

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN FARKLI
DÖVME YÖNTEMLERİ İLE DÖVÜLEREK
YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Coşkun YOLCU

Haziran, 2018
İZMİR

METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN FARKLI DÖVME YÖNTEMLERİ İLE DÖVÜLEREK YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon ve İmalat Programı

Coşkun YOLCU

Haziran, 2018

İZMİR

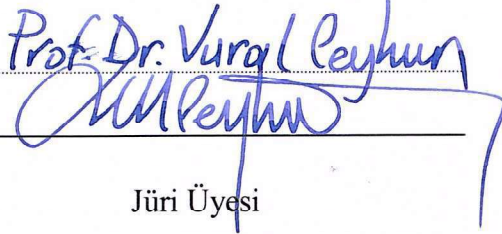
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

COŞKUN YOLCU, tarafından DR. ÖĞR. ÜYESİ FATİH KAHRAMAN yönetiminde hazırlanan “METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN FARKLI DÖVME YÖNTEMLERİ İLE DÖVÜLEREK YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

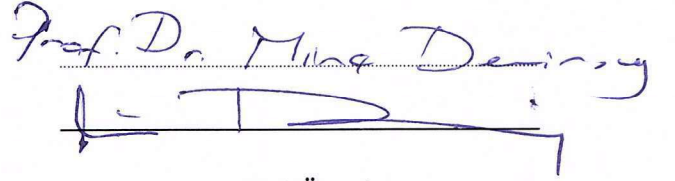


Dr. Öğr. Üyesi Fatih KAHRAMAN

Yönetici

Prof. Dr. Vural Peyhu


Jüri Üyesi

Prof. Dr. M. N. Demirey


Jüri Üyesi



Prof. Dr. Latif SALUM

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Çalışmalarında bilgilerini, tecrübelerini ve desteğini hiçbir zaman benden esirgemeyerek çalışmalarımın tamamlanması adına büyük katkılar veren, hayatımın her alanında yol gösteren ve her zaman kendime örnek aldığım değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Fatih KAHRAMAN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Döküm çalışmalarımın tamamlanmasında bana yol gösteren Metalurji Yüksek Mühendisi Haydar KAHRAMAN'a ve Teknisyen Faik SOYSAL'a, bilyalı dövme işlemlerinde benden yardımlarını esirgemeyen Tümersan Otomotiv Ltd. Şti. firmasına ve Makine Mühendisi Muammer TÜM'e, numunelerimin hazırlanmasında bana yardımcı olan Makine Teknisyeni Erman DOĞAN ve Makine Teknisyeni Erkan YURTSEVER'e teşekkür ederim.

Son olarak bugüne kadar hayatımın her anında yanımda olan, aldığım her kararın ve attığım her adımın arkasında duran aileme çok teşekkür ederim.

Coşkun YOLCU

METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN FARKLI DÖVME YÖNTEMLERİ İLE DÖVÜLEREK YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZ

Bu çalışmada farklı kütleli oranlarda silisyum karbür takviyesi içeren alüminyum esaslı metal matrisli kompozit malzemeler karıştırmalı döküm yöntemi ile üretilmiş ve üretilen numuneler bilyalı dövme yöntemi ve ultrasonik dövme yöntemi kullanılarak deforme edilmiştir. Numunelerin deformasyon işlemleri öncesinde ve sonrasında sahip olduğu yüzey özellikleri deneysel çalışmalar ile incelenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda yapının içerdği takviye faz oranının artmasının porozite oluşumunun artmasına sebep olduğu ve bu nedenle numunelerin sahip oldukları çekme dayanımlarının ve sertlik değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Uygulanan dövme yöntemleri ile numunelerin yüzeylerinde meydana gelen deformasyon sertleşmesi sonucunda porozitenin neden olduğu bu etkinin azaldığı ve numunelerin bu özelliklerinde önemli bir iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca takviye oranının artmasıyla numunelerin aşınma dayanımlarının da arttığı ve uygulanan dövme yöntemleri ile de bu dayanımın bir miktar daha iyileştiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Metal matrisli kompozitler, karıştırmalı döküm yöntemi, bilyalı dövme yöntemi, ultrasonik dövme yöntemi

INVESTIGATION OF SURFACE PROPERTIES OF METAL MATRIX COMPOSITES BY THREATED DIFFERENT IMPACT PROCESSES

ABSTRACT

In this study, aluminum based metal matrix composite materials containing silicon carbide reinforcement at different mass ratios were produced by the stir casting method and the produced specimens were deformed by using the shot peening method and the ultrasonic impact treatment. The surface properties of the specimens before and after the deformation processes were investigated by experimental studies.

As a result of the experimental studies carried out, it was observed that the increase of the ratio of the reinforcement phase in the structure caused the increase of the porosity formation, and therefore the tensile strength and hardness values of the samples decreased. As a result of the deformation hardening on the surface of the samples with the applied impact methods, it is observed that decreasing in this effect which is caused by porosity and a significant improvement in these properties of the samples. In addition, with the increase of the reinforcement ratio, the wear resistance of the samples increased and with the applied impact methods, this strength was slightly improved.

Keywords: Metal matrix composites, stir casting method, shot peening method, ultrasonic impact treatment

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

BÖLÜM İKİ – KOMPOZİT MALZEMELER..... 2

2.1 Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler	3
2.1.1 Seramik Matrisli Kompozitler	3
2.1.2 Polimer Matrisli Kompozitler.....	4
2.1.3 Metal Matrisli Kompozitler	4
2.2 Takviye Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler	6
2.2.1 Fiber Takviyeli Kompozitler	6
2.2.2 Parçaçık Takviyeli Kompozitler.....	7
2.2.3 Yapısal Kompozitler.....	7

BÖLÜM ÜÇ – METAL MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ . 8

3.1 Katı Hal Üretim Yöntemleri.....	8
3.1.1 Toz Metalürjisi ile Üretim	8
3.1.2 Difüzyon Bağı ile Üretim	9
3.2 Sıvı Hal Üretim Yöntemleri	10
3.2.1 Karıştırma(Vorteks) Döküm Yöntemi.....	10
3.2.2 Sıkıştırırmalı Döküm Yöntemi.....	11
3.2.3 Basınçlı ve Basıncsız İnfiltrasyon Yöntemi	12

BÖLÜM DÖRT – PLASTİK DEFORMASYON VE DÖVME YÖNTEMLERİ	14
4.1 Plastik Deformasyon ve Etkileri.....	14
4.2 Dövme Yöntemleri	16
4.2.1 Ultrasonik Dövme Yöntemi.....	16
4.2.2 Bilyalı Dövme Yöntemi.....	20
4.2.2.1 Pnömatik Bilyalı Dövme Makinaları	21
4.2.2.1.1 Sifon indüksiyon metodu	21
4.2.2.1.2 Yerçekimi indüksiyon makinası.....	22
4.2.2.1.3 Direkt basınç makinaları	23
4.2.2.2 Santrifüj Bilyalı Dövme Makinaları	24
4.2.3 Ultrasonik Bilyalı Dövme Yöntemi.....	25
4.2.4 Lazer Dövme Yöntemi	26
4.2.5 Su Jeti ile Dövme Yöntemi.....	28
4.2.6 Düşük Plastisiteli Ezme Yöntemi	30
BÖLÜM BEŞ – DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
BÖLÜM ALTI – BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	35
6.1 Döküm İşlemi Sonrası Porozitenin İncelenmesi	35
6.2 Dövme İşlemleri Sonucunda Oluşan Yüzey Pürüzlülüklerinin İncelenmesi ..	36
6.3 Dövme İşlemleri Sonucunda Oluşan İçyapının İncelenmesi	42
6.4 Dövme İşlemlerinin Etkisinin X-Ray Difraksiyon Analizi ile İncelenmesi....	62
6.5 Dövme İşlemlerinin Çekme Dayanımı Üzerine Etkisinin İncelenmesi	65
6.6 Dövme İşlemlerinin Sertlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi.....	68
6.7 Dövme İşlemlerinin Aşınma Dayanımı Üzerine Etkisinin İncelenmesi	71
BÖLÜM YEDİ - SONUÇLAR	82
KAYNAKLAR	84

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	3
Şekil 2.2 Sıvı ve katı kütle arasında meydana gelen kuvvetler	6
Şekil 3.1 Toz metalürjisi ile metal matrisli kompozit üretimi	8
Şekil 3.2 Sinterleme işleminde partiküllerin birleşmesi	9
Şekil 3.3 Difüzyon bağı ile üretim yöntemi	10
Şekil 3.4 Karıştırılmalı döküm yöntemi şematik gösterim	11
Şekil 3.5 Preform ile sıkıştırılmalı döküm yöntemi şematik gösterimi.....	11
Şekil 3.6 Metal kalıba sıkıştırılmalı döküm yöntemi	12
Şekil 3.7 Basıncsız infiltrasyon yöntemi ile üretim	13
Şekil 3.8 Basıncılı infiltrasyon yöntemi ile üretim	13
Şekil 4.1 Plastik deformasyon hareketi	14
Şekil 4.2 Tane sınırının dislokasyon hareketine engel olması	15
Şekil 4.3 Dislokasyon nedeniyle yapı içerisinde meydana gelen gerilmeler	15
Şekil 4.4 Ultrasonik dövme yöntemi sistemi	17
Şekil 4.5 Magnetostriktif transdüser	18
Şekil 4.6 Piezoelektrik transdüserde titreşim oluşumu	19
Şekil 4.7 Ultrasonik dövme yöntemi çalışma prensibi.....	19
Şekil 4.8 Sifon indüksiyon metodu ile bilyalı dövme işlemi	22
Şekil 4.9 Yerçekimi indüksiyon makinası ile bilyalı dövme işlemi.....	23
Şekil 4.10 Direkt basınç makinası ile bilyalı dövme işlemi.....	24
Şekil 4.11 Bilyalı dövme işleminde kullanılan nozul	24
Şekil 4.12 Santrifüj bilyalı dövme makinası ile bilyalı dövme işlemi	25
Şekil 4.13 Ultrasonik bilyalı dövme ekipmanları	26
Şekil 4.14 Lazer dövme yöntemi	28
Şekil 4.15 Su jeti ile dövme yöntemi şematik gösterimi.....	29
Şekil 4.16 Su jeti bölgeleri	29
Şekil 4.17 Düşük plastisiteli ezme yöntemi şematik gösterimi	30
Şekil 5.1 Döküm işlemlerinde kullanılan sistem.....	31
Şekil 5.2 Deneylerde kullanılan karıştırıcı çubuk	32
Şekil 5.3 Deneylerde kullanılan döküm kalıbı	33

Şekil 5.4 Bilyalı dövme işleminde kullanılan santrifüj bilyalı dövme makinası	34
Şekil 5.5 Deneylerde kullanılan bilyalar	34
Şekil 6.1 Döküm sonrası elde edilen numuneler.....	35
Şekil 6.2 SiC takviyesi içermeyen numunenin bilyalı dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi	37
Şekil 6.3 SiC takviyesi içermeyen numunenin ultrasonik dövme işlemi sonucu meydana gelen yüzeyi	37
Şekil 6.4 %5 oranında SiC takviyesi içeren numunenin bilyalı dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi	38
Şekil 6.5 %5 oranında SiC içeren numunenin ultrasonik dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi	38
Şekil 6.6 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunenin bilyalı dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi	39
Şekil 6.7 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunenin ultrasonik dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi	39
Şekil 6.8 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunenin bilyalı dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi	40
Şekil 6.9 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunenin ultrasonik dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi	40
Şekil 6.10 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunenin bilyalı dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi	41
Şekil 6.11 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunenin ultrasonik dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi	41
Şekil 6.12 SiC takviyesi içermeyen numunenin mikro yapı görüntüsü	44
Şekil 6.13 SiC takviyesi içermeyen numunede porozite oluşumu	44
Şekil 6.14 %5 oranında SiC takviyesi içeren numunenin mikro yapı görüntüsü.....	45
Şekil 6.15 %5 oranında SiC takviyesi içeren numunede porozite oluşumu	45
Şekil 6.16 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunenin mikro yapı görüntüsü.....	46
Şekil 6.17 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunede porozite oluşumu	46
Şekil 6.18 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunenin mikro yapı görüntüsü.....	47
Şekil 6.19 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunede porozite oluşumu	47
Şekil 6.20 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunenin mikro yapı görüntüsü.....	48

Şekil 6.21 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunede porozite oluşumu	48
Şekil 6.22 Al-Si faz diyagramı.....	49
Şekil 6.23 SiC takviyesi içermeyen numunede Mg ₂ Si oluşumu.....	50
Şekil 6.24 %5 oranında SiC takviyesi içeren numunede Mg ₂ Si oluşumu	50
Şekil 6.25 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunede Mg ₂ Si oluşumu	51
Şekil 6.26 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunede Mg ₂ Si oluşumu	51
Şekil 6.27 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunede Mg ₂ Si oluşumu	52
Şekil 6.28 SiC takviyesi içermeyen numunenin tane yapısı	53
Şekil 6.29 %5 oranında SiC takviyesi içeren numunenin tane yapısı.....	53
Şekil 6.30 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunenin tane yapısı.....	54
Şekil 6.31 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunenin tane yapısı.....	54
Şekil 6.32 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunenin tane yapısı.....	55
Şekil 6.33 Ultrasonik dövme sonucunda SiC takviyesi içermeyen numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı.....	56
Şekil 6.34 Bilyalı dövme sonucunda SiC takviyesi içermeyen numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı	56
Şekil 6.35 Ultrasonik dövme sonucunda %5 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı.....	57
Şekil 6.36 Bilyalı dövme sonucunda %5 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı	57
Şekil 6.37 Ultrasonik dövme sonucunda %10 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı.....	58
Şekil 6.38 Bilyalı dövme sonucunda %10 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı	58
Şekil 6.39 Ultrasonik dövme sonucunda %15 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı.....	59
Şekil 6.40 Bilyalı dövme sonucunda %15 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı	59
Şekil 6.41 Ultrasonik dövme sonucunda %20 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı.....	60
Şekil 6.42 Bilyalı dövme sonucunda %20 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı	60

Şekil 6.43 Ultrasonik dövme sonucunda yüzeyde kırılan SiC partikülleri (a: %5 oranında SiC içeren numune, b: %10 oranında SiC içeren numune, c: %15 oranında SiC içeren numune, d: %20 oranında SiC içeren numune	61
Şekil 6.44 Bilyalı dövme sonucunda yüzeyde kırılan SiC partikülleri (a: %5 oranında SiC içeren numune, b: %10 oranında SiC içeren numune, c: %15 oranında SiC içeren numune, d: %20 oranında SiC içeren numune	62
Şekil 6.45 SiC takviyesi içermeyen numuneye ait XRD grafikleri	63
Şekil 6.46 %5 oranında SiC takviyesi içeren numuneye ait XRD grafikleri	63
Şekil 6.47 %10 oranında SiC takviyesi içeren numuneye ait XRD grafikleri	64
Şekil 6.48 %15 oranında SiC takviyesi içeren numuneye ait XRD grafikleri	64
Şekil 6.49 %20 oranında SiC takviyesi içeren numuneye ait XRD grafikleri	65
Şekil 6.50 Dövme işlemleri öncesinde ve sonrasında elde edilen çekme dayanımları.....	67
Şekil 6.51 SiC takviyesi içermeyen numunenin dövme işlemleri sonucunda elde edilen mikro sertlik değerleri	69
Şekil 6.52 %5 oranında SiC takviyesi içeren numunenin dövme işlemleri sonucunda elde edilen mikro sertlik değerleri.....	69
Şekil 6.53 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunenin dövme işlemleri sonucunda elde edilen mikro sertlik değerleri.....	70
Şekil 6.54 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunenin dövme işlemleri sonucunda elde edilen mikro sertlik değerleri.....	70
Şekil 6.55 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunenin dövme işlemleri sonucunda elde edilen mikro sertlik değerleri.....	71
Şekil 6.56 Aşınma test cihazı şematik gösterimi	71
Şekil 6.57 Aşınma deneyleri sonucunda meydana gelen kütle kayıpları.....	72
Şekil 6.58 SiC takviyesi içermeyen dövülmemiş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	74
Şekil 6.59 SiC takviyesi içermeyen ultrasonik dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	74
Şekil 6.60 SiC takviyesi içermeyen bilyalı dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	75

Şekil 6.61 %5 oranında SiC takviyesi içeren dövülmemiş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	75
Şekil 6.62 %5 oranında SiC takviyesi içeren ultrasonik dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	76
Şekil 6.63 %5 oranında SiC takviyesi içeren bilyalı dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	76
Şekil 6.64 %10 oranında SiC takviyesi içeren dövülmemiş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	77
Şekil 6.65 %10 oranında SiC takviyesi içeren ultrasonik dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	77
Şekil 6.66 %10 oranında SiC takviyesi içeren bilyalı dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	78
Şekil 6.67 %15 oranında SiC takviyesi içeren dövülmemiş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	78
Şekil 6.68 %15 oranında SiC takviyesi içeren ultrasonik dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	79
Şekil 6.69 %15 oranında SiC takviyesi içeren bilyalı dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	79
Şekil 6.70 %20 oranında SiC takviyesi içeren dövülmemiş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	80
Şekil 6.71 %20 oranında SiC takviyesi içeren ultrasonik dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	80
Şekil 6.72 %20 oranında SiC takviyesi içeren bilyalı dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları	81

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 5.1 A356 küttele kimyasal bileşimi.....	31
Tablo 6.1 Numunelerin içerdikleri porozite miktarları	36
Tablo 6.2 Dövme işlemleri sonucunda oluşan yüzey pürüzlülükleri.....	42
Tablo 6.3 Dövme işlemleri öncesinde ve sonrasında elde edilen çekme dayanımları.....	67
Tablo 6.4 Numunelerin makro sertlik değerleri	68



BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Kompozit malzemeler geliştirilebilir özellikleriyle bilimsel çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda oldukça sık kullanılan malzeme grubu olarak öne çıkmaktadır. Matris fazının takviye fazıyla birleştirilmesi sonucu mevcut özelliklerin geliştirilmesi ile istenilen özelliklerde malzeme elde edilmesine olanak sağlayan kompozit malzemeler özellikle havacılık ve otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kompozit malzemeler, bir araya getirilen matris ve takviye malzemelerine sınıflandırılırken elde edilen yapının göstereceği mekanik özellikler bu iki fazın özelliklerine göre değişmektedir. Yapının sahip olacağı özellikleri belirleyen unsurlardan bir diğeri de bu iki fazın bir araya getirilmesi için kullanılan yöntemlerdir. Gerek üretimin kendisinden kaynaklanan gerekse matris ve takviye fazının bir araya getirilmesinde kaynaklanan zorluklar, yapının beklenen mekanik özelliklere sahip olamamasına neden olabilir. Bu durumun iyileştirilebilmesi için çeşitli yöntemler kullanılırken bu yöntemlerden birisi de plastik deformasyondur.

Plastik deformasyon malzemelerin akma gerilmelerini aşan yükler altında dislokasyon hareketi ile gerçekleşen bir mekanizmadır. Malzeme içerisinde hareket eden dislokasyonların yapı içerisinde hareketinin engellenmesi sonucunda bir bölgede yığılması ve oluşan iç gerilmeler malzemenin mekanik özelliklerinin iyileşmesine yol açan bir durumdur. Malzemelerin bu özelliklerinden yola çıkılarak dövme yöntemleri gibi plastik deformasyon meydana getirebilecek yöntemler geliştirilmiştir.

Bu çalışmada matris fazı olarak kullanılan A356 alüminyum alaşımı, takviye fazı olarak kullanılan SiC partikülleri ile karıştırmalı döküm yöntemi kullanılarak farklı kütle oranlarında bir araya getirilmiştir. Elde edilen kompozit malzemeler ultrasonik dövme yöntemi ve bilyalı dövme yöntemi kullanılarak deforme edilmiş ve bu yöntemlerin yapının yüzey özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır.

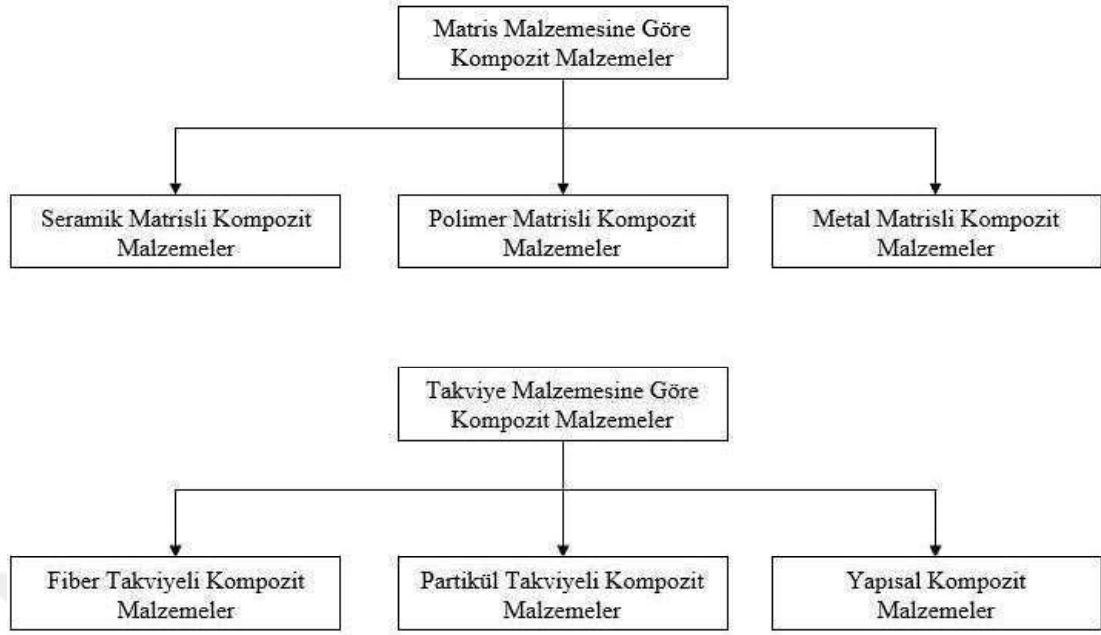
BÖLÜM İKİ

KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Kimyasal özellikleri farklı olan bu malzemeler, tek başına kullanıldığında elde edilemeyen bazı özelliklerin elde edilmesi amacıyla bir araya getirilir ve tek bir malzeme özelliği gösteren malzemeler hedeflenen uygulamalar için hazır hale getirilir. Takviye fazı olarak adlandırılan süreksiz fazın matris olarak adlandırılan sürekli faz içerisinde dağıtılmasıyla elde edilen kompozit malzemelerde takviye fazının görevi, matris fazının zayıf olan ve iyileştirilmesi istenilen özelliklerinin malzemeye kazandırmakken matris fazının görevi takviye fazını bir arada tutmak ve bütünlük oluşturmaktır.

Kompozit malzemeler; yüksek mukavemet, elastisite modülü, kırılma tokluğu, aşınma direnci ile birlikte yüksek mukavemet/ağırlık ve yüksek elastisite modülü/ağırlık gibi özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahipken kompozit yapının göstereceği bu özellikler fazların bileşim oranlarına, iki faz arasındaki bağ özelliklerine, takviye fazının şekli ve boyutu gibi özelliklere göre belirlenir (Kalemtaş, 2014).

Kompozit malzemeler Şekil 2.1’ de gösterildiği gibi matris türüne bağlı olarak metal matrisli, seramik matrisli ve polimer matrisli kompozitler olarak üç sınıfa ayrılabilirken takviye fazının türüne göre fiber takviyeli, partikül takviyeli ve yapısal kompozitler olarak üç sınıfa ayrılabilir (İbrahim ve diğer., 2015).



Şekil 2.1 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (İbrahim ve diğer., 2015)

2.1 Matris Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

2.1.1 Seramik Matrisli Kompozitler

Matris malzemesi olarak kullanılan seramikler çok sert, kırılğan ve inert olmalarının yanında düşük yoğunluğa sahip malzemelerdir. Bu özelliklerinin yanında termal şok direnci ve tokluğunun düşük olması kullanım alanlarını sınırlandırır. Bu tür malzemelerin seramik fiberlerle takviye edilmeleri mukavemet ve tokluk değerlerini geliştirebilir. Son yıllarda özellikle alümina ve zirkonyum esaslı kompozitler üzerinde yapılan çalışmalar uzay endüstrisinin yanı sıra insan vücudunda kullanımı için de imkân sağlamıştır. Seramik matrisli kompozitlerin kullanım sebepleri şu şekilde sıralanabilir;

- Yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal kararlılık
- Yüksek sertliğe sahip olmaları
- Hammadde olarak bol miktarda bulunmaları
- Metallere oranla hafif ve ucuz olmaları
- Aşınma dayanımlarının yüksek olması

- Oksitlenme dirençlerinin yüksek olması
- Düşük sürtünme katsayısına sahip olmaları (Özben, 2001)

Tüm bu avantajlarının yanında gevrek bir yapıya sahip olmaları seramiklerin dezavantajı olarak gösterilebilir (Evcı, 2009).

2.1.2 Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitler ucuz ve kolay çalışılabilir malzemeler olmalarına rağmen düşük modüle ve kullanım sıcaklığına sahip olmaları bu tür kompozitlerin kullanımlarını sınırlayan özellikleridir. Polimer matrisli kompozitlerde matris malzemesi termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılmaktadır. Termoset polimerler ısıtıldıklarında sert ve rijit hale gelirler ve bu işlem tersinir değildir. Termoplastik polimerler ise belirli bir sıcaklığın üzerine çıktığında malzeme sıvı hale geçebilir ve bu işlem tersinirdir. Daha basit bir ifade ile termosetler ısıyla bir kez şekillendirildikten sonra tekrar şekillendirilemezken termoplastikler ısıtılarak tekrar şekillendirilip kullanılabilir. Polimer matrisli kompozitler için en çok kullanılan matris malzemeleri termoset olarak epoksi, polyester ve vinil esterken termoplastik olarak polietilen, polipropilen, poliamid ve polikarbonat gibi malzemelerdir. Bu malzemelerin kullanımda tercih edilme sebepleri ise şu şekildedir;

- Düşük yoğunluğa sahip olmaları.
- Seri üretim için hızlı, ekonomik ve kolay tekniğe sahip olmaları.
- Atmosferik koşullara ve birçok kimyasala karşı dirence sahip olmaları.
- Özelliklerinin katkı maddeleri ve molekül yapılarının değiştirilmesi ile geliştirilmelerinin mümkün olması (Özben, 2001; Sönmez, 2009).

2.1.3 Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler; matris malzemesinin alüminyum, titanyum, magnezyum, bakır, nikel ve süper alaşımlar gibi metal malzemelerden oluştuğu kompozit malzemelerdir. Yapı içinde bulunan takviye fazı ise genellikle oksitler

(Al_2O_3 , SiO_2), nitrirler (Si_3N_4 , AlN) ile karbürlerden oluşur ve bu malzemeler süreksiz olup sert ve yüksek dayanım gösteren malzemelerdir.

Takviye malzemelerinin kullanımıyla yapıya kazandırılmak istenilen özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Akma ve çekme dayanımlarını arttırması
- Yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanımlarını arttırması
- Yorulma dayanımını arttırması
- Termal şok direncini arttırması
- Korozyon direncini arttırması
- Elastisite modülünü arttırması

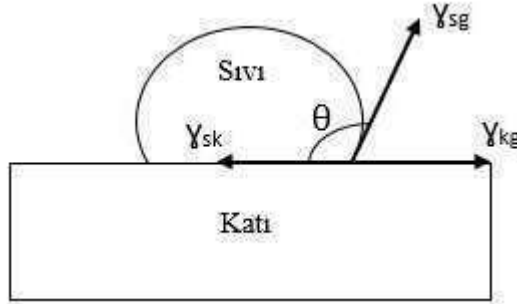
Kompozit yapı içerisindeki bir diğer faz ise ara faz olarak isimlendirilen ve matris ve takviye malzemesinin etkileşimiyle oluşan yapıdır. Metal matrisli kompozitlerin takviye fazı ile sahip olacağı özellikleri matris ve takviye fazlarının yanında takviye fazının yapı içerisindeki dağılımına ve karışım oranlarına bağlıdır. Ayrıca takviye fazı ile matris fazının kendi aralarındaki uygunluğu, takviye fazının matris fazı tarafından ıslatılabilirliği ve oluşan reaksiyonlar sonucu meydana gelen arayüzeyin mekanik özellikleri de yapının sahip olacağı özellikleri etkileyen faktörlerdir. Bu nedenle bu mukavemetin arttırılması için;

- Islanabilirliğin arttırılması,
- Kimyasal etkileşimlerin kontrol edilmesi,
- Oksit oluşumunun minimuma indirilmesi gerekmektedir.

Bu yapılarda takviye fazının matris fazı tarafından ıslatılabilmesi için arayüzey bağ mukavemetinin sıvının yüzey geriliminden yüksek olması gerekmektedir.

Katı bir malzeme üzerine sıvı metalin damlatılması sonucu bu damlacığın ortaya çıkarmış olduğu geometri ve yüzey kuvvetleri Şekil 2.2’de gösterildiği gibidir. Bu durumda ideal bir ıslanma için temas açısının sıfır olması ve sıvı metalin katı yüzeyi

kaplaması gerekmektedir. Etkin bir ıslanma sıvı katı arayüzey gerilimin düşmesi ve temas açısının 90 dereceden düşük olması gerekmekte iken bu açının 180 derece olması ıslanmanın yetersiz olduğunun göstergesidir.



Şekil 2.2 Sıvı ve katı kütle arasında meydana gelen kuvvetler (Özben, 2001)

Islanmayı etkileyen temel faktör yapı içerisindeki partikül dağılımıdır. Partiküllerin homojen bir biçimde dağılmasının yanında partikül boyutunun, sıvı viskozitesinin ve katılaşma hızının yüksek olması ıslanmayı sağlayan faktörlerdir. Bununla birlikte partiküller ve sıvı arasındaki yoğunluk farkının ve arayüzeyde sıcaklık gradyanının da düşük olması etkin bir ıslanma için gerekli koşullardır (Kainer, 2006; Özben, 2001; Uygur ve Saruhan, 2004).

2.2 Takviye Malzemesine Göre Kompozit Malzemeler

2.2.1 Fiber Takviyeli Kompozitler

İnce fiberlerin matris içerisinde yer almasıyla elde edilen kompozit malzemeler fiber takviyeli kompozit malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Fiberlerin matris içerisindeki yerleşimi malzemenin mukavemetini etkileyen en önemli faktördür. Birbirine paralel ve tek yönlü yerleşime sahip fiberlere sahip kompozit malzemeler fiber yönünde yüksek mukavemete sahipken fiberlere dik doğrultudaki yüklere karşı düşük dayanıma sahiptir. İki boyutlu yerleşmiş fiberlerle her iki yönde eşit dayanım elde edilirken homojen dağıtılmış kısa fiberler ile izotrop bir yapı elde edilebilir.

Çapları yaklaşık 100 μm ve boy/çap oranları 100 ve daha yukarısı olanlar uzun fiber olarak adlandırılmaktayken boy/çap oranları 10 ile 100 arasında olanlar kısa

fiber olarak adlandırılmaktadır. Fiberler düşük yoğunluğa sahip olmalarının yanında yüksek elastisite modülüne ve sertliğe sahiptirler. Ayrıca kimyasal korozyona da dirençleri yüksektir. Fiberler metal matrisli kompozitlerde mekanik özellik ve yüksek sıcaklık dayanımlarının iyileştirilmesi için kullanılırken seramiklerde tokluk özelliğinin iyileştirilmesi için kullanılır (Bulut, 2014).

2.2.2 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Matris malzeme içerisinde takviye fazının parçacıklar halinde olmasıyla elde edilen kompozit malzeme çeşididir. Yapı içerisinde bulunan takviye elemanının boyutunun 1 μm 'den küçük ise partikül büyük ise parçacık olarak adlandırılır. Takviye fazının yapı içerisinde homojen dağılması ile her yönde yaklaşık olarak eşit mekanik özelliklere sahiptirler. Bu tür kompozit yapılarda dağılım sertleşmesi ile mekanik özellikler iyileşmektedir. Bu da partiküllerin tane sınırlarında oluşan kaymaları engellemesiyle gerçekleşir. Bu nedenle parçacıkların sertliği yapının mukavemetini etkileyen en önemli faktördür (Bulut, 2014).

2.2.3 Yapısal Kompozitler

Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bir araya getirilerek elde edildiği, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip kompozit yapılardır. Farklı yönlenmelere sahip elyaflar sayesinde yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Metallere oranla hafif ve mukavemetli olmalarının yanında düşük maliyete sahip olmalarıyla sıkça tercih edilen malzemelerdir (Bulut, 2014).

Yapısal kompozit malzemeler kendi içinde tabakalı ve sandviç kompozit malzemeler olarak ikiye ayrılmaktadır. Tabakalı kompozit malzemeler iki boyutla panellerin belirli bir oryantasyonda bir araya getirilmesiyle oluşturulurken sandviç kompozit malzemeler iki dış panelin ortadaki çekirdek yapının yüzüyle birleştirilmesiyle elde edilir (Callister 2007).

BÖLÜM ÜÇ

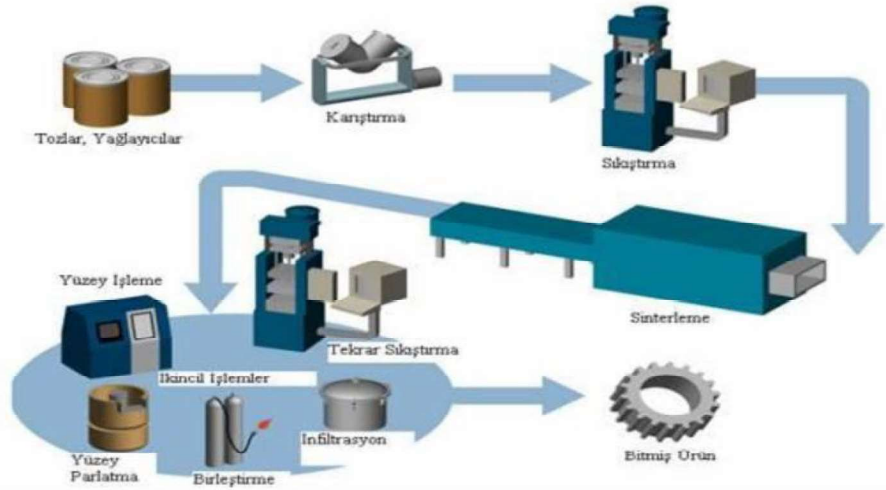
METAL MATRİSLİ KOMPOZİT ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Metal matrisli kompozit üretim yöntemleri, matris fazının takviyelendirildiği durumdaki fiziksel haline göre katı ve sıvı haldeki üretim yöntemleri olarak gruplandırılabilir.

3.1 Katı Hal Üretim Yöntemleri

3.1.1 Toz Metalürjisi ile Üretim

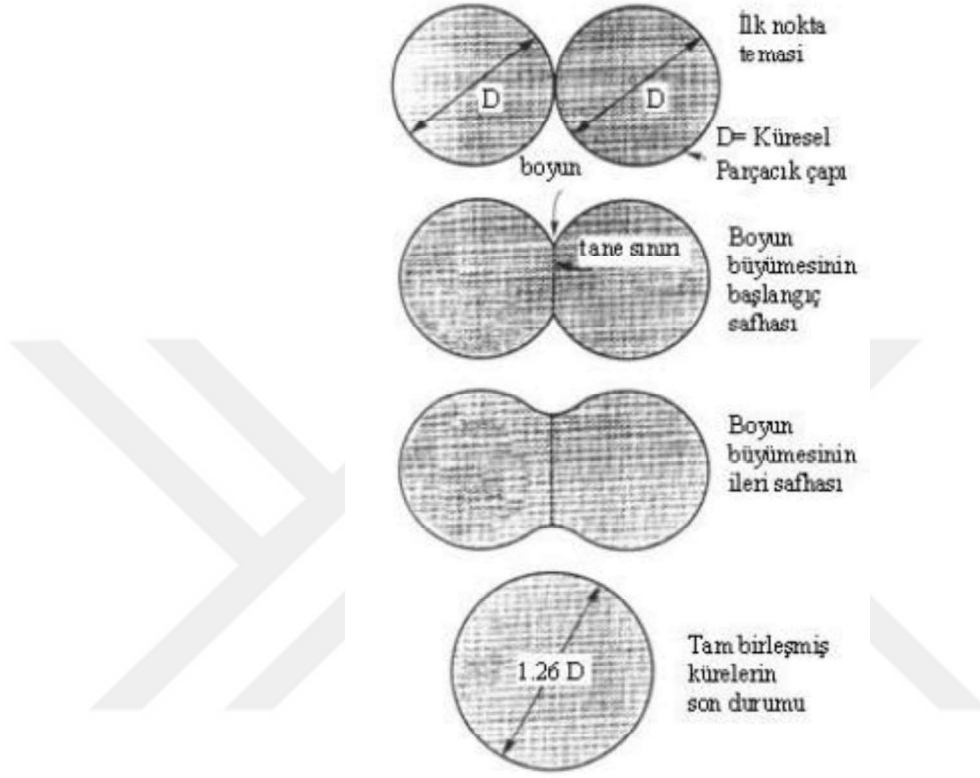
Toz metalürjisi ile üretim yönteminde Şekil 3.1’de gösterildiği gibi toz halindeki matris ve takviye fazları karıştırıldıktan sonra sıcak veya soğuk olarak preslenir. Tozların şekillendirilmesi ve kalıptan çıkarılması sırasında metal tozları ile kalıp yüzeyi arasındaki sürtünmeyi azaltmak amacıyla yağlayıcılar da kullanılmaktadır. Ardından sinterleme işleminin uygulandığı yöntemde difüzyon vasıtasıyla atomik ölçekte kütle taşınımı ile yoğunluk ve mukavemetin artması sağlanır. Sinterleme işleminden sonra ise isteğe bağlı olarak gaz giderme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi işlemlerle kompozit yapıya son şekli verilmiş olur (Akın, 2006; Güven, 2011).



Şekil 3.1 Toz metalürjisi ile metal matrisli kompozit üretimi (Güven, 2011)

Sinterleme işlemi sırasında tozların oluşturduğu gözenekli yapıda tozların yüzey alanlarının küçültülmesi, temas noktalarının büyütülmesi ve gözenek hacminin

küçültülmesi hedeflenir. Sinterleme işlemi sırasında Şekil 3.2’de gösterildiği gibi noktasal temas ile başlayan süreç bu temas noktasının boyun oluşturmaya devam eder ve tane sınırının oluşmasıyla iki parçacık tek bir parçacık oluşturacak şekilde birleşir (Aktaş, 2018).

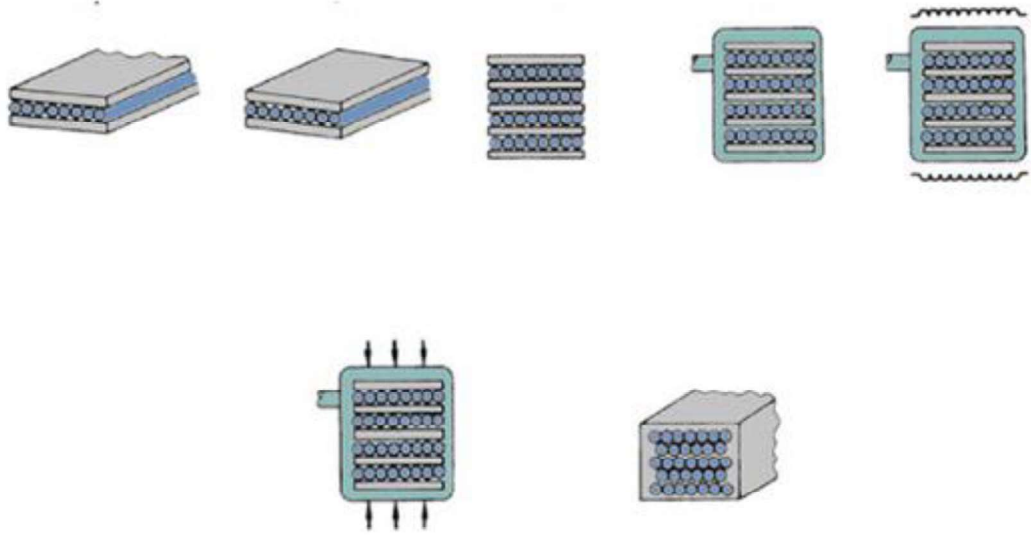


Şekil 3.2 Sinterleme işleminde partiküllerin birleşmesi (Aktaş, 2018)

3.1.2 Difüzyon Bağı ile Üretim

Difüzyon bağı yöntemi ile üretim oldukça yaygın kullanılan bir katı hal üretim yöntemidir. Temel avantajın kontrol edilebilir fiber oranı ve oryantasyonun olduğu işlemde yüksek sıcaklıklardaki atomlar arasında difüzyon bağı kurulmasıyla metal matrisli kompozit üretilmiş olur.

Üretim aşamaları Şekil 3.3’ de gösterildiği gibi olan yöntemde matris tozlarından üretilen folyo halindeki matris fazı ile fiberler istiflendikten sonra vakum altında preslenir ve ısıtılır. Yeterli sıcaklık ve basınç değerleri elde edildikten sonra atomların difüzyonu ile tabakalar arasında bağ oluşumu gerçekleşir (Balasubramanian, 2013).



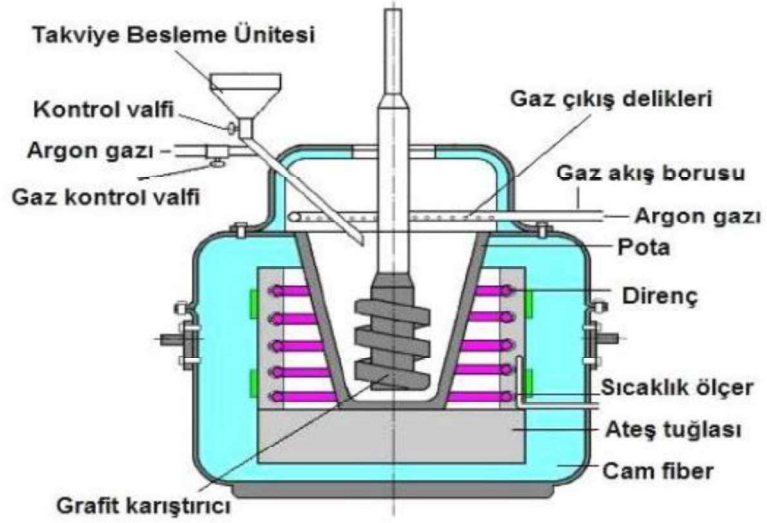
Şekil 3.3 Difüzyon bağı ile üretim yöntemi (Chawla, 2013)

3.2 Sıvı Hal Üretim Yöntemleri

Matris fazının sıvı olduğu üretim yöntemleri Karıştırma(Vorteks) Döküm, Sıkıştırma Döküm ile Basıncılı ve Basıncısız İnfiltrasyon Yöntemleri olarak incelenebilir.

3.2.1 Karıştırma(Vorteks) Döküm Yöntemi

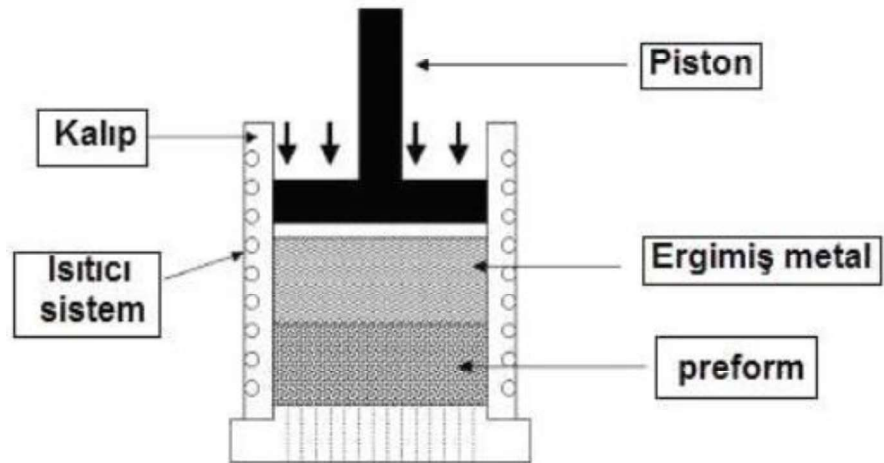
Bu yöntemde ergiyik metal içerisinde takviye fazının homojen şekilde dağıtılabilmesi için mekanik bir karıştırıcı kullanılır. Şekil 3.4’de gösterildiği gibi fırın içerisinde bulunan potadaki ergiyik metalde mekanik karıştırıcı bir girdap oluşturarak takviye fazının ergiyik içerisinde dağıtılmasını ve ıslanmasını sağlar (Akın, 2006).



Şekil 3.4 Karıştırırmalı döküm yöntemi şematik gösterim (Akın, 2006)

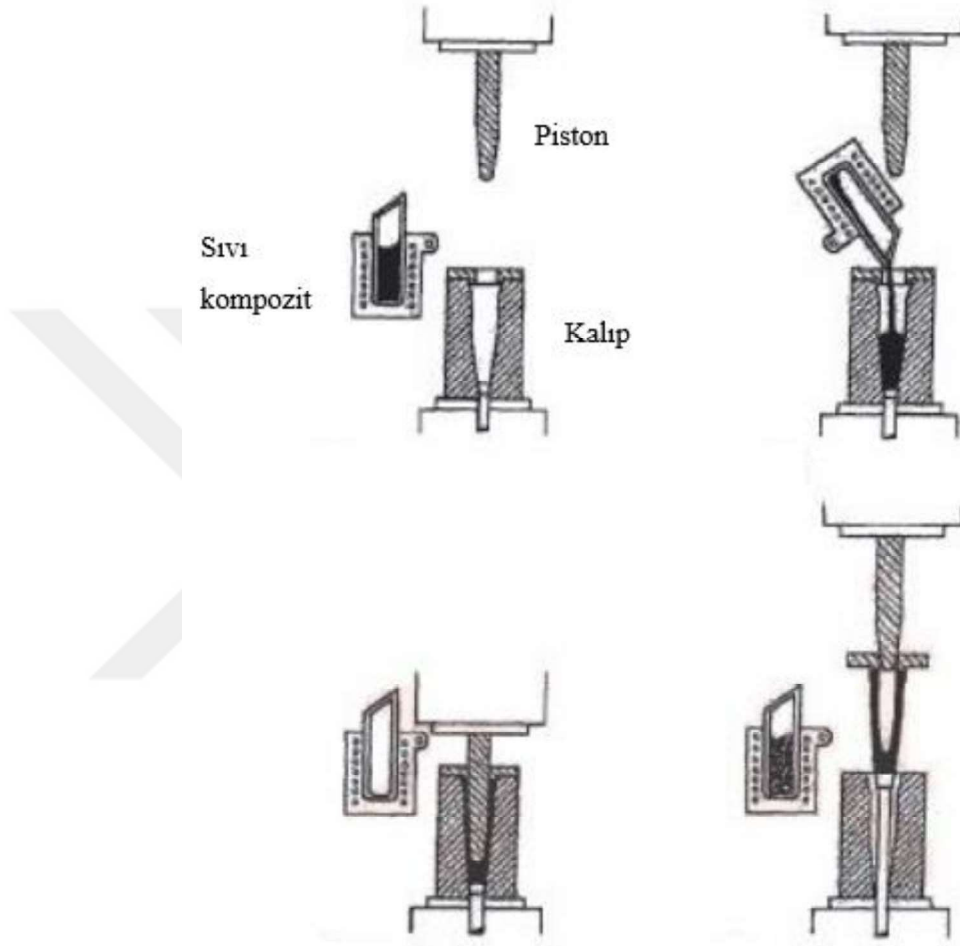
3.2.2 Sıkıştırırmalı Döküm Yöntemi

Sıkıştırırmalı döküm yöntemi ergiyik metalin bir preform yapı içerisine emdirilmesi esasına dayanır. Partikül veya fiberlerin paketlenmesinden oluşan preform metal kalıp içerisine yerleştirilir. Üzerine Şekil 3.5'te gösterildiği gibi ergiyik metalin ilave edilip hidrolik presin uyguladığı basınç yardımıyla metal preform yapıya emdirilir ve kompozit yapı elde edilir. Yöntemde ergiyik metalin katılaşmasını engellemek için kalıp, preform ve zımba önceden ısıtılır ve ısıl denge sağlanır (Akın, 2006).



Şekil 3.5 Preform ile sıkıştırırmalı döküm yöntemi şematik gösterimi (Akın, 2006)

Bir diğerk sıkıştırırmalı döküm yöntemi ise Şekil 3.6’da gösterildiğı gibi istenilen şekle sahip yapının hacmine uygun olarak üretilen kompozitin ergiyik halde metal kalıba konulması ve üst kalıbın ergiyik metale basınç uygulayarak istenilen şekli vermesiyle üretim yapmaktır (Kılıç, 2008).

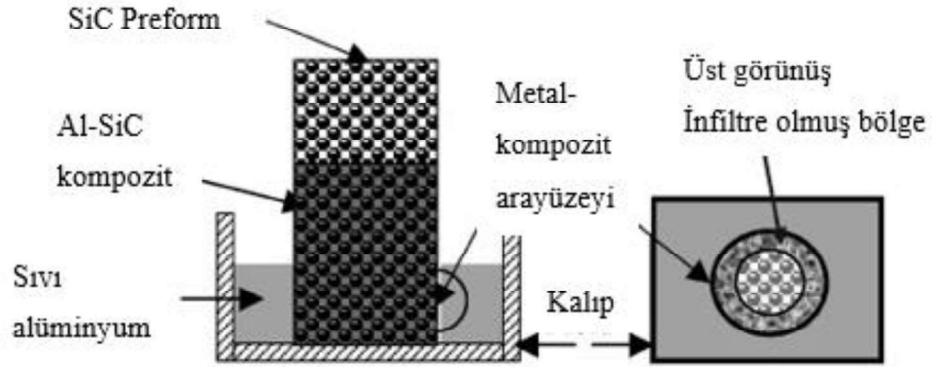


Şekil 3.6 Metal kalıba sıkıştırırmalı döküm yöntemi (Kılıç, 2008)

3.2.3 Basıncılı ve Basıncsız İnfiltrasyon Yöntemi

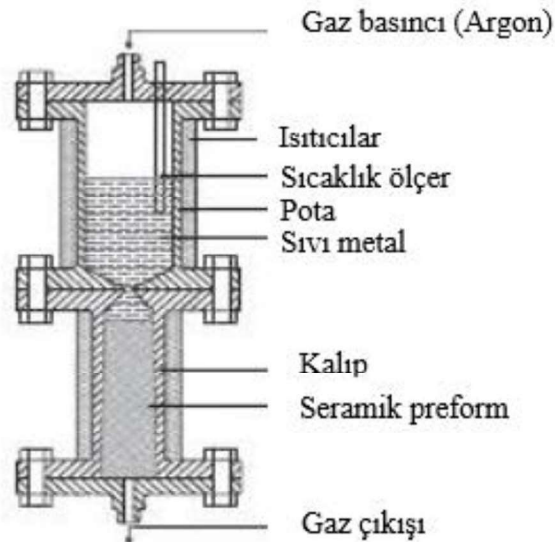
Basıncsız infiltrasyon yöntemi düşük maliyetli ve basit bir yöntemdir. Yöntemde Şekil 3.7’de gösterildiğı gibi sıvı metal, takviye fazı içerisine basınç uygulamadan nüfuz etmektedir. Özellikle alüminyum esaslı kompozit üretiminde kullanılan bu yöntemde takviye fazının alüminyum tarafından ıslatılabilmesi için Mg ilavesi yapılır ve infiltrasyon işlemi azot ortamında gerçekleştirilerek arayüzeyde meydana gelebilecek reaksiyonlar minimize edilmeye çalışılır. İlave edilen magnezyum matris

ile seramik faz arasında oluşabilecek alüminyum oksit tabakasının oluşmasını engeller ve viskoziteyi düşürerek yüzey gerilimini azaltır ve ıslanabilirliği artırır (Rodriguez-Reyes, Pech-Canul, Parras-Medecigo ve Gorokhovsky, 2003).



Şekil 3.7 Basıncısız infiltrasyon yöntemi ile üretim (Rodriguez-Reyes, Pech-Canul, Parras-Medecigo ve Gorokhovsky, 2003)

Basıncılı infiltrasyon yönteminde ise Şekil 3.8’de gösterildiği üzere poroziteli yapıya sahip bir preform içerisine ergiyik metal gaz basıncı ile nüfuz ettirilir. Bu yöntem özellikle basıncısız infiltrasyonla elde edilemeyen ıslanabilirliğin sağlanması amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 3.8 Basıncılı infiltrasyon yöntemi ile üretim (Akın, 2006)

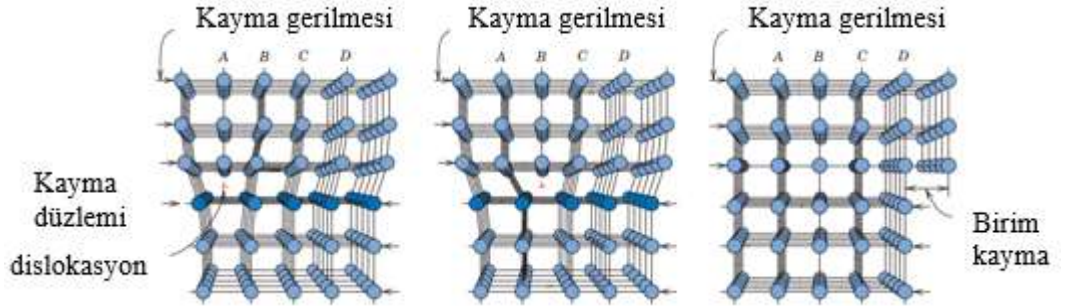
BÖLÜM DÖRT

PLASTİK DEFORMASYON VE DÖVME YÖNTEMLERİ

4.1 Plastik Deformasyon ve Etkileri

Plastik deformasyon mikroskobik anlamda uygulanan gerilim karşısında çok sayıda atom hareketi olarak tanımlanmaktadır. Bu işlem sırasında atomlar arası bağlar kopar ve sonrasında yeniden oluşur. Uygulanan gerilim sonucunda malzeme içerisinde bulunan dislokasyonlar harekete geçer. Bu dislokasyon hareketine “kayma” adı verilirken kaymanın gerçekleştiği düzlem ise “kayma düzlemi” olarak adlandırılır.

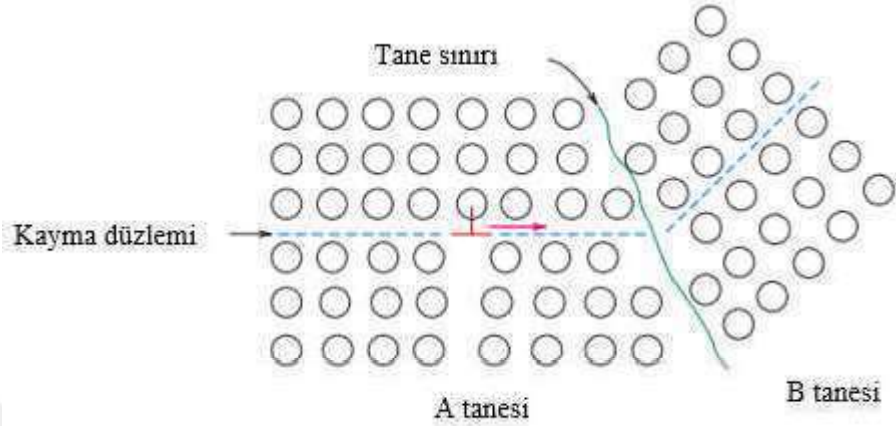
Malzeme üzerine uygulanan kuvvet ile Şekil 4.1’de görüldüğü üzere malzeme içyapısında oluşan kayma gerilmesi A düzlemini sağ tarafa doğru hareket etmeye zorlar. Eğer meydana gelen gerilme yeterli büyüklükteyse B düzlemi ile kayma düzlemi arasındaki atomları arası bağların kopmasına ve B düzleminin kayma düzlemi altında kalan atomlar ile A düzlemi arasında bağ oluşmasına sebebiyet verir. Bu hareket C ve D düzlemleri boyunca bir tırtıl hareketi gibi devam eder.



Şekil 4.1 Plastik deformasyon hareketi (Callister, 2006)

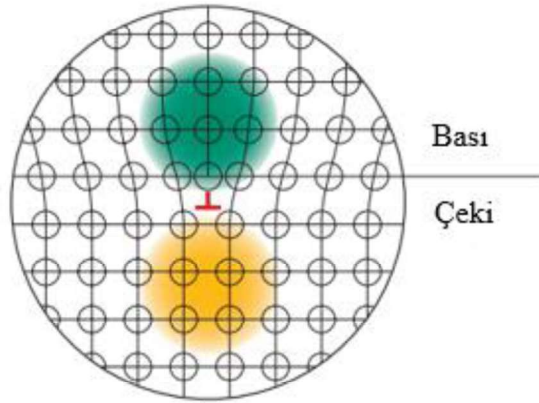
Yapı içerisinde meydana gelen gerilme dislokasyonların harekete geçirirler ve bu dislokasyonlar bir engelle karşılaştıkça kadar hareket ederler. Bu engellerden birisi de yapı içerisindeki tane sınırlarıdır. Şekil 4.2’deki yapı dikkate alındığında A tanesinde hareket eden dislokasyon B tanesi ile olan tane sınırı tarafından engellenir. Bu durumun sebeplerinden birisi iki tane yapısı arasındaki oryantasyonun farklı olması ve dislokasyonun bir yapıdan diğerine geçişinin oldukça zor olmasıdır. Diğer ise iki

tane yapısı arasındaki atomal düzensizlik sonucu kayma düzlemlerinin farklı olmasıdır. Bu durumun sonucu olarak deformasyon ile dislokasyonların tane sınırlarına yığılmasıyla da bu kısımlarda gerilim yığılması sonucu iç gerilme meydana gelir.



Şekil 4.2 Tane sınırının dislokasyon hareketine engel olması (Callister, 2006)

Yapı içerisinde bulunan dislokasyon sonucu atomal sistemde bulunan düzensizlik sonucu Şekil 4.3’de görüldüğü gibi iç gerilmeler meydana gelir. Dislokasyon çizgisinin üzerinde bulunan atomlar birbirlerini sıkıştırırlar ve bu nedenle bu bölgede bası gerilmeleri meydana gelirken dislokasyon çizgisinin alt kısmında ise bu durumun tam tersi şekilde çeki gerilmesi meydana gelir.



Şekil 4.3 Dislokasyon nedeniyle yapı içerisinde meydana gelen gerilmeler (Callister, 2006)

Plastik deformasyon, yapı içerisindeki dislokasyonları harekete zorlayıp tane sınırlarına yığarak bu bölgelerde gerilim yoğunluğunun artmasına sebep olurken aynı zamanda yeni dislokasyonların oluşmasını ve dislokasyon yoğunluğunun artışı da

sağlar. Dislokasyon yoğunluğunun artmasıyla da dislokasyonların hareketi zorlaşırken oluşan dislokasyonlar atomal düzen içerisinde de artık gerilim oluşturlar. Hem dislokasyonların tane sınırlarına yığılması hem de dislokasyon yoğunluğunun artmasıyla da malzemelerin mekanik özellikleri geliştirilmiş olur (Callister, 2006).

4.2 Dövme Yöntemleri

Malzemelerin plastik deforme edilmesiyle mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla ultrasonik dövme yöntemi, bilyalı dövme yöntemi, ultrasonik bilyalı dövme yöntemi, lazer dövme yöntemi, su jeti ile dövme yöntemi ve düşük plastisiteli ezme yöntemi gibi yöntemler geliştirilmiştir.

4.2.1 Ultrasonik dövme yöntemi

Ultrasonik dövme yöntemi ses üstü frekanslara sahip titreşimlerle yüzeyde deformasyon oluşturarak kaynaklı bağlantıların dayanımının artırılması için geliştirilmiş bir yöntemdir. Yöntemin geliştirilmesi 1950'lerde I.I. Mukhanov (Mukhanov ve Golubev, 1966) ve A.V. Mordvintseva'nın (Mordvintseva, 1959) çalışmalarına dayanmaktadır. Bu çalışmalarda, magnetostriktif bir transdüzer (dönüştürücü) yardımıyla elde edilen kesintisiz ultrasonik mekanik titreşimlerin yüzeye doğrudan temasıyla yüzeyde plastik olarak deforme edilmiş çok ince bir yüzey tabakası oluşturularak yüzey modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Daha sonra N. A. Krylov ve arkadaşları tarafından işlem görececek malzeme ve ultrasonik transdüzer arasına yerleştirilmiş serbest bilyelerin kullanıldığı ultrasonik bilyalı dövme yöntemi olarak adlandırılan yöntemi geliştirmişlerdir (Krylov ve Polischuk, 1970).

Ultrasonik dövme yöntemi ise bunu takip eden yıllarda E. Statnikov tarafından Sovyetler Birliği'nde deniz araçlarında kullanılan kaynaklı bağlantılardaki gerilmeleri azaltmak için bası gerilmeleri ve deformasyon oluşturmak için bulunmuştur. Ultrasonik dövme yöntemi diğer yöntemlerden farklı olarak 20-40 kHz

gibi çok yüksek frekanslar (diğer yöntemlerde 50-100 Hz arasındadır.) kullanılmakta ve ultrasonik dalgaların oluşturduğu titreşimleri malzeme yüzeyine mekanik darbeler şeklinde aktaran pimler bulunmaktadır. Çok yüksek frekanslarda gerçekleştirilen bu işlem sonucunda plastik deformasyon kolaylaşmaktadır ayrıca dövme cihazının kontrolü diğer yöntemlere göre daha kolaydır ve bu da kullanım kolaylığını getirmektedir.

Bu yöntemde işlenecek yüzeyin dövülmesi için titreşen sistemin ekseni boyunca hareket eden pimler bulunmaktadır. Bu pimler titreşim sonucu oluşan mekanik etkiyi malzeme yüzeyine darbe olarak aktarırlar. Uygulanan bu mekanik darbeler malzeme yüzeyinde plastik deformasyonlara neden olurlar. Malzeme yüzeyinde oluşan bu deformasyonlar sonucu malzeme yüzeyi genişlemeye çalışmakta ancak iç bölgeler buna engel olduğu için malzeme belli bir derinliğe (kalınlığa) kadar yüzey tabakasında kalıcı bası gerilmeleri oluşmaktadır. Ayrıca elastik-plastik şekil değişiminin bir arada oluşması da kalıcı bası gerilmelerinin oluşmasında ek bir etki yapmaktadır (Statnikov ve Muktepavel, 2003). Şekil 4.4'te tipik bir ultrasonik dövme yöntemi sistemi görülmektedir.

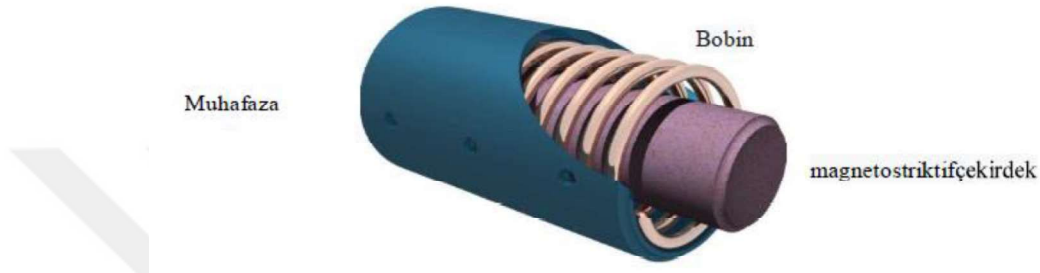


Şekil 4.4 Ultrasonik dövme yöntemi sistemi (Kahraman, Yolcu ve Kahraman, 2016)

Ultrasonik dövme yönteminde dövme takımı temel olarak ultrasonik transdüser, konsantratör, yüzer pimler ve diğer parçalardan oluşmaktadır. Ultrasonik transdüserlerin piezoelektrik seramik ve magnetostriktif olmak üzere iki çeşidi vardır ve bunlar 20-30 kHz arasında elektro-mekanik bir yapıya sahiptirler. Bu transdüserlerin her ikisi de güç jeneratöründen gelen alternatif elektrik enerjisini

mekanik enerjiye çevirme görevini yapmaktadır, ancak bu görevi farklı şekillerde yerine getirmektedirler.

Gösterimi Şekil 4.5’de verilen Magnetostriktif transdüserlerde güç jeneratöründen alınan elektrik enerjisi bir bobin kullanılarak önce değişken manyetik alana çevrilir. Daha sonra bu alternatif manyetik alan ise magnetostriktif malzemenin rezonans çubuğunda ultrasonik frekansta mekanik titreşimlere dönüştürülür.

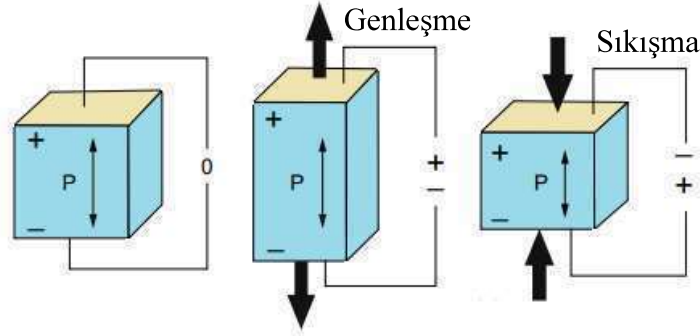


Şekil 4.5 Magnetostriktif transdüser (Kahraman, Yolcu ve Kahraman, 2016)

Magnetostriktif transdüserlerin genellikle piezoelektrik olanlara göre verimleri düşüktür. Bunun temel nedeni magnetostriktif transdüserlerin elektrikten manyetiğe ve manyetikten mekanik enerjiye ikili enerji dönüşümü yapmalarıdır. Bu dönüşümlerin her birinde belirli oranda enerji kaybı olmakta ve bu nedenle de verim düşmektedir. Manyetik histerizis etkileri de ayrıca magnetostriktif transdüserin verimini düşürmektedir. Buna ek olarak ultrasonik dövme yönteminde magnetostriktif transdüserlerin bobinde meydana gelen ısınma nedeniyle basınçlı su ile soğutulması da gerekmektedir.

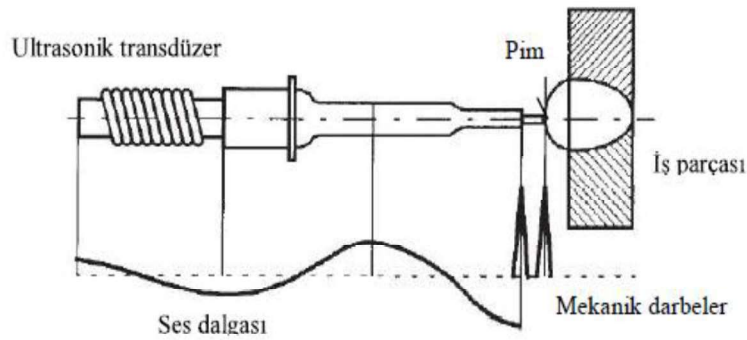
Piezoelektrik transdüserlerde ise değişken elektrik gerilimi altında değişken bir elektrik alanı meydana gelmekte ($E=U/d$) ve meydana gelen bu değişken elektrik alanının etkisi altında piezoelektrik eleman boyut değiştirmekte yani titreşmektedir. Bu olay piezoelektrik etki olarak adlandırılmaktadır. Böylece piezoelektrik transdüserler Şekil 4.6’da gösterildiği gibi piezoelektrik etki nedeni ile doğrudan alternatif elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmektedirler. Günümüzde daha sağlam, daha verimli ve daha stabil seramik piezoelektrik malzemelerin kullanımı ile sıcaklık ve gerilmeler altında daha iyi sonuçlar veren ve enerji tüketimini %60 civarında azaltan piezoelektrik transdüserler kullanılabilmektedir. Piezoelektrik transdüserlerin yüksek

enerji veriminden dolayı yorulma ömrü iyileştirmede piezoelektrik transdüserlerde 350-500 W'lık güç tüketimi ile elde ettiği işlem magnetostriktif transdüserler ile ancak 1000 W'lık bir enerji tüketimi ile sağlanabilmektedir (Kudryavtsev, Kleiman ve Iwamura, 2009; Kudryavtsev ve diğer., 2004).



Şekil 4.6 Piezoelektrik transdüserde titreşim oluşumu (Soin, Anand ve Shah, 2016)

Transdüserler tarafından üretilen ultrasonik titreşimin genliği genellikle 10 μm 'den daha küçüktür. Ancak ultrasonik dövme işleminden daha iyi sonuçlar elde edebilmek için bu genliğin 20 μm 'den daha yüksek olması gerekir. Bu nedenle ses dalgası üretildikten sonra genellikle kullanılan bir genlik transformatörü ile son çıkış genliği 20 ile 40 μm arasında olacak şekilde titreşimlerin genliği yükseltilmelidir. Daha sonra transformatörün ucunda bulunan yüzer pimler ise bu titreşim ile harekete geçerek titreşmekte ve işlenecek olan yüzeye mekanik darbe uygulamaktadır. Yüzer pimler metal yüzeyine darbe uygulayarak yüzeyde plastik deformasyon meydana getirmekte ve faydalı bası gerilimi yığmaktadır. Ultrasonik darbe yönteminin çalışma prensibi Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 Ultrasonik dövme yöntemi çalışma prensibi (Statnikov ve Muktepavel, 2013)

4.2.2 Bilyalı dövme yöntemi

Bilyalı dövme işlemi literatürde “Shot Peening” olarak geçen ve ilk olarak otomotiv endüstrisinde kullanılan sübab yaylarının iyileştirme çalışmaları sırasında ortaya çıkmış bir yöntemdir. Kullanılan yayların üzerinde bulunan yağların kumlama işlemi ile temizlenmesinin yayın uzun ömürlü olmasına yol açtığına inanılırken daha sonra kum yerine çakıl taşlarının kullanılması ile daha yüksek bir ömür elde edilmesi sonucu ömür artışının temizleme işleminden değil yüzeye uygulanan darbelerden kaynaklandığı anlaşılmıştır. 1928-1929 yıllarında General Motor firmasının yaptığı çalışmalarla da ömür artışının yüzeyde oluşan bası gerilmelerinden kaynaklandığı ortaya konulmuştur (Ay ve Sakin, 1998).

Bilyalı dövme işlemi genellikle küresel şekle sahip ve dövülecek malzemeden daha sert bilyaların dövülecek malzeme yüzeyine batmasını sağlayacak bir hızda fırlatılmasıyla yapılan bir mekanik yüzey işlemidir. Bilyalı dövme işleminde parametre olarak bilya sertliği, çapı ve hızı gibi değerler kullanılırken dövülecek malzeme sertliği ne olursa olsun bilya çapı ve hızı arttıkça oluşan plastik deformasyon tabakasının da arttığı gözlemlenmektedir. Bilya malzemesi olarak ise dökme çelikler, dökme demirler, camlar, paslanmaz çelikler ve seramikler kullanılmaktadır (Alkan, Varol ve Selver, 2016).

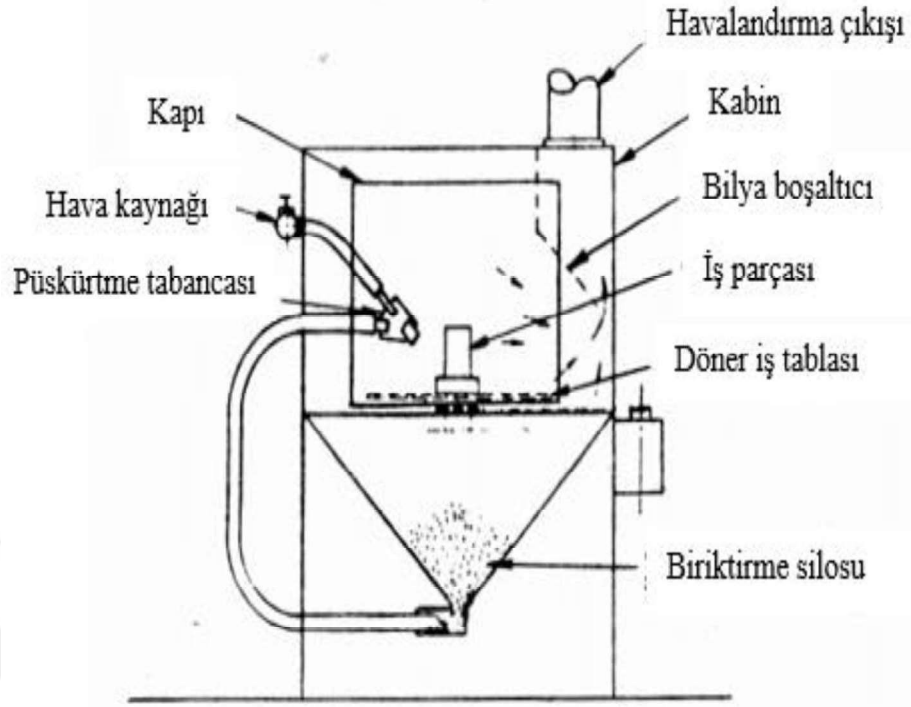
Bilyalı dövme işlemi metallerin yüzeylerine küçük çaplı bilyaların fırlatılması ile yapılan, soğuk veya ılık olarak uygulanan bir mekanik yüzey işlemidir. Çeşitli malzemelerden elde edilen bilyalar yüzeye plastik deformasyon oluşturacak hızlarda gönderilir ve malzemede plastik akma gerçekleşir. Bilyaların çarptığı yüzeyde deformasyona sebep olması ve bu bölgelerin genişlemeye çalışması elastik deformasyona maruz kalan bölgeler tarafından engellenir. Dolayısıyla plastik deformasyona maruz kalan bölgelerde bası gerilmeleri meydana gelirken elastik deformasyona maruz kalan bölgelerde ise çeki gerilmeleri meydana gelir. Oluşan bu artık gerilmeler elastik gerilmeler olarak değerlendirilebilir. Diğer bir ifade ile bu gerilmelerin akma gerilmesinin üstünde olması durumunda bir başka plastik deformasyon söz konusu olur (Ünal, 2011).

Bilyalı dövme makinaları bilyaların istenilen hızda ivmelendirilmesini sağlayan bilya fırlatma ünitesi, fırlatılan bilyaların proses sonunda tekrar ayırıcıya yükselten yükseltici, hasara uğrayan ve deforme olan bilyaların ayrılmasını sağlayan ayırıcı ve yeni bilyaların sisteme eklenmesini sağlayan bilya ekleme ünitesi gibi ekipmanlardan oluşur. Bilyalı dövme makinaları bilya fırlatma şekillerine göre de pnömatik ve santrifüj dövme makinaları olarak incelenebilir.

4.2.2.1 Pnömatik Bilyalı Dövme Makinaları

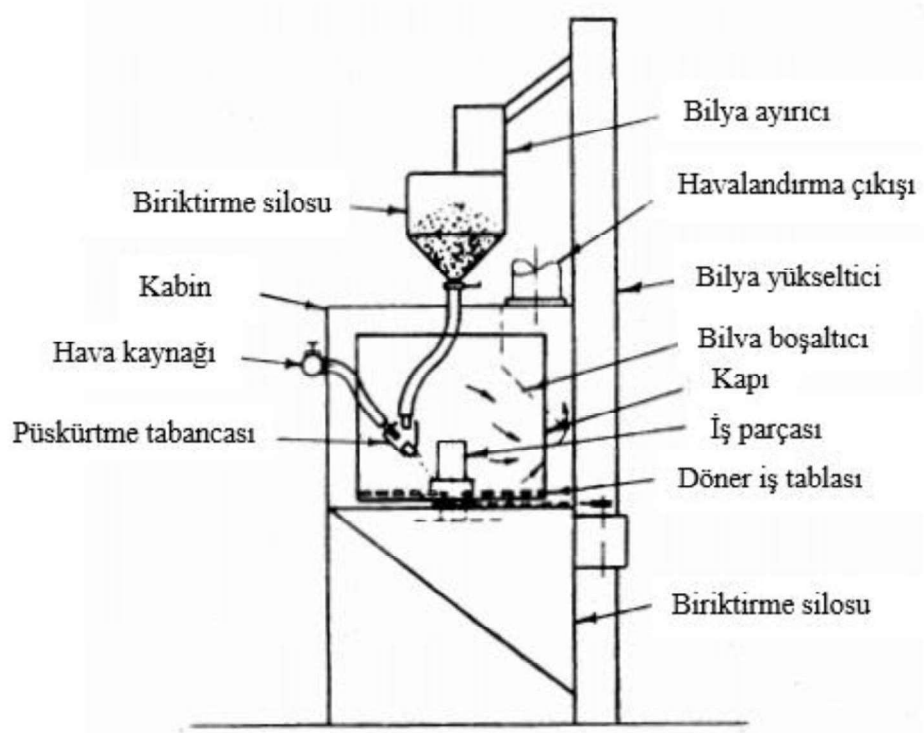
Dövme işleminde kullanılan bilyaların istenilen hıza ulaşmalarını sağlamak için hava jeti kullanan dövme makinalarıdır. Bu tip makinalar sifon indüksiyon metodu, yerçekimi indüksiyon metodu ve direk basınç metodu gibi yöntemlerle bilyaları hava jetine alır ve bir nozul yardımıyla iş parçasına fırlatırlar (Design S. F. ve Evaluation Committee - 1991).

4.2.2.1.1 Sifon İndüksiyon Metodu. Bu yöntemde hava bir nozulda genişletilir. Aynı zamanda bilyanın nozula giriş kısmında vakum oluşur ve bilyalar hava jeti içine çekilir ve ivmelendirilir. Şekil 4.8’de gösterilen bu tip makinalar en basit bilyalı dövme makinalarıdır ve genellikle az miktarda ve küçük boyutta iş parçalarının düşük dövme şiddetlerinde dövülmesi amacıyla kullanılır (Design S. F. ve Evaluation Committee - 1991).



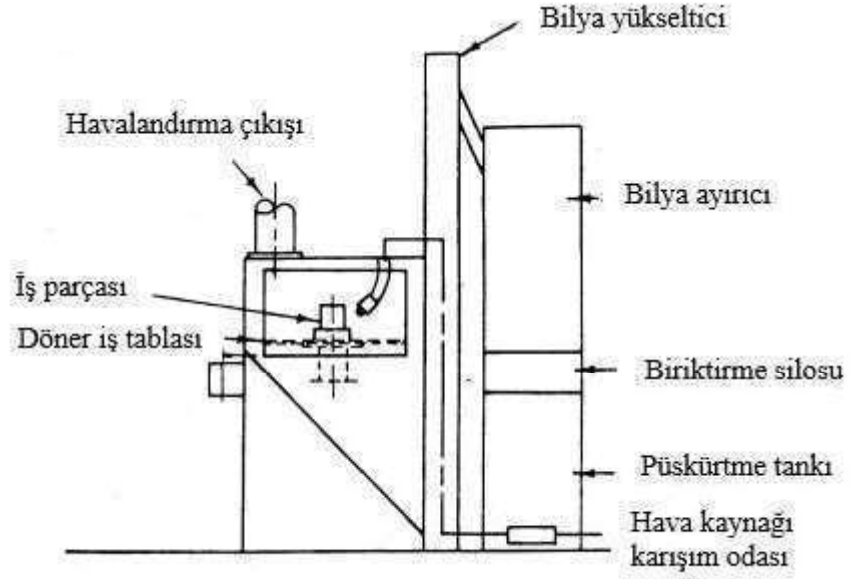
Şekil 4.8 Sifon indüksiyon metodu ile bilyalı dövme işlemi (Design S. F. ve Evaluation Committee - 1991)

4.2.2.1.2 Yerçekimi İndüksiyon Makinası. Bu tip makinalarda bilyalar kabin üzerindeki haznede depolanır ve yerçekiminin etkisiyle hava jetine alınır. Şekil 4.9'da gösterilen bu sistemde kullanılan nozul ayarlanabilir hava jetine sahiptir ve dövme şiddetinin ayarlanmasında rol oynar. Birden fazla sayıda nozul kullanılabilir ve bu sayede fazla sayıda dövme işlemi yapılabilir. Nozul ile bilya debisi, çarpma hızı gibi parametreler bilgisayar kontrolüne uygun olduğu için değişik geometrideki parçaların dövülebilmesine olanak sağlar (Design S. F. ve Evaluation Committee - 1991).



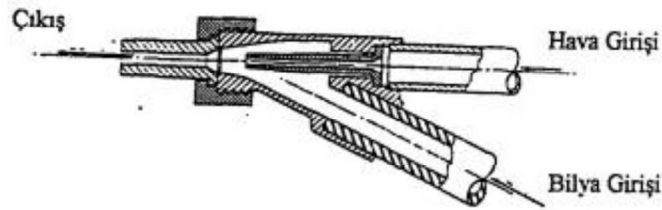
Şekil 4.9 Yerçekimi indüksiyon makinası ile bilyalı dövme işlemi (Design S. F. ve Evaluation Committee - 1991)

4.2.2.1.3 Direkt Basınç Makinaları. Bu tür makinalarda bilyalar, nozuldaki fırlatma basıncına sahip bir tüp içerisinde tutulur. Bu tüp içerisindeki karıştırıcıda karıştırılan bilyalar nozula verilir ve buradan da iş parçasına püskürtülür. Gösterimi Şekil 4.10'da verilen bu sistem genellikle yüksek dövme şiddeti gerektiren uygulamalarda kullanılır (Design S. F. ve Evaluation Committee - 1991).



Şekil 4.10 Direkt basınç makinası ile bilyalı dövme işlemi (Design S. F. ve Evaluation Committee - 1991)

Bahsedilen her üç yöntemde de bilyalar Şeki 4.11’de gösterilen bir nozul vasıtasıyla iş parçasına püskürtülür ve nozulun sahip olduğu çap 6 mm ile 9 mm arasında değişebilmektedir. Bu çapın boyutu akış hacmi, istenilen dövme şiddeti ve dövülecek alanın büyüklüğü gibi etkenlere bağlı olarak belirlenir.

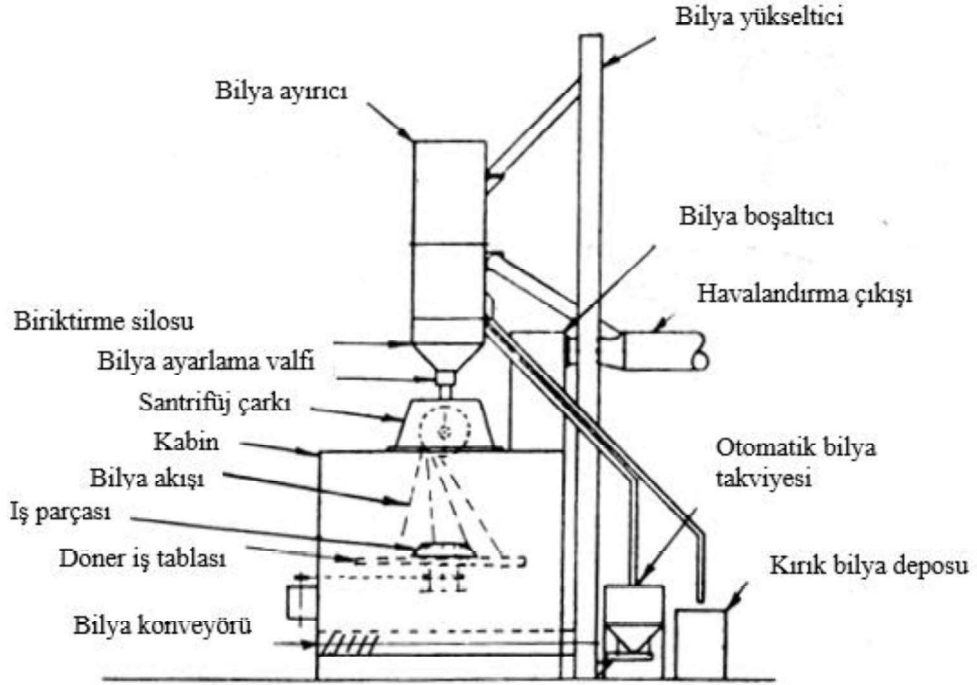


Şekil 4.11 Bilyalı dövme işleminde kullanılan nozul (Akyıldız, 1998)

4.2.2.2 Santrifüj Bilyalı Dövme Makinaları

Bu tür makinalarda Şekil 4.12’de de gösterildiği gibi bilyalar kendi ağırlığı ile veya düşük bir hızda üzerinde kanatlar bulunan döner bir çarkın merkezine bırakılır ve buradan da kanatlara yönlendirilir. Döner durumdaki çarkın kanatlarına

yönlendirilen bilyalar merkezkaç kuvvetinin etkisiyle özellikle düz şekle sahip iş parçasına fırlatılır (Akyıldız, 1998).



Şekil 4.12 Santrifüj bilyalı dövme makinası ile bilyalı dövme işlemi (Design S. F. ve Evaluation Committee - 1991)

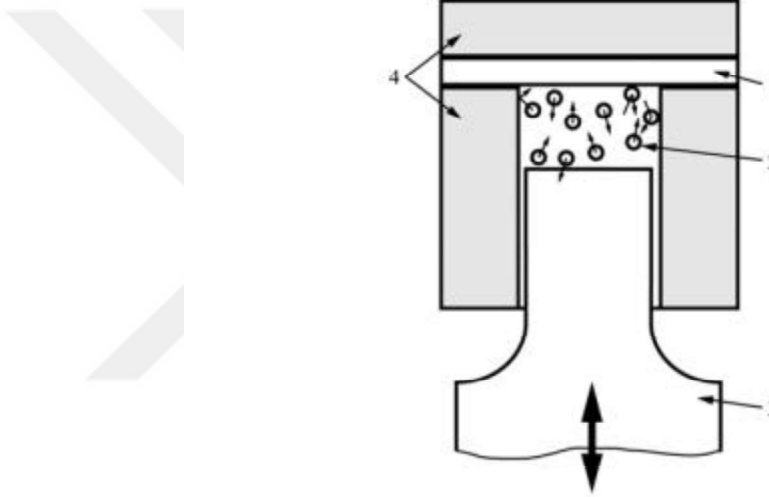
Metal matrisli kompozitlerin içyapısında döküm ve kaynaklı imalat gibi üretim yöntemleri sonucu meydana gelen zararlı çeki gerilmeleri bu malzemelerin kullanımına doğrudan etki eden bir faktördür. Bu özelliklerin iyileştirilmesi için de hem çeki gerilmelerinin giderilmesi hem de yararlı bası gerilmesi oluşturmayı amaçlayan plastik deformasyon mekanizmasını kullanan bilyalı dövme, pim ve bilya ile ultrasonik dövme, lazer ile dövme ve su jeti ile dövme gibi bazı yöntemler geliştirilmiş, böylece bu malzemelerin kullanım ömrü iyileştirilmeye çalışılmıştır.

4.2.3 Ultrasonik Bilyalı Dövme Yöntemi

Ultrasonik bilyalı dövme yöntemi bilyaların işlem yüzeyine gönderilme yöntemi açısından klasik bilyalı dövme yönteminden ayrılmaktadır. Klasik bilyalı dövme yönteminde bilyalar yüzeye pnömatik veya santrifüj gibi yöntemlerle gönderilirken

ultrasonik bilyalı dövme yönteminde titreşim yapan bir gövde tarafından gönderilir. Kullanılan titreşimin frekansı da ses üstü (18 kHz üzeri) frekans aralığında olduğu için ultrasonik bilyalı dövme yöntemi adını almıştır.

Ultrasonik dövme yöntemi ekipmanları Şekil 4.13’de görüldüğü üzere ultrasonik titreşim jeneratörü, bu titreşimleri mekanik harekete çeviren transdüser ve bilyaları yüzeye gönderen metal bir çubuktan oluşmaktadır. Bilyalar bu metal çubuk ile iş parçası arasında kapatılır ve işlem gerçekleştirilir (Rakita, Wang, Han, Liu ve Yin, 2013).



Şekil 4.13 Ultrasonik bilyalı dövme ekipmanları: (1) iş parçası, (2) bilyalar, (3) gövde, (4) transdüserle bağlı anten ve ultrasonik sinyal üretici (Rakita, Wang, Han, Liu ve Yin, 2013)

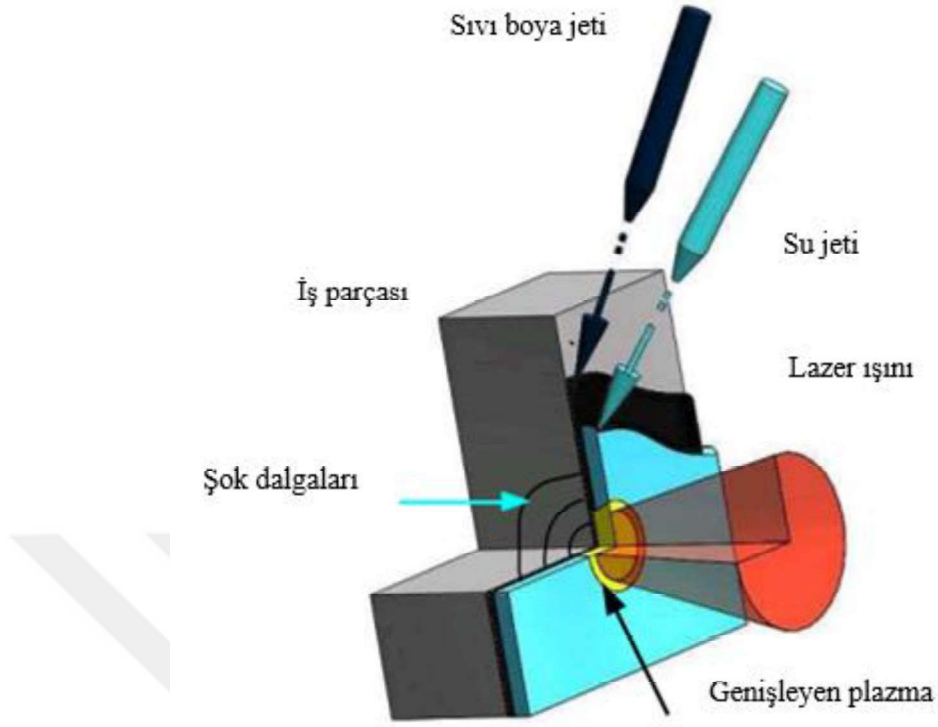
4.2.4 Lazer Dövme Yöntemi

Lazer dövme yöntemi; lazerlerin şok dalgası üretebilme özelliğini kullanarak, metalik parçalarda artık gerilme oluşturmak amacıyla kullanılan bir yüzey iyileştirme yöntemidir. Bu yöntemin kullanılabilirliği ilk olarak 1960’lardan öncesine, Battelle Laboratuvarları’nda (Columbus, Ohio) yapılan çalışmalara dayanmaktadır. İlk olarak havacılıkta kullanılan bağlantıların yorulma dayanımının iyileştirilmesinden sonra yapılan çalışmalarla birlikte lazer dövme yöntemi klasik bilyalı dövme yöntemine alternatif olmuştur.

Klasik yüzey iyileştirme yöntemlerine kıyasla lazer dövme yöntemi daha az soğuk iş miktarı ile daha derin artık bası gerilmelerinin oluşturulmasıyla öne çıkan lazer dövme yöntemi temassız çalışması, bilyalı dövme yöntemine oranla daha iyi yüzey elde edilmesi, parametrelerin hassas kontrol edilebilirliği ve karmaşık şekillerin dövülebilirliği gibi özelliklere de sahiptir.

Lazer dövme yönteminde işlem yapılacak yüzey iki çeşit kaplama kullanılarak kaplanır. Bu kaplamalardan ilk opak tabaka olarak bilinen geçirimsiz tabakadır ve doğrudan parça üzerine yerleştirilir. Diğeri de suyun da kullanıldığı saydam tabaka olarak bilinen geçirimli tabakadır. Yüksek sıcaklığa sahip lazer ile malzemenin doğrudan temas etmesi ince ergimiş bir tabaka oluşmasına sebebiyet verir. Bu nedenle malzeme yüksek sıcaklığın meydana getireceği termal etkiden korunmak için opak tabakayla kaplanır. Saydam tabaka kullanılmadığı durumda opak tabakaya temas sonucu oluşan buharlaşma ve plazma malzeme üzerinde serbestçe genişler ve bu durum da lazer enerjisinin verimsiz bir şekilde şok basıncına dönüştürülmesine sebebiyet verir.

İşlemden Şekil 4.14’de gösterildiği gibi lazer ışını yüzeye gönderildikten sonra saydam tabakadan geçer ve opak tabakayı ısıtıp buharlaştırır. Opak tabaka yüzeyde yüksek sıcaklığa sahip hızlıca genişleyen plazmayı oluşturur ve bu plazma çok yüksek değerlerde plazma gaz basıncının oluşmasına sebep olur. Yüksek basınca sahip gaz da yüzeyde şok dalgası yaratır. Oluşan şok dalgasının büyüklüğü malzemenin akma dayanımından yüksek olması durumunda da plastik deformasyon meydana gelir ve bu dalganın büyüklüğü akma gerilmesinin altına düşene kadar malzeme içerisinde ilerleyerek artık bası gerilmelerinin oluşumu ile deformasyon sertleşmesi meydana getirir (Singh 2009).

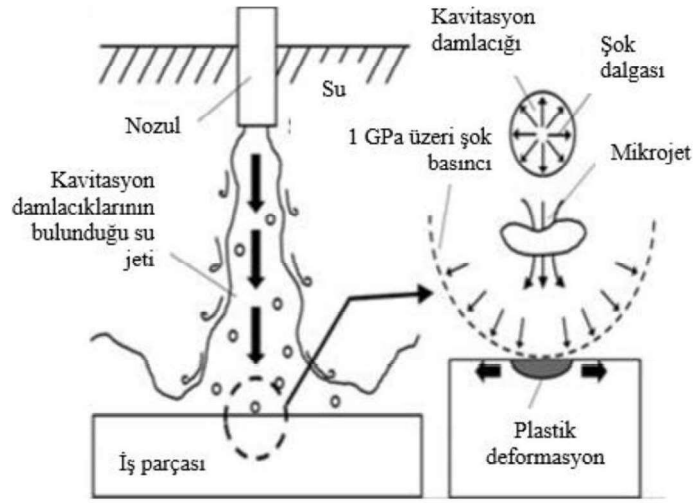


Şekil 4.14 Lazer dövme yöntemi (Singh, 2009)

4.2.5 Su Jeti ile Dövme Yöntemi

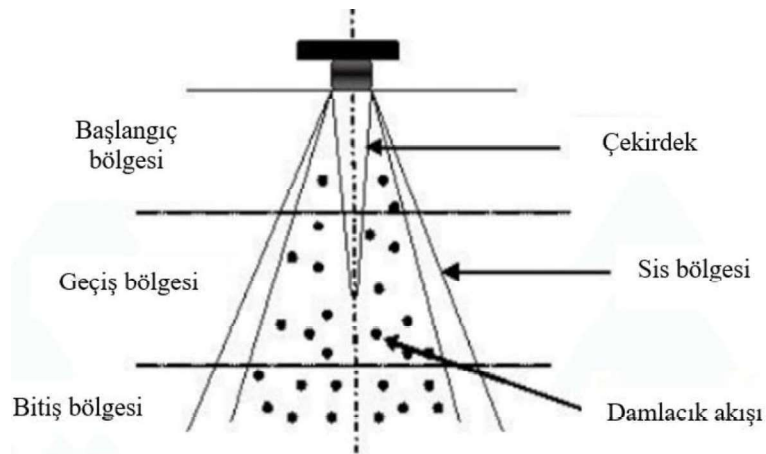
Su jeti ile dövme yöntemi, su jetinin yüksek hızlı darbelerini kullanan bir yöntemdir. Bu darbeler vasıtasıyla yüzeyde meydana gelen plastik deformasyon ile iş parçasında kalıcı bası gerilmeleri yaratılır ve bu sayede malzemelerin sertliğinin ve yorulma dayanımlarının iyileştirilmesi amaçlanır.

Su jeti ile dövme yönteminde işlem Şekil 4.15’de ve Şekil 4.16’da gösterildiği gibi nozul tarafından gönderilen yüksek basınçlı su ve su damlacıklarının yüzeye uyguladığı darbeler ile gerçekleşir. Bu yüksek basınçlı darbeler kavitasyon oluşmasını sağlar ve bu kavitasyonlar da yoğun basınç dalgaları üretir. Üretilen bu basınç dalgalarının akma dayanımının üzerinde olmasıyla da yüzeyde plastik deformasyon meydana gelir.



Şekil 4.15 Su jeti ile dövme yöntemi şematik gösterimi (Srivastava, Tripathi, Hloch, Chattopadhyaya ve Dixit, 2016)

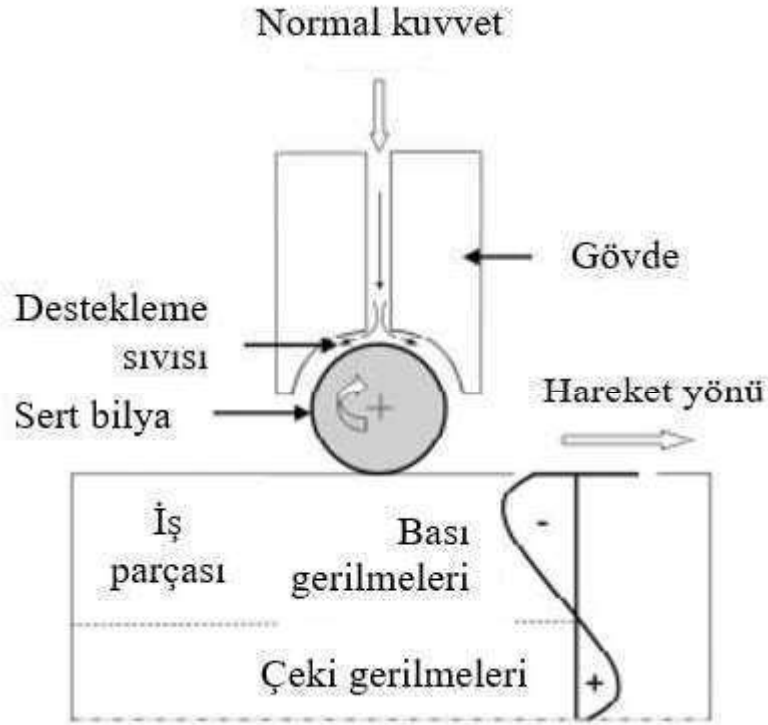
Bu deformasyonun oluşması işlemde kullanılan su damlacıkları ile doğrudan ilişkilidir. Nozul çıkışında gerçekleşen süreçleri olduğu gibi başlangıç, geçiş ve bitiş bölgeleri olarak üç kısımda incelenebilir. Başlangıç bölgesinde jet sabit bir basınçla üretilir ve bu değer malzemenin akma değerinin altındadır. Bu bölgede iş parçası üzerinde çalışmak plastik deformasyon meydana gelmesi için yetersizdir. Geçiş bölgesinde ise su damlacıklarının darbeleri plastik deformasyon meydana getirebilir. Bitiş kısmında ise bu damlacıkları daha geniş bir alana saçılırlar ve bu durumda işlem için uygun olmayan bir kısımdır (Srivastava, Tripathi, Hloch, Chattopadhyaya ve Dixit, 2016).



Şekil 4.16 Su jeti bölgeleri (Srivastava, Tripathi, Hloch, Chattopadhyaya ve Dixit, 2016)

4.2.6 Düşük Plastisiteli Ezme Yöntemi

Düşük plastisiteli ezme yöntemi deformasyon sertleşmesi ile bası gerilmeleri meydana getirmek üzerine normal kuvvet uygulanan bir bilyanın kullanıldığı bir yöntemdir. Termal yüklemelerde veya tekrarlı yüklemelerde kullanılan soğuk iş miktarının artmasıyla gerilim giderme miktarı artabilir. Soğuk iş miktarının daha da artması ise malzemenin daha kırılgan hale gelmesine ve yorulma dayanımının azalmasına sebebiyet verebilir. Bu yöntemde klasik bilyalı dövme yöntemine kıyasla daha az soğuk iş miktarı ile bası gerilmeleri yaratılır. Böylece faydalı bası gerilmelerinin kaybolmasının önüne geçilmeye çalışılırken aynı zamanda daha pürüzsüz bir yüzey elde edilir (Maawad, 2013; Mohammadi, Sedaghati ve Bonakdar, 2014). Yöntemde Şekil 4.17’de gösterildiği gibi hidrolik yağ bir güç kaynağı ve soğutucu görevi yaparken seramik bilya iş parçası yüzeyine kuvvet uygular. Hidrolik yağ basıncıyla birlikte iş parçası yüzeyinde plastik deformasyon meydana gelir (Yuan, Sun, Li ve Liu, 2017).



Şekil 4.17 Düşük plastisiteli ezme yöntemi şematik gösterimi (Maawad, 2013)

BÖLÜM BEŞ

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda matris malzemesi olarak kütlece kimyasal bileşimi Tablo 5.1’de verilen A356 alüminyum alaşımı kullanılmış ve farklı miktarlarda SiC partiküller ile takviyelendirilmiştir. Kompozit malzemeler kütlece %5, %10, %15 ve %20 oranında SiC içerecek şekilde üretilmiş olup kullanılan SiC partiküllerin boyutu 45 μm ’dir.

Tablo 5.1 A356 kütlece kimyasal bileşimi (%wt)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
6,5-7,5	0,2	0,2	0,1	0,25-0,45	0,1	0,1	Kalan

Matris malzemesi pota içerisine konulduktan sonra sıcaklığının 790 dereceye ulaşması beklenmiştir. SiC partiküllerinin ıslanabilirliğinin artırılması amacıyla partiküller 450 °C’de 4 saat boyunca bekletilmiş ve ergiyik içerisine kütlece %2 oranında Mg ilavesi yapılmıştır. SiC partiküller alüminyum folyo içerisinde ergiyik içerisine ilave edildikten sonra 5 dakika boyunca matkap ile karıştırılmıştır. Deneylerde kullanılan sistem ve karıştırıcı çubuk Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Döküm işlemlerinde kullanılan sistem (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 5.2 Deneylerde kullanılan karıştırıcı çubuk (Kişisel arşiv, 2018)

Karıştırıcı çubuk tasarımında SiC partiküllerinin alüminyuma kıyasla yüksek olan yoğunluğu göz önünde bulundurulmuştur. Karıştırma sırasında SiC partiküllerinin yoğunluk farkından dolayı pota içerisinde çökmesinin önüne geçilebilmesi için karıştırıcı çubuğun kanat kısımları partikülleri yukarı taşıyacak şekilde eğimli üretilmiştir. Karıştırma işlemi 900 devir/dakika karıştırma hızı ile yapılmış ve karıştırıcı çubuk paslanmaz çelik malzemeden imal edilmiştir. Karıştırma işlemi sırasında karıştırıcı çubuğun yüksek sıcaklığa dayanabilmesi için karıştırıcı çubuk ZrO_2 ile kaplanmıştır. Ergitme ve karıştırma işlemleri boyunca koruyucu atmosfer oluşturabilmek amacıyla pota üzerine 15 litre/dakika debide argon gazı verilmiştir. Döküm işlemi hızlı katılaşma sonucu meydana gelebilecek iç gerilmelerin ve çatlakların önüne geçilebilmesi için 450 °C sıcaklıktaki kalıba yapılmıştır. Şekil 5.3’de gösterilen kalıp içerisine yapılan döküm sonrası katılaşma kalıp içerisinde oda sıcaklığında gerçekleşmiştir.



Şekil 5.3 Deneylerde kullanılan döküm kalıbı (Kişisel arşiv, 2018)

Döküm işleminden sonra plastik deformasyonun etkilerinin incelenebilmesi amacıyla “Ultrasonik Dövme” ve “Bilyalı Dövme” yöntemlerinden faydalanılmıştır. 150x20x3,5 mm ölçülere sahip numunelerin 150x20 mm ölçülere sahip her iki yüzeyi ultrasonik dövme işlemi ile 6 dakika boyunca deforme edilirken aynı yüzeyler bilyalı dövme işlemi ile 90 saniye boyunca deforme edilmiştir.

Ultrasonik dövme işlemi Sunbow HJ-III model cihaz kullanılarak yapılmış ve işlemler 17,48 kHz frekans ve 25,6 μ m genlik altında yapılmıştır. Kullanılan pim çapı ise 5 mm’dir.

Bilyalı dövme işlemi ise Şekil 5.4’de gösterilen santrifüj bilyalı dövme cihazı kullanılarak yapılmıştır. İşlemde Şekil 5.5’de 40-50 HRC sertliğe sahip düşük karbonlu çelik bilyalar kullanılmıştır. Dövme işlemi 0.711 mm nominal çapa sahip

S280 ve 0.838 mm nominal çapa sahip S330 bilyalar %50 oranda karıştırılarak yapılmış ve numune yüzeylerine 90 derece açıyla gönderilmiştir.



Şekil 5.4 Bilyalı dövme işleminde kullanılan santrifüj bilyalı dövme makinası (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 5.5 Deneylerde kullanılan bilyalar (Kişisel arşiv, 2018)

BÖLÜM ALTI

BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Döküm işlemi sonrasında elde edilen kompozit yapılar Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Elde edilen bu yapılardan çıkarılan 150x20x3,5 mm boyutundaki numuneler ultrasonik dövme işlemi ve bilyalı dövme işlemlerine tabii tutulmuştur.



Şekil 6.1 Döküm sonrası elde edilen numuneler (Kişisel Arşiv, 2018)

6.1 Döküm İşlemi Sonrası Porozitenin İncelenmesi

Numunelerin üretim sonrasında sahip olmaları gereken teorik yoğunluk hesaplanmış ve sahip oldukları deneysel yoğunluğa formülde gösterildiği gibi oranlanarak içerdikleri porozite miktarları hesaplanmıştır. Hesaplanan porozite değerleri Tablo 6.1’de verilmiştir.

$$\text{Teorik Yoğunluk} = \frac{\%Kütle_{A356} \times \rho_{A356} + \%Kütle_{SiC} \times \rho_{SiC}}{100} \quad (6.1)$$

$$\text{Porozite} = \left(1 - \frac{\rho_{Deneysel}}{\rho_{Teorik}} \right) \times 100\% \quad (6.2)$$

$$\%5 \text{ SiC için teorik yoğunluk} = \frac{0,95 \times 2,67 + 0,05 \times 3,21}{100} = 2,697$$

$$\%10 \text{ SiC için teorik yoğunluk} = \frac{0,90 \times 2,67 + 0,10 \times 3,21}{100} = 2,724$$

$$\%15 \text{ SiC için teorik yoğunluk} = \frac{0,85 \times 2,67 + 0,15 \times 3,21}{100} = 2,751$$

$$\%20 \text{ SiC için teorik yoğunluk} = \frac{0,80 \times 2,67 + 0,20 \times 3,21}{100} = 2,778$$

Tablo 6.1 Numunelerin içerdikleri porozite miktarları

SiC Oranı	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	Deneyisel Yoğunluk (g/cm ³)	Porozite (%)
%0	2,67	2,64	%1,12
%5	2,697	2,654	%1,59
%10	2,724	2,61	%4,19
%15	2,751	2,504	%8,98
%20	2,778	2,48	%10,14

Numunelerin içerdikleri porozite miktarları incelendiğinde yapıdaki SiC takviye oranının artmasıyla porozite miktarının da arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun sebebi olarak Soltani ve arkadaşlarının çalışmasına benzer şekilde SiC partiküllerinin ergiyik metale ilavesi sırasında partikülleri çevreleyen havanın da ergiyik metale karıştığı söylenebilir. Partikül oranının artmasıyla da ergiyik içerisine karışan havanın artması porozite oluşumunu attırdığı düşünülmektedir (Soltani ve diğer., 2017.)

6.2 Dövme İşlemleri Sonucunda Oluşan Yüzey Pürüzlülüklerinin İncelenmesi

Ultrasonik dövme yöntemi ve bilyalı dövme yöntemi uygulandıktan sonra numune yüzeylerinde oluşan yapı Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9, Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de gösterilmiştir. Kullanılan yöntemlerde kuvvet uygulayan pim ve bilyalar yüzey tabakasında plastik deformasyon ve plastik akış ile çok sayıda girintilerin oluşmasına sebep olmuştur. Yüzey morfolojisi incelendiğinde bilyalı dövme işlemi ile oluşan yüzeyin ultrasonik dövme işlemi ile oluşan yüzeyden daha pürüzlü olduğu görülmektedir.



Şekil 6.2 SiC takviyesi içermeyen numunenin bilyalı dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi



Şekil 6.3 SiC takviyesi içermeyen numunenin ultrasonik dövme işlemi sonucu meydana gelen yüzeyi



Şekil 6.4 %5 oranında SiC takviyesi içeren numunenin bilyalı dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi



Şekil 6.5 %5 oranında SiC içeren numunenin ultrasonik dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi



Şekil 6.6 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunenin bilyalı dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi



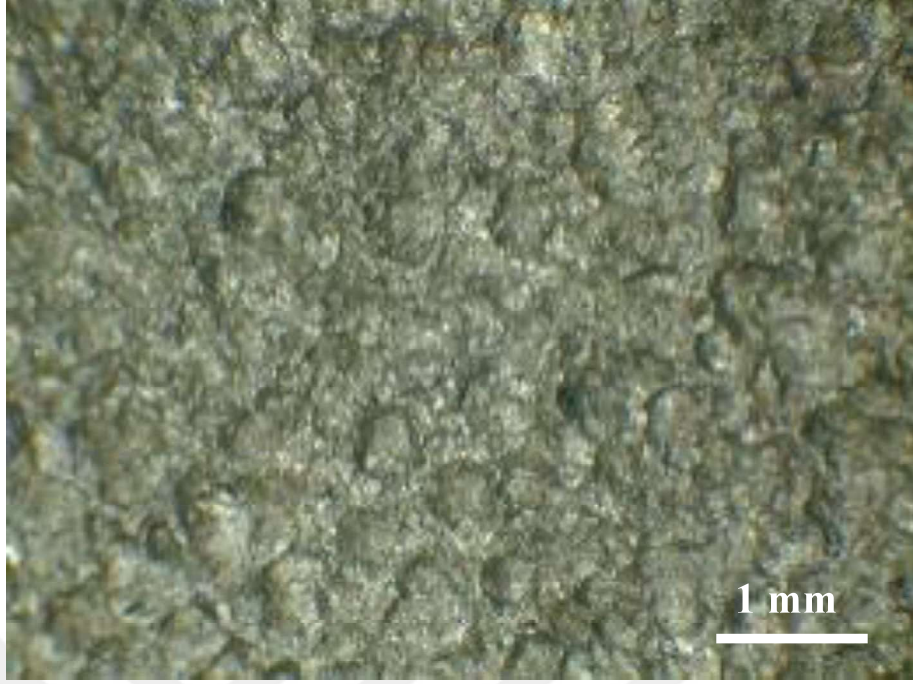
Şekil 6.7 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunenin ultrasonik dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi



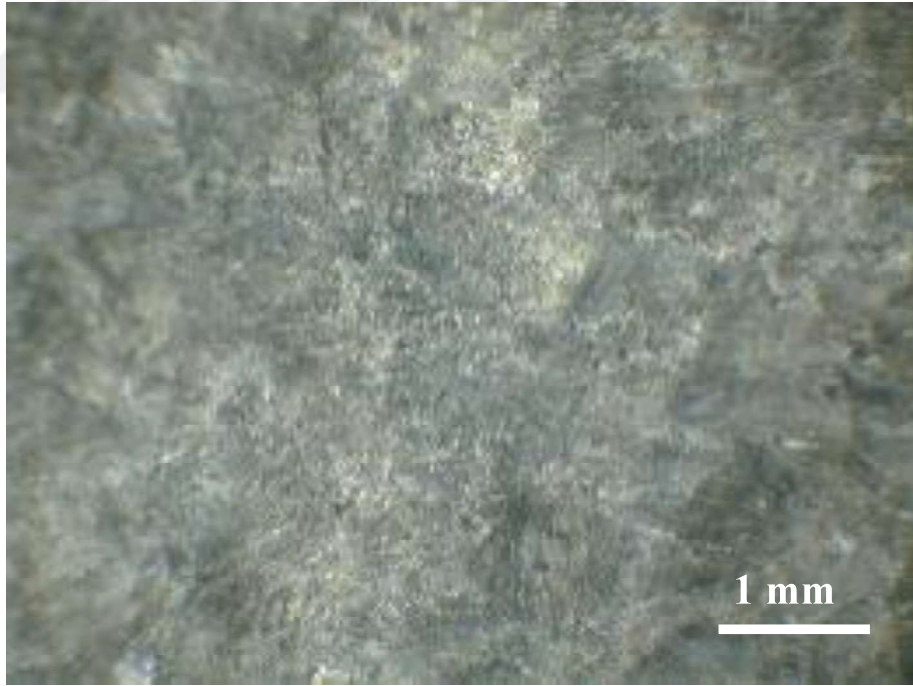
Şekil 6.8 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunenin bilyalı dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi



Şekil 6.9 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunenin ultrasonik dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi



Şekil 6.10 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunenin bilyalı dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi



Şekil 6.11 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunenin ultrasonik dövme işlemi sonrasında meydana gelen yüzeyi

Dövme işlemlerinden sonra numune yüzeylerinde meydana gelen pürüzlülük değerleri, Mitutoya SJ-210 model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile her numuneden 10'ar adet ölçüm alınarak yapılmıştır. Ortalama pürüzlülük değeri (Ra) ve en yüksek pik ile en düşük çukur arasındaki ortalama mesafe değeri (Rz) ölçülmüş ve 10 adet ölçümün ortalaması Tablo 6.2'de gösterilmiştir. Dövme işlemleri öncesi numunelerin ortalama pürüzlülük değerleri Ra için 8,209 μm ve Rz için 55,399 μm olarak ölçülmüştür. Dövme işlemleri sonrasında elde edilen değerler incelendiğinde bilyalı dövme işlemi ile elde edilen yüzeylerin ultrasonik dövme işlemi ile elde edilen yüzeylere kıyasla daha pürüzlü olduğu görülmektedir. Bilyalı dövme işleminde kullanılan bilyaların daha yüksek darbe enerjisiyle yüzeye çarpması daha yüksek deformasyonun meydana gelmesine sebep olmuştur. En yüksek pürüzlülük değerleri ise yapıda SiC bulunmayan numunelerde ölçülmüştür. Pürüzlülük değerlerinin de ayrıca yapıda SiC miktarı arttıkça azaldığı gözlemlenmiştir. Pürüzlülüğün SiC miktarının artmasına bağlı olarak azalması, dislokasyon hareketinin ve plastik deformasyon sonucu oluşan plastik akış mekanizmasının SiC partikülleri tarafından zorlaştırılmasından ileri gelmektedir.

Tablo 6.2 Dövme işlemleri sonucunda oluşan yüzey pürüzlülükleri

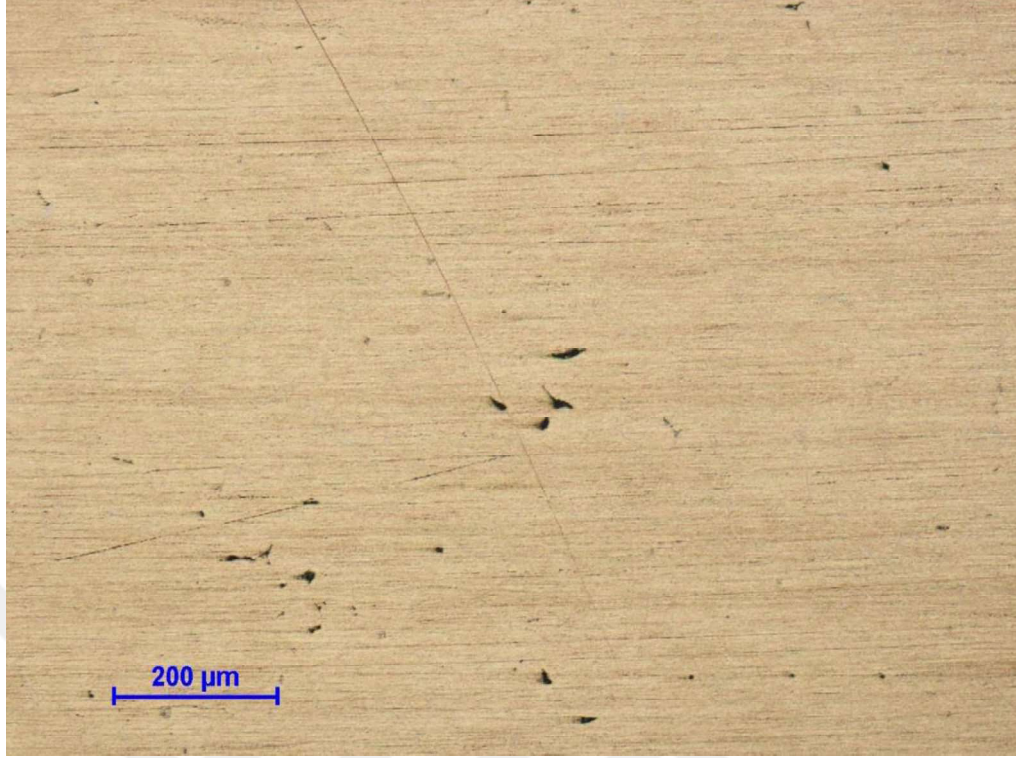
SiC Oranı	Bilyalı Dövme İşlemi ile Dövülmüş		Ultrasonik Dövme İşlemi ile Dövülmüş	
	Ra (μm)	Rz (μm)	Ra (μm)	Rz (μm)
%0	22,2925	106,3425	7,1825	37,15
%5	22,0325	107,09	7,17	36,59
%10	21,1225	106,115	6,95	33,6025
%15	19,595	99,8025	6,0875	31,19
%20	18,85	98,88	5,7925	30,31

6.3 Dövme İşlemleri Sonucunda Oluşan İçyapının İncelenmesi

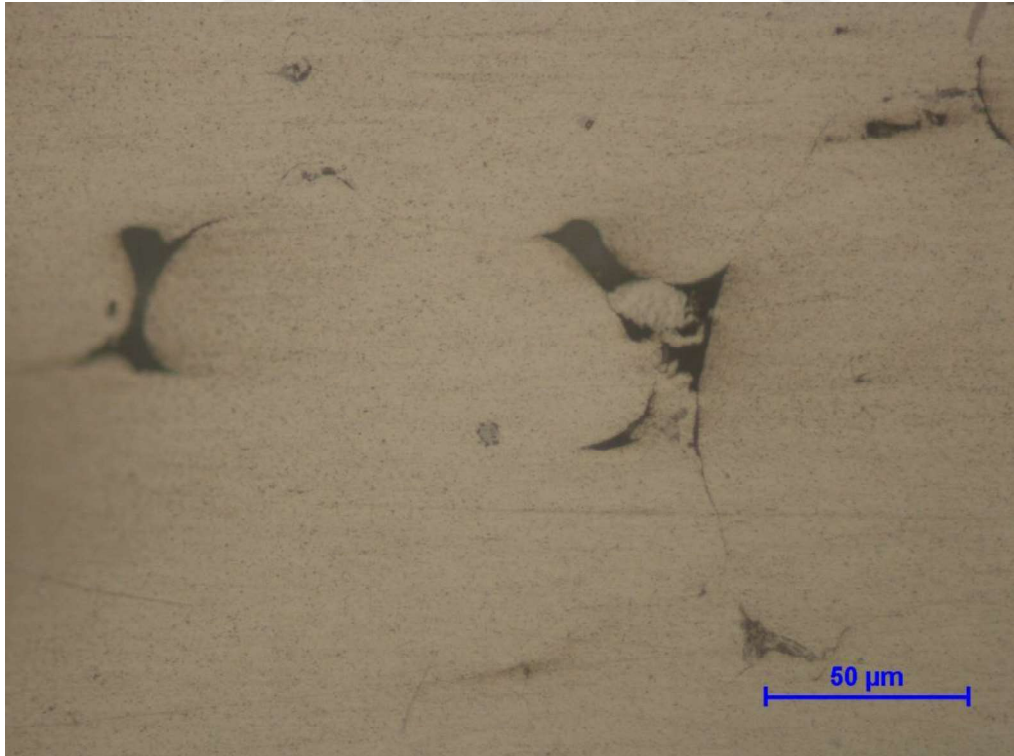
Elde edilen numunelerin mikro yapılarının ve tane yapılarının incelenmesi Nikon Epiphot 200 optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin tane yapılarının

incelenebilmesi için ise 6 ml HF, 3 ml HNO₃ ve 150 ml saf su ile hazırlanan dağlama solüsyonu kullanılmış olup numuneler 60 saniye boyunca bu solüsyon içerisinde dağlanmıştır.

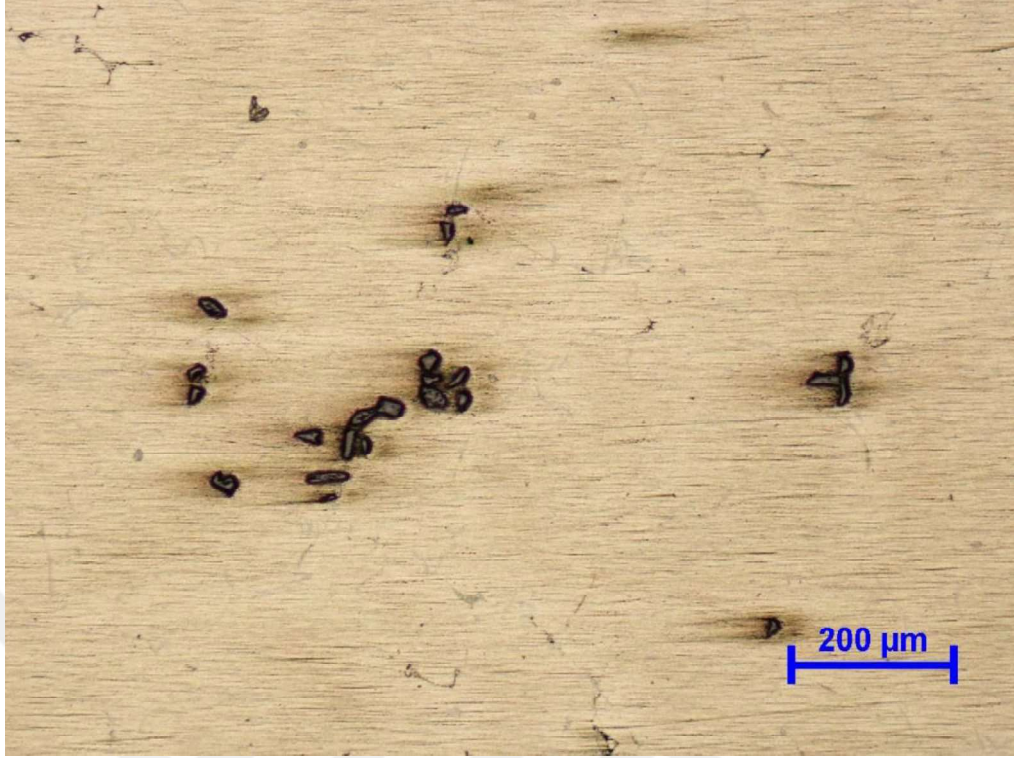
Üretilen metal matrisli kompozitlerin dağlama öncesi görüntüleri şekil 6.12, Şekil 6.13, Şekil 6.14, Şekil 6.15 ve Şekil 6.16, Şekil 6.17, Şekil 6.18, Şekil 6.19, Şekil 6.20 ve Şekil 6.21’de verilmiştir. Görüntülerde SiC takviyesi içermeyen numunede katılma sırasında oluşan hacimsel azalmalar (lunker) meydana gelirken SiC takviyesi içeren numunelerin bazı bölgelerinde SiC partiküllerin kümелendiğı ve uniform dağılmadığı, bu kısımlarda porozitelerin meydana geldiğı görülmektedir. Aynı zamanda SiC takviye oranı arttıkça kümelenme ve porozite de artmaktadır. Kompozitlerde porozite oluşumunun mekanik özelliklerde önemli azalmalara neden olduğu kabul edilmektedir. Takviye fazının sıvı metale ilavesi sırasında da porozite oluşabilmektedir. Takviye fazının yüzeyinde su buharının bulunması, partiküllerin etrafını çevreleyen havanın ergiyik içerisine karışması ve partiküllerin karıştırılması sırasında yapı içerisinde porozite meydana gelmektedir (Soltani ve diğer., 2017). Yapılan deneysel çalışmalarda partiküllerin ilavesi öncesi 4 saat boyunca 450 °C bekletilmesi ile su buharının giderilmesi ve karıştırma süresinin tüm çalışmalarda 5 dakika boyunca yapılması oluşan gözeneklerin partikülleri çevreleyen havanın partiküllerin ilavesi sırasında ergiyik metale karışması ile açıklanabilir. Ergiyik içerisine karışan bu hava da ergimiş metalin hareketine engel olmuş ve SiC partikülleri ile temasta bulunmasının önüne geçmiştir. Partikül miktarının artması da bu nedenle daha fazla porozite oluşumuna sebep olmuştur.



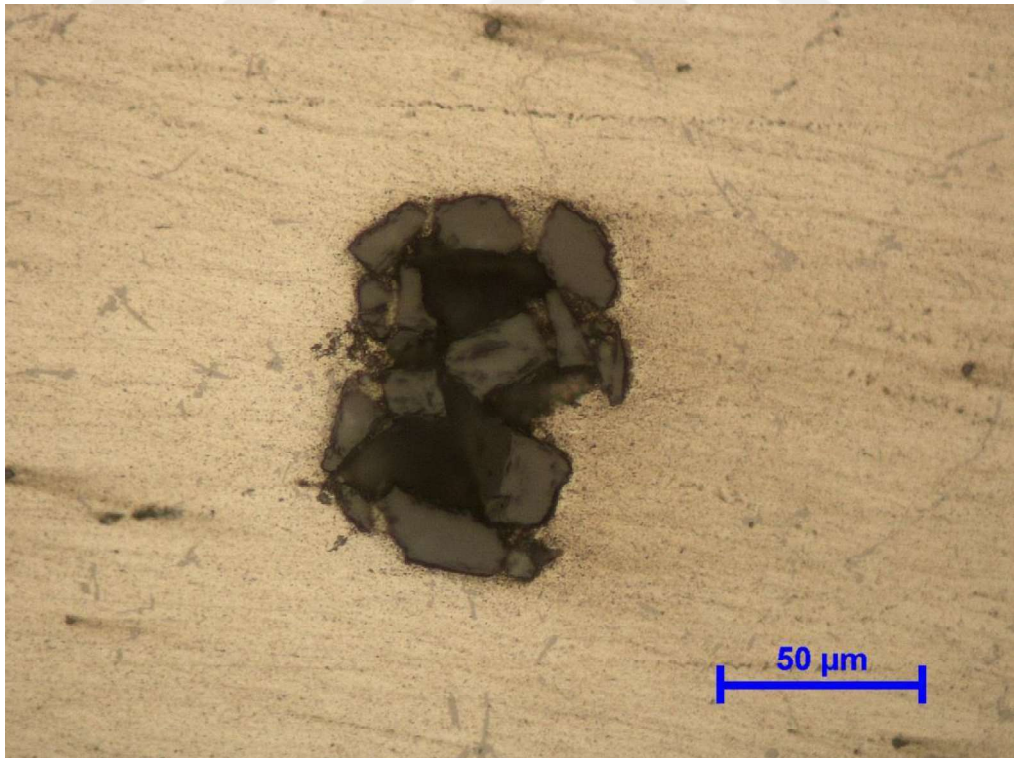
Şekil 6.12 SiC takviyesi içermeyen numunenin mikro yapı görüntüsü



Şekil 6.13 SiC takviyesi içermeyen numunede porozite oluşumu



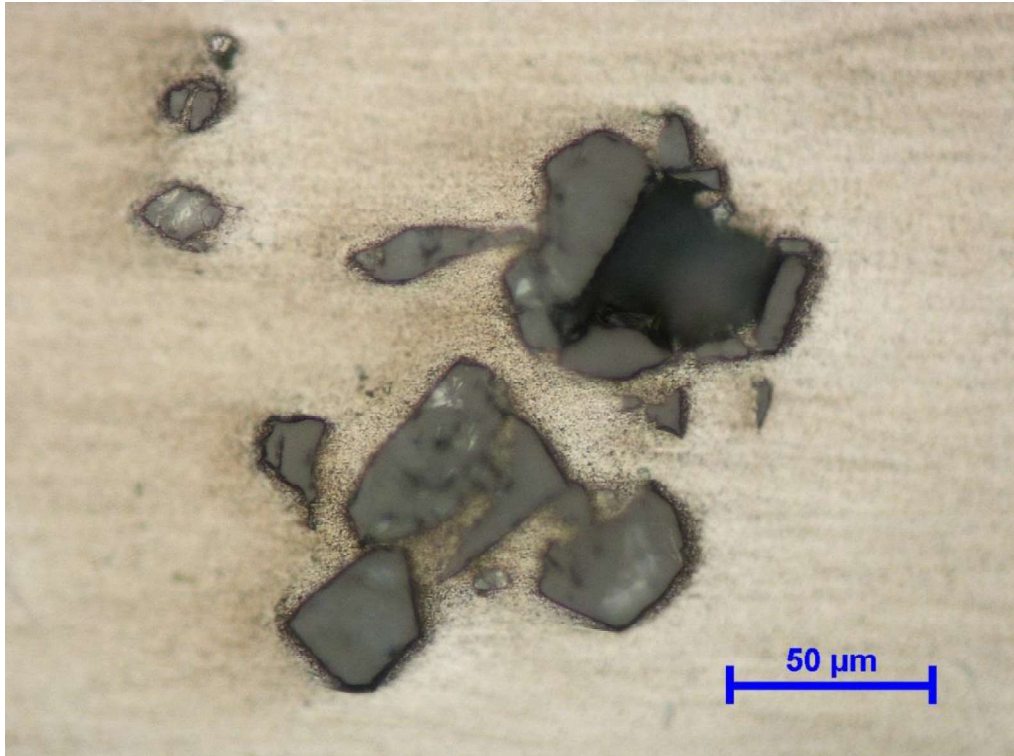
Şekil 6.14 %5 oranında SiC takviyesi içeren numunenin mikro yapı görüntüsü



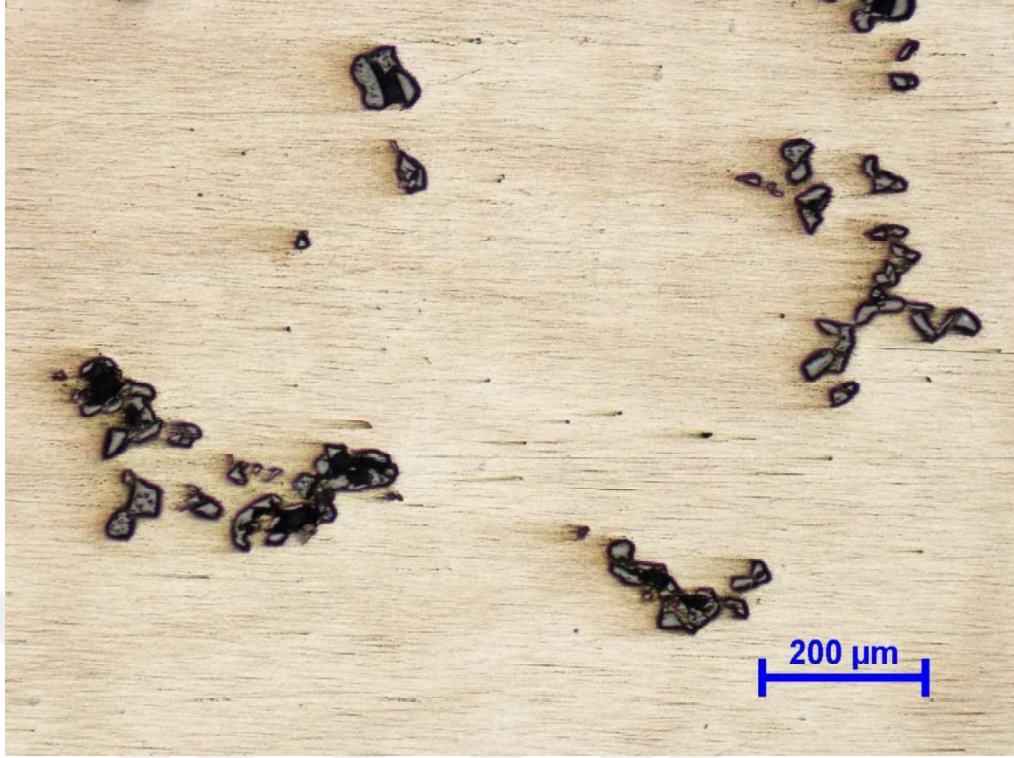
Şekil 6.15 %5 oranında SiC içeren numunede porozite oluşumu



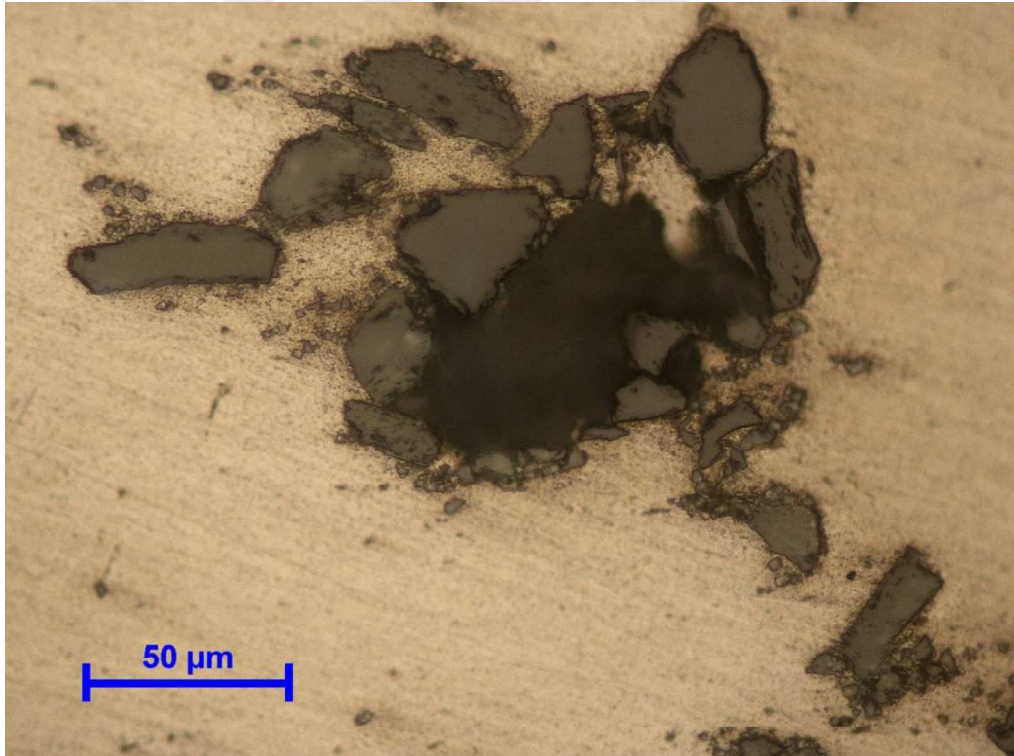
Şekil 6.16 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunenin mikro yapı görüntüsü



Şekil 6.17 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunede porozite oluşumu



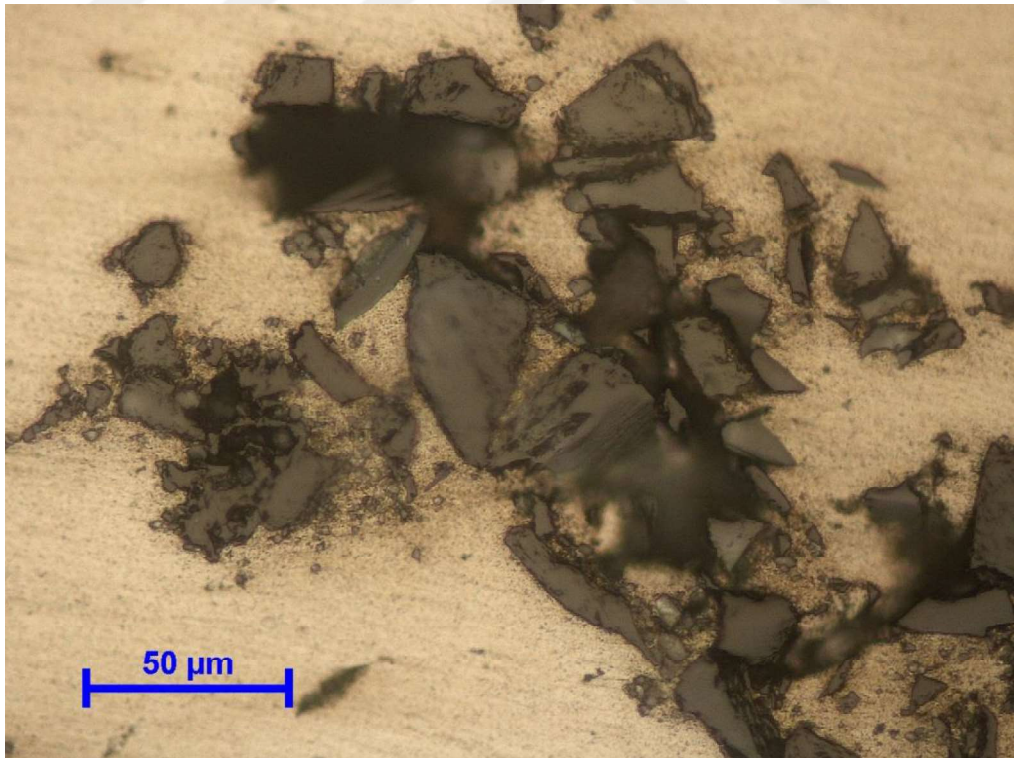
Şekil 6.18 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunenin mikro yapı görüntüsü



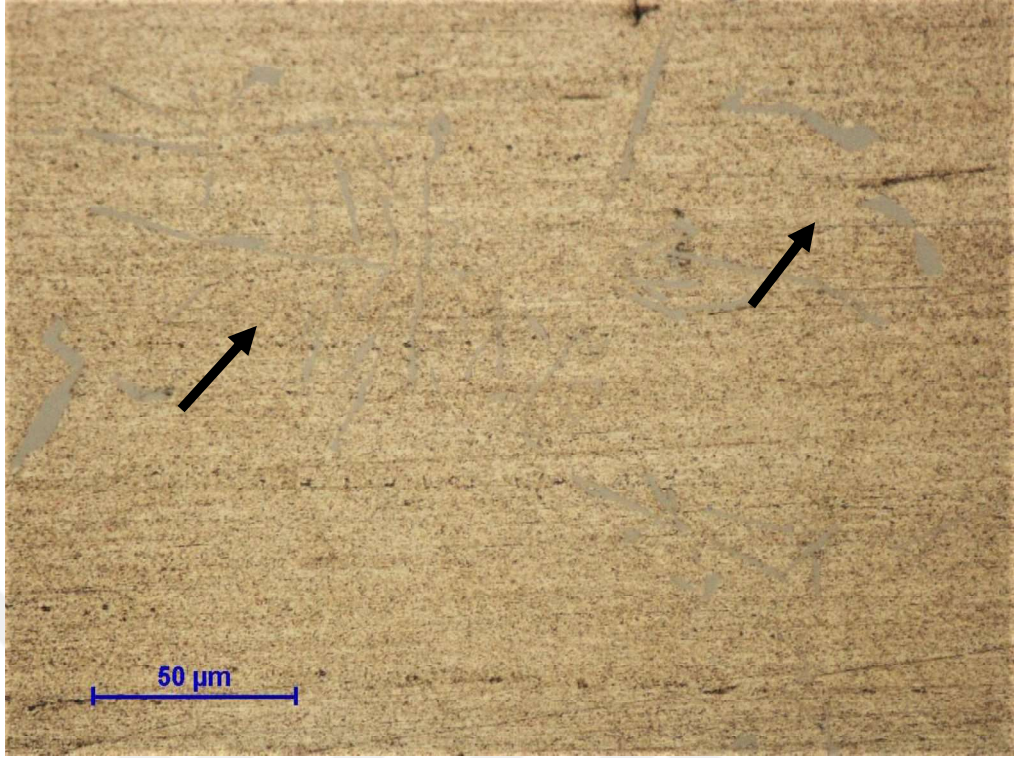
Şekil 6.19 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunede porozite oluşumu



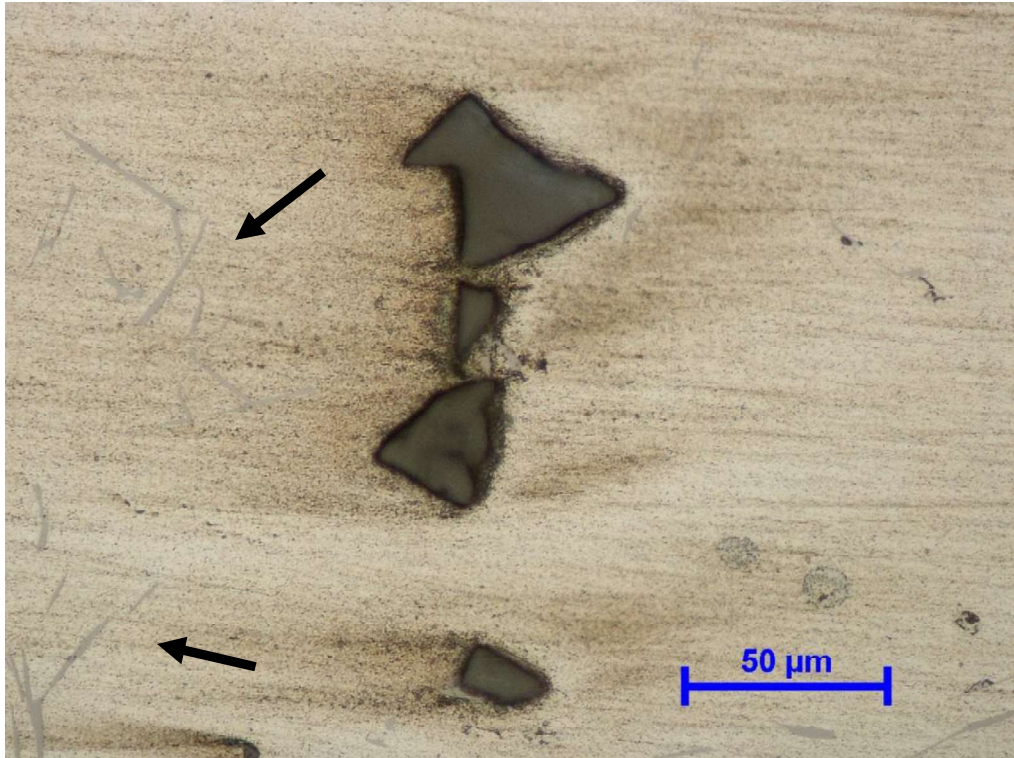
Şekil 6.20 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunenin mikro yapı görüntüsü



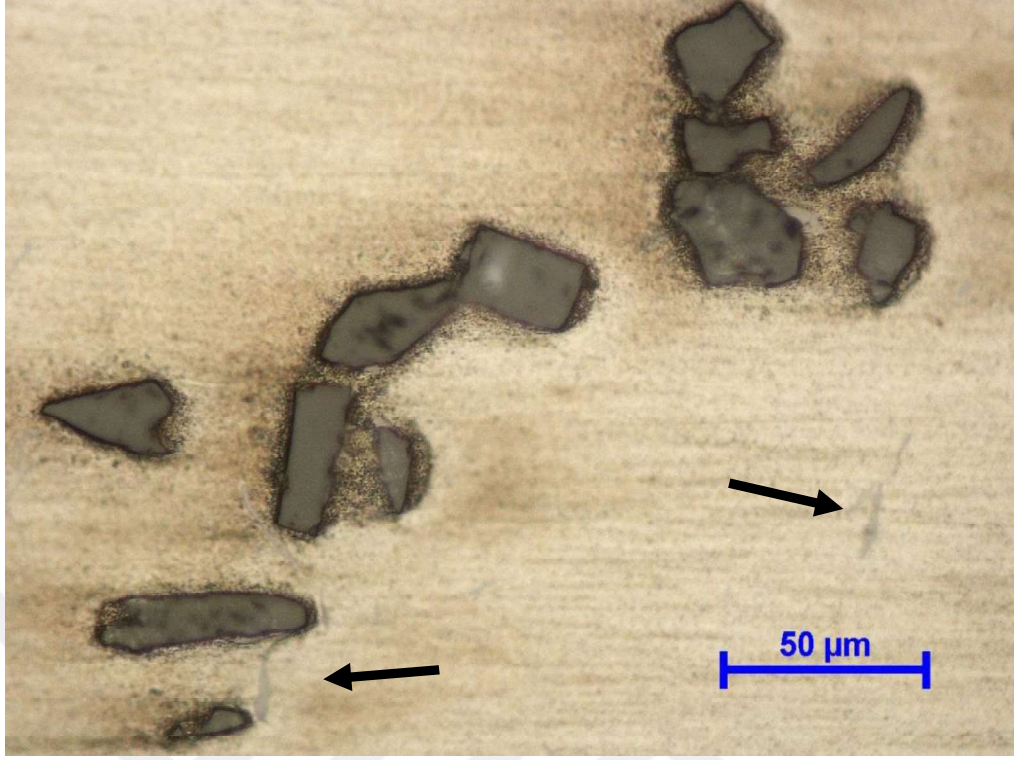
Şekil 6.21 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunede porozite oluşumu



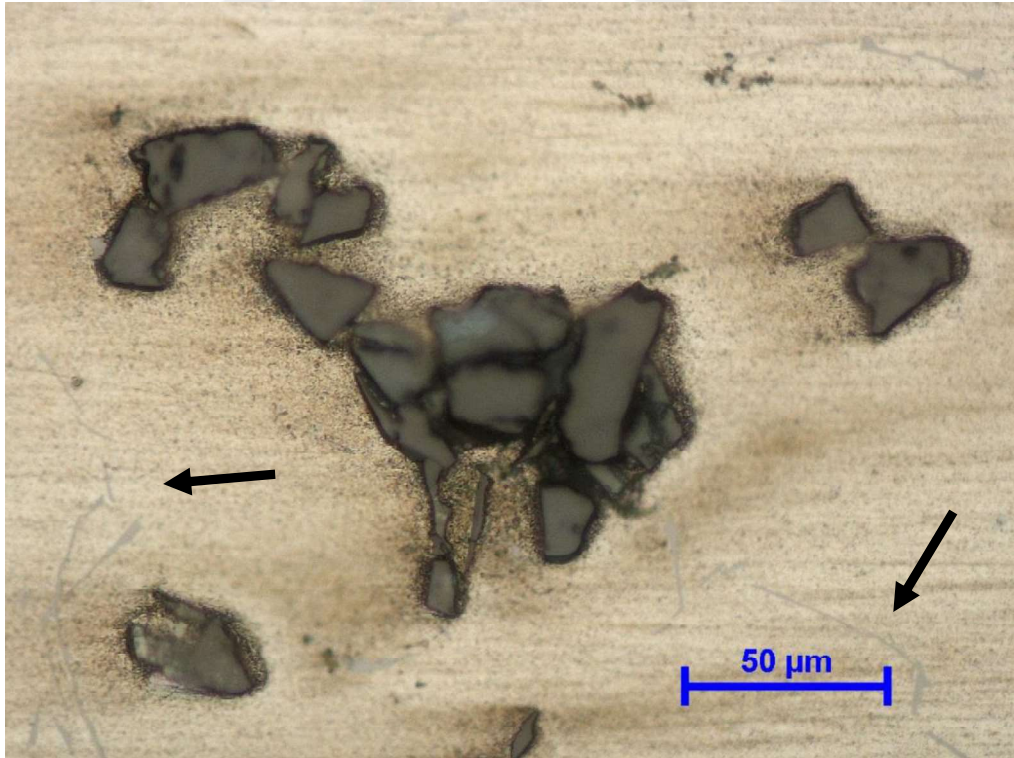
Şekil 6.23 SiC takviyesi içermeyen numunede Mg₂Si oluşumu



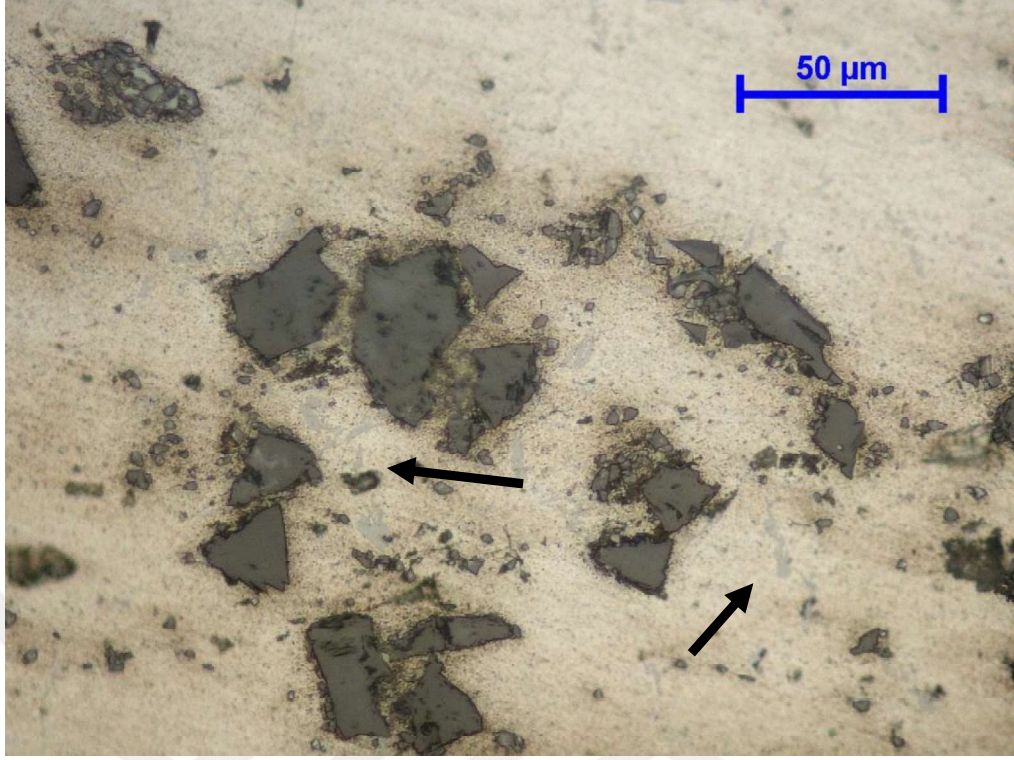
Şekil 6.24 %5 oranında SiC takviyesi içeren numunede Mg₂Si oluşumu



Şekil 6.25 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunede Mg_2Si oluşumu

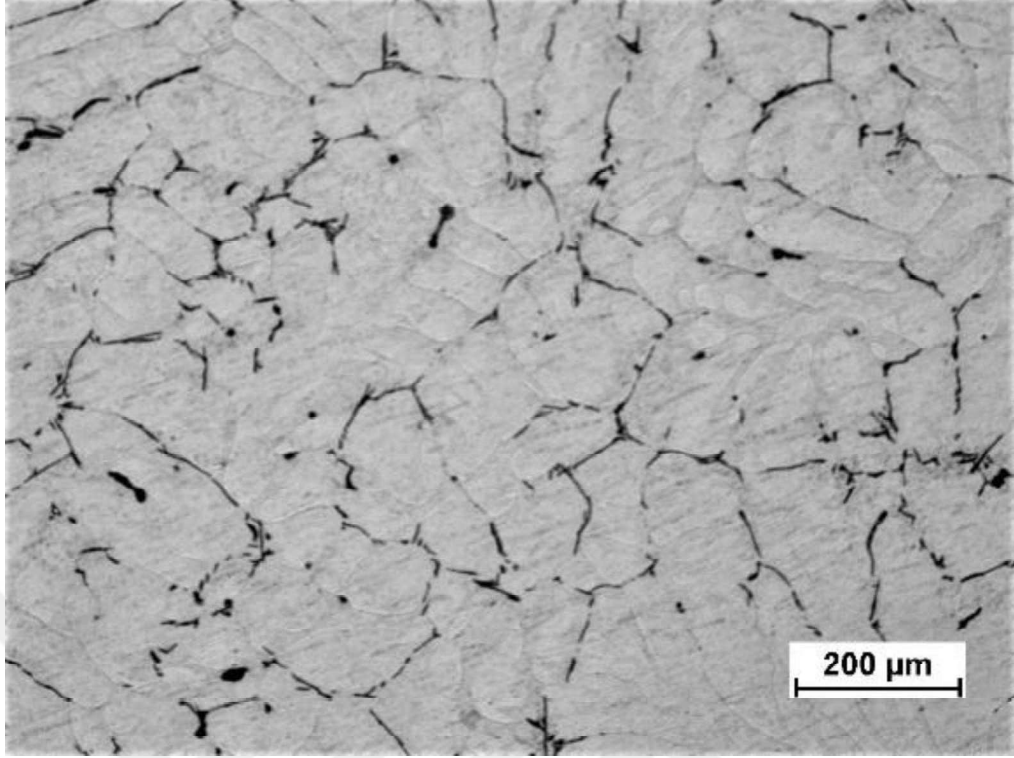


Şekil 6.26 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunede Mg_2Si oluşumu

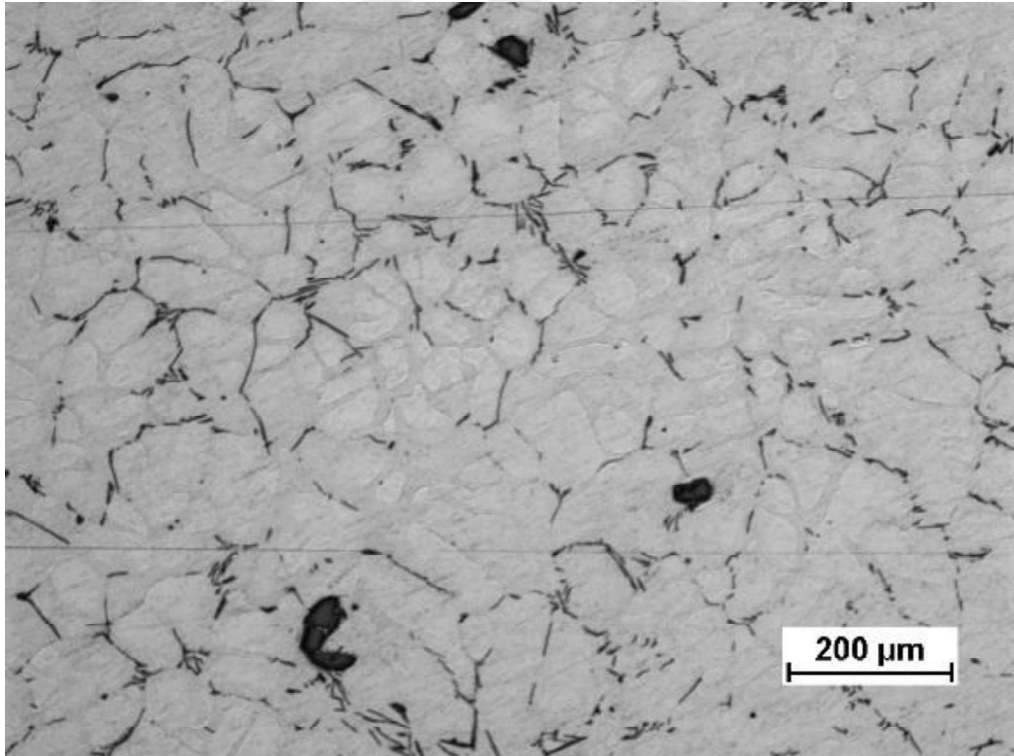


Şekil 6.27 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunede Mg_2Si oluşumu

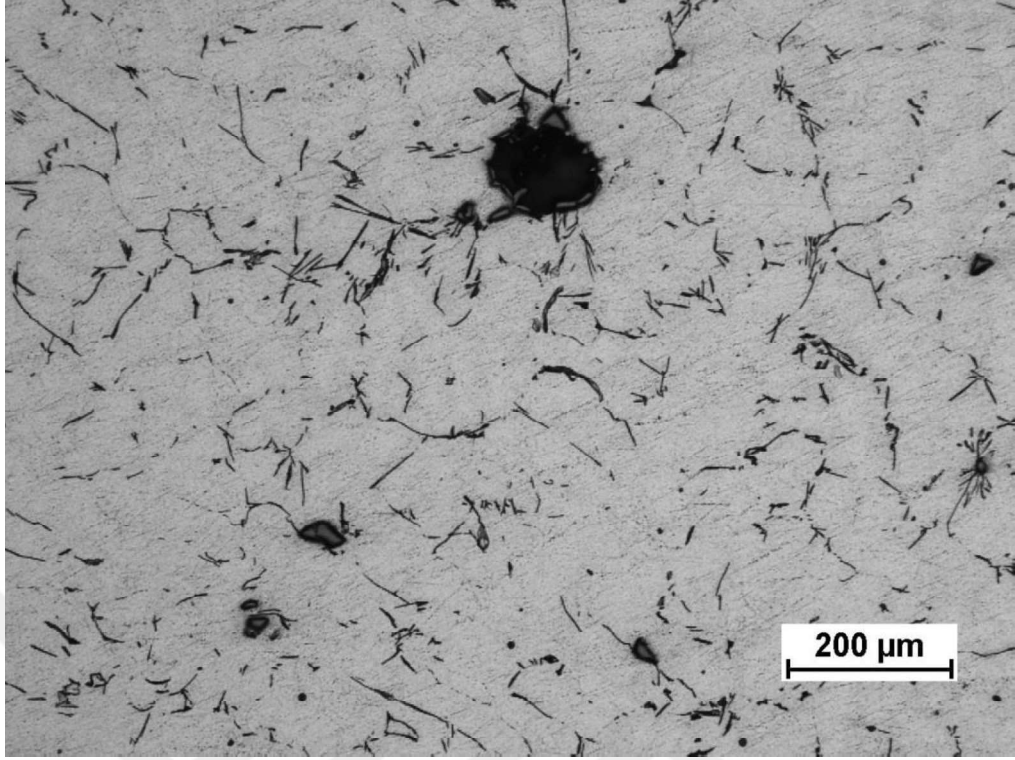
Numunelerin Şekil 6.28, Şekil 6.29, Şekil 6.30, Şekil 6.31, Şekil 6.32, Şekil 6.33, Şekil 6.34, Şekil 6.35, Şekil 6.36 ve Şekil 6.37’de verilen tane yapıları incelendiğinde dendritik yapı ve lamel şeklinde silisyum yapılar görülmektedir. Silisyumun lamel şeklinde yapıda bulunması ise Al-Si alaşımlarında hasar oluşumunun temel sebebidir. Bu yapılar malzemede çatlak başlangıç bölgelerinin oluşmasında aktif rol oynarlar ve bu da malzemenin dayanımını azaltan bir özelliktir. Bu nedenle mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için bu yapıların küreselleştirilmesi, boyutlarının küçültülmesi ve küçük partiküller halinde dağıtılması gibi işlemler yapılmaktadır (Chitra, Ojha ve Singh, 2016).



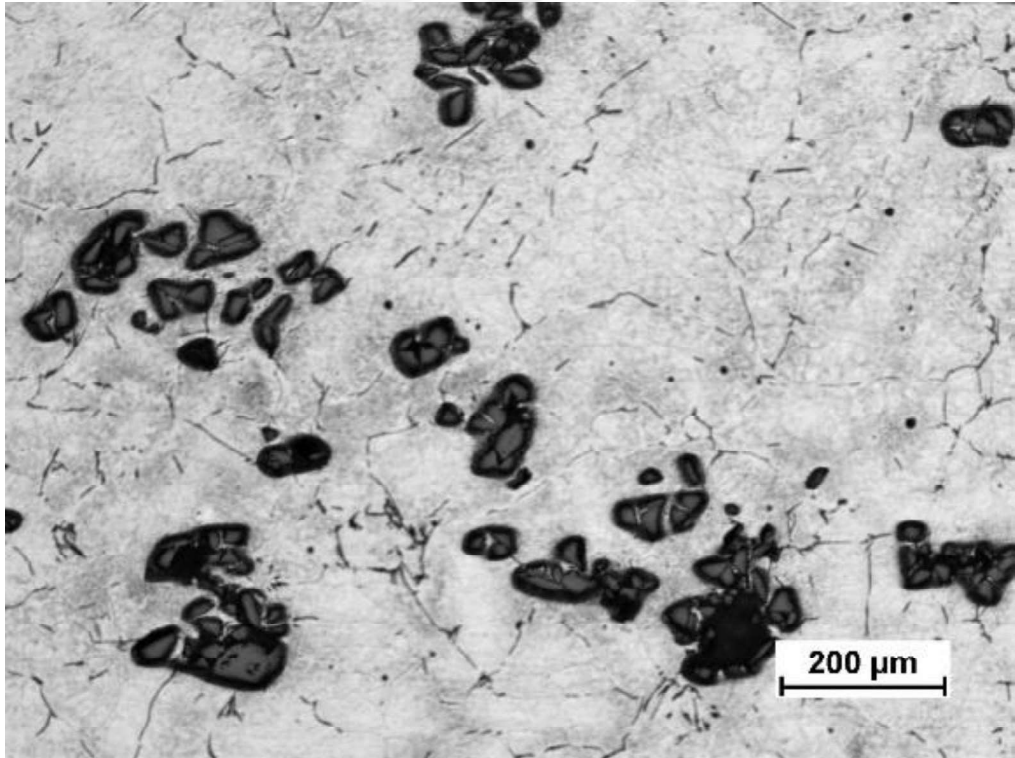
Şekil 6.28 SiC takviyesi içermeyen numunenin tane yapısı



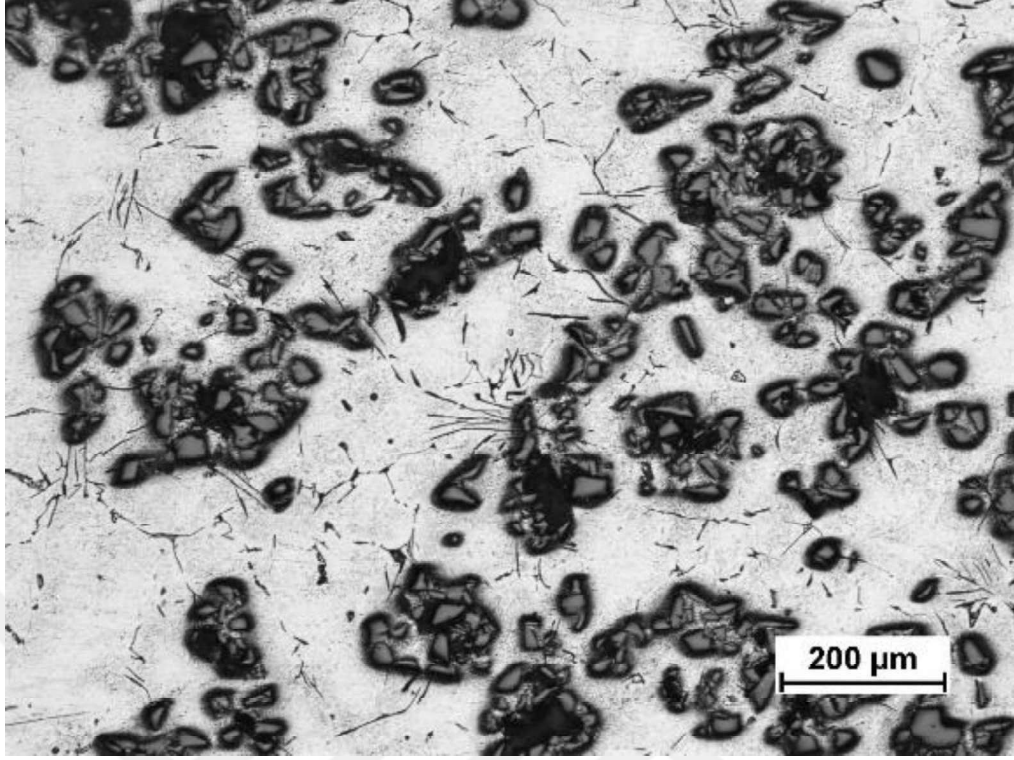
Şekil 6.29 %5 oranında SiC takviyesi içeren numunenin tane yapısı



Şekil 6.30 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunenin tane yapısı



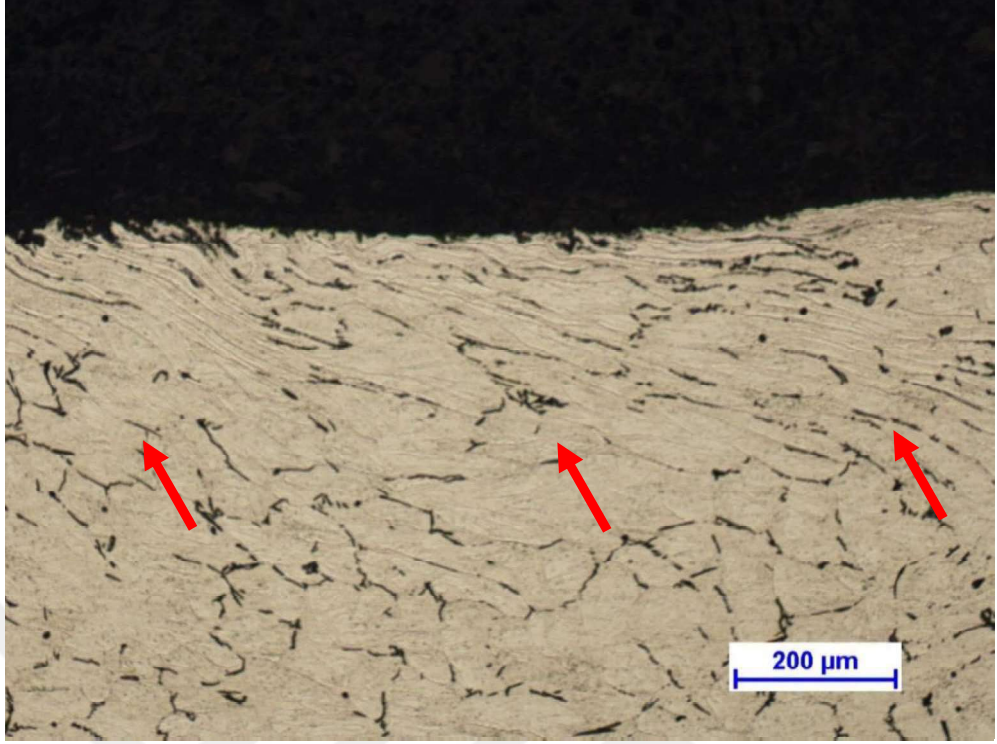
Şekil 6.31 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunenin tane yapısı



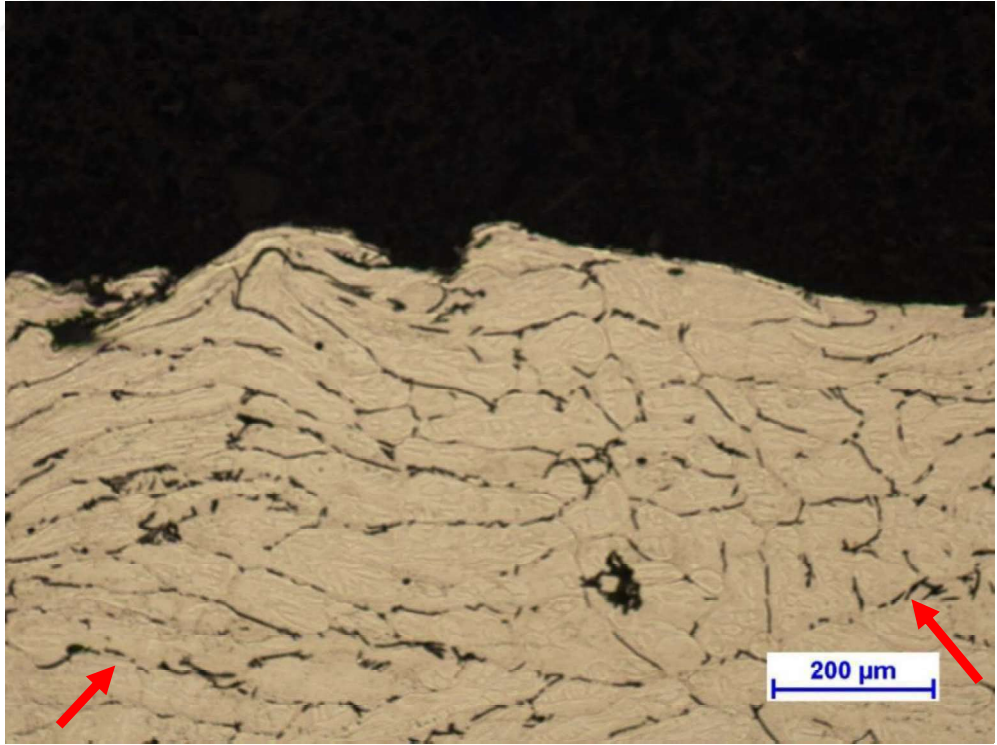
Şekil 6.32 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunenin tane yapısı

Deformasyon işlemleri sonrası numunelerin yüzey kısımlarında Şekil 6.33, Şekil 6.34, Şekil 6.35, Şekil 6.36, Şekil 6.37, Şekil 6.38, Şekil 6.39, Şekil 6.40, Şekil 6.41 ve Şekil 6.50’de görüldüğü üzere tanelerin incelme ve yönlendiği görülmektedir. İşlem sırasında üretilen dislokasyonlar verilen enerji ile yeniden düzenlenir tane sınırlarını ve alt tane sınırlarını oluşturur. Yeni oluşan tane sınırları da deformasyon işlemi sırasında tane incelmeye sebep olur.

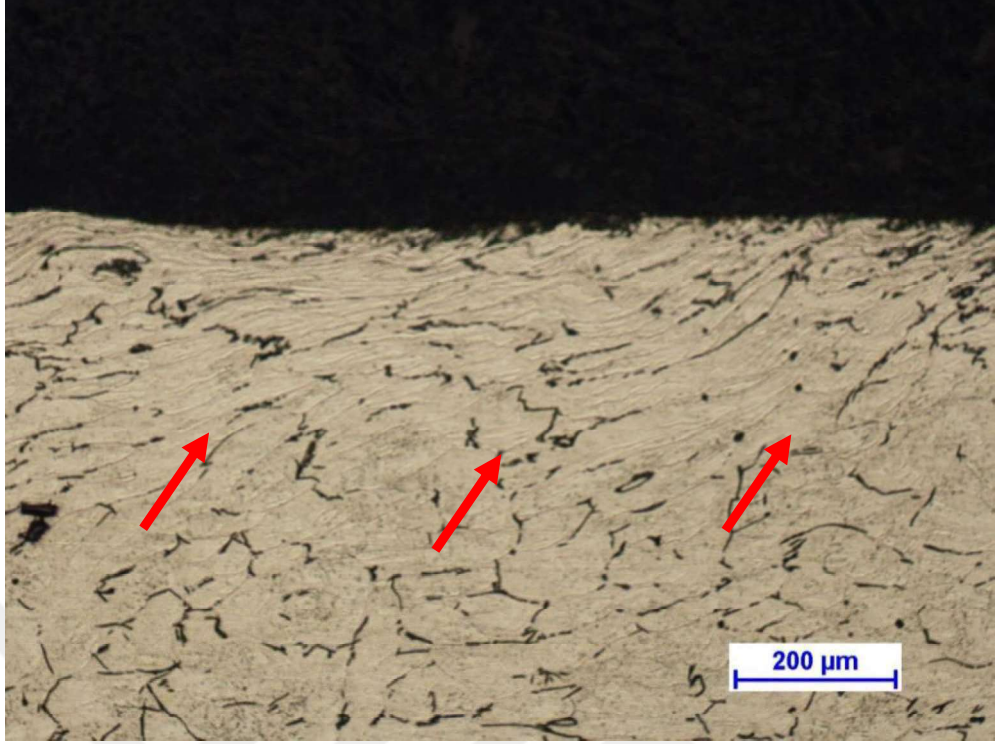
Tane yapıları incelendiğinde ultrasonik dövme işleminde ve bilyalı dövme işleminde tanelerin farklı doğrultularda yönlendiği görülmektedir. Ultrasonik dövme işleminde pimin ilerleme yönüne bağlı olarak doğrusal şekilde yönlenen taneler bilyalı dövme işleminde ise darbe uygulayan bilyanın şekline benzer dairesel şekilde yönlendirilmiştir. Yapı içerisindeki matris fazına kıyasla daha sert olan SiC takviye oranının artması ise dislokasyon hareketini zorlaştırmış ve tanelerin yönlendiği bu tabaka kalınlığının SiC miktarına bağlı olarak azalmasına sebep olmuştur.



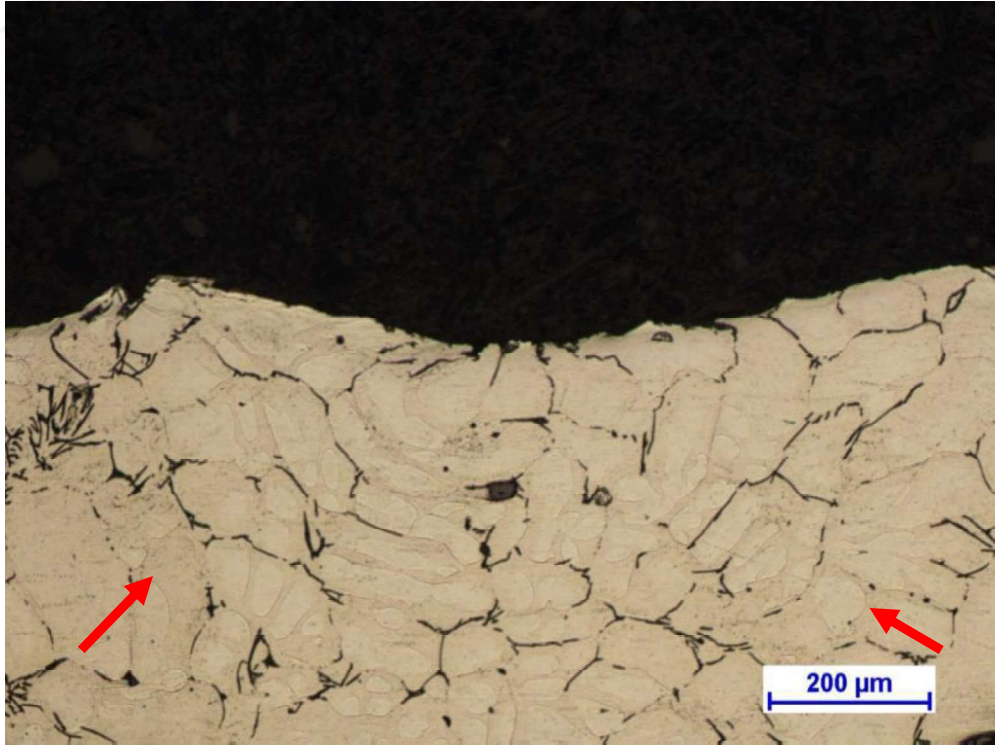
Şekil 6.33 Ultrasonik dövme sonucunda SiC takviyesi içermeyen numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı



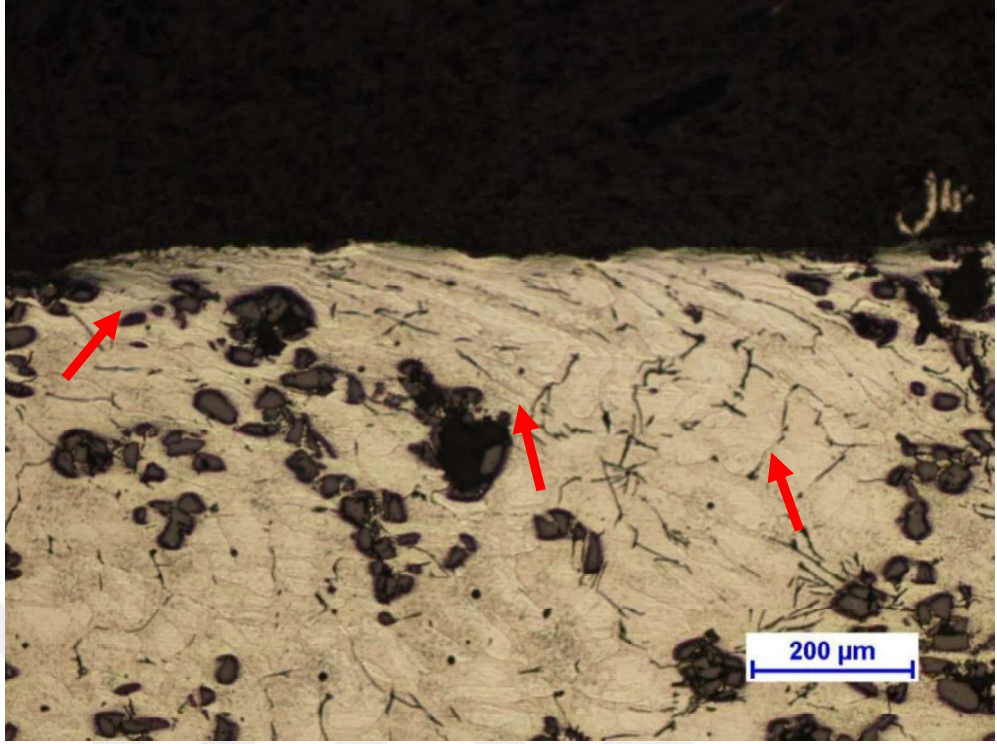
Şekil 6.34 Bilyalı dövme sonucunda SiC takviyesi içermeyen numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı



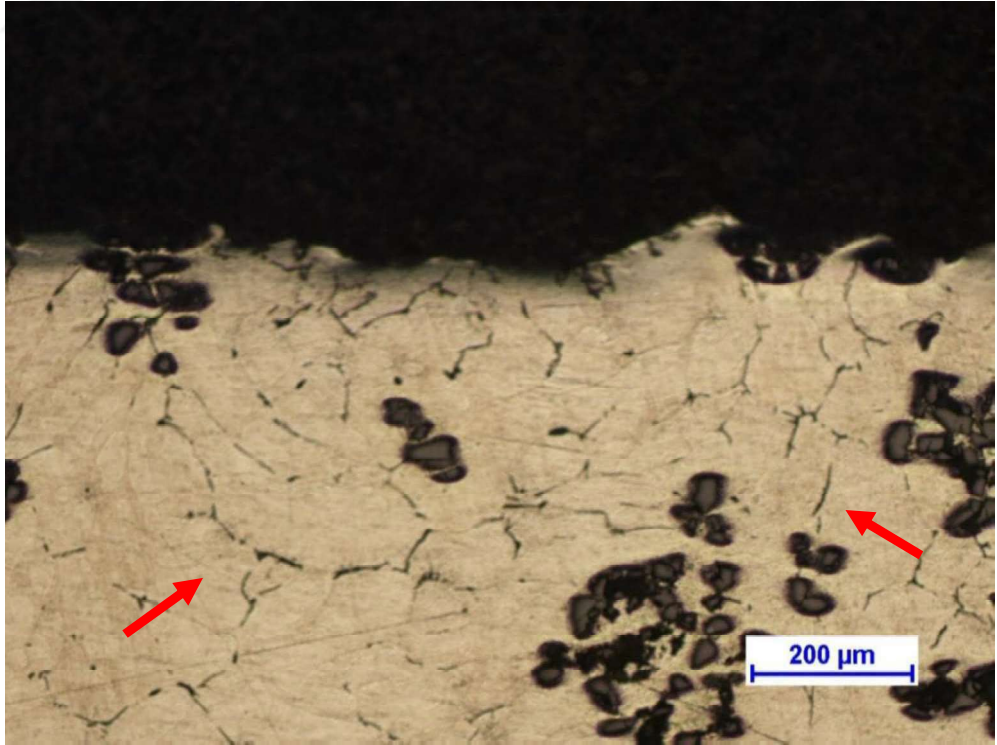
Şekil 6.35 Ultrasonik dövme sonucunda %5 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı



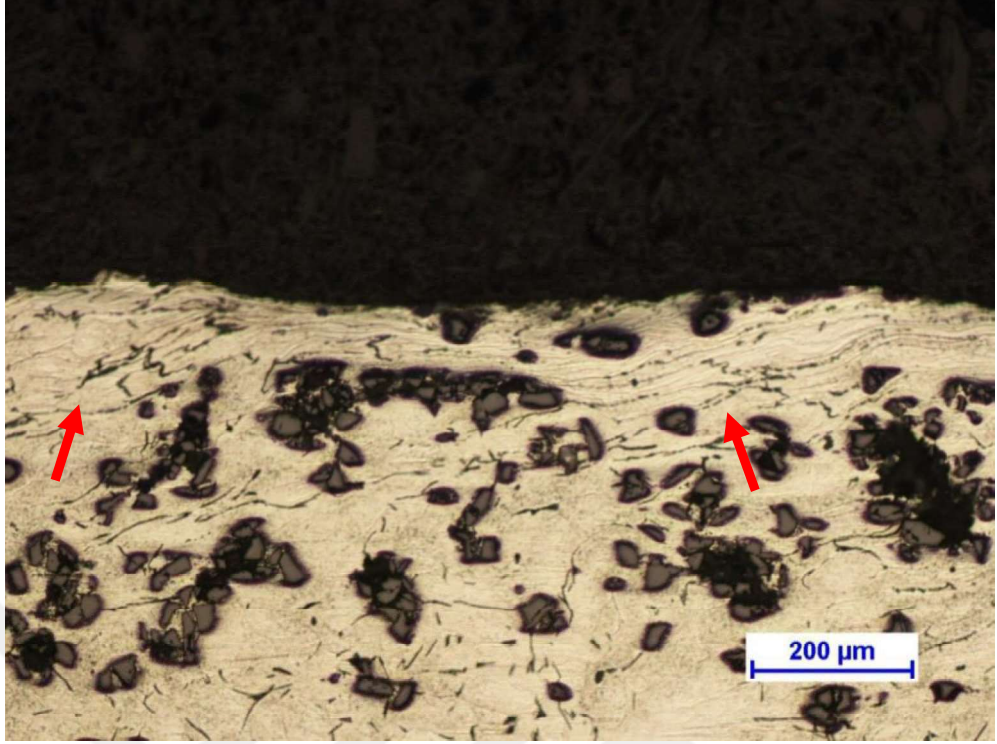
Şekil 6.36 Bilyalı dövme sonucunda %5 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı



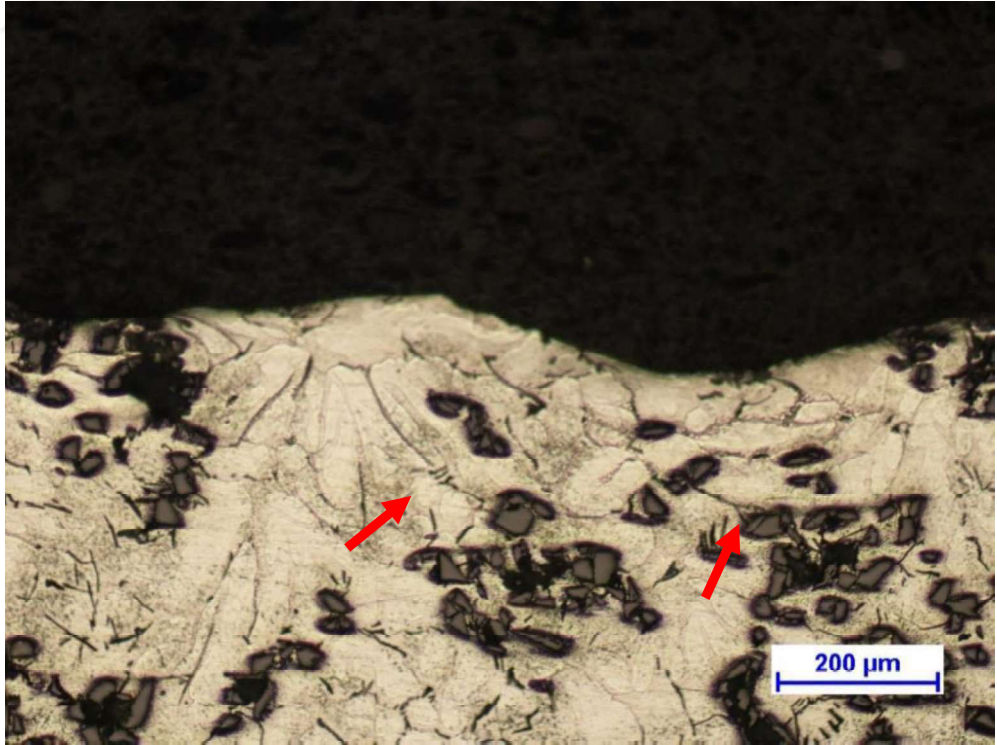
Şekil 6.37 Ultrasonik dövme sonucunda %10 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı



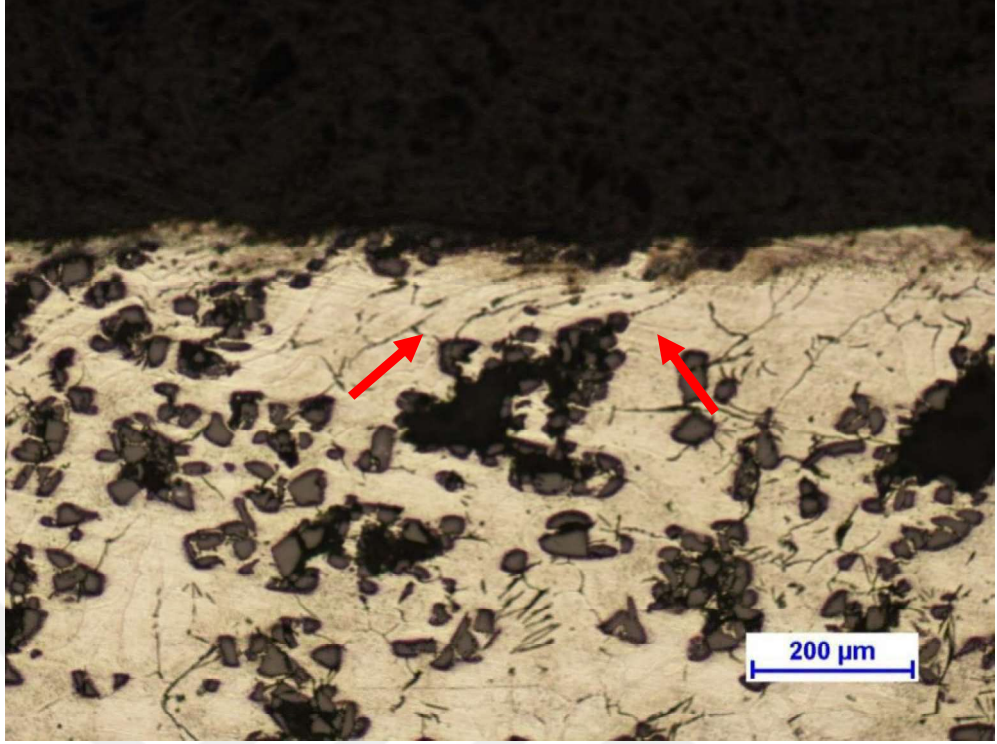
Şekil 6.38 Bilyalı dövme sonucunda %10 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı



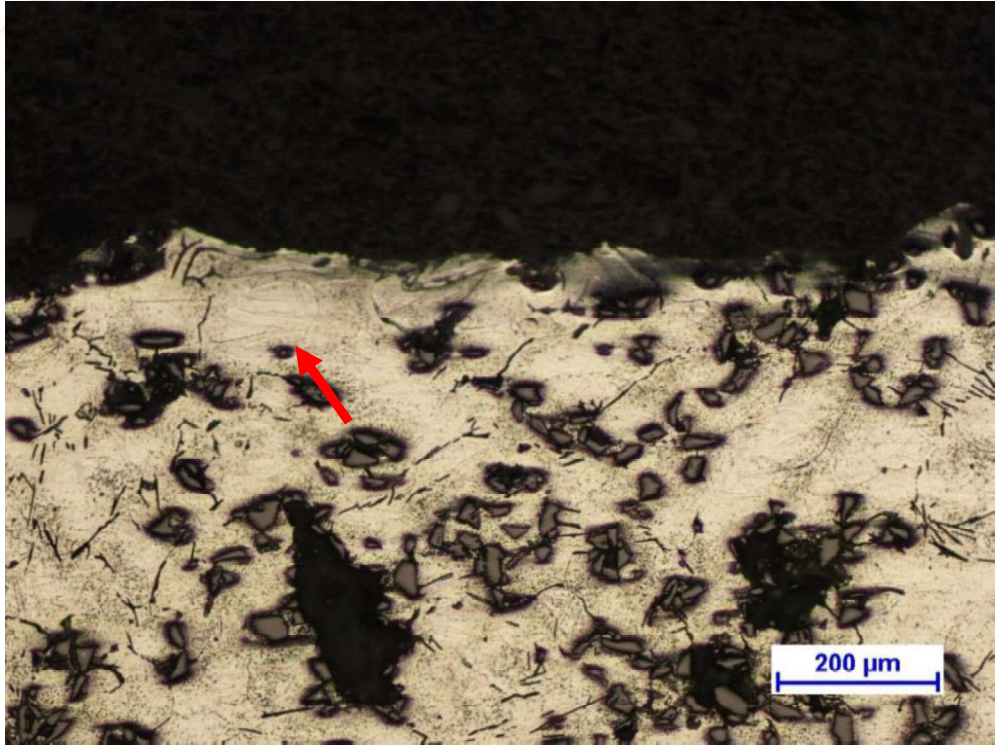
Şekil 6.39 Ultrasonik dövme sonucunda %15 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı



Şekil 6.40 Bilyalı dövme sonucunda %15 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı

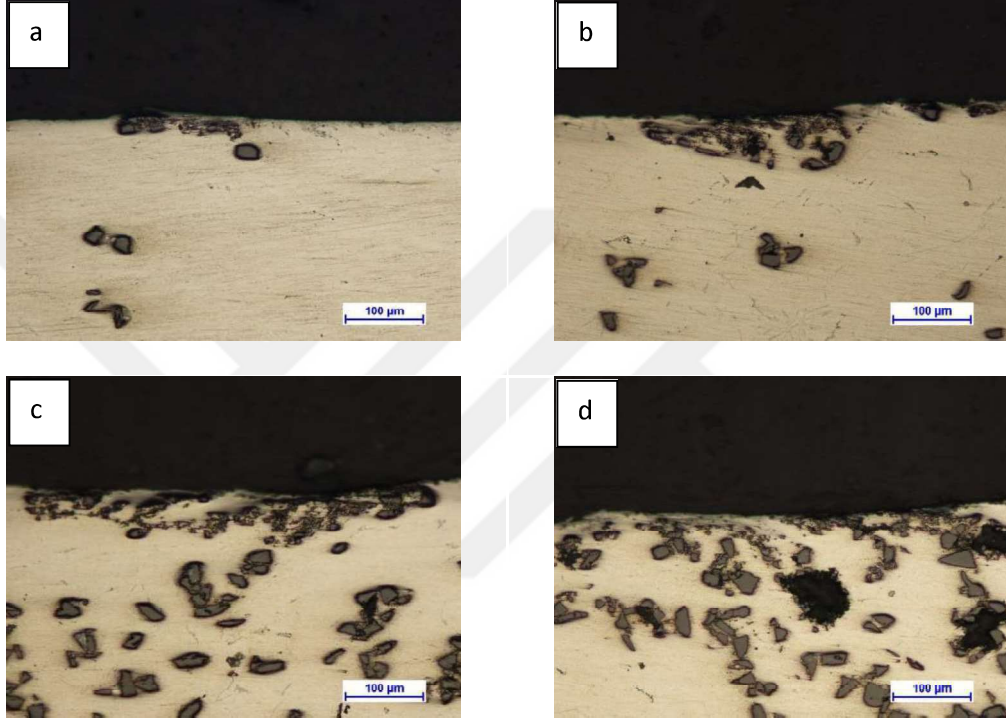


Şekil 6.41 Ultrasonik dövme sonucunda %20 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı

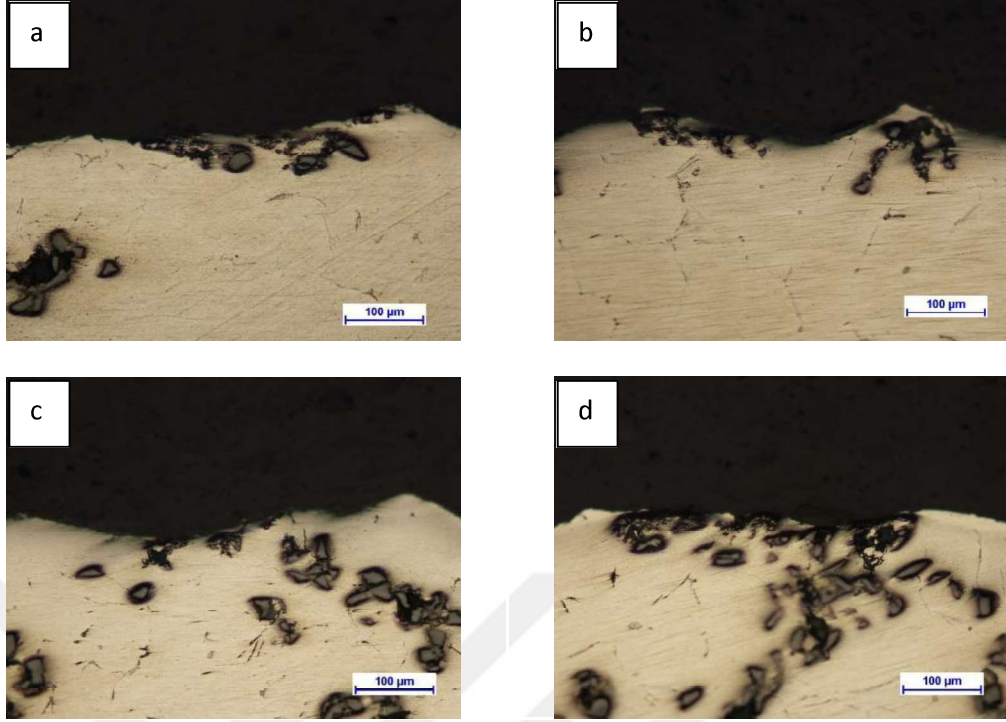


Şekil 6.42 Bilyalı dövme sonucunda %20 oranında SiC içeren numunenin yüzeyinde oluşan tane yapısı

Dövme yöntemleri Şekil 6.43 ve Şekil 6.44’de görüldüğü gibi yüzeye çok yakın olan SiC partiküllerinin kırılarak ufalanmasına sebep olmuştur. Uygulanan darbelerin bu şekilde yüzeydeki SiC partikülleri tarafından karşılanması ise darbelerin matris malzemesine daha az oranda iletilmesine sebep olmuştur. Tane yönlenmelerinin yüksek SiC takviye oranında daha ince bir tabakada gerçekleşmesinin sebeplerinden birisinin de bu durum olduğu söylenebilir.



Şekil 6.43 Ultrasonik dövme sonucunda yüzeyde kırılan SiC partikülleri (a: %5 oranında SiC içeren numune, b: %10 oranında SiC içeren numune, c: %15 oranında SiC içeren numune, d: %20 oranında SiC içeren numune)



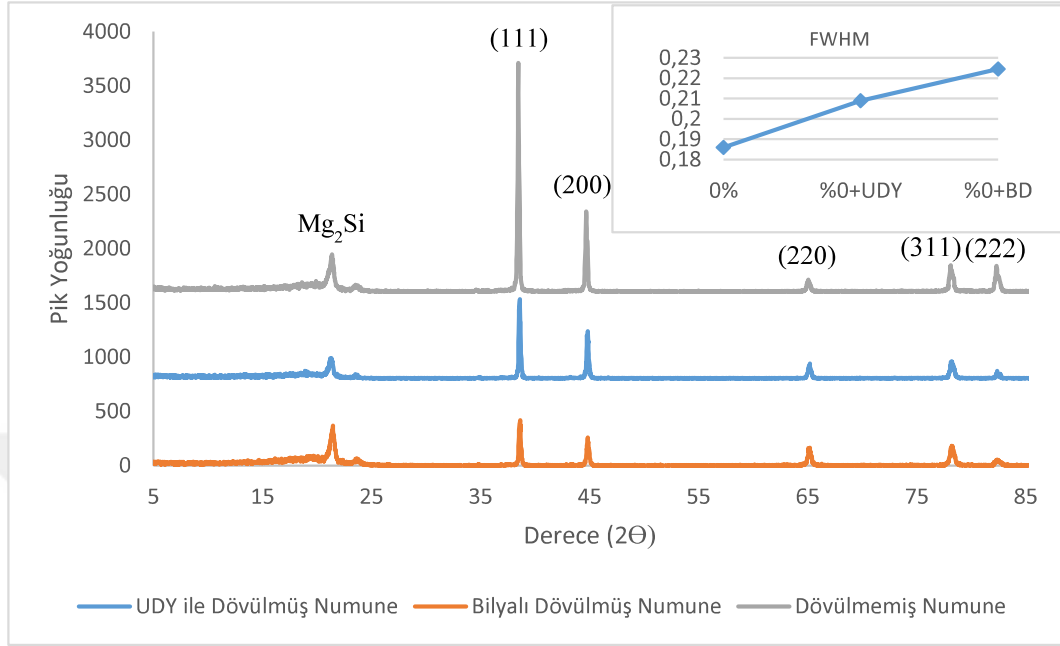
Şekil 6.44 Bilyalı dövme sonucunda yüzeyde kırılan SiC partikülleri (a: %5 oranında SiC içeren numune, b: %10 oranında SiC içeren numune, c: %15 oranında SiC içeren numune, d: %20 oranında SiC içeren numune)

6.4 Dövme İşlemlerinin Etkisinin X-Ray Difraksiyon Analizi ile İncelenmesi

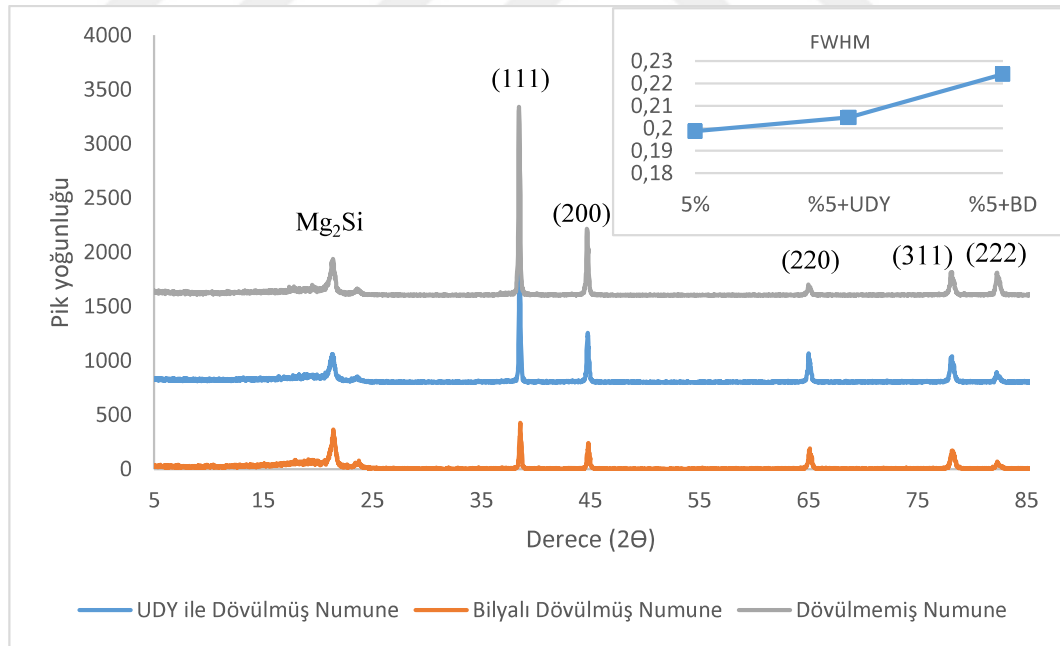
Numunelerin X-Ray Difraksiyon analizleri, Thermo Scientific ARL K-Alpha model cihazda Cu-K α radyasyonu kullanılarak 0,1°2 θ /s çalışma değerlerinde yapılmıştır.

Numunelerin dövme işlemleri öncesinde ve sonrasında XRD grafikleri Şekil 6.45, Şekil 6.46, Şekil 6.47, Şekil 6.48 ve Şekil 6.49’da verilmiştir. Numunelerin XRD grafikleri incelendiğinde içyapı görüntülerinde de gözlemlenen Mg₂Si fazına ait pik oluştuğu görülmektedir. Bu durumla birlikte elde edilen grafikler incelendiğinde deformasyon işlemleri sonrasında pik genişliklerinin ve maksimum yarısı tam genişlik (FWHM-Full Width at Half Maximum) değerlerinin arttığı görülmektedir. FWHM değerinin artışı da soğuk deformasyon sonucu tane incelmesinin göstergesi olarak kabul edilmektedir (Karademir, Ünal, Ateş, Gökçe ve Gök, 2016). Deformasyon işlemleri incelendiğinde bu değer tüm numunelerde arttığı görülmektedir. Bilyalı dövme (BD olarak gösterilmiştir) ve ultrasonik dövme

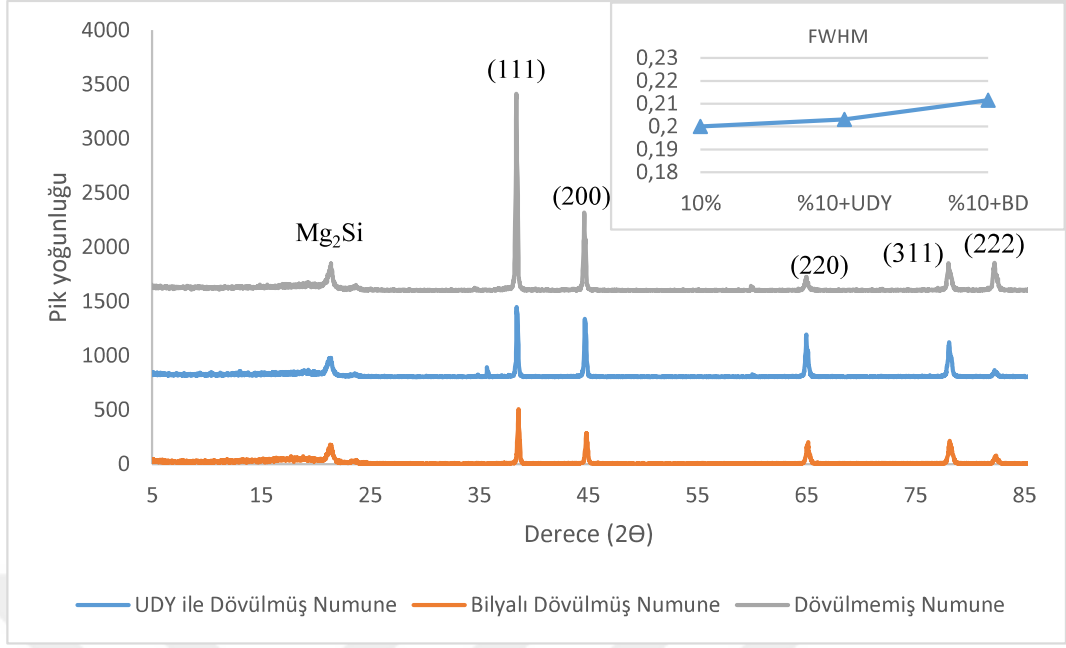
işlemleri (UDY olarak gösterilmiştir) karşılaştırıldığında ise bu artışın bilyalı dövme işleminde daha fazla olduğu görülmektedir.



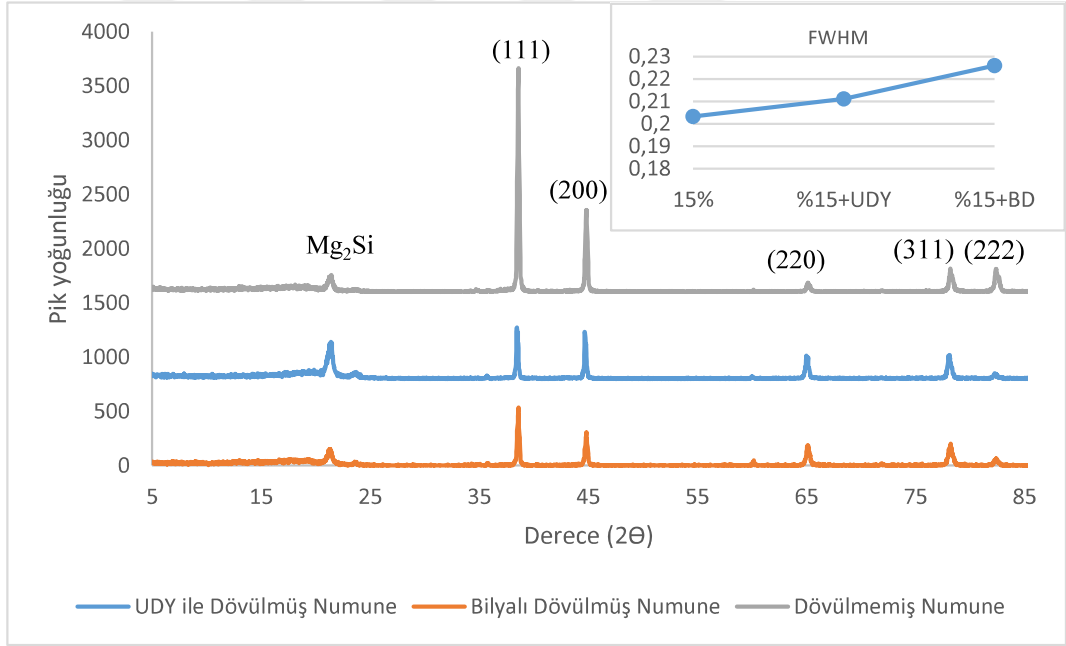
Şekil 6.45 SiC takviyesi içermeyen numuneye ait XRD grafikleri



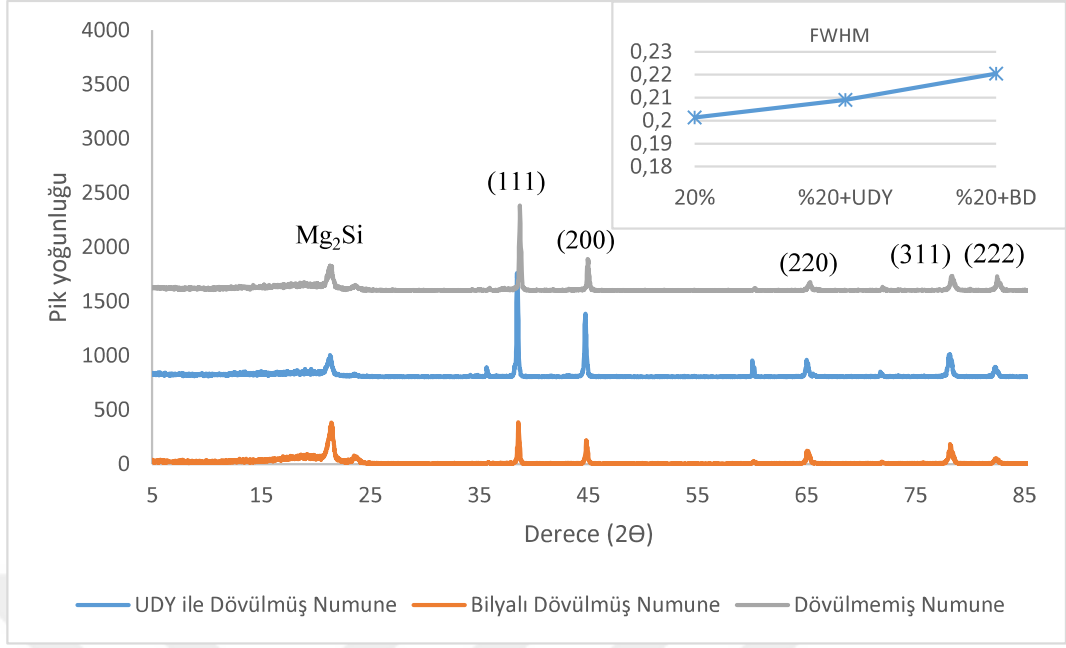
Şekil 6.46 %5 oranında SiC takviyesi içeren numuneye ait XRD grafikleri



Şekil 6.47 %10 oranında SiC takviyesi içeren numuneye ait XRD grafikleri



Şekil 6.48 %15 oranında SiC takviyesi içeren numuneye ait XRD grafikleri



Şekil 6.49 %20 oranında SiC takviyesi içeren numuneye ait XRD grafikleri

6.5 Dövme İşlemlerinin Çekme Dayanımı Üzerine Etkisinin İncelenmesi

ASTM E8/E8M standardına uygun olarak hazırlanan numunelerin çekme testleri Shimadzu UH-500kN model cihazda 1 mm/s çekme hızı kullanılarak yapılmıştır.

Numunelerin dövme işlemleri öncesinde ve sonrasında elde edilen çekme dayanımları Tablo 6.3’de ve Şekil 6.50’de verilmiştir. Dövülmemiş numunelerin çekme testinde elde edilen değerler incelendiğinde en düşük çekme dayanımı SiC içermeyen numunede gözlemlenmiştir. Bu değer bu numune için 54 MPa iken yapıya %5 oranında SiC ilave edilmesi bu değer 126 MPa seviyesine çıkmasına sebep olmuştur. Yapıya katılan SiC miktarının artmasıyla birlikte artan porozite miktarı ise %10 ve %15 oranında SiC takviyesi içeren numunelerde çentik etkisine ve gerilme yığılmalarına sebep olmuş bu nedenle de çekme dayanımlarının %5 oranında SiC takviyesi içeren numuneye kıyasla daha düşük olmasına sebebiyet vermiştir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda %4,19 ve üzerindeki porozite miktarının çekme dayanımı üzerinde kritik bir role sahip olduğu görülmektedir. Bu numunelerin çekme dayanımları %10 oranında SiC takviyesi içeren numune için 93 MPa, %15 oranında SiC takviyesi içeren numune için ise 114 MPa olarak ölçülmüştür. SiC miktarının %20 oranına çıkmasıyla ise elde edilen çekme dayanımı 150 MPa

seviyesine çıkmıştır. %10, %15 ve %20 oranında SiC içeren numuneler kendi aralarında kıyaslandığında ise SiC miktarının artışıyla birlikte çekme dayanımlarının da arttığı görülmektedir.

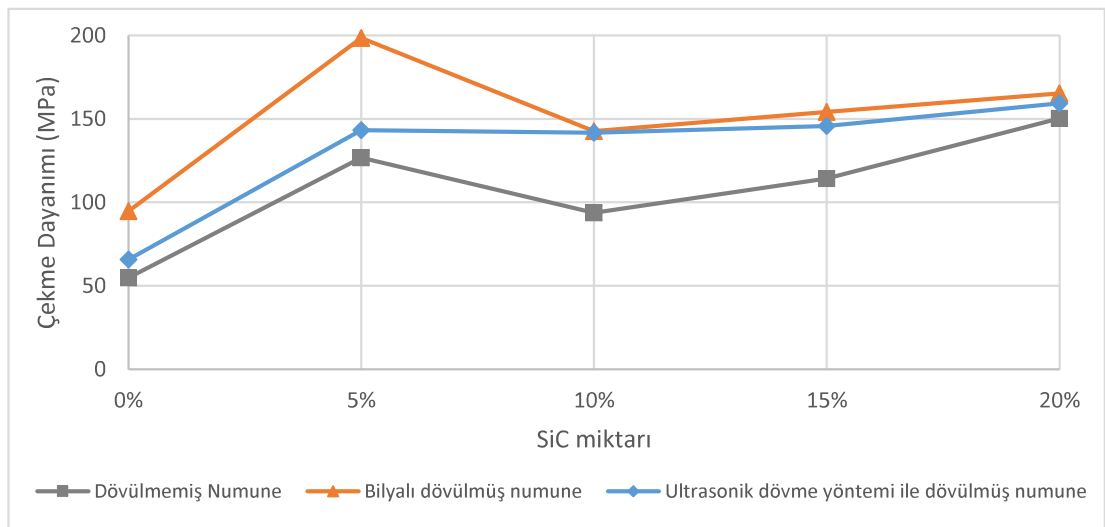
Dövme işlemleri sonucunda tüm numunelerin çekme dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Bilyalı dövme yöntemi sonucunda elde edilen çekme dayanımı değerleri SiC takviyesi içermeyen ve %5, %10, %15 ve %20 oranında SiC takviyesi içeren kompozit malzemeler için sırasıyla 94 MPa, 198 MPa, 142 MPa, 154 MPa ve 165 MPa olarak ölçülmüştür. Ultrasonik dövme yöntemi sonucunda elde edilen değerler ise SiC takviyesi içermeyen numune için 65 MPa ve %5, %10, %15 ve %20 oranında SiC takviyesi içeren numuneler için sırasıyla 143 MPa, 141 MPa, 145 MPa ve 159 MPa olarak ölçülmüştür.

Numunelerin çekme dayanımlarındaki bu artış ise plastik deformasyon ile meydana deformasyon sertleşmesi ile ilişkilendirilebilir. Numunelerin içyapı görüntülerinde de görüldüğü üzere yapıdaki SiC takviye oranının artmasıyla birlikte numunelerin yüzey kısımlarında daha fazla SiC partikülü bulunmaktadır. Bu partiküller de dövme işlemleri sırasında deformasyona engel olarak tane yönelmesi ve incilmesi gibi etkilerin daha ince bir tabakada meydana gelmesine sebep olmuştur. Numunelerin çekme dayanımlarındaki artış miktarının SiC takviye oranının artmasıyla birlikte azalması da bu durumun bir sonucu olarak düşünülmektedir.

Dövme yöntemleri kendi aralarında kıyaslandığında ise bilyalı dövme işleminin ultrasonik dövme işlemine oranla numunelerin çekme dayanımlarını iyileştirmede daha etkin olduğu görülmektedir.

Tablo 6.3 Dövmeye işlemleri öncesinde ve sonrasında elde edilen çekme dayanımları

SiC miktarı	Uygulanan İşlem	Maksimum Gerilme (MPa)
%0	Dövülmemiş	54,8063
	Bilyalı Dövülmüş	94,72129
	Ultrasonik Dövmeye Yöntemi ile Dövülmüş	65,75015
%5	Dövülmemiş	126,7818
	Bilyalı Dövülmüş	198,4415
	Ultrasonik Dövmeye Yöntemi ile Dövülmüş	143,3042
%10	Dövülmemiş	93,75
	Bilyalı Dövülmüş	142,6119
	Ultrasonik Dövmeye Yöntemi ile Dövülmüş	141,6401
%15	Dövülmemiş	114,2178
	Bilyalı Dövülmüş	154,2413
	Ultrasonik Dövmeye Yöntemi ile Dövülmüş	145,7018
%20	Dövülmemiş	150,3957
	Bilyalı Dövülmüş	165,1982
	Ultrasonik Dövmeye Yöntemi ile Dövülmüş	159,2609



Şekil 6.50 Dövmeye işlemleri öncesinde ve sonrasında elde edilen çekme dayanımları

6.6 Dövmeye İşlemlerinin Sertlik Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Numunelerin makro sertlik testleri 50 kg yük altında yapılırken mikro sertlik testleri ise 10 gr yük kullanılarak yapılmış ve her 100 μm 'de bir ölçüm alınarak gerçekleştirilmiştir. Testler EmcoTest Durascan20 G5 model cihazda gerçekleştirilmiştir.

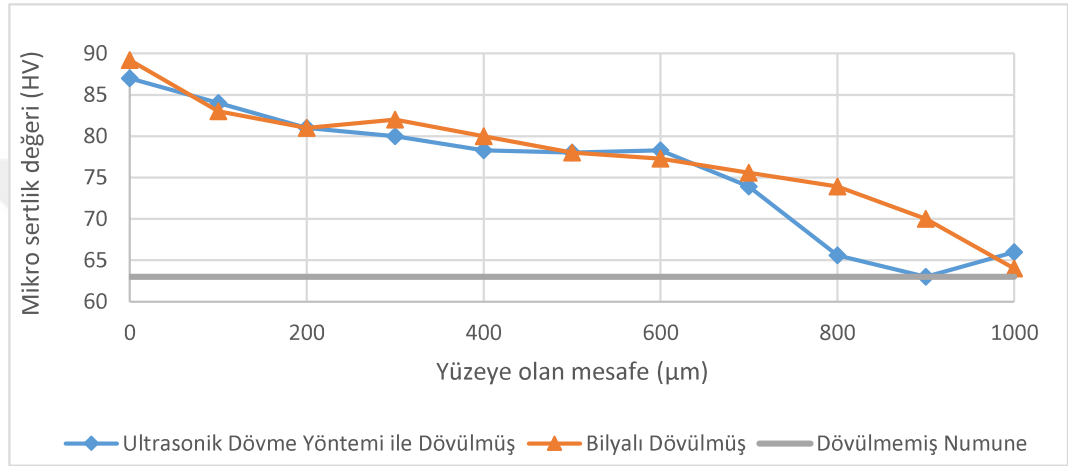
Üretimi yapılan numunelerin makro sertlik değerleri Tablo 6.4'de görülmektedir. SiC içermeyen numunenin sertlik değeri 60 HV iken SiC miktarının %5, %10, %15 ve %20 olmasıyla bu değer sırasıyla 64 HV, 67 HV, 71 HV ve 73 HV seviyesine yükselmiştir. Sert olan seramik fazın yapıya katılması dislokasyon hareketinin önünde engel oluşturarak dislokasyon yoğunluğunun artmasına sebep olurlar. Numunelerin sertlik değerlerindeki artış bu durumla açıklanabilir.

Tablo 6.4 Numunelerin makro sertlik değerleri (HV)

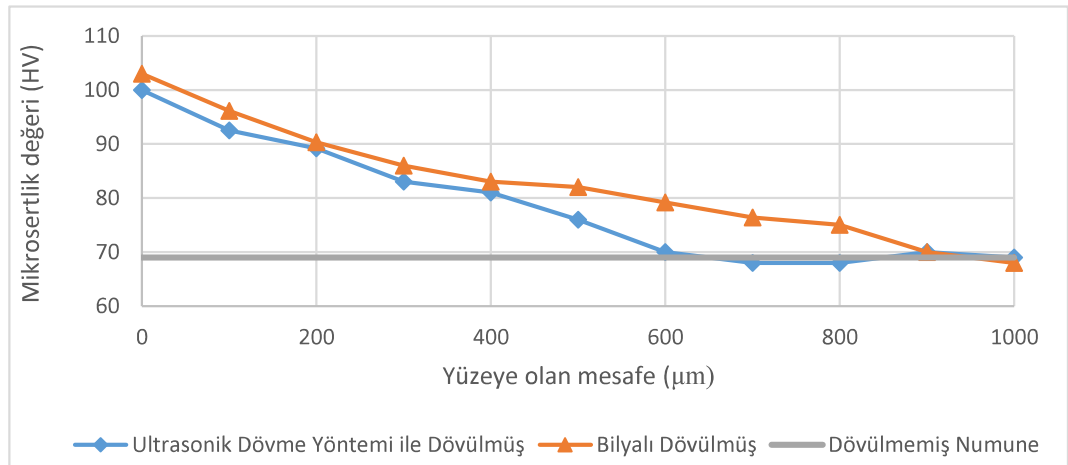
%0	%5	%10	%15	%20
60	64	67	71	73

Numunelerin mikro sertlik değerleri için elde edilen değerler SiC takviyesi içermeyen numune ve %5, %10, %15 ve %20 oranında SiC içeren numuneneler için sırasıyla 63, 69, 74, 79 ve 83 HV olarak ölçülmüştür. Deformasyon işlemleri sonrasında elde edilen değerler Şekil 6.51, Şekil 6.52, Şekil 6.53, Şekil 6.54 ve Şekil 6.55'de gösterildiği gibidir. Elde edilen değerler incelendiğinde deformasyon sonucunda artan dislokasyon yoğunluğu ve dislokasyon yığılmalarından dolayı meydana pekleşme ile tüm numunelerin yüzeylerinde sertlik artışı meydana gelmiştir. Bu sertlik artışı numune yüzeylerinden belirli bir derinliğe kadar devam ederken bu derinliğin numunelerin içerdiği SiC takviye oranına göre değiştiği görülmektedir. Dövmeye işlemleri sonucunda SiC içeren numunelerin yüzeye yakın kısımlarında yaklaşık olarak aynı değerler elde edilirken SiC partiküllerinin dislokasyon hareketine engel olmalarından dolayı numunelerin içerdiği SiC miktarının artışına bağlı olarak sertlik artışı meydana gelen tabakanın kalınlığının azaldığı gözlemlenmiştir. Bilyalı dövmeye işleminin sertlik artışı üzerine etkisi incelendiğinde SiC içermeyen numune ve %5, %10, %15 ve %20 oranında SiC

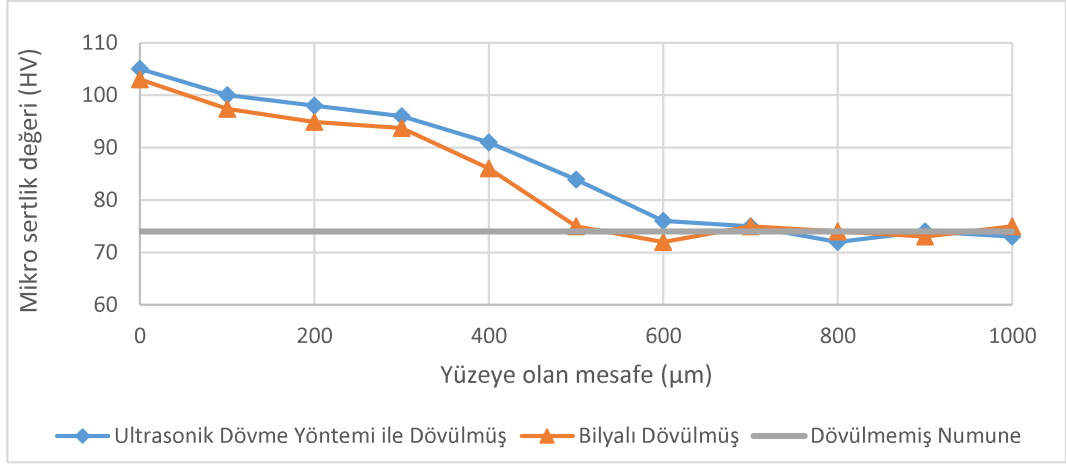
içeren numunelerin yüzeylerinde oluşan sertlik değerleri sırasıyla 89, 103, 105, 105 ve 106 HV iken sertlik artışının meydana geldiği tabaka kalınlıkları da sırasıyla 1000, 900, 600, 400 ve 300 μm 'dir. Ultrasonik dövme yönteminin etkisi incelendiğinde ise SiC içermeyen numune ve %5, %10, %15 ve %20 oranında SiC içeren numunelerin yüzeylerinde oluşan sertlik değerleri sırasıyla 87, 100, 105, 108 ve 106 HV iken sertlik artışının meydana geldiği tabaka kalınlıkları da sırasıyla 800, 600, 500, 400 ve 200 μm 'dir.



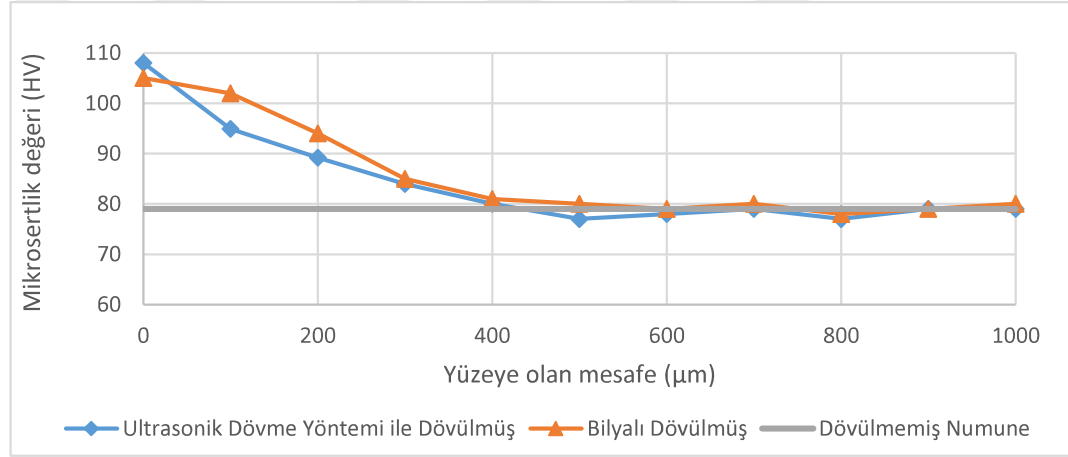
Şekil 6.51 SiC takviyesi içermeyen numunenin dövme işlemleri sonucunda elde edilen mikro sertlik değerleri



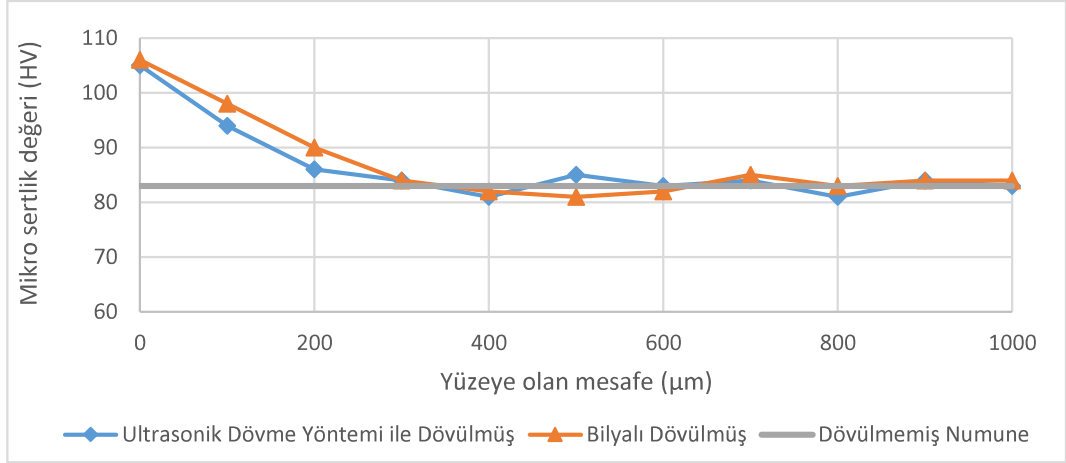
Şekil 6.52 %5 oranında SiC takviyesi içeren numunenin dövme işlemleri sonucunda elde edilen mikro sertlik değerleri



Şekil 6.53 %10 oranında SiC takviyesi içeren numunenin dövme işlemleri sonucunda elde edilen mikro sertlik değerleri



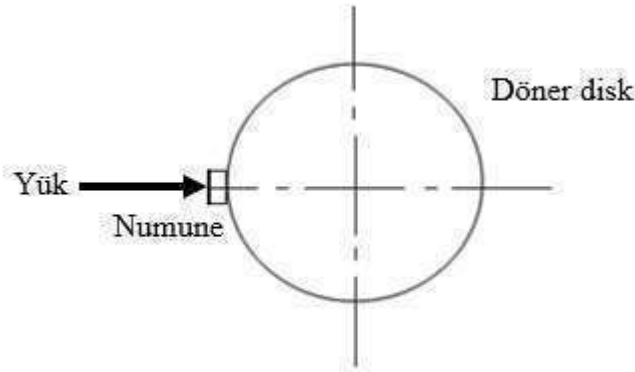
Şekil 6.54 %15 oranında SiC takviyesi içeren numunenin dövme işlemleri sonucunda elde edilen mikro sertlik değerleri



Şekil 6.55 %20 oranında SiC takviyesi içeren numunenin dövme işlemleri sonucunda elde edilen mikro sertlik değerleri

6.7 Dövme İşlemlerinin Aşınma Dayanımı Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Numuneler dövme işlemlerinden önce ve sonra aşınma testlerine tabi tutulmuştur. Aşınma testleri Şekil 6.56’da gösterildiği gibi döner disk üzerinde bulunan numuneye 5 N yük uygulanarak kuru sürtünme koşulları altında yapılmıştır. Diskin dönme hızı 1 m/s olarak seçilmiştir ve testler 1000 m boyunca gerçekleştirildikten sonra aşınma miktarı hassas terazi kullanılarak kütle kaybının ölçülmesiyle incelenmiştir.



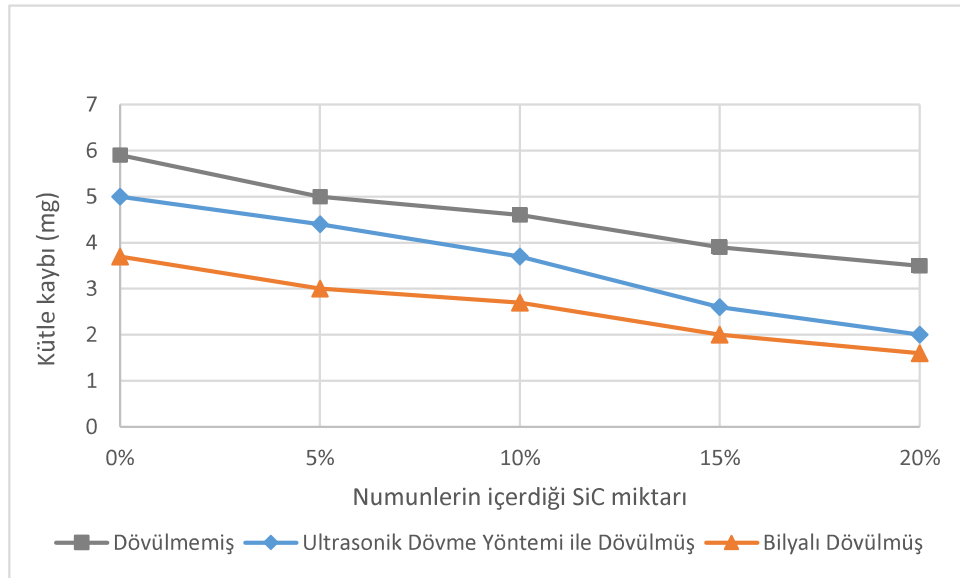
Şekil 6.56 Aşınma test cihazı şematik gösterimi

Numunelerin aşınma testleri sonucunda kaybettikleri kütleler Şekil 6.56’da gösterilmiştir. Dövülmemiş numuneler için SiC içermeyen ve %5, %10, %15 ve %20 oranında SiC takviyesi içeren numunelerin aşınma sonrası kütle kayıpları sırasıyla 5,9 mg, 5 mg, 4,6 mg, 3,9 mg ve 3,5 mg olarak ölçülmüştür. Ultrasonik dövme

yöntemi uygulandıktan sonra ise bu değerler azalmış ve SiC içermeyen ve %5, %10, %15 ve %20 oranında SiC içeren numuneler için sırasıyla kütle kayıpları 5 mg, 4,4 mg, 3,7 mg, 2,6 mg ve 2 mg olarak ölçülmüştür. Bilyalı dövülmüş numunelerin kütle kayıpları ise SiC içermeyen ve %5, %10, %15 ve %20 oranında SiC içeren numuneler için sırasıyla 3,7 mg, 3 mg, 2,7 mg, 2 mg ve 1,6 mg olarak ölçülmüştür.

Bu değerler karşılaştırıldığında kompozit içerisindeki SiC takviye fazının artmasıyla aşınma direncinin de arttığı görülmektedir. Yapıdaki SiC takviye miktarının artmasıyla uygulanan yükün bu sert partiküller ile taşınması bu durumun ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Uygulanan dövme işlemleri sonucunda ise numune yüzeylerinde meydana gelen sertlik artışı, aşınma deneyleri sırasında daha az miktarda kütle kaybının oluşmasına neden olmuştur. Kullanılan parametrelerle her iki yöntemde de numune yüzeylerinde birbirlerine yakın sertlik değerleri oluşmasına rağmen bilyalı dövme işleminin ultrasonik dövme işlemine kıyasla daha kalın bir sert tabaka meydana getirmesi, aşınma sırasında daha az miktarda kütle kaybının oluşmasına sebep olmuştur.



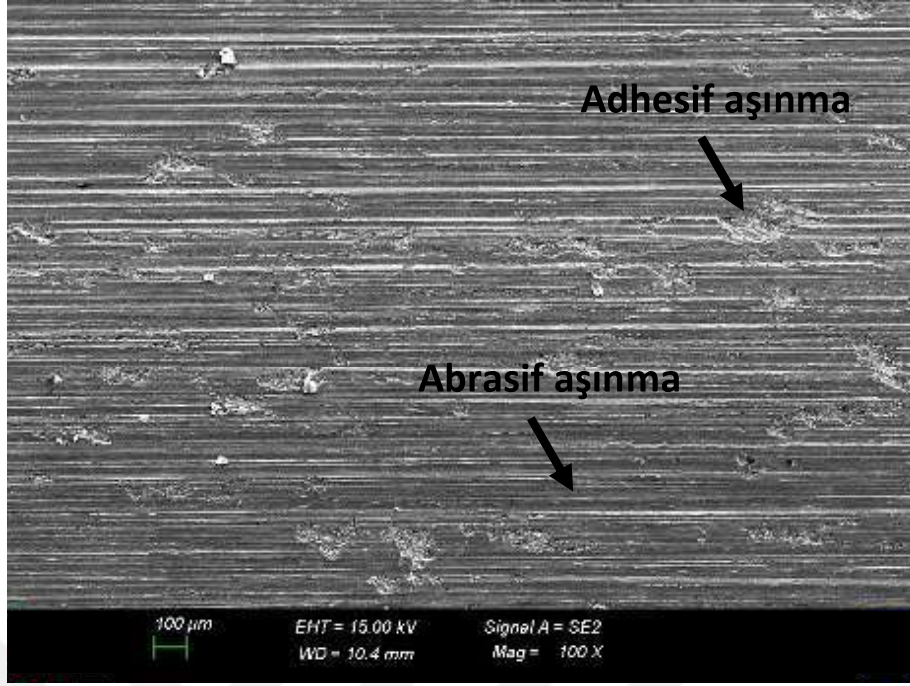
Şekil 6.57 Aşınma deneyleri sonucunda meydana gelen kütle kayıpları

Numune yüzeylerinde aşınma sonrası meydana gelen aşınma olukları Şekil 6.58 ve Şekil 6.72 arasındaki görüntülerde görülmektedir. Aşınma sırasında meydana

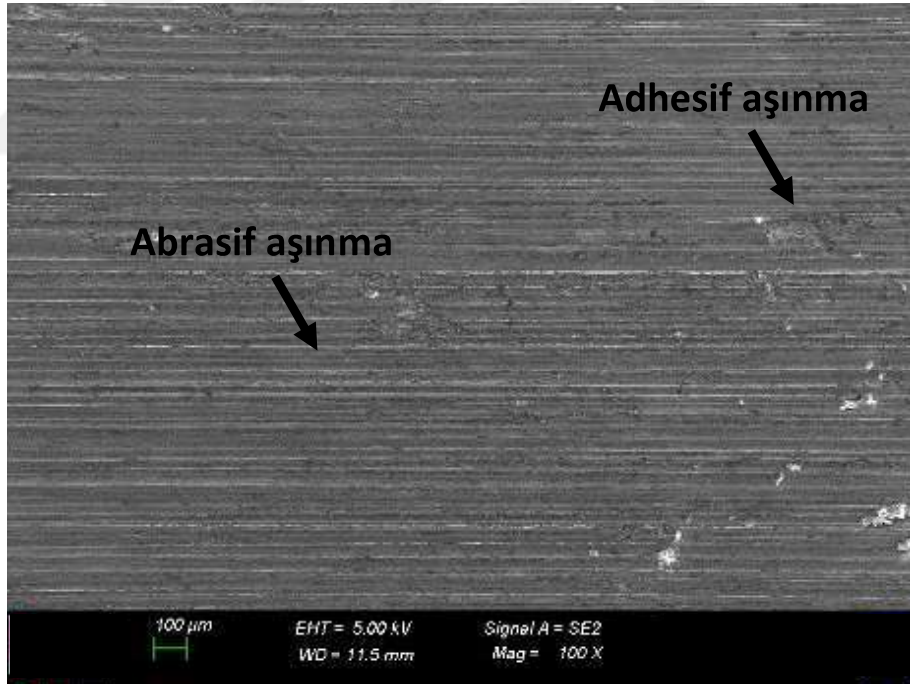
gelen sürekli oluklar abrazif aşınma mekanizmalarının etkin olduğunu göstermekteyken numune yüzeylerindeki bazı bölgelerde adhesif aşınma izlerine rastlanmıştır.

Aşınma olukları incelendiğinde malzeme içerisindeki SiC miktarının artmasıyla abrazif aşınma izlerinin de incelendiği ve süreksizleştiği görülmektedir. Bu durumun sebebi olarak ise SiC partiküllerinin daha sert yapıda olması ve aşındırıcı diskin daha fazla SiC partikülü ile temas etmesi sonucu aşınma işleminin daha zor bir hale gelmesi söylenebilir. Matris malzemesinin sertlik değerinin deforme edilmemiş numunelerde birbirine yakın olması ise adhesif aşınma izlerinin deforme edilmemiş tüm numunelerde ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

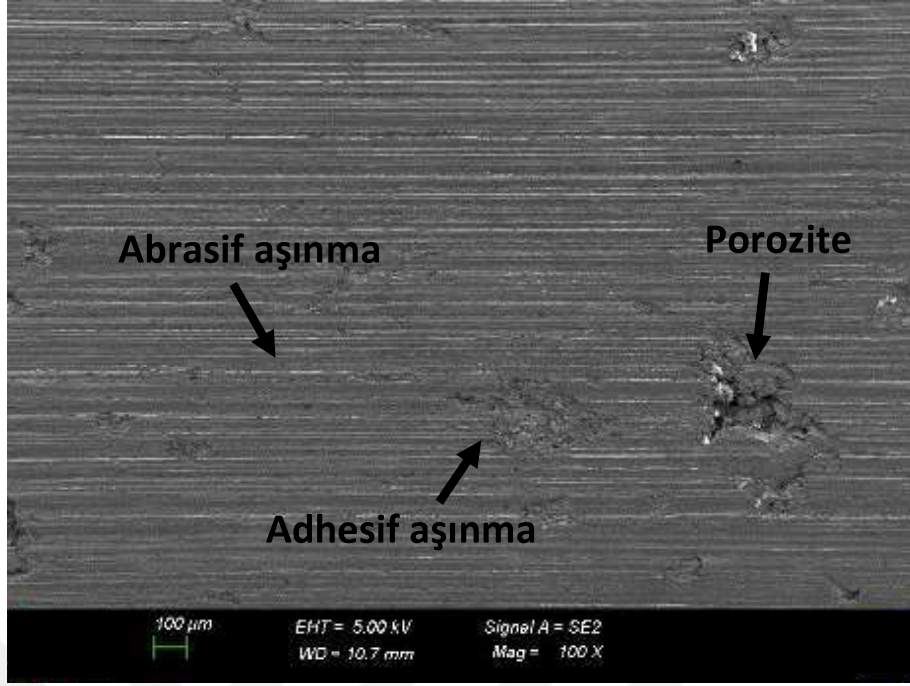
Deforme edilmiş numunelerde plastik deformasyon sonucu meydana gelen deformasyon sertleşmesi ile hem aşınma oluklarının incelendiği hem de adhesif bölgelerinin azaldığı görülmüştür. Bu numunelerde aşınma kayma alanının düşük olduğu pürüz tepelerinde yüksek kayma gerilmelerinin meydana gelmesiyle başlamaktadır. Bu nedenle pürüz tepelerinde başlayan aşınmayla birlikte aşınma izleri görülmekte iken aşınmanın gerçekleşmediği bölgelerde de pim ve bilya izlerine rastlanmıştır.



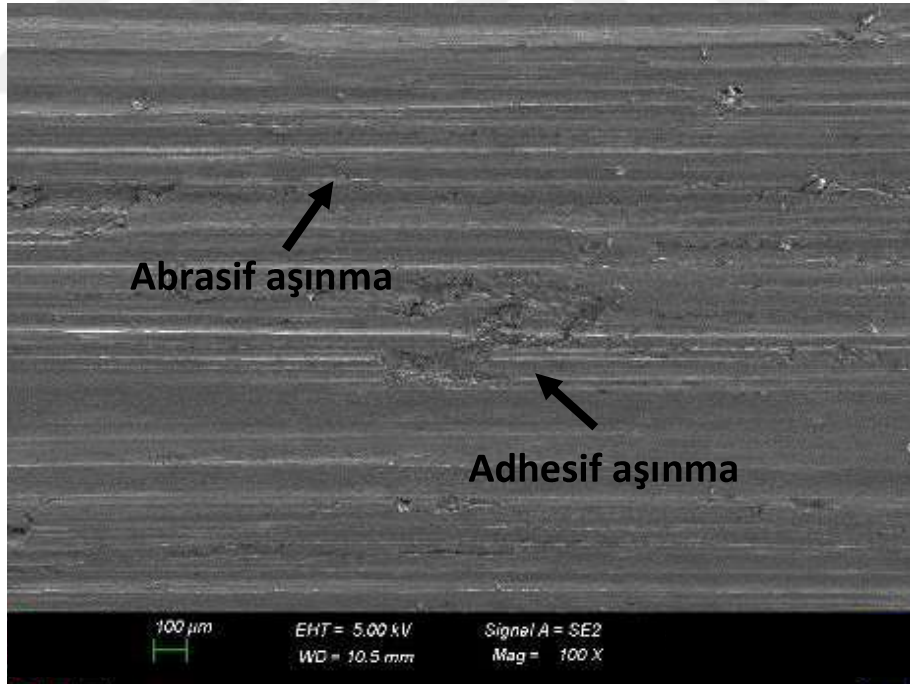
Şekil 6.58 SiC takviyesi içermeyen dövülmemiş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



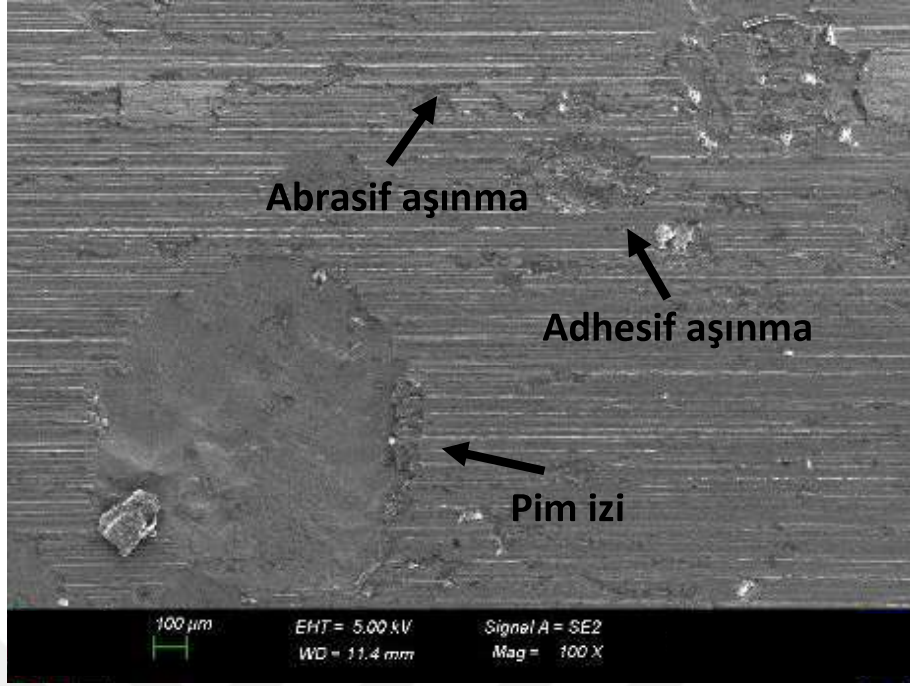
Şekil 6.59 SiC takviyesi içermeyen ultrasonik dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



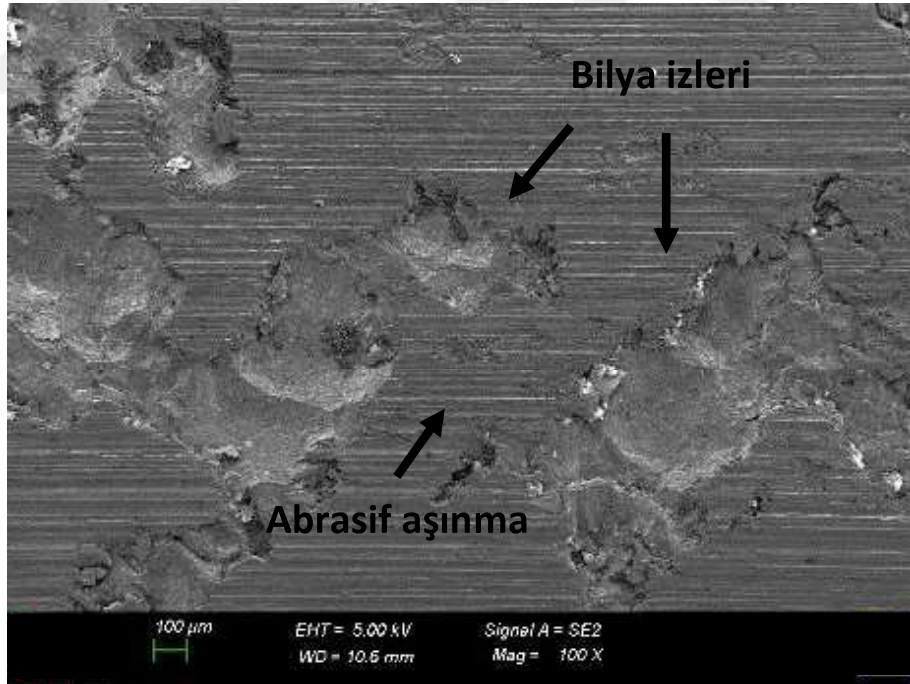
Şekil 6.60 SiC takviyesi içermeyen bilyalı dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



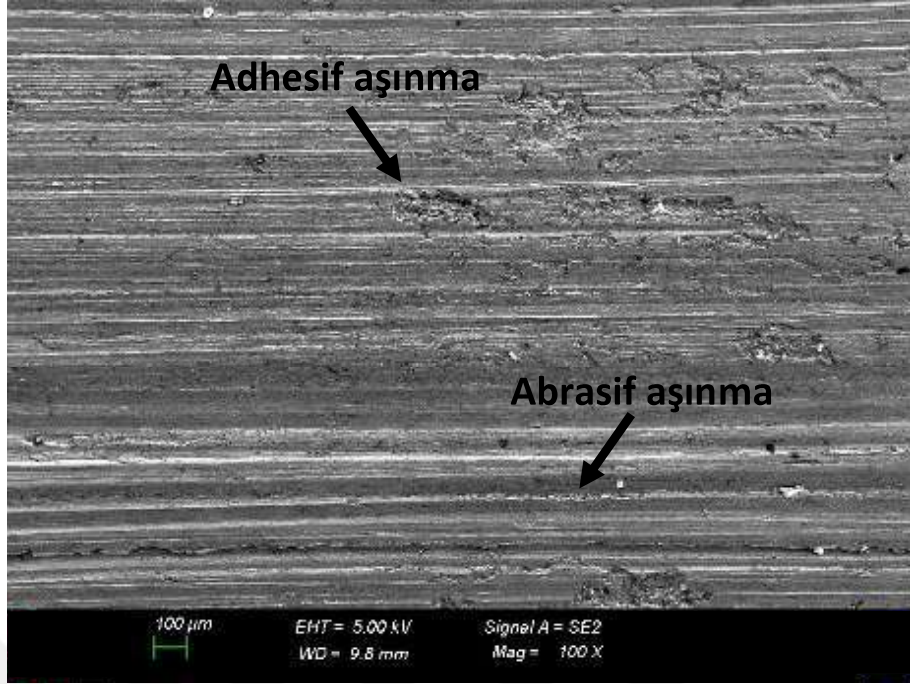
Şekil 6.61 %5 oranında SiC takviyesi içeren dövülmemiş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



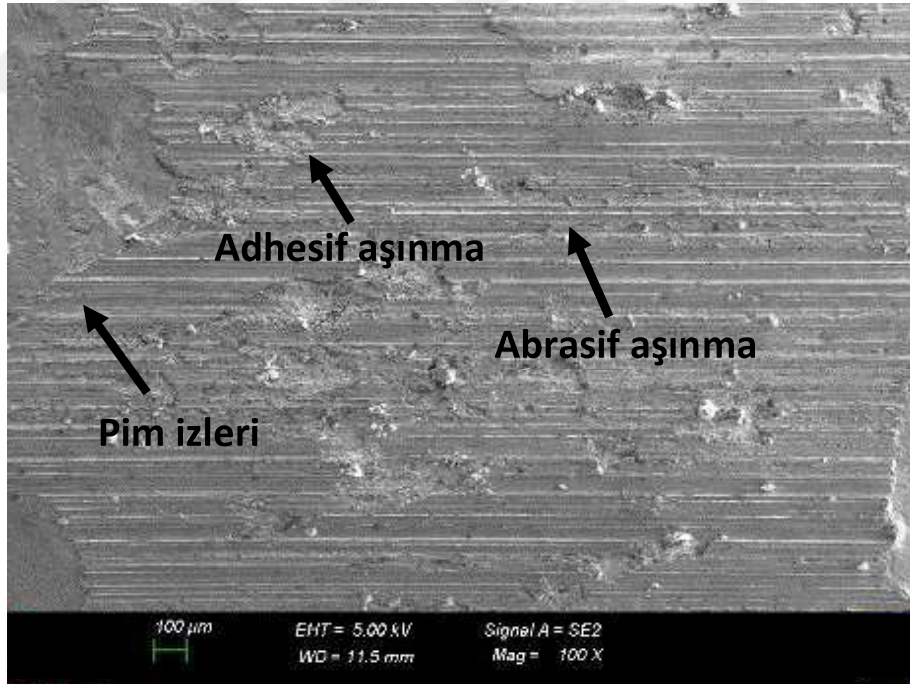
Şekil 6.62 %5 oranında SiC takviyesi içeren ultrasonik dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



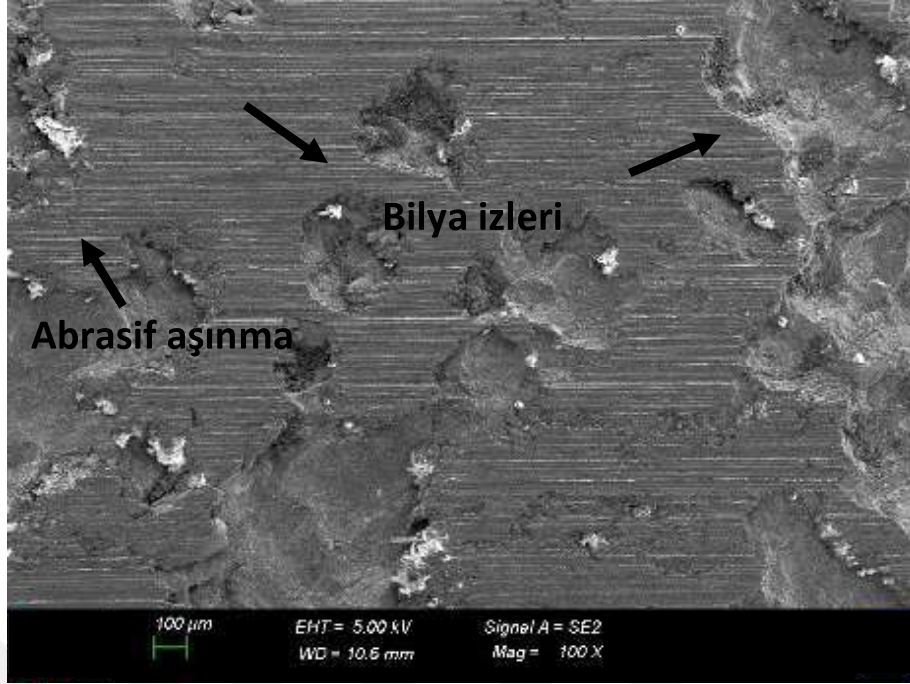
Şekil 6.63 %5 oranında SiC takviyesi içeren bilyalı dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



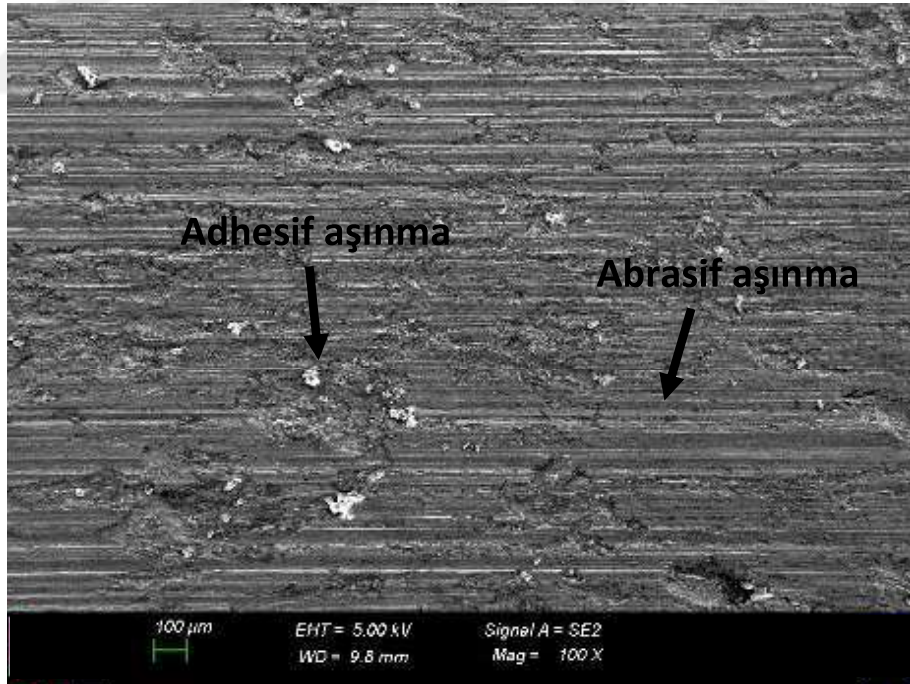
Şekil 6.64 %10 oranında SiC takviyesi içeren dövülmemiş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



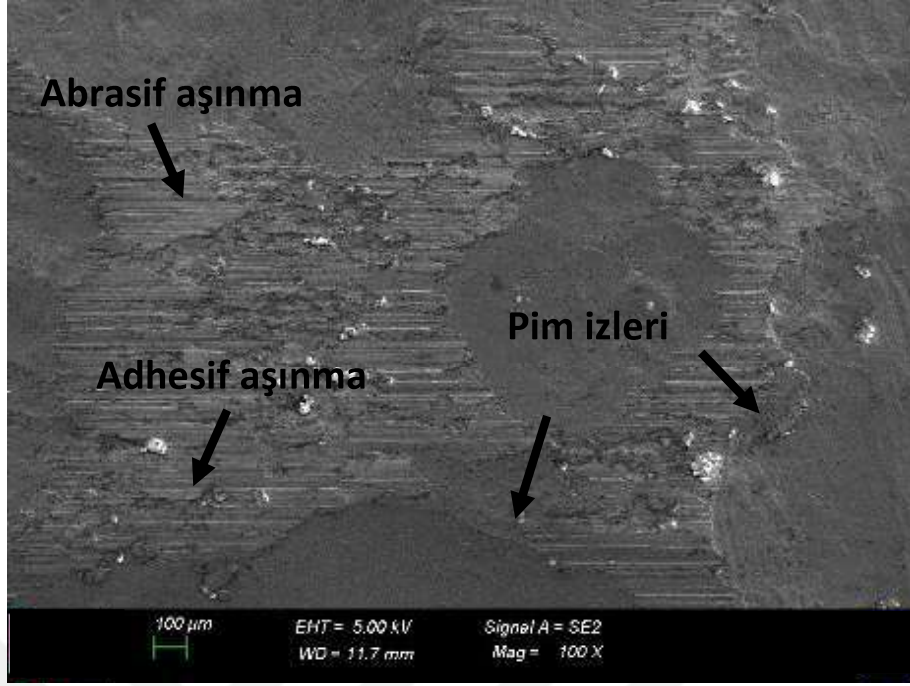
Şekil 6.65 %10 oranında SiC takviyesi içeren ultrasonik dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



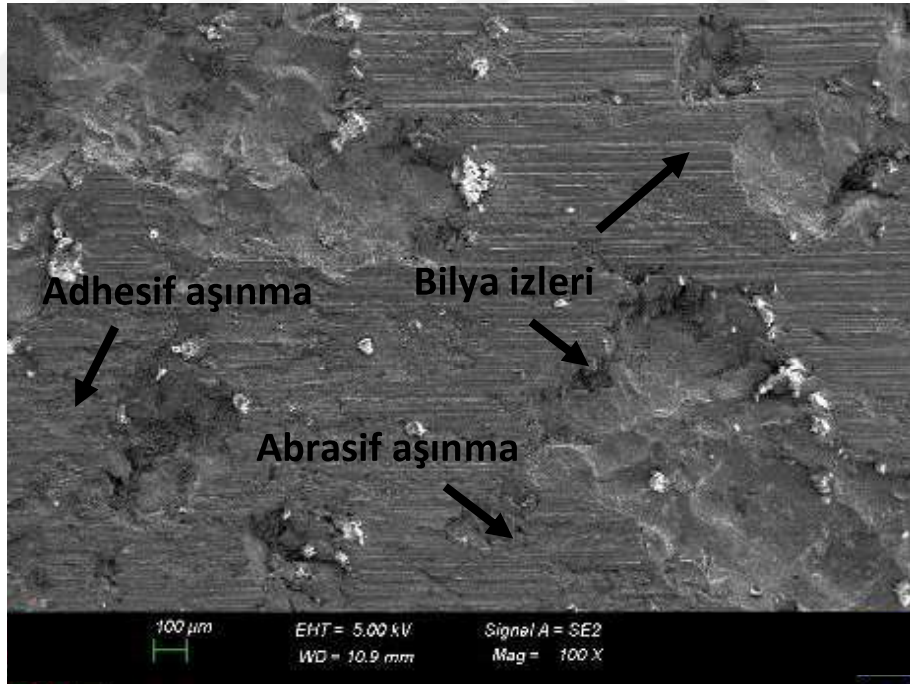
Şekil 6.66 %10 oranında SiC takviyesi içeren bilyalı dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



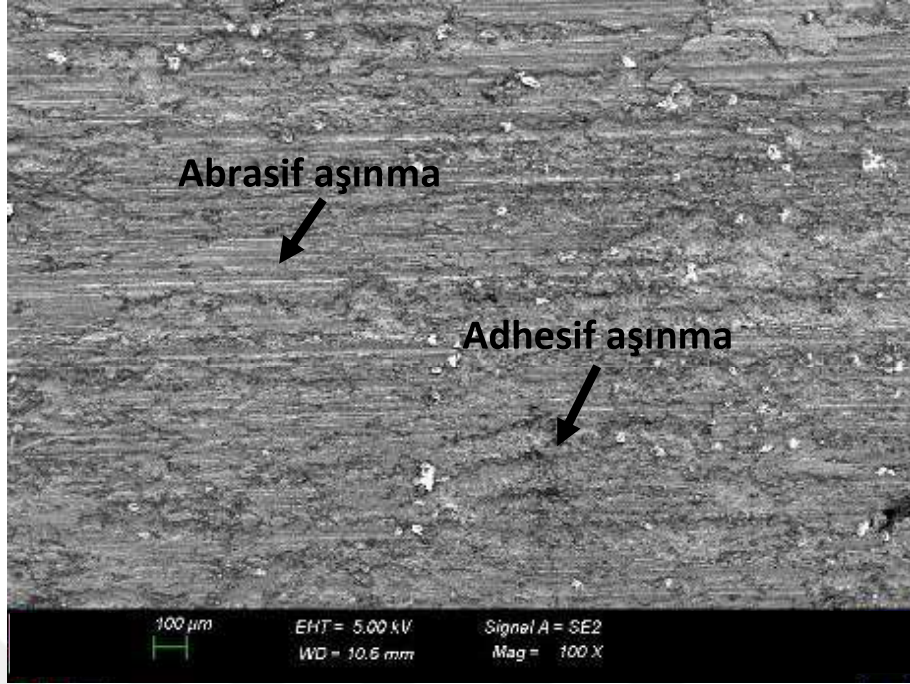
Şekil 6.67 %15 oranında SiC takviyesi içeren dövülmemiş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



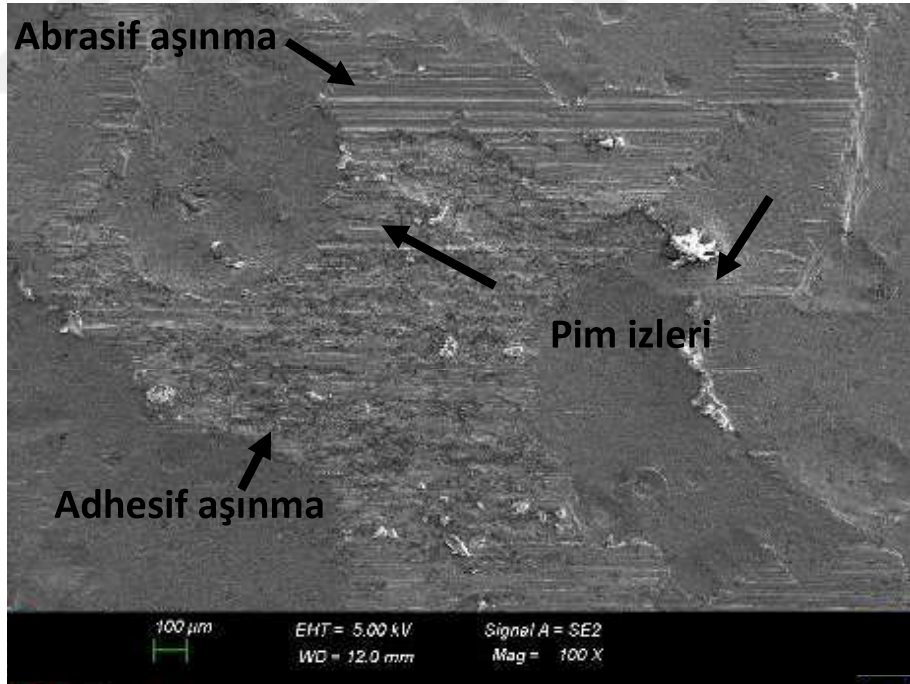
Şekil 6.68 %15 oranında SiC takviyesi içeren ultrasonik dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



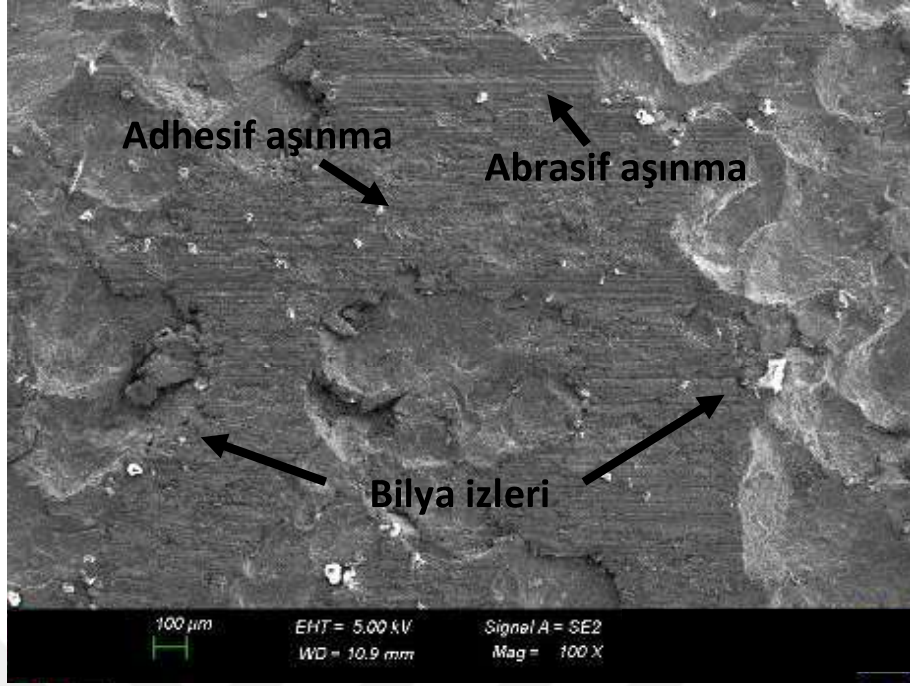
Şekil 6.69 %15 oranında SiC takviyesi içeren bilyalı dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



Şekil 6.70 %20 oranında SiC takviyesi içeren dövülmemiş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



Şekil 6.71 %20 oranında SiC takviyesi içeren ultrasonik dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları



Şekil 6.72 %20 oranında SiC takviyesi içeren bilyalı dövülmüş numune yüzeyinde meydana gelen aşınma olukları

BÖLÜM YEDİ

SONUÇLAR

Bu çalışmada karıştırmalı döküm yöntemi ile farklı kütleli oranlarda SiC takviyesi içeren metal matrisli kompozit malzemeler üretilmiş ve bu kompozitler üzerine “Bilyalı Dövme” ve “Ultrasonik Dövme Yöntemi” uygulandıktan sonra numunelerin yüzey özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneysel incelemeler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Döküm işlemleri sonucunda yapıda artan SiC takviye oranıyla birlikte porozite oluşumunun da arttığı görülmüştür.
- Uygulanan dövme işlemleri numunelerin yüzeylerinde plastik akış sonucunda pürüzlülük artışına sebep olmuşlardır. Pürüzlülük değerleri incelendiğinde ise ultrasonik dövme yönteminin bilyalı dövme işlemine kıyasla yüzeyde daha az miktarda pürüzlülük artışına sebep olduğu gözlemlenmiştir.
- Numunelerin mikro yapıları incelendiğinde tüm numunelerde Mg_2Si intermetalik fazının oluştuğu gözlemlenmişken numunelerin içerisindeki SiC takviye oranının artmasıyla da oluşan partikül kümelenmeleri ve porozitenin arttığı gözlemlenmiştir.
- Dövme işlemlerinin etkisiyle numunelerin yüzey kısımlarındaki SiC partiküllerinin parçalandığı görülmüştür. Matris malzemesinde ise bilyalı dövme ve ultrasonik dövme işlemlerine ait karakteristik tane yönelmelerine rastlanmıştır.
- Numunelerin XRD grafikleri incelendiğinde mikro yapılarda rastlanan Mg_2Si fazına ait pike rastlanmıştır. Ayrıca dövme işlemleri ile deforme edilen numunelerin XRD grafiklerinde deformasyonun ve tane incelmesinin bir etkisi olarak pik genişliklerinin arttığı görülmüştür. Bu artış bilyalı dövme işleminde ultrasonik dövme yöntemine kıyasla daha fazla olmuştur.
- Yapılan çekme testleri sonucunda en yüksek dayanıma sahip numunenin %20 oranında SiC içeren numune olduğu görülmüştür.

- Uygulanan dövme işlemleri numunelerin çekme dayanımlarının artmasına neden olmuşken yapı içerisindeki SiC takviye miktarının artması bu dayanımın dövme işlemleri ile yüksek oranda artışına engel olmuştur.
- Makro sertlik testleri sonucunda en yüksek sertliğe sahip numunenin %20 oranda SiC içeren numune olduğu görülmüştür.
- Mikro sertlik testleri incelendiğinde ise deformasyon sonucunda numunelerin yüzey kısımlarındaki tane incelmeleri ve pekleşmeden dolayı sertlik artışının meydana geldiği görülmüştür. Numunelerin yüzeylerinde meydana gelen sertlik her iki yöntemde de birbirine yakın iken bilyalı dövme yöntemi ultrasonik dövme yöntemine kıyasla daha kalın bir tabakada sertlik artışına sebep olmuştur.
- Aşınma testleri sonucunda SiC takviye miktarının artışının numunelerin aşınma dayanımlarını iyileştirdiği gözlemlenmişken bu direncin dövme yöntemleriyle daha da arttığı görülmüştür. Bilyalı dövme yöntemi ve ultrasonik dövme uygulandıktan sonra numunelerin aşınma dirençleri karşılaştırıldığında ise bilyalı dövme yönteminin daha üstün olduğu görülmüştür.
- Aşınma izleri taramalı elektron mikroskobu ile incelendiğinde ise tüm numunelerde aşınma tipinin abrazif aşınma ve adhezif olduğu görülürken hem yapıdaki SiC takviye oranının artmasıyla hem de dövme işlemleriyle daha ince aşınma oluklarının meydana geldiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Akın, G. (2006). *Toz metalürjisi yöntemiyle alüminyum matrisli bor karbür takviyeli kompozitlerin üretilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Aktaş, B. (2018). *Alüminyum metal matrisli malzemelerde darbe dayanımı araştırmalarının incelenmesi*. Yüksek Lisans Dönem Projesi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- Akyıldız, H. K. (1998) *Bilyalı dövmenin Fe + %2 Cu + %0,5 C toz metal çeliğin yorulma davranışına etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Alkan, Z., Varol, R. ve Selver, R. (2016). Bilyeli dövme uygulanmış AA1050 alüminyum malzemenin metalografik incelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20 (3), 524-529.
- Ay, İ. ve Sakin, R. (1998). Kumlama ile parça temizleme ve bilyalı dövme prosesi. *Makina & Metal Teknolojisi*, 79, 68-72.
- Balasubramanian, M. (2013). Composite materials and processing. *Metal matrix composites* içinde (267-354). ABD: CRC Press.
- Bulut, M. (2014). *Türkiye’de kompozit malzeme üretimi ve kompozit malzeme sektörünün genel değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Callister, W. D. Jr. (2006). Composites. *Material science and engineering – an introduction* (7. Baskı) içinde (578-619). ABD: John Wiley & Sons, Inc.

- Callister, W. D. Jr. (2006). Dislocation and strenghtening mechanisms. *Material science and engineering – an introduction* (7. Baskı) içinde (175-206). ABD: John Wiley & Sons, Inc.
- Chawla, N. ve Chawla, K. K. (2013). Metal matrix composites. *Composite materials – science and engineering* (3. Baskı) içinde (197-245). ABD: Springer.
- Chitra, S., Ojha, S. N. ve Singh, J. K. (2016). Microstructural evolution of aluminum A356 alloy. *International Conference on Breakthrough in Engineering, Science & Technology*, 3 (3), 159-161.
- Design, S. F., ve Evaluation Committee. (1991). SAE Manual on Shot Peening (SAE HS-84). *Society of Automotive Engineers, Inc.*
- Djurdjevic, M. B., Manasijevic, S., Odanovic, Z., ve Dolic, N. (2013). Calculation of liquidus temperature for aluminum and magnesium alloys applying method of equivalency. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 1-8.
- Evci, C. (2009). *Seramik kompozit zırh sistemlerinin darbe ve balistik özelliklerinin belirlenmesi*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Güven, Ş. Y. (2011). Toz metalürjisi ve metal köpükler. *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 1 (2), 22-28.
- Ibrahim, I. D., Jamiru, T., Sadiku, R. E., Kupolati, W. K., Agwuncha, S.C. ve Ekundayo, G. (2015), The use of polypropylene in bamboo fibre composites and their mechanical properties – A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 34 (16), 1347-1356.

- Jiang, W., Fan, Z., Liao, D., Liu, D., Zhao, Z. ve Dong, X. (2011). Investigation of microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloy produced by expendable pattern shell casting process with vacuum and low pressure. *Materials & Design*, 32 (2), 926-934.
- Kahraman, F., Yolcu, C. ve Kahraman, A. D. (2016). Ultrasonik darbe yöntemi (UDY) ile kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımının iyileştirilmesi. Meran, C., Korkmaz, E., Yurtseven, R., Özenç, M., Asan, B. T., Ersan, Ç. ve Akdoğan, E. (Ed.), 16th International Materials Symposium Proceedings içinde (1776-1783)
- Kainer, K. U. (2006). Basics of metal matrix composites. K. U. Kainer, (Ed.), *Metal matrix composites, custom-made materials for automotive and aerospace engineering* içinde (1-54). Almanya; WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.
- Kalemtaş, A. (2014). Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. *Putech & Composites*, 22, 18-30.
- Karademir, I., Ünal, O., Ateş, S., Gökçe, H. ve Gök, M. S. (2016). Effect of severe plastic deformation on wear properties of aluminum matrix composites. *Acta Physica Polonica A*, 131, 487-489.
- Krylov, N. A., ve Polischuk, A. M. (1970). The use of ultrasonic equipment for metal structure stabilization. *Basic Physics of Industrial Ultrasonic Applications, Part, 1*, 70.
- Kudryavtsev, Y., Kleiman, J. ve Iwamura, Y. (2009). Fatigue improvement of HSS welded elements by ultrasonic peening. In *Proceedings of the International Conference on High Strength Steels for Hydropower Plants, July 20-22. Takasaki, Japan.*

- Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Lugovskoy, A., Lobanov, L., Knysh, V. ve Voitenko, O. (2004). Fatigue life improvement of welded elements by ultrasonic peening. (Rapor No. XIII-2010-04), Fransa: International Institute of Welding.
- Li, G. H., Gill, H. S. ve Varin, R. A. (1993). Magnesium silicide intermetallic alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A* 24 (11), 2383-2391.
- Maawad, E. K. S. (2012). *Residual stress analysis and fatigue behavior of mechanically surface treated titanium alloys*. Doktora Tezi, Clausthal Teknik Üniversitesi, Almanya.
- Mohammadi, F., Sedaghati, R. ve Bonakdar, H. (2014). Finite element analysis and design optimization of low plasticity burnishing process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70 (5-8), 1337-1354.
- Mordvintseva, A.V. (1959). Ultrasonic treatment of welded joints for removal of residual stresses. *Trudy MVTU im. N.E. Bauman*, 45, 32-43.
- Mukhanov, I. ve Golubev, Y. M. (1966). Strengthening steel components by ultrasonically vibrating ball, *Vestn. Mashin*, 11, 52-53.
- Özben, T. (2001). *Sıkıştırma döküm yöntemiyle üretilen seramik partikül takviyeli Al-Si esaslı metal matriksli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Rakita, M., Wang, M., Han, Q., Liu, Y. ve Yin, F. (2013). Ultrasonic Shot Peening. *International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering* 5 (3), 189 – 209.
- Singh, G. (2009). *Effective simulation and optimization of a laser peening process*. Doktora Tezi, Wright State Üniversitesi, ABD.

- Sinha, A. ve Farhat, Z. (2015). A Study of porosity effect on tribological behavior of cast al a380m and sintered al 6061 alloys. *Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, 5, 1-16
- Soin, N., Anand, S. C. ve Shah, T. H. (2016). Energy Harvesting and Storage Textiles. Horrocks, A. R. ve Anand, S. C. (Ed.), *Handbook of Technical Textiles* içinde (s. 357-393). ABD: Woodhead Publishing
- Soltani, S., Khosroshahi, R. A., Mousavian, R. T., Jiang, Z. Y., Boostani, A. F. ve Brabazon, D. (2017). Stir casting process for manufacture of Al–SiC composites. *Rare Metal*, 36 (7), 581-590.
- Sönmez, M. (2009). *Polimer matrisli kompozitlerin endüstri ürünleri tasarımında önemi ve geleceği: Türkiye’den dört örnek firma üzerine bir inceleme*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Srivastava, M., Tripathi, R., Hloch, S., Chattopadhyaya, S., ve Dixit, A. R. (2016). Potential of using water jet peening as a surface treatment process for welded joints. *Procedia Engineering*, 149, 472-480.
- Statnikov, E. Sh. (2004). *Physics and mechanism of ultrasonic impact treatment*. (Rapor No. XIII-2004-04). Rusya: International Institute of Welding.
- Statnikov, E. Sh., Korolkov, O. V.ve Vitzayev, V. N. (2006). Physics and mechanism of ultrasonic impact. *Ultrasonics*, 44, e533-e538.
- Statnikov, E. Sh. ve Muktepavel, V. O. (2013). Technology of ultrasound impact treatment as a means of improving the reliability and endurance of welded metal structures. *Welding International*, 17 (9), 741-744.

Uygur, İ.ve Saruhan, H. (2004). Alüminyum esaslı metal matrisli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri. *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1), 167-174.

Ünal, O. (2011). *Bilyalı dövme işleminin tane boyutuna etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Bartın.

Yuan, X., Sun, Y., Li, C. ve Liu, W. (2017). Experimental investigation into the effect of low plasticity burnishing parameters on the surface integrity of TA2. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88 (1-4), 1089-1099.

Zulfia, A., Zhakiah, T., Dhaneswara, D. ve Sutopo. (2017). Characteristics of Al-Si-Mg reinforced SiC composites produced by stir casting route. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 202.