boyutlarında numuneler üretmiştir. 650 °C'de sinterlenerek aynı numune ölçülerine sahip takviyesiz Al alaşımı ile kaynak işlemi uygulanmıştır. 5 MPa basınçta 590-610 ve 630 °C'lerde 30-60 ve 90 dakika değişen sürelerde difüzyon kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Birleştirilen numunelere kesme testi uygulanmış ve kaynak bölgeleri optik mikroskopta incelenerek karşılaştırma yapılmıştır. Kaynak süresi arttıkça kesilme mukavemeti artmış, kaynak arayüzelerindeki belirginlik azalmıştır. En yüksek kesme mukavemeti değeri 590 °C ve 90 dakika sürede gerçekleştirilen birleştirmede elde edilmiştir. Kaynak sıcaklığının artması kesilme mukavemetini azaltmıştır.

Alp (2008), çalışmasında hacimce %10, 20 değişen oranlarda SiC parçacık takviyeli AlMg₃ matrisli kompozit malzemenin ve takviyesiz alaşımın difüzyon kaynağı ile kaynaklanabilirliğini araştırmıştır. Kaynak işlemi 580 °C sıcaklıkta ve 1,5, 2,5 ve 3,5 MPa değişen basınçlarda 2 ve 3 saat sürelerde gerçekleştirilmiştir. Aynı basınç altında düşük takviyeli kompozit malzemelerin kesme dayanımı daha yüksek olarak bulunmuştur. Kaynak basıncı ve süresi arttıkça birleştirme kabiliyeti ve kesme dayanımı artmıştır. Yüksek basınç altında düşük takviye oranına sahip kompozit malzemelerin birleştirilmesinde deformasyon meydana gelmiştir. Yüksek takviye oranına sahip kompozit malzemelerin birleştirilmesi işleminde ise basınç artışı ile kesme dayanımı artmıştır. Mikroyapı incelemelerinde tüm numunelerin difüzyon kaynağında kaynak çizgisinin kaybolduğu ve kaynak işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirildiği gözlenmiştir.

Bozkurt (2008), çalışmasında farklı sürtünme karıştırma kaynak (SKK) parametrelerini kullanarak SiC takviyeli AA 2124 Al matrisli kompozit malzeme

levhalarının kaynaklanabilirliğini incelemiştir. 355, 560, 900, 1120 ve 1400 dev/dak farklı dönme hızları ile 40, 50, 80 ve 100 mm/dak ilerleme hızları ayrı ayrı denenerek mukavemet değişimi araştırılmıştır. 2°'lik sabit takım eğim açısı ile kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı ve mekanik özellikler ile kaynak sırasındaki ısı dağılımını belirlemek amacıyla takım ilerleme ve takım yığma kenarlarından sıcaklık dağılım eğrileri oluşturulmuş ve XRD karakterizasyonu yapılmıştır. Takım ilerleme hızı arttıkça mukavemet değerleri düşmüştür. En yüksek mukavemet 1120 dev/dak dönme ve 40 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. En düşük mukavemet değeri ise 900 dev/dak dönme ve 100 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. XRD incelemesinde SiC partiküllerinin çevresinde Cu_2FeAl_7 fazı oluşmuş levhaların karışım bölgesinde yeniden kristalleşme meydana gelmiştir. Farklı parametrelerde birleştirilen levhaların kaynak merkezinden 15 mm uzaklıktaki sıcaklık dağılımı 180 ile 270 °C değişmiş oluğ karışım bölgesindeki sıcaklık 400-500 °C olduğu teorik olarak hesaplanmıştır. SKK sonrası çekme mukavemetinde %19,25 ile 42 oranlarında azalma, uzama miktarında ise yüksek ilerleme hızlarında %17 ile 82,5 oranlarında artış olmuştur. En iyi kaynak performansına 1120 dev/dak dönme ve 40 mm/dak ilerleme hızlarında ulaşılarak 366,20 MPa olarak ölçülmüştür. Takım dönme ve ilerleme hızları arttıkça sertlik artmıştır. SKK'lı sertlik değerleri 165 ile 200 HV arasında değişmiş olup ana metale göre 35 HV'lık bir sertlik değişimi gözlenmiştir.

Avcı ve diğ. (2017), gerçekleştirdikleri çalışmada 6 µm boyutundaki Al_2O_3 takviye malzemesi partikülleri ile AA 7039 alaşımı matris malzemesini kullanarak Vorteks yöntemi ile kompozit malzeme üretmişlerdir. Al_2O_3 ağırlıkça %2, 5 ve 8 oranlarında uygulanmıştır. 750 °C'de ergiyik hale gelen 650 gr ağırlığındaki matris malzemesinin oksitlenmesini engellemek amacıyla saf argon gazı 15 lt/dak hızda gönderilmiştir. Takviye malzemesinin ıslatılabilirliğini artırmak ve topaklaşmayı önlemek amacıyla takviye malzemesi 850 °C'de 1 saat ön ısıtma yapılmıştır. Ergiyik alaşıma takviye malzemeleri kademeli olarak ilave edilerek 1050 dev/dak hızında karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi sonrasında 450 °C ön ısıtma yapılmış 120x120x5 mm boyutlarındaki metal kalıba döküm işlemi yapılmış ve katılma tamamlanana kadar 5 MPa basınç uygulanmıştır. 300 °C'de 24 saat homojenleştirme işlemi uygulanarak T6 ısıl işlemi ve yaşlandırma yapılmıştır. Elde edilen numune levhalar 1800 dev/dak dönme hızı ve 56 mm/dak ilerleme hızında sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Birleştirilen numunelerin mikroyapı ve mekanik

özellikleri incelenmiştir. Numunelerde ana metal, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), termo-mekanik etkilenen bölge (TMEB) ve karıştırma bölgesi olmak üzere 4 farklı bölge tespit edilmiştir. TMEB'deki taneler dönme yönünde yönlenmiş, ITAB'daki tanelerde ise irileşme gözlenmiştir. Ana metaldeki sertlik değerleri %2 takviyeli malzemede 120, %5 takviyeli malzemede 121 %8 takviyeli malzemede 123 HV olarak ölçülmüş olup ITAB, TMEB ve karıştırma bölgelerinin sertlik değerleri ise sırasıyla %2 takviyeli malzemede 100, 124 ve 113, %5 takviyeli malzemede 104, 125 ve 115, %8 takviyeli malzemede ise 109, 122 ve 117 olarak ölçülmüştür. ITAB'daki azalışın çökelti irileşmesinden TMEB'deki artışın ise artan dislokasyondan olduğu düşünülmektedir. Çekme mukavemeti değerleri ise %2 takviyeli malzemede 158,67 MPa, %5 takviyeli malzemede 185,01 ve %8 takviyeli malzemede ise 200,84 MPa olarak ölçülmüştür. Takviye oranı arttıkça mukavemet artmıştır.

Taban (2004), çalışmasında 6,4 mm kalınlığındaki AW-5083 ve AW 5086 alüminyum alaşımı levhaları MIG, TIG ve Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirerek mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. SKK yöntemi ile birleştirilen numunelerin mekanik özelliklerinin MIG ve TIG yöntemi ile gerçekleştirilen kaynak işlemlerine eş ve daha iyi olduğu sonucuna ulaşmıştır. SKK yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirme işleminde açılma çarpılma görülmemiş olup ısı girdisinde dolayı MIG ve TIG yönteminde görülmüştür. SKK yöntemi sonucu birleştirilen levhalar MIG ve TIG yöntemi ile birleştirilen levhalara göre daha üstün mekanik özellikler göstermiştir. SKK yöntemi ile gerçekleştirilen birleştirmedeki kaynak dikişlerinin boyutları MIG ve TIG yöntemine göre %25 daha küçük olduğu görülmüştür. Aynı zamanda SKK yönteminde istenmeyen bileşik oluşumu ve çökelti gözlenmemiştir.

Köse (2011), çalışmasında AA 5754 H22 alüminyum alaşımı levhaları farklı kaynak akımı, gerilim ve kaynak hızlarında robot MIG yöntemi ile birleştirerek mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. 70 – 80 ve 90 A akım, 60 ile 79 cm/dak kaynak hızı ve 17 ile 18 V gerilimde değişen parametreler kullanılmış olup Argon gazı ile 20 lt/dak debide uygulanmıştır. Birleştirme işleminde DC Pulse akımı kullanılarak düşük ısı girdisi sağlanmış ve çarpılma gözlenmemiştir. Çekme işleminde numunelerin hiçbirinde kaynak metalinden kopma olmamış ve ITAB'dan sünek kopma gözlenmiştir. Deney numuneleri haddelenerek üretildiğinden dolayı uniform

boyun verip kopma olmuştur. ITAB'daki dayanım yeniden kristalleşme sebebi ile düşmüştür. Kaynak parametrelerinin değişmesi ile kaynak dikiş profili de değişmiştir. Kaynak dikişinde görülen gözeneklilik makul ve kabul edilebilir ölçülerde gerçekleşmiştir. Sertlik değerleri sırasıyla ana metal, kaynak metali ve ITAB olmak üzere azalmıştır. Esas metalde homojen yapı gözlenirken kaynak bölgesinde soğumadan dolayı dentritik yapı gözlenmiş ITAB'da daha bozuk bir yapı görülmüştür.

Ayvaz ve Çetinel (2014), gerçekleştirdikleri çalışmada farklı matrislere ağırlıkça değişen oranlarda B₄C takviye malzemesi ekleyerek toz metalürjisi yöntemiyle kompozit malzeme üretmişlerdir. Takviye malzemesi miktarının, farklı matris malzemelerinin ve değişken üretim şartlarının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Matris malzemesi olarak Al₅Cu, Al₅Mg ve Al_{2.5}Cu.2Mg seçilmiş, takviye malzemesi olarak da ağırlıkça %5, 10, 20 ve 30 oranlarda 40 µm boyutundaki B₄C eklenmiştir. Matris ve takviye malzemesi tozları kuru ortamda 30 dev/dak dönme hızında 5 saat karıştırılmıştır. Toz karışımlar 100 tonluk hidrolik preste 200 ve 400 MPa yük altında basılıp Ø20x10 mm boyutlarında numuneler elde edilmiş ve 560 °C'de 60, 120 ve 240 dakika boyunca sinterleme işlemi uygulanmıştır. Presleme basıncının artması teorik yoğunluğu ve mikrosertliği artırmıştır. Takviye malzemesi oranının artması yoğunluğu düşürürken sertliği artırmıştır. 60 dk sinterleme süresinde gözenekli yapının tam kapanmadığı görülmüştür. Matris malzemesinde Mg ilave edilmesi malzemenin mikrosertliğini ve yoğunluğunu düşürmüştür.

Çakır (2007), çalışmasında toz metalürjisi yöntemi ile üretilen alüminyum numunelerin sürtünme karıştırma kaynak (SKK) yöntemi ile kaynaklanabilirliğini araştırmıştır. Al tozları 290, 330, 370 ve 410 MPa değişken basınçlarda 45x55x5 mm boyutlarındaki bloklara basılmış ve 600 °C'de 60 dakika sinterlenerek kaynak işlemine hazır hale getirilmiştir. Numuneler alın altına kaynak yapılarak mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. SKK işleminde 900 dev/dak dönme hızı ve 6 mm/dak ilerleme hızında en iyi sonuç alınmıştır. Basıncın artmasıyla sertliğin arttığı görülmüştür. Sabit kaynak ilerleme hızında karıştırıcı ucun devir hızının artması ile giren ısı miktarının artması sonucu kaynak yüzeyinde pürüzlülük görülmüştür. 1400 dev/dak dönme ve 6 mm/dak ilerleme parametrelerinde ısı girdisinin artmasından dolayı yanma ve yüzeyde bozukluk görülmüştür. Kırılma testlerinde kırılma işlemi

numunelerin ITAB bölgesinde meydana gelmiştir ve ana malzemeye göre kaynak bölgesinin mukavemetinin daha yüksek olduğu görülmüştür ve sertlik artmıştır.

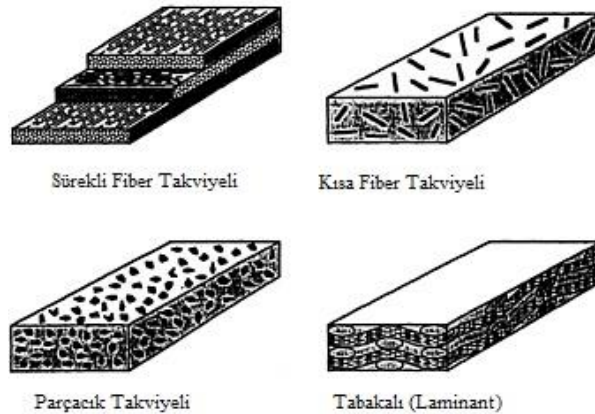
Çetkin ve diğ. (2019), gerçekleştirdikleri çalışmada AA 5182 ve AA7075 alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile birleştirilmesinde karıştırıcı ucun dönme devri, kaynak ilerleme hızı ve karıştırıcı uç geometrisi gibi farklı kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere ve mikroyapıya olan etkisini incelemiştir. Al alaşımları 800x240x5 mm ölçülerinde alın altına kaynağa hazır hale getirilmiştir. K100 çeliğinden yapılmış üçgen profilli ve konik helisel kanal profilli iki farklı uç 3° eğim açısında kullanılmıştır. İki farklı uç, 980, 1325, 1800 dev/dak dönme hızları ve 108 ve 233 MM/dak ilerleme hızlarında farklı birleştirme işlemleri uygulanmıştır. En yüksek çekme dayanımı, 980 dev/dak dönme devri, 108 mm/dak ilerleme hızı ve helisel konik uç parametresinde elde edilmiştir. Helisel konik uç ve düşük ilerleme hızı mekanik özellikler üzerinde daha iyi sonuç vermiştir. Düz ve oluksuz uçların kaynak sırasında gözenek ve boşluklu yapıyı artırması olumsuz olarak yansımıştır.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Bir kompozit malzeme, aralarında farkedilebilir bir arayüze sahip iki veya daha fazla farklı malzemenin makroskopik bir birleşimi olarak tanımlanabilir. Kompozitler yalnızca yapısal özelliklerinden dolayı değil aynı zamanda mekanik, elektriksel, termal, tribolojik ve çevresel uygulamalar için de kullanılabilir. Genellikle, uygulama alanlarında istenen özellikleri sağlamak için optimize edilmektedir. Ortaya çıkan kompozit malzemedan, tek başına bileşenlerinin sağladığı özelliklerinden daha üstün bir performans sağlaması beklenir. Kompozit malzemelerden kullanım alanı ve ihtiyaca göre yüksek mukavemet, yorulma dayanımı, aşınma direnci, korozyon direnci, tokluk, ısı dayanımı, ısı iletkenliği, elektriksel direnç veya elektrik iletkenliği, akustik sönümlenme gibi özelliklerin geliştirmesi beklenmektedir (Miracle ve Donaldson 2001).

3.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, matris malzemesi türüne göre ve takviye malzemenin şekline göre sınıflandırılmaktadır. Matris malzemesinin türüne göre polimer matrisli, seramik matrisli ve metal matrisli kompozit malzemelerdir. Diğer sınıflandırma türü ise takviye malzemesinin şekline göre uzun veya kısa fiber, tabakalı (laminant), parçacık takviyeli ve karma kompozit malzemelerdir.



Şekil 3-1: Takviye Malzemesinin Şekline Göre Kompozit Malzemeler (Zweben 1998)

Ana malzeme olarak tanımlanan matris fazının görevi takviye fazının bütünlüğünü sağlamak ve bir arada tutmaktır. Kompozit malzemeye gelen yükü takviye malzemesine iletir ve dağıtır. Takviye fazının matris malzeme içerisinde homojen olarak dağılımının sağlanması istenen mekanik özelliklerin sağlanabilmesi için önemlidir (Muratoğlu ve Demirel 2009). Takviye fazından beklenen ise matrisin rijitliğini ve mukavemetini artırarak malzemeye gelen yükü taşımaktır (Özdin 2006).

Kompozitlerin genellikle matris fazından daha sert ve daha güçlü bir fiber ya da partikül takviye fazına sahiptir. Pek çok takviye fazı genellikle iyi termal ve elektrik iletkenliğe, matris fazından daha düşük bir termal genleşme katsayısına ve daha yüksek bir aşınma direncine sahiptir (Miracle ve Donaldson 2001).

3.1.1 Polimer Matrisli Kompozit Malzemeler

Polimer matrisli kompozit malzemelerin matris malzemesi termoset veya termoplastik esaslı malzemelerden oluşmaktadır. Düşük yoğunluk, üretim kolaylığı, yalıtkanlık ve ekonomik özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptir. En çok bor, cam ve karbon fiber takviye elemanları ile birlikte kullanılmaktadır. Isıl dayanımlarının düşük olması yüksek sıcaklıklarda kullanımlarını sınırlandırmaktadır. Polimer matrisli kompozit malzemeler, kalıplama ve profil çekme yöntemleri ile üretilmektedir (Fidan 2011).

3.1.2 Seramik Matrisli Kompozit Malzemeler

Seramik malzemeler, sahip olduğu yüksek sıcaklık dayanımları özelliği nedeniyle kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak tercih edilmektedir. Seramik matrisli kompozit malzemeler, düşük yoğunluğa sahip ve yüksek korozyon direncine sahiptirler. Gevrek yapıda olup, çekme dayanımları düşüktür. Buna karşın yüksek basma direncine ve yüksek kayma dirençleri vardır. Plastik şekil vermeye uygun olmayıp gevrek kırılma karakteristiği gösterirler. ZrO, Al₂O₃ ve SiC en çok tercih edilen matris malzemeleridir. Savunma ve uzay sanayisinde tercih edilmektedir (Çalın 2006).

3.1.3 Metal Matrisli Kompozit Malzemeler

Metal matrisli kompozit malzemeler (MMK), matris malzemesi metal esaslı alaşımlardan oluştuğu için bu şekilde adlandırılmaktadır. Metal esaslı alaşımlara göre daha üstün elastisite modülleri, mukavemetleri, aşınma dirençleri, termal dirençleri ve yorulma dirençlerinden dolayı MMK'lar üzerine gerçekleştirilen araştırma faaliyetleri ve bunun sonucunda kullanım alanları artmıştır. MMK'larda en fazla seramik takviye elemanları kullanılmaktadır. MMK'ların kullanım amacı, metal alaşımlarının süneklik ve tokluk özellikleri ile seramik malzemelerin elastisite modülü ve mukavemeti gibi üstün özelliklerinin birleştirilmesidir. MMK'ların özelliklerini, kullanılan matris malzemesi, takviye malzemesi ve matris-takviye fazı arayüzü belirlemektedir. MMK'larda çeşitli matris malzemeleri kullanılsa da havacılık, uzay ve otomotiv endüstrisindeki daha hafif malzemelerin kullanılma talebi alüminyum ve titanyum alaşımlarının matris malzemesi olarak tercih edilmesini artırmıştır.

Matris malzemesinin seçiminde, kullanım yeri ve amacı belirleyici olmaktadır. Genel olarak mukavemet, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme, yoğunluk ve maliyet matris malzemesinin seçiminde etkilidir. MMK'lar ile ilgili ticari çalışmaların çoğu matris malzemesi olarak Al alaşımları üzerine yapılmıştır. Hafiflik, çevresel dirençler ve üstün mekanik özellikleri alüminyumun matris malzemesi olarak tercih edilmesini artırmıştır. Al alaşımlarının ergime noktası, birçok uygulama alanında kullanılacak kadar yüksek ve kompozit malzemenin işlenebilmesini sağlayacak kadar da düşüktür (Schwartz 1997). Alüminyum alaşımları, mukavemet ve ısı kapasiteleri titanyum alaşımlarından daha düşük olmasına rağmen daha düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı belirli özellikler temelinde titanyum ile rekabet edebilmektedir. Ayrıca titanyum alaşımlarına göre daha düşük maliyetlidir. Kullanım amaçlarına göre süneklik, kırılma tokluğu ve yorulma direnci gibi faktörler de matris malzemesinin seçiminde belirleyici olmaktadır.

Seçimde etkili bir diğer faktör ise matris malzemesi ile takviye malzemesinin birbiri ile uyumluluğudur. İki faz arasında kimyasal reaksiyon oluşmamalıdır. Bu durum, ara yüzeyde intermetalik bileşiklerin oluşması ile takviye fazına aktarılan yükün azalmasıdır. Ayrıca bu reaksiyonlar çatlaklara yol açabilmektedir.

Seramik takviye elemanlarının süneklik ve tokluk özelliklerinin düşük olmasından dolayı seramik takviyeli kompozit malzemelerin bu özellikleri takviyesiz metal alaşımlarına göre daha düşüktür. Bu nedenle MMK'lardaki matris malzemesinin seçiminde daha yüksek sünekliğe ve kırılma tokluğuna sahip malzemeler tercih edilmektedir (Pandey ve diğ. 2001).

Uluköy ve diğ. (2015), gerçekleştirdikleri çalışmada santrifüj döküm yöntemi ile ürettikleri hacimce %15, 9 µm boyutlu SiC takviyeli AA 2014 matrisli kompozit malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Döküm işlemi sonrası yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Kompozit malzemenin santrifüj döküm ile üretimi sırasında SiC partikülleri, yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı silindirin dış çapına çarpmış ve kompozit malzemenin homojen dağılımı etkileyerek Young modülünde değişikliklere yol açmıştır. Sertlik değerleri, döküm ve yaşlandırma işlemlerinde takviye malzemesi ve matris malzemesinin yoğun olduğu yerlere göre değişkenlik göstermiştir SiC ilavesi, çekme mukavemeti, akma sınırı ve kazımalı (fretting) aşınmayı olumlu yönde etkilemiştir.

3.2 Nano Kompozitler

Kompozit malzemeyi oluşturan matris ve takviye fazlarının en az birinin nano boyutta olduğu kompozit malzemelere nano kompozit malzeme adı verilir. Nano malzemelerin kompozitlerde kullanılmasının amacı daha üstün mekanik özelliklerin elde edilebilmesidir. Nano kompozit üretiminde en çok kullanılan matris malzemeleri Al, Mg, Ti ve Cu alaşımları olup takviye malzemeleri ise nano boyuttaki SiC, Al₂O₃, TiB₂ ve Y₂O₃'tür. Takviye elemanının boyutunun küçük olması toplam yüzey alanını artırır ve dislokasyon hareketleri zorlaştırır. Bu durum, matristen takviye fazına daha fazla yük aktarılmasını sağlar dolayısıyla daha mukavemetli malzemeler üretilebilir. Aynı zamanda matris ve takviye fazı arasındaki arayüzeyin uyumlu olması ve kuvvetli bir bağ yapısı matristen takviye fazına yük transferini daha iyi iletilmesini sağlamaktadır.

Kompozit malzeme üretiminde takviye fazı ıslanabilir olmalı ve matris-takviye fazları birbirleri ile iyi bir bağ oluşturabilmelidir. Nano takviye malzemelerindeki en büyük sorun ıslanabilirliğin az olması ve aglomerasyonun oluşması sonucu matris

malzeme içinde homojen olarak dağılma problemidir. Bu sebeplerden dolayı döküm yöntemi ile nano kompozit malzeme üretiminde malzemelerin dikkatli bir şekilde karıştırılması gerekmektedir (Çalışkan 2019).

3.3 Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

MMK malzemelerin üretim yöntemlerinde malzemenin kullanım alanı, boyutları ve takviye malzemesinin şekli belirleyici olmaktadır. Üretimde matris ve takviye fazının iyi bir arayüz oluşturması önemlidir. Matrisin sıvı, katı veya buhar fazında olmasına göre üretim yöntemleri adlandırılmıştır (Çavuşoğlu 2013).

3.3.1 Katı Faz Üretim Yöntemleri

3.3.1.1 Difüzyon Bağı ile Üretim

Difüzyon bağı ile üretim yöntemi ile fiber takviyeli MMK'ler üretilmektedir. Levha şeklindeki matris malzemeleri ile uzun fiber ya da levha şeklindeki takviye malzemelerinin belirli yön, açı ve aralıklarda ergime sıcaklığının altında presleme uygulanması ve difüzyonla birleşmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntemin uygulanması maliyetli ve karmaşık şekilli parçaların üretilmesi zordur (Çavuşoğlu 2013).

3.3.1.2 Toz Metalürjisi (T/M) ile Üretim

Toz metalürjisi yöntemi, süreksiz fiberli MMK'lerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntem, toz halindeki matris ve takviye malzemelerinin karıştırılarak kalıplanması ve preslenmesi esasına dayanır. Matris ve takviye fazı arasındaki bağı kuvvetlendirilmesi için sinterleme veya sıcak presleme işlemi de yapılmaktadır. T/M yönteminde malzeme kaybı azdır ve neredeyse parçanın nihai şeklinde parça üretimi gerçekleştirilmektedir. Ara yüzey reaksiyonlarının da en aza

indirgendiği bu yöntemle istenen mekanik özellikler elde edilebilmektedir (Baydemir 2018).

3.3.2 Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

3.3.2.1 Sıvı Metal İnfiltrasyonu ile Üretim

Sıvı metal infiltrasyon yöntemi, sıvı metalin basınç ya da vakum uygulanmadan preform adı verilen dizili takviye malzemelerinin arasına infiltre edilmesine dayanır. Takviye malzemesi oranı, infiltre edilen malzemenin başlangıç yoğunluğu ile kontrol edilebilir. Birbirine bağlı gözeneklilik ve uygun infiltre koşulları sağlandığı sürece sıvı metal preformun içine infiltre edilecektir (Schwartz 1997). Metal katılaştırken gözeneklerin yüzeyleri ince tanelerin oluşmasını sağlar. Yöntemin dışarıdan ek bir müdahale olmadan kendiliğinden olmasından dolayı takviye malzemenin ıslanabilirliğinin iyi olması gerekmektedir.

3.3.2.2 Püskürtme Yöntemi ile Üretim

Püskürtme yönteminde ergiyik metalin atomize edilmesi ve metal tozu imalatında olduğu gibi damlacıkların tamamen katılaşmadan yarı katı damlacıkların bir alt tabakada toplanması esastır. İşlem, metalin sıvı fazdan katı faza hızlı dönüştüğü, oda sıcaklığına ise yavaş bir şekilde soğuduğu hibrit bir katılaşma işlemidir. Bu durum, inceltmiş bir tane yapısını ve çökeltme yapısını sağlar ve daha çok ergime sıcaklığı düşük metallere uygulanmaktadır (Schwartz 1997).

3.3.2.3 Kompo Döküm ile Üretim

Kompo döküm prosesinde ergiyik metalin katılaşma aşamasında hızlı bir şekilde karıştırılır ve katı-sıvı karışımın içinde ince ve küresel geometrili katılardan oluşan bir karışım meydana gelir. Döküm aşamasında partikül, whisker ve fiber formlarındaki takviye elemanları eklenir. Kalıba dökülüp basınç işlemi katılaşma

sağlandıktan sonra kompozit malzeme üretilmiş olur. Geleneksel döküm işlemlerine göre daha düşük sıcaklıklarda uygulandığından takviye fazında kimyasal reaksiyon görülmemektedir. Hızlı çevirme işleminden dolayı fiber takviye elemanları zarar görebilmektedir (Çavuşoğlu 2013).

3.3.2.4 In-Situ Yöntemi ile Üretim

In-situ yöntemi ile MMK üretiminde takviye malzemesi, katı veya sıvı matris malzemesi içinde kimyasal reaksiyonlar ile sentezlenmektedir. Bu yöntem ile üretilen MMK'larda iyi bir arayüzey oluşumu görülürken takviye malzemesinin homojen olmayan dağılımı, topaklanma ve seramik partiküllerin zarar görmesi gibi olumsuz durumlar görülebilmektedir (Önal ve Gavgalı 2015).

3.3.2.5 Sıkıştırılmalı Döküm Yöntemi ile Üretim

Sıkıştırılmalı döküm yöntemi, alt ve üst kalıptan oluşan kalıbın alt tarafına ergiyik metalin eklenmesi sonrasında üst kalıbın inmesi veya alt kalıbın kaldırılması ile metale basınç uygulanıp katılaşması esasına dayanmaktadır. Seri üretime uygun bir yöntem olup, ölçeklenebilmesinde dolayı ekonomiktir. Basınç etkisiyle, üretilen malzemenin gözenekliliği azdır ve yüzeyi düzgündür. Sıkıştırma döküm yönteminde metal sıcaklığı, kalıp sıcaklığı, basınç süresi, bekleme süresi, kalıp malzemesi ve tasarımı dikkat edilmesi gereken parametrelerdir. Yüksek basınç gereksinimi, parça boyutunu sınırlandırmaktadır ve takviye malzemesinin basınç etkisi ile kırılması dezavantaj olarak sayılabilir (Çavuşoğlu 2013).

3.3.2.6 Karıştırılmalı Döküm Yöntemi ile Üretim

Genel olarak Al alaşımlarının üretilmesi için kullanılan döküm yöntemleri alüminyum matrisli kompozit malzemeleri üretmek için de kullanılabilir. Karıştırılmalı döküm yönteminden beklenen takviye malzemesinin ergiyik matris malzemesi içinde homojen olarak dağılımını sağlamasıdır. Döküm aşamasında geleneksel döküm

işlemlerinden bazı farklı uygulamaların yapılması gerekmektedir. Bu uygulamalardan bazıları altta belirtilmiştir;

- Geleneksel döküm işleminde gerçekleştirilen gaz alma tableti veya gaz gidericiler takviye malzemesi olarak kullanılan SiC partiküllerinde gaz kabarcıkları oluşturur ve ıslanabilirliğini engeller. Bunun yerine Argon SF₆ gazı ile çalışan döner enjeksiyon sistemi ergiyik malzemenin akışını sağlar ve gazını giderir. Ayrıca, ergiyikte emilen hidrojen gazı, argon gazının difüzör tüp ile ergiyike verilmesi sonucu sıvı metalin gazı giderilebilir.
- Aşırı ısınma sonucu Al₄C₃ oluşumunu engellemek için ergiyik sıcaklığının sık sık kontrol edilmesi gerekmektedir.
- Partikül takviyesinin homojen karışımının sağlanması için ergiyik karışım hafifçe karıştırılmalıdır. Özellikle seramik takviye malzemeleri matris alaşımından daha ağır oldukları için potanın dibine batma ihtimali mevcuttur.
- Gaz sıkışmasının önlenmesi için döküm sırasında türbülans en aza indirilmelidir.

Matris alaşımlarının ergitme işlemleri geleneksel döküm yöntemlerinde olduğu gibi indüksiyon, elektrikli dirençli ve gaz ile çalışan ocaklarda gerçekleştirilebilir. Ergitilecek alaşımların neminin alınması amacıyla 200 °C'nin üzerinde bir sıcaklıkta kurutma işlemi uygulanmalıdır. Kullanılacak diğer malzemelerin de kuru olduğundan emin olunmalıdır. Özellikle SiC takviyeli kompozit malzemenin üretimi esnasında aşırı ısınma yapılmamalıdır. 750 °C'de reaksiyon sonucu Al₄C₃ oluşumu yavaş iken 780-800 °C'lerde hızlanmakta ve bunun sonucunda da Al₄C₃ çökmesi akışkanlığı olumsuz etkilemekte ve korozyon direncini düşürmektedir.

Seramik takviye malzemelerinin yoğunluğu alüminyum matris malzemesinden fazladır (Al ~2,7 g/cm³, SiC ~3,2 g/cm³). SiC partikülleri matris malzemesi tarafında ıslandığından topaklanmaz ancak karıştırma işlemi uygulanmazsa potanın dibine çöker. Karıştırıcı ucun ergiyik malzemeler ile reaksiyona girmeyen malzemedan imal edilmesi ve kullanım sırasında kuru olması gerekmektedir. Ayrıca karıştırma işlemi vorteks oluşumunu engellemek için yavaş bir şekilde gerçekleştirilmelidir (Kunze 2001).

3.3.3 Buhar Faz Üretim Yöntemleri

3.3.3.1 Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi ile Üretim

Fiziksel buhar biriktirme yönteminde, vakum odasından geçirilen fiber takviye malzemesine metal buharları çökeltir ve fiberi kaplar. Kaplanan fiber, demet halinde toplanır ve sıcak presleme yapılarak kompozit malzeme üretilir. Pahalı bir yöntem olup üniform bir dağılım sağlar ve takviye malzemesinin yoğun olması istenen durumlarda tercih edilmektedir (Aytaç ve Malayoğlu 2018).

4. METAL MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN KAYNAKLI BİRLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Metal matrisli kompozit malzemelerin (MMK) endüstride kullanımında birleştirme işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Otomotiv, havacılık gibi kullanılan parçaların ağırlığının önemli olduğu sektörlerde birleştirme işlemlerinin cıvata, somun, perçin gibi makine elemanları kullanılmadan kaynak işlemi ile yapılması büyük önem taşımaktadır (Kahraman ve diğ. 2018). Kullanım yeri ve amacı, matris ve takviye malzemesinin türü ve parçanın şekline göre uygun kaynaklı birleştirme yöntemi seçilmelidir. Takviye malzemesi ilavesi, kaynak işleminde fiziksel ve kimyasal özelliklerde farklılaştırma oluşturduğundan MMK'ların kaynağı diğer metal alaşımlarına göre daha karmaşık ve araştırmaya açık bir konudur (Guo 2012). MMK'ların kaynaklı birleştirmesinde sıvı ve katı hal kaynak teknikleri kullanılabilir.

MMK'ların kaynak yöntemi ile birleştirme işleminde maliyetin düşük ve bilgi birikiminin yüksek olmasından dolayı ilk olarak sıvı hal birleştirme yöntemleri uygulanmıştır. Sıvı hal kaynak yöntemlerinde yüksek viskozite, kontrolsüz katılma, porozite oluşumu, aşırı ötektik oluşumu, zararlı fazlar ve istenmeyen reaksiyonlar gibi durumlar oluşabilir ve bu durum mikro ve makro hatalara neden olarak kaynak kabiliyetini düşürür (Kalaiselvan 2021). Dolayısıyla düzgün bir kaynak işlemi için uygun kaynak yöntemi, parametreler ve dolgu metalinin seçimi büyük önem taşır. Örneğin, Al-SiC kompozit malzemelerin kaynağında kırılğan Al_4C_3 oluşumu, Mg- Al_2O_3 veya Al-Mg- Al_2O_3 malzemelerin kaynağında $MgAl_2O_4$ spinel (yakut) fazı oluşumu görülebilmektedir. Benzer şekilde Ti-SiC kompozit kaynağında TiC, Al-B kompozit kaynağında AlB_2 oluşumu da istenmeyen reaksiyonlardandır (Guo 2012).

Katı hal kaynak yöntemleri ise sıvı hal kaynak yöntemlerinde karşılaşılan problemlerden dolayı kendine uygulama alanı bulmuştur. Katı hal kaynak teknikleri temelde aynı veya farklı iki malzemenin uygun basınç ve sıcaklık altında birleştirilmesi prensibine dayanmaktadır. Ergimiş kaynak havuzunun olmaması, sıvı hal kaynak yöntemlerinde karşılaşılan problemleri ortadan kaldırmaktadır. MMK'lara uygulanan bazı kaynak yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları Tablo 4.1'de belirtilmiştir.

Tablo 4.1: Çeşitli Kaynak Türlerinin Avantaj ve Dezavantajları (Guo 2012)

Kaynak Türü	Avantajları	Dezavantajları
TIG - MIG	Standart donanım, Kaynak teli kolaylıkla kullanılabilir.	Kimyasal reaksiyon oluşabilir, Takviyesiz kaynak teli ile düşük kaynak mukavemeti
Elektron Işın Kaynağı	Yüksek hızlı kaynak, Derin ve dar kaynak işlemine uygun	Kimyasal reaksiyon oluşabilir, Vakum gerekli
Lazer Işın Kaynağı	Yüksek hızlı kaynak, Vakum gerektirmez, Derin ve dar kaynak işlemine uygun, Düşük bozulma	Kimyasal reaksiyon oluşabilir, Koruyucu gaz gerekli, Uzun bağlantı gereksinimi
Direnç Kaynağı	Kısa termal döngü sebebiyle daha az çözünme/takviye reaksiyonu	Takviye partiküllerinin olası segregasyonu, Geometrik sınırlamalar
Difüzyon Kaynağı	Optimum bağ özellikleri için ara katman gerekebilir, Partikül-matris etkileşimi yok	Yetersiz veya aşırı kütle taşınımı, Uzun termal döngü
Sütünme Karıştırma Kaynağı	Parçacık-matris etkileşimi, çatlama, gözeneklilik, dolgu metali ve koruyucu gaz yok, Basit kaynak hazırlığı, Isıl işlem sonrası elde edilen tam bağ	Büyük ve pahalı ekipman, Düz plaka kaynağı ile sınırlı, Kaynak ekipmanlarının hızlı aşınması

4.1 Sıvı Hal Kaynak Yöntemleri

4.1.1 Ark Kaynağı

Ark kaynağı temelde kaynak işlemi için gereken ısıyı bir kaynak teli yardımıyla elektrik enerjisi kullanılarak ergitilmesi ve parçaların birleştirilmesi prensibine dayanır. TIG ve MIG kaynağı en yaygın kullanılan ark kaynağı yöntemlerindedir. TIG kaynağında tükenmeyen bir tungsten elektrot kullanılırken MIG kaynağında ise tükenen ve beslenen bir metal elektrot kullanılmaktadır. Her iki yöntemde de inert gaz akışı ile kaynak işlemi gerçekleştirilir.

Düzgün bir kaynak işleminin uygulanabilmesi için kaynak parametrelerinin iyi seçilmesi gerekir. SiC takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin kaynağında düşük ısı girdisi ve yüksek oranda Si içeren kaynak teli kullanımı kaynak işleminde oluşan Al_4C_3 oluşumunu en aza indirebilir. Al_2O_3 takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin ark kaynağında da Mg içeren kaynak teli kullanımı da Al_2O_3 partiküllerinin nem alma ve topaklanma etkilerini engelleyebilir (Stantz ve diğ. 1992).

Uluköy (2017), çalışmasında hacimce %14 ve %20 olmak üzere farklı SiC takviye oranlarına sahip AA 2014 matrisli kompozit malzemenin farklı parametrelerdeki darbeli MIG kaynağı ile birleştirilmesinin kaynak bölgesi, ITAB ve esas malzemedeki mikroyapılara olan etkisini incelemiştir. Isı girdisinin mikroyapıya olan etkisini belirlemek için 110 ve 120 A olmak üzere farklı akım değerlerinde farklı takviye oranlarına sahip kompozit malzemelerin ayrı ayrı birleştirme işlemi yapılmıştır. SEM ve XRD ile gerçekleştirilen mikroyapı incelemeleri sonucu hacimce %14 takviyeli AA 2014 matrisli kompozit malzemenin kaynak bölgesinde iki farklı akım değerinde de Al_4C_3 oluşumu görülmemiş ancak SiC takviyesinin artırılması ile faz oluşumu gerçekleşmiştir. Oluşan Al_4C_3 fazı, mekanik özellikleri daha kötü etkileyen iğnemsî yapıda oluşmamıştır. Tüm kaynak işlemlerinde Al_2Cu çökeltileri gözlenmiştir. Isı girdisi ve SiC takviyesinin artırılması ile kaynak bölgesi ve ITAB'da gözenekli yapı artmıştır. Isı girdisinin artması ile esas metalden kaynak bölgesine Mn ve Fe difüzyonu oluşmuştur. Darbeli akım ile kaynak işleminin yapılması, takviye oranının ve ısı girdisinin artırılmasına rağmen ergime bölgesinde Al_4C_3 oluşumuna neden olmadığı sonuçlarına ulaşmıştır.

Coo (2007), çalışmasında kaynak telinde Ti ilavesinin %20 SiC takviyeli Al 356 matrisli kompozit malzemenin TIG kaynağında istenmeyen Al₄C₃ oluşumunu azaltabileceği sonucuna ulaşmıştır.

Garcia ve diğ. (2003), çalışmalarında TiC takviyeli Al matrisli kompozit malzemenin MIG kaynağında doğrudan ve dolaylı elektrik arkın kaynak işlemine etkisini incelemiştir. Dolaylı elektrik arkı kullanılarak gerçekleştirilen kaynak işleminde ihmal edilebilir düzeyde TiC çözünmesi meydana gelirken doğrudan elektrik ark kullanılan MIG kaynağında ise bir miktar TiC çözünmesi gerçekleşmiştir.

Metal matrisli kompozit malzemelerin kaynağında ise matris-takviye malzemesi arasındaki termal genleşme farkı, seramik takviye elemanlarının daha yüksek ergime noktaları, yüzey reaksiyonu oluşması gibi durumlar kaynak bağlantısının mekanik özelliklerini düşürmektedir. Bu nedenle kaynak işleminde ana metalle uyumlu ve takviye fazının ıslanabilirliği iyi olan bir dolgu malzemesinin eklenmesi gerekmektedir.

4.1.2 Elektron Işın Kaynağı

Elektron ışın kaynağı (EBW), yüksek enerjili elektron ışınları ile üretilen ısıyı kullanıp birleştirme işlemini gerçekleştiren bir sıvı hal kaynak tekniğidir. Elektronların birleştirme gerçekleştirilecek iş parçasına çarparak kinetik enerjileri ısı enerjisine dönüşür ve parçalar birbiri ile birleştirilir. Elektron ışınlarının dağılmasını önlemek için vakum işlemi uygulanır. Havacılık, otomotiv, savunma sanayi, yarı iletkenler, tıp gibi alanlarda uygulamaları mevcuttur (Kalaiselvan 2021).

Cui ve diğ. (2010), çalışmalarında kaynak işlemi sırasında elektron ışınlarının dairesel şekilde hareket ettirilmesinin ergiyik havuz içerisinde karıştırma etkisi göstereceğini ve bunun gözeneklerini azalttığını ve homojen dağılımı sağladığını bildirmişlerdir.

Peng ve diğ. (2011), çalışmalarında elektron ışın kaynağı ile TiB₂/ZL101 kompozit malzemenin kaynak özelliklerini araştırmışlardır. Kaynak işlemi farklı ısı girdilerinde yapılmış olup plakanın tam birleşimi 2340 W elektron ışın gücü altında

gerçekleştirilmiştir. Numunelerin tümünde derinlik/genişlik oranları 2,5 mm üstünde ve giriş çapı 0,1 mm idi. Bunun sonucunda ısı tesiri altında kalan bölge çok küçük olmuştur. Güç 2,8 kW'ya yükseltildiğinde ise aşırı birleşme gerçekleşmiştir.

SiC takviyeli kompozit malzemelerin kaynak işleminde ise ısı dönüşümün hızlı olması ve düşük ısı girişinin Al_4C_3 oluşumuna sebep olduğu, elektron ışınlarının takviye malzemesi tarafından absorbe edilmemesinden dolayı da reaksiyona girip aşırı ısınmaya sebep olacağı belirtilmiştir. Yüksek ilerleme hızı ve ışının bir noktaya odaklanarak kaynak işleminin yapılmasının istenmeyen reaksiyonları azaltacağı sonucuna ulaşılmıştır (Bozkurt 2008).

4.1.3 Lazer Işın Kaynağı

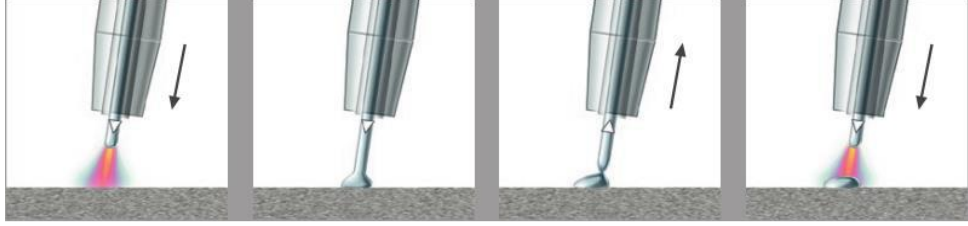
Lazer ışın kaynağı (LBW), lazer ışının iki metal parça arasına odaklanıp yoğunlaştırılmış bir ısı kaynağı sağlaması ile iki metal parçanın ergitilip birleştirilmesi esasına dayanan sıvı hal kaynak yöntemidir. Otomotiv endüstrisi gibi otomasyona uygun ve yüksek hacimli uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek ve odaklanabilir ısı kaynağı sunması, daha yüksek hassasiyette kaynak işlemini gerçekleştirebilmesi, otomasyona uygun 3 boyutlu kaynak imkanı, düşük bozulma ve vakum ihtiyacı duymaması gibi sebeplerden dolayı MMK'larda tercih edilmektedir (Kalaiselvan 2021).

Diğer ergitmeli kaynak teknikleri ile karşılaştırıldığında lazer kaynağındaki derin ve dar ergitme bölgesi ısıdan etkilenen çok daha küçük bir bölge üretir ve daha az termal bozulma ve mekanik özelliklerin olumsuz etkilenmesi ile sonuçlanır (Guo ve diğ. 2012).

4.1.4 CMT Kaynağı

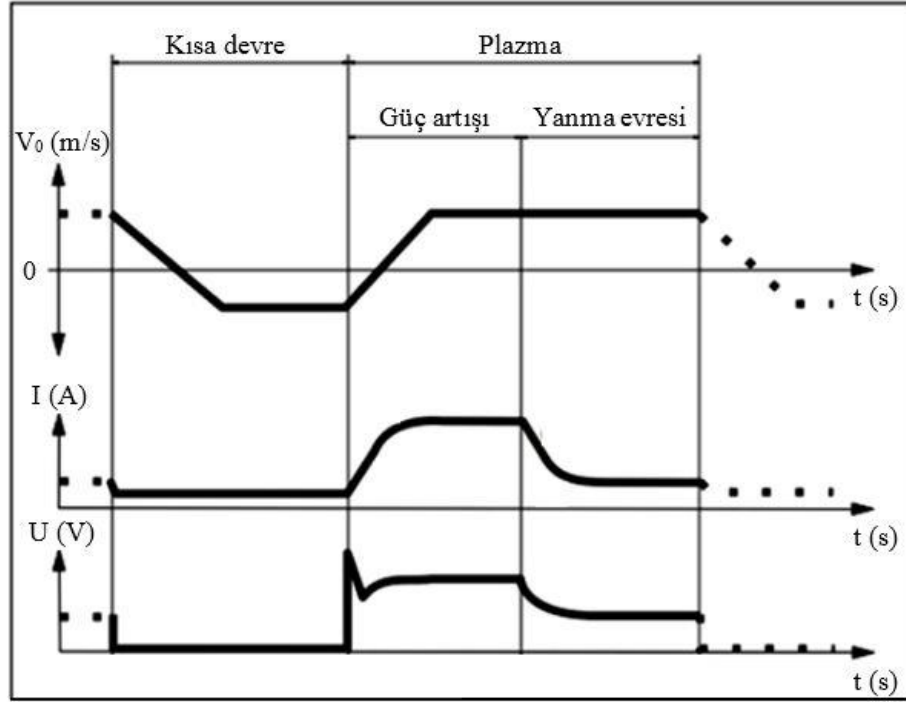
CMT (Cold Metal Transfer) kaynağı, 2004 yılında Fronius tarafından patentlenen ve kısa devre (daldırma metal transfer) prensibine dayanan bir kaynak yöntemidir (Kah ve diğ. 2013). Bu kaynak yöntemi ile işlem sırasında ısı girdisinin azaltılarak geleneksel ark kaynağında karşılaşılan yüksek ısı girdisi kaynaklı, birleşme

bölgesindeki mekanik özelliklerin zayıflamasının engellenmesi amaçlanmıştır. İnce sac ve levhaların kaynak ile birleştirilmesi işleminde düşük ısı girdisinden dolayı iyi sonuçlar alınabilir. CMT kaynağının, geleneksel gaz metal ark kaynağından en önemli farkı ark boyu, akım, gerilim, metal transferi miktarı ve ısı girdi miktarının otomasyon sistemi ile kontrol edilen tel elektrod sürme sistemine sahip olmasıdır (Kahraman ve diğ. 2018).



Şekil 4-2: CMT kaynak yönteminin çevrimi (Tapiola 2017)

MIG kaynağında malzeme transferi elektriksel olarak kontrol edilir yani kısa devre oluşana kadar tel elektrod ilerler, kısa devre ile birlikte akım artar ve kaynak bölgesine yüksek ısı girdisi olur. CMT işlemi ise malzeme transferini hem kısa devrenin başlatılması ve süresi ile hem de mekanik destekli yöntemlerle kontrol eder. Ana yenilik, tabancaya entegre edilen, kısa devre meydana geldiği anda 70 Hz'ye kadar salınım yapabilen ve alternatif akımla çalışan servomotorun tel elektrodu geri çekmesi ve damla transferine yardımcı olmasıdır. Böylelikle elektromanyetik kuvvet olmadan metal, kaynak banyosuna transfer edilir ve ısı girdi büyük ölçüde azaltılmış olur. Damla transferi sonrası ark ateşlenir, tel elektrod tekrar ileri sürülür ve kaynak döngüsü devam eder (Kah ve diğ. 2013). Dolayısıyla yöntemin ismindeki soğuk ifadesinin sebebi kısa ark sürelerinden dolayı ısı girdisinin MIG ya da MAG kaynak yöntemlerine göre daha az olmasıdır.



Şekil 4-3: CMT kaynak yöntemine ait akım-zaman, gerilim-zaman ve tel sürme hızı-zaman eğrileri (Kahraman ve diğ. 2018)

Durmuş ve Çömez (2018), çalışmalarında alüminyum levhaların CMT yöntemi ile kaynağı sonrasında korozyon davranışlarını incelemiştir. 2 mm kalınlığındaki AA 5754 alüminyum levhalar alın altına getirilerek üç farklı kaynak parametresinde birleştirilmiştir. 103 A akım değeri, 13,3 V gerilim ve 1 m/dak kaynak hızında 73,97 J/mm ısı girdisi, 114 A, 14 V ve 1 m/dak'da 86,18 J/mm ısı girdisi ve son olarak da 87 A, 11,6 V ve 0,5 m/dak'da 108,99 J/mm ısı girdisi olmuştur. Kaynaklı birleştirmelerin mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiş ve %3,5 NaCl çözeltisinde korozyon hızı belirlenmiştir. Kaynak işleminde tam nüfuziyet sağlanmış, az miktarda ise gözenek oluşmuştur. Isı girdisi arttıkça kaynak dikişinin boyu da artmıştır. Isı girdisinin artması korozyon direncini azaltmıştır. Yeterli korozyon direnci için 85 J/mm altındaki ısı girdilerinde birleştirme işleminin gerçekleştirilmesi ve korozyon dayanımını azaltan β fazından dolayı Mg içeriği daha düşük olan kaynak telinin seçilmesi önerilmiştir.

Grzybicki ve Jakubowski (2013), gerçekleştirdikleri çalışmada 0,8 mm kalınlığındaki DC 04 çelik sacının CMT, MAG, sinerjik MAG, darbeli sinerjik MAG yöntemleri ile kaynak işlemlerini gerçekleştirmiş ve kaynaklı bağlantıların mekanik ve mikroyapı özelliklerini incelemiştir. 60x300x0,8 mm boyutlarındaki çelik levhalar, belirlenen parametrelerde dört farklı kaynak yönteminde alın altına kaynak

yapılmıştır. Farklı kaynak yöntemlerindeki kaynak yüzeyi, ısıdan etkilenen bölge, kaynak başlangıcı ve sonundaki değişimler incelenmiştir. CMT kaynağı ile birleştirilen parçaların yüzeyleri düzgün ve görüntüsü tekrarlı halka şeklinde oluşmuştur. CMT yöntemindeki tüm bağlantılarda neredeyse hiç sıçrama görülmezken geleneksel yöntemler ile gerçekleştirilen bağlantılarda sıçrama ve yanık görülmüştür. CMT yönteminde diğer yöntemlere göre daha dar ısıdan etkilenen bölge oluşmuştur. CMT birleştirmelerinde kaynak boyunca kabarcık, mikro çatlak ve gözenekler şeklinde belirgin kusurlar görülmemiştir. Gerçekleştirilen çekme testlerinde CMT kaynağında kırılma kaynak bölgesi dışında gerçekleşirken, darbeli sinerjik MAG kaynağında kırılma kaynak bölgesinde gerçekleşmiştir. Sertlik testleri, ana malzeme, ısıdan etkilenen bölgede, kaynak bölgesinde olmak üzere sabit aralıklarla yapılmış ve tüm kaynak işlemlerinde kaynak yönüne doğru sertlik artmıştır. CMT yönteminin MAG yöntemlerine göre daha düşük enerji kullanan, sıçrama yapmayan yüksek kaynak hızlarında ince sacların kaynağının yapılabildiği sonucuna ulaşmışlardır. CMT yönteminin bazı parametrelerinde ise yaklaşık %1'lik karışım oranı ile eksik ergime gerçekleşmiş ark boyunun artırılması ile karışım oranı %5'in üzerinde güvenli bir değere çıkarılmıştır.

4.1.5 PMC Kaynağı

PMC (Pulse Multi Control) kaynak yöntemi, darbeli metal transferinin kontrolüne dayanan bir gazaltı kaynak tekniğidir. MIG, MIG pulse gibi yöntemler ile kıyaslandığında, PMC sistemindeki sürücü, hızlı kontrol algoritmaları ile optimize edilmiş darbeli püskürtme arkı sayesinde ark ateşlemesini iyileştirip, süreç stabilitesini artırıp, tortu penetrasyonunu stabilize ederek kaynak işleminde daha az ısı girdisi sağlamaktadır (Gomes ve diğ. 2018).

PMC yönteminde işlemci tarafından tüm süreçler kontrol edilir. Tel ayarının yapılması sonucu kaynak sırasında iş parçasıyla torç arasındaki mesafe değiştiğinde işlemci, akım ve kaynak nüfuziyetini sabit tutarak ark kararlılığı sağlar ve kaynak nüfuziyeti daha kararlı hale gelir. Geleneksel gazaltı kaynak tekniklerinde ise mesafe değişikliğinde kaynak akımı sabit kaldığından kaynak gücü düşmektedir. Bunun sonucunda kaynak nüfuziyeti düşük olduğunda istenen kaynak kalitesi elde

edilememekte yüksek olduğunda ise kaynak akımı artacağından ince sacların kaynağında dikiş düşebilmektedir. Kısa ark boylarında daha güvenli ve hatasız bir damla geçişi sağlanmaktadır. PMC yöntemi, hızlı ayarlamaya imkan verdiği için kısa devre süresi asgaride tutularak gerilimi azaltır. Ark boyu stabilizatörü sayesinde ark kısa tutulur ve arkın kararlı olması sağlanır. Kaynak programları sayesinde seri üretimdeki robot kaynak işlemleri sırasında manuel ayar yapılmasına gerek duyulmadığından zaman tasarrufu sağlamaktadır (Fronius 2021).

Gomes ve diğ. (2018), Al-Mg alaşımlarında katmanlı yüzey üretilmesinde CMT, CMT-Pulse, PMC, PMC-Mix ve MIG Pulse yöntemlerini uygulayarak üretilen parçaların sertlik, mukavemet ve gözenekliliğini incelemiştir. 10 mm kalınlığındaki AA 6082 çubuklar ve 1,2 mm çapındaki ER5356 tel ile 35x125 mm ölçülerinde çok katmanlı parçaların üretimi için seçilmiştir. Çalışmada, tek yönlü süreksiz ark, çift yönlü süreksiz ark ve tek yönlü sürekli ark olmak üzere 3 ayrı hareket ile katman oluşturma gerçekleştirilmiştir. Katman oluşturma işleminde; 46-49 A akım, 12,1-16,1 V gerilim, 2,8-3,5 m/dak tel besleme hızı ve 60 cm/dak hareket hızı katman oluşturma parametreleri olarak seçilmiştir. Koruyucu gaz olarak argon gazı 15 l/dak akış hızında ve %99,99 saflıkta kullanılmıştır. Tek yönlü sürekli ark ile üretilen parçaların geometrisi daha düzenli olurken diğer hareketlerde tümsekler oluşmuştur. Parametrelerin kontrol edilmesi ile bu sorunun çözülebileceğini bildirmişlerdir. Tüm yöntemlerle üretilen parçaların mekanik özellikleri birbirine benzer olmuştur. CMT yönteminde en fazla birikim gerçekleşmiş fakat homojen olmayan bir yapı ortaya çıkmıştır. MIG pulse ve PMC yönteminde diğer yöntemlere kıyasla daha küçük gözenekli yapılar oluşmuştur. Genel olarak katmanlı yüzey üretiminde, en iyi mekanik özellikler, en küçük gözenekli yapılar ve düzenli yapıya sahip parçalar PMC yönteminde elde edilmiştir.

4.2 Katı Hal Kaynak Yöntemleri

4.2.1 Difüzyon Kaynağı

Difüzyon kaynağında, birleştirilecek parçaların ergime noktası altındaki bir sıcaklıkta belirli bir yük altında parçalar arasında katı hal bağı oluşturulur. MMK'ların kaynaklı birleştirilmesinde kullanılır ancak uygulamada bazı kısıtlamalar mevcuttur. Genel olarak birleştirilecek yüzeylerin hazırlığı, ara katman ve işlem süresi, sıcaklık, basınç gibi diğer parametreler optimum birleştirme için büyük önem taşır. MMK'ların difüzyon kaynağı ile birleştirilmesindeki kilit nokta kaynak kalitesinin artırılması için uygun ara katmanın kullanılmasıdır (Guo 2012).

Zang ve diğ. (1999), çalışmalarında Al-SiC kompozit malzemenin difüzyon bağı ile kaynaklanabilirliğini incelemişlerdir. Al-Si-Mg yumuşak aktif tabakası ve saf bakır folyo çalışmada kullanılmıştır. Uygun ara katmanın kullanılması bağlantının kalitesini artırdığını ve birleştirilen parçanın mukavemetinde artışın sağlandığı sonucuna ulaşmışlardır. Başka bir çalışmada ise, Al-Al₂O₃ kompozit malzemesinin difüzyon kaynağı ile birleştirilmesinde ara katman olarak Al-Li alaşımı ara katman olarak kullanılmış ve alüminyum oksit parçalanmasını hızlandırmıştır (Urena ve diğ. 2000).

Difüzyon ile birleştirme işleminin genellikle matrisin çözelti işlem sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilmesinden dolayı kaynak işlemi sonrası daha fazla ısıl işlemin yapılması gerekmektedir. Yöntemin bir diğer sınırlaması ise kaynak işlemi sırasındaki basınç ve oluşan ısıdan dolayı, düşük sıcaklık mukavemetine sahip bazı MMK'ların makro deformasyona uğramasıdır (Çam ve Koçak, 1998).

4.2.2 Sürtünme Karıştırma Kaynağı

Sürtünme karıştırma kaynağında (SKK), alın altına eklenen parçalar, dönen bir pim bağlantı hattı boyunca hareket ettirilmesi ile birleştirme işlemi gerçekleştirilir. Dönen pim, sürtünme kuvveti ile birleştirilecek parçalara ısı enerjisi vererek, parçaların yumuşamasını sağlar. Pim, kaynak yönünde ilerledikçe şekil değiştirilebilir

sıcaklığa gelen malzeme pimin önünden arkasına doğru hareket eder ve birleştirme işlemi katı halde gerçekleşir. Matris ve takviye malzemeleri arasında herhangi bir kimyasal reaksiyon gerçekleşmemesinden dolayı MMK'ların kaynağında başarılı bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Ancak, birleştirme işlemindeki pimin dönme hareketi takviye partiküllerinin boyutu, şekli ve dağılımlarını üzerinde önemli bir etkiye sahip olup, pim seçimi ve parametreleri dikkatlice seçilmelidir (Kalaiselvan 2021). SKK yöntemi, gemi yapımı, yüksek hızlı tren imalatı, havacılık endüstrisinde yakıt tanklarının kaynağı gibi alanlarda Mg, Cu, Ti, Al matrisli kompozit malzemelerin kaynağında kullanılmaktadır (Çam 2011).

MMK'ların endüstriyel uygulamalarında partikül segregasyonu, matris ve takviye malzemesi arasındaki zararlı reaksiyonlar, homojen olmayan mikroyapılar geleneksel kaynak yöntemlerinde karşılaşılan zorluklardandır ve kaynaklı bölgenin mekanik özelliklerinin düşmesine neden olmaktadır. SKK işlemi ise ana malzemenin sahip olduğu mekanik özelliklere kaynak bölgesinde de ulaşılabilir. Ancak kaynak ekipmanlarının ekonomik olmaması, takımlarının hızlı aşınması ve kaynak işleminin düz plakaların kaynağı ile sınırlı olması geliştirilmeye açık konulardır.

5. MALZEME VE YÖNTEM

Çalışma kapsamında AA 6013 alüminyum alaşımı çubuk ve lama formundaki malzeme, karıştırmalı döküm yöntemi ile ergitilmiş ve takviye malzemesi olarak 15 nm boyutundaki Al₂O₃ nano tozlar ön ısıtma yapılarak ergiyik alüminyum alaşımına ilave edilmiştir. Kum kalıba döküm işlemi gerçekleştirilerek ağırlıkça farklı oranlarda (%0-0,5-1) takviye malzemesi içeren alüminyum matrisli kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen malzemelerin freze tezgâhında yüzeyleri temizlenmiştir. Kaynak işleminin gerçekleştirilebilmesi için testere ile uygun boyutlarda kesim işlemi yapılmıştır. CMT ve PMC yöntemleri ile farklı parametrelerde kaynaklı birleştirilmesi yapılan parçaların mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Mekanik özelliklerin incelenebilmesi için kaynaklı parçalar, deney numunesi boyutlarında testere ile kesilerek hazırlanmıştır.

Döküm işlemi, döküm parçaların yüzeyinden freze tezgahında talaş kaldırılması ve numune parçaların hazırlanması için testere ile kesim işlemi Pamukkale Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Talaşlı İmalat Laboratuvarında gerçekleştirilmiş, kaynaklı birleştirme işlemleri Fronius International firmasında tamamlanmış, çekme ve sertlik testleri ise Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Tahribatlı Muayene Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri ise Pamukkale Üniversitesi İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde (İLTAM) yapılmıştır.

5.1 Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

5.1.1 Matris Malzemesi

Matris malzemesi olarak seçilen AA 6013 alaşımı, ısıtma işlemi uygulanabilen şekillendirmeye uygun, kaynak yöntemi ile birleştirilebilen, işlenebilen ve korozyon direnci yüksek orta dayanımlı alaşımlardır. T6 yapay yaşlandırma işlemi uygulanması durumunda dayanımları önemli ölçüde artırılabilir. Kaynaklı birleştirmede yaygın olarak tercih edilip genellikle ekstrüzyon ürünü farklı yapı bileşenlerinin

birleştirilmesinde tercih edilmektedir (Taban 2004). Uluslararası standartlarda gösterimi $AlMg1Si0,8CuMn$ şeklindedir. Genel endüstri malzemesi olarak kullanılabilen AA 6013 alaşımı daha çok valf, makine parçaları, ABS fren sistemleri, hidrolik uygulamalarda kullanım bulmaktadır. Kaynak kabiliyeti yüksek bir alaşım olması, endüstride geniş uygulama alanı olması ve otomotiv sanayide kullanılabilmesi gibi özelliklerinden dolayı matris malzemesi olarak seçilmiştir. Alaşımın, kimyasal kompozisyonu, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'te gösterilmiştir.

Tablo 5.2: AA 6013 Alüminyum Alaşımının Kimyasal Kompozisyonu

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Değerler (%)	0,8	0,25	0,85	0,5	1	0,05	0,12	0,05	Kalan

(Zeid 2019)

Tablo 5.3: AA 6013 Alüminyum Alaşımının Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Yoğunluk	2,72 g/cm ³
Ergime Sıcaklığı	579 °C
Isıl Genleşme Katsayısı	21,7x10 ⁻⁶ °K ⁻¹
Elastisite Modülü	71 GPa
Isıl Kapasite	150 W/m.°K
Elektriksel İletkenlik	%38 IACS
Akma Dayanımı	350 MPa
Çekme Dayanımı	400 MPa
Uzama (%)	13
Sertlik	115 HV

5.1.2 Takviye Malzemesi

Takviye malzemesi olarak seçilen Al_2O_3 (alümina) seramik malzemedir. Yüksek sıcaklık direncine sahip olup elastisite modülü ve rijitlik özelliklerinden dolayı takviye malzemesi olarak tercih edilmektedir. En fazla alüminyum alaşımlı matris malzemeleri ile kullanılmaktadır. Yüksek sertlik ve aşınma direncine sahiptir (Çalışkan 2019). Aşınmanın istenmediği yüksek sıcaklıklarda çalışması istenen kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılmaktadır. Çalışmada, %99,5 saflıkta 15 nm boyutunda nano Al_2O_3 toz takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Al_2O_3

fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 5.4'te belirtilmiştir. Alüminyum matris malzemeleri ile uyumlu kullanılabilen bir takviye malzemesi olması, ekonomiklik ve endüstride yaygın kullanım alanı bulması gibi sebeplerden ötürü ilgili takviye malzemesinin seçimi yapılmıştır.

Tablo 5.4: Al₂O₃ Takviye Malzemesinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Termal İletkenlik Katsayısı	28 W/m.°K
Yoğunluk	3,98 g/cm ³
Ergime Sıcaklığı	2050 °C
Kaynama Sıcaklığı	2080 °C
Isıl Genleşme Katsayısı	7,8x10-6 °K ⁻¹
Molekül Ağırlığı	101,96 g/mol
Spesifik Yüzey Alanı	115 m ² /g
Elastisite Modülü	~360 GPa
Mikrosertlik	25 GPa

(Çalışkan 2019)

5.2 Alüminyum Matrisli Nano Alüminyum Oksit Takviyeli Kompozit Malzemenin Üretimi

5.2.1 Kalıbın Hazırlanması

Döküm işleminin öncesinde kum kalıp hazırlanmıştır. Döküm işlemine uygun olan silis kumu, yüksek sıcaklıklara dayanıklı ve gaz geçirgenliği yüksektir. Silis kumu, tutunma özelliğinin artırılabilmesi için ıslatılmış ve kum karıştırılarak kalıp hazırlama işlemine hazır hale getirilmiştir. Silis kumları elekten geçirilerek inceltirilmiştir. Alt ve üst olmak üzere iki parçadan oluşan derece, 300x300x180 mm ölçülerine sahiptir. Dereceye, 250x110x60 mm boyutlarına sahip ahşap model ve yolluk koyulmuş, inceltirilmiş silis kumları eklenip sıkıştırılarak rijit bir yüzey elde edilmiştir. Üst derecenin hazırlanarak eklenmesi sonrası döküm ağzı açılmış ve derece çıkarılarak döküm işlemine hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5-4: Kalıp hazırlama işlemi

5.2.2 Matris Malzemesinin Ergitilmesi

Alüminyum matrisli kompozit malzemenin üretilebilmesi için çubuk ve silindirik formlardaki AA 6013 alüminyum alaşımı, döküm ocağına eklenerek ergitilmiştir. Ergitilecek malzeme miktarı, kum kalıpta kullanılan modelin hacmi hesaplanıp, alüminyum alaşımının yoğunluğu ile çarpılmış ve gereken AA 6013 alaşımı Nevola Eefe serisi EVO 770 model elektrikli ergitme ocağına eklenmiştir. Alüminyum alaşımı yaklaşık olarak 6 saat boyunca seramik potada ısıtılıp ergitilmiştir. Ocak sıcaklığı, 750 °C'ye ulaştığında ergiyiğin yüzeyindeki cüruf alınarak temizleme tozu ocağa atılmış ve takviye malzemesinin ilavesi aşamasına geçilmiştir.



Şekil 5-5: Döküm ocağı ve malzemenin ergitilmesi

5.2.3 Takviye Malzemesi İlavesi

Döküm ocağında ergitilen AA6013 alaşımına sırasıyla %0,5 ve 1'lik oranlarda nano Al_2O_3 tozu eklenmiştir. Döküm işlemi her bir takviye malzemesi oranında kompozit malzeme üretmesi için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Nano Al_2O_3 tozları yaklaşık 1 saat boyunca elektrikli fırında ön ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Takviye malzemesi, döküm ocağındaki alüminyum alaşımının ağırlığı hesaplanarak ağırlıkça orana uygun şekilde hassas terazide ölçülmüş ve potaya ilave edilmiştir. Ergiyik alüminyum alaşımı ile takviye malzemesinin homojen karışımını sağlamak için döküm ocağında bulunan paslanmaz çelikten üretilmiş karıştırıcı yardımı ile bir saat boyunca karıştırılmıştır.



Şekil 5-6: Takviye malzemesinin hazırlanması

5.2.4 Döküm İşlemi

Homojen olarak karışımı sağlanan ergiyik alüminyum alaşımı ve takviye malzemesinin döküm işleminin gerçekleştirilmesi için hazırlanan kum kalıp ocağın potasının hizasına getirilmiştir. Gerekli güvenlik önlemlerinin alınmasının ardından döküm ocağının çevirme kolu çevrilmiş ve 90° döndürülen potadan ergiyik karışım sabit hızda kalıp boşluğuna dökülmüştür. Yaklaşık 10 dakika beklendikten sonra kalıp bozularak döküm malzemeye su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece takviyesiz ve takviyeli kompozit malzemelerin üretimi tamamlanmıştır.



Şekil 5-7: Döküm işlemi ile üretilen kompozit malzemeler

5.3 Alüminyum Matrisli Nano Alüminyum Oksit Takviyeli Kompozit Malzemenin Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesi

5.3.1 Kaynak Yöntemi ile Birleştirme için Numune Hazırlanması

Takviyesiz ve farklı takviye oranlarına sahip, 250x110x60 mm ölçülerindeki döküm kompozit malzemelere düzgün bir kaynak işlemi uygulanabilmesi için önce

yolluk ve döküm ağız el testeresi ile kesilmiştir. Parçalar, freze tezgahına bağlanarak tüm yüzeylerinden 5 mm talaş kaldırılmış ve yüzey temizleme işlemi yapılmıştır. Yüzeylerin kontrolü sonrasında testere ile dilimleme işlemine geçilmiştir. Takviyesiz alaşım ve %0,5 - 1 takviyeli kompozit malzemeler, Jetco JBS 180-T model testereye bağlanmıştır. Belirlenen kalınlıklarda kesim işlemi yapılarak 3,5x100x50 mm ölçülerinde numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 5-8: Freze tezgahında talaş kaldırma işlemi



Şekil 5-9: Testere ile kesim işlemi

5.3.2 Kaynak Yöntemi ile Birleştirme

3,5 mm kalınlığında takviyesiz alaşım ve % 0,5 ve 1 oranlarında hazırlanan numuneler, Fronius International firmasında CMT ve PMC kaynak yöntemleri ile alına birleştirilmiştir. Kaynak işleminde 1,2 mm çapındaki ER5183 (AlMg4.5Mn) ve ER4043 (AlSi5) kaynak telleri kullanılmıştır. Koruyucu gaz olarak argon gazı, 12 l/dak debide kullanılmıştır. Kullanılan tellerin kimyasal kompozisyonu Tablo 5.5 ve Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.5: ER5183 Telinin Kimyasal Kompozisyonu

	Al	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Cu	Zn	Ti	Diğer
Değerler (%)	Kalan	<0,4	4,3-5,2	0,5-1,0	<0,4	<0,05	<0,1	<0,25	<0,15	<0,0003

Tablo 5.6: ER4043 Telinin Kimyasal Kompozisyonu

	Al	Si	Mn	Fe	Cu	Zn	Ti
Değerler (%)	Kalan	4,5-5,5	<0,05	<0,5	<0,3	<0,1	<0,01

CMT ve PMC kaynak yöntemlerinin her biri için 110 ve 120 A olmak üzere 2 farklı akım şiddetinde birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. CMT kaynak yönteminde %0,5 takviye oranına sahip kompozit malzeme için 2 farklı kaynak telinde birleştirme yapılmıştır. Kaynak işlemleri 400 mm/dak sabit hızda gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi sırasında oluşan ısı girdisi (5.1) formülüne göre hesaplanmıştır.

$$Isı\ Girdisi\ \left(\frac{j}{mm}\right) = \frac{60 \times I \times V}{İ.H.\ \left(\frac{mm}{dak}\right)} \times \eta \quad (5.1)$$

Burada, I, akım şiddeti (Amper), V, gerilim (V), η, ark verimi, İ.H. ise ilerleme hızıdır. η ark verimi ise, CMT yöntemi işlemi için 0,66, PMC yöntemi için 0,8 alınmıştır. Kaynak işlemi gerçekleştirilen tüm numunelere ait kaynak parametreleri Tablo 5.7'de verilmiştir.

Tablo 5.7: Kaynak parametreleri

Numune Numarası	Malzeme	Kaynak Yöntemi	Kaynak Teli	Akım (A)	Voltaj (V)	Hız (mm/dak)	Isı Girdisi (J/mm)
1	AA6013	CMT	ER4043	110	14,2	400	154,64
2	AA6013	CMT	ER4043	120	14,4	400	171,07
3	AA6013+ %0,5Al ₂ O ₃	CMT	ER4043	110	14,2	400	154,64
4	AA6013+ %0,5Al ₂ O ₃	CMT	ER4043	120	14,4	400	171,07
5	AA6013+ %0,5Al ₂ O ₃	CMT	ER5183	110	14,2	400	154,64
6	AA6013+ %0,5Al ₂ O ₃	CMT	ER5183	120	14,5	400	172,26
7	AA6013+ %1Al ₂ O ₃	CMT	ER5183	110	14,2	400	154,64
8	AA6013+ %1Al ₂ O ₃	CMT	ER5183	120	14,5	400	172,26
9	AA6013+ %0,5Al ₂ O ₃	PMC	ER5183	110	18,3	400	241,56
10	AA6013+ %0,5Al ₂ O ₃	PMC	ER5183	120	18,7	400	269,28
11	AA6013+ %1Al ₂ O ₃	PMC	ER5183	110	18,3	400	241,56
12	AA6013+ %1Al ₂ O ₃	PMC	ER5183	120	18,7	400	269,28



Şekil 5-10: Kaynak yöntemi ile numunelerin birleştirilmesi

5.4 Makroyapı ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi

Farklı kaynak yöntemleri ve parametreleri ile birleştirilmesi yapılan takviyesiz alaşım ve %0,5 ve %1 takviyeli kompozit malzeme numunelerinin mikroyapı ve makroyapıları PAÜ Makine Mühendisliği Metalografi Laboratuvarında bulunan mikroskop ile incelenmiştir. Kaynaklı numunelerin incelenebilmesi için kesitleri bakalite alınarak zımparalanmış ve sonrasında elmas pasta ile parlatılmıştır. Son olarak Keller dağlama sıvısı kullanılarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir.

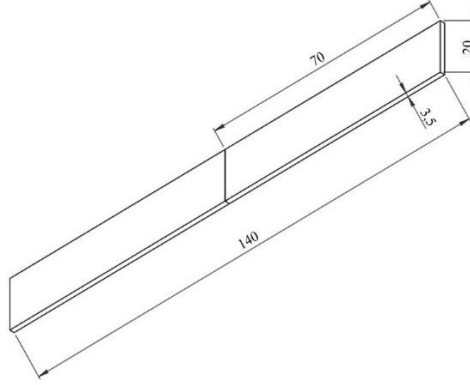


Şekil 5-11: Mikroyapı ve makroyapı incelemesinin yapılması

5.5 Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

Döküm işlemi sonrasında elde edilen takviyesiz alaşım, %0,5 ve %1 takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tespiti için her malzemeden 3,5 mm

kalınlığında olacak şekilde testerede kesim işlemi yapılmış ve tüm malzeme türlerinden 3,5x20x100 mm ölçülerinde üçer adet numuneler elde edilerek kaynaklı numunelerin mekanik özellikleri tespit edilmiştir. Farklı kaynak parametreleri ile birleştirilmesi gerçekleştirilen numunelerin çekme testlerinin yapılması amacıyla kaynak başlangıç ve bitiş kısımlarından 10 mm kaynak yönüne dik doğrultuda testerede kesim işlemi yapılarak ayrılmıştır.



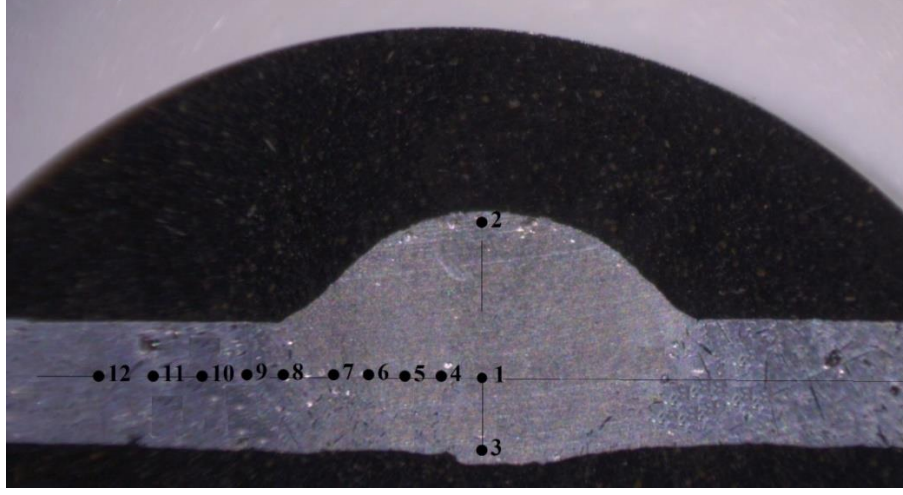
Şekil 5-12: Çekme testi için hazırlanan kaynaklı birleştirmelerin numune boyutları

Sonrasında her numune için 3 adet olmak üzere 3,5x20x140 mm lama formunda numuneler standartlara uygun bir şekilde testerede kesilerek çekme testi numuneleri oluşturulmuştur.



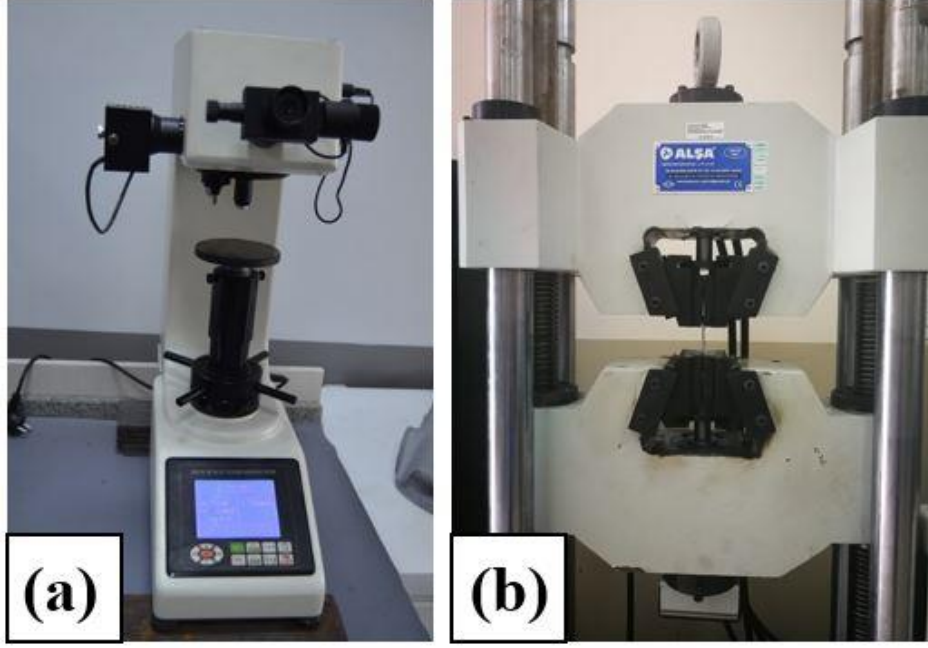
Şekil 5-13: Çekme testi için hazırlanan numuneler

Her bir numunenin setlikleri, kaynak bölgesinin ortası, üst ve alt kısımları ile ITAB ve ana malzemenin yüzeyleri dahil olmak üzere 12 farklı noktadan 0,1 mm aralıklar ile ölçülmüştür. Serlik ölçümleri, 5 saniyelik yük uygulama süresi (dwell time) ve 200 gramlık yük (HV 0,2) şartlarında yapılmıştır.

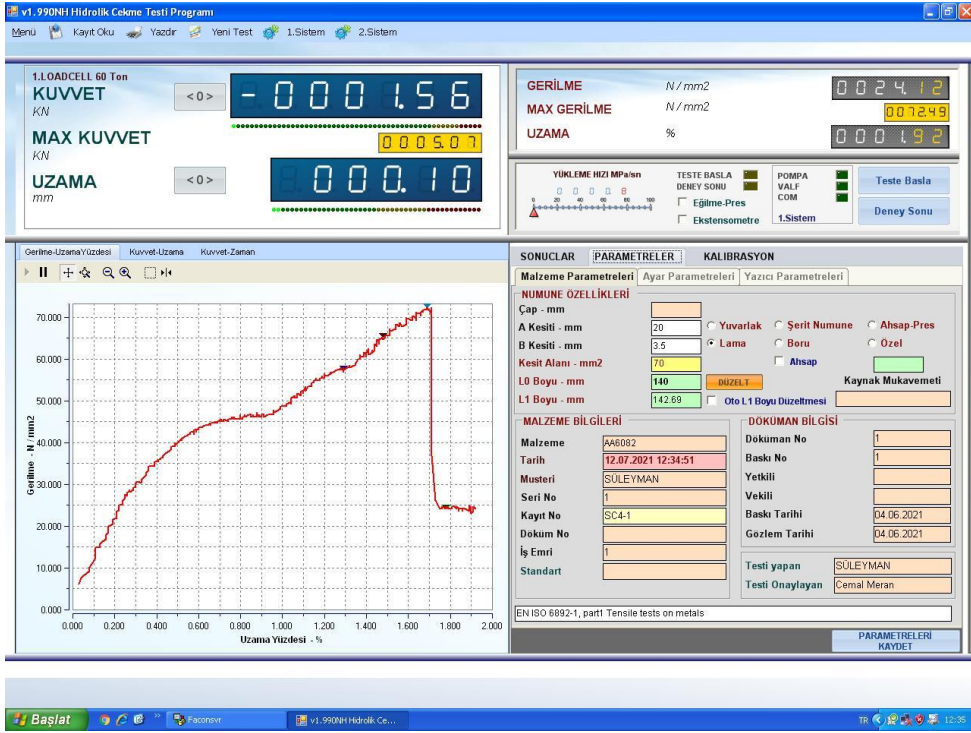


Şekil 5-14: Sertlik testi için ölçüm noktaları

Çekme testleri, Pamukkale Üniversitesi Makine Mühendisliği Tahribatlı Malzeme Muayene Laboratuvarındaki 30 tonluk Alşa marka çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme işlemi 20 mm/dak hızda gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda numunelerin uzamaları da ölçülmüştür. Mikrosertlik testleri ise Metkon mikrosertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 5-15: (a) Mikrosertlik cihazı, (b) çekme testi cihazı

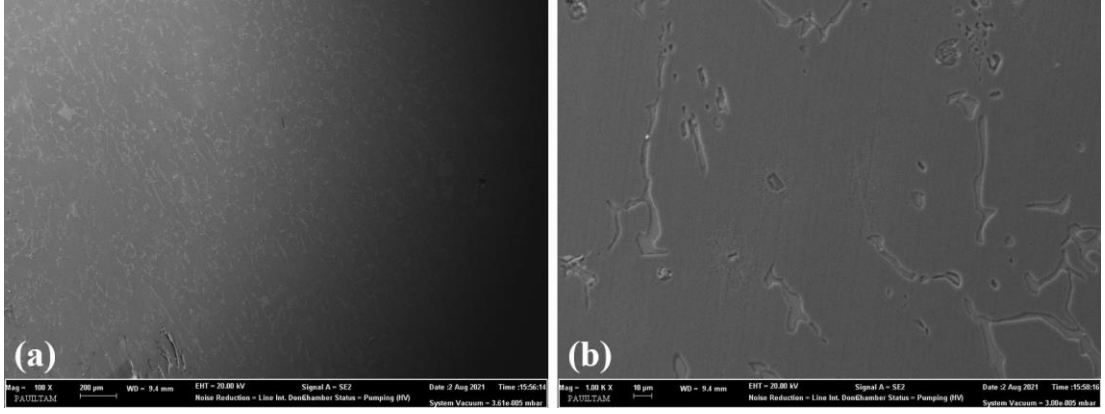


Şekil 5-16: Çekme testi sırasındaki ekran görüntüsü

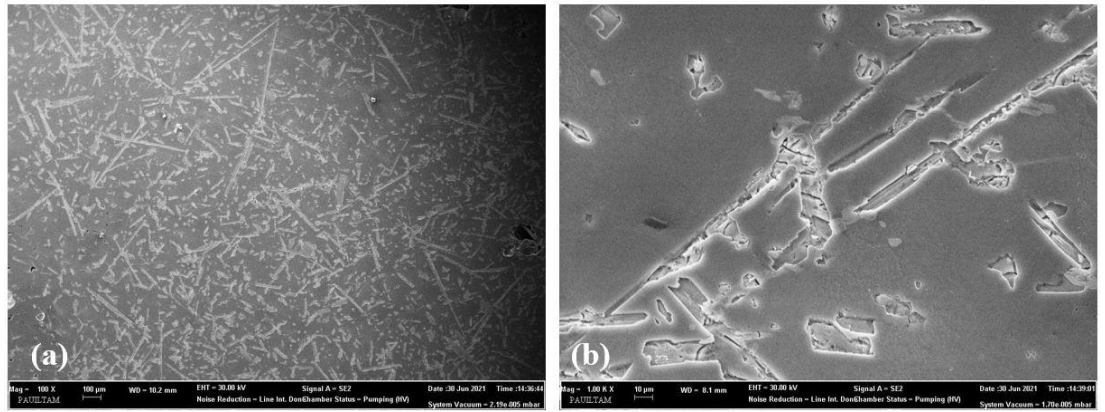
6. DENEYSEL SONUÇLAR

6.1 Makroyapı ve Mikroyapı Sonuçları

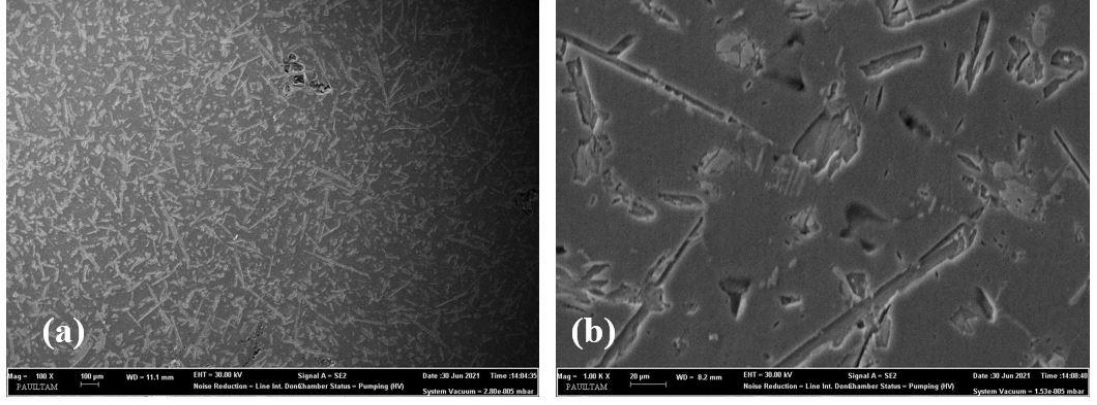
Döküm işlemi gerçekleştirilen takviyesiz alaşım, %0,5 ve %1 takviyeli kompozit malzemelerin SEM görüntüleri sırası ile Şekil 6-17, Şekil 6-18 ve Şekil 6-19'da görülmektedir. Al_2O_3 nano tozların her iki kompozitte de topaklanma olmadan dağıldığı gözlemlenmiştir. Nano tozların etrafında, Fe, Zn, Cr, Si ve Mg'dan oluşan yapılar ince çubuksu yapılar halinde oluşmuştur. Şekil 6-20, Şekil 6-21 ve Şekil 6-22'de ise FESEM nokta analizi sonuçları görülmektedir.



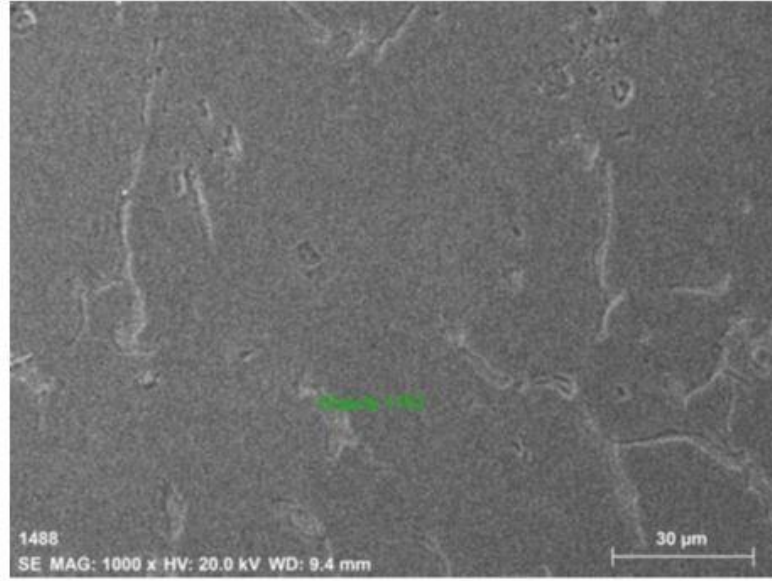
Şekil 6-17: Takviyesiz alaşım SEM görüntüleri, (a) 100 µm, (b) 10 µm



Şekil 6-18: %0,5 takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri, (a) 100 µm, (b) 10 µm

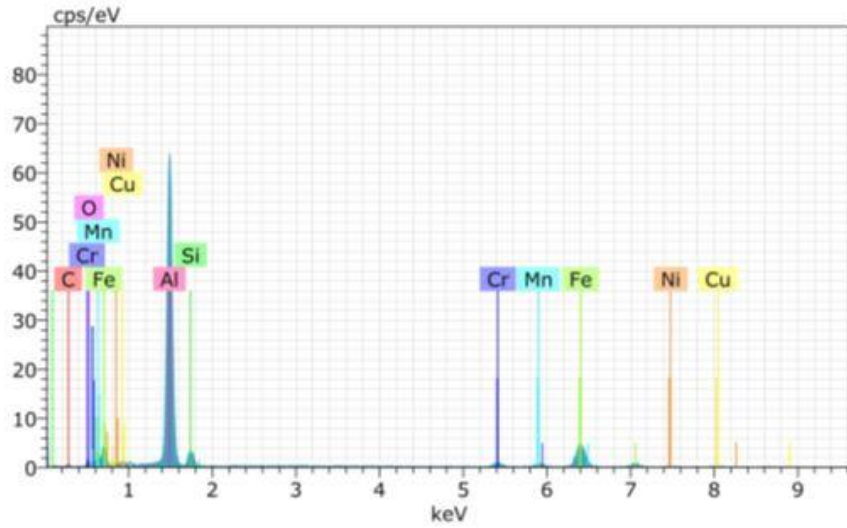


Şekil 6-19: %1 takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri, (a) 100 μm , (b) 10 μm

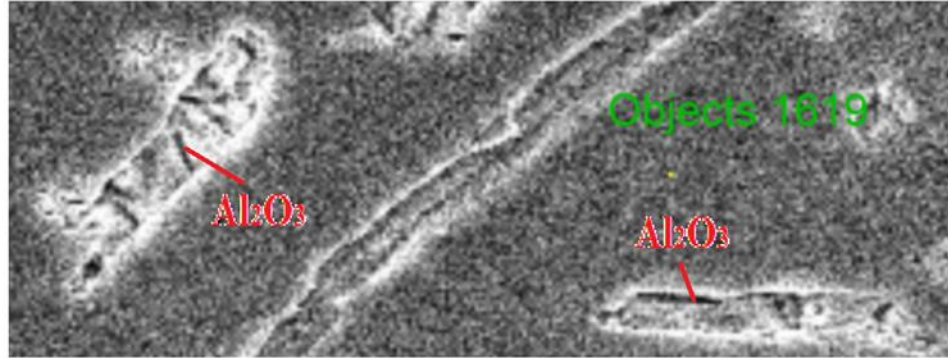
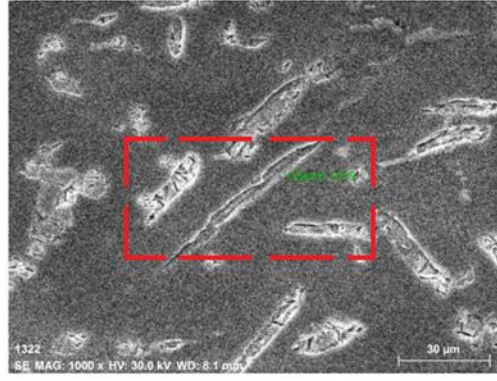


Spectrum: Objects 1793

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Al	13	K-series	51.86	56.40	58.55	2.51
Fe	26	K-series	20.19	21.96	11.01	0.60
C	6	K-series	7.45	8.10	18.89	2.04
Si	14	K-series	3.61	3.93	3.92	0.20
Cr	24	K-series	2.22	2.41	1.30	0.11
O	8	K-series	2.09	2.28	3.98	0.57
Mn	25	K-series	1.98	2.15	1.10	0.10
Cu	29	K-series	1.80	1.95	0.86	0.12
Ni	28	K-series	0.76	0.82	0.39	0.07
Total:			91.95	100.00	100.00	

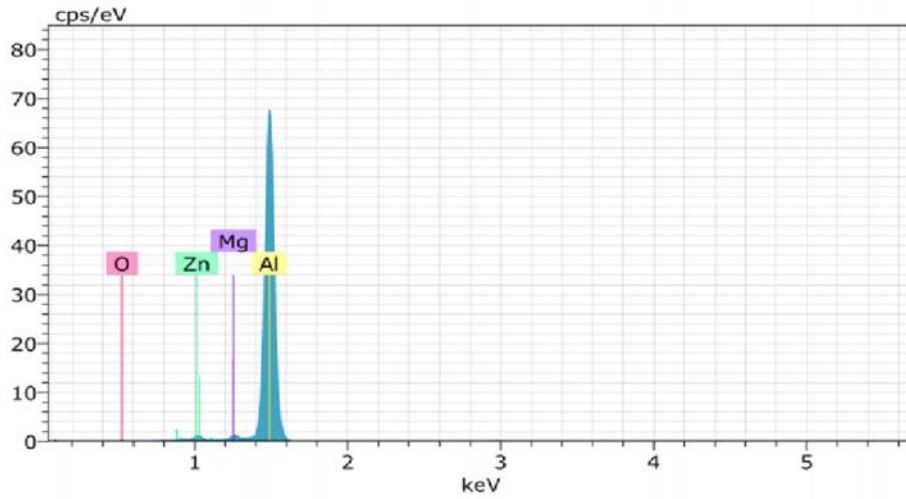


Şekil 6-20: Takviyesiz alaşım FESEM nokta analizi

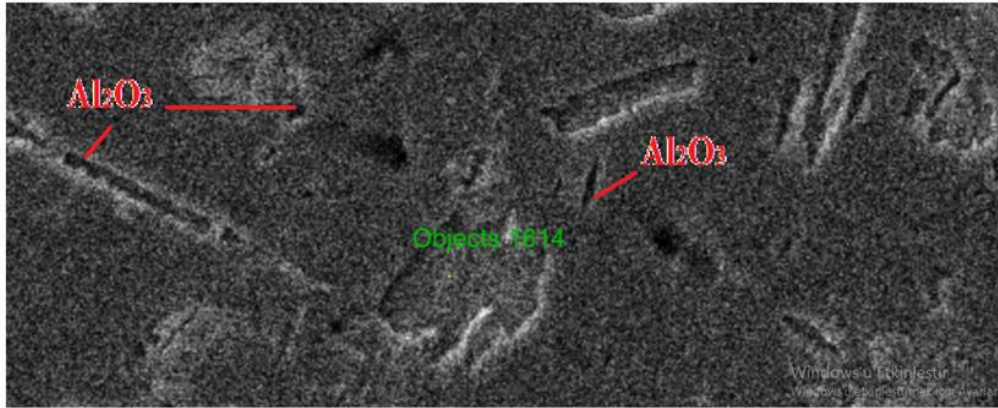
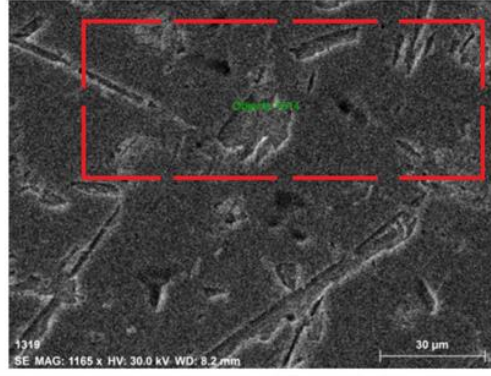


Spectrum: Objects 1619

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Al	13	K-series	93.12	93.91	93.87	4.70
Zn	30	K-series	2.56	2.58	1.07	0.12
O	8	K-series	2.04	2.05	3.46	0.70
Mg	12	K-series	1.43	1.45	1.61	0.12
Total:			99.16	100.00	100.00	

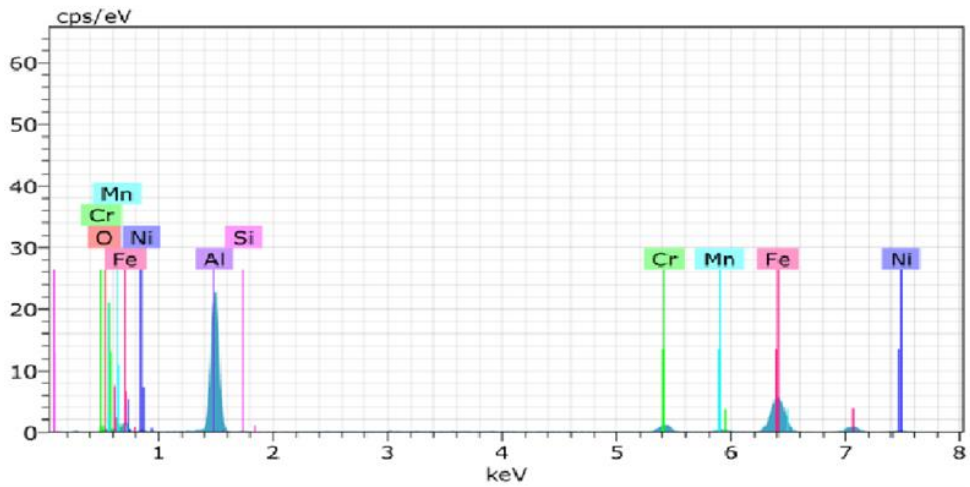


Şekil 6-21: %0,5 takviyeli kompozit malzemenin FESEM nokta analizi



Spectrum: Objects 1614

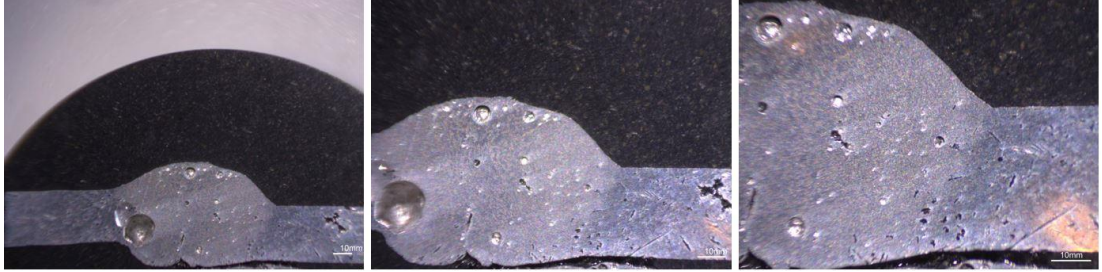
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Al	13	K-series	52.46	56.80	68.89	2.68
Fe	26	K-series	29.77	32.23	18.89	0.81
Cr	24	K-series	3.52	3.81	2.40	0.14
O	8	K-series	3.41	3.69	7.54	0.98
Ni	28	K-series	1.88	2.04	1.14	0.10
Mn	25	K-series	0.83	0.90	0.54	0.06
Si	14	K-series	0.48	0.52	0.61	0.07
Total:			92.35	100.00	100.00	



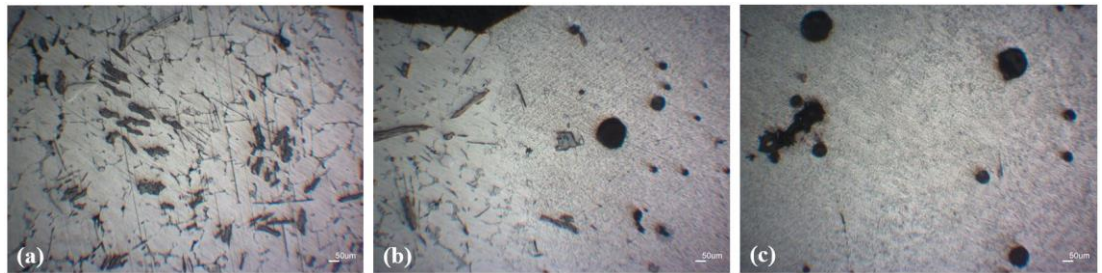
Şekil 6-22: %1 takviyeli kompozit malzemenin FESEM nokta analizi

Kaynaklı birleştirme işlemleri gerçekleştirilen numunelerden alınan parçaların makroyapıları incelenerek farklı kaynak parametrelerinin kaynak yapılarına olan etkileri incelenmiştir. Mikroyapı görüntülerinde ise numunelerin içyapıları, esas malzeme, geçiş bölgesi ve kaynak bölgesi olmak üzere incelenmiştir.

110 A'de ER4043 teli ile CMT kaynağı yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımının makroyapı görüntüleri Şekil 6-23'te verilmiştir. Kaynak sırasında 154,64 J/mm'lik bir ısı girdisi olmuştur. Kaynak nüfuziyeti sağlanmış olup, kaynak metalinin hızlı katılaşmasından dolayı kaynak sırasında ortaya çıkan gazlar dışarı çıkamadan katılaşarak büyük çaplarda gaz boşlukları oluşmasına sebep olmuştur. Geçiş bölgesinde oluşan boşluklar ise daha küçük çaplarda meydana gelmiştir. Düşük ısı girdisinden dolayı esas malzeme ısıdan daha az etkilenmiş ve daha dar bir ITAB oluşmuştur. Mikroyapıda ise esas metalden kaynak metaline doğru ısı girdisi kaynaklı tane irileşmesi görülmüştür. Kaynak bölgesinde ise merkeze doğru taneler yönlenmiştir. Şekil 6-24'te 110 A'de ER4043 teli ile CMT kaynağı yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımının numaralı numunenin mikroyapısı görülmektedir. Kaynak bölgesinde gözenekli bir yapı oluşmuştur. Esas malzemedan kaynak bölgesine doğru tane irileşmesi ve tane yönlenmesi görülmüştür.

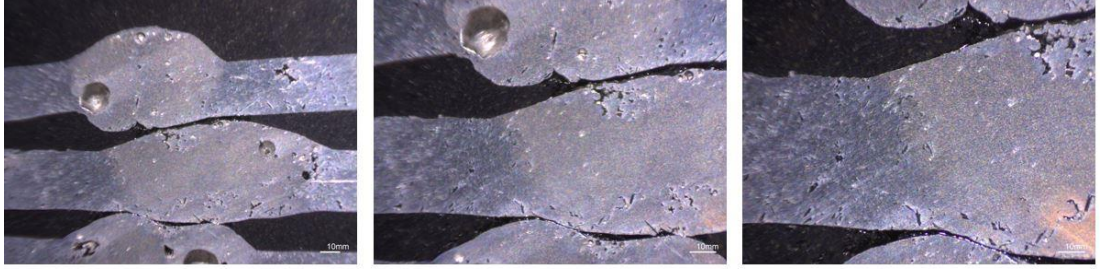


Şekil 6-23: CMT kaynağı ile 110 A'de ER4043 teli ile birleştirmesi yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımının makroyapı görüntüleri



Şekil 6-24: CMT kaynağı ile 110 A'de ER4043 teli ile birleştirmesi yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımının mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi

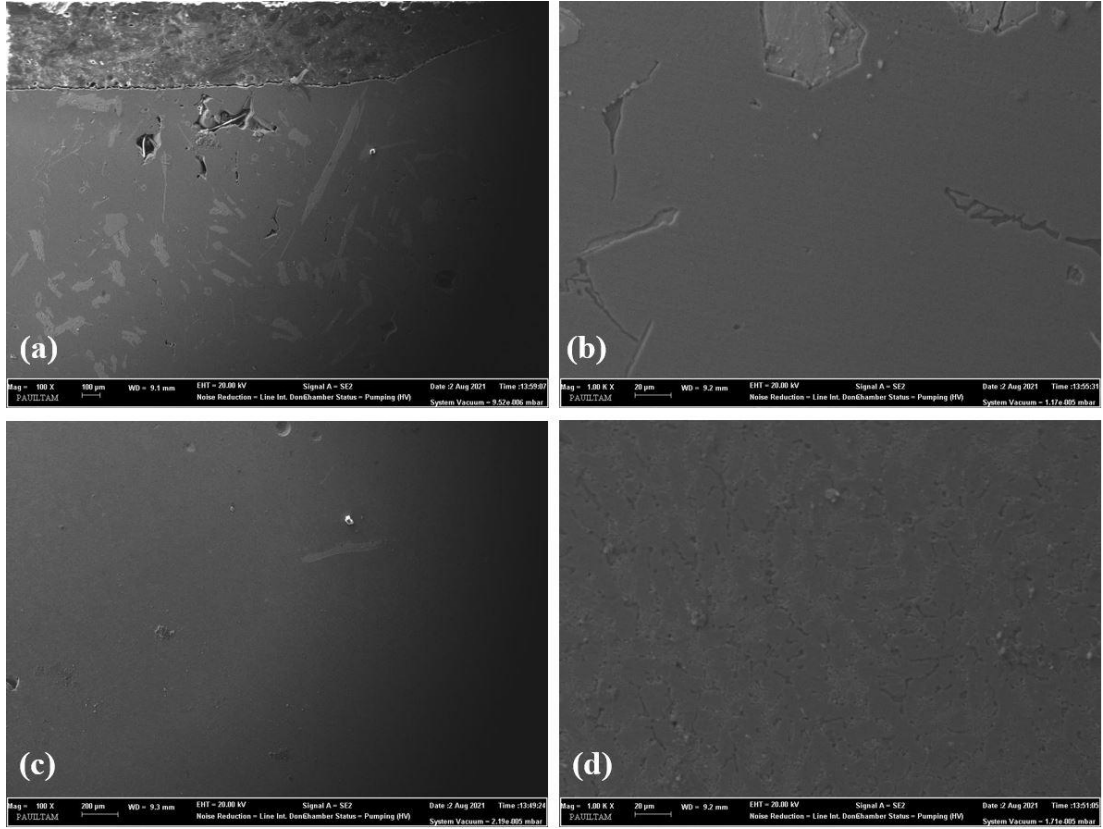
120 A'de ER4043 teli ile CMT kaynağı yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımının makroyapı görüntüleri Şekil 6-25'te verilmiştir. Kaynak sırasında 171,07 J/mm'lik bir ısı girdisi olmuştur. Kaynak nüfuziyeti sağlanmış olup 110 A ile birleştirme yapılan numuneye göre daha az ve küçük çapta gaz boşluklarının olduğu görülmektedir. Bu durum, ısı girdisinin artmasından dolayı daha yavaş bir katılaşma meydana gelerek gazların dışarıya daha iyi çıkması ile açıklanabilir. Mikroyapı görüntülerinde ise (Şekil 6-26) ısı girdisi kaynaklı esas metalden kaynak metaline doğru tane irileşmesi meydana gelmiştir. Tane boyutları arasındaki fark 110 A'de birleştirilen takviyesiz alaşıma göre daha az belirgin olmuş ve daha iyi bir kaynak yapısı elde edilmiştir. Şekil 6-27'de ise SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6-25: CMT kaynağı ile 120 A'de ER4043 teli ile birleştirilmesi yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımının makroyapı görüntüleri

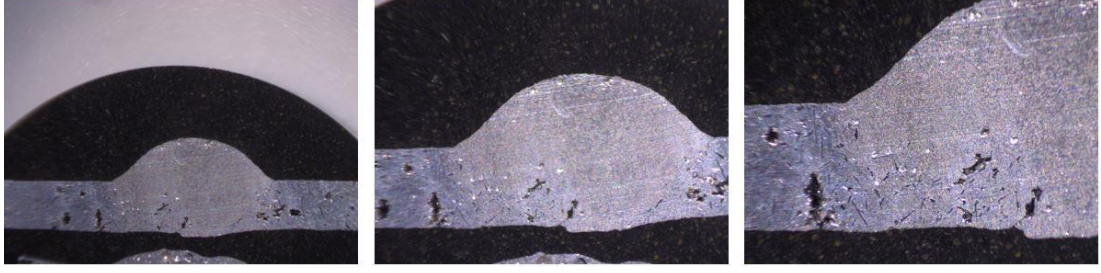


Şekil 6-26: CMT kaynağı ile 120 A'de ER4043 teli ile birleştirilmesi yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımının mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi

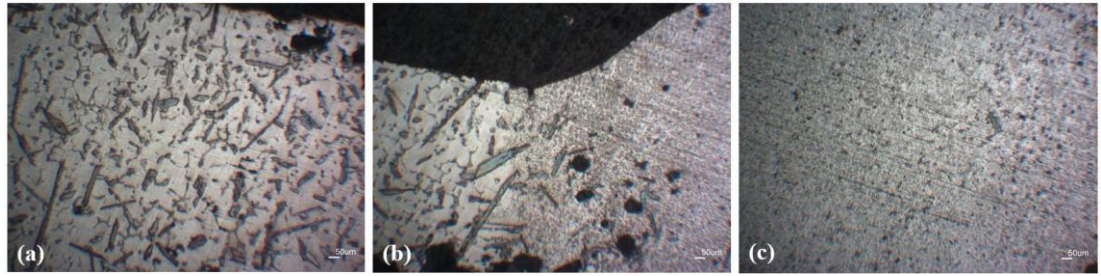


Şekil 6-27: CMT kaynağı ile 120 A'de ER4043 teli ile birleştirmesi yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımının SEM görüntüleri, (a) 100x geçiş bölgesi, (b) 1000x geçiş bölgesi, (c) 100x kaynak bölgesi, (d) 1000x kaynak bölgesi

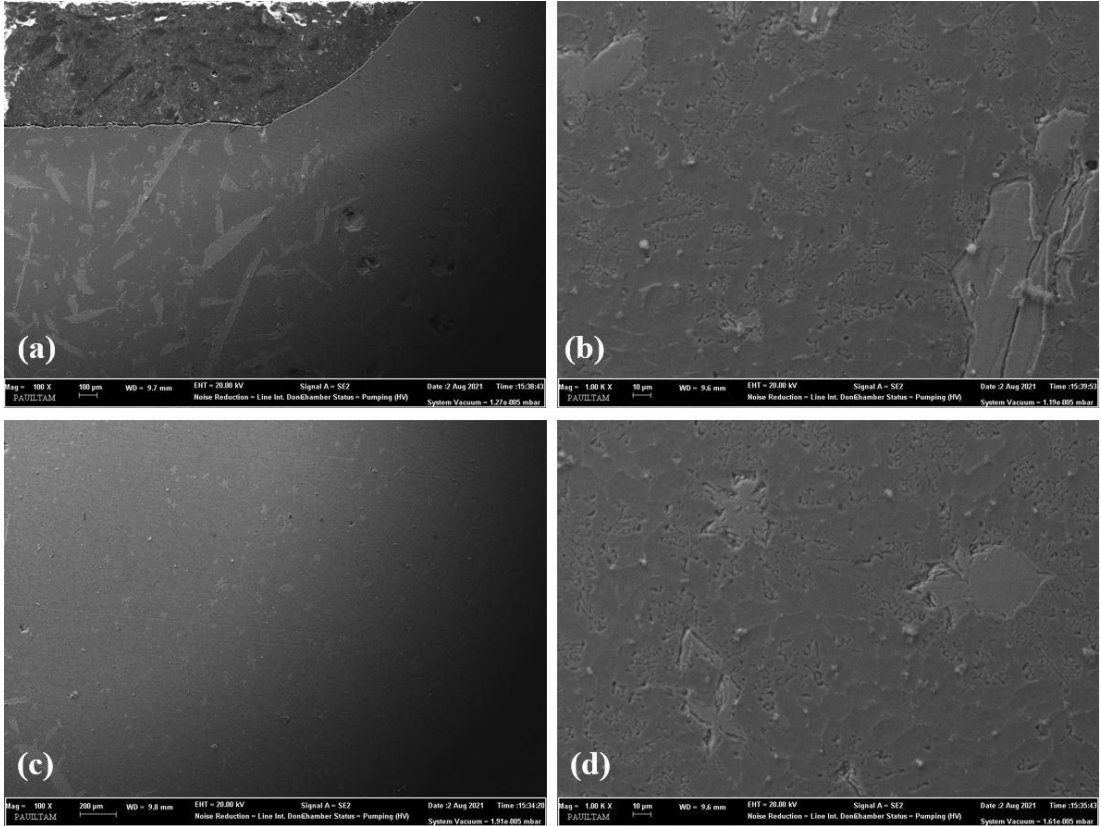
110 A'de ER4043 teli ile CMT kaynağı yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri Şekil 6-28'de verilmiştir. Kaynak işleminde 154,64 J/mm'lik bir ısı girdisi olmuştur. Kaynak nüfuziyeti sağlanmış ve iyi bir kaynak yapısı elde edilmiştir. Geçiş bölgesinde küçük çaplı gaz boşlukları mevcuttur. Esas malzemede görülen çatlak ve boşlukların döküm kusurları olduğu görülmektedir. Mikroyapı görüntüleri ise Şekil 6-29'da verilmiştir. Esas metalden kaynak metaline doğru ısı girdisi kaynaklı tane irileşmesi görülmüştür. Kaynak bölgesinde ise merkeze doğru taneler yönlendirilmiştir. Şekil 6-30'da ise SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6-28: CMT kaynağı ile 110 A'de ER4043 kaynak teli ile birleştirilmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri

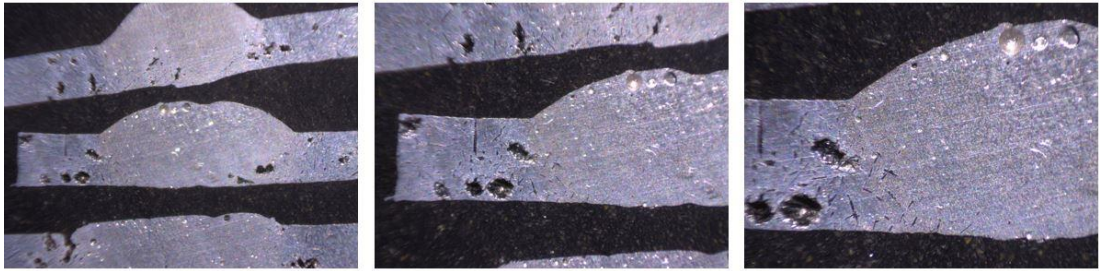


Şekil 6-29: CMT kaynağı ile 110 A'de ER4043 kaynak teli ile birleştirilmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi

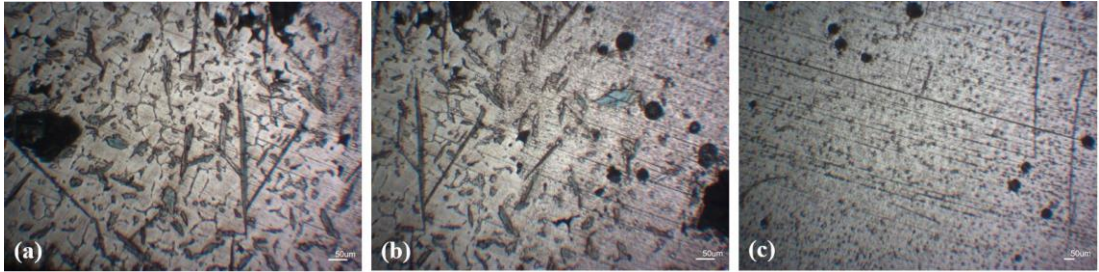


Şekil 6-30: CMT kaynağı ile 110 A'de ER4043 teli ile birleştirilmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri, (a) 100x geçiş bölgesi, (b) 1000x geçiş bölgesi, (c) 100x kaynak bölgesi, (d) 1000x kaynak bölgesi

120 A'de ER4043 teli ile CMT kaynağı yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri Şekil 6-31'de verilmiştir. Kaynak nüfuziyeti sağlanmış olup kaynak sırasında 171,07 J/mm'lik bir ısı girdisi olmuştur. Kaynak bölgesinde küçük çaplı gaz boşlukları olup geçiş bölgesindeki boşluklar daha seyrek ve küçük oluşmuştur. Esas malzemedeki gözenekli yapı ise döküm kusurlarından kaynaklanmıştır. Şekil 6-32'de ise mikroyapıları görülen numunede kaynak bölgesine doğru tane irileşmesi ve yönlenme görülmüştür. %0,5 takviyeli malzemenin CMT yöntemi ve ER4043 teli ile kaynağında 110 A'de birleştirmesi yapılan numunede daha iyi bir kaynak yapısı elde edilmiştir.



Şekil 6-31: CMT kaynağı ile 120 A'de ER4043 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri



Şekil 6-32: CMT kaynağı ile 120 A'de ER4043 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi

CMT kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri Şekil-33'te verilmiştir. Kaynak nüfuziyeti sağlanmış ancak kaynak bölgesinde damlacık şeklinde yapı oluşmamıştır. Kaynak bölgesi ve geçiş bölgesinde gaz boşlukları oluşmuştur. Şekil 6-34'te ise mikroyapı görüntüleri mevcuttur. Geçiş bölgesinde görülen Al_2O_3 parçacıkları tane yönlenmesinden kaynaklanmıştır. Kaynak bölgesinde ise gözenekli yapı oluşmuştur.

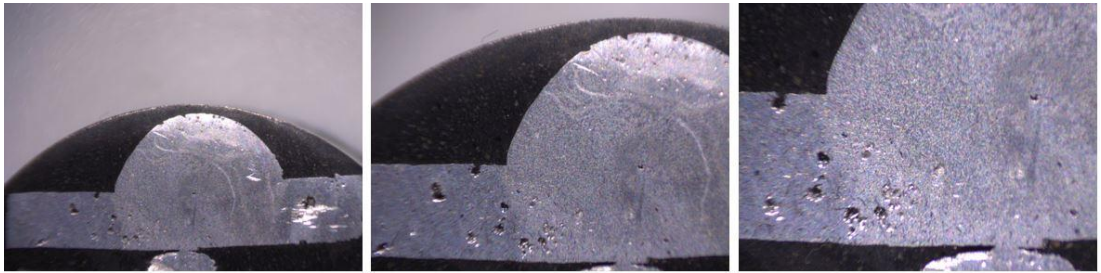


Şekil 6-33: CMT kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirilmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri

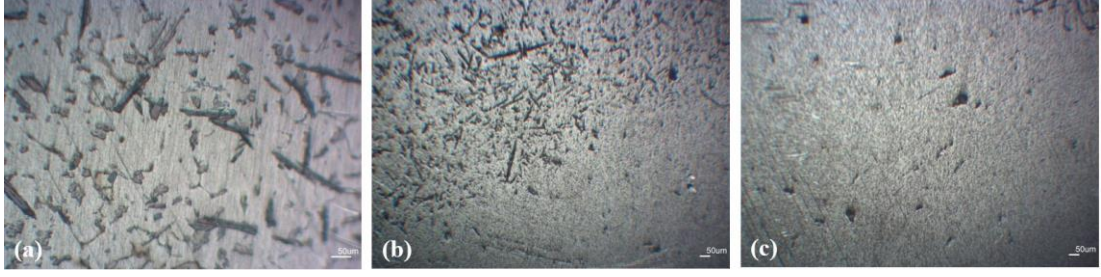


Şekil 6-34: CMT kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirilmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi

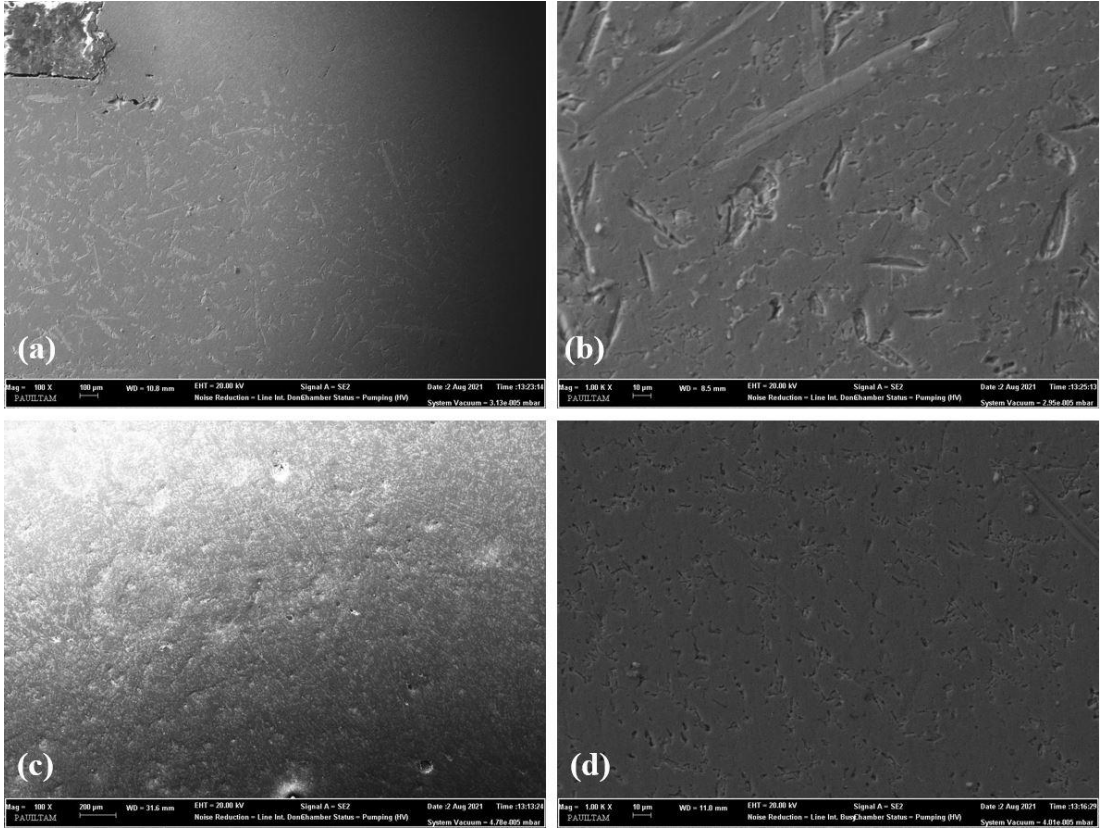
120 A'de ER5183 kaynak teli ile CMT kaynağı yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri Şekil 6-35'te verilmiştir. Kaynak nüfuziyeti iyi sağlanmış ve çok seyrek gaz boşlukları görülmüştür. Kaynak işleminin gerçekleştirildiği yüzeyde düzgün damlacık yapı oluşmuştur. Kaynak sırasında 172,26 J/mm'lik ısı girdisi olmuştur. CMT kaynağı gerçekleştirilen numuneler arasında en iyi kaynak yapısı bu numunede elde edilmiştir. Şekil 6-36'da ise mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Kaynak bölgesine doğru yönlenme görülmüştür. Geçiş bölgesindeki boşluklar kaynak bölgesine kıyasla daha fazladır. Aynı akımda ER4043 kaynak teli ile birleştirilmesi gerçekleştirilen numuneye göre kaynak bölgesinde daha az ve küçük çapta gözenekli yapı oluşmuştur. Şekil 6-37'de ise SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6-35: CMT kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirilmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri



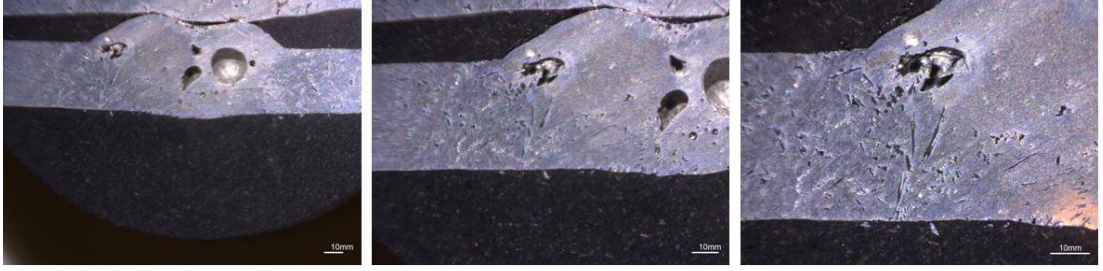
Şekil 6-36: CMT kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirilmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi



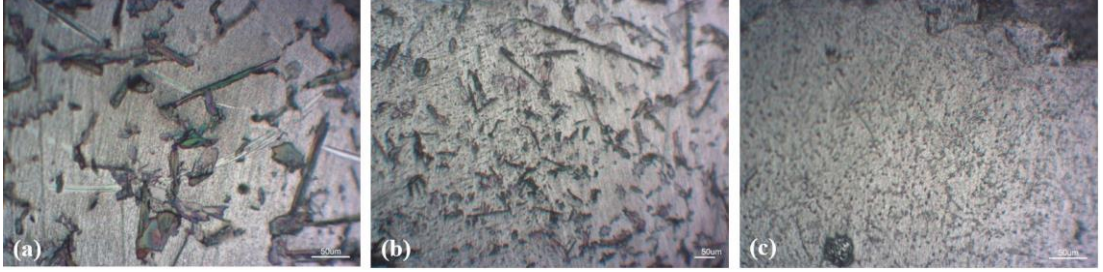
Şekil 6-37: CMT kaynağı ile 120 A'de ER5183 teli ile birleştirilmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri, (a) 100x geçiş bölgesi, (b) 1000x geçiş bölgesi, (c) 100x kaynak bölgesi, (d) 1000x kaynak bölgesi

110 A'de CMT kaynağı, ER5183 kaynak teli ile birleştirilmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri Şekil 6-38'de görülmektedir. 154,64 J/mm ısı girdisi olup istenen kaynak nüfuziyetinin sağlanamadığı görülmektedir. Kaynak işlemi sırasında ortaya çıkan gazların dışarı çıkamadan katılaşma olmasından kaynaklı büyük çaplı gaz boşlukları meydana gelmiştir. Şekil 6-39'da ise mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Kaynak işlemi sırasında tane

yönlenmesi görülmüş ve Al_2O_3 parçacıkları yer almıştır. Esas malzemedan kaynak bölgesine doğru tane irileşmesi görülmüştür.

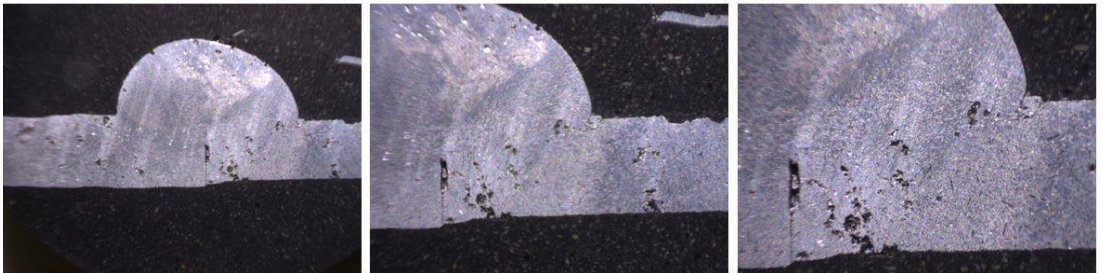


Şekil 6-38: CMT kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri

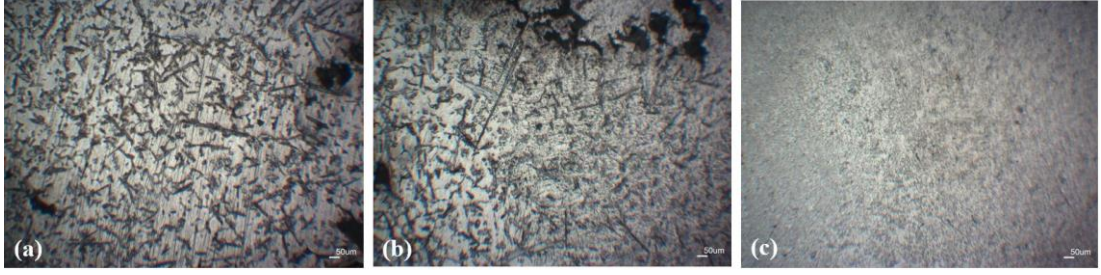


Şekil 6-39: CMT kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi

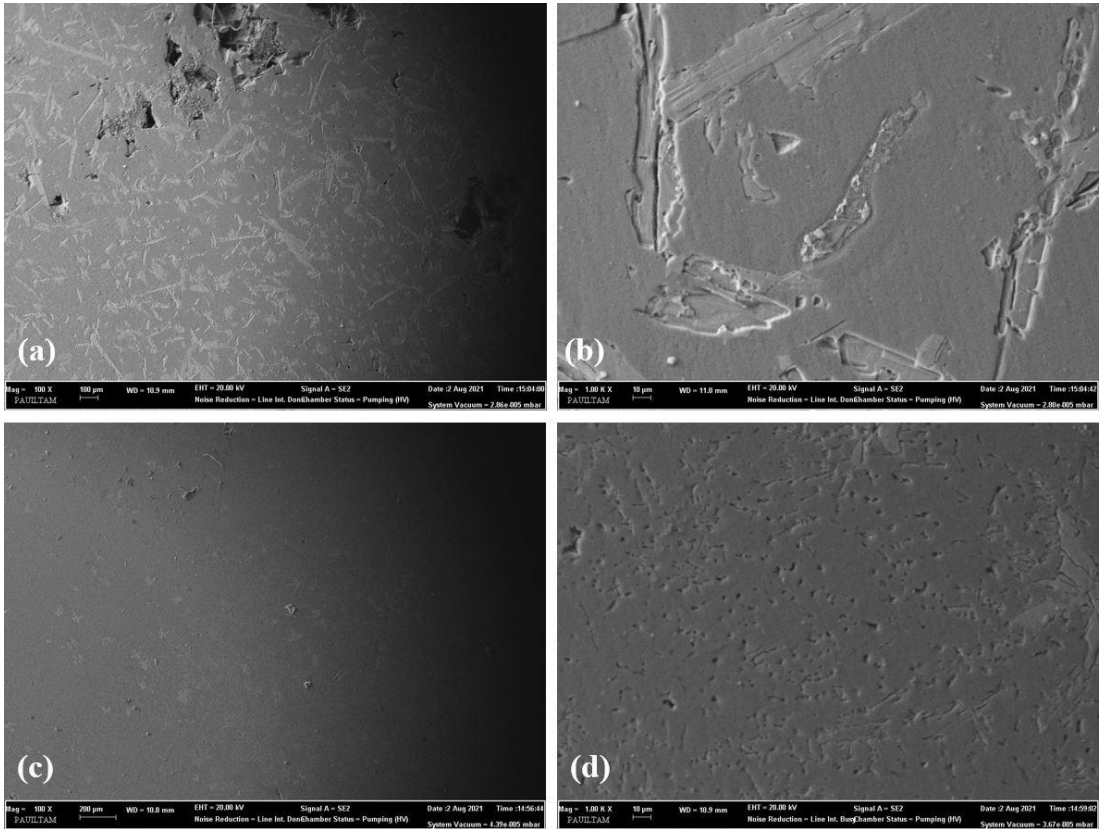
CMT kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri Şekil 6-40'ta verilmiştir. Kaynak işleminde 172,26 J/mm'lik ısı girdisi olmuştur ancak kaynak nüfuziyetinin tam sağlanamadığı görülmektedir. Kaynak bölgesinde damlacık şeklinde yapı oluşmuştur. Kaynak bölgesinin üst tarafında küçük çapta gaz boşlukları olup alt kısımda ise çatlaklar ve boşluklar meydana gelmiştir. Şekil 6-41'de ise mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Geçiş bölgesinde tane yönlenmesinden kaynaklı Al_2O_3 parçacıkları yer almıştır. SEM görüntüleri Şekil 6-42'de verilmiştir.



Şekil 6-40: CMT kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri

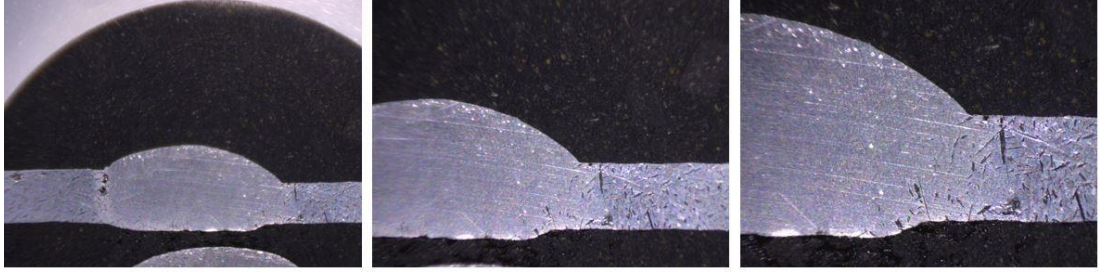


Şekil 6-41: CMT kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi



Şekil 6-42: CMT kaynağı ile 120 A'de ER5183 teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri, (a) 100x geçiş bölgesi, (b) 1000x geçiş bölgesi, (c) 100x kaynak bölgesi, (d) 1000x kaynak bölgesi

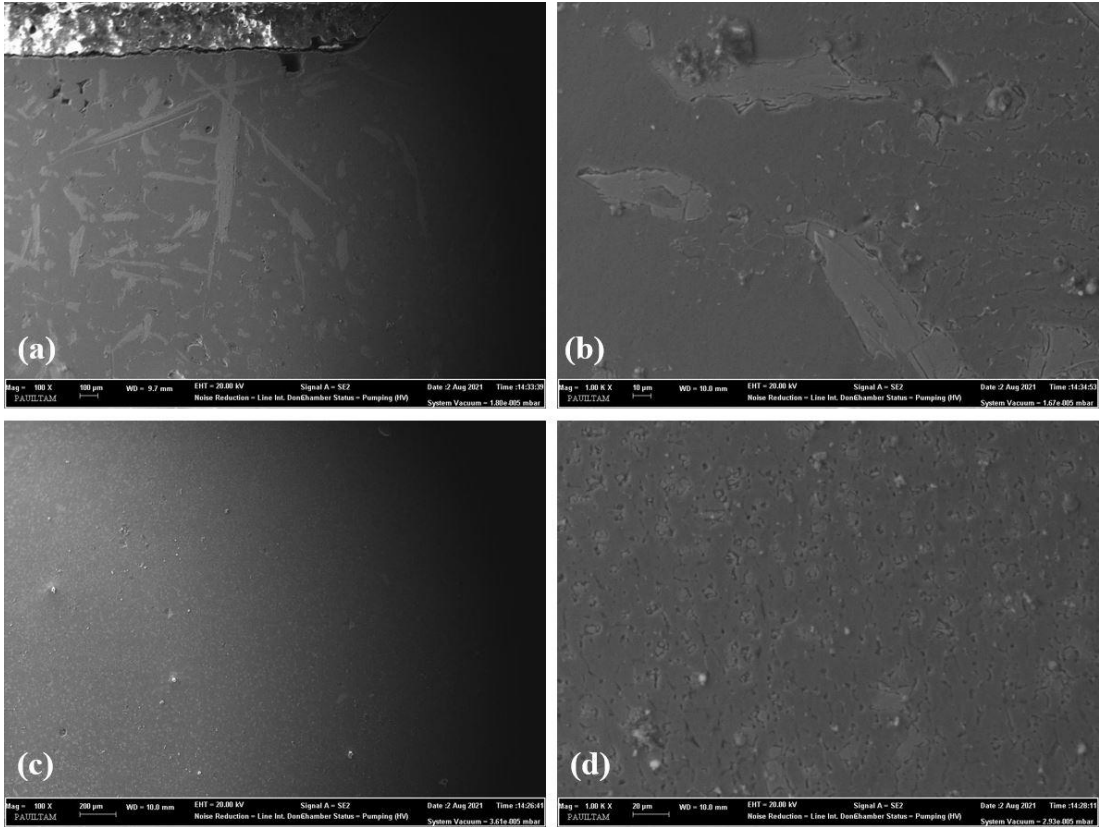
PMC kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri Şekil 6-43'te verilmiştir. İyi bir kaynak yapısı elde edilmiş olup küçük çaplı gaz boşlukları gözenekli yapı oluşturmuştur. Kaynak işleminde 241,56 J/mm ısı girdisi olmuştur. Esas malzemede yer alan çatlak ve boşluklar ise döküm kusurlarından kaynaklanmıştır. Şekil 6-44'te mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. Esas malzemeden kaynak bölgesine doğru tane yönelmesi ve irileşmesi görülmüştür. SEM görüntüleri Şekil 6-45'te verilmiştir.



Şekil 6-43: PMC kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri

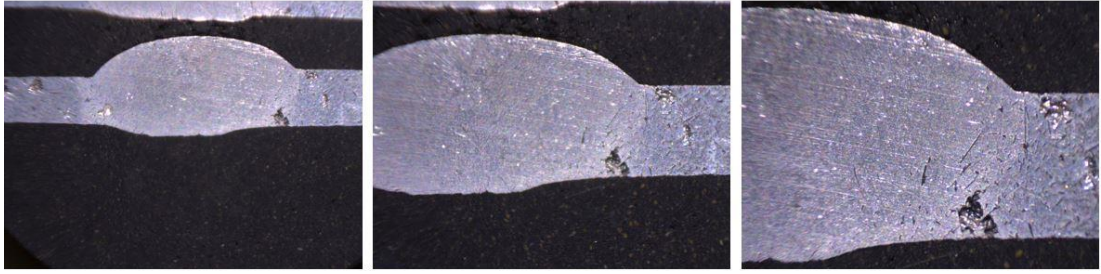


Şekil 6-44: PMC kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi

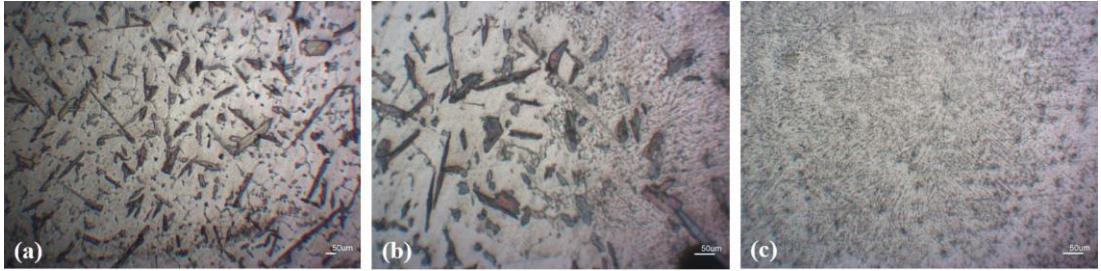


Şekil 6-45: PMC kaynağı ile 110 A'de ER5183 teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin SEM görüntüleri, (a) 100x geçiş bölgesi, (b) 1000x geçiş bölgesi, (c) 100x kaynak bölgesi, (d) 1000x kaynak bölgesi

120 A'de PMC kaynağı ve ER5183 teli ile kaynak işlemi gerçekleştirilen %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı incelemesinde ise iyi bir kaynak nüfuziyetinin olduğu görülmektedir. İşlem sırasında 269,28 J/mm'lik ısı girdisi olmuştur. Kaynak bölgesinde nadir gaz boşlukları görülmektedir. Geçiş bölgesinde ise çatlaklar mevcuttur. Şekil 6-46'da görüntüleri yer alan numunenin kaynak yapısı 110 A'de birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli malzeme ile benzerdir. Mikroyapı görüntüleri Şekil-6-47'de yer alan numunenin geçiş bölgesinde tane yönlenmesinin olduğu ve kaynak merkezine doğru tane irileşmesi olduğu görülmektedir.

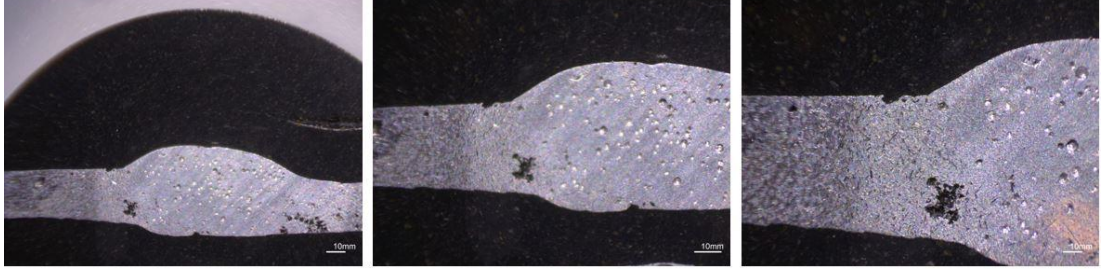


Şekil 6-46: PMC kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri

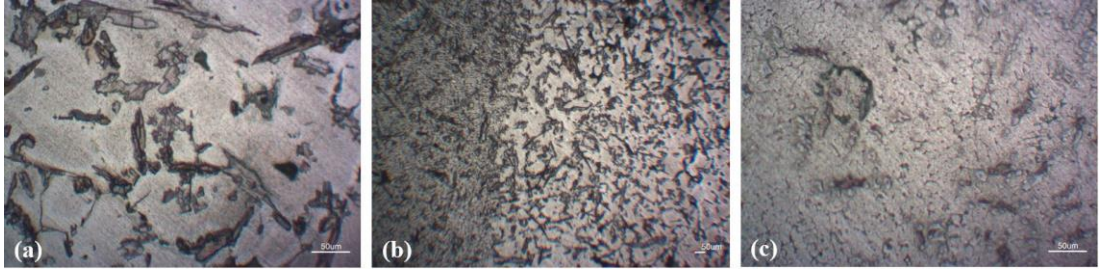


Şekil 6-47: PMC kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi

PMC kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri Şekil 6-48'de görülmektedir. Kaynak işleminde 241,56 J/mm'lik ısı girdisi olmuş ve kaynak bölgesinde gaz boşlukları oluşmuştur. Geçiş bölgesinde boşluklu yapı mevcuttur. Mikroyapıları ise Şekil 6-49'ta verilmiştir. Geçiş bölgesinde tane yönlenmesinden dolayı Al_2O_3 parçacıkları yer almış ve esas metalden kanak metaline doğru ısı girdisine bağlı olarak tane irileşmesi meydana gelmiştir.

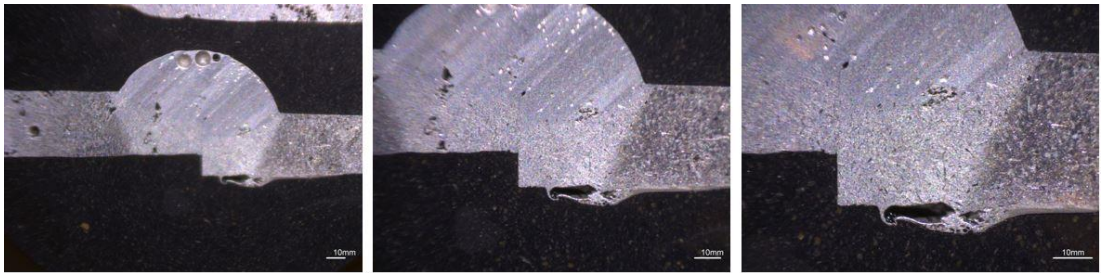


Şekil 6-48: PMC kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri



Şekil 6-49: PMC kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi

120 A'de ER5183 teli ile PMC kaynağı yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri Şekil 6-50'de verilmiştir. Kaynak nüfuziyeti tam sağlanamamış ve istenen birleştirme gerçekleşmemiştir. Kaynak işleminde 269,28 J/mm'lik ısı girdisi olmuştur. Kaynak bölgesinde gaz boşluklarından dolayı gözenekli yapı oluşmuştur. Şekil 6-51'de verilen mikroyapı görüntülerinde ise ısı girdisi kaynaklı tane irileşmesi görülmüştür. Geçiş bölgesinde de kaynak yönüne doğru tane yönelmesi oluşmuştur.



Şekil 6-50: PMC kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin makroyapı görüntüleri



Şekil 6-51: PMC kaynağı ile 120 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirilmesi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemenin mikroyapı görüntüleri, (a) esas malzeme, (b) geçiş bölgesi, (c) kaynak bölgesi

Numunelerin CMT ve PMC kaynak yöntemi ve farklı parametrelerdeki birleştirme işlemleri sonucunda en iyi kaynak yapısı 120 A ve ER5183 kaynak teli ile gerçekleştirilen %0,5 katkılı kompozit malzemede elde edilmiştir. PMC yönteminde ise %0,5 katkılı kompozit malzemenin kaynak yapılarının %1 katkılı kompozit malzemeye kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Isı girdisi nispeten az olan numunelerde katılma hızlı gerçekleştiğinden dolayı kaynak işlemi sırasında oluşan gazlar dışarıya çıkamamış ve daha büyük gaz boşlukları oluşmuştur. Isı girdisinin geleneksel ark kaynak yöntemlerine göre daha az olması ise esas malzemeyi daha az etkilemiş ve daha dar bir ITAB oluşmasını sağlamıştır. %0,5 katkılı kompozit malzemenin birleştirilmesinde aynı parametrelerde ER5183 teli ile gerçekleştirilen kaynak işlemi ER4043 teli ile gerçekleştirilen birleştirme işlemine göre daha iyi sonuç vermiştir. Tüm numunelerde esas malzemedeki kaynak bölgesine doğru ısı girdisinin artmasından kaynaklı tane irileşmesi görülmüştür. Isı girdisinin daha fazla olduğu birleştirme işlemlerinde tane irileşmesi daha belirgin haldedir.

6.2 Çekme Testi Sonuçları

Döküm işlemi sonrasında elde edilen takviyesiz alaşım, %0,5 ve %1 takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tespit edilebilmesi amacıyla her malzeme için üçer adet numune hazırlanmış ve çekme testi işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her malzeme türü için numunelerden elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Buna göre numunelerin çekme, akma değerleri ile uzama değerleri Tablo 6.8'de verilmiştir.

Tablo 6.8: Döküm işlemi sonrasında elde edilen kaynaklı numunelerin çekme, akma ve uzama değerleri

Malzeme	İlk Boy	Son Boy	Uzama (%)	R _m (MPa)	R _e (MPa)
AA 6013	100	100,95	0,95	83,73	67
AA 6013+ %0,5Al ₂ O ₃	100	101,17	1,17	95,48	76,58
AA 6013+ %1Al ₂ O ₃	100	100,82	0,82	89,52	72,4

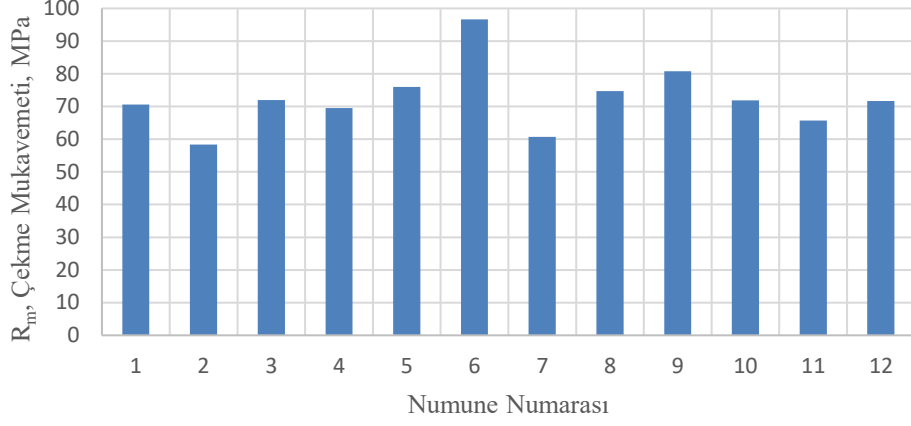
Kaynaklı birleştirmeler sonucunda çekme testi gerçekleştirilecek numunelerin her birinden üçer adet hazırlanmış ve elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır. Buna göre tüm numunelerin çekme, akma değerleri ile uzama değerleri Tablo 6.9'da verilmiştir.

Tablo 6.9: Farklı kaynak yöntemi ve parametrelerindeki numunelerin çekme, akma ve uzama değerleri

Numune Numarası	Malzeme	Kaynak Yöntemi	Kaynak Teli	Akım (A)	Voltaj (V)	İlk Boy	Son Boy	Uzama (%)	R _m (MPa)	R _e (MPa)
1	AA 6013	CMT	ER4043	110	14,2	110	112,79	2,54	70,6	57,8
2	AA 6013	CMT	ER4043	120	14,4	110	113,51	3,19	58,3	54,9
3	AA 6013+ %0,5Al ₂ O ₃	CMT	ER4043	110	14,2	140	142,64	1,89	72	57,5
4	AA 6013+ %0,5Al ₂ O ₃	CMT	ER4043	120	14,4	140	142,86	2,04	69,5	59,4
5	AA 6013+ %0,5Al ₂ O ₃	CMT	ER5183	110	14,2	140	143,44	2,46	75,9	61,3
6	AA 6013+ %0,5Al ₂ O ₃	CMT	ER5183	120	14,5	140	143,66	2,61	96,6	78
7	AA 6013+ %1Al ₂ O ₃	CMT	ER5183	110	14,2	140	142,7	1,93	60,7	51,3
8	AA 6013+ %1Al ₂ O ₃	CMT	ER5183	120	14,5	140	142,89	2,06	74,7	60
9	AA 6013+ %0,5Al ₂ O ₃	PMC	ER5183	110	18,3	140	142,44	1,74	80,8	60,9
10	AA 6013+ %0,5Al ₂ O ₃	PMC	ER5183	120	18,7	140	142,61	1,86	71,8	63,3
11	AA 6013+ %1Al ₂ O ₃	PMC	ER5183	110	18,3	140	142,63	1,88	65,7	46,7
12	AA 6013+ %1Al ₂ O ₃	PMC	ER5183	120	18,7	140	144,98	3,56	71,7	59,2

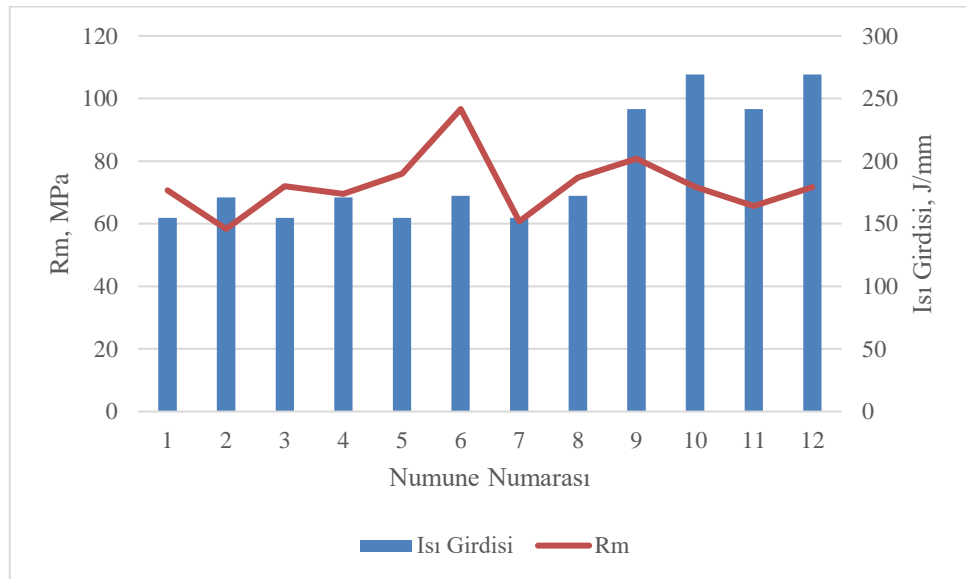
Kaynaklı birleştirme işlemlerindeki en yüksek çekme değeri olan 96,6 MPa değeri, CMT yöntemi, ER5183 kaynak teli kullanılarak 120 amper değerinde birleştirme işlemi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemede elde edilmiştir. En düşük değer olan 58,3 MPa ise CMT yöntemi, ER4043 kaynak teli kullanılarak 120

amper değerinde birleştirme işlemi yapılan takviyesiz alaşımda elde edilmiştir. Tüm numunelere ait çekme mukavemeti değerleri Şekil 6-52’de verilmiştir.



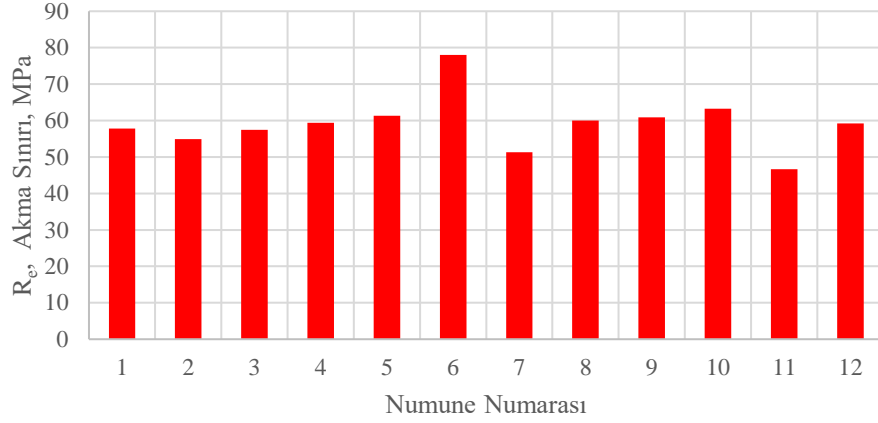
Şekil 6-52: Tüm numunelerin çekme mukavemeti değerlerinin karşılaştırılması

Kaynak işlemindeki akım değerinin artması ısı girdisi miktarını artırmaktadır. 110 A’de kaynak işlemi gerçekleştirilen AA 6013 alaşımında 154,64 J/mm’lik ısı girdisi olup 70,63 MPa mukavemet değeri elde edilirken 120 A’de birleştirme işlemi gerçekleştirilen AA 6013 alaşımında %11 daha fazla ısı girdisi olmuş ve %17 daha düşük bir mukavemet elde edilmiştir. Diğer numuneler de incelendiğinde ısı girdisinin artmasının mukavemeti düşürdüğü söylenebilir. Isı girdisi-çekme mukavemeti ilişkisi Şekil 6-53’te verilmiştir.



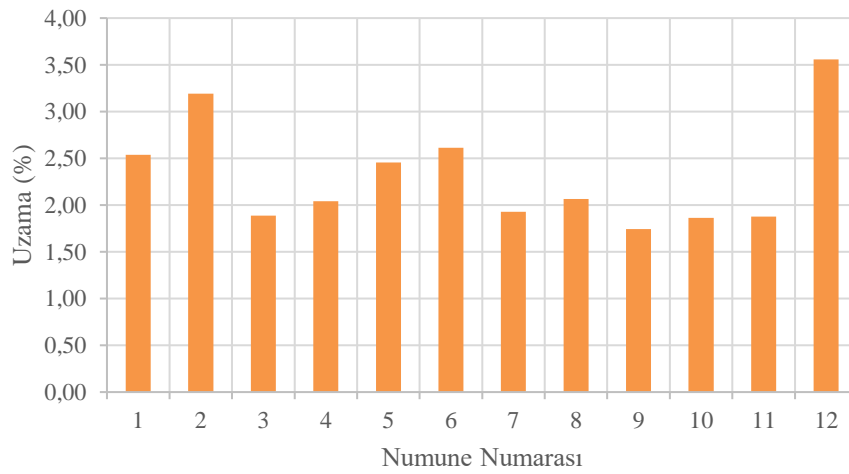
Şekil 6-53: Isı girdisi - çekme mukavemeti arasındaki ilişki

En yüksek akma sınırı değeri 78 MPa olup CMT yöntemi, ER5183 kaynak teli kullanılarak 120 amper değerinde birleştirme işlemi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemede elde edilmiştir. En düşük değer olan 51,3 MPa değeri ise CMT yöntemi, ER5183 kaynak teli kullanılarak 110 amper değerinde birleştirme işlemi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemede elde edilmiştir. Tüm numunelere ait akma sınırı değerleri Şekil 6-54'te verilmiştir.



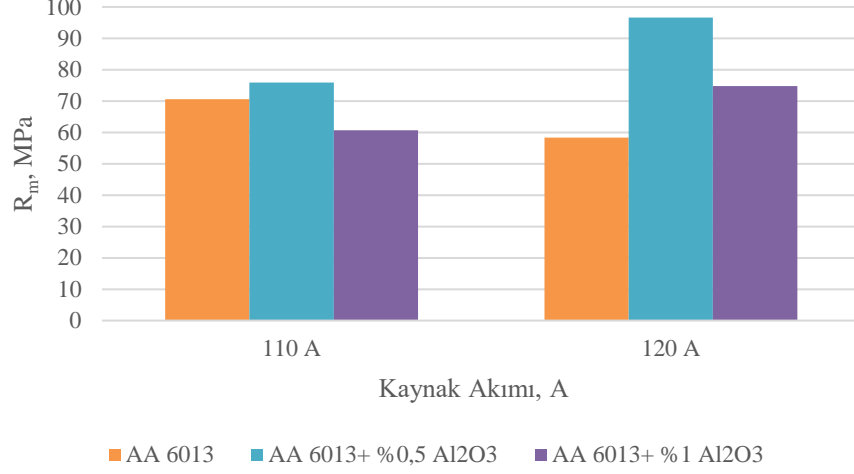
Şekil 6-54: Tüm numunelerin akma sınırı değerlerinin karşılaştırılması

Birleştirme işlemi yapılan tüm numunelerin yüzde uzamaları Şekil 6-55'te verilmiştir. Buna göre en yüksek uzama %3,56 ile %1 takviyeli ve PMC yöntemi ile 120 amper değerinde gerçekleştirilen birleştirmede görülürken en düşük uzama %1,74 ile %0,5 takviyeli PMC yöntemi ile 110 amperde birleştirilen numunede görülmüştür.



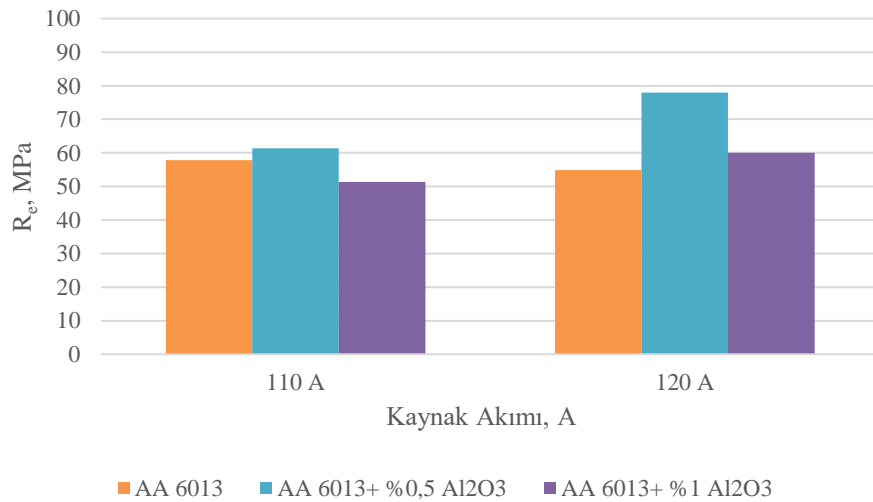
Şekil 6-55: Tüm numunelerin uzama (%) karşılaştırması

Ağırlıkça farklı oranlara sahip kompozit malzemelerin ve takviyesiz alaşımın CMT yöntemi ile kaynağında farklı akımlardaki çekme mukavemetleri ve akma sınırları Şekil 6-56 ve Şekil 6-57’de verilmiştir.



Şekil 6-56: 110 A ve 120 A akım değerlerindeki CMT kaynağının çekme mukavemetleri

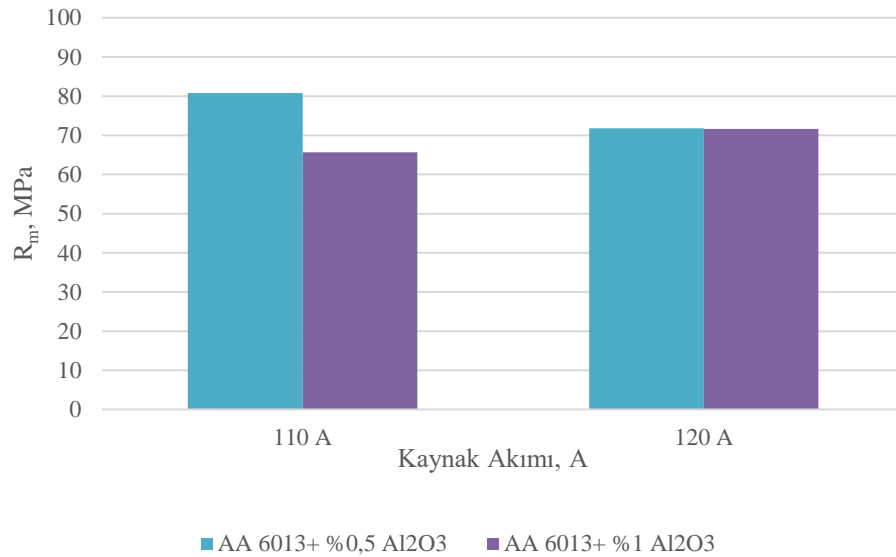
Takviyesiz AA 6013 alaşımının, artan kaynak akım değeri ve ısı girdisi nedeniyle R_m değeri 70,63 MPa'dan 58,32 MPa değerine düşmüştür. %0,5 ve %1 Al_2O_3 takviyeli kompozitlerin ise kaynak akımının artmasıyla birlikte R_m değerleri artmıştır. Al_2O_3 ilavesiyle, kaynak bölgesinde oluşan çökeltilerin kaynak bölgesinin mukavemetini arttırdığı sonucu çıkarılabilir. En fazla artış %27’lik değer ile %0,5 katkıli kompozitte elde edilmiştir. CMT kaynaklı birleştirme için %1 yerine %0,5 oranında Al_2O_3 takviyesinin optimum olduğu söylenebilir.



Şekil 6-57: 110 A ve 120 A akım değerlerindeki CMT kaynağının akma sınırları

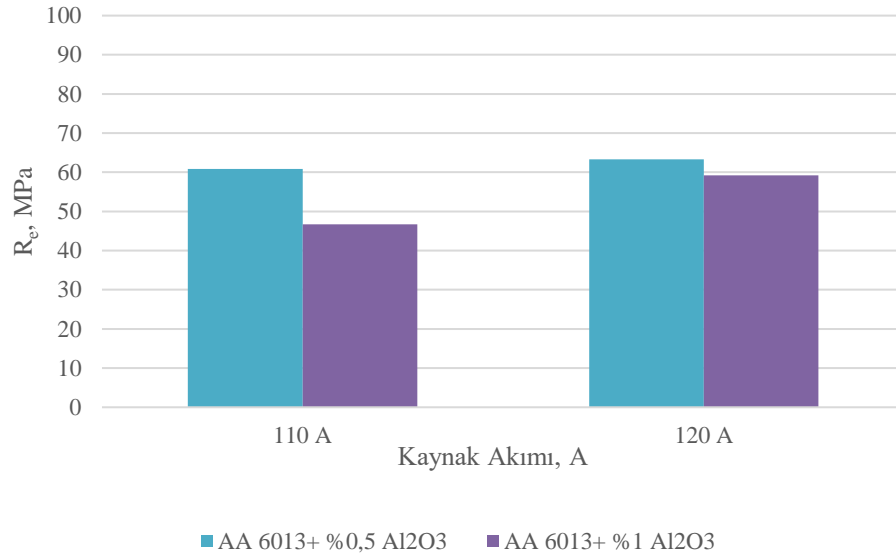
Takviyesiz AA 6013 alaşımının, artan kaynak akım değeri ve ısı girdisi nedeniyle R_e değeri 57,81 MPa'dan 54,9 MPa değerine dūřmūřtur. %0,5 ve %1 Al_2O_3 takviyeli kompozitlerin ise kaynak akımının artmasıyla birlikte R_e değerleri artmıştır. Al_2O_3 ilavesiyle, kaynak bōlgesinde oluşan okeltelerin kaynak bōlgesinin mukavemetini arttırdığı sonucu çıkarılabilir. En fazla artış %28'lik değer ile %0,5 katkıli kompozitte elde edilmiştir. CMT kaynaklı birleştirme için %1 yerine %0,5 oranında Al_2O_3 takviyesinin optimum olduğu sōylenebilir.

PMC kaynağında ise %0,5 ve %1 takviyeli kompozit malzemelerin birleştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. 110 ve 120 A olmak ūzere iki farklı akımdaki çekme mukavemetleri ve akma sınırları Őekil-58 ve Őekil-59'da belirtilmiştir.



Şekil 6-58: 110 A ve 120 A değerlerindeki PMC kaynağının çekme mukavemetleri

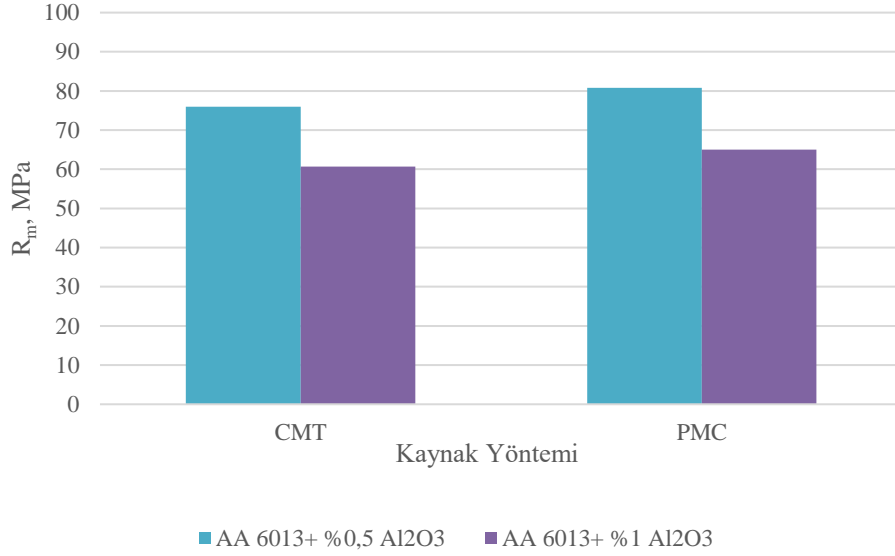
PMC kaynaęında %0,5 takviyeli kompozitin R_m deęeri artan kaynak akımıyla birlikte 80,81 MPa'dan 71,83 MPa deęerine dūřmūřtur. %1 takviyeli kompozitin ise, artan ısı girdisi ile R_m deęeri 65,7 MPa'dan 71,66 MPa deęerine yūkselmiřtir. Sonuç olarak, 120 A kaynak akımında elde edilen R_m deęerleri aynı çıkmıřtır.



Şekil 6-59: 110 A ve 120 A akım değerlerindeki PMC kaynağının akma sınırları

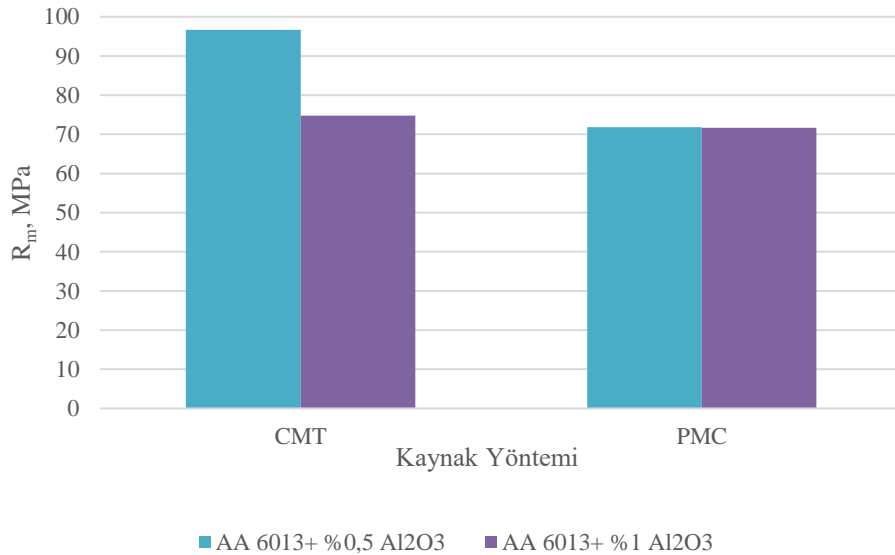
PMC kaynağında %0,5 takviyeli kompozitin R_e değeri, artan kaynak akımıyla birlikte 60,89 MPa'dan 63,28 MPa değerine yükselmiştir. %1 takviyeli kompozitin ise, artan kaynak akımı değeri ile R_e değeri 46,7 MPa'dan 59,18 MPa değerine yükselmiştir. Sonuç olarak, 120 A kaynak akımında elde edilen R_e değerleri arasındaki oran sadece %6 değişmiştir.

CMT ve PMC kaynak yöntemleri ile 110 amper ve 120 amperde birleştirme işlemi yapılan numunelerin çekme mukavemeti değerleri Şekil-60 ve Şekil-61'de verilmiştir.



Şekil 6-60: 110 A akım değerinde CMT ve PMC kaynak yöntemleri ile elde edilen numunelerin çekme mukavemetleri

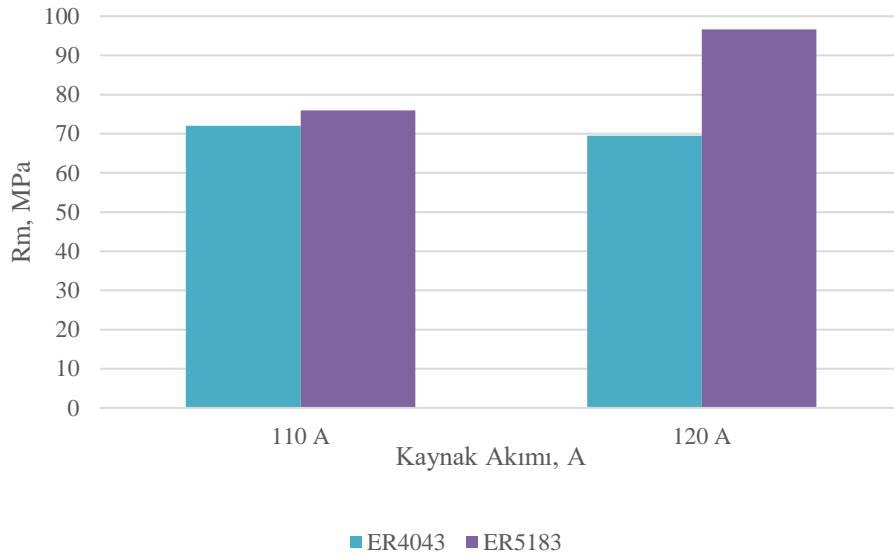
110 A kaynak akımında %0,5 takviyeli kompozit malzeme, PMC kaynak yöntemiyle 80,81 MPa R_m değerine ulaşmıştır. CMT kaynağıyla aradaki fark %6 olarak elde edilmiştir. %1 takviyeli kompozit de PMC kaynak yönteminde 110 A kaynak akımında 65 MPa dayanım göstermiştir ve CMT kaynak yöntemiyle aradaki dayanım oranı %7 olarak tespit edilmiştir. %0,5 takviyeli kompozit, 110 A kaynak akımında her iki kaynak yönteminde de en yüksek dayanımı göstermiştir.



Şekil 6-61: 120 A akım değerinde CMT ve PMC kaynak yöntemleri ile elde edilen numunelerin çekme mukavemetleri

120 A kaynak akımında %0,5 takviyeli kompozit, CMT kaynak yöntemiyle 96,63 MPa R_m değerine ulaşmıştır. PMC kaynağına göre %34 daha fazla dayanım elde edilmiştir. %0,5 takviyeli kompozit için CMT kaynak yönteminin ve 120 A kaynak akımının optimum özellikleri sağladığı sonucu çıkarılmaktadır. %1 takviyeli kompozit de PMC kaynak yönteminde 120 A kaynak akımında 71,66 MPa dayanım göstermiştir ve CMT kaynak yöntemiyle aradaki dayanım oranı %4 olarak tespit edilmiştir. %0,5 takviyeli kompozit, 120 A kaynak akımında her iki kaynak yönteminde de en yüksek dayanımı göstermiştir.

%0,5 takviye oranına sahip kompozit malzeme numuneleri CMT kaynak yönteminde ER4043 ve ER5183 olmak üzere iki farklı kaynak teli ve iki farklı akım değerinde birleştirilmiştir. Numunelerin çekme testi sonuçlarından elde edilen değerler Şekil-62’de verilmiştir.

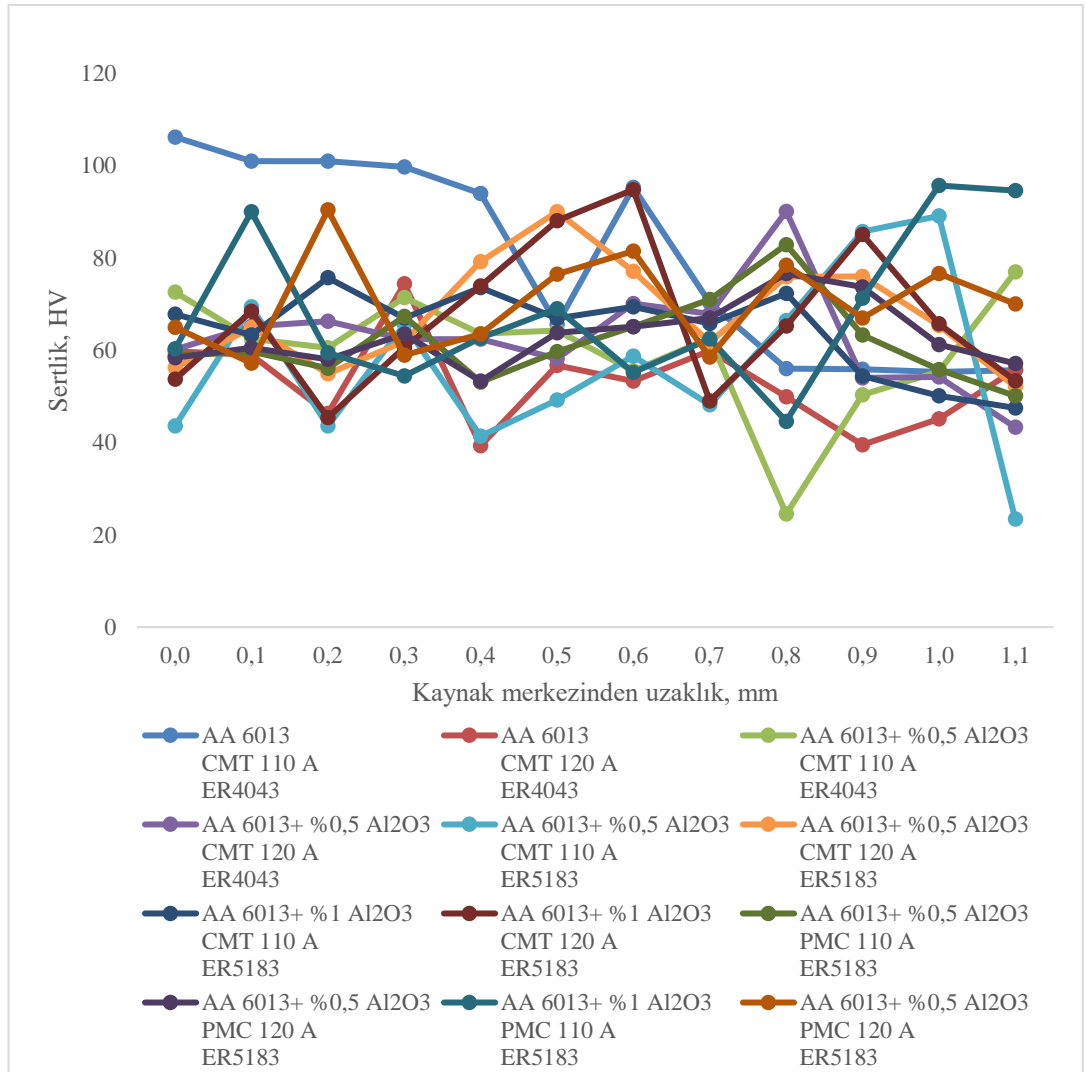


Şekil 6-62: %0,5 takviyeli kompozit malzemenin CMT yönteminde farklı kaynak telleri ile birleştirilmesi sonucu elde edilen çekme mukavemetleri

%0,5 takviyeli kompozitin kaynağında kullanılan iki farklı telden ER5183 teli, 110 ve 120 A kaynak akımı değerlerinde ER4043 teline göre daha yüksek dayanım elde edilmesini sağlamıştır. 110 A akım değerinde ER4043 ile elde edilmiş olan R_m değeri 72 MPa iken ER5183 teli ile 75,94 MPa değeri elde edilmiş ve sadece %5’lik bir artış olmuştur. 120 A kaynak akımı uygulandığında ise ER5183 kaynak teli, ER4043 kaynak teline oranla çekme mukavemetinde %39’luk bir artış sağlamıştır.

6.3 Sertlik Ölçüm Sonuçları

Farklı kaynak yöntemleri ve farklı parametrelerde birleştirme işlemi gerçekleştirilen numunlerin sertlik ölçümleri kaynak bölgesi, ITAB ve esas malzeme olmak üzere 12 noktadan gerçekleştirilmiştir. Ölçüm işlemi kaynak merkezinden başlayıp 0,1 mm aralıklar ile esas malzemeye doğru yapılmıştır. Tüm numunelere ait sertlik değerleri Şekil 6-63'te verilmiştir.

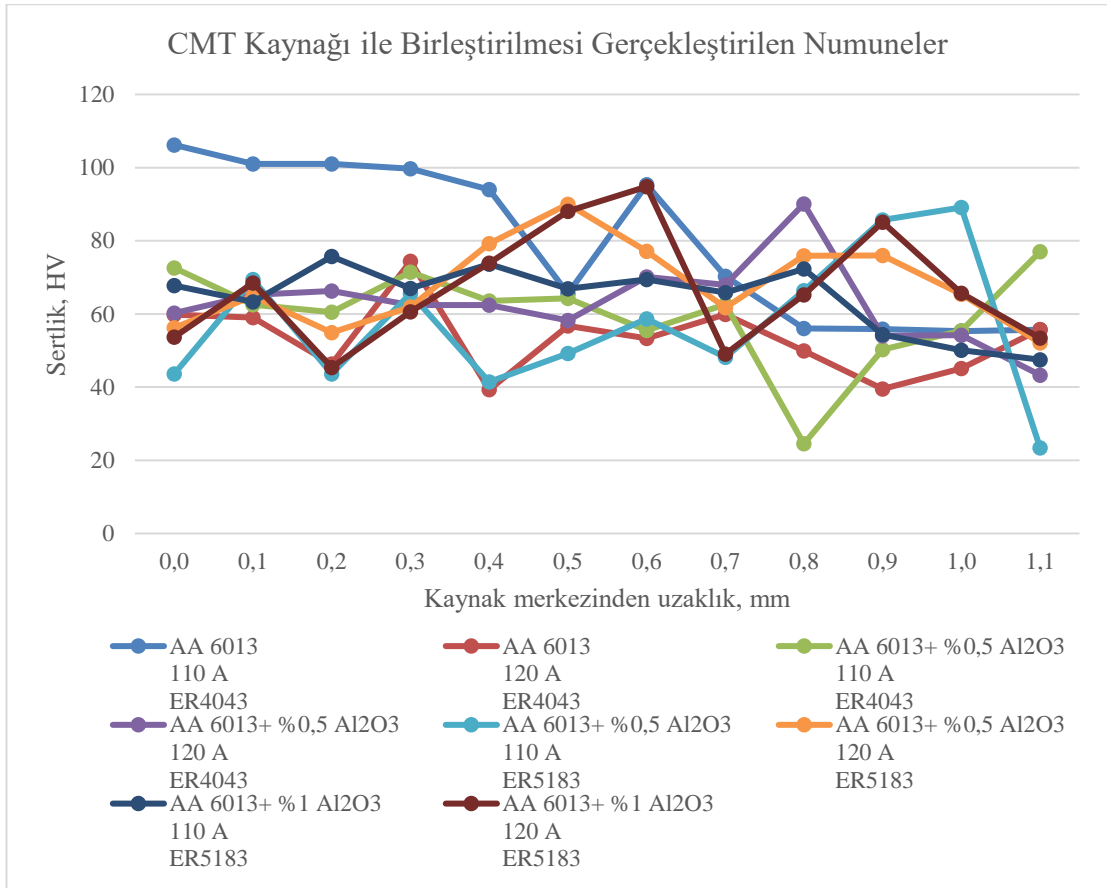


Şekil 6-63: Tüm numunelere ait sertlik değişimleri

CMT ve PMC yönteminde farklı parametreler ve farklı takviye oranlarına sahip malzemelerin birleştirme işlemleri sonucu en yüksek sertlik değeri 106,2 HV ile CMT yöntemi, 110 A akım ve ER4043 teli ile kaynak işlemi gerçekleştirilen takviyesiz AA 6013 alaşımının kaynak merkezinde ölçülmüştür. En düşük sertlik ise CMT yöntemi,

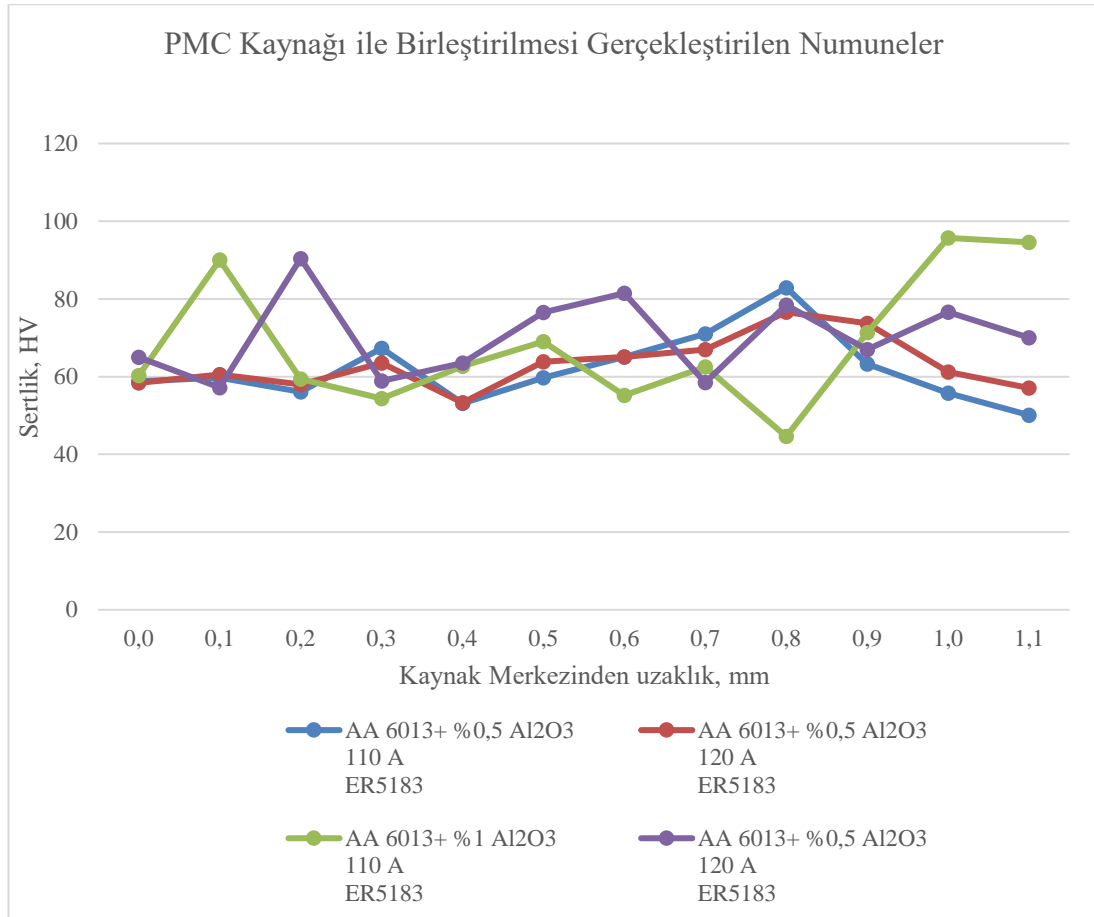
110 A, ER5183 teli parametreleri ile birleştirilmesi gerçekleşen %0,5 katkılı kompozit malzemenin kaynak merkezine en uzak noktasından ölçülen 23,4 HV değeridir. Takviyesiz alaşımda ölçülen en yüksek sertliğin kaynak merkezinde, en düşük sertliğin ise kaynak bölgesinden en uzak bölgedeki esas malzemedeki olması, ısı girdisi sonucu esas metalin ergiyip hızlı katılaşması ile oluşan iç gerilmelerden kaynaklanmaktadır. Aynı zamanda kullanılan kaynak metali de sertliğin daha yüksek olmasında etkindir. Takviyeli malzemelerde ölçülen geçiş bölgesi ve esas malzemedeki yüksek sertlik değerleri ise kompozit malzemedeki Al₂O₃ partiküllerinin sert yapısından dolayıdır. CMT ve PMC yöntemlerinin diğer ark kaynak yöntemlerine göre daha az ısı girdisi ile kaynak yapılmasını sağlamasından dolayı esas metalin ısıdan etkilenmesi daha az olmuş ve kaynak merkezinden esas malzemeye doğru sertlik değerleri birbirine yakın ölçülmüştür.

CMT kaynak yöntemi ile 110 A ve 120 A’de birleştirme işlemi gerçekleştirilen farklı takviye oranlarına sahip kompozit malzeme ve takviyesiz alaşımın sertlik değerleri Şekil 6-64’te yer almaktadır. En yüksek sertlik değeri 110 A’de kaynağı yapılan takviyesiz alaşım olup kaynak merkezinde 106,2 HV ölçülmüştür. En düşük değer ise %0,5 katkılı 110 A’de ER5183 teli ile kaynağı yapılan kompozit malzemedeki ölçülüp, esas malzeme üzerinde kaynak merkezine en uzak bölgedeki 23,4 HV değeridir. Kaynak merkezinden esas malzemeye doğru sertlik değerleri takviyesiz alaşımda azalırken kompozit numunelerde belirgin bir değişim gözlenmemiştir.



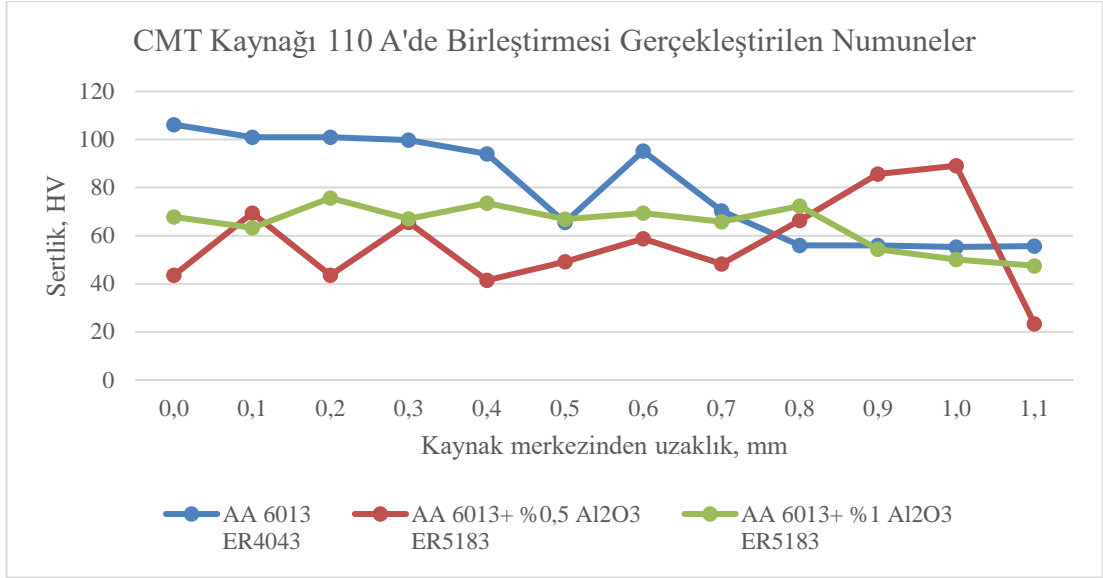
Şekil 6-64: CMT kaynak yöntemi ile birleştirilmesi yapılan numunelerin sertlik değişimi

PMC kaynak yöntemi ile 110 A ve 120 A’de birleştirme işlemi gerçekleştirilen farklı takviye oranlarına sahip kompozit malzeme ve takviyesiz alaşımın sertlik değerleri Şekil 6-65’te yer almaktadır. En yüksek sertlik değeri 110 A’de birleştirilen %1 takviyeli kompozit malzemedeki esas malzeme üzerindeki 95,7 HV olarak ölçülmüştür. En yüksek sertliğin esas malzemedeki ölçülmesinin nedeni Al₂O₃ parçacıklarının matrise göre daha sert yapıda olmasından kaynaklanmıştır. En düşük sertlik ise 110 A’de birleştirilen %1 takviyeli kompozit malzemedeki esas malzeme üzerindeki 44,6 HV değeridir. PMC kaynağı ile birleştirilen tüm numunelerde sertlik değişimlerinde belirgin bir fark olmamıştır.



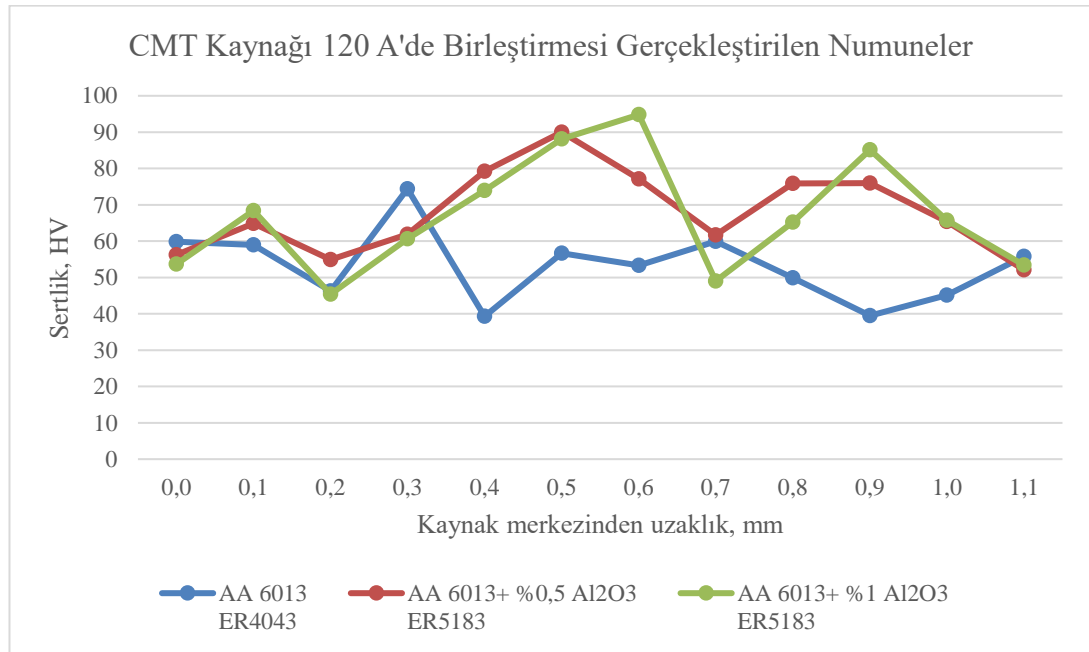
Şekil 6-65: PMC kaynak yöntemi ile birleştirilmesi yapılan numunelerin sertlik değişimi

CMT yönteminde 110 A akım değerinde birleştirilmesi yapılan takviyesiz alaşım, %0,5 ve %1 takviyeli kompozit malzemelere ait sertlik değerlerinin değişimi Şekil 6-66'da verilmiştir. En yüksek sertlik değeri takviyesiz alaşımın kaynak merkezinde ölçülürken %0,5 takviyeli kompozit malzemenin kaynak bölgesi ve ITAB'daki sertlikleri %1 takviyeli kompozit malzemenin sertlik değerlerinden daha küçüktür.



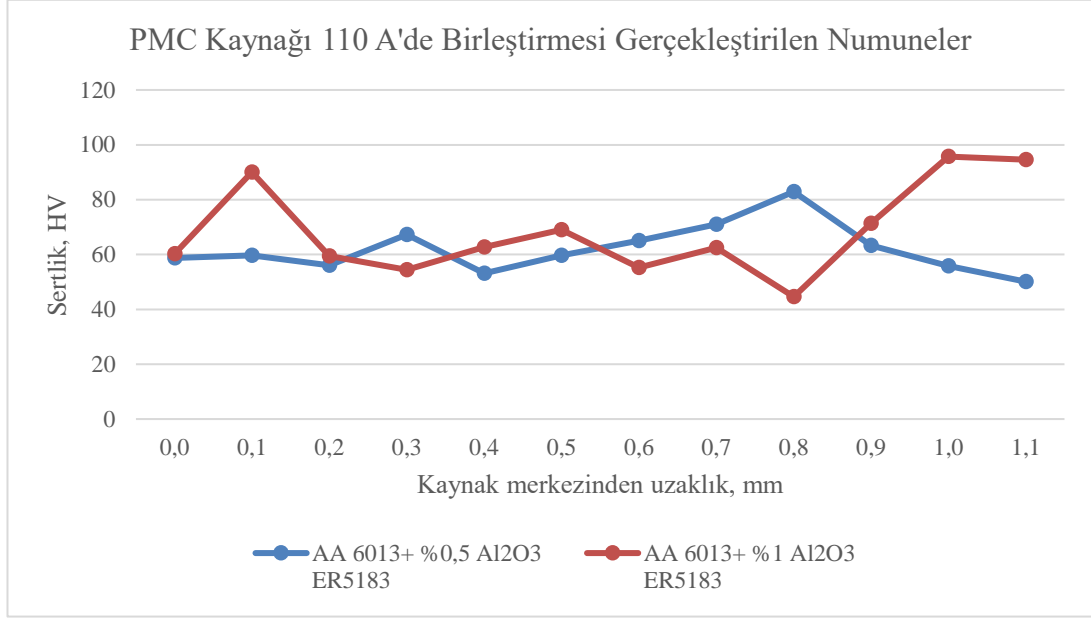
şekil 6-66: CMT yöntemi, 110 A akım değerindeki birleştirmesi yapılan numunelerin sertlik değişimi

CMT yönteminde 120 A akım değerinde birleştirmesi yapılan takviyesiz alaşım, %0,5 ve %1 takviyeli kompozit malzemelere ait sertlik değerlerinin değişimi şekil 6-67'de verilmiştir. Kaynak merkezindeki sertlik değerleri birbirine yakın değerler olup 53,7 ile 59,8 HV arasında ölçölmüştür. %0,5 ve %1 takviyeli kompozit malzemelerin sertlik değerlerinin takviyesiz alaşıma göre ITAB ve esas malzemede daha yüksek değerlerde ölçölmesi takviye malzemesinin sertliğinden kaynaklanmaktadır.



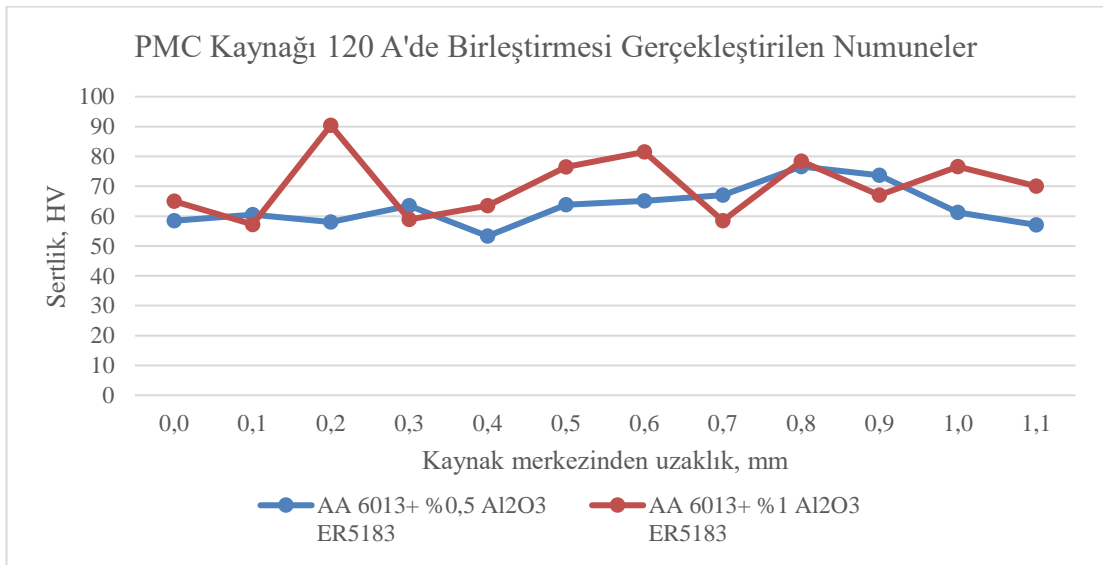
şekil 6-67: CMT yöntemi, 120 A akım değerindeki birleştirmesi yapılan numunelerin sertlik değişimi

PMC yönteminde 110 A akım değerinde birleştirmesi yapılan %0,5 ve %1 takviyeli kompozit numunelerine ait sertlik değerlerinin değişimi Şekil 6-68'de verilmiştir. İki numunenin de kaynak merkezinde birbirine yakın değerler ölçülürken, geçiş bölgesi ve esas malzemedeki sertlik değerlerinde belirgin bir fark görülmemiştir.



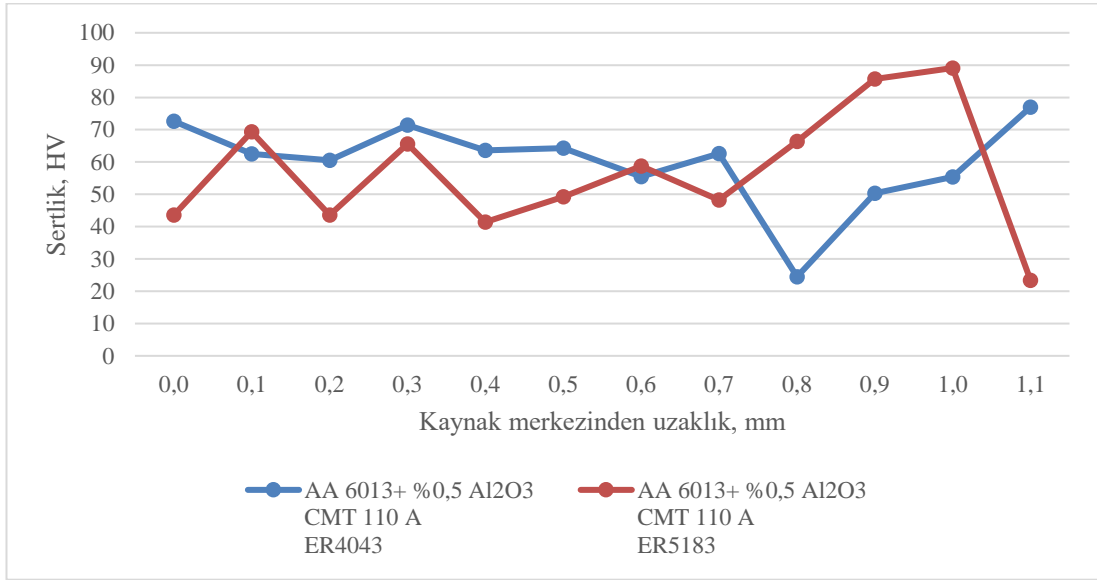
Şekil 6-68: PMC yöntemi, 110 A akım değerindeki birleştirmesi yapılan numunelerin sertlik değişimi

PMC yönteminde 120 A akım değerinde birleştirmesi yapılan %0,5 ve %1 takviyeli numunelere ait sertlik değerlerinin değişimi Şekil 6-69'ta verilmiştir. Takviye oranlarının değişiminin sertlik değerleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.



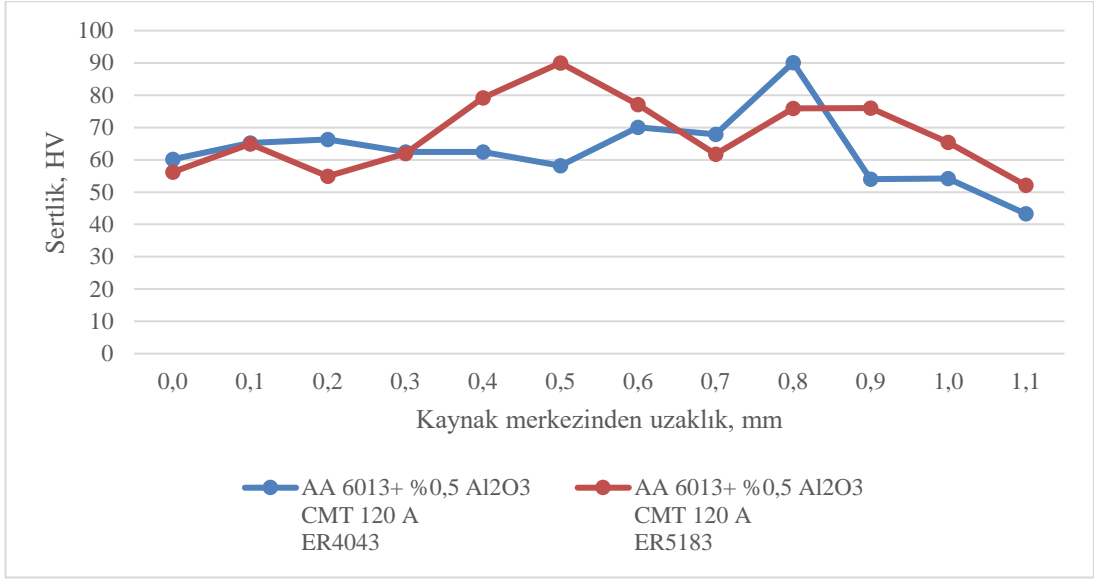
Şekil 6-69: PMC yöntemi, 120 A akım değerindeki birleştirmesi yapılan numunelerin sertlik değişimi

CMT yönteminde 110 A akım değerinde ER4043 ve ER5183 kaynak telleri ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin numunelerine ait sertlik değerlerinin değişimi Şekil 6-70’de verilmiştir. ER5183 teli ile yapılan kaynak işleminin kaynak merkezindeki sertlik değeri 43,6 HV, ER4043 teli ile yapılan kaynak işleminin kaynak merkezindeki sertlik değeri ise 72,6 HV olarak ölçülmüştür. ER5183 teli kullanılan kaynak işleminde kaynak merkezi ve ITAB’da daha düşük değerler ölçülmüştür.



Şekil 6-70: CMT yöntemi, 110 A değerinde farklı kaynak tellerinin sertlik değişimine etkisi

CMT yönteminde 120 A akım değerinde ER4043 ve ER5183 kaynak telleri ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin numunelerine ait sertlik değerlerinin değişimi Şekil 6-71’de verilmiştir. Kaynak merkezinin sertlik değerleri ER5183 telinde 56,2 HV ve ER4043 telinde 60,2 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak bölgesi ve ITAB’daki sertlik değişimlerinde ise belirgin bir farklılık görülmemiştir.



Şekil 6-71: CMT yöntemi, 120 A değerinde farklı kaynak tellerinin sertlik değişimine etkisi

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada alüminyum AA 6013 matrisli ve ağırlıkça %0,5 ve %1 nano- Al_2O_3 takviyeli 2 farklı kompozit, karıştırmalı döküm yöntemiyle üretilmiştir. AA 6013 alaşımı, ısıl işlem uygulanabilen, şekillendirmeye uygun, kaynak yöntemi ile birleştirilebilen, işlenebilen ve korozyon direnci yüksek olmasından dolayı pek çok farklı alanda kullanılan bir alaşımdır. Bu alaşımın sertlik, aşınma ve mukavemetini arttırmak amacıyla içerisine katılan nano- Al_2O_3 seramik partiküllerin, kompozitin kaynak edilebilirliği ve mukavemetine etkisi incelenmiştir.

Takviyesiz ve ağırlıkça %0,5 ve %1 nano- Al_2O_3 takviye oranlarına sahip, 250x110x60 mm ölçülerindeki döküm kompozit malzemelerin yüzeyinden 5 mm talaş kaldırılmış ve 3,5x100x50 mm ölçülerinde kesilerek kaynak işlemi için numuneler hazırlanmıştır. Elde edilen plakalar, Fronius International firmasında CMT (Cold Metal Transfer) ve PMC (Pulse Multi Control) kaynak yöntemleri ile alın alına birleştirilmiştir. Kaynak işleminde 1,2 mm çapındaki ER5183 (AlMg4.5Mn) ve ER4043 (AlSi5) kaynak telleri kullanılmıştır. CMT ve PMC kaynak yöntemlerinin her biri için 110 ve 120 A olmak üzere 2 farklı akım şiddetinde birleştirme işlemi gerçekleştirilmiştir. CMT kaynak yönteminde %0,5 takviye oranına sahip kompozit malzeme için 2 farklı kaynak telinde birleştirme yapılmıştır. Kaynak işlemleri 400 mm/dak sabit hızda gerçekleştirilmiş ve her bir kaynak parametresi için ısı girdisi hesaplanmıştır. Her numune için 3,5x20x140 mm lama formunda numuneler standartlara uygun bir şekilde kesilerek, çekme testi numuneleri oluşturulmuştur.

Kompozit malzemelerin mikro yapı, makro yapı ve sertlik değerleri, stereo mikroskop, optik mikroskop, SEM ve mikro sertlik cihazı ile incelenmiştir. Çekme deneyleri sonucunda, her bir kaynak parametresinin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmaların sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

Al_2O_3 nano tozların her iki kompozitte de topaklanma olmadan dağıldığı gözlemlenmiştir. Nano tozların etrafında, Fe, Zn, Cr, Si ve Mg'dan oluşan yapılar ince çubuksu yapılar halinde oluşmuştur.

Kaynaklı birleştirmelerde kaynak akım ve voltajına bağlı olarak 154,64 - 269,28 J/mm arasında ısı girdisi oluşmuştur.

En az gaz boşluğu oluşan kaynaklı bağlantılar, 120 A'de ER4043 teli ile CMT kaynağı yapılan takviyesiz AA 6013 alaşımı, PMC kaynağı ile 110 A'de ER5183 kaynak teli ile birleştirmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit ve 120 A'de PMC kaynağı ve ER5183 teli ile kaynak işlemi gerçekleştirilen %0,5 takviyeli kompozit malzemede elde edilmiştir.

Numunelerin CMT ve PMC kaynak yöntemi ve farklı parametrelerdeki birleştirme işlemleri sonucunda en iyi kaynak yapısı 120 A ve ER5183 kaynak teli ile gerçekleştirilen %0,5 katkılı kompozit malzemede elde edilmiştir.

PMC yönteminde %0,5 katkılı kompozit malzemenin kaynak yapılarının %1 katkılı kompozit malzemeye kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

%0,5 katkılı kompozit malzemenin birleştirilmesinde aynı parametrelerde ER5183 teli ile gerçekleştirilen kaynak işlemi ER4043 teli ile gerçekleştirilen birleştirme işlemine göre daha iyi sonuç vermiştir.

Tüm numunelerde esas malzemedeki kaynak bölgesine doğru tane irileşmesi görülmüştür. Isı girdisinin daha fazla olduğu birleştirme işlemlerinde tane irileşmesi daha belirgin haldedir.

Kaynaklı birleştirme işlemlerindeki en yüksek çekme değeri olan 96,6 MPa değeri, CMT yöntemi, ER5183 kaynak teli kullanılarak 120 amper değerinde birleştirme işlemi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemede elde edilmiştir.

Kaynaklı birleştirme işlemlerindeki en düşük değer olan 58,3 MPa, CMT yöntemi, ER4043 kaynak teli kullanılarak 120 amper değerinde birleştirme işlemi yapılan takviyesiz kompozit malzemede elde edilmiştir.

110 A'de kaynak işlemi gerçekleştirilen AA 6013 alaşımında 154,64 J/mm'lik ısı girdisi olup 70,63 MPa mukavemet değeri elde edilirken 120 A'de birleştirme işlemi gerçekleştirilen AA 6013 alaşımında %11 daha fazla ısı girdisi olmuş ve %17 daha düşük bir mukavemet elde edilmiştir.

En yüksek akma sınırı değeri 78 MPa olup CMT yöntemi, ER5183 kaynak teli kullanılarak 120 amper değerinde birleştirme işlemi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemede elde edilmiştir.

En düşük akma sınırı değeri 46,7 MPa olarak, PMC yöntemi, ER5183 kaynak teli kullanılarak 110 amper değerinde birleştirme işlemi yapılan %1 takviyeli kompozit malzemede elde edilmiştir.

Takviyesiz AA 6013 alaşımının, artan kaynak akım değeri ve ısı girdisi nedeniyle R_m değeri 70,63 MPa'dan 58,32 MPa değerine düşmüştür.

%0,5 ve %1 Al_2O_3 takviyeli kompozitlerin ise kaynak akımının artmasıyla birlikte R_m değerleri artmıştır. Al_2O_3 ilavesiyle, kaynak bölgesinde oluşan çökeltilerin kaynak bölgesinin mukavemetini arttırdığı sonucu çıkarılabilir. En fazla artış %27'lik değer ile %0,5 katkıli kompozitte elde edilmiştir. CMT kaynaklı birleştirme için %1 yerine %0,5 oranında Al_2O_3 takviyesinin optimum olduğu sonucuna varılmıştır.

Takviyesiz AA 6013 alaşımının, artan kaynak akım değeri ve ısı girdisi nedeniyle R_e değeri 57,81 MPa'dan 54,9 MPa değerine düşmüştür.

%0,5 ve %1 Al_2O_3 takviyeli kompozitlerin ise kaynak akımının artmasıyla birlikte R_e değerleri artmıştır. En fazla artış %28'lik değer ile %0,5 katkıli kompozitte elde edilmiştir. Al_2O_3 ilavesiyle, kaynak bölgesinde oluşan çökeltilerin kaynak bölgesinin mukavemetini arttırdığı ve CMT kaynaklı birleştirme için %1 yerine %0,5 oranında Al_2O_3 takviyesinin optimum olduğu sonucuna varılmıştır.

PMC kaynağında %0,5 takviyeli kompozitin R_m değeri artan kaynak akımıyla birlikte 80,81 MPa'dan 71,83 MPa değerine düşmüştür. %1 takviyeli kompozitin ise, artan ısı girdisi ile R_m değeri 65,7 MPa'dan 71,66 MPa değerine yükselmiştir. Sonuç olarak, 120 A kaynak akımında elde edilen R_m değerleri aynı çıkmıştır.

PMC kaynağında %0,5 takviyeli kompozitin R_e değeri, artan kaynak akımıyla birlikte 60,89 MPa'dan 63,28 MPa değerine yükselmiştir. %1 takviyeli kompozitin ise, artan kaynak akımı değeri ile R_e değeri 46,7 MPa'dan 59,18 MPa değerine yükselmiştir. Sonuç olarak, 120 A kaynak akımında elde edilen R_e değerleri arasındaki oran sadece %6 değişmiştir.

110 A kaynak akımında %0,5 takviyeli kompozit malzeme, PMC kaynak yöntemiyle 80,81 MPa R_m değerine ulaşmıştır. CMT kaynağıyla aradaki fark %6 olarak elde edilmiştir.

%1 takviyeli kompozit PMC kaynak yönteminde 110 A kaynak akımında 65 MPa dayanım göstermiştir ve CMT kaynak yöntemiyle aradaki dayanım oranı %7 olarak tespit edilmiştir.

%0,5 takviyeli kompozit, 110 A kaynak akımında her iki kaynak yönteminde de en yüksek dayanımı göstermiştir.

120 A kaynak akımında %0,5 takviyeli kompozit, CMT kaynak yöntemiyle 96,63 MPa R_m değerine ulaşmıştır. PMC kaynağına göre %34 daha fazla dayanım elde edilmiştir.

%0,5 takviyeli kompozit için CMT kaynak yönteminin ve 120 A kaynak akımının optimum özellikleri sağladığı sonucu çıkarılmaktadır.

%1 takviyeli kompozit PMC kaynak yönteminde 120 A kaynak akımında 71,66 MPa dayanım göstermiştir ve CMT kaynak yöntemiyle aradaki dayanım oranı %4 olarak tespit edilmiştir.

%0,5 takviyeli kompozit, 120 A kaynak akımında her iki kaynak yönteminde de en yüksek dayanımı göstermiştir.

%0,5 takviyeli kompozitin kaynağında kullanılan iki farklı telden ER5183 teli, 110 ve 120 A kaynak akımı değerlerinde ER4043 teline göre daha yüksek dayanım elde edilmesini sağlamıştır.

%0,5 takviyeli kompozitin kaynağında 110 A akım değerinde ER4043 ile elde edilmiş olan R_m değeri 72 MPa iken ER5183 teli ile 75,94 MPa değeri elde edilmiş ve sadece %5'lik bir artış olmuştur.

%0,5 takviyeli kompozitin kaynağında 120 A kaynak akımı uygulandığında ER5183 kaynak teli, ER4043 kaynak teline oranla çekme mukavemetinde %39'luk bir artış sağlamıştır.

En yüksek sertlik değeri 106,2 HV ile CMT yöntemi, 110 A akım ve ER4043 teli ile kaynak işlemi gerçekleştirilen takviyesiz AA 6013 alaşımının kaynak merkezinde ölçülmüştür.

En düşük sertlik değeri CMT yöntemi, 110 A, ER5183 teli parametreleri ile birleştirilmesi gerçekleşen %0,5 katkılı kompozit malzemenin kaynak merkezine en uzak noktadan ölçülen 23,4 HV değeridir.

CMT yönteminde 120 A akım değerinde ER4043 ve ER5183 kaynak telleri ile birleştirilmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin sertlik değerleri ER5183 telinde 56,2 HV ve ER4043 telinde 60,2 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak bölgesi ve ITAB'daki sertlik değişimlerinde ise belirgin bir farklılık görülmemiştir.

CMT yönteminde 110 A akım değerinde ER4043 ve ER5183 kaynak telleri ile birleştirilmesi yapılan %0,5 takviyeli kompozit malzemenin ER5183 teli ile yapılan kaynak işleminin kaynak merkezindeki sertlik değeri 43,6 HV, ER4043 teli ile yapılan kaynak işleminin kaynak merkezindeki sertlik değeri ise 72,6 HV olarak ölçülmüştür. ER5183 teli kullanılan kaynak işleminde kaynak merkezi ve ITAB'da daha düşük değerler ölçülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre takviyesiz alaşım, %0,5 takviyeli ve %1 takviyeli kompozit malzemelerin birleştirilmesinde elde edilen çekme mukavemeti ve akma sınırı değerlerine göre optimum parametreler Tablo 7.10'da verilmiştir.

Tablo 7.10: Çekme mukavemeti ve akma sınırı değerlerine göre belirlenen optimum parametreler

	AA6013	AA6013+%0,5Al₂O₃	AA6013+%1Al₂O₃
Kaynak Yöntemi	CMT	CMT	CMT
Kaynak Teli	ER4043	ER5183	ER5183
Kaynak Akımı	110 A	120 A	120 A

Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında, gelecek çalışmalar için öneriler aşağıda sıralanmıştır:

Bu çalışmada incelenen mekanik değerler, ısıtılmış numunelerin değerleridir. Kaynak işleminin ardından farklı yaşlandırma koşullarında, kaynak yöntemlerinin ve ısı girdisinin etkisi incelenmelidir.

Nano-Al₂O₃, malzemenin mekanik özelliklerine olumlu etki etmiştir. %1'in altında takviye oranlarında farklı kompozitler üretilerek kaynak işlemi için optimum oranlar tespit edilebilir.

8. KAYNAKLAR

Akbari, M. K., Baharvandi, H. R., Mirzaee, O., “Fabrication of nano sized Al_2O_3 reinforced casting aluminum composite focusing on preparation process of reinforcement powders and evaluation of its properties”, *Composites: Part B*, 55, 426-432, (2013).

Akkaş, G., “AA 6013-T651 Alüminyum Alaşımında Sürtünme Karıştırma Kaynağının, Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerindeki Etkileri”, Yüksek Lisans, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, (2012).

Akyel, O., “Sürtünme Karıştırma Yöntemi ile Kaynak Edilen 5083 Alüminyum Alaşımında Kaynak Parametrelerinin Optimizasyonu”, Yüksek Lisans, *Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, (2020).

Alaneme, K. K., Bodunrin, M. O., “Corrosion Behavior of Alumina Reinforced Aluminium (6063) Metal Matrix Composites”, *J. of Minerals and Materials Characterization and Eng*, 10(12), 1153-1165, (2011).

Alp, E., “AlMg₃/SiC_p Kompozitlerinin Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, (2008).

Ansal, E., “T/M ile Üretilmiş Al Esaslı Partikül Takviyeli Kompozit Malzemelerin Kaynak Edilebilirliğinin Araştırılması”, Yüksek Lisans, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, (2008).

Avcı, U., Erdem, M., Karabulut, M., “Vorteks Yöntemi ile Al_2O_3 Takviye Edilen 7039 Al Alaşımı Levhanın Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmesi, Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması”, *El Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(3), 560-567, (2017).

Aytaç, A., Malayoğlu, U., “Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemlerinden PVD ve JVD/DVD İnce Film Kaplamaların Karşılaştırılması ve DVD Kaplama Teknolojisinin Endüstriyel Uygulamaları Üzerine Kavramsal, Akademik ve Teorik Bir Analiz”, *Savunma Bilimleri Dergisi*, 17(1), (2018).

Ayvaz, M., Çetinel, H., "Farklı Matris Kompozisyonları ve Takviye Oranları İçin Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu" *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 10(1), 45-53, (2014).

Başer, T. A., "Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı," *Mühendis ve Makina*, 53(635), 51-58, (2012).

Baydemir, E., "Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretilen AA6061 Matrisli Al₂O₃ Takviyeli Kompozitlerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2018).

Bharath, V., Nagaral, M., Auradi, V., Kori, S. A., "Preparation of 6061Al-Al₂O₃ MMC's by Stir Casting and Evaluation of Mechanical and Wear Properties", *Procedia Materials Science*, 6, 1658-1667, (2014)

Bozkurt, Y., "Sürtünme Karıştırma Kaynak Tekniği ile Birleştirilen AA2124/SiC_p/25 Kompozit Levhaların Mekanik Özellikleri ve Mikroyapı Karakterizasyonu", Doktora, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2008).

Cavaliere, P., Cerri, E., Marzoli, L., & Dos Santos, J., "Friction Stir Welding of Ceramic Particle Reinforced Aluminium Based Metal Matrix Composites", *Applied Composite Materials*, 11(4), 247–258, (2004).

Chawla N., Chawla K. K., "*Metal Matrix Composites*", NY, USA, Springer, (2006).

Chawla, N., Williams, J. J., Saha, R., "Mechanical behavior and microstructure characterization of sinter-forged SiC particle reinforced aluminum matrix composites", *Journal of Light Metals*, 2(4), 215–227, (2002).

Chen, X., Yan, H., "Fabrication of nanosized Al₂O₃ reinforced aluminum matrix composites by subtype multifrequency ultrasonic vibration", *J. Mater. Res.*, vol. 30 (14), 2197-2209, (2015).

Coo, Y., "Effect of in situ reaction on microstructure of TIG welding SiCp/A356 with Ti as filler metal", *Materials Science and Technology*, 23(8), 917-922, (2007).

Cui, H., Lu, F., Peng, K., Tang, X., Yao, S., "Research on Electron Beam Welding of in situ TiB₂p/ZL101 Composite", *J. Shanghai Jiaotong Univ.*, 15(4), 479-483, (2010).

Çakır, M., "Toz Metal Alüminyum Malzemelerin Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Kaynaklanabilirliği", Yüksek Lisans, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2007).

Çalın, R., "Magnezya parçacık takviyeli Al matrisli kompozitin vakum infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi," Yüksek Lisans, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2006).

Çalışkan, O., "Nano Al₂O₃ Takviyeli A356 Al Matrisli Nanokompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Yüksek Lisans, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, (2019).

Çam, G., Koçak, M., "Progress in joining of advanced materials", *International Materials Reviews*, 43(1), 1-39, (1998).

Çavuşoğlu, Ü., "Magnezyum Matrisli B₄C Takviyeli Kompozit Malzeme Üretimi", Yüksek Lisans, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2013).

Çetkin, E., Çelik, Y. H., Temiz, Ş., "Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA5182/AA7075 alaşım bağlantılarının mekanik özelliklerinin incelenmesi", *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(2), 603-612, (2019).

Donomoto, T., Miura, N., Funatani, K., Miyake, N., "Ceramic Fiber Reinforced Piston for High Performance Diesel Engines", *SAE Transactions*, 92, 927-937, (1983).

Durmuş H., Çömez N., “Soğuk metal transferi ile birleştirilen AA5754 alaşımı ince sacların korozyon davranışı”, *Politeknik Dergisi*, 21(4), 907-911, (2018).

Edalati, K., Ashida, M., Horita, Z., Matsui, T., Kato, H., "Wear resistance and tribological features of pure aluminum and Al–Al₂O₃ composites consolidated by high-pressure torsion" *Wear*, 310(1), 83-89, (2014).

El-Labban, H. F., Mahmoud E. R. I., “Welding of AA 6028 Aluminum Alloy and Its Nanocomposite Using Different Filler Materials”, *Materials Transactions*, vol. 56 (1), 113-119, (2015).

El-Mahallawi, I., Abdelkader, H., Yousef, L., Amer, A., Mayer, J., Schwedt, A., "Influence of Al₂O₃ nano-dispersions on microstructure features and mechanical properties of cast and T6 heat-treated Al Si hypoeutectic Alloys", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 556, 76-87, (2012).

Evans, A., San Marchi, C., Mortensen, A., “*Metal Matrix Composites in Industry*”, NY, USA, Springer, (2003).

Fidan, S., “Polimer matrisli kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi ve oluşun hasarların mikro tomografi yöntemiyle incelenmesi”, Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 10-20, (2011).

Fronius, “Pulse Multi Control: Kontrollü ve Hızlı Kaynaklama için Yeni Impuls”, (Erişim 18.05.2021), <https://www.fronius.com/tr-tr/turkey/kaynak-teknolojisi/kaynak-duenyas/fronius-welding-processes/pmc>, (2021).

Garcia, R., Lopez, V. H., Bedolla, E., Manzano, A., "A comparative study of the MIG welding of Al/TiC composites using direct and indirect electric arc processes", *Journal of Materials Science*, 38(12), 2771-2779, (2003).

Gomes, B. F., Morais, P. J., Ferreira, V., Pinto, M., Almeida, L. H., “Wire-arc additive manufacturing of Al-Mg alloy using CMT and PMC Technologies”, *8th EASN-CEAS International Workshop on Manufacturing for Growth & Innovation*, 233, (2018).

Grzybicki, M., Jakubowski, J., “Comparative tests of steel car body sheet welds made using CMT and MIG/MAG methods”, *Welding International*, 27(8), 610-615, (2013).

Guo, J., “Joining of Al-B₄C Metal Matrix Composites by Laser Welding and Friction Stir Welding”, Doktora, *Universite Du Quebec A Chicoutimi*, Quebec, (2012).

Guo, J., Gougeon, P., Nadeau, F., Chen, X., “Joining of AA1100–16 vol-%B₄C metal matrix composite using laser welding and friction stir welding”, *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science*, 51(3), 277-283, (2012).

Gündoğan, K., Özsarı, A. R. B., “Basınçlı İnfiltrasyon Yöntemiyle Üretilen AA2024 ve AA6061 Matrisli, B₄C ve SiC Takviyeli Kompozit Malzemelerin Mikroyapı, Mekanik ve Isıl İletkenlik Özelliklerine Basıncın Etkisi”, *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(2), 657-669, (2019).

Hossein-Zadeh, M., Razavi, M., Mirzaee, O., Ghaderi, R., “Characterization of properties of Al–Al₂O₃ nano-composite synthesized via milling and subsequent casting”, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* 25, 75-80, (2012).

Hunt, W. H., Miracle, D. B., “*ASM Handbook – Composites*”, Ohio, USA, vol. 21, 1029-1032, (2001).

Kah, P., Suoranta, R., Martikainen, J., “Advanced gas metal arc welding processes”, *Int J Adv Manuf Technol*, 67, 655-674, (2013).

Kahraman, F., Gençer, G. M., Yolcu, C., Kahraman, A., D., Dilbaz, M. E., “Soğuk Metal Transfer (CMT) ve Darbeli Soğuk Metal Transfer (Darbeli CMT) Kaynak İşlemleri ile Birleştirilmiş AA5754 Alüminyum Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi”, *DEU Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(59), 625-636, (2018).

Kalaiselvan, K., Dinaharan, I., Murugan, N., “Routes for the Joining of Metal Matrix Composite Materials”, *Encyclopedia of Materials: Composites*, 2, 652-670, (2021).

Kırcı, O., “AW-5005 Alüminyum Alaşımının Bindirme Sürtünme Karıştırma Kaynaklı Bağlantı Özelliklerine Takım Profilinin Etkisi”, Yüksek Lisans, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2012).

Kianezhad, M., Raouf, A. H., “Effect of nano- Al_2O_3 particles and friction stir processing on 5083 TIG welding properties”, *Journal of Materials Processing Tech.*, 263, 356-365, (2019).

Köse, C., “Robotik MIG ile Birleştirilen AA 5754 Alüminyum Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri”, Yüksek Lisans, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2011).

Kunze, J. M., “*ASM Handbook, Composites*”, Vol. 21, OH, USA: ASM International, (2001).

Kurşun, T., “Alüminyum ve Alaşımlarının MIG Kaynağı”, *Metal Makine Dergisi*, 158, (2006).

Lean, P. P., Gil, L., & Ureña, A., “Dissimilar welds between unreinforced AA6082 and AA6092/SiC/25p composite by pulsed-MIG arc welding using unreinforced filler alloys (Al-5Mg and Al-5Si)”, *Journal of Materials Processing Technology*, 143-144, 846–850, (2003).

Lei Y., Yuan W., Chen X., Zhu F., Cheng X., “In-Situ Weld-Alloying Plasma Arc Welding of SiC_p/Al MMC”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 17(2), 313-317, (2007).

Ma, P., Jia, Y., Gokuldoss, P. K., Yu, Z., Yang, S., Zhao, J., Li, C., “Effect of Al_2O_3 Nanoparticles as Reinforcement on the Tensile Behavior of Al-12Si Composites”, *Metals*, 7, 359, (2017).

Mazahery, A., Ostadshabani, M., “Investigation on mechanical properties of nano- Al_2O_3 -reinforced aluminum matrix composites”, *Journal of Composite Materials*, 0(0), 1-8, (2011).

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

Miracle, D. B., Donaldson, S. L., “*ASM Handbook, Composites*”, Vol. 21, OH, USA: ASM International, (2001).

Muratoğlu, M., Demirel, M., “Cu/Ni₃Al metal matrisli kompozitin kuru kayma aşınma davranışlarının araştırılması”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, 759-764 (2009).

Önal, M., Gavgalı, M., “In Situ Alüminyum Metal Matrisli Kompozitler ve Sıcak Presleme ile Üretimleri”, *Ordu Üniv. Bil. Tek. Derg.*, 5(2), 63-73, (2015.)

Önal, S. D., “SiO₂ Nanopartikül Takviyeli Alüminyum Matris Kompozitlerin Üretimi, Mekanik ve Şekillendirilebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya, (2019).

Özdin, K., “Alüminyum esaslı SiC takviyeli kompozitlerin üretimi ve aşınma özelliklerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-22 (2006).

Pandey, A. B., Prath, Whitney, “*ASM Handbook, Composites*”, Vol. 21, OH, USA: ASM International, (2001).

Peng, K., Cui, H., Lu, F., Wu, X., Tang, X., Yao, S., Lou, S., “Mechanical properties and wear resistance of aluminum composite welded by electron beam”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 21, 1925-1931, (2011).

Pramanik, A., Zhang, L.C., Arsecularatne, J.A., “Prediction of cutting forces in machining of metal matrix composites”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 1795-1803, (2006).

Reihani, S. M. S., "Processing of squeeze cast Al6061–30vol% SiC composites and their characterization", *Materials and Design*, 27, 216-222, (2006).

Sajjadi, S. A., Ezatpour, H. R., Parizi, M. T., "Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/Al₂O₃ composites fabricated by stir and compo-casting processes", *Materials and Design*, 34, 106-111, (2012).

Sandal, R., "Al-Al₂O₃ Kompozit Malzeme Üretimi ve Difüzyon Kaynağı ile Kaynaklanabilirliğinin Araştırılması", Yüksek Lisans, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2009).

Schwartz, M. M., *Composite Materials - Processing, Fabrication, and Applications*, Vol. 2, NJ, USA: Prentice Hall PTR, (1997).

Shorowordi, K. M., Laoui, T., Haseeb, A. S. M. A., Celis, J. P., Froyen, L., "Microstructure and interface characteristics of B₄C, SiC and Al₂O₃ reinforced Al matrix composites: a comparative study", *Journal of Materials Processing Technology*, 142(3), 738–743, (2003).

Singh, T., Tiwari, S. K., Shukla, D. K., "Friction-stir welding of AA6061-T6: The effects of Al₂O₃ nano-particles addition", *Results in Materials*, vol. 1, (2019).

Stantz, T. M., Aldun, D. K., Morrison, D. J., Diebold, T., Martin, P., Bruskotter, M., "Weldability of boron carbide reinforced aluminium", *International Trends in Welding Science and Technology*, Eds.: David, S. A., Vitek, J. M., Gatlinburg, Tennessee, USA, 781-785, (1992).

Storjohann, D., Barabash, O. M., Babu, S. S., David, S. A., Sklad, P. S., Bloom, E. E., "Fusion and Friction Stir Welding of Aluminum-Metal-Matrix Composites", *Metallurgical and Materials Transactions*, 36A, 3237-3247, (2005).

Su, H., Gao, W., Feng, Z., Lu, Z., “Processing, microstructure and tensile properties of nano-sized Al₂O₃ particle reinforced aluminum matrix composites”, *Materials and Design*, 36, 590-596, (2012).

Şenel, M. C., Gürbüz, M., Koç, E., “SiC Takviyesinin Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mikro Yapısı ve Sertliği Üzerine Etkisi”, *Conference: II. International Conference on Advanced Engineering Technologies*, Bayburt, Türkiye, (2017).

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

Tapiola, J., “Cold Metal Transfer Cladding of Wear And Corrosion Resistant Coatings In Engine Applications”, Yüksek Lisans, 38, *Tampere University of Technology*, Tampere, (2017).

Toktaş, A., Tayanç, M., “Sürtünme Karıştırma Kaynak Parametrelerinin 6063-T4 Alüminyum Alaşımının İç Yapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, *Makine Tasarım ve İmalat Dergisi*, 8(2), 92-103, (2006).

Uluköy, A., Topcu, M., Tasgetiren, S., “Experimental investigation of aluminum matrix functionally graded material: Microstructural and hardness analyses, fretting, fatigue, and mechanical properties”, *Proc IMechE Part J: J Engineering Tribology*, 0(0), 1–13, (2015).

Uluköy, A., “Pulsed metall inert gas (MIG) welding and its effects on the microstructure and element distribution of an aluminum matrix reinforced with SiC composite material”, *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 48(2), 163–176, (2017).

Uluköy, A., Onar, V., Kaplan, Y., “SiC takviyeli Alüminyum matrisli kompozit malzemenin farklı kaynak akımları ve türlerinde oluşan mikroyapı ve sertlik özelliklerinin analizi”, *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 21(8), 365-370, (2015).

Urena, A., Salazar, J. M. G., Escalera, M. D., Hanson, W. B., "Diffusion bonding of alumina reinforced 6061 alloy metal matrix composite using Al-Li interlayer", *Materials Science and Technology*, 16(1), 103-109, (2000).

Wert, J., "Microstructures of friction stir weld joints between an aluminium-base metal matrix composite and a monolithic aluminium alloy", *Scripta Materialia*, 49(6), 607–612, (2003).

Yu, Z., Wu, G., Sun, D., Chen, J. ve Jiang, L., "Coating of Y_2O_3 additive on Al_2O_3 powder and its effect on the wetting behaviour in the system Al_2O_3p/Al ", *Materials Letter*, 57, 3111-3116, (2003).

Zeid, E. F. A., "Mechanical and electrochemical characteristics of solutionized AA 6061, AA6013 and AA 5086 aluminum alloys", *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 1870-1877, (2019).

Zhang, S., Jiang, F., Ding, W., "Microstructure and mechanical performance of pulsed current gas tungsten arc surface engineered composite coatings on Mg alloy reinforced by SiC_p ", *Materials Science and Engineering: A*, 490(1-2), 208–220, (2008).

Zhang, X. P., Ye, L., Mai, Y. W., Quan, G. F., Wei, W., "Investigation on diffusion bonding characteristics of SiC particulate reinforced aluminium metal matrix composites", *Composites: Part A*, 30(12), 1415-1421, (1999).

Zweben, C., "*Composite Materials and Mechanical Design, Mechanical Engineer's Handbook*", 2nd ed., Myer Kutz, Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, (1998).