T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN KAM MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Tezi Hazırlayan
Afşın Alper CERİT

Tezi Yöneten
Prof. Dr. M. Baki KARAMIŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Mart 2010
KAYSERİ

T.C.
ERCİYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN KAM MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Tezi Hazırlayan
Afşın Alper CERİT

Tezi Yöneten
Prof. Dr. M. Baki KARAMIŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FBT07-55) ve TÜBİTAK (106M021) tarafından desteklenmiştir

Mart 2010
KAYSERİ

Prof. Dr. Mehmet Baki KARAMIŞ danışmanlığında **Afşın Alper CERİT** tarafından hazırlanan **"Metal Matrisli Kompozitlerin Kam Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

12/03/2010

JÜRİ :

Başkan : Prof. Dr. M. Kemal APALAK

Üye : Prof. Dr. M. Baki KARAMIŞ

Üye : Prof. Dr. Sedat ÖZDEN

Üye : Doç. Dr. Burhan SELÇUK

Üye : Yrd. Doç. Dr. Fehmi NAİR

ONAY :

Bu tezin kabülü Enstitü Yönetim Kurulunun 23/03/2010 tarih ve 2010/12-03 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

23 / 03 / 2010

T.C.

Prof. Dr. Nusret AYYILDIZ

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

"Metal Matrisli Kompozitlerin Kam Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması" konulu tez çalışmasının seçiminde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. M. Baki KARAMIŞ'a teşekkür ederim.

Üretim, analiz ve değerlendirme aşamalarında her türlü yardımı yapan, zaman harcayan, emek veren, tecrübesini paylaşan hocam Yrd. Doç. Dr. Fehmi NAİR'e, bilgisayar analizleri ve tezin yazılması safhalarında yardım eden arkadaşım Arş. Gör. Mustafa YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Tezi maddi olarak destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK, Proje No: 106M021) ile Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (FBT07-55) teşekkür ederim.

Tez çalışması boyunca bana verdiği maddi-manevi destekten, göstermiş oldukları sabır ve anlayıştan dolayı değerli aileme teşekkür ederim.

METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN KAM MALZEMESİ OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Afşın Alper CERİT
Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi, Mart 2010
Tez Danışman : Prof. Dr. M. Baki KARAMIŞ

ÖZET

Bu çalışma kapsamında, temel olarak motor kamlarının alüminyum esaslı seramik takviyeli kompozitten imalatı amaçlanmıştır. Kam elemanı malzeme özellikleri bakımından üstün tribolojik ve mekanik özellikler gerektirirken, üretim şartları bakımından da özel bir imalat süreci gerektirir. Diğer taraftan dinamik kuvvetlerin etkisi altında çalıştığından diğer durağan parçalara göre daha fazla enerji tüketir ve bu nedenle hafiflik bu parça için önemli bir parametredir. Metal Matrisli Kompozitlerin (MMK) benzer değişik uygulama alanlarında üstün tribolojik ve mekanik özellikler sergilemesi ve üretim yönteminin diğer kompozitlerle mukayese edildiğinde kolay ve ucuz olması başlıca tercih sebebidir.

Bu çalışmada iki temel ana hedef öngörülmüştür. Birincisi metal matrisli kompozit (MMK) esas olmak üzere; karıştırmalı döküm (KD), toz metalürjisi (TM), ekstrüzyon teknikleriyle kam üretimi, ikinci aşama ise üretilmiş numune kamların yüzey ve tribolojik özelliklerinin test edilerek kam elemanı olarak uygulanabilirliğinin belirlenmesidir. Metal Matrisli Kompozitlerin (MMK) yukarıda belirtilen tekniklerle üretilmesi aşamasında; matris malzemesi olarak seçilen farklı formdaki (toz, kütük) AA2124 alaşımı farklı tane boyutlarındaki seramikler ile (SiC_p, Al_2O_{3p}, B_4C_p) takviyelendirilerek kompozit üretilmiştir. Elde edilen tüm numunelerin metalografik incelemeleri EDX, XRD ve SEM analizleriyle değerlendirilmiş, sertlikleri ve mikro yapı özellikleri belirlenmiştir.

Üretilen numunelerin disk üzerinde pim prensibine dayalı üniversal sürtünme-aşınma deney tesisatında sürtünme ve aşınma davranışları belirlenmiş ve bu sonuçlardan yola çıkarak üretim parametreleri üzerinde nihai kararlara varılmış, malzeme seçimi yapılmış ve gerçek boyutlarda kam profili üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen kam elemanları daha sonra gerçek çalışma şartlarına uygun aşınma

makinesinde test edilmiştir. Aşınma açısından performans testleri sonunda numunelerin yüzey özellikleri ve aşınma mekanizmaları değerlendirilerek imal edilen kompozitlerin, küresel grafitli dökme demire göre nasıl davrandığı konusundaki bulgular yorumlanmıştır.

Alınan sonuçlara göre, AA2124 alüminyum tozlarının %30 hacim oranında $2\mu m$'lik SiC partiküllerıyle takviyelendirilip imal edilen kompozit kam, küresel grafitli dökme demir kam aşınma davranışını %77 oranında sağlamıştır.

Bu çalışma, tek bir motor parçasının üretimi üzerine yoğunlaşmakla birlikte çalışmanın esasını tribomalzeme üretimi oluşturmaktadır. Elde edilen sonuçlar benzer şartlarda çalışan diğer motor ve konstrüksiyon elemanları için yol gösterici olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Metal Matrisli Kompozitler, Kamlar, Sürtünme-Aşınma, Otomotiv Malzemeleri, Seramik Takviye

AN INVESTIGATION ON USABILITY OF METAL MATRIX COMPOSITES AS A CAMSHAFT MATERIAL

Afşın Alper CERİT
Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences
Ph.D. Thesis, March 2010
Thesis Supervisor: Prof. Dr. M. Baki KARAMIŞ

ABSTRACT

In this study, main purpose is to manufacture the cams on the cam shaft of an automobile from Metal Matrix Composites using Al alloys as matrix material and some ceramics as reinforcements. Cams as engine parts should have very good tribological and mechanical properties in material, while they need some special manufacturing process. An addition to this, they are not only light in weight because of their movement consuming energy but also they must be strength to the dynamic loading according to static ones. It gives courage to us to experiment in this subject that Metal Matrix Composites (MMCs) show very good tribological and mechanical properties in some application areas similar to working conditions of a cam. They have also easier and more economical manufacturing process than those of other composites.

There are two main stages in this study. The first stage is to manufacture the cam as metal matrix composites (MMCs) by stirred casting (SC), powder metallurgy (PM), extrusion. Second one is to determine the tribological and surface properties of manufactured cams and to determine whether they can be used as a cam or not. For manufacturing MMCs cams by the methods mentioned above, different types of 2124 alloys (powder, block) were used as matrix material. These materials were reinforced by ceramics in different size such as a SiC_p, Al_2O_{3p}, B_4C_p. These sample surfaces were examined by EDX, SEM and XRD methods and their hardness and microstructures were determined.

The friction and wear behaviours of the composite cams were determined by experiments carried out by universal test machine working on pin-on-disc configuration and results were obtained from the tests would be evaluated at the both points as material and manufacturing methods. For the final decision, the

cams manufactured with optimum conditions were tested by a simulation system under real working conditions. According the results of the wear performance tests, surface properties and wear mechanism of the cam profiles were determined by the comparison of composite and cast iron cam profiles.

As a result of this study, while the composite cam profile made from AA2124/SiC $2\mu m/30$ has the best specific wear resistance on the other hand when it was compared with to the sfero iron cam profile, the general tribological performance point of view, the composite cam has a performance percentage of 77%.

Although this study is focused on the manufacturing of cam which is a engine element, it aims to show the way to guide for some engine parts can be able to manufactured from MMCs composite material for tribological requirements.

Keywords: Metal Matrix Composites, Cams, Friction-Wear , Automotive Materials, Ceramic Reinforcement.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY i

TEŞEKKÜR ii

ÖZET iii

ABSTRACT v

TABLOLAR LİSTESİ x

ŞEKİLLER LİSTESİ xi

1. BÖLÜM

GİRİŞ 1

1.1. Giriş 1

1.2. Konunun Önemi 4

1.3. Tezin Amacı 5

2. BÖLÜM

KAM MİLLERİ 7

2.1. Kam Milinin Çalışma Koşulları ve Özellikleri 7

2.2. Dizayn Prensipleri 10

2.3. Ticari Uygulamalar 10

2.4. Kam Mili Özellikleri 11

2.4.1. Kam Mili Terimleri 11

2.4.2. Kam Mili Malzemeleri 17

2.4.3. Yüzey Sertleştirme 19

2.5. Kam İzleyici Malzemeleri 20

2.6. Literatür Araştırması 21

3. BÖLÜM

METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER 32

3.1. Giriş 32

3.2. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi 36

3.2.1. Takviye Elemanı Seçimi 36
3.2.2. Matris Malzemesinin Seçimi 37
3.3. Üretim Teknikleri 38
3.3.1. Karıştırmalı Döküm Tekniği 39
3.3.2. Toz metalürjisi 41
3.3.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Extrüzyonu 51
3.3.4. MMK' lerin Mühendislik Alanındaki Uygulamaları ve Teknolojik Açıdan Önemi 54
4. BÖLÜM
DENEYSEL ÇALIŞMA 60
4.1. Gereç ve Yöntem 60
4.1.1. Alt Yapı Çalışmaları 60
4.1.1.1. Hidrolik Pres Modifikasyonu 60
4.1.1.2. Kalıplar 62
4.1.1.3. Malzeme 64
4.1.1.4. Tozların Karıştırılması 65
4.1.1.5. Pin-on-Disk Aşınma Deney Sistemi 65
4.1.1.6. Kam Profili Aşınma Test Cihazı 66
4.1.1.7. İmalat Sistematiği 72
4.1.1.7.1. Uygun İmalat Şartlarının Belirlenmesi 72
4.1.1.7.2. İmalat Yöntemleri 73
4.2. İmalat ve Testler 76
4.2.1. Metal Matrisli Kompozit Ön Deneme İmalat ve Testleri 76
4.2.1.1. AA1080 Matrisli SiC Takviyeli Kompozit İmalatı ve Testleri (sertlik, aşınma) 76
4.2.1.2. AA2124 Matrisli SiC Takviyeli Kompozit İmalatı ve Testleri (sertlik, aşınma, imalat şartları) 86
4.2.1.3. İmalat Şartlarının Kompozit Özelliklerine Etkisi (sıcaklık, basınç) . . 98
4.2.2. Kam Profili İmalatı ve Testleri 130

4.2.2.1. Toz Metalürjisi Yöntemiyle Kam Profili İmalatı ve Testleri 132
4.2.2.2. Kam Profili Performans Testleri 140
4.2.2.3. Ekstrüzyon Kam Profili İmalatı 182
4.2.2.4. Karıştırmalı Döküm Kam Profili İmalatı 189
4.2.3. Elde Edilen Sonuçları İyileştirme Çalışmaları 190
4.2.3.1. Grafit Katkısının İncelenmesi 190
4.2.3.2. Kompozitlere Çökeltme Sertleştirmesi İşleminin Uygulanması 193
5. BÖLÜM
SONUÇLAR ve ÖNERİLER 204
5.1. Araştırmada Elde Edilen Önemli Sonuçlar 204
5.2. Araştırma Sonuçları Dikkate Alınarak Yapılabilecek Öneriler 207
KAYNAKLAR 209
EKLER 222
ÖZGEÇMİŞ 238

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Kam mili malzemeleri. 17

Tablo 2.2. Kam mili ve kam izleyici malzemeleri. 21

Tablo 2.3. Seramik takviye malzemelerinin bazı mekanik özellikleri. 31

Tablo 3.1. Al, SiC, MMK'in bazı mekanik özellikleri. 34

Tablo 3.2. Seramik takviye malzemelerinin bazı mekanik özellikleri. 37

Tablo 3.3. Alternatif biyel kolu malzemelerinin bazı özellikleri. 51

Tablo 3.4. Otomotiv endüstrisinde metal matrisli kompozitlerin potansiyel uygulamalarına bazı örnekler. 57

Tablo 4.1. AA2124 alüminyumun kimyasal bileşimi. 86

Tablo 4.2. İmalat şartları. 87

Tablo 4.3. Kam profili özellikleri ve imalat şartları. 130

Tablo 4.4. Kam performans testlerine tabi tutulacak kompozit kamların imalat şartları. 140

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Bir araçta enerji tüketen unsurların dağılımı. 2

Şekil 1.2. Bir araçta ağırlık dağılımı. 2

Şekil 1.3. Bir araçtaki malzeme kullanımının yıllara göre değişimi. 3

Şekil 2.1. Kam profili geometrisi ve kısımları. 12

Şekil 2.2. Supap ve yuvası. 12

Şekil 2.3. Kam profili ve kaldırma yüksekliği ilişkisi. 13

Şekil 2.4. Kam profili itme miktarı, açıklık süre bağlantısı. 14

Şekil 2.5. Ara dilim. 14

Şekil 2.6. İticiler arasındaki potansiyel farkı. 15

Şekil 2.7. Kam yüzeyi-itici teması. 15

Şekil 2.8. Kam profili tiplerli. 16

Şekil 2.9. Lamel grafit yapı ve boyutları. 18

Şekil 2.10. Çil döküm sırasında oluşan yapılar a) karbür ve martenzit b) karbür, martenzit, grafit. 18

Şekil 2.11. Sem görüntüleri a) fosfat kaplama b) ferrox kaplama. 20

Şekil 2.12. Kam milinin motor üzerinde şematik gösterimi. 22

Şekil 2.13. Kam millerinde oluşan kırılma yüzeyi. 22

Şekil 2.14. Küresel grafit dökme demir iç yapısı. 23

Şekil 2.15. Üretim sırasında meydana gelen boşluklar. 23

Şekil 2.16. Kam mili modellemesinde sınır şartları ve yükler. 23

Şekil 2.17. Maksimum gerilme bölgesi. 24

Şekil 2.18. Kam profili üzerine gelen yükler. 24

Şekil 2.19. Aşınma öncesi ve sonrasındaki profiller. 25

Şekil 2.20. Meydana gelen aşınmaların miktarı. 25

Şekil 2.21. Numunelerde meydana gelen kütle kayıplarının devire göre değişimi. 25

Şekil 2.22. Kam profili üzerindeki bölgeler ve aşınma yüzeyleri. 26

Şekil 2.23. Numunelerin yüzey sertlik değerleri. 27

Şekil 2.24. Numunelerde meydana gelen kütlesel kayıplar. 27

Şekil 2.25. Eğme ve burulma sonrasında oluşan hasar bölgesi. 28

Şekil 2.26. Kam mili sertlik değerleri 29

Şekil 2.27. Boru ve Kam profili birleştirme aparatı. 29

Şekil 2.28. Boru üzerine dizilmiş kam profilleri. 30

Şekil 2.29. Kam millerlindeki ağırlık değişimi. 30

Şekil 3.1. Karıştırmalı döküm tekniğinin temel prensibi 40

Şekil 3.2. Toz metalürjisinin kalitesini etkileyen faktörler. 41

Şekil 3.3. Toz tane boyutu analizi. 44

Şekil 3.4. Taneler arası yapışma. 45

Şekil 3.5. Toz karıştırma sistem çeşitleri. 46

Şekil 3.6. Karışım homojenliği. 47

Şekil 3.7. Kalıp içerisinde sıkıştırılan toz davranışı. 48

Şekil 3.8. Toz metalürjisi kalıp ve sıkıştırma. 48

Şekil 3.9. Tozların sinterleme sırasındaki bağlanma mekanizması. 50

Şekil 3.10. MMK 'den TM ile üretilmiş biyel kolu. 51

Şekil 3.11. Ekstrüzyon prensibinin şematik gösterimi 52

Şekil 3.12. Temel ekstrüzyon tipleri 52

Şekil 3.13. Ekstrüzyon sırasında malzemenin kalıp içerisinden akış şematiği. . 53

Şekil 3.14. MMK ürünler, a) Genel konstrüksiyon elemanları, b) Aşınma dirençli elemanlar. 55

Şekil 3.15. MMK' den üretilmiş motor bloğu 57

Şekil 3.16. Çeşitli motor malzemelerinin çalışma sıcaklığı ve mukavemet/ağırlık oranına göre performans haritaları. 58

Şekil 3.17. Jet Motorlarında ve otomobillerde kullanılan ve ileriki yıllarda kullanılması düşünülen malzeme. 58

Şekil 3.18. MMK 'den üretilmiş a) şaft, b) fren diski. 59

Şekil 4.1. Hidrolik pres ve ekipmanları. 61

Şekil 4.2. Zımba, kapak ve kovan yerleşimi. 61

Şekil 4.3. Dizayn edilen sistemin şematik gösterimi. 62

Şekil 4.4. Isıtıcı fırın içyapısı. 62

Şekil 4.5. Toz metalürjisinde kullanılan kalıp görünüşleri. 63

Şekil 4.6. Toz sıkıştırma kalıbı. 63

Şekil 4.7. Sıcak pres kam profili kalıpları 64

Şekil 4.8. Deneme maksatlı imal edilen AA2124 kam profili. 64

Şekil 4.9. Kalıpların (H13) ısıl işlem grafiği. 65

Şekil 4.10. Toz karıştırma ünitesi 66

Şekil 4.11. Aşınma test cihazı şematiği 67

Şekil 4.12. Gerçek şartlarda kam profili aşınma test cihazı 67

Şekil 4.13. Kam profili üzerine delik delme kalıbı. 69

Şekil 4.14. Kam profili aşınma test cihazı 69

Şekil 4.15. Profil çıkartma aşamaları 71

Şekil 4.16. Ekstrüzyon Ünitesi. 73

Şekil 4.17. Billet kalıpları 74

Şekil 4.18. Ekstrüzyon kalıbı (şematik) 74

Şekil 4.19. Ekstrüzyon kalıbı 75

Şekil 4.20. İmal edilen kam profilleri parça detayları. 75

Şekil 4.21. Karıştırmalı dökümle imalat. 76

Şekil 4.22. İmal edilen kompozitin genel görünüşü. 77

Şekil 4.23. AA1080/SiC 167μm/20 kompozitin makro görüntüsü. 78

Şekil 4.24. AA1080/SiC 20μm/20 kompozitte takviye elemanı dağılımı. . . . 78

Şekil 4.25. Hacim oranı-HRT15 sertlik değişim grafikleri 79

Şekil 4.26. Kompozit iç yapısındaki boşluk hataları. 80

Şekil 4.27. Aşınma sonrası numune makro görüntüleri(AA1080/SiC) 81

Şekil 4.28. AA1080 matrisli kompozitin aşınma sonrası makro görüntüleri . . 82

Şekil 4.29. AA1080 matrisli numunenin aşınma sonrası görüntüleri 83

Şekil 4.30. Kompozit sürtünme yüzeyindeki Fe'in tespit edildiği bölgeler . . . 83

Şekil 4.31. Sürtünme kuvveti-aşınma yolu eğrisi a) AA1080 takviyesiz b) AA1080/SiC 20μm/10. 84

Şekil 4.32. Sürtünme kuvveti-aşınma yolu eğrisi a) AA1080/SiC 20μm/20 b) AA1080/SiC 20μm/30. 84

Şekil 4.33. Sürtünme kuvveti-aşınma yolu eğrisi a) AA1080/SiC 20μm/40 b) AA1080/SiC 20μm/50. 85

Şekil 4.34. Sürtünme kuvveti-aşınma yolu eğrisi a) AA1080/SiC 20μm/20 b) AA1080/SiC 53μm/20. 85

Şekil 4.35. a) AA1080/SiC 167μm/20 b) AA1080/SiC 478μm/20 kompozit sürtünme kuvveti-aşınma yolu eğrisi. 85

Şekil 4.36. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit yüzey görüntüsü. 87

Şekil 4.37. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit sertlik değerleri. 88

Şekil 4.38. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit iç yapısı. 89

Şekil 4.39. AA2124/SiC 2μm/30 kompozitte oluşan sertlik izi ve çatlakları. . 89

Şekil 4.40. AA2124/SiC 2μm/30 partikül kümelenmesinde görülen kırılma. . 90

Şekil 4.41. AA2124/B_4C/30 sertlik değişimi 91

Şekil 4.42. AA2124/Al_2O_3/30 sertlik değişimi 91

Şekil 4.43. AA2124 takviyesiz numune sertlik değişimi 91

Şekil 4.44. AA2124 matrisli kompozitlerde sertlik değişimi 92

Şekil 4.45. Aşınma sonrasında kompozit numuneler 94

Şekil 4.46. Takviye türünün AA2124 matrisli kompozitin aşınma davranışına etkisi. 95

Şekil 4.47. Kompozit numunelerdeki aşınma direnci ve ağırlık kayıp miktarları. 95

Şekil 4.48. Farklı toz karıştırma yöntemleri kullanılarak imal edilen kompozitlerin iç yapı makro görüntüleri 96

Şekil 4.49. Şekil 4.48'deki a) A yüzeyi detayı b) B yüzeyi detayı 96

Şekil 4.50. a) Elle karıştırılan kompozit içyapısındaki SiC kümelenmesi b) Makine ile karıştırılan kompozit içyapısı (ışık mikroskop). 96

Şekil 4.51. AA2124/Al_2O_3 1μm/30 kompozit iç yapısı. 97

Şekil 4.52. AA2124/Al_2O_3 1μm/30 kompozit üzerindeki mikro sertlik izleri. . 97

Şekil 4.53. Kompozit numunelerde sinterleme sonrasında meydana gelen hasarlar. 99

Şekil 4.54. AA2124/SiC 20μm, Teorik-Gerçek Yoğunluk Değişimine (%) basıncın etkisi. 100

Şekil 4.55. AA2124/SiC 20μm, Teorik-Gerçek Yoğunluk Değişimine (%) sıcaklığın etkisi. 101

Şekil 4.56. AA2124/SiC 20μm, Teorik-Gerçek Yoğunluk Değişimine (%) hacim oranının etkisi. 102

Şekil 4.57. SiC takviyeli kompozite ait a,b) sürtünme yolu-sürtünme kuvveti c) hacim oranı-ağırlık kaybı grafiği. 103

Şekil 4.58. Alumina takviyeli kompozitin sürtünme yolu-sürtünme kuvveti grafiği. 104

Şekil 4.59. Kompozitlerin sürtünme yolu-sürtünme kuvveti grafikleri. 105

Şekil 4.60. Kompozit numunelerde meydana gelen aşınma yüzeyleri a,b) AA2124/SiC20μm/20 c,d) AA2124/B_4C 1-7μm/20. 106

Şekil 4.61. Kompozit malzeme takviye oranı-sertlik (HRT15kg) grafiği. . . . 107

Şekil 4.62. Aşınma test düzeneği. 108

Şekil 4.63. AA2124 matrisli kompozit numune yüzey görüntüleri 109

Şekil 4.64. Aşınma testi yapılacak numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri. 110

Şekil 4.65. Dökme demir ve kompozit numune yüzey sertlikleri. 110

Şekil 4.66. Sürtünme kuvveti - Aşınma yolu grafikleri. 111

Şekil 4.67. Sürtünme kuvveti - Aşınma yolu grafikleri. 112

Şekil 4.68. Sürtünme kuvveti - Aşınma yolu grafikleri. 114

Şekil 4.69. Özgül aşınmanın takviye hacim oranıyla değişimi. 115

Şekil 4.70. Aşınma deneyi sonrasında malzemelerdeki % ağırlık kaybı. 115

Şekil 4.71. Dökme demir numunesinin a) genel görünüş, b) aşınma yüzeyleri. 116

Şekil 4.72. AA2124/Al_2O_3 2μm takviyeli kompozitin a) aşınma bölgeleri, b) x detayı. 116

Şekil 4.73. AA2124/Al_2O_3 20μm ve farklı oranlarda takviyeli kompozitlerin aşınma sonrası yüzeyleri. 117

Şekil 4.74. AA2124/B_4C takviyeli kompozitlerin aşınma sonrası yüzeyleri . . 117

Şekil 4.75. AA2124/SiC takviyeli kompozitlerin aşınan yüzeyleri 118

Şekil 4.76. %30 ve farklı boyutlarda partikül takviyeli kompozitlerin aşınma yüzeyleri. 118

Şekil 4.77. AA2124/SiC 20μm/30 ve İndüksiyonla Sertleştirilmiş Dökme Demirin aynı şartlarda aşınma bölgeleri. 119

Şekil 4.78. Tane boyutunun özgül aşınma miktarına etkisi. 119

Şekil 4.79. Aşındırıcı karşı eleman (ORS® 6304) aşınmış yüzeyleri. 120

Şekil 4.80. Kompozit numunelerin aşınma sonrasındaki pürüzlülük değişimleri.120

Şekil 4.81. İnd. Sertleştirilmiş dökme demir ve karşı eleman pürüzlülük değişimi. 121

Şekil 4.82. Aşınma çiftlerinin takviye oranına bağlı pürüzlülük değişimleri. . 122

Şekil 4.83. a) AA2124/SiC 20μm/30 iç yapısı b) x noktası analizi. 123

Şekil 4.84. AA2124/SiC 53μm/30 içerisindeki kırılmış partiküller. 124

Şekil 4.85. AA2124/Al_2O_3 20-50μm/30 a) iç yapı b) bakır bölgeleri c) x bölgesi analiz. 125

Şekil 4.86. İndüksiyonla Sertleştirilmiş Dökme Demir aşınma bölgesi. 126

Şekil 4.87. AA2124/SiC 20μm takviyeli kompozit aşınma bölgeleri a) %10 b) %20 c) %30. 127

Şekil 4.88. AA2124/SiC 53μm/30 aşınma bölgesi. 128

Şekil 4.89. AA2124 Takviyesiz numune aşınma bölgesi yüzey detayları 128

Şekil 4.90. AA2124/SiC 20μm/20 aşınma bölgesi 129

Şekil 4.91. Sıcak preslemeyle imal edilen kompozit kam profil numuneleri. . . 130

Şekil 4.92. Kompozit kam profil numunelerinde takviye oranıyla sertlik değişimi. 131

Şekil 4.93. Kam profili üzerindeki bölgelerin şematik gösterimi. 131

Şekil 4.94. Kam profili hareket şematiği 133

Şekil 4.95. Kam üzerine uygulanan normal kuvvetin bölgesel dağılımı. 134

Şekil 4.96. Kompozit kam profillerinin takviye oranı – özgül aşınma miktarı grafiği. 134

Şekil 4.97. Takviyesiz kompozit kam profili (AA2124) aşınma yüzey görüntüleri 135

Şekil 4.98. Aşınmadan önce ve sonra profil 136

Şekil 4.99. AA2124/SiC 20μm/10 kompozitin aşınma sonrası görüntüleri . . 137

Şekil 4.100. AA2124/SiC 20μm/20 kompozitin aşınma sonrası görüntüleri . . 138

Şekil 4.101. AA2124/SiC 20μm/30 kompozitin aşınma sonrası görüntüleri . . 139

Şekil 4.102. Takviyesiz AA2124 kam profili. 140

Şekil 4.103. Kuru şartlar sıcaklık ölçüm düzeneği. 141

Şekil 4.104. Kuru şartlar kam profili aşınma grafikleri (F70D500S150) 143

Şekil 4.105. Kuru aşınma sonrası kam profilleri yüzey pürüzlülük değişimleri . 144

Şekil 4.106. Aşınma sırasında a) kam-rulman teması b) yığılma. 145

Şekil 4.107. Kuru şartlar aşınma sonrası AA2124/B_4C/10 kompozit kam yüzeyleri 145

Şekil 4.108. Kuru şartlar aşınma sonrası AA2124/B_4C/30 kompozit kam yüzeyleri 146

Şekil 4.109. AA2124/B_4C/30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası SEM görüntüsüleri 146

Şekil 4.110. AA2124/ B_4C /30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası kaldırma bölgesi yüzey SEM görüntüsü. 147

Şekil 4.111. AA2124/ B_4C /30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası ara bölge yüzey SEM görüntüsü. 147

Şekil 4.112. AA2124/ B_4C /30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası yüzeydeki yeniden katılaşma bölgesi a) SEM görüntüsü b) x bölgesi detay c) x bölgesi analizi. 148

Şekil 4.113. AA2124/ B_4C /30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası karşı eleman yüzey SEM görüntüsü. 149

Şekil 4.114. Kuru şartlar aşınma sonrası AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam yüzeyleri 149

Şekil 4.115. Kuru şartlar aşınma sonrası AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam tepe bölge görüntüsü 152

Şekil 4.116. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası a) indirme bölgesi SEM ve pürüzlülük b) indirme bölgesi detayı. . 153

Şekil 4.117. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası ara bölge SEM görüntüsü. 154

Şekil 4.118. Kuru şartlar aşınma sonrası AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam karşı eleman yüzeyi 155

Şekil 4.119. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası yüzey SEM görüntüsü. 156

Şekil 4.120. Kuru şartlar aşınma sonrası AA2124/SiC 20μm/20 kompozit kam yüzeyleri 156

Şekil 4.121. Yağ haznesi a) sistem görünümü b) sistem şematiği. 157

Şekil 4.122. Yağlı şartlarda 2.5 saat aşınma sonrasında aşınma grafikleri . . . 158

Şekil 4.123. Yağlı şartlarda 70 N yük, 500 d/d ve 150 dakika aşınma sonrasında numune yüzeylerinde meydana gelen yüzde pürüzlülük değişimi (F70D500S150). 159

Şekil 4.124. Yağlı şartlar aşınma sonrası AA2124/B_4C/30 kam yüzey görüntüleri 160

Şekil 4.125. Yağlı şartlar aşınma sonrası AA2124/B_4C/30 kam yüzey SEM görüntüleri 161

Şekil 4.126. Yağlı şartlar aşınma sonrası AA2124/B_4C/30 kam yüzey SEM görüntüleri 162

Şekil 4.127. Yağlı şartlar aşınma sonrası AA2124/B_4C/30 kam profili karşı eleman yüzeyi SEM görüntüleri 163

Şekil 4.128. Yağlı şartlar aşınma sonrası AA2124/SiC 20μm/20 kompozit kam yüzeyleri 164

Şekil 4.129. AA2124/SiC 20μm/30 kuru ve yağlı şartlar yüzey karşılaştırması 166

Şekil 4.130. Yağlı şartlarda sürtünme süresinin aşınmaya etkisi 167

Şekil 4.131. Yağlı şartlarda farklı deney süreleri sonrasında numunelerde ve karşı elemanlarda meydana gelen aşınma miktarları (F70D500). . 168

Şekil 4.132. Kam profili üzerine uygulanan kuvvetlerin profil üzerindeki açıya bağlı olarak değişimi. 168

Şekil 4.133. Yağlı şartlarda uygulanan yükün aşınmaya etkisi 169

Şekil 4.134. Yağlı şartlarda AA2124/SiC 2μm/20 ve AA2124/SiC 2μm/30 kamların karşılaştırılması 171

Şekil 4.135. Yağlı şartlarda farklı deney süreleri sonrasında numunelerde ve karşı elemanlarda meydana gelen aşınma miktarları (F115D500). . 172

Şekil 4.136. Yağlı şartlarda farklı deney süreleri sonrasında numunelerdeki a) aşınma oranı b) aşınma direnci c) özgül aşınma direnci (F140D500S1200). 173

Şekil 4.137. Yağlı şartlarda karşı malzemelerdeki kayıp miktarları (F140D500S1200). 174

Şekil 4.138. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam aşınma sonrası yüzey SEM görüntüleri a) tepe ve indirme bölgesi b) kaldırma bölgesi. 174

Şekil 4.139. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam aşınma sonrası yüzey SEM görüntüleri a) indirme bölgesi b) geçiş bölgesi. 175

Şekil 4.140. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam karşı eleman yüzey SEM görüntüleri a) genel görüntü ve pürüzlülük, b) aşınma izleri detayı.176

Şekil 4.141. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam karşı eleman yüzeyindeki Fe-Cr varlığı. 177

Şekil 4.142. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam karşı eleman yüzeyindeki a) SiC partikülü, b) yüzeye gömülmüş SiC partikülü c) x noktası analizi. 178

Şekil 4.143. 20 saatlik yağlı şartlarda aşınma sonrası a) KGDD kam yüzeyi b) karşı eleman yüzeyi. 179

Şekil 4.144. Tribolojik çift özgül aşınma direnci grafiği, a) toplam aşınma direnci b) % yaklaşım. 180

Şekil 4.145. AA2124/B_4C/30 kompozit kam profilinin iç yapısı ve tane dağılımı.181

Şekil 4.146. a) AA2124/SiC 20μm/30 takviyeli kam profili iç yapısı b) a'nın detayı. 181

Şekil 4.147. a) Takviyesiz Alüminyum kam profili ekstrüzyon ürünü b) kesilmiş profil. 183

Şekil 4.148. a) 53μm SiC takviyeli alüminyum kam profili ekstrüzyon ürünü b) kesit görüntüsü c) hasarlar. 183

Şekil 4.149. AA2124/SiC 20μm/10 kompozit kam ekstrüzyon ürün hasarı. . . 184

Şekil 4.150. a) Toz metalurjisi yöntemiyle ekstrüzyon takozların hazırlanması b) AA2124/SiC 20μm/10 kompozit billeti c) ekstrüze edilmiş kam profili ve takoz artığı (Takviyesiz AA2124). 184

Şekil 4.151. AA2124/SiC 2μm/30 billetin ekstrüzyon sonrası görünümü 185

Şekil 4.152. AA2124/SiC 2μm/20 billetin ekstrüzyon sonrası görünümü 186

Şekil 4.153. AA2124/SiC 2μm/10 billetin ekstrüzyon sonrası görünümü 187

Şekil 4.154. AA2124/B_4C 1-7μm/30 billetin ekstrüzyon sonrası görünümü . . 188

Şekil 4.155. a) ergitme fırını, b) grafit pota ve toz karışımı. 190

Şekil 4.156. Karıştırmalı döküm kam profili 190

Şekil 4.157. AA2124/SiC2μm/30+%5 Grafit takviyeli hibrid kompoziti aşınma sonrası a) üst bölge b) yan bölge. 191

Şekil 4.158. AA2124/SiC2μm/20+%5 Grafit takviyeli hibrid kompoziti aşınma sonrası a) ön görünüş b) yan bölge 192

Şekil 4.159. AA2124/SiC2μm/10+%5 Grafit takviyeli hibrid kompoziti aşınma sonrası a) üst bölge b) yan bölge. 192

Şekil 4.160. AA2124/SiC2μm/20 Grafit takviyeli hibrid kompoziti aşınma sonrası a) grafit katkısı %2 b) grafit katkısı %1 192

Şekil 4.161. Alüminyuma ait yaşlandırma faz diyagramı. 194

Şekil 4.162. AA2014'e ait sıcaklığın yaşlanmaya olan etkisinin grafiği. 195

Şekil 4.163. AA2014 matrisli SiC_p takviyeli kompozite ait sıcaklığın yaşlanmaya olan etkisinin grafiği. 195

Şekil 4.164. AA2014 matrisli SiC_p takviyeli kompozite ait takviye oranının yaşlanmaya olan etkisinin grafiği. 196

Şekil 4.165. Kompozit kamların 175°C'de 8 saat yaşlandırılması sonrasında sertliklerindeki değişim a) AA2124/SiC 20μm b) AA2124/SiC 2μm c) AA2124/B_4C d) AA2124/SiC 2μm+%5 Grafit. 198

Şekil 4.166. Kompozit kamlardaki yaşlandırma ve grafit katkısı etkilerinin birlikte değerlendirilmesi. 199

Şekil 4.167. AA2124 için çözeltiye alma ve yaşlandırma deneyi sıcaklık-süre şematiği. 200

Şekil 4.168. AA2124, yaşlandırma süresinin malzeme sertliğine olan etkisi. . . 201

Şekil 4.169. AA2124, yaşlandırma süresinin malzeme sertliğine olan etkisi (%değişimi). 201

Şekil 4.170. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam profilinde çökeltme sertleştirmesi sonrasında meydana gelen hasarlar. 203

1. BÖLÜM

GİRİŞ

1.1. Giriş

Rekabete açık tüm sanayii ürünlerinin üretiminde daha kaliteli ürün ve daha düşük maliyet üretim sürecinin temel hedefini oluşturur. Bununla birlikte otomotiv sektörü gibi enerji tüketen konstrüksiyonlar için ürünler üretildiği durumlarda yukarıdaki iki temel hedefe ürün kullanımında düşük enerji tüketimi de eklenmiştir. Enerji tüketimini ve hava kirliliğini azaltmak için daha verimli araçlara olan talep otomobil üreticilerini yakıt tüketimini azaltmaya yönelik arayışlara itmiştir. Otomobil üreticileri bir yandan müşterinin, otomobil ağırlığını arttıran, konfor ve güvenlik taleplerini karşılamaya çalışırken öte yandan da düşük enerji tüketimi talebini karşılamaya çalışmaktadırlar [1–3].

Otomobillerde enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik tedbirlerin başında;

✓ Yakıt ve yanma verimliliğinin arttırılması

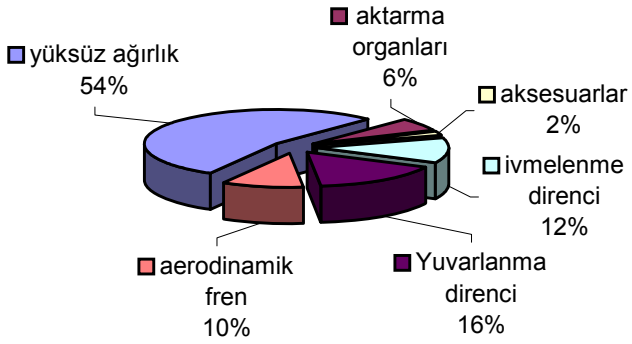
✓ Araç ağırlığının azaltılması,

✓ Yuvarlanma ve aerodinamik direncin azaltılması,

✓ Hareketli elemanlarda sürtünme direncinin azaltılması gelmektedir [2].

Şekil 1.1' de Mercedes-Benz C-Class bir araçta enerji tüketimine sebep olan unsurların yüzde oranları görülmektedir. Buradan açıkça anlaşılacağı gibi en önemli enerji tüketim kalemini araç ağırlığı oluşturmaktadır [4, 5].

Araç ağırlığı, doğrudan oluşturduğu atalet kuvvetleri nedeniyle enerji sarfiyatına yol

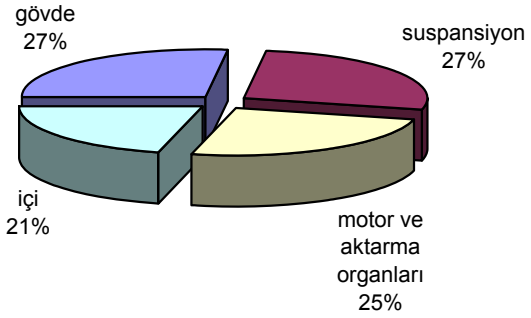


Şekil 1.1. Bir araçta enerji tüketen unsuların dağılımı [2].

açarken, kendisi ise sistemin her bir parçasının ağırlığı toplamından oluşur. Bu ise her bir parça ağırlığı nispetinde enerji sarfı olacağı anlamına gelir.

Şekil 1.2' de ise aynı araç üzerinde ağırlık dağılımı görülmektedir. Buradan da açıkça anlaşılacağı gibi motor ve aktarma organları toplam araç ağırlığının önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. Bu noktadan yola çıkarak enerji tasarrufu sağlamak için araç ağırlığının azaltılmasına yönelik çalışmalar iki temel hedefe yönelmiştir. Bunlar optimum tasarım ve hafif malzeme kullanımıdır.

Burada hafif malzeme kullanımı ile ifade edilmek istenilen, mevcut kullanımda olan malzeme yerine en azından aynı mukavemet özelliklerine sahip düşük yoğunluklu yani düşük ağırlık/mukavemet özelliklerine sahip malzemelerin kullanılmasıdır. Diğer taraftan kullanılan malzemenin düşük ağırlık/mukavemet özelliklerine sahip

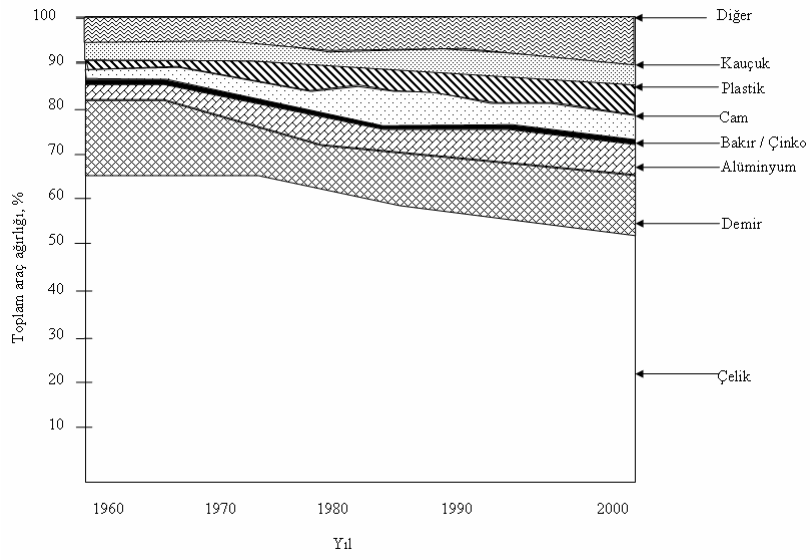


Şekil 1.2. Bir araçta ağırlık dağılımı [2].

olması yanında maliyetinin de düşük olması gerekir veya sağladığı yakıt tasarrufu ile kendisini amorti edebilmelidir. Malzeme maliyeti, ham madde maliyeti, üretim maliyeti ve malzemenin servis ömrü ile ortaya konulabilir. Belirli atalet kuvvetleri altında sürtünerek çalışan bir makine elemanı için enerji tasarrufu açısından hafiflik kadar tribolojik faktörlerde önemlidir. Optimum tribolojik özellikler bir yandan sürtünme için harcanan enerjiyi azaltırken, öte yandan aşınma ile meydana gelebilecek hasarın oluşumunu geciktirir ve en aza indirir. Aşınma sonucu hem aşınma etkisi altında çalışan elemanlar zarar görür hem de bu elemanlarla koordineli olarak çalışan sistemler verimsiz çalışır.

Otomobillerde ağırlığın azaltılması yakıt verimliliğinde dalga etkisine sahiptir. Şöyle ki; ağırlığı azaltılmış bir araç daha küçük motora ihtiyaç duyar, daha küçük bir motorun daha küçük yakıt tankına ve aktarma organlarına ihtiyacı vardır. Bu etki sonucunda ağırlıktaki % 10'luk bir azalma yakıt verimliliğinde % 8-10' luk bir artış sağladığı tahmin edilmektedir. Otomobil üreticileri üzerindeki ağırlığın azaltılmasına yönelik baskılar konstrüksiyonda çelik ve dökme demir kullanımını kademeli olarak azaltırken (Şekil 1.3) alternatif malzemelerin kullanımı artmaktadır [3].

Alüminyum hafif malzeme olarak çeşitli alanlarda yaygın kullanılırken, magnezyum, plastikler, fiber ve metal matrisli kompozitlerin otomobil parçalarının üretiminde



Şekil 1.3. Bir araçtaki malzeme kullanımının yıllara göre değişimi [3].

kullanımı son yıllarda hızla artmaktadır [2]. Ancak kaporta ve aksesuarlar bu değişime hızla ayak uydurabilirken hareketli çalışan parçalarda özellikle motor parçalarında çeliğin ve dökme demirin üstünlüğü devam etmektedir. Çünkü bu alanlarda malzemelerden yüksek fiziksel, mekanik ve termodinamik özellikler beklenmektedir. Yinede son yıllarda bu konuda yapılan çalışmalardan olumlu sonuçlar alınmış ve geleneksel olarak çelik veya dökme demirden üretilen bazı motor parçalarından çok daha iyi performans sergileyecek şekilde alüminyum esaslı seramik takviyeli kompozitlerden üretilmeye başlanmıştır [6–9].

1.2. Konunun Önemi

Araç ağırlığının azaltılarak yakıt tasarrufunun sağlanmasına yönelik çalışmalar dünyada son yıllarda hız kazanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda bir yandan çalışmanın direk hedefi olan enerji tasarrufu sağlanırken öte yandan malzeme ve üretim teknolojilerinde gelişmeler sağlanarak farklı alanlarda da kullanılabilmektedir. Mevcut durumda kam milleri çoğunlukla dökme demirden üretilmektedir. Burada kullanılan küresel grafitli dökme demir özel bir eritme ve döküm süreci gerektirir. Ayrıca döküm sonrası nihai ürün elde edilene kadarki talaşlı imalat, hassas taşlama ve ısıl işlem safhalarından oluşan üretim safhaları pahalı ve zahmetlidir. Tüm bunların yanında üretilen ürün ağırlık/ mukavemet oranı bakımından günümüz teknolojik ürünlerinden geridedir. Tabiki bu durum ilk kez keşfedilmemiştir. Dünyada ve ülkemizde bir yandan alternatif malzeme (sinterlenmiş metaller, özel alüminyum alaşımları, kompozitler) arayışlarına girilirken öte yandan mevcut malzemeden yani dökme demirden üretilen kam millerinin ağırlığının azaltılması yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan biriside ülkemizde otomotiv yan sanayine yönelik hizmet veren ESTAŞ (Sivas) firması tarafından yürütülmektedir. Çalışmamız mevcut kam elemanının malzemesini ve üretim teknolojisini değiştirerek, mekanik ve tribolojik özellikleri üstün yeni ikame bir malzemenin ve üretim teknolojisinin bu alanda uygulanması ve yukarıda değinilen getirileri bakımından özgün değere sahiptir.

Otomobil endüstrisinin gelişebilmesi için yeni teknolojileri uygulamaya koymak gerekmektedir. Bir ileri dünya ülkesi olabilmek, belirlenmiş ve kesin uygulanması

istenen koşulları yerine getirmekle mümkündür. Otomobiller en büyük enerji tüketicisidir. Bu tüketimi azaltmak için hafif otomobil en kolay çözümdür. Günümüz teknolojisiyle bu sağlanmaya çalışılmaktadır. Ağırlığı azaltmak için bir otomobilde çelik ve dökme demir yerine kullanılabilen en önemli malzeme alüminyumdur. Alüminyum günümüz için bir çok uygulama alanında başarıyla kullanılan vazgeçilmez bir malzemedir. Yerine geçtiği çelik ve dökme demirle karşılaştırılabilecek özelliklere sahiptir. Yeni üretim tekniklerinin ve yeni alaşımlama ve takviyeleme tekniklerinin geliştirilmesiyle bir otomobilin neredeyse tüm parçalarında kullanılabilecek potansiyele sahiptir. Alüminyumun özelliklerini istenilen doğrultuda iyileştirme tekniklerinden biriside alüminyum esaslı seramik takviyeli kompozit üretmektir. Ülkemiz otomobil teknolojisinin gelişmesi, dünya pazarında rekabet edebilecek güce hatta liderlik edebilecek güce erişebilmesi yeni malzeme teknolojilerinin bu alanda cesaretle uygulanması ile mümkündür. Yeni malzemeler bu teknolojik gelişimin çok önemli bir parçasıdır. Ana ve yan sanayi ile birlikte malzemelerin üretim teknolojilerinin geliştirilmesi hiçte zor değildir.

1.3. Tezin Amacı

Bu çalışmada mevcut durumda dökme demir ve çelikten üretilen otomobil kamlarının MMK'den üretilerek; mevcut duruma göre ağırlığın azaltılarak yakıt tasarrufu sağlanması, üretim yönteminin geliştirilmesi ve üretim maliyetinin düşürülmesi ile fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerin en az mevcutlarınkini sağlayacak seviyede iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda alüminyum esaslı seramik takviyeli MMK'lerin yukarıda bahsedilen farklı üretim teknikleri ve malzeme parametreleriyle üretilmesi, mekanik ve tribolojik testlerle ürünlerin performanslarının değerlendirilmesi ve malzeme özellikleri ve üretim şartları bakımından optimum değerlerin belirlenmesi bu çalışmanın kapsamını oluşturmaktadır.

Bu çalışma; uygulamadaki mevcut bir ürünün evrensel ve yöresel talepler doğrultusunda yeni malzeme teknolojileri ve üretim yöntemleriyle geliştirilmesine yönelik temel üzerine oturmakta olup üniversite – sanayii işbirliği içerisinde yürütülmüştür. Bu açıdan çalışma doğrudan uygulanabilir olma özelliğine sahiptir.

Bu nedenle sonuçların ticarileştirilme potansiyeli yüksektir. Öte yandan tezin nihai hedefi doğrultusunda yapılan bilimsel çalışmalar ve bu çalışmaların sonuçları farklı teknolojik alanlarda da kullanılabilme özelliğine sahiptir. Örneğin bu çalışma kapsamında geliştirilecek yeni bir tribomalzeme sürtünme ve aşınmanın ön plana çıktığı farklı bir sahada doğrudan kullanılabilir veya bu sahadaki özel amaca yönelik tercihli özellikleri tekrar geliştirilebilir.

Çalışma sonuçları değerlendirildiğinde doğrudan ürün çıktısı yanında ülkemizin öncelikli araştırma konularından olan yeni malzeme ve üretim teknolojisi konusunda teknolojik alt yapı ve bilgi birikimini arttırarak ülkenin bilimsel ve teknolojik araştırma gücüne katkı sağlayacaktır. Bu alt yapı ve bilgi birikimi yeni araştırmalar için basamak teşkil edecektir. Bu çalışmada kullanılan seramik takviye malzemelerinden biri olan B_4C'ün kullanımı, hem ülkemiz kaynaklarının bu alanda kullanımı bakımından hem de ülkemiz kaynaklarını kullanarak B_4C'yi ara ürün olarak elde eden sanayi kuruluşlarını teşvik ve pazar oluşturması açısından önemlidir.

2. BÖLÜM

KAM MİLLERİ

2.1. Kam Milinin Çalışma Koşulları ve Özellikleri

Mevcut herhangi bir motor elemanı yerine, gerek ağırlığın azaltılması maksadıyla gerekse sistemdeki işlevini daha iyi yerine getirebilmesi için ikame bir malzemenin tasarlanıp üretilmesi gündeme geldiğinde mevcut malzemenin çalışma koşullarının ve barındırdığı özelliklerin iyi bilinmesi gerekir. Böyle bir analiz yeni üretilen malzemenin sistem koşullarını sağlayabilmesi ve verimli olması bakımından son derece önemlidir. Bu çalışmanında hedefi motorlardaki kam elemanının; hem ağırlığını azaltmak hem üretim tekniğini geliştirmek hem de tribolojik özelliklerini iyileştirmek için bu elemanı MMK' den üretmektir. Böyle bir malzemeyi üretmek için mevcut durumdaki kam elemanının çalışma koşullarının ve malzeme özelliklerinin iyi analiz edilerek üretilecek yeni malzemeden beklenilen asgari özellikleri belirlemek gerekir. Bu üretilen malzemenin performansını değerlendirme bakımından da önemlidir. Bu maksatla burada geleneksel bir kam elemanının çalışma koşulları kısaca analiz edilecektir.

Kam mili üzerindeki özel profile sahip kam elemanları motorda emme ve ekzoz supaplarının uyumlu bir şekilde açılıp kapanmasını sağlar. Kam millerinin büyük çoğunluğu % 3,5-4 C içeren ve karbonun büyük kısmının küresel grafit yumruları şeklinde ayrıştığı GGG-50 dökme demirden yapılır. Bunun yanında çelikten veya yüzeyi sertleştirilmiş gri dökme demirden de üretilir. Kam yüzey sertliği, en az 45 HRC ve 3 mm sertleştirilmiş tabaka derinliğine sahip olmalıdır. Kam izleyicisi ise en az 55 HRC sertlik değerinde olmalıdır. İşletme sırasında kamlar darbeli çalıştıklarından aşınmayı azaltmak amacıyla yüzeyleri sertleştirilir. Kam yüzeyi termal ve termokimyasal yöntemlerle sertleştirilir. Son zamanlarda tekrar eritme

metoduyla yüzeyler sertleştirilmektedir. Bu metot bir elektrik arkıyla , lazerle veya elektron bombardımanıyla gerçekleştirilir. Kamın şekli supapların açılıp kapanma zamanlarını açma ve kapama hızını ve yuvasında kalma miktarını saptar ve sağlar.Bu nedenle istenilen kam şekli ve profili çok duyarlı bir şekilde taşlanarak sağlanır. Geleneksel kam malzemelerinin yanında seramiklerin, sert sinterlenmiş metallerin ve kompozitlerin kam uygulamaları için bir çok çalışma yapılmaktadır [10].

Kam ve kam izleyicisi işlem sırasında aşınma ve mekanik yükleme şartlarında çalışan sürtünme çiftleridir. Kam ve kam izleyicisi arasındaki Hertzian basıncının değeri pitting aşınmasının ölçüsünü etkiler. Bunun yanında plastik deformasyon ve adhezyon aşınmayı dahada şiddetlendirir. Aşınma, kam ve kam izleyicisi daha çok kamın burnunda ve yanaklarında görülür. Burundaki aşınma supapların daha az açılmasına yanaktaki aşınma ise supapların sesli çalışmasına ve erken açılıp kapanmasına neden olur, sonuçta motor güçten düşer. Aşınma hızı ve süresi, kamın yüzey sertliğine supap boşluğuna ve supap yay sertliğine bağlıdır. Öte yandan yüzey yorulması da önemli bir hasar türüdür. Kam yüzey basıncının osiloskobik değişimi yüzey yorulmasını teşvik eden en önemli unsurdur. Ayrıca bu hareket, sürtünme hızını değiştirerek, kam ve kam izleyicisi arsındaki elastohidrodinamik film kalınlığını değiştirir [10, 11].

Teknolojik gelişmelerle yeni malzemeler üzerindeki çalışmalar gittikçe artmıştır. Bu gelişmeler otomobil endüstrisine de yansımıştır. Avrupa toz metalürjisi endüstrisinin kompozit kamları ürettiği düşünülmektedir. Son zamanlarda, üreticilerin bu mamulleri otomobil motorlarına adapte etmeye yönelik çalıştıkları da aşikârdır. Bu işlemlerde son derece kesin boyutlarda üretilmiş kam profillerinin boru üzerine monte edilmesi amaçlanmaktadır. Kompozit kam milleri hali hazırda kullanılan dökme demirlere göre %30-40 ağırlıktan tasarruf etmek maksadıyla geliştirilmiştir. Bir başka avantajı ise malzeme seçimindeki serbestlik ve kam izleyicisiyle arasında meydana gelen aşınmayı azaltmasıdır.

Kam milleri bazı özel durumlara sahip motorlar içinde üretilebilmektedir. Kam millerini en çok etkileyen özellikler

✓ Kam tipi

✓ Yük/hertzian gerilmesi

✓ İzleyici malzemesi

✓ Yağlama kalitesi

olarak sıralanmaktadır. Ayrıca bu işlemler sırasında otomobil endüstrisi mühendisleri ve kam mili üreticileri arasında görüş alışverişi yapılması, çalışmalarda ortak hareket edilmesi oldukça gerekli ve önemlidir.

Hali hazırda kullanılan dökme demirlere uygulanan yüzey sertleştirme işlemlerinin (indüksiyonla sertleştirme vs.) toz metalürjisi ile üretilen kompozit kam millerine uygulanma gerekliliği bulunmamaktadır. Toz metalürjisi ürünü olan kamlarda tolerans çok düşük olduğu için mamuller istenilen boyutlarda olmaktadır. Üretim sonrasında kam profillerinin içi boş tüpler üzerine dizildiğinde yağlayıcı akışkanın boru içerisinden sirkülâsyonu mümkün olmaktadır. Kompozit kam millerinin maliyetinin ve özeliklerinin hali hazırda üretimi yapılan kamlarınkinden daha iyi olmasına rağmen bugünkü teknolojiyi değiştirmek neredeyse imkânsızdır. Otomobil üreticilerinin döküm kam millerinin üretimi, işlenmesi ve maliyetinin düşürülmesi amacıyla yaptıkları yatırımlar dikkate alındığında bu sonuca varılabilir. Miba firması yaptığı incelemede döküm kamlarındaki dizayn parametrelerinin kompozit kamlar için uygulanamayacağı sonucuna varmıştır. Kompozit kam milleriyle döküm kam millerini maliyet açısından karşılaştırmak mümkün değildir. Bununla birlikte, eğer yüzey düzeltme ve ısıl işlemler gören döküm kam veya çillendirilmiş dökme demir ile, kompozit kamlar rekabet edebilir durumdadır. Kompozit kamların maliyet bakımından ana avantajları:

✓ Kamlar ve kam milleri oldukça ekonomik yöntemlerle üretilir. Üretim yöntemleri küçük üretimler için esnektir.

✓ Otomobil endüstrisi ayrıca işlemler için büyük yatırımlar yapmak zorunda olmayacaktır.

✓ Döküm yöntemiyle karşılaştırıldığında takım giderleride fark edilir seviyede düşer, buda hızlı dizayn değişikliklerine müsaade eder.

✓ Kam ve kam mili üretimi oldukça seri bir şekilde yapılabilir ve sinterleme işlemiyle, sürekli sabit kalite, uzun üretimler boyu sağlanabilir.

2.2. Dizayn Prensipleri

Yapılan çalışmaların çoğunluğunun amacı döküm kamlara göre daha ekonomik ve kesin ölçülerde kompozit kamların üretilmesidir. Bu çalışmaların bazılarında kamlar borular üzerine ısıtılarak yerleştirilmektedir. BMW, Audi, Amg ve Abt gibi firmalar bu sistemleri kullanmaktadır. Diğer firmalarında kompozit kamlar üzerinde çalışmakta oldukları bilinmektedir. Bunlardan biri, iç kısmında diş olan kam profili üretmiştir, bu profiller boru üzerine şişirme işlemi yardımıyla istenilen açılarda yerleştirilmiştir. Bir diğer firma ise kam profillerini boru üzerine hidrolik genişletme yöntemiyle yerleştirmiştir. Mitsubishi firması kam profillerini üzerine dizdiği mili alüminyumdan yapmaktadır. Toyota ve Ford firmasında kullanılan kamlar ise direkt olarak borulara sinterlenmistir.

2.3. Ticari Uygulamalar

Haziran 1991'de Audi Almanya'nın ilk kompozit kam mili seri üreticisi olmuştur. Bu miller yeni V8 motorlarda kullanılmıştır. Kam milleri, yüksek alaşımlandırılmış malzemelerden yapılmış ve Miba/Suko tarafından geliştirilmiştir. 1992 yılında aynı firma BMW motosikletleri için kompozit kam millerinin seri dağıtımına başlamıştır. Bu şekilde elde edilen seri üretim içerisinde kompozit kam mili bulunan motorlar, BMW ve Sauber-Mercedes yarış araçlarında yıllarca kullanmıştır. 1990'lar da otomobil endüstrisi aşağıda sıralanan sebeplerden dolayı kompozit kamların üretimi konusuyla ilgilenmiştir

✓ Toz metalürjisinin kam milleri üretiminde kullanılabilir olması

✓ İleride daha az maliyet ve yatırım gerektiren üretim yöntemi ve malzemelerin ihtiyacının doğacağı

✓ Kompozit kam milleri ve üretimin diğer malzeme ve yöntemlere göre daha esnek olması: takım, zaman, ürün, özellik ve değişimi açısından

✓ Yüksek alaşımlı malzemeler döküm millerle karşılaştırıldığı zaman yüzey işlemi yapılmamasına rağmen daha iyi tribolojik özellikler sunmaktadır [12].

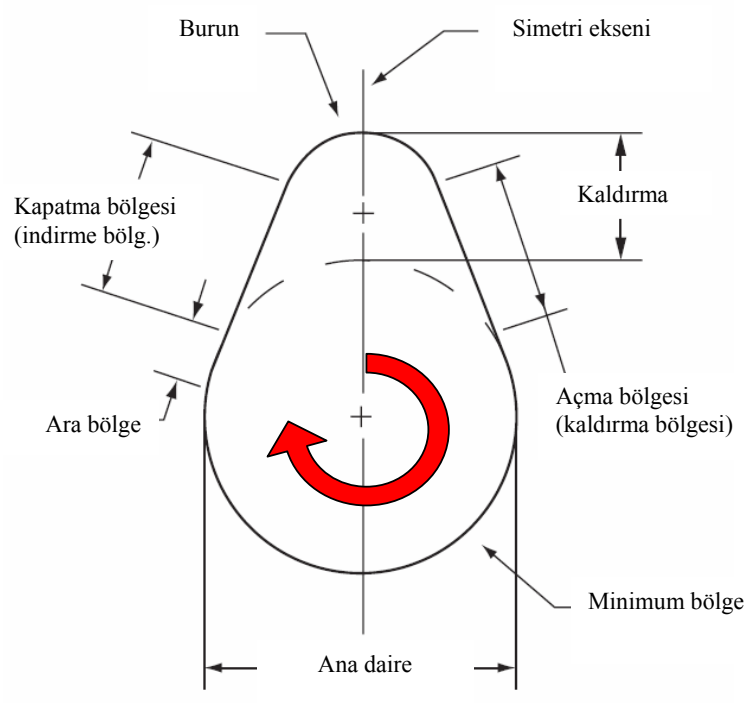
2.4. Kam Mili Özellikleri

2.4.1. Kam Mili Terimleri

Toz metalürjisi ile üretilmiş kam milleri ağırlıkta tasarruf, düşük sürtünme ve kam aşınması gibi iyi özellikler gösterir. Araştırmalar da toz metalürjisiyle üretilen malzemelerin bu memnuniyet verici özelliklerini doğrulamaktadır. Toz metalürjisi ile sinterlenerek üretilmiş ve metalürjik olarak çelik borulara yapıştırılmış kam milleri, diğer ürünlere nazaran daha hafif olması ve çukurcuk oluşumuna karşı gösterdiği dirençten dolayı tercih edilmektedir. Bu iki özellik sayesinde performans yükselmekte ve uzun çalışma ömrü sağlamaktadır. Maliyet geçerliliği toz metalürjisi ve diğer yöntemlerle üretilmiş özel parçaların karşılaştırılmasıyla ortaya çıkmaktadır. Önemli teknolojik gelişmelerle birlikte gelecekte de bu metodun yaygın olarak kullanılacağı açıkça görülmektedir. Bu tür çalışmalar 1998 yılından beri kuzey Amerika'da, İngiltere ve Asya'da devam etmektedir. Maliyet geçerliliği ve eşsiz özellikleri toz metalürjisinin otomobil parçalarının yapımında kullanılmasının nedenleri olarak açılabilmektedir [13–15].

Kam milinin üst eğrisel kısmı kam izleyicisini kaldırma ve indirme hareketinin verildiği bölge olarak açıklanabilir (Şekil 2.1). Buraya kam burnu, açma ve kapama bölgesi dahildir. Bu bölgeler hızdaki ve süre açısındaki farklılıklardan dolayı değişik kaldırma oranlarına sahiptir ve krank milinin dönüş açı derecesiyle ölçülür.

Ara bölgede kam mili profili açma bölgesiyle kapama bölgesi arasındaki orta noktadadır [16]. Açma bölgesi, kaldırma işleminin başladığı yer olarak açıklanır, kaldırma işlemi kam burnuna kadar devam eder. Kapatma bölgesi, kam burnundan aşağı doğru olan bölgedir. Kam burnu, kam profili üzerindeki en üst noktadır ve bu noktada valfler maksimum açılmış durumdadır. Vafler kapama konumuna geçmeden önce mümkün olduğu kadar bu noktada tutulur. Ana daire veya minimum bölge olarak adlandırılan kısım, profilin en alt bölümüdür ve bu bölgede valfler kapalı

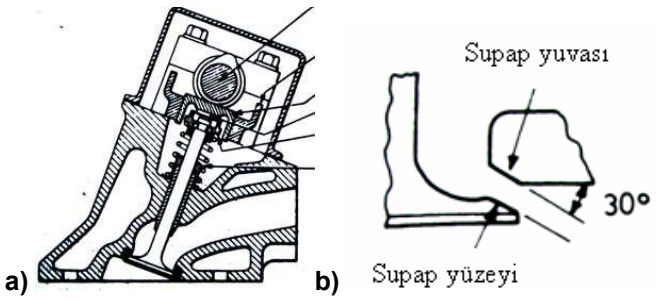


Şekil 2.1. Kam profili geometrisi ve kısımları [16].

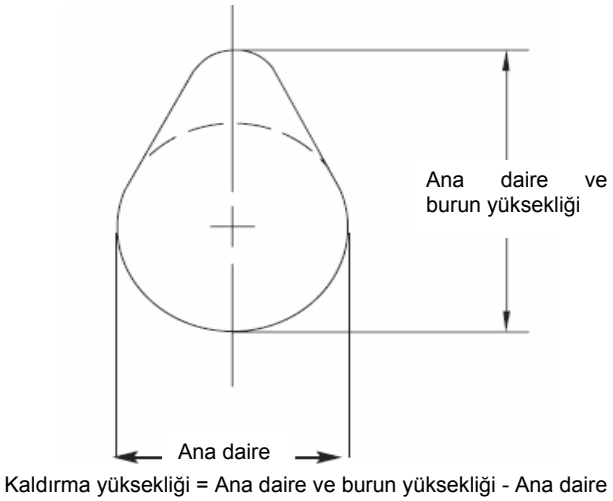
durumdadır. Bu bölge tüm valf ayarlarının yapıldığı noktadır (Şekil 2.1) [16].

Kaldırma kavramı valfin en yüksek yer değiştirme veya hareket sırasında yuvasıyla oluşan mesafe olarak açıklanabilir. Kam burnu en yüksek noktaya ulaştığında valfte çıkabileceği maksimum yüksekliktedir. Genellikle valf yükselme değerleri inç cinsinden elde edilmektedir. Şekil 2.2'de supapların, supap yuvalarının motor içerisindeki yerleşimi ve supap-yuva geometrileri görülmektedir.

Şekil 2.3'den anlaşılacağı gibi basit bir kam milinin kaldırma mesafesi kam profilinin simetri ekseni dikkate alınarak toplam yüksekliğinden sahip olduğu merkez dairenin



Şekil 2.2. Supap ve yuvası [16].

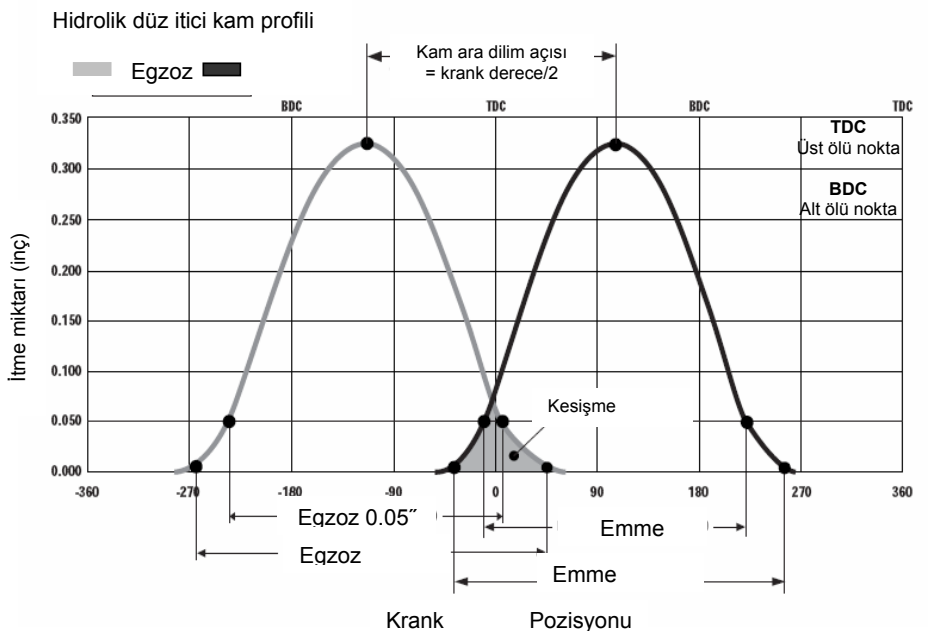


Şekil 2.3. Kam profili ve kaldırma yüksekliği ilişkisi [16].

çapının çıkartılmasıyla hesaplanır.

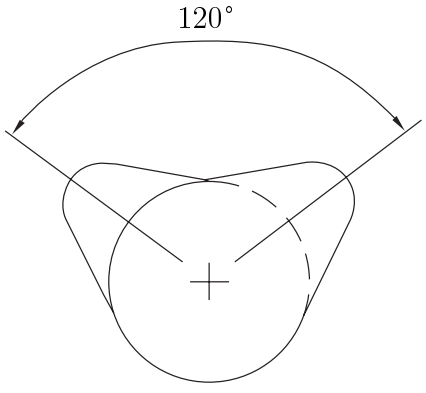
Emme ve egzoz zamanlarının her ikisinde supapların açılması gerekmektedir. Emme zamanında temiz hava ve benzin karışımının yanma odasına girmesi, egzoz zamanında ise yanan karışımdan dolayı oluşan yanmış gazların dışarı atılması amacıyla bu açma işlemi yapılır. Kam profili üzerindeki eğrisel dilim sayesinde bu açma ve kapama işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Supapların kaldırma mesafesini açma kapama sürelerini değiştirmeden artırarak motorun güç eğrilerini değiştirmeden daha fazla güç sağlanabilmektedir. Bununla birlikte supap kaldırma değerlerinde değişiklik yapıldığı zaman daima sürelerdede artırmalar yapılmaktadır, çünkü kam profil şekilleri karşılıklı çalıştıkları izleyicilerin şekline (düz, yuvarlak) bağlıdır. Yukarıda bahsedilen süre (duration) kamın supapları hareket ettirme döngüsü sırasında krank mili dereceleri arasındaki açı olarak ifade edilmektedir. Kam izleyicisinin, SAE standartlarına göre 0,006″ hareket etmesi sırasında krank mili açısıdır. 0,050″ süresi, kam profili ana dairesinin açma yüzeyinin olduğu bölümden 0,050″ kaldırmasından sonra başlayarak, kapama bölgesindeki 0,050″ kaldırma değerine gelene kadar geçen süredeki kam milinin hareketi şeklinde ölçülür (Şekil 2.4).

Kam profili üzerindeki emme ve egzoz zamanlarında supaplarının çıkartıldığı maksimum noktalarının arasındaki açı ara dilim (lobe separation) olarak adlandırılır

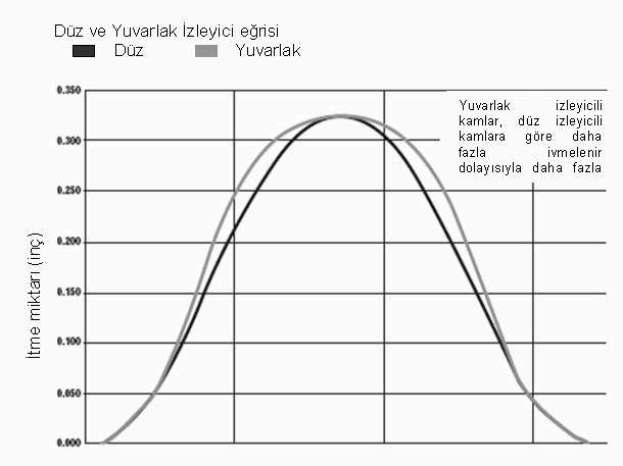


Şekil 2.4. Kam profili itme miktarı, açıklık süre bağlantısı [16].

(Şekil 2.5). İticiler, kam izleyicisi veya kam iticisi olarak adlandırılır. Kam yüzeyiyle direkt olarak temastadır ve kam profilini takip eder. Hidrolik düz, mekanik düz, hidrolik yuvarlak ve mekanik yuvarlak olmak üzere dört çeşittir. Eskiden beri üretici ve yarışçılar düz izleyicileri kullanmaktaydı, son zamanlarda izin verilmesi durumunda belirgin avantajlarından dolayı yuvarlak izleyicileri tercih edecektir. Kayma sürtünme kuvvetleri, yuvarlanma sürtünme kuvvetlerinden büyüktür. Bu nedenle yuvarlak kam milleri dönmek için daha az güç harcamakta ve oldukça geç aşınmaktadır. Bu iyi özellik yuvarlanan izleyicilerede uygulanmıştır ve kamların değiştirilmesi durumunda izleyicilerin değiştirilmesi gerekmemektedir.



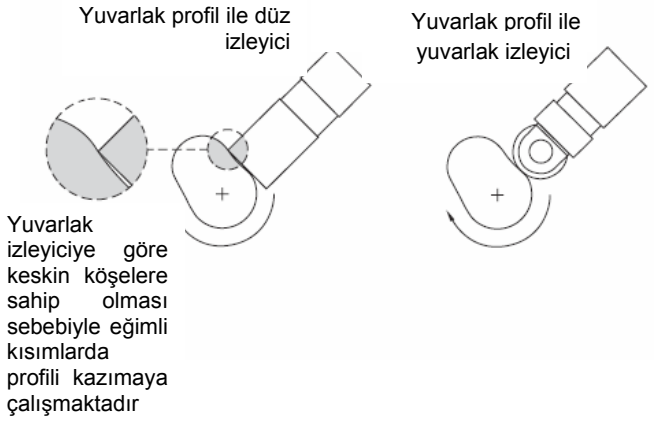
Şekil 2.5. Ara dilim=(açma merkez çizgisi+kapama merkez çizgisi)/2 [16].



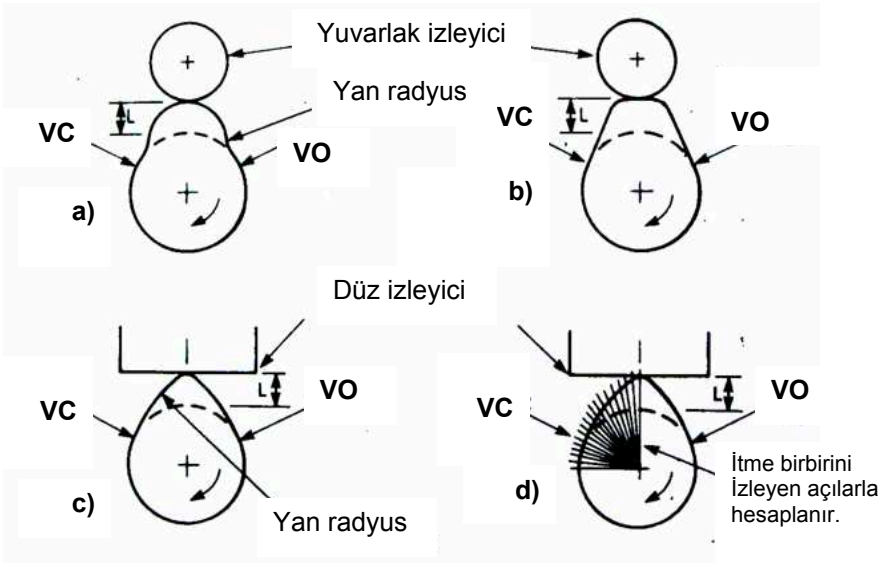
Şekil 2.6. İticiler arasındaki potansiyel farkı [16].

Aşağıdaki grafikle bağlantılı olarak, eğri altında kalan alan ne kadar büyükse güç potansiyelide okadar büyük olur (Şekil 2.6). Yuvarlak profiller düz profile göre daha etkili ve ivmelidir. Düz profile sahip iticiler kam profil yüzeylerindeki eğrisel bölgelerde kamı aşındırma veya kazıma etkisi yapmaktadır. Bu sorun yuvarlak profilli iticiler için geçerli değildir (Şekil 2.7) [17].

Konkav kamlar, kam çeşitlerinde ilklerden birisidir ve yuvarlak izleyicilerle birlikte kullanılırlar. Bu tür kamlardaki her yan konkavı bir daire yayı vasıtasıyla ana daireye ve kam burnuna bağlanmaktadır. Bu tip profillerin iticileri sabit hızlandırmasına ve yavaşlatmasına rağmen, birinden diğerine geçiş aniden olmaktadır. Bir diğer



Şekil 2.7. Kam yüzeyi-itici teması [16].



Şekil 2.8. Kam profili tiplerli; a) konkav b) tanjant c) konveks d) geometrisi olmayan konveks. L:itme, VO: supap açılması, VC: supap kapanması [18].

dezavantajı ise düz iticilere nazaran daha fazla atalete sahip olan yuvarlak iticilere ihtiyaç duymasıdır ve buda yüksek hızlı motorlar için kullanışsız bir durumdur (Şekil 2.8).

Tanjant kamlarda yuvarlanan veya eğrisel yüzeyli izleyiciler tercih edilmektedir (Şekil 2.8). Bazen hızlı kam olarakta adlandırılmaktadır, izleyici yan yüzeylerdeyken ivmelenmektedir. Ardından ani bir şekilde hızlanma durmakta ve yavaşlamaktadır. Bu safha kam burnu hareketiyle izleyici çıkabileceği maksimum yüksekliktedir. Bu döngü daha fazla supap yay kuvvetine ihtiyaç duymaktadır ve yüksek hızlı motorlarda tanjant kam millerinin kullanımı uygun olmamaktadır.

Konveks kamlar, genellikle düz kam izleyicileriyle karşılıklı çalışmaktadır (Şekil 2.8). Bu tür kamlarda burnun her iki yanındaki konveks eğriler ana daireye tanjant olarak burun radyusunu bağlamaktadır. Bu kamların karakteristiği izleyicinin çok kısa bir süre yüksek hızla hareket ettirmesidir. Bunu nispeten uzun bir yavaşlama periyodu izler, dolayısıyla supap yayları tarafından harcanan kontrol kuvveti çok büyük olmamaktadır. Konkav ve tanjant kamlarda açıklandığı gibi konveks kamlarda ivmelenmeden yavaşlayan geçişin çok kısa bir sürede gerçekleşmesinden etkilenmektedir. Geometrisi olmayan konveks kam millide konveks kamlar gibi düz izleyicilerin kullanılmasını gerektirmektedir. Yan

yüzeylerdeki eğrisellikler tam bir daire yayı değildir. Bu eğriler kamın ardışık dönme dereceleri hesaplanarak elde edilmiştir (Şekil 2.8). Bunun anlamı, izleyicinin kaldırılması sırasında oluşan ivmelenme ve yavaşlama periyotları arasındaki ani geçişin istenilen şekilde hafifletilmesi yumuşatılmasıdır. Bununda ötesinde kritik hız ve operasyonlarda kullanılan bu tip kamların geliştirilmesi matematiksel çalışmalarla gerçekleştirilmiştir [18].

Birçok motorda en çok yüklenen kısımlar kam ve kam izleyicileridir. Araştırmalara göre kam burnunun yüzey kalitesi, yağlayıcı ve metalürjik özellikleri benzer elemanlara göre kısmi tribolojik durumlarda önem arz etmektedir.

Son yıllardaki çalışmalarda kam millerinin üzerine krom kaplanması konusunda incelemeler yapılmıştır. Krom yüzeyinin oldukça pürüzsüz olması yağlamayı zorlaştırmaktadır. Ticari çalışmalarda ise yüzeyde yağlamayı kolaylaştıracak kadar pürüzlülük içeren güvenli mamuller üretmek amaçlanmaktadır.

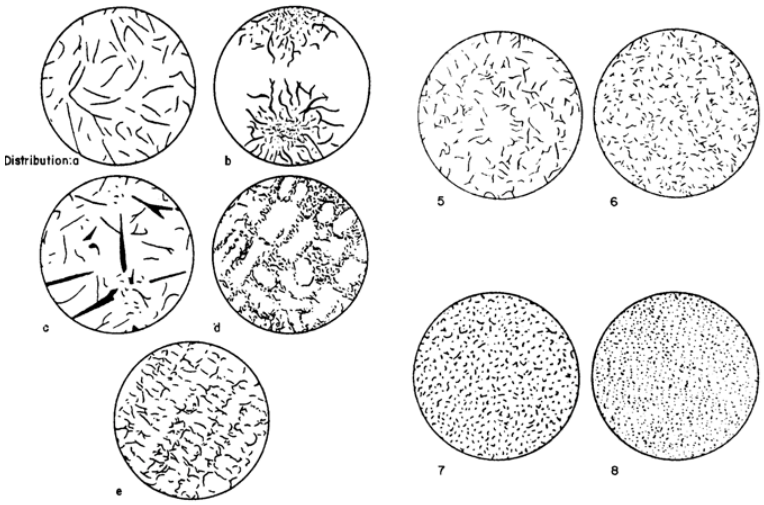
2.4.2. Kam Mili Malzemeleri

Hali hazırda yaygın oranlarda kullanılan kam mili malzemeleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Dökme demir, ucuz ve kolayca kullanılabilir. Üretimde kullanılan dökme demirler kütlesel olarak büyük oranlarda üretilebilirken, çelikler ise düşük kütlesel üretim kabiliyetlerinden dolayı daha az tercih edilmektedir.

Kullanılan dökme demirler, gri dökme demir, küresel dökme demir, dövülebilir ve çillendirilmiş dökme demir olarak çeşitlendirilmektedir. Gri yani kır dökme demirler genellikle kupol ocaklarında ve elektrik fırınlarında üretilebilmektedir. Her iki durumda da öncelikli olarak kalite, mikro yapıyı sınırlandırmaktadır. Lamel grafitlerin tipleri ve boyutları ASTM kaynaklarına göre kontrol edilebilmektedir. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi bu kaynaklara göre yapılar A ve E arasında görünüşe,

Tablo 2.1. Kam mili malzemeleri.

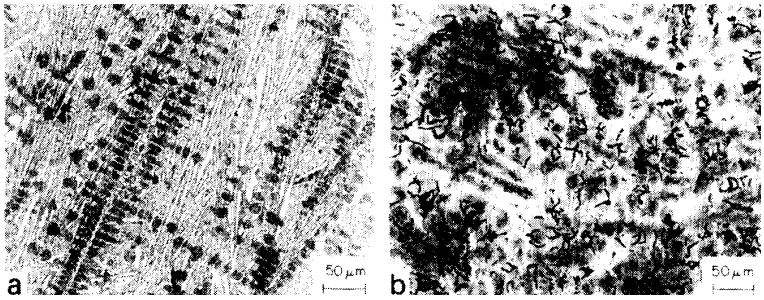
Tür	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Mg%
Gri D.D. sertleştirilebilir	3.1-3.3	2.1-2.4	0.7-0.9	0.2max	0.1 max	1-1.25	0.4-0.7	0.4	-
Çil D.D.	3.6 max	2.3 max	0.6-1.2	0.12 max	0.30 max	0.15 max	-	0.50 max	-
Küresel D.	3.1-3.3	2.1-2.4	-	0.2 max	0.1 max	1-1.25	0.4-0.7	0.4-0.7	0.7-0.9
Dövülebilir D.	2.2-3.0	0.7-1.2	0.2-0.5	0.12 max	0.05-0.16	-	-	-	-



Şekil 2.9. Lamel grafit yapı ve boyutları [19].

5 ve 8'deki büyüklüğe sahiptir. Demir üretimi sırasında krom ve molibden oranları yapı içerisindeki karbürleri elde etmek için kontrol edilir. Yüksek poroziteli demirler (0.7 wt%) yapı içerisinde sert ötektik fosfat oluşturmak için kullanılır. Çillendirilmiş kır dökme demir özellikle Avrupa'daki üreticiler tarafından sıkça kullanılmaktadır ve malzeme özellikleri kır dökme demirle yaklaşık olarak benzemektedir. Üretim kalitesi, malzeme yüzey sertliğine ve çilin içyapıdaki derinliğine bağlıdır. Çillendirilmiş dökme demirlerdeki ana problem değişik soğuma oranlarında farklı sertlik değerleri göstermeleridir (Şekil 2.10).

Şekil 2.10'de görüldüğü gibi yönlü olarak soğutulma sırasında martenzit ile birlikte karbür oluşmakta, daha yavaş soğuma hızında karbür ve martenzitle birlikte grafit oluşumuda gözlenmektedir. Buradan yola çıkarak bu mikro yapı, farklı sertlik değerleri, aşınma karakteristikleri meydana getirecektir. Küresel ve dövülebilir



Şekil 2.10. Çil döküm sırasında oluşan yapılar a) karbür ve martenzit b) karbür, martenzit, grafit [19].

dökme demirler genellikle büyük kam burun radyusu gerektiren kam sistemlerinde kullanılır. Tüm döküm kam milleri ekseriyetle kum kalıba döküm yöntemiyle üretilsede bazen kabuk dökümlede üretilir. Çillendirilmiş kam millerinin üretimi ise kam burnuna yakın yerlerdeki demirlerin çillendirilmesiyle gerçekleştirilir. Çelik kam milleri genellikle dövme yöntemi ile üretilir, devamında ise işlenir ve sertleştirme operasyonlarına tabi tutulur. Küçük üretimlerde ise firmalar dolu ingot veya çubuklardan işlemeyi tercih etmektedirler. Çillendirilmiş kır dökme demir kamlar pürüzlü bir yapıdan son bitmiş hale getirilir. Sertleştirilebilir kır dökme demir kamlar işlenir, sertleştirilir ve bitiş boyutuna getirilir. Yüzey bitişi yaklaşık olarak 0,25-0,75 μm hassaslığındadır. Dökme demirlerin çelik yerine üretimde kullanılmasının bir diğer avantajı ise malzemenin işlenmesi sırasındaki kayıp malzemenin veya talaşın az miktarda olmasıdır. Üretimde kullanılan yüzey işlemleri iki ana grupta incelenebilir, bunlar kısa çalışma ömrü için tasarlanmış ve uzun ömür için tasarlanmış işlemler olarak adlandırılır. Aşınma karakteristiğinin iyileştirilmesi için kaplama örnek olarak verilebilir.

2.4.3. Yüzey Sertleştirme

Daldırma ile magnezyum fosfat $Mg_3(PO_4)_2$kullanılarak yapılan kaplama işlemi fosfatlama olarakta adlandırılır. Bu proses 15 dakika süreyle 80-100 °C sıcaklıktaki fosforik asit ve fosfat banyosuna malzemelerin daldırılmasıyla gerçekleştirilir. Bu proses sayesinde yüzeyde ince kristalli tabaka oluşur (Şekil 2.11.a), bu tabaka adheziv aşınmayı önlemektedir ve üzerine yağ tabakası püskürtüldüğünde ıslanmayı sağlayarak malzemeye yapışmasına yardımcı olmaktadır. Oksidasyon işlemi ise genellikle piston segmanlarında uygulanır, oksit kaplamasını elde etmek için 300-600 °C arasındaki sıcaklıkta buhar kullanılır (Şekil 2.11.b). Bu işlemle elde edilen kaplama adheziv aşınmaya karşı direnç sağlamaktadır. Yüzeyde oluşan doğal boşluklar fosfatlamadakine benzemekte, iyi bir ıslanma ve yağlamaya yardımcı olmaktadır. Nitrürleme işleminde yüzeyde kırılgan olmayan FeN tabakası elde edilir. Bu yüzey daha az porozite içerir ve 400-700 HV sertik değerine sahiptir.

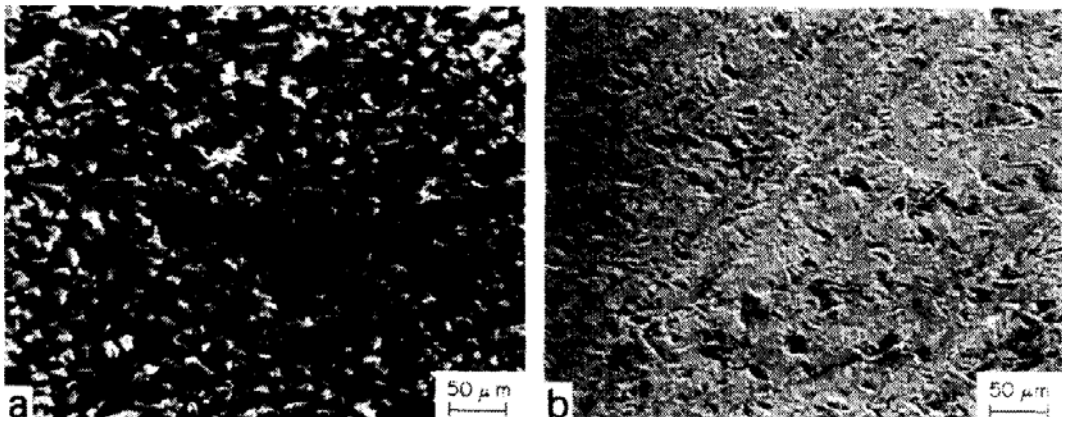
İndüksiyon ve alevle sertleştirme prosesinde karbon ihtiva eden kır, küresel ve dövülebilir dökme demirlerin yüzey sertliğini artırmak amaçlanmaktadır. Yüzeyde

ostenit yapısı elde edilinceye kadar hızlıca ısıtılır, sıcaklık iç bölgeye ulaşmadan ısıtma durdurulup soğutma işlemi yapılır. Sonuçta sert bir martenzit yüzey ve dayanıklı içyapı elde edilmiş olur.

Karbürizasyon işlemi ise düşük karbon oranları nedeniyle çeliklerle sınırlandırılmıştır. Katı, sıvı ve gaz fazlarının her biri bu proseste kullanılır, elde edilen sonuçlar nispeten birbirine yakındır. Çelik ostenitik sıcaklık olan 925°C'ye, ortamda bulunan karbonların çelik içerisine difüze olması için ısıtılır. Proses süresi derinliğin 0.25–2.00 mm arasında olmasına bağlı olarak 30 dakikadan dört saate kadar değişebilmektedir. 780 °C'ye yeniden ısıtma ile yapının tekrar ostenit olması sağlandığı zaman sertleştirme gerçekleşmiş olur, ardından soğuma işlemi sonucunda martenzit oluşumu başlar ve 200-250 °C'de temperleme yapılarak iç gerilmeler giderilir ve dayanıklılığı artırılır.

2.5. Kam İzleyici Malzemeleri

Kam izleyicilerinin büyük bir çoğunluğu çillendirilmiş dökme demirden üretilmektedir. Daha öncede bahsedildiği gibi parmak izleyicileri krom kaplanmış çeliklerden veya yüzeyi karbo-nitrürlenmiş küresel demirlerden yapılır. Krom kaplamanın sertliği yaklaşık olarak 800-850 HV değerlerindedir, böylece motor parçalarının dayanıklılığı artırılır, ancak yağlama karakteristikleri zayıflatılmış olur. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre yüzeyde azda olsa pürüzlülük veya kanal tipi boşluklar tavsiye edilmektedir. Karbo-nitrürasyona tabi tutulan



Şekil 2.11. Sem görüntüleri a) fosfat kaplama b) ferrox kaplama [19].

Tablo 2.2. Kam mili ve kam izleyici malzemeleri [19]

Kam Mili	Kam İzleyicisi
İndüksiyonla sertleştirilmiş alaşım dökme demir	Çillendirilmiş küresel
Çil dökme demir	Çil dökme demir
İndüksiyonla sertleştirilmiş dövülebilir perlitik	Sert krom kaplama
%0.1 karbonlu karbürlü çelik	%1.5 mangan karbo-nitrür molibdenyum çelik
%0.35karbonlu indüksiyonla serleştirilmiş çelik	
İndüksiyonla sertleştirilmiş 0.7% fosforlu kır dökme demir	Nitrürlenmiş Çil dökme demir

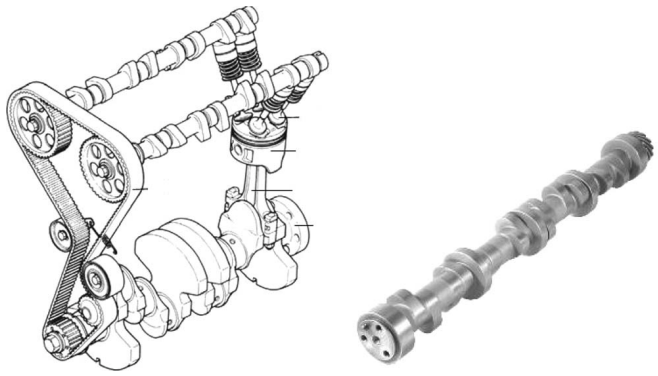
küresel demirler sürtünme aşınması için iyi sonuçlar göstermektedir, ancak uzun çalışma ömürlerinde sertleştirilmiş yüzeyin zamanla yok olduğu tesbit edilmiştir. Tablo 2.2'de ise sıklıkla kullanılan kam mili ve kam izleyicisi malzeme kombinasyonları görülmektedir. Genel olarak anlatıldığı gibi yağlamanın, yüzey sertleştirme işlemlerinin kam millerinin özelliklerini iyileştirdiği, performansını ve çalışma ömürlerini artırdığı bilinmektedir [19].

Konuyla ilgili deneysel ve teorik literatür çalışmaları incelendiğinde kompozit kamlar hakkında yeterince çalışmanın yapılmadığı görülmektedir. Daha çok ticari manada yapılan araştırmalarda ise ticari kaygılar taşınmakta, bilgi ve teknoloji gizliliği karşımıza çıkmaktadır. Yapılan bilimsel çalışmalar kısaca özetlenmeye çalışılacaktır.

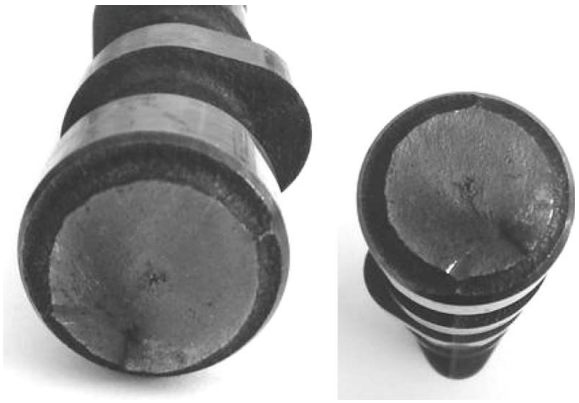
2.6. Literatür Araştırması

Yarı oval çıkıntıya sahip olan kam milleri benzinli ve dizel motorlardaki emme ve egzoz zamanlarında supapların açılıp kapanmasını sağlamaktadır. Kam milleri hareketlerini zincir veya triger kayışıyla bağlı olduğu krank milinden alır (Şekil 2.12). Bayrakçeken ve diğ., [20],otomobil motorlarındaki kam millerinin kırılma analizleri yapılmışlardır. Ortaya çıkan hasarların nedenlerini tespit emek amacıyla, kam mili malzemelerinin mikro yapı ve kimyasal bileşimler incelenmiştir. Kam mili üzerindeki yüksek gerilimli bölgelerdeki gerilme analizleri sonlu elemanlar tekniği ile ortaya çıkartılmıştır.

Çalışmada otomobil motorlarındaki kam millerindeki kırılma hasarları incelenmiştir (Şekil 2.13). İncelemesi yapılan kam milleri araçlarda kısa süreli kullanmışlardır. Kırılma hasarlarının sebeplerini ortaya çıkartmak için, çok sayıda deney ve sonlu elemanlar çözümleri gerçekleştirilmiştir.



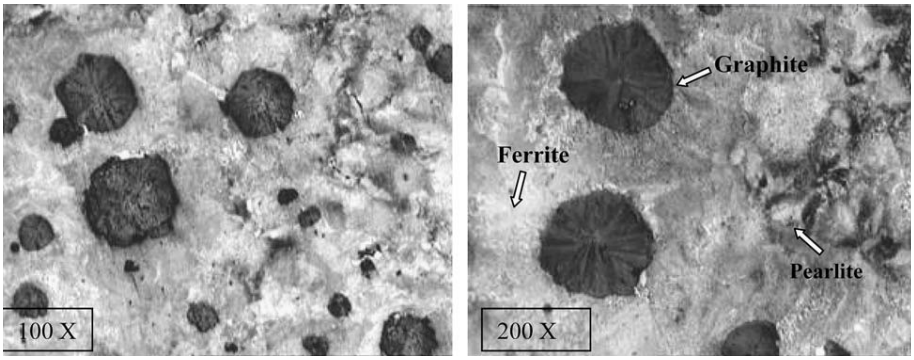
Şekil 2.12. Kam milinin motor üzerinde şematik gösterimi [20].



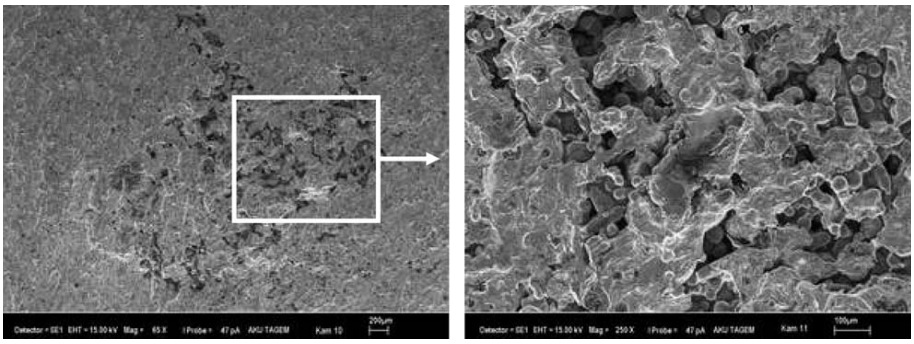
Şekil 2.13. Kam millerinde oluşan kırılma yüzeyi [20].

KGDD'nin iyi aşınma direnci, iyi dökülebilirlik ve işlenebilirlik kabiliyetleri vardır. Kesit alanında 23,1 HRC sertlik değeri tespit edilirken, yüzeyde gerçekleştirilen sertleştirme işlemlerinden dolayı bu değer 56,1 HRC olarak elde edilmiştir. Küresel grafit dökme demirin mekanik özellikleri yaklaşık olarak, akma dayanımı 450 MPa ve kopma mukavemeti 550 MPa olarak bilinmektedir. Şekil 2.14'den de görüldüğü gibi ferritik-perlitik matris yapısında grafitte iyi bir küresellik göze çarpmaktadır. Döküm sırasında oluşan boşluklar Şekil 2.15'de görülmektedir. Yapı içerisindeki bu oluşumlar belirli bölgelerde toplanma eğilimi göstermektedirler ve kırılmayı hızlandırmaktadırlar.

Kam mili üzerindeki gerilme analizlerinde sonlu elamanlar yaklaşımı kullanılmıştır. Çalışma sırasında kam milinin yarı kesit görünüşlü model oluşturulmuş ve analizlerde temel alınmıştır. Şekil 2.16'de model üzerine uygulanan yükler ve sınır şartları



Şekil 2.14. Küresel grafit dökme demir iç yapısı [20].

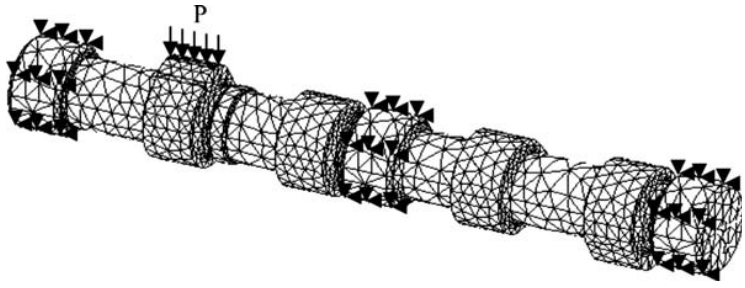


Şekil 2.15. Üretim sırasında meydana gelen boşluklar [20].

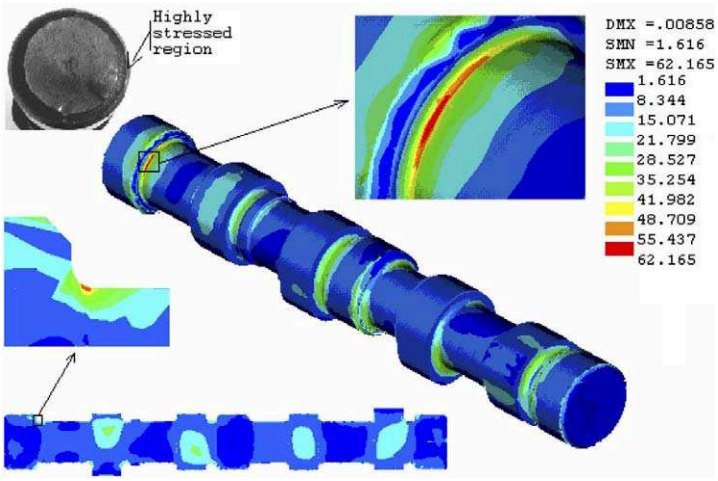
görülmektedir.

Kamın dönüşü sırasında, her profil farklı kuvvetlerden etkilenir. Bu farklı kuvvetlerin hesaplanması ve hangi pozisyonun daha tehlikeli olduğunun tespiti için her 30 derecelik açıda analizler gerçekleştirilmiştir. Maksimum gerilmenin ve kırılmanın meydana geldiği bölge Şekil 2.17'de açıkça görülmektedir.

Ipek ve Selçuk, [21], kuru aşınma şartlarında kam millerin davranışlarını incelemiştir. Aşınma deneylerinde kullanılan numuneleri indüksiyonla sertleştirilmiş AISI 1040



Şekil 2.16. Kam mili modellemesinde sınır şartları ve yükler [20].

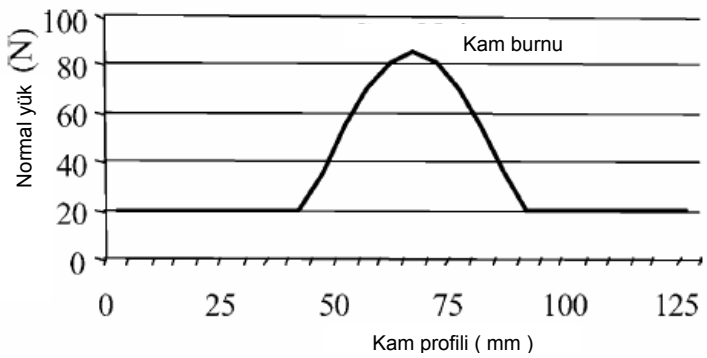


Şekil 2.17. Maksimum gerilme bölgesi [20].

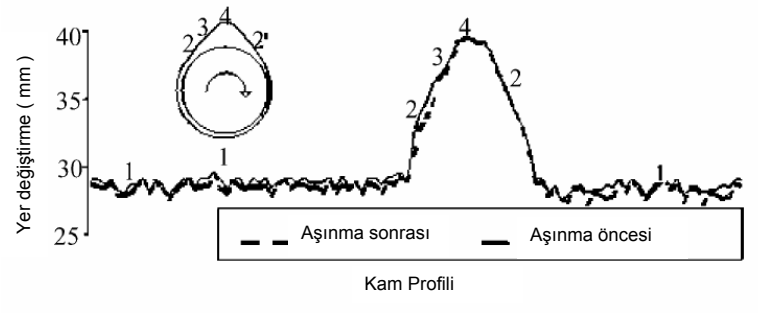
malzemesidir (640 HV). Aşındırıcı karşı malzeme olarakta borlanmış AISI 1020 çeliği kullanılmıştır. Borlama sonrasında 2320 HV sertlik değerinde ve 70 μm kalınlığında bor tabakası elde edilmiştir.

Test sırasında sistemdeki alıcılar sayesinde elde edilen veriler bilgisayara aktarılmıştır. Kam milinin bir dönüşünde 80 aşınma verisi toplanmaktadır. Deney sırasında 90, 100, 110 ve 120 rpm'lik dönüş değerleri kullanılmıştır. Kam üzerine 25-85 N'luk normal yüklerin geldiği Şekil 2.18'deki grafikte açıklanmıştır.

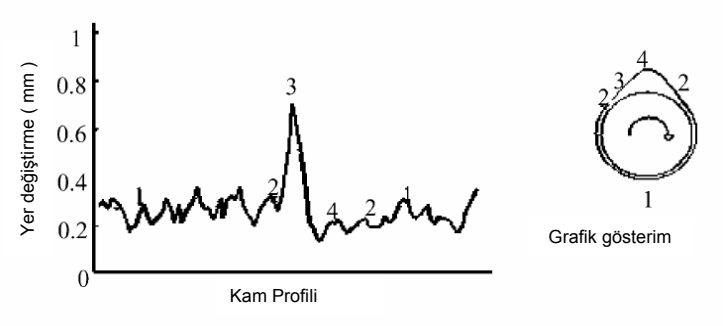
Numune 25-85 N'luk yüke maruz kalarak dört saat süren aşınma testinden sonra kam yüzeyinde meydana gelen değişim Şekil 2.19'daki gibidir. Şekilde profil yüzeyinde meydana gelen aşınmaların yüzeydeki noktalara olan dağılımı görülmektedir.



Şekil 2.18. Kam profili üzerine gelen yükler [21].



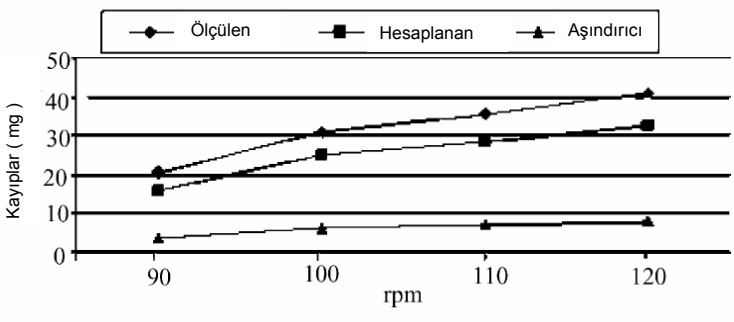
Şekil 2.19. Aşınma öncesi ve sonrasındaki profiller [21].



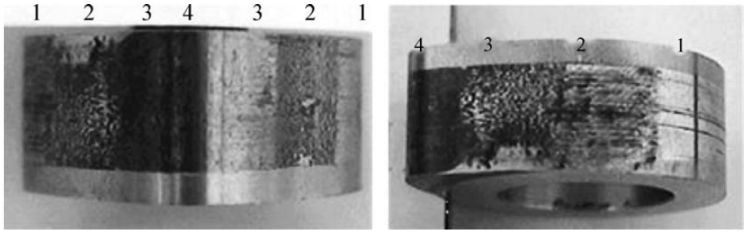
Şekil 2.20. Meydana gelen aşınmaların miktarı [21].

Şekil 2.19'deki çizginin altında kalan kısım kam yüzeyinde meydana gelen hasarlı kısımların miktarını göstermektedir. Bölgesel olarak aşınma dağılımına baktığımız zaman 3 numaralı bölgedeki aşınma miktarının diğer bölgelere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.20).

Aşınma sonrasında meydana gelen kütle kayıplarına ait veriler Şekil 2.21'deki gibidir. Ölçülen kayıplar miligram boyutlarındadır. Yapılan incelemelerde aşındırıcı karşı malzemede meydana gelen kayıpların daha az olduğu görülmüştür. Devir sayısı artışlarından sonra aşınma ve kayıplarda da artışlar olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2.21. Numunelerde meydana gelen kütle kayıplarının devire göre değişimi [21].

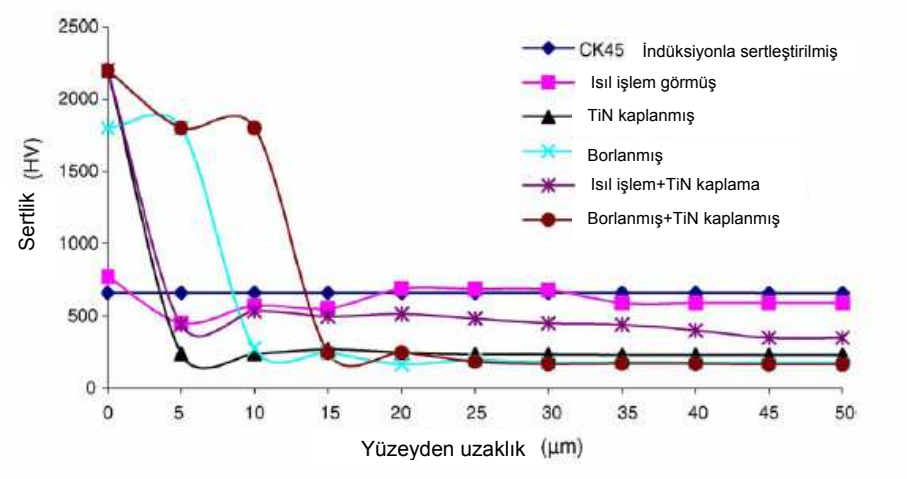


Şekil 2.22. Kam profili üzerindeki bölgeler ve aşınma yüzeyleri [21].

Aşınma testlerinden sonra, kam profilleri üzerinde meydana gelen aşınma izleri ve ağır deformasyon Şekil 2.22'da görülmektedir. Kam profil yüzeyi analizler sırasında dört farklı kısma ayrılmıştır. Sonuçta en fazla kütle kaybının üçüncü bölgede olduğu görülmüştür. Bu bölgedeki aşınma karakteristiklerinin diğerlerinden farklı olduğu tespit edilmiştir. İkinci ve üçüncü bölgelerde aşınma izleri görülmüş olsada asıl aşınma tipi adheziv aşınmadır. İkinci bölgedeki yapışma ve çizilme izleri aşınmanın yumuşak adhezyon aşınması olduğu sonucunu gösterir. Üçüncü bölge aşınmanın en fazla olduğu ve kam burnuna en yakın olan bölgedir, adheziv aşınma izleri ve plastik deformasyonla oluşmuş büyük çukurlar görülmektedir. Birinci bölgede ise bazı adheziv aşınma belirtileri olmasına rağmen abrasiv aşınma baskın aşınma mekanizması olarak görülmektedir.

Sert ve diğ., [22], ısıl işlem yapılmış küresel grafit dökme demir (GGG50) ve indüksiyonla sertleştirilmiş Ck45 çeliği kullanılmıştır. Deneylerde, Pvd-TiN kaplama, borlanmış ve PVD-TiN kaplanmış, sertleştirilmiş, sertleştirilmiş ve PVD-TiN, borlanmış küresel dökme demir ve sertleştirilmiş Ck45 çeliği kullanılmıştır. Testler yay sıkıştırmalı kam tribometer cihazıyla, 32N maksimum 40 N ölü ağırlıkla gerçekleştirilmiştir. 90, 110 ve 130 rpm dönüş devirleri kullanılmıştır. Malzemelerde meydana gelen kayıp miktarları kayma zamanının ve hızının fonksiyonu olarak açıklanmıştır. Bor ve Pvd-TiN kaplama GGG50 üzerine başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bu işlemler GGG50'nin aşınma direncini artırmıştır. Numunelerin yüzey pürüzlülükleri testlerden önce ve sonra ölçülmüştür. Ayrıca numuneler üzerinde yapılan mikro sertlik testleri sonucunda elde edilen veriler Şekil 2.23'deki gibidir.

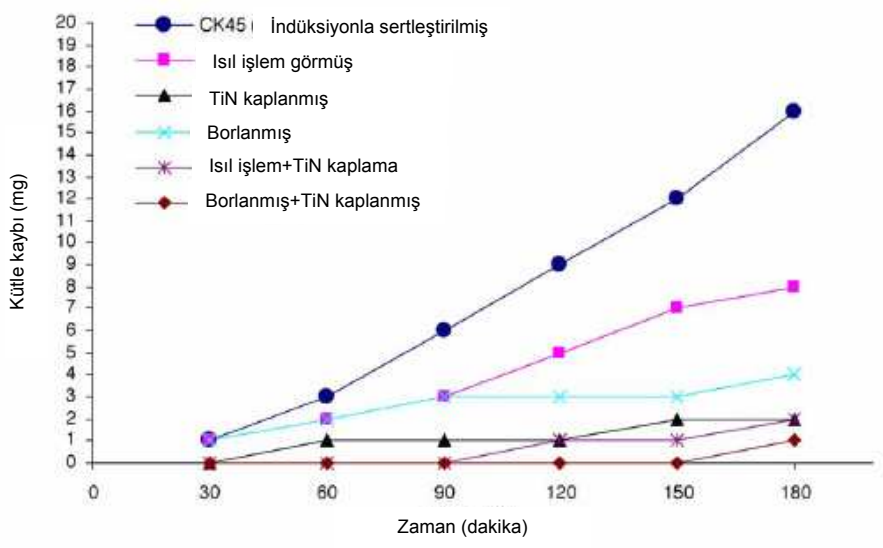
Yapılan çalışmalar sonunda Ck45 çeliğinin GGG50 yerine kullanılabileceği tespit



Şekil 2.23. Numunelerin yüzey sertlik değerleri [22].

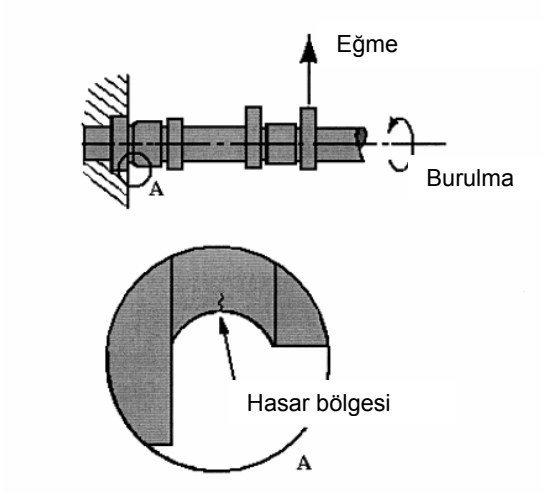
edilmiştir. Borlanmış GGG50 üzerindeki tabakanın aşınma sonunda kaybolduğu görülmüştür. Yapılan testler sonucunda, farklı özelliklere sahip bu numunelerde meydana gelen kütlesel kayıplar ölçülmüştür. Şekil 2.24'da görüldüğü gibi en az kayıp borlanmış ve TiN kaplanmış numunede olmuştur. Malzemelerin üzerinde meydana gelen hasarlar incelendiği zaman, hasar tipinin daha çok abraziv aşınma olduğu görülmektedir. Sürtünme şartları iki sert malzemenin sürtünmesi şeklindedir, dolayısıyla abraziv aşınma görülmüştür.

Wang ve diğ., [23], kır dökme demirden imal edilmiş kam millerinin eğme ve burulma



Şekil 2.24. Numunelerde meydana gelen kütlesel kayıplar [22].

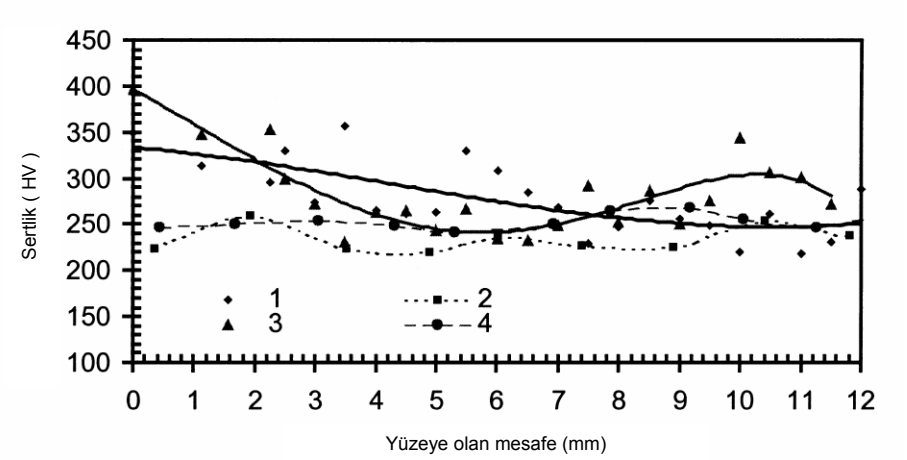
davranışlarını sonlu elemanlar metodunu kullanarak incelemiştir. Çatlak modelleme olarak bilinen yeni bir teknikle yorulma limitlerinin belirlenmesini amaçlamışlardır. Bu teknik kullanılarak yorulma limitleri her iki model ve yükleme tipine göre başarıyla belirlenmiştir. Şekil 2.25'dende görüldüğü gibi bu çalışmada da hasarların yatak bölgelerine yakın yerlerde meydana geldiği tespit edilmiştir.



Şekil 2.25. Eğme ve burulma sonrasında oluşan hasar bölgesi [23].

Şekil 2.26'de malzemelere ait sertlik değerleri verilmektedir, döküm malzeme yüzeyinde özellikle 1 mm mesafede mikro sertliğin daha fazla olduğu görülüyor, bu alanlarda makro sertlik değeri okunamamıştır. Ortalama yüzey Vickers sertlik değeri 395,5'dir, kütlesel olarak ise ortalama 326,6 Vickers değerindedir. Meydana gelen farklılık ise morfolojideki sementit oranlarındaki değişimden karşımıza çıkmaktadır. Bu mikro incelemede, sementitler grafit nodulleri içerisinde değil perlit-sementit matrisi içinde bulunduğu anlaşılmıştır. İşlenmiş durumda değer 319,3 olmaktadır ve kütleyle yaklaşık aynı değerdedir.

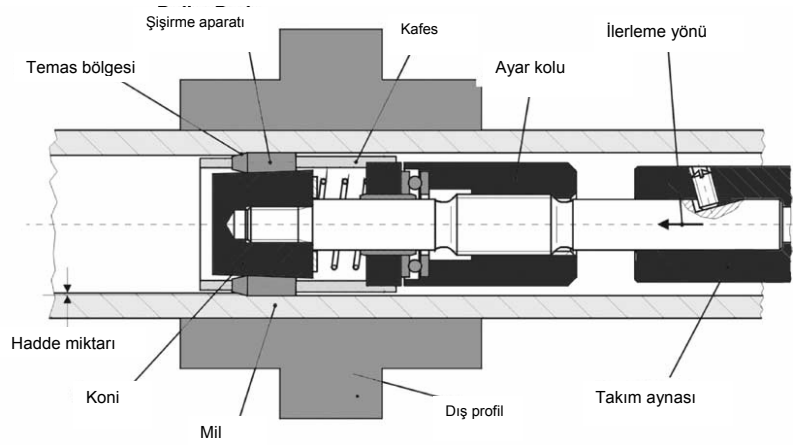
Hagedorn ve Weinert, [24], makine mühendisliğinde otomobiller için düşük ağırlıklı yüksek aşınma dirençli MMC'ler geliştirme çalışmaları devam etmektedir, genellikle bu çalışmalarda matris malzemesi olarak düşük yoğunluğu sebebiyle alüminyum veya magnezyum kullanılmaktadır. Bu malzemelerin mekanik mukavemetlerini güçlendirmek maksadıyla çok sert fiberler veya SiC, Al_2O_3, Ti_2B gibi partiküllerden oluşan takviyeler kullanılabilmektedir. Bu konuda yapılan bir başka çalışma sahası da kompozit kaplama üzerinedir. Dayanıklılığı yüksek iç yapısı çok sert ve aşınma



Şekil 2.26. Kam mili Vickers sertlik değerleri a) işlenmiş yüzey mikro sertlik, b) işlenmiş yüzey makro sertlik, c) döküm yüzeyi mikro sertlik, d) döküm yüzeyi makro sertlik [23].

direnci yüksek bir katmanla kaplanır (titanyum nitrit, titanyumaluminyumnitrit gibi). Bu bağlamdaki bir çalışmada içi boş yapılarla kompozitleri birleştirmektir. Bunda kullanılan yöntem ise şişirme yöntemidir. İç içe girecek olan malzemeler istenilen şekilde bağlanır ve içi boş olan boru içerisinden içten dışa doğru kuvvet uygulanarak şişirme yöntemiyle bağlantı yapılır (Şekil 2.27). Bu yöntemle üretilmiş kam mili Şekil 2.28'de görülmektedir. Buradaki amaç içi boş malzemeler kullanarak araçtaki ağırlığı dolayısıyla benzin sarfiyatını düşürmektir.

Aynı çalışma içerisinde, kam milinin içinin boş ve dolu üretilmesi durumunda meydana gelen ağırlık tasarrufu incelenmiştir. İçi boş boru kullanıldığı durumlarda,

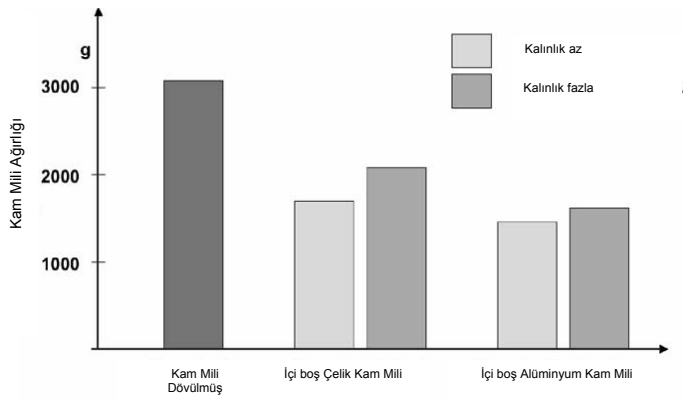


Şekil 2.27. Boru ve Kam profili birleştirme aparatı [24].

Şekil 2.28. Boru üzerine dizilmiş kam profilleri [24].

borunun kalınlığındaki değişim sırasında bile ağırlıkta gözle görülür düşüşler olmuştur (Şekil 2.29). Kam mili dövme yöntemiyle üretildiği zaman ortalama ağırlığı 3200 gr civarındadır. İçi boş çelik mil kullanıldığı zaman bu ağırlık 2300 gram'a düşmektedir, borunun kalınlığı azaltıldığında ise 1800 gramlık bir kam mili elde edilmektedir. Çelik yerine alüminyum kalın boru kullanılırsa 1700 gram, ince alüminyum boru kullanılırsa bu ağırlıkların 1500 grama düştüğü görülmektedir.

Bunlara ek olarak yapılan incelemelerde, hali hazırda kullanımda olan araçlarda çalışan kam millerinin malzemeleri Tablo 2.3'de verilmiştir. Daha çok performans ve güç istenen araçlarda çelik kam millerinin tercih edildiği görülmektedir. Türkiye'de büyük ölçekli üretim ve montaj yapan firmalarla temaslarda bulunulmuştur. Piyasada kullanılan kam millerinin mekanik ve boyutsal özellikleri hakkında bilgi



Şekil 2.29. Kam millerindeki ağırlık değişimi [24].

Tablo 2.3. Seramik takviye malzemelerinin bazı mekanik özellikleri [25].

Kullanım Yeri	Malzeme
TOYOTA 4 SİL. 2,2/2,5D L, 2L, 2LT MOTOR	Çil Döküm
VW 4 SİL. 1,9D/TD/SDI 1X, 1Y, AAZ, ABL, AEF, ASX MOTOR	Çil Döküm
Jaguar 6 Sil. 3,6/4,2 DOHC XJ6 Motor - Özel	Çil Döküm
Ford Focus 4 Sil. DOHC - Ex. (6274)	Çil Döküm
Opel 4 Sil. 1,4/1,6i 16V DOHC X14XE, X16XE Motor (636181) - In.	Çil Döküm
ROVER 4 SİL. XUD7/T, XUD9 MOTOR	Çil Döküm
SEAT 4 SİL. 1,9 D/TD 1Y, AAZ MOTOR	Çil Döküm
SKODA 4 SİL. 1,9 D/TD 1Y, AAZ MOTOR	Çil Döküm
CHRYSLER. PT Cruiser 4 Sil. 16V - (In.)	Sfero Dök.
Dodge Neon 4 Sil. 420 16V - (In.)	Sfero Dök
STEYR 8073 4 SİL. MOTOR (TRAKTÖR)	Çelik
Chevrolet 350 - b/b 1306 (Cu plated)	Çelik
Fiat 2000	Çelik
Alfa Romeo - 2000	Çelik
Honda XR 70	Çelik
Ford KA 4 Sil. 1,1/1,3 "Valencia" (95BM6251CD)	Gri Dök
Honda Acura RSX 2,0 Type-S DOHC K20A Motor - In.	Gri Dök

almak, tezin piyasanın beklentilerini karşılaması ve istekleri doğrultusunda çalışmak amaçlanmıştır. Firmaların çoğu motorları montajlı halde yurt dışından getirmekte dolayısıyla kullanılan kam milleri hakkında bilgi sahibi olmamaktadır.

Ticari anlamdaki inceleme ve literatür taramalarından anlaşılacağı gibi kompozit kam üretimi konusunda yeterli çalışmaya rastlanamamaktadır. Bir kısım çalışmaların olduğu, kullanılan malzeme tipleri ve çalışma sonuçlarının bilgi gizliliği açısından duyurulmadığı aşikârdır.

Tablo 2.3'den de anlaşılacağı üzere genel olarak tüm araçlarda kullanılan kam mili malzemesi çelik veya dökme demirdir. Oysa günümüzde verimlilik, mukavemet ve fonksiyonelliğin bir arada sağlandığı makine konstrüksiyonları gereklilik arz etmekte ve öne çıkmaktadır. Bu çerçevede kurgulanan tez konusu yukarıda gerekçelendirilmiş, hedef ortaya konmuş ve ileriki bölümlerde de faaliyetlerin gerçekleştirilme yöntemi ve alınan sonuçların değerlendirilmesi verilmiştir.

3. BÖLÜM

METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER

3.1. Giriş

Kompozit malzeme esas olarak birbiri içinde çözünmeyen, biçim ve kimyasal bileşimleri birbirinden farklı, mikro veya makro boyuttaki bileşenlerin karışımından oluşan yeni malzemedir. Bu malzemelerin mühendislik alanındaki önemi, birbirinden farklı iki veya daha çok öğenin oluşturduğu yeni malzemenin, her bir öğenin iyi özelliğinden faydalanarak daha üstün özelliğe sahip olmasıdır [26, 27].

Kompozit malzemelerin, ileri teknoloji ve genel mühendislik yapı malzemeleri olarak değişik sahalarda kullanım alanları giderek artmaktadır. Son yıllarda fiber takviyeli kompozitlerin yerini daha az maliyetli olan metal matrisli kompozitler almaya başlamıştır. Bu kompozitler yönlenmiş özelliklerin gerekmediği pek çok uygulama alanında başarıyla kullanılmaktadır.

Metal matrisli kompozitler (MMK) ile ilgili çalışmalar her geçen gün artmakta, dayanım /ağırlık oranı yüksek, bir çok yeni malzeme ortaya çıkmaktadır. Bu malzemeler genellikle havacılık ve uzay sanayii için geliştirilmekle birlikte, taşıma , savunma, spor ve bazıları otomotiv sanayi gibi diğer sanayi dallarında da örneğin otomobil motorlarında, fren disklerinde uygulama alanı bulabilmektedirler [26–30]. Genel olarak ele alındığında takviye tipine göre metal matrisli kompozitlerin üç ana türde olduğunu söyleyebiliriz:

✓ Sürekli lifler,

✓ Süreksiz lifler ve

✓ Parçacıkla güçlendirilenler

Metal matrisli kompozitlerin üretimindeki temel amaç matris malzemesinin ve takviye elemanının arzu edilen mekanik ve fiziksel özelliklerini bir araya getirmektir. Yani metallerin özelliklerinden olan;

- ✓ Tokluk
- ✓ Yüksek termal iletkenlik
- ✓ Kolay şekillendirilebilirlik
- ✓ Dövülebilirlik ve
- ✓ Peklik

özelliklerine sahip matris alaşımı içerisine;

- ✓ Yüksek dayanımlı,
- ✓ Yüksek modüllü (young, tanjant, chort)
- ✓ Isıya dayanıklı (refraktör)
- ✓ Termal genleşme katsayısı düşük

seramik parçaların ilavesiyle, özellikleri matris alaşımı ve seramik takviye elemanı arasında, daha yüksek kayma ve basma direncine sahip ve daha yüksek işletme sıcaklıklarında çalışabilen kullanışlı, içerdiği malzemelerin özelliklerini bir arada sağlayan bir malzeme elde edilir. Bu malzemeler; yüksek dayanım, yüksek ısıl direnç, dövülebilirlik gibi özelliklere de sahiptir. Kompozit içerisindeki birleşimlerin birbirlerine göre miktarı, dağılımı ve üretim şartları dikkatlice kontrol edilerek bu özellikler daha da iyileştirilebilir veya takviye elemanının tane boyutu ve hacim oranı ayarlanılarak arzu edilen doğrultuda değiştirilebilir. Fakat bazen seramikler sert ve rijit olmalarına rağmen bu malzemeler düşük rijitlikte olabilirler [31, 32]. Alüminyum ve SiC örnek olarak ele alındığında bu malzemeler birbirlerinden çok farklı mekanik ve kimyasal özelliklere sahiptirler. Tablo 3.1 de Al, SiC, MMK'in bazı mekanik özellikleri mukayeseli olarak verilmiştir [31].

Tablo 3.1. Al, SiC, MMK'in bazı mekanik özellikleri [31].

Mekanik Özellikleri	Al	SiC	MMK (A6061/SiC/17p(T6))
Young Modülü (GPa)	70	400	96.6
Termal Genl. Kats.(1/°C)	24.10^{-6}	4.10^{-6}	—
Akma Dayanımı (MPa)	35	600	510

Ağırlık / mukavemet oranlarının düşük olması nedeniyle, havacılık, uzay, otomotiv ve savunma sanayii başta olmak üzere diğer yapısal uygulama alanlarında da metal matrisli kompozitlere ilgi giderek artmaktadır [28]. Örnek olarak Al/SiC_p kompozitler 500°C 'ye kadar mükemmel yüksek sıcaklık mukavemetine sahip olduklarından, otomotiv sanayiinde ısıya maruz motor parçalarının üretilmesinde başarıyla kullanılmaktadırlar. Bu artışın tek nedeni bu malzemelerin yapısal ağırlığındaki azalma değil aynı zamanda özgül değerlerinin de artmış olmasıdır. Örneğin; SiC takviyeli alüminyum matrisli kompozit, normal alaşıma göre özgül değerlerde %50 artış sağlarken, ağırlıkta %10 azalma gösterir [25].

Takviye malzemeleri arasında karbürler (SiC, B_4C) [25, 27, 33–35] nitrürler (Si_3N_4, AlN), oksitler (SiO_2, Al_2O_3 , ZnO) ve elementler (Si, C) yer alır. Takviye elemanlarının şekilleri; sürekli fiberler, doğranmış fiberler, plakacıklar ve partiküller olabilir [25, 33]. Örneğin SiC, alüminyum ve magnezyum esaslı kompozitler de yukarıda bahsedilen şekillerde kullanılır. En yaygın olarak kullanılan oksit olmayan seramikler, Zr, SiC, SiN, sialon' dur. Bunlar yüksek dayanım, sertlik ve korozif ortamlara karşı kimyasal olarak inert olduklarından yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruyabilirler [36, 37].

Metal matrisli kompozitlerin davranışları ve geliştirilmeleri ile ilgili ilk çalışmalar, kesiksiz fiber takviyeli alüminyum ve titanyum matrisli kompozitler üzerine olmuştur. Bu tür kompozitler yüksek özgül dirençleri ve elastiklik modülleri ile havacılık ve uzay sanayii gibi özel uygulama alanlarında kullanılmaya başlanmıştır [25, 27].

Çalışmalarda ümit verici ilerlemeler elde edilmesine rağmen, kompozitlerin takviye elemanlarının pahalı (600\$ Kg^{-1} boron fiber), üretim ve ikincil işlem maliyetlerinin yüksek olması endüstriyel alanda kullanımlarının yaygınlaşmasını engellemiş olup

çok özel endüstriyel ve askeri alanların dışına çıkamamıştır [25].

Dağınık takviyelendirilmiş metal matrisli kompozitler gurubuna hem parçacık takviyeliler hem de kesikli fiber takviyeliler girer. Son zamanlarda bu gurup kompozitler aşağıdaki özelliklerinden dolayı daha dikkat çekici olmuşlardır.

- ✓ Takviye elemanlarının maliyeti düşüktür (4.85\$ Kg^{-1} SiC)
- ✓ Üretimde kullanılan imal usulleri teknolojilerinde ve özelliklerinde başarılı gelişmeler olmuştur.
- ✓ Kullanılan imal usulleri standartlar dahilinde veya çok yakındır.

Bunların yanında fiber takviyelerin sakıncaları:

- ✓ Fiber hasarı.
- ✓ Mikro yapısal olarak üniform olmayışları.
- ✓ Fiber-fiber teması.
- ✓ Aşırı ara yüzey reaksiyonlarıdır.

Bu sakıncalar süreksiz takviye elemanları kullanılarak aşılabilir [25].

Rastgele dağılımla takviyelendirilmiş alaşımlar; metal matristen (Al, Ti, v.b.) ve ona ilave edilmiş sert, çözülemeyen parçacıklardan (SiC, WC, v.b.) oluşur [38, 39]. Rastgele dağılımla takviyelendirilmiş kompozitlerin yönden bağımsız (izotropic) dayanım ve rijitlik özellikleri takviyelendirilmemiş alaşımlara nispeten önemli ölçüde iyileştirilmiş olup, aşırı termal ve mekanik yüklemelerin bulunmadığı konstrüksiyonlarda (örn. Otomotiv parçaları) önemli ölçüde kullanılmaktadır [25, 27].

Whisker (kılcal kristal) takviyeli MMK'ler, dayanım ve termal kararlılık bakımından, parçacık takviyeli MMK'lere nazaran üstün özellikler sergilemekle birlikte, mevcut whiskerlerin yüksek maliyetli oluşu, içyapılarındaki kusurlar ve parçacık kirliliklerinin sebep olduğu düzensiz yüzeyler ve asbest gibi sağlığa zararlı

partiküllerin bulunması bu tür kompozitlerin yaygın olarak ticari kullanımını sınırlamaktadır [25, 35].

3.2. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi

3.2.1. Takviye Elemanı Seçimi

Seramik takviye malzemelerinin seçiminde;

✓ Elastiklik modülü,

✓ Çekme gerilmesi,

✓ Ergime sıcaklığı,

✓ Termal kararlılık,

✓ Termal genleşme katsayısı,

✓ Yoğunluk,

✓ Boyut ve şekil,

✓ Matris'e karışabilirlik,

✓ Maliyet, özellikleri dikkate alınır.

Yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleri arasında Al_2O_3, AlN, BeO, B_4C, C, Si, SiC, WC, ZrO_2 yer alır [25, 40–49]. Tablo-3.2' de bu takviye elemanlarından bazılarının mekanik özellikleri verilmiştir.

Rastgele dağılımlı parçacık takviyeli kompozitlerin performansı; takviye fazının, yoğunluğunun, elastiklik modülünün ve çekme gerilmesinin bir fonksiyonudur. Takviye elemanının kimyasal kararlılığı ve matris metaline uygunluğu yalnızca nihai üründe değil, üretim esnasında da önemlidir. Tekrarlı termal gerilmelere maruz kalacak bir MMK için, takviye elemanı ve ana faz arasındaki termal davranışın uyumu takviye fazının seçiminde önemli bir faktördür [25, 28].

Tablo 3.2. Seramik takviye malzemelerinin bazı mekanik özellikleri [25].

Seramik Takviye	Yoğunluk ($\times 10^{-3} kg/m^3$)	Genleşme katsayısı ($10^{-6}/^oC$)	Dayanım (Mpa)	Elastiklik Modülü (Gpa)
Al_2O_3	3.98	7.92	221 (1090°C)	379 (1090°C)
AlN	3.26	4.84	2069 (1090°C)	310 (1090°C)
B_4C	2.52	6.08	2759 (24°C)	448(24°C)
C	2.18	-1.44	–	690
Si	2.33	3.06	–	112
SiC	3.21	5.4	–	324 (1090°C)
SiO_2	2.66	<1,08	–	73
TiC	4.93	7.60	55 (1090°C)	269 (24°C)
WC	15.63	5.09	–	669(24°C)
ZrC	6.73	6.66	90 (1090°C)	359 (24°C)

3.2.2. Matris Malzemesinin Seçimi

Alüminyum ve magnezyum alaşımları düşük yoğunlukları ve yüksek termal iletkenlikleri nedeni ile matris malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar [25]. Özellikle alüminyum alaşımları düşük yoğunluk yanında yüksek korozyon direncine sahip olmaları, kolay şekil alabilmeleri, iyi termal ve elektrik iletkenliğine sahip olmaları ve mukavemet özelliklerinin ısıl işlemlerle geliştirilebilir olması bakımından en çok tercih edilen matris malzemelerindendir Yaygın olarak kullanılan herhangi bir 2xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx serisi alüminyum alaşımı matris malzemesi olarak kullanılabilir [25, 50, 51].

Yapılan çalışmalar matris malzemesine az miktarda alaşım elementi ilavesiyle MMK'de dayanım, tokluk ve süneklik bakımından cazip bir faz kombinasyonu elde edilebileceğini göstermiştir. Bunun yanında, dövme alaşımlarında tane inceltici olarak kullanılan Cr, Mn gibi alaşım elementlerinin süreksiz takviyelendirilmiş MMK' larda kullanılmasına gerek yoktur. Bunun ötesinde, bu alaşım elementlerinin kullanılmasından kaçınılmalıdır. Çünkü bunlar takviyelendirme işlemi veya sonraki aşamalarda kaba intermetalik bileşikler oluşturarak kompozitin çekme tokluğunu zayıflatmaktadırlar [25, 28].

Alüminyum döküm alaşımları otomotiv sanayiinde öteden beri kullanılmakta olup bu alanda belirli bir deneyim ve bilgi birikimi mevcuttur. Alüminyum alaşımı bazı seçkin alanlarda da kullanılmakta olup, nihai şekilde veya nihai şekle yakın

ürünler elde edilmesinde avantajlıdır. Bununla birlikte hem döküm ürünleri hemde toz metalürjisi ürünleri bir çok üstün özelliklerine rağmen uygulama alanları beklenilenin altındadır. Çünkü bu ürünler yeterli elastiklik modülüne aşınma direncine ve yüksek sıcaklık dayanımına sahip değillerdir [6].

Buradan da anlaşılacağı gibi alüminyum alaşımının otomotiv sanayiinde daha geniş çapta kullanımı için geleneksel alüminyum alaşımlarına ve üretim tekniklerine alternatifler getirilmelidir.Bu konuda son zamanlarda yapılan çalışmalar özellikle aşağıdaki üç konu üzerinde durmaktadır. Bunlar: Toz metalürjisinde ön alaşımlandırılmış tozların kullanımı, sprey şekillendirme (ön alaşımlandırılmış tozların özelliklerine sahip ancak daha düşük maliyetli) alüminyum esaslı MMK üretme [6].

3.3. Üretim Teknikleri

Nihai bir şekillendirme işlemi sonradan uygulanmak üzere MMK' lar birincil işlemle takoz şeklinde yarı mamul olarak üretilir. Bu kompozitler haddeleme, dövme, extrüzyon gibi geleneksel şekillendirme işlemlerine uyumludur [52, 53].

Ekstrüzyon takozlarının üretiminde en çok karıştırmalı döküm ve toz metalürjisi tekniği kullanılmaktadır [26, 50, 54–65]. Ön şekillendirilmiş SiC fiber veya kılcal kristaller (Whisker) içerisine erimiş metalin sıkıştırılarak sızdırılması suretiyle uygulanılan basınçlı sızdırma metoduyla da MMK üretilmektedir. Her bir teknik kendine has özelliklere ve olumsuzluklara sahiptir. Sıvı faz metotları düşük üretim maliyetine ve yüksek verimliliğe sahiptirler [52].

Metal Matrisli Kompozitler (MMK); aralarında karıştırmalı döküm (KD), basınçlı döküm (BD), toz metalürjisi (TM), basınçlı sıvı metal süzdürme tekniği, derin çekme, haddeleme, sıcak ekstrüzyon gibi sıcak ve soğuk şekillendirme tekniklerinin bulunduğu geleneksel ve ileri şekillendirme teknikleri ile şekillendirilebilmektedirler. Bu şekillendirme teknikleri katı fazda şekillendirme, sıvı fazda şekillendirme, katı-sıvı fazda şekillendirme olarak sınıflandırılabilirler. Diğer taraftan MMK 'lerin talaşlı imalatla şekillendirilmesi; takviye elemanı hasarına yol açacağından ve de sert takviye parçacıklarının işlenmesinin yüksek maliyeti nedeniyle sınırlıdır [54, 66–68].

Şekillendirme metodunun seçimi; takviye elemanı boyutuna, türüne, şekline, hacim oranına ve üretilecek parçanın şekline, kompozitin uygulama alanına ve maliyetine bağlı olarak belirlenir. Örneğin; ince taneli ($<20\mu$m) takviye elemanlarının yüksek hacim oranlarında ($>\%30$) kullanıldığı kompozitler TM tekniği ile şekillendirilirler. Kısa ve sürekli fiber ve kılcal kristal (whisker) takviye elemanı içeren kompozitler genellikle basınçlı sıvı metal süzdürme tekniği ile üretilirler. Daha kaba parçacıklı takviye elemanlarıyla, % 30 hacim oranlarından düşük oranlarda takviyelendirilen kompozitler KD tekniği ile ekonomik olarak üretilebilirler. Ayrıca bu teknikle üretilmiş yarı mamul takozlar; geleneksel sıcak ve soğuk şekillendirme yöntemleri ile tekrar şekillendirilebilirler [69].

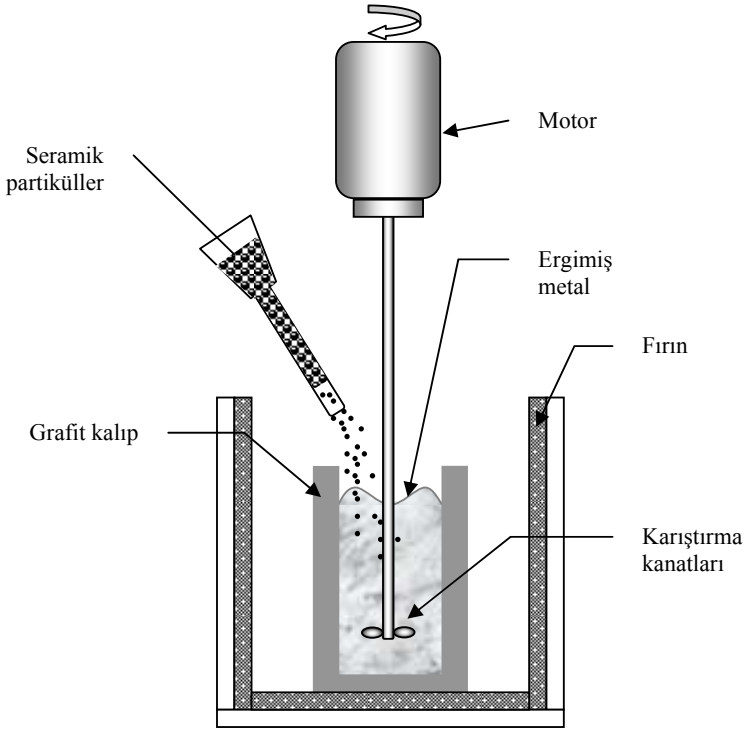
3.3.1. Karıştırmalı Döküm Tekniği

Karıştırmalı döküm tekniği ile extrüzyon takozlarının üretiminde bu tekniğin doğasında var olan gözeneklilik, seramik-takviye elemanı topaklanması, yapıda gaz sıkışması, kaba tane boyutu gibi yapısal problemler karşımıza çıkar. Diğer taraftan döküm kalıbının farklı yerlerinde farklı katılaşma hızlarından dolayı matris içerisinde parçacık dağılımını kontrol etmek güçtür. Matris ve takviye elemanları arasındaki kimyasal reaksiyonları kontrol etmek ve sınırlamak için sıcaklığın kontrol edilmesi önemlidir Bu problemler toz metalürjisi ile karşılaştırıldığında bu tekniği ikinci plana iter [57].

Takoz üretimi ile ilgili yapılan çalışmalarda farklı tane boyutlarındaki (10-40μm) farklı seramik tozlar ve kılcal kristaller (SiC_p, SiC_w , Al_2O_{3p}, Al_2O_{3w} ,B_4C_p) farklı hacim oranlarında (%0-30) ergitilmiş matris malzemesine karıştırılarak döküm veya basınçlı döküm yöntemleriyle extrüzyon takozları üretilmektedir. Matris malzemesi ya alüminyum döküm alaşımlarından (A356, A359.v.b.) ya da 2xxx, 5xxx, 6xxx, 7xxx serisi alüminyum alaşımlarından seçilmektedir. Günümüzde MMK 'lerin karıştırmalı döküm tekniği ile üretilmesi rutin bir üretim süreci haline gelmiştir [26, 52, 53, 55, 57, 58, 70–74].

Seramik parçacıklar 670-750°C 'de ergitilmiş matris alaşımına katılmadan önce 650-750°C 'de ön ısıtmaya tabi tutulurlar ve argon gazı [52] gibi koruyucu bir

gaz akımı altında belirli bir debide (örn. 8 gr/dak) erimiş metale ilave edilerek belirli bir hızda (Örn. 750 dev/dak) karıştırılır [26, 52, 57]. Karıştırma işleminin bitiminde pota içerisindeki MMK alttan boşaltma [26] veya üstten boşaltma teknikleriyle çelik kalıplara dökülerek yer çekim etkisinde veya basınçlı [52, 53, 57] olarak katılaşmaya terk edilirler. Bir potadan bir seferde bir veya birkaç takoz dökülebilir. Takoz boyutları belirlenen deney şartlarına ve extrüzyon tesisatının kapasitesine bağlı olarak birkaç gramdan birkaç kilo grama kadar değişebilir. Döküm payları ile üretilen takozlar talaşlı imalatla işlenilerek extrüzyonda kullanılacak nihai boyutlarına getirilir [26,32,52,55–57,59–61].



Şekil 3.1. Karıştırmalı döküm tekniğinin temel prensibi

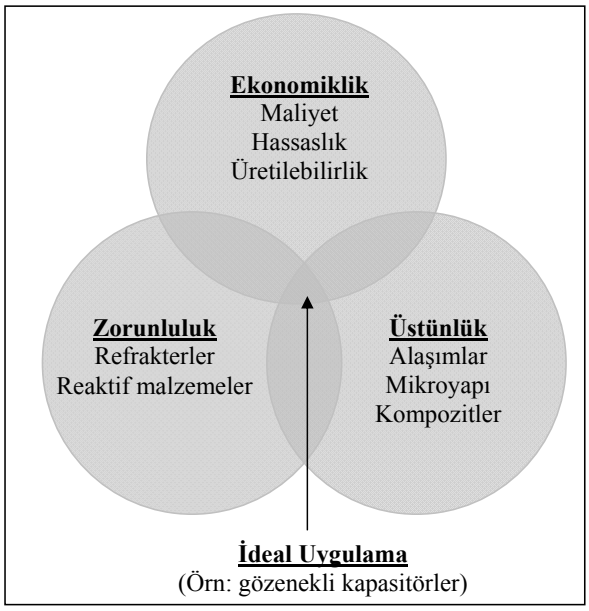
Takviye edilmemiş bir alüminyum alaşımı ile aynı alaşımın matris malzemesi olarak kullanılmasıyla elde edilmiş olan bir MMK'nın kimyasal özellikleri aynı değildir. MMK 'nın üretim süreci alaşım elementlerinin kimyasal yüzdelerini de önemli ölçüde değiştirir [59].

Bu yöntem geleneksel döküm yönteminden farklı olarak iki aşamada gerçekleştirilir. İlk aşamada ergitilmiş matris malzemesi içerisine seramik takviye elemanı belirli yöntemlerle katılır ve mekanik bir karıştırıcı ile karıştırılır, ikinci aşamada ise

elde edilen bu çamur kıvamındaki karışım geleneksel döküm yöntemlerinden biri kullanılarak kalıba dökülerek katılaştırılır. Bu şekilde bir nihai ürün veya bir ara ürün elde edilmiş olur (Şekil 3.1) [28, 75].

3.3.2. Toz metalürjisi

Toz metalürjisinin başarısına birçok özellik katkıda bulunmaktadır. Bunlardan üç anahtar etken; maliyet, özellikler ve reaktivitedir . Şekil 3.2 toz metalürjisi uygulamalarının nasıl kategorize edildiğini göstermektedir. Bunlardan ilki karmaşık geometrili parçaların ekonomik üretimine dayalı pek çok uygulamadır. Otomotiv endüstrisi için parçalar bu sahadaki iyi örneklerdir; yataklar, supap yuvaları, emisyon algılayıcıları, katalitik konvertörler, darbe emiciler, bujiler, piston kolları, zincir dişlisi ve pek çok motor zamanlama parçaları. Bu alanda daha çok üretilebilirlik, otomasyon ve boyut toleransı düşünceleri hakimdir. Yüksek üretim miktarları için hassaslık ve maliyetin her ikisi de çok önemlidir [76].



Şekil 3.2. Toz metalürjisinin kalitesini etkileyen faktörler.

Toz metalürjisi ürünlerinin kullanılması için pek çok üstün özellik ve mikroyapısal uygunluk vardır. Örnek olarak gözenekli filtreler, oksit dağılımlı güçlendirilmiş türbin alaşımları, sermetler (seramik-metal kompozitler), fonksiyonel tabakalı yapay kemikler (metal-seramik, titanyum-hidrosiapatit), temas alaşımları (bakır-karbon)

ve tungsten karbürden veya elmas kompozitlerden kesici takımlar verilebilir. Bu malzemeleri diğer tekniklerle üretmedeki yetersizlik bu sektörün büyümesine katkıda bulunmuştur. Son olarak zorunlulukları ele aldığımızda, bu malzemelerin diğer tekniklerle üretilmeleri oldukça zordur. Örnekler arasında seramikler, pek çok reaktif ve refrakter metaller, ergitilmesi pratikte uygun olmayan bazı polimerler gibi sert ve yüksek sıcaklık malzemeleri vardır. Güncel örneklerden bazıları molibden disilisit, titanyum diborür, titanyum alüminat, magnezyum diborür ve amorf metallerdir. Pek çok durumda, yüksek sıcaklık işleminden kaynaklanan mikroyapı hasarından kaçınmak için, bir tozun oluşturulması ve daha sonra işlenmesinde düşük sıcaklık arzu edilir.

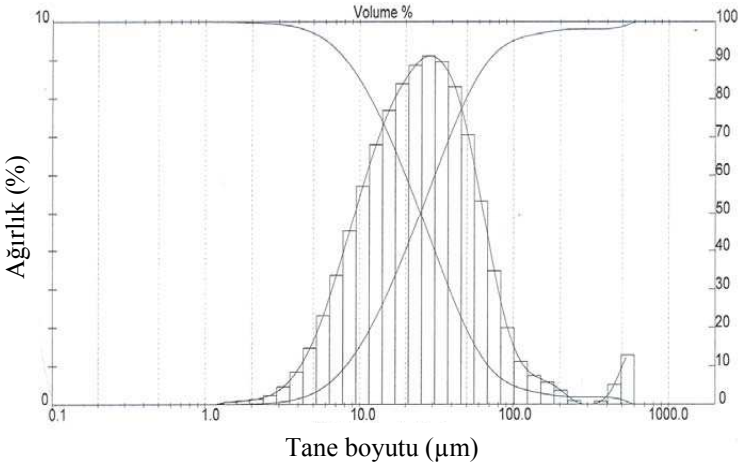
Sıklıkla her üç kategorideki elementler, toz metalürjisi uygulamalarında yer alır. Gerçekten, önemli büyüme ve gelişme muhtemelen yüksek kaliteli, düşük maliyetli, amaca uygun şekillendirilmiş; ekonomiklik, zorunluluk ve üstünlüğün geliştirilmiş bileşenlerinden kaynaklanacaktır. Örnek olarak, tantalyum gibi metaller ve baryum titanat gibi seramikler kullanılarak üretimi günde yüz milyonlara ulaşan elektronik devreler için üretilen gözenekli kapasitörler verilebilir [76].

Toz metalürjisi teknikleri parçacıkların bir araya gelmesiyle oluşan tozlarla başlar. Parçacık, tozun bölünemeyen en küçük birimi olarak tanımlanır. Toz işleme teknolojileri dumandan daha büyük (0.001-1μm), fakat kumdan daha küçük (0.1-3mm) parçacıklarla ilgilenir. Kullanılan tozların çoğu, insan saçı çapı ölçüsündedir (25-200μm). Taramalı elektron mikroskobu (SEM), bir tozun farklı özelliklerinin gözlenmesinde kullanılan en iyi araçlardan birisidir. Bu sayede farklı parçacık boyutları ve şekilleri rahatça görülebilmektedir. Kullanılan toz parçacıkların çoğu kohesivdir dolayısıyla birbirine yapışır. Toz karıştırma işlemi sonrasında toz özelliklerinin belirlenmesi amacıyla parça kümelenmelerini ayırmak veya dağıtmak bazı durumlarda zordur. Böyle durumlarda çok sayıdaki küçük parçacıklar, doğru olmayan bir biçimde büyük bir parçacık gibi ölçülür. Bunun sorumlusu parçacıkların topaklanmasına sebep olan yüzey nemidir. Bu nedenle boyut analizinden önce, yüzeydeki nemden kaynaklanan kılcal kuvvetleri önlemek için parçacıkların sıvı içerisinde dağıtılması tercih edilir. Topak, malzeme mukavemetinden çok küçük kayma gerilmeleriyle yenilebilecek zayıf kuvvetlerin bir

arada tuttuğu parçacıklar kümesidir. Çamur kuruduğunda, toprak parçacıkları elle ufalanabilen çamur keseleri şeklinde topaklanır. Bunun aksine, agregalar genellikle güçlü kimyasal kuvvetlerle bağlıdır. Toz özelliklerinin ölçülmesinden önce topaklar parçalanarak dağıtılabilir, agregalar ise dağıtılamaz. Parçacığa depolanmış yüzey enerjisi, parçacık yüzey alanı (A) ile yüzey enerjisinin (δ,J/m^2) çarpımı ile orantılıdır. Yüzey alanı parçacığın çapı D'nin karesiyle, V hacmi ise parçacık çapının küpü ile değişir. Sonuç olarak bir tozun birim hacim başına düşen enerjisi (E), esas olarak parçacık boyutu ile ters orantılıdır (E=6δ/D). Hacim başına düşen enerji, parçacık boyutu ile ters orantılı olarak değiştiğinden, parçacık boyutu azaldıkça topaklanma için itici güç daha büyük olur. Bu durum toz özelliklerinin belirlenmesinde önemli problem oluşturur. Bunun nedeni topaklanmış küçük parçacıkların diğer tozlara göre daha büyük boyut vermesidir. Bir tozun boyutunu veya diğer özelliklerini doğru olarak belirlemek için, tozun uygun bir şekilde dağıtılması gerekmektedir. Dağıtma işlemi parçacık boyutu ne kadar küçükse o kadar güçleşir. Birçok parçacık için yüzey aktifleştiren sıvılar, mekanik veya ultrasonik çalkalama, parçacıkların dağılması ve özelliklerinin doğru olarak belirlenmesinde etkili olabilir. Özellikle 100μm'den daha küçük parçacıklar, dağıtma işlemine direnç gösteren yüksek çekim kuvvetlerine sahiptirler. Nem topaklanmaya neden olduğu için, toz kurutma işlemi iyi bir ilk adımdır [76]. Tozların tamamı aynı boyutta olmadığı için, karışımının ortalama tane boyutlarını ölçmek için çeşitli yöntemler izlenmektedir. Öncelikle tel aralıkları birbirinden farklı olan eleklerle tozlar elenir. Daha sonra eleklerde kalan tozlar tartılır, bu ağırlıklar toplam ağırlığa bölünerek yüzde ağırlık oranları tespit edilir ve sütun grafikleri şeklinde ifade edilir. Bu tür çizimlerde mod tepe noktasıdır (Şekil 3.3).

Sıkıştırma, tozları şekillendirmenin yaygın bir yoludur. Dolayısıyla basınca verilen tepki önemli bir toz özelliğidir. Sıkıştırılabilirlik uygulanan bir yük altında tozun yoğunlaşmasını ölçer. Tipik test geometrisi, basit silindir veya dikdörtgendir. Kalıp toz ile görünür yoğunlukta doldurulur ve yoğunluk sıkıştırılmadan sonra ölçülür. Ham yoğunluk preslemeden sonraki yoğunluktur ve sıkıştırılabilirliğin ifade edilmesinde temel oluşturur.

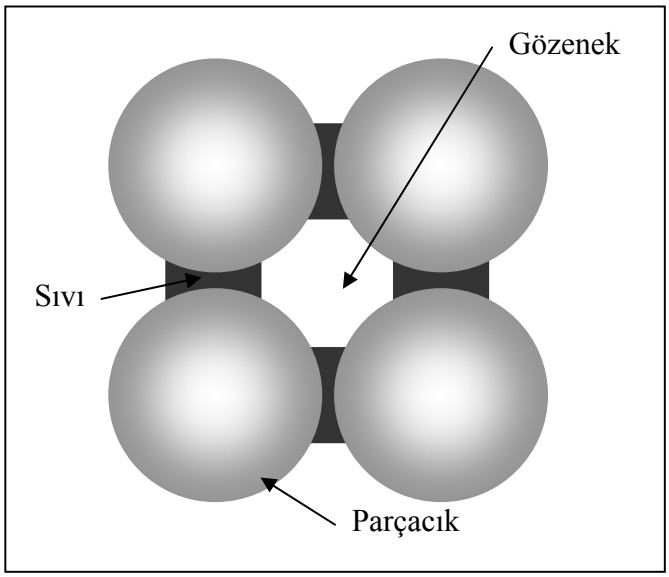
Toz metalürjisinde küçük parçacıklar topaklanma nedeniyle zorluk çıkartırlar.



Şekil 3.3. Toz tane boyutu analizi.

Topaklanma, yoğuşmuş sıvı veya ısının neden olduğu sinterleme bağlarından kaynaklanır. Neticede, paketleme, akma, karıştırma, sıkıştırma ve sinterleme işlemlerini olumsuz etkiler. Topaklanmanın bir diğer nedeni de öğütme ve karıştırma esnasında parçacıkların soğuk kaynaklanmasıdır. Topaklanma yüksek yüzey alanı ve zayıf kuvvetler etkisiyle oluşur. Bu zayıf kuvvetler toza bağlayıcı dayanımı sağlar ve bu dayanım paketleme yoğunluğu arttıkça artar. Normal olarak bu zayıf bir kuvvettir ve parçacıklar iri ise toz kolay akar. Bununla birlikte çok küçük parçacıklarda, kendiliğinden topaklanma yaygındır. Küçük büyütmede yuvarlak olarak görülen tozlar, büyük büyütmede binlerce parçacık içeren iri toz küreleri olarak karşımıza çıkabilmektedir. Topaklanma genelde ıslatma sıvısındaki nemden kaynaklanır. Şekil 3.4'de verildiği gibi, su parçacık temas noktalarında yoğunlaşarak sarkaç bağlar olarak tanımlanan kılcal köprüler oluşturur. Emilen nemden kaynaklanan topaklanma, 100 mikrondan daha küçük parçacıklar için önemli bir sorundur. Bir mikronun altındaki tozlar ise kuru olsalar dahi kendiliğinden topaklanmaya uğrar. Topakların dağılması kurutma, öğütme ve yüzey işlemleriyle sağlanır. Bir tozun topak dağılması için sıkça kullanılan yöntem bilyeler veya çubuklarla kuru atmosferde yapılan hafif öğütmedir. İstenilen durum parçacıkların kırılması değil, topaklanmış yapının darbe ile ayrılmasıdır [76].

Karıştırma ve harmanlama işlemleri; özel parçacık boyut dağılımı hazırlanması, sinterleme esnasında yeni alaşımların oluşturulması amacıyla tozların birleştirilmesi, sıkıştırma için yağlayıcıların eklenmesi ve şekillendirme için toz-bağlayıcı karışımının



Şekil 3.4. Taneler arası yapışma.

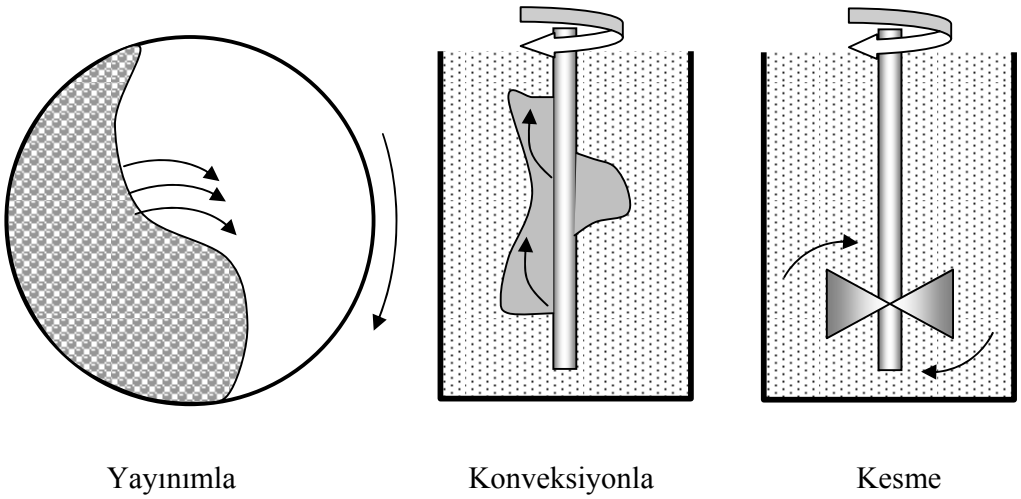
hazırlanması için gereklidir. Tozların harmanlanmasının ana sebebi genel olarak taşıma sırasında titreşimler ile oluşan ayrışmanın engellenmesidir. Titreşimler küçük partikülleri büyüklerin arasından sızarak alt bölgelerde birikmesine aynı zamanda daha büyük boyuttaki parçacıkların üst yüzeye yakın bölgelerde birikmesine sebep olur. Bu tür ayrışmalar sıkıştırma ve sinterlemede düzensizlikler yaratır. Ayrışmanın üç nedeni olmasına rağmen (parçacık boyutu, yoğunluk ve şekildeki farklılıklar), boyut farkından ileri gelen ayrışma en baskın olanıdır. Boyut ayrışmasının sonucu olarak, yoğunluk değişimi sebebiyle, genel görünür yoğunluğun noktadan noktaya azalmasıdır [76]. Karıştırma işlemleri parçaların üretiminde yaygın bir sorun kaynağıdır. Harmanlama veya karıştırmadaki değişkenler: malzeme, parçacık boyutları, karıştırıcı tipi karıştırıcı boyutu, karıştırıcı içerisindeki tozun göreceli hacmi, karıştırma hızı, kesme ve karıştırma zamanıdır. Bunlara ek olarak nemlilik gibi çevresel faktörler de karıştırmayı etkiler. Bazı basit kurallar sorunları azaltır:

✓ Taşıma sonrası kuru tozların yeniden harmanlanması

✓ Kuru tozların titreştirilmemesi

✓ Boyut ayrışmasının gerçekleşeceği durumlarda kuru tozun sert düşüşle beslenmemesi

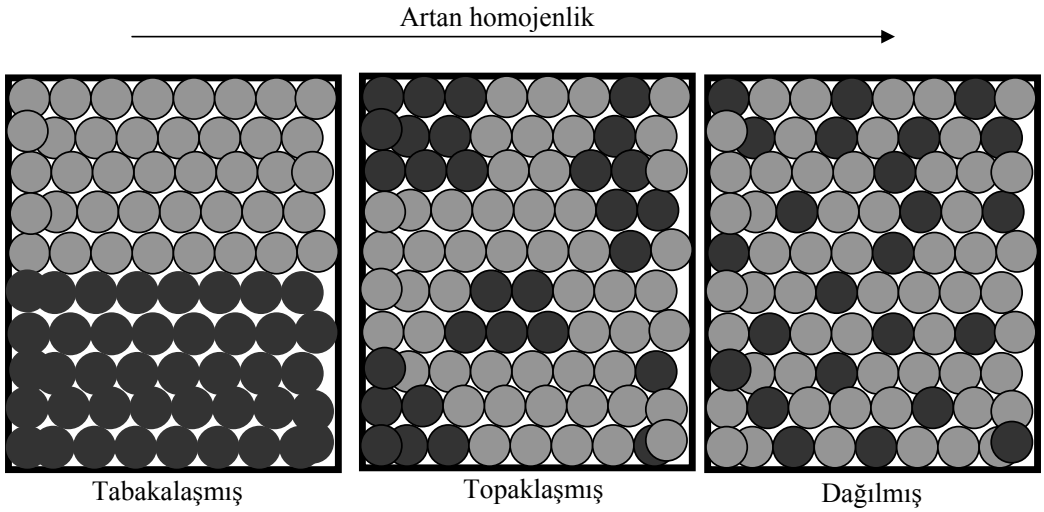
✓ Toz-bağlayıcı karışım için gereksiz kesmenin giderilmesi.



Şekil 3.5. Toz karıştırma sistem çeşitleri.

Toz karıştırma mekanizmaları Şekil 3.5'de görüldüğü gibi; yayınma, konveksiyon ve kesmedir. Yayınma ile karışım dönen silindir içerisinde, konveksiyon ile karışım vidalı karıştırıcıda, kesme ile karışım ise bıçaklı karıştırıcıda yapılmaktadır. Yayınma ile karışım her parçacığın toz kütle içerisinde hareketi ile oluşur. Toz yatak düzlemi dış kenarında kırılarak yüzeyden akışın gerçekleşmesini sağlar. Sürekli dönen silindir taze tozları ve kesme düzlemlerini ortaya çıkarır ve bu durum parçacıkların bir biri içerisinde karışmalarını teşvik eder. Konveksiyonla karışım toz gruplarının bir yerden diğer bir yere taşınımı ile karıştırılmalarını içerir. Vida küçük toz grubunu alt yüzeyden keserek harman içerisinde üstlerde bir yere taşır. Kesme ile karıştırma sürekli ayrışma ve tozların kayma düzlemleri üzerinde akmaları ile oluşur. Tozun harmanlanmasında ve karıştırılmasında bazı olumsuz durumlar söz konusu olabilmektedir. Metal parçacıkların iş sertleşmesi ile sertliği arttığından daha zor preslenir, seramik parçacıklar ise daha küçük parçacıklara bölünür. Karıştırma özellikle sert parçacıklarda kirlenmeyi de arttırır. Yanlış tasarlanmış karıştırma süreci parçacık ayrışmasına neden olacağından, iki tozun arasındaki boyut, şekil ve yoğunluk farkı arttıkça sorun yaratır [76].

Karışımın homojenliği, belirli noktalardan alınan yoğunluk, ısı kapasitesi, elektrik iletkenliği, viskozite ve hatta renk testleri kullanılarak bileşim farklılıklarının ölçümü ile belirlenir. Karışımın kalitesi geniş aralıkta alınmış numunelerin karşılaştırılması ile değerlendirilir. Şekil 3.6'de üç farklı düzeyde homojenlik vardır. Bunlar

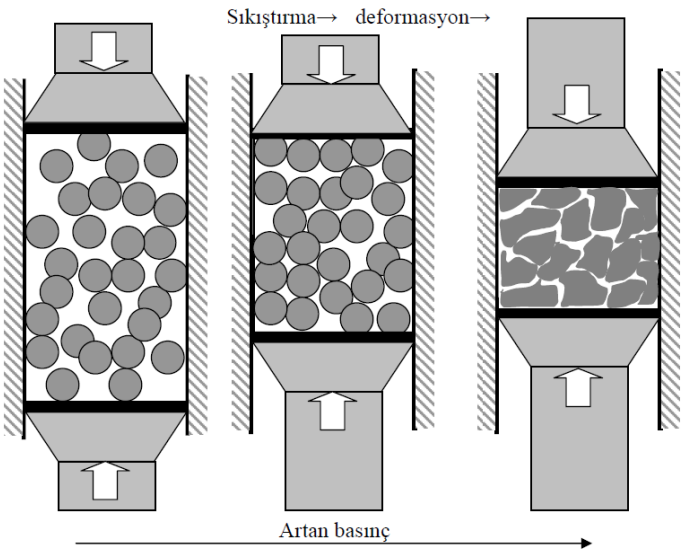


Şekil 3.6. Karışım homojenliği.

büyük ölçekli ayrışarak tabakalaşmış yapılar kısmi homojenlik içeren topaklanmış yapılar ve iyi dağılmış ideal homojen yapılardır. Karıştırmada ilk hareket büyük parçacık kümelerinin kesme ile kırılmasıdır. Başlangıçta homojenlik artışı hızlıdır. Karıştırmanın devam etmesi ile bağlayıcı dağılır ve toz kümeleri küçülür [76].

Tozlar basınç uygulandığında; önce parçacıklar birbiri üzerinden kayarak ve daha sonrada yüksek basınçlarda parçacığın şekil değiştirmesiyle yoğunlaştırılırlar. Yoğunluk artması düşük basınçlarda önce hızlıdır, fakat gözenekler kapandıkça toz, yoğunlaşmaya karşı artarak direnç gösterir. Kalıpta sıkıştırmanın basitleştirilmiş şekli aşağıda şematik olarak verilmiştir. Toz görünür yoğunlukta başlar, her bir parçacık 4-6 komşu ile temastadır (koordinasyon sayısı). Bu aşamada tozun herhangi bir bağ mukavemeti yoktur. Basınç uygulandıkça parçacıklar yerleşir, şekil değiştirir ve bağ oluşur. Şekil değiştirme parçacıkların sertliğini artırdığından, sıkıştırmayı devam ettirmek için daha yüksek basınç gerekir. Neticede malzeme geri dönüşü olmayan bir noktaya kadar sertleşir. Toz cinsi ve kalıp malzemesine bağlı olarak, en üst sıkıştırma basıncı 1000 MPa değerine kadar çıkabilir. Çok sert ve çok yumuşak tozlar daha düşük basınçlarda sıkıştırılır (Şekil 3.7).

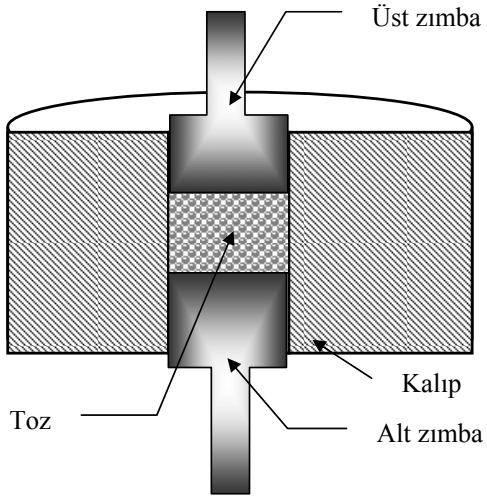
Kalıpta sıkıştırma takımı, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi tek bir eksende basınç uygulayacak şekilde tasarımlanır. Presleme sırasında kalıpta oluşan hareket Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Kalıp, tozun doldurulup sıkıştırılacağı boşluğu temin eder. Toz dolumu sırasında üst zımba yukarı çekilmiş durumdadır. Dolum sırasında



Şekil 3.7. Kalıp içerisinde sıkıştırılan toz davranışı.

alt zımbanın bulunduğu durum doldurma konumu olarak tanımlanır ve kalıbın içine ne kadar toz koyulabileceği alt zımba tarafından belirlenir. Alt zımbanın hareketsiz olduğu sistemlerde vardır. Toz doldurma işlemi bittikten sonra her iki zımba vasıtasıyla kuvvet uygulanır ve tozlar sıkıştırılarak işlem tamamlanmış olur. Zımbalar vasıtasıyla yoğunlaştırılmış toz kalıp içerisinden çıkartılır.

Sinterleme, birbirine temas eden parçacıkların yüksek sıcaklıklarda birbirine bağlanmasını sağlar. Bu bağlanma, ergime sıcaklığının altında katı halde atom

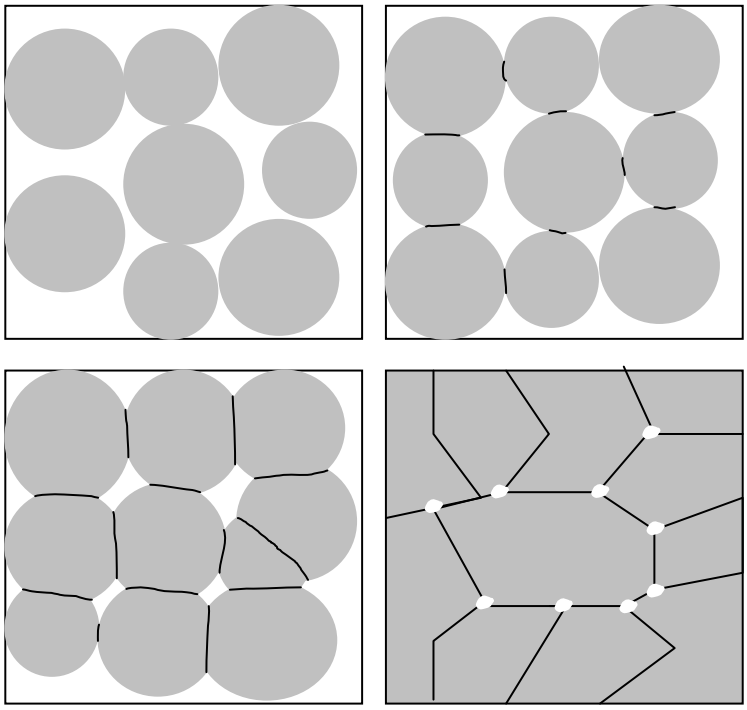


Şekil 3.8. Toz metalürjisi kalıp ve sıkıştırma.

hareketleriyle oluşabilir. Fakat pek çok durumda, sıvı faz oluşumu ile birlikte gerçekleşir. Mikroyapı ölçeğinde, bağlanma temas eden parçacıklar arasında boyunlaşma ile kendini gösterir. Bu tür boyunlaşma mukavemetin ham mukavemete oranla artmasını ve diğer birçok faydalı özelliğin gelişmesini sağlar. Sinterlemenin ilk aşaması, her parçacık üzerinde birkaç noktada boyun büyümesi ile tanımlanır. Fakat, boyunlar birbirinden bağımsız olarak büyür. Bu durum Şekil 3.9'da gösterilmiştir. Ayrıca küçük parçacıklarda boyun bölgesinin doldurulması için daha az sayıda atom gerekir. Atomların hareket mesafesi daha kısadır ve gerilme daha büyüktür. Bunun doğal sonucu olarak küçük boyutlu parçacıklar daha hızlı sinterlenir. Sıkıştırma olmadan parçacıklarda temas küçük noktalar ile başlar. Başlangıçta gözenekler düzensiz ve köşeli şekildedir. Boyun zamanla dışbükey bölgedeki atomlar tarafından doldurulan bir içbükeyliği temsil eder. Boyun büyüdükçe kavis azalır ve işlem yavaşlar. Sinterlemenin ara aşamasında gözenekler yuvarlaklaşır, fakat etrafındaki kavis kütle transferi için itici güç oluşturmaya devam ederek içbükey bölgeleri doldurur. Sinterlemenin ara aşamasında, boyunlar birbiri ile etkileşecek ve örtüşecek ölçüde büyümüştür. Her ne kadar gözenekler yuvarlaklaşıp düzgün hale gelsede hala dışa açıktırlar. Diğer bir ifade ile, akışkanlar ham parça içine girip çıkabilir. Sinterlemenin ilerlemesiyle taneler büyür ve gözenekler küçülür. Sinterlemenin son aşamasında gözenekler kapalı ve küreseldir. Tam yoğunluğa yaklaşılırken tane sınırı hareketini zorlaştıran gözenek sayısı azaldığından tane büyümesi hızlanır. Gözenekler, sadece önemli oranda bulunduklarında tane büyümesine engel oluşturur (Şekil 3.9).

MMK' ler özel otomobil parçalarının üretiminde kullanılmaktadır. KD tekniği ile üretilenlerden daha çok TM ile üretilmiş ürünler yaygındır. TM ile üretilen ürünler ya doğrudan nihai şekilde üretilir veya TM ile üretilmiş kütükler extrüzyon, dövme, haddeleme v.b. sıcak veya soğuk şekillendirme yöntemleri ile nihai şekle getirilir. KD tekniği kolay ve ucuz olmakla birlikte TM ile üretilmiş ürünlerin özelliklerini sağlayamaz. Bunun yanında TM pahalı olması nedeniyle sınırlı kullanım alanı bulmuştur [6, 77–79].

Toz metalürjisi ile üretilen takozlar, üniform ve homojen bir parçacık dağılımına sahiptir. Bu durum ürün özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir. Ancak bu teknik



Şekil 3.9. Tozların sinterleme sırasındaki bağlanma mekanizması.

karıştırmalı döküm ile karşılaştırıldığında daha pahalıdır. Bu nedenle takoz üretim tekniğinin seçimi nihai üründen beklenilen performansa ve birim maliyete bağlıdır [26, 54].

Toz metalürjisi ile MMK takozların üretilmesinde seçilen matris alaşımının belirli tane boyutundaki (4-80μm) tozları, belirli tane boyutundaki (3-40μm) takviye elemanı (SiC_p, SiCw, Al_2O_3) tozları ile karıştırılarak elenir, sıcak vakumda gazı alınır ve soğuk izostatik presleme yapılarak MMK takoz elde edilir [26, 54, 56, 57, 61, 66–68, 80, 81]. Ayrıca toz metalürjisi ile hap şeklinde üretilmiş farklı karışım oranlarındaki tabakalar vakum altında gazı alındıktan sonra üst üste konularak ekstrüze edilebilmektedir [61].

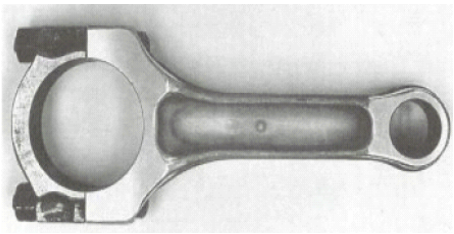
Toz metalürjisi ile üretimde gaz giderme süreci işlem özellikleri bakımından önemlidir [54]. Toz metalürjisi ile üretilen takozlarda takviye elemanın yapı içerisine dağılımı kolaylıkla sağlanabilir ve ara yüzey reaksiyonları kolaylıkla kontrol edilebilir [82].

TM ile üretilmiş ürünlerin otomotiv teknolojisi açısından en başta gelen avantajı, özellikle yüksek sıcaklıklardaki yüksek çevrimli yorulma direncidir. TM 'de seramik

Tablo 3.3. Alternatif biyel kolu malzemelerinin bazı özellikleri [6].

Malzeme	Elastiklik Modülü/Yoğunluk (10^7)	Yorulma direnci/Yoğunluk (10^6)
$2080/SiC/15_p$	3.5	7.6
$6061/Al^2O^3/20_p$	3.5	3.8
6061	2.6	4.0
1040 Çeliği	2.6	3.0
Ti-6Al-4V	2.5	7.0
KGDD	2.2	7.0

parçacıkların presleme esnasında alüminyum tozları üzerindeki oksitleri kırarak alüminyum tozları arasındaki metalik bağı güçlendirdiği bu nedenle TM ile üretilmiş MMK 'lerin, yorulma direnci TM ile üretilmiş Al alaşımlarına nazaran daha yüksektir. Şekil 3.10'de MMK' den toz metalürjisi ile üretilmiş hafiflik ve yorulma direnci özelliklerini bir arada bulunduran biyel kolu görülmektedir. Tablo 3.3'de ise biyel kolu için alternatif malzemelerin mukayaseli özellikleri görülmektedir [6].

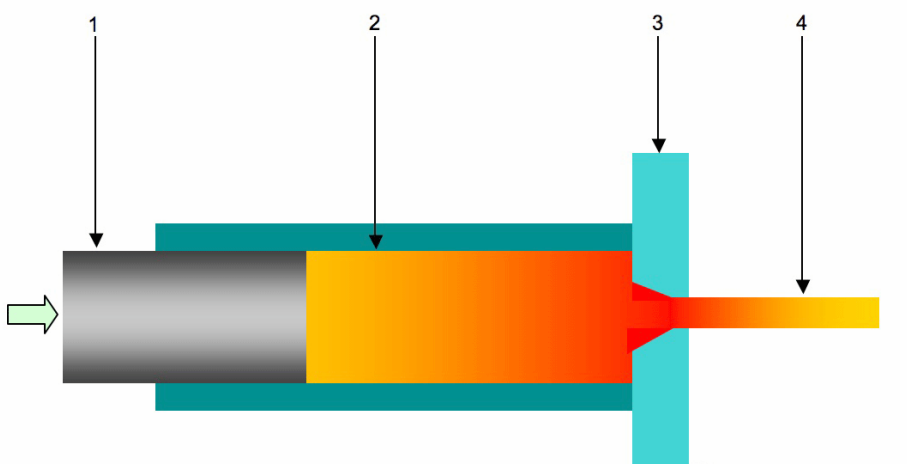


Şekil 3.10. MMK 'den TM ile üretilmiş biyel kolu [6].

Toz metalurjisi ürünlerinin mekanik ve fiziksel avantajları yanında nihai ürün veya nihai ürüne yakın ürün elde edilebilmesidir. Böylece hem üretim süreci kısalır hem de üretim maliyeti azalır.

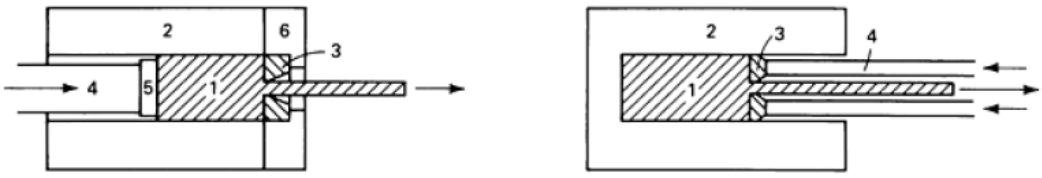
3.3.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Extrüzyonu

Bu yöntem genellikle yumuşak veya ergime noktası düşük metallerin şekillendirilmesinde kullanılır. Örneğin alüminyum 340-510°C sıcaklık aralığında ekstrüze edilebilir. Sıcak ekstrüzyon uzun ve sabit kesitli üretim amacıyla kullanılır. Soğuk ekstrüzyonla üretilemeyen içi dolu ve boş çubuklar, borular sıcak ekstrüzyonla rahatlıkla üretilmektedir. Temel prensip olarak; bir ucu ekstrüzyon kalıbı bir ucu baskı zımbasıyla kapatılmış kovan içerisinde belirli sıcaklığa ısıtılmış malzemenin uygulanan basınçla kalıp boşluğundan akarak şekillendirmesidir (Şekil 3.11).



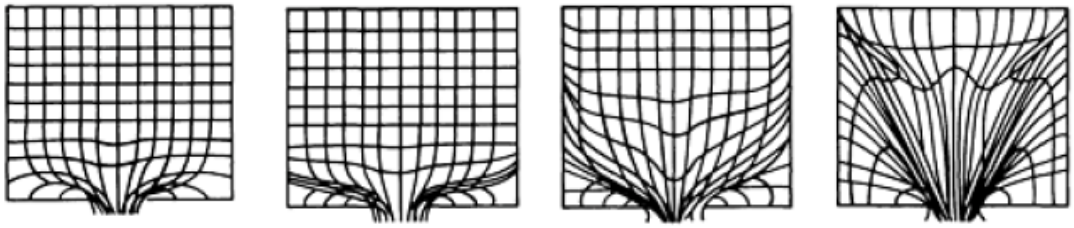
Şekil 3.11. Ekstrüzyon prensibinin şematik gösterimi; 1-zımba, 2-billet, 3-kalıp, 4-ekstrüzyon ürünü.

Ekstrüzyon direk ve indirek olarak ayrılmaktadır. Direk ekstrüzyonda, kovan içerisindeki billet arka taraftan zımba vasıtasıyla itilerek kalıp boşluğundan dışarı çıkmaya zorlanır. İndirek ekstrüzyon yönteminde ise kovan içerisindeki billet üzerine kalıp bastırılır, bu sayede hareket eden kalıp içerisindeki boşluktan ekstrüzyon ürünü çıkar (Şekil 3.12).Ekstrüzyon sırasında metal akış karakteristiği malzeme-kalıp sürtünme durumuna, ekstrüzyonla imal edilecek mamul şekline ve malzeme tipine göre farklılıklar göstermektedir (Şekil 3.13) [83] .



Şekil 3.12. Temel ekstrüzyon tipleri a) İleri (direct) b) geri (indirect), 1-billet, 2- kovan, 3- kalıp, 4- zımba, 5- ara pul, 6- kalıp desteği [83].

Ekstrüzyon sırasında oluşan sıcaklığın ekstrüzyon hızından etkilendiği sert aluminyum alaşımlarıyla yapılan çalışmalarda görülmüştür. Karmaşık ısıl etkileşim, ısıtılmış biletlin ön ısıtma yapılmış kovan içerisine konulması ve ekstrüzyonun başlamasıyla ortaya çıkmaktadır. Sıcaklık; plastik deformasyonla oluşan sıcaklıktan, iç gerilmelerden ve kalıpla deforme olan malzeme arasında meydana gelen sıcaklıktan, billet'deki ısı transferinden, billet ile kalıp arasındaki ısı transferi ve ekstrüze olan kısımdan yapılan ısı transferinden etkilenmektedir. Bu karmaşık



(a) (b) (c) (d)

Şekil 3.13. Ekstrüzyon sırasında malzemenin kalıp içerisinden akış şematiği [83].

olaylar, malzeme ile üretim değişkenleri (billet malzemesi ve sıcaklığı, sürtünme, kalıp malzemesi ve sıcaklığı, ekstrüzyon hızı, ekstrüze olan malzemenin şekli, kesitteki azalma) arasındaki ilişki ve etkileşimden meydana gelmektedir. Üretim miktarı, billet kesit alanının ekstrüze olan ürün kesit alanına oranıyla bulunan ekstrüzyon oranının ve ekstrüzyon hızının artırılmasıyla artış göstermektedir. Ancak yüksek billet sıcaklığı, aşırı kesit değişimi (veya büyük ekstrüzyon oranı), yüksek ekstrüzyon oranı sıcaklığın aşırı derecede artmasına sebep olabilmektedir. Bu sıcaklık artışları özellikle ekstrüzyonu zor olan alüminyum 2xxx ve 7xxx serisi alaşımlarda plastik deformasyon ve sürtünmenin sıcaklığa dönüşmesiyle birlikte daha çok yüzeylerde, sıcaklıktan dolayı şekil bozukluklarına ve yırtılmalara sebep olmaktadır [83].

Sıcak şekillendirme teknikleri yalnızca malzemeyi arzu edilen şekil ve boyuta getirmekle kalmaz, aynı zamanda mikro yapıyı mekanik özellikleri iyileştirecek tarzda yeniden düzenler. Sıcak extrüzyon gibi ikincil şekillendirme işlemleri döküm gibi birincil işlemle üretilmiş MMK'lerin mekanik özelliklerini arttırmak yanında homojen bir parçacık dağılımını da sağlar [52, 54, 55, 70].

Homojen olmayan parçacık dağılımı ve kaba taneli mikro yapı; döküm yoluyla üretilen MMK 'lerin en önemli problemlerindendir. Döküm yoluyla üretilen takozlar extrüze edilerek aşağıda sayılan mikroyapı özellikleri de iyileştirilir :

✓ Ürün içerisinde üniform takviye elemanı dağılımı sağlanır

✓ Gözeneklilik azaltılır

✓ Matris-seramik ara yüzey bağı güçlenir

✓ Daha ince matris malzeme tane yapısı elde edilir

✓ Takviye elemanı kümelenme ve topaklanmaları dağıtılır

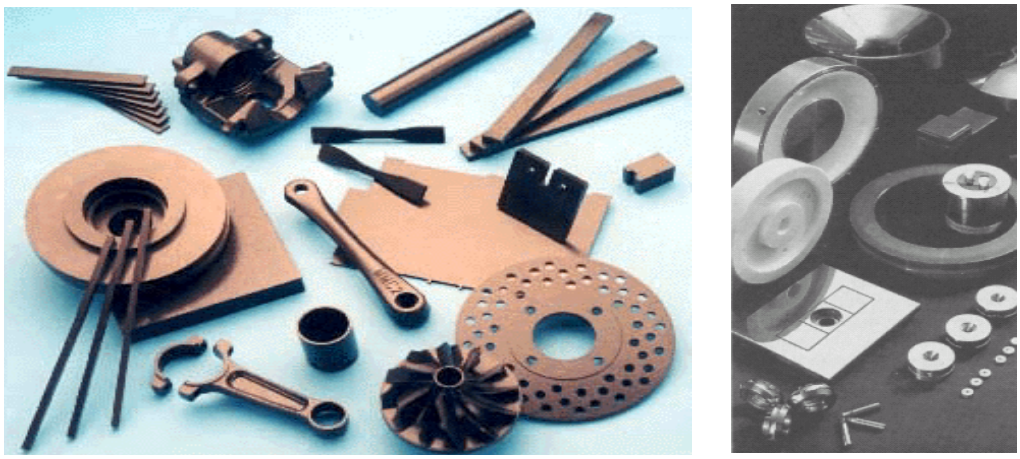
Extrüzyon işlemi, döküm yöntemiyle üretim sonucunda oluşan muhtemel parçacık kümelenmelerini extrüzyon yönünde bant şeklinde yayar. Böylece homojen bir parçacık dağılımı sağlanmış ve de yerel gerilmeler azaltılmış olur. Aksi taktirde bu kümelenmeler ürün içerisinde çatlak kaynağı olarak davranır ve iç çatlaklara yol açar [52, 58, 67].

MMK' ların extrüzyon gibi geleneksel bir yöntemle üretilebilmesi onların üretim maliyetini diğer kompozit türlerine göre önemli ölçüde azaltır ve rekabet şansını arttır. Ancak MMK' ların takviye edilmemiş geleneksel matris malzemesine göre şekillendirilmeleri daha zordur ve bu nedenle üretim maliyetleri onlara göre yüksektir. Ayrıca, MMK 'ların extrüzyonunun geniş kapasiteli presler gerektirmesi yanında, kalıp ve takımların şiddetli aşınmasına yol açması yine onların üretim maliyetini arttırır [57, 58].

3.3.4. MMK' lerin Mühendislik Alanındaki Uygulamaları ve Teknolojik Açıdan Önemi

Teknolojik uygulamalardaki çalışma ve yakıt masraflarını düşürmek için otomotiv ve havacılık uygulamalarında malzeme ağırlığının düşürülmesi ve bu yolla mukavemet/yoğunluk (spesifik mukavemet) oranlarının arttırılması önemlidir. Bu oran mühendislik malzemelerinin elastik modül, mukavemet, korozyon, oksidasyon, termal kararlılık, sürtünme, aşınma ve yorulma uygulamalarında en önemli parametrelerden biridir. Bunlarla beraber, seramiklerde olduğu gibi MMK malzemelerin uygulamaya aktarılmasındaki en önemli dezavantaj ise düşük kırılma toklukları ve matris-takviye elemanı arasındaki termal genleşme farklılıklarıdır [84–86].

Metal matrisli kompozitler çok sayıdaki yapısal uygulamalarda kullanılmaları için iyi bir potansiyele sahiptirler. Ancak monolitik metal ve alaşımları ile karıştırıldıklarında, mukavemet ve elastik modül kazanımının yüksek maliyete üstün



a) b)

Şekil 3.14. MMK ürünler, a) Genel konstrüksiyon elemanları,b) Aşınma dirençli elemanlar [89].

geldiği uygulamalar dışında, MMK' lerin kullanımları yüksek maliyetten dolayı sınırlandırılmıştır [87]. MMK üretiminin ana amacı matris alaşımının mukavemet ve elastik modülünü arttırmaktır. Bununla beraber matris alaşımları farklılığından dolayı değişik elastik modül, mukavemet ve termal genleşme katsayılı malzemeler üretilebilmektedir. En önemli özelliklerinden biri ise aşınma dirençlerinin çok iyi olmasından dolayı aşınma uygulamalarında yaygın olarak kullanılabilmeleridir [88]. Şekil 3.14'de MMK' den üretilmiş genel konstrüksiyon elemanları ve aşınma dirençli parçalar görülmektedir.

Ticari olarak elde edilebilecek ve kullanılacak MMK malzemelerin özelliklerinin ve üretim proseslerinin geliştirilmesi üzerinde büyük ilerlemeler olmaktadır. MMK malzemelerin üretimi ve uygulamaya aktarılmasındaki ana engelin maliyet olduğu ve maliyetin yüksek olmasının ana sebebinin sadece hammaddelerin elde edilebilirliğindeki güçlüklerden değil, aynı zamanda ikincil işlemler olarak adlandırılan kompozit üretim tekniklerinin pahalılığı ve aynı zamanda üretim proseslerinin hala yeterli bilgi donanımı ile gerçekleştirilemediğinden dolayı oluştuğu rapor edilmektedir [89].

MMK malzemeler matris alaşımlarından çok daha pahalı olduklarından dolayı yalnızca malzeme özelliklerinin birinci derecede önemli olduğu alanlarda kullanılırlar. Bir MMK malzeme türbin motoru olarak kullanılacaksa diğer

yüksek sıcaklık motor malzemelerine göre özelliklerinin optimal olarak geliştirilmesi gerekmektedir. Ancak MMK malzemelerin yerlerine kullanımlarının amaçlandığı malzemelere göre çok üstün özellikler sergilemeleri, bu malzemelerin üretimlerinin ileride belirli standartlara bağlanacağı ve geleneksel hafif-düşük mukavemetli alaşımların yerini alacaklarına kesin gözüyle bakılmaktadır.

MMK malzemelerin üretim maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen bugün bile bu maliyet yüksekliğinin, yüksek spesifik özellikleri, dayanım sürelerinin uzunluğu, yakıt tüketimini azaltmaları gibi üstünlüklerinden dolayı uzun vadede geleneksel alaşımlara göre daha ekonomik olduğunu iddia eden araştırmacılar mevcuttur. TOYOTA firmasının otomobil pistonlarında Al-kısa fiber takviyeli MMK malzemeler kullanarak piston ağırlığını ve yakıt tüketimini düşürdüğü çok spesifik bir örnek olarak verilmektedir.

Trumper'in ifade ettiğine göre [90], 2000'li yıllarda otomobil ve havacılık sanayinde MMK malzemeler seramik matrisli kompozitlerle beraber çelik, Al alaşımları, Ti ve alaşımları gibi metallerin yerini alacaktır. Kaldı ki günümüzde MMK malzemelerin, otomobillerin çok değişik parçalarında kullanıldığını gösteren deliller mevcuttur. Tablo 3.4'de otomotiv endüstrisinde başarılı olarak kullanılan ve uygulama alanlarının daha da yaygınlaşacağı ifade edilen MMK'ler ve avantajları özetlenmektedir [89]. Şekil 3.15'de ise Al esaslı Al_2O_3 ve grafit takviyeli MMK'den üretilmiş motor bloğu görülmektedir [91]. Burada hacimca % 12 Al_2O_3 takviyesi mukavemet özelliklerini iyileştirirken % grafit katkısı yağlama özelliklerini iyileştirdiği vurgulanmaktadır. Bu blok dökme demir ile karşılaştırıldığında %50 daha hafif, daha yüksek termal iletkenliğe ve daha düşük genleşme katsayısına sahiptir.

Kompozit performansının geliştirilmesi için en önemli anahtar parametreler, mukavemet/ağırlık oranı veya spesifik mukavemettir. Şekil 3.16'de kullanım sıcaklıklarına ve spesifik mukavemetlerine göre çeşitli yüksek sıcaklık malzemelerinin performans haritalarını göstermektedir. Bu şekilde MMK malzemeler geleneksel malzemelerden daha iyi bir yer işgal etmekteyken spesifik mukavemetlerinin seramik ve karbon/karbon kompoziti gibi diğer yüksek sıcaklık malzemelerinkinden daha

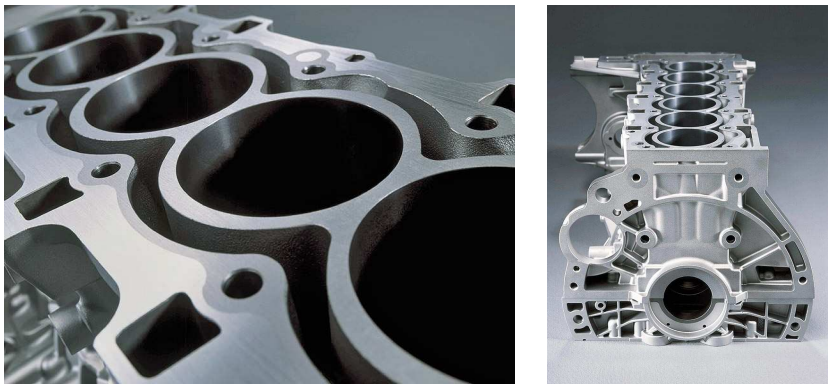
Tablo 3.4. Otomotiv endüstrisinde metal matrisli kompozitlerin potansiyel uygulamalarına bazı örnekler [89].

Bileşen	Malzeme	Avantaj
Fren pedalı	Al-SiC_P	Hafif ve uzun ömür
Piston kolu	Al-Al_2O_3 fiber	Hafiflik, yüksek mukavemet ve modül
Segman	Al-SiC_P	Yüksek aşınma dayanımı
Pistonla	Al-Al_2O_3 fiber	Yüksek sıcaklık mukavemeti
Pistonlar	Al-SiC_P	Yüksek aşınma dayanımı ve hafiflik
Kasnaklar	Al-SiC_P	Yüksek aşınma dayanımı ve hafiflik
Selektör Çatalları	Al-SiC_P	Yüksek aşınma dayanımı ve hafiflik

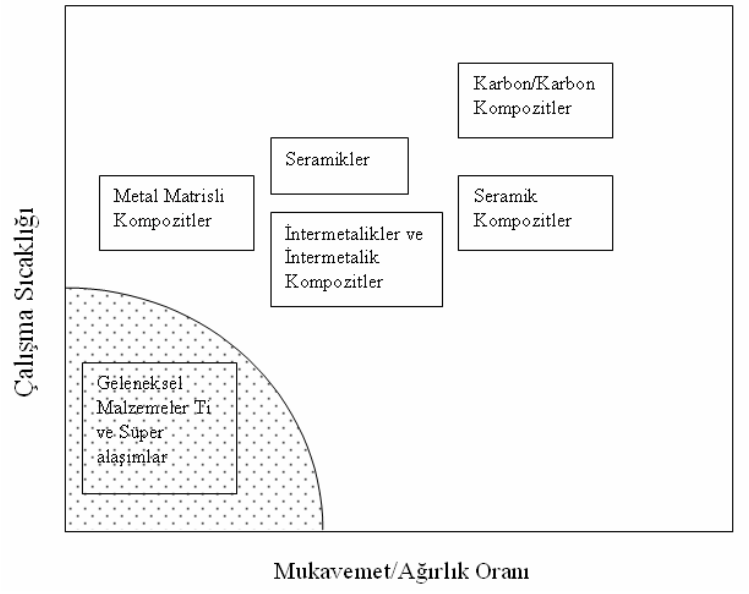
düşük olduğu gözlenmektedir.

MMK'ler bazı dezavantajlarına rağmen hala yüksek sıcaklık malzemesi olarak seramik matrisli kompozit malzemeden daha fazla ve güvenilir olarak kullanılmaktadırlar, bunun en önemli sebebi de metal bilimi ve teknolojisinin seramiklerden çok daha ileride olmasıdır. Otomobil ve uzay araçlarının çeşitli motor parçalarında MMK'lerin kullanımı, seramik matrisli kompozitlerden daha güvenilir olmaktadır. Şekil 3.17'da MMK olarak fiber takviyeli süper alaşımların ve bazı diğer malzemelerin 1990 ve ileriki yıllarda jet motorlarında türbin kanadı ve otomobillerde motor elemanı olarak kullanımının bir tahminini göstermektedir [93–96].

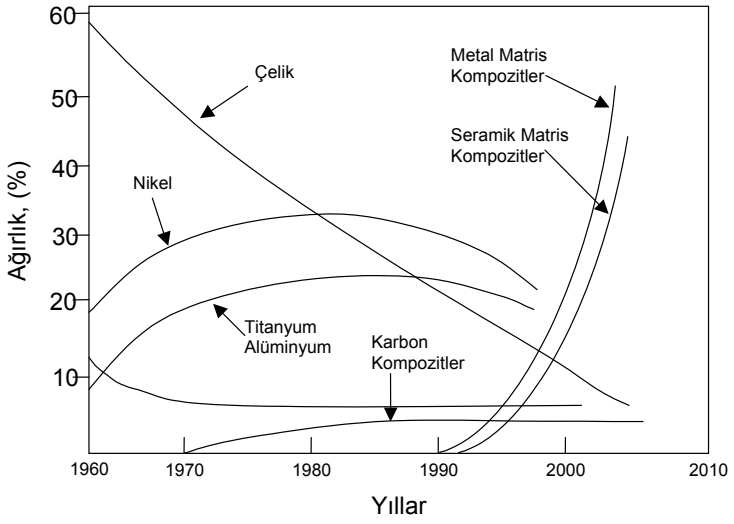
MMK malzemelerin çok değişik uygulamaları arasına sadece motor parçaları değil motor dışı bileşen alanları da girmektedir. Şekil 3.18'da MMK 'den üretilmiş fren diskleri ve şaft görülmektedir.



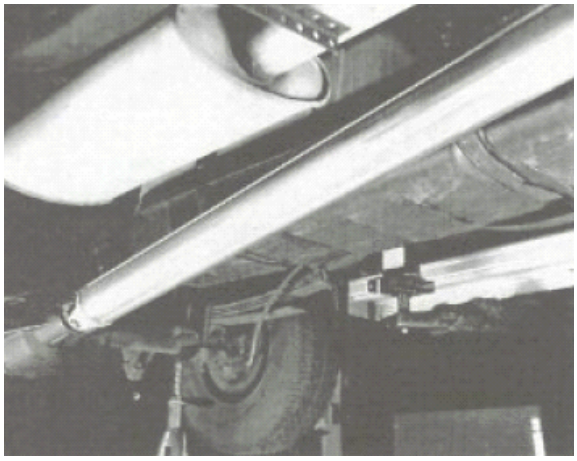
Şekil 3.15. MMK' den üretilmiş motor bloğu [91].



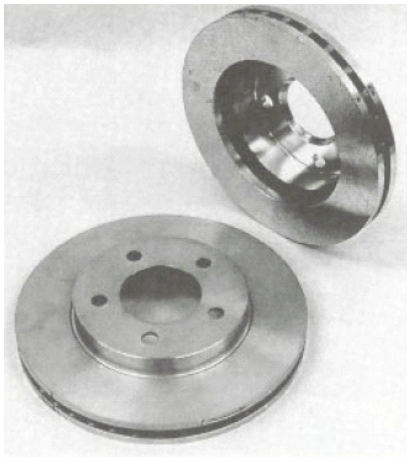
Şekil 3.16. Çeşitli motor malzemelerin çalışma sıcaklığı ve mukavemet/ağırlık oranına göre performans haritaları [92].



Şekil 3.17. Jet Motorlarında ve otomobillerde kullanılan ve ileriki yıllarda kullanılması düşünülen malzeme [92].



a)



b)

Şekil 3.18. MMK 'den üretilmiş a) şaft, b) fren diski [92].

4. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Gereç ve Yöntem

4.1.1. Alt Yapı Çalışmaları

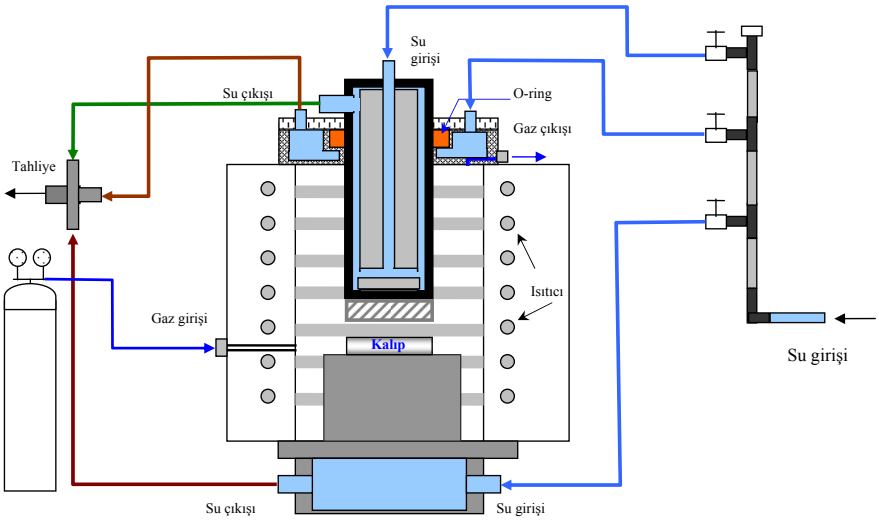
4.1.1.1. Hidrolik Pres Modifikasyonu

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde temel ekipman olarak laboratuarımızda mevcut 250 tonluk hidrolik pres kullanılmıştır ve bu sistemin modifiye çalışmaları çerçevesinde, ısıtıcı fırın, elektrik kontrol paneli, sıcaklık göstergesi ve sıcaklık alıcısı, üst zımba-orta kapak-alt tabla destek ve soğutucuları, basınç göstergesiyle bağlantılı ve eş zamanlı çalışabilecek şekilde düzenlenmiştir. Sistem genel görünüş olarak Şekil 4.1'deki gibidir. Isıtıcı fırın ve diğer bağlantılar ise Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de görülmektedir. Üst zımba, orta kapak ve alt tabla ısıya maruz kalacakları için soğutulmaya ihtiyaç duymaktadır. Şekil 4.2'de ki su girişleri her bir parçaya ayrı koldan soğutma suyu taşımakta, ayrı bir hat kullanılarak tahliye edilmektedir. Şekil 4.3'de sistemin çalışma prensibi şematik olarak görülmektedir. Üst zımba orta kapak içerisinde hareket edebilmekte, kapakta sızdırmazlığı sağlayan o-ring içerisinden geçerken, kapak o-ringin ısıdan zarar görmemesi için soğutulmaktadır. Fırın içerisindeki istenmeyen gazları ortamdan uzaklaştırıp koruyucu gaz atmosferi oluşturmak maksadıyla fırına dışarıdan bağlanan kanallar vasıtasıyla argon gazı verilmektedir. Sistem şematiğinde, üst zımba, orta kapak ve alt tabla soğutucu su sistemi, fırındaki koruyucu gaz giriş ve çıkışı açıkça gösterilmiştir. İmalat sırasında fırın sıcaklığını ölçebilmek için, iç kısma termocuple yerleştirilmiştir (Şekil 4.4). Kalıp, alt tablaya (Şekil 4.4) yerleştirildikten sonra, üst kapak monte

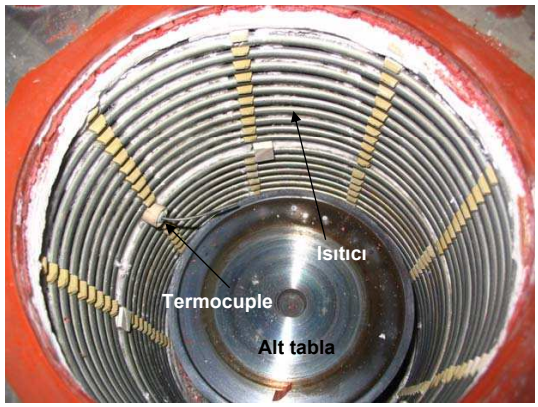
edilmekte ve böylece gerekli güç üst zımba ile küçük zımbaya iletilerek sıkıştırma gerçekleşmektedir.

Şekil 4.1. Hidrolik pres ve ekipmanları.

Şekil 4.2. Zımba, kapak ve kovan yerleşimi.



Şekil 4.3. Dizayn edilen sistemin şematik gösterimi.



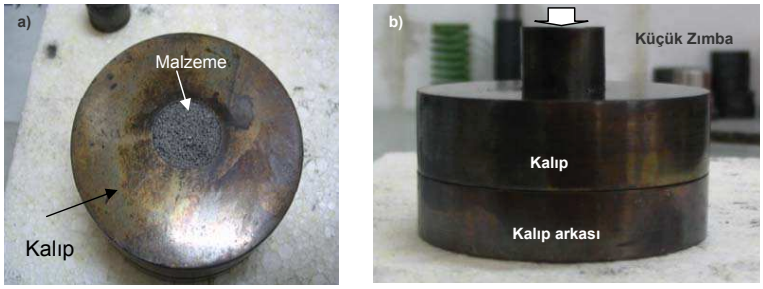
Şekil 4.4. Isıtıcı fırın içyapısı.

4.1.1.2. Kalıplar

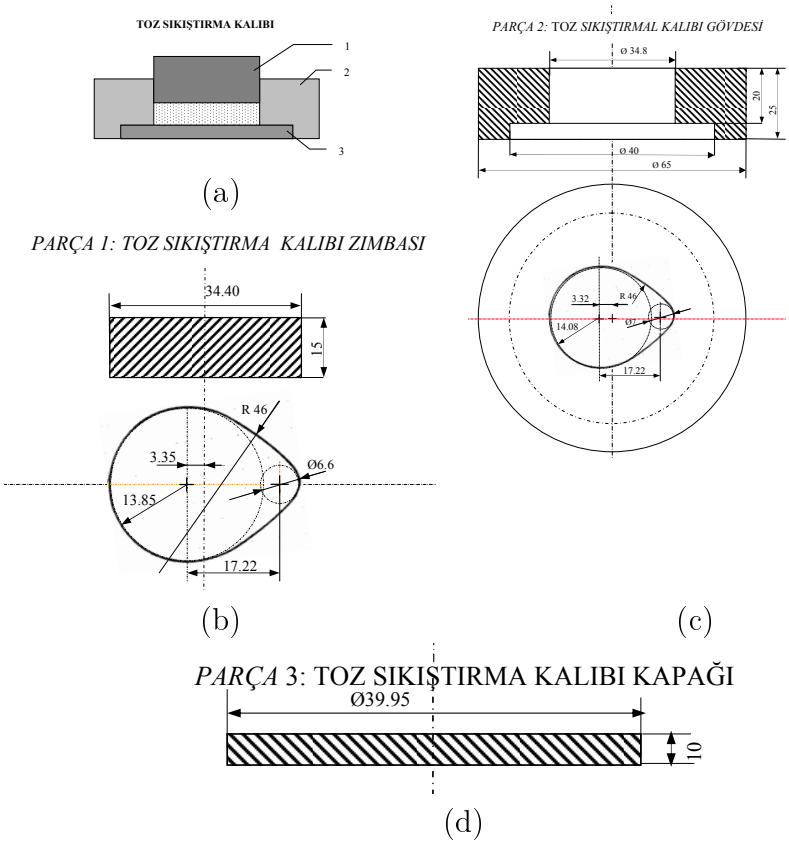
Toz metalürjisinin tabiatı gereği imalat sırasında baskı kuvveti, sıcaklık altında sürekli uygulanarak tozlar arasında tam birleşme sağlanır. İmalat sistemi; kalıp ve malzeme sıcaklığının 615°C'a ulaşması için sürekli ısıtma yapılabilecek, istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra sinterleme ve kalıplama amacıyla 30 dakika süreyle gerekli basınç uygulanabilecek, malzemenin kalıp içerisinde soğuması beklendikten sonra, kalıplar birbirinden ayrılarak üst kalıp içerisindeki numune alınmasına müsaade edebilecek tarzda imal edilmiş (Şekil 4.5), ayrıca numunelerin kalıplara yapışmaması için grafit kullanılmıştır.

Uygun boyutlarda kam profili imalatı amacıyla sıcak pres, karıştırmalı döküm ve

ekstrüzyon kalıpları hazırlanmıştır. Detay ve teknik resimleri Şekil 4.6'de verilen sıcak pres kalıpları, ana kalıp gövdesi, kalıp arkası ve baskı zımbasından meydana gelmektedir. Kalıp arkası kalıp boşluğunu hem kapatıp hem desteklemektedir. Kalıp boşluğuna kompozit karışımı konularak baskı zımbasıyla yük uygulanırken kalıplar sıcak pres ısıtıcı ünitesi içerisinde istenilen sıcaklıkta tutulması sağlanmıştır (Şekil 4.7). Isıtıcı ünite içerisinde 600°C sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra 30 dakika süresince 15 bar basınç altında sinterlenerek Şekil 4.8'da görülen AA2124 kam profili imal edilmiştir.

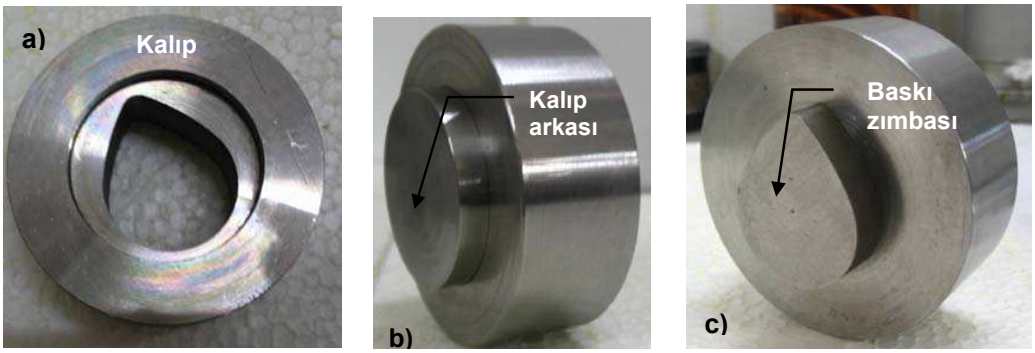


Şekil 4.5. Toz metalürjisinde kullanılan kalıp görünüşleri.

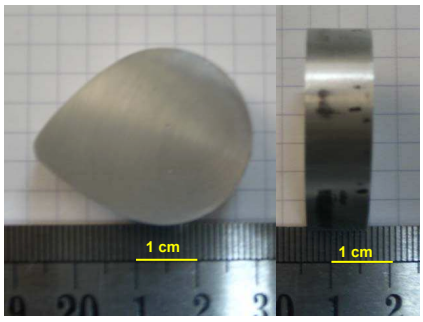


Şekil 4.6. Toz sıkıştırma kalıbı.

Kullanılan tüm bu kalıplar fırın içerisinde ısıya ve basınca maruz kaldığı için bu şartlara dayanıklı H13 (2344) çeliğinden tel erozyonla imal edilmiş, ardından 650°C sıcaklıkta 2 saat ön ısıtma yaparak gerilme giderme işlemi gerçekleştirilmiş olup takiben 1030°C'de 20 dakika östenizasyon işleminden sonra havada su verilmiş ve 600°C'de 2 saat menevişleme işlemleri Şekil 4.9'e uygun olarak sırasıyla tamamlanarak sertleştirilmiştir. Isıl işlem öncesinde 80 HRB olan sertliği ısıl işlem sonrasında 130 HRB'ye (50 HRC) çıkarılmıştır.



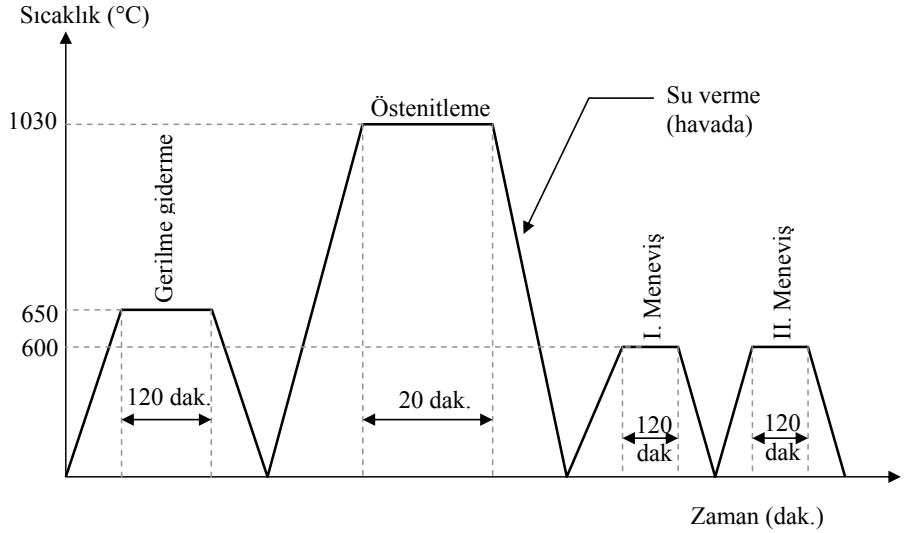
Şekil 4.7. Sıcak pres kam profili kalıpları a) kalıp b) kalıp arkası c) baskı zımbası.



Şekil 4.8. Deneme maksatlı imal edilen AA2124 kam profili.

4.1.1.3. Malzeme

Çalışmanın temelini oluşturan AA2124 alüminyum matrisli kompozitlerin imalatı için gerekli olan tozların temini uzun sürdüğü için elimizde bulunan AA1080 alüminyum tozlarıyla imalat denemeleri yapılmıştır. İmal edilen kompozit numunelerin sertlik ölçümleri Matsuzawa DX markalı Rockwell sertlik ölçüm cihazıyla tamamlandıktan sonra aşınma testleri gerçekleştirilmiştir ve iç yapıları taramalı elektron (SEM) mikroskobuyla incelenmiştir.



Şekil 4.9. Kalıpların (H13) ısıl işlem grafiği.

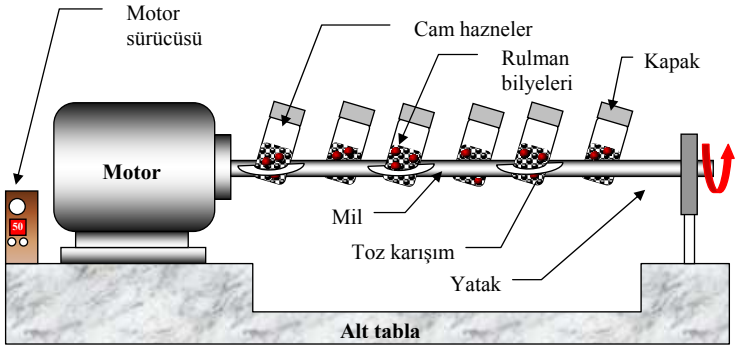
4.1.1.4. Tozların Karıştırılması

AA2124 tozlarının temin edilmesiyle birlikte uygun imalat şartlarının belirlenmesi için deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde AA2124 matrisli, SiC (2 μm), B_4C (1-7μm), ve Al_2O_3 (1 μm) partikülleriyle %30 takviyelendirilmiş kompozitler imal edilmiştir. İmalat şartlarından basınç ve sıcaklık değiştirilerek bu şartların sertlik değerlerine, aşınma davranışına olan etkileri ve kompozit numunelerin mikro yapıları SEM'de incelenmiştir. Numuneler hazırlanırken tozların elle karıştırılması sonrasında topaklanmaların olduğu iç yapı analizlerinden tespit edilmiştir. Problemin çözümü için bilyeli mekanik bir karıştırma sisteminin çözüme yardımcı olabileceği düşünülmüş ve yeni bir karıştırma sistemi tasarlanmıştır. Motordan hareket alan bir mil üzerine tutucu kollar yardımıyla dizilen karıştırma hazneleri, milin dönmesiyle salınım hareketi yaparak tozların karışımına yardımcı olmaktadır (Şekil 4.10). Ayrıca karıştırma haznelerinin içerisine rulman bilyeleri koymak suretiyle hazne içerisinde topaklanan tozların birbirinden ayrılması, topaklanmanın giderilmesiyle homojen karışım sağlanması amaçlanmıştır. Bu nedenle karıştırma işlemi süresi uzun tutulmaya çalışılmıştır (1 saat).

4.1.1.5. Pin-on-Disk Aşınma Deney Sistemi

İmalatı gerçekleştirilen kompozit numuneler sabit devirde ve sabit yük altında

(a)



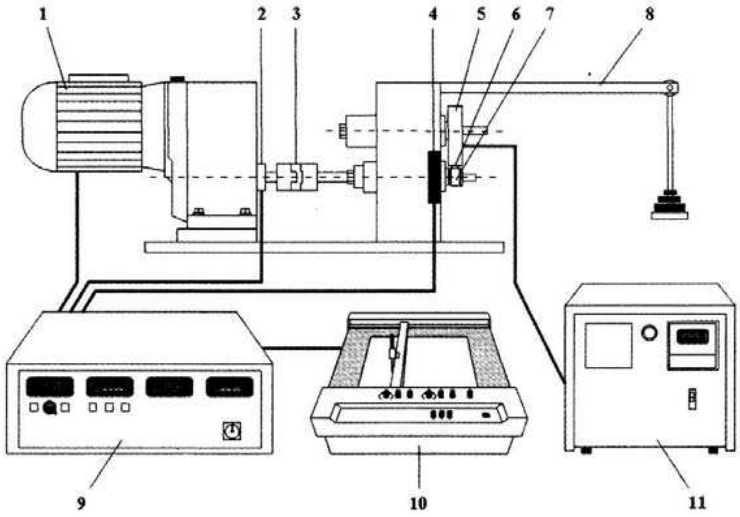
(b)

Şekil 4.10. Toz karıştırma ünitesi a) genel görüntü b) cihaz şematiği.

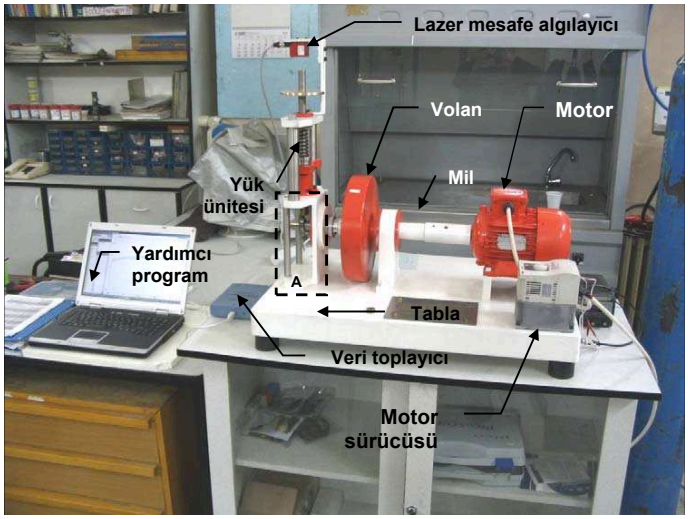
aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Aşınma test cihazı şematik olarak Şekil 4.11'de görülmektedir. Her bir numuneye aşınmadan önce hassas teraziyle ağırlık ölçümü yapılmış, aşınma sonrası tekrar tartılmak suretiyle ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Deneyler pin-on-disk prensibiyle çalışan deney düzeneğinde kuru sürtünme şartlarında gerçekleştirilmiş olup karşı malzeme olarak 100Cr6 rulman çeliği kullanılmıştır. Deney sırasında malzeme sıcaklığı belirli aralıklarla ölçülmüştür. Kuvvet sensöründen okunarak elde edilen sürtünme kuvvet (Fs) veri toplayıcı sayesinde bilgisayara aktarılarak ve yardımcı programlar vasıtasıyla bu değerler kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve grafik haline getirilmiştir.

4.1.1.6. Kam Profili Aşınma Test Cihazı

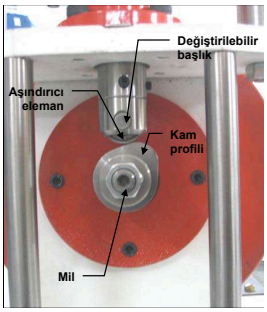
Gerçek şartlarda kam profili aşınma testlerinin gerçekleştirilebileceği test makinesinin tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Sistem, Şekil 4.12'da görüldüğü gibi; motor sürücüsü, motor, mil, volan, yük ünitesi, lazerli mesafe algılayıcısı ve veri toplayıcısından oluşmaktadır.



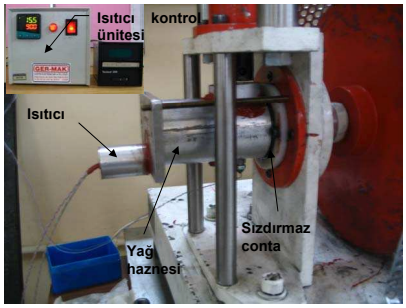
Şekil 4.11. Aşınma test cihazı şematiği: 1. Motor, 2. Takometre, 3. Kavrama, 4. Kuvvet sensörü, 5. Numune tutucu, 6. Numune, 7. Aşındırıcı disk, 8. Yük ünitesi, 9. Göstergeler, 10. Garfik çizici, 11. Isıtıcı.



(a)



(b)



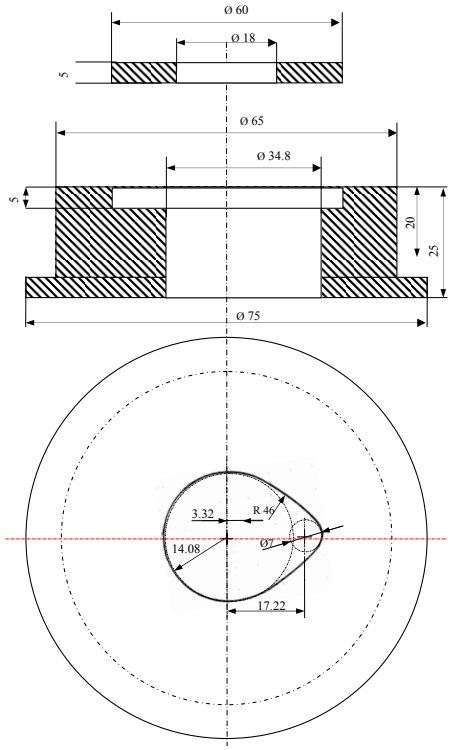
(c)

Şekil 4.12. Gerçek şartlarda kam profili aşınma test cihazı a) genel görünüm b) A detayı c) yağlı sistem.

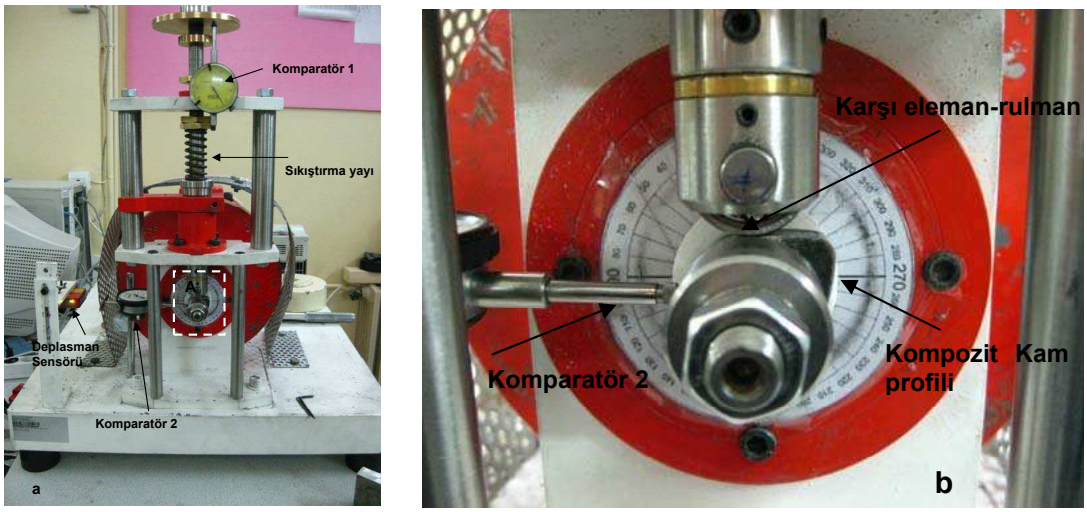
Motorun istenilen devir sayısında sabit tutulabilmesi yada devir sayısının kontrollü artırılmasını sağlamak amacıyla motor sürücüsü kullanılmıştır. İstenilen devir sayısında, yük ünitesindeki yay sıkıştırılarak kam profili üzerine kuvvet uygulanabilmektedir. Lazerli mesafe algılayıcı ise aşınma öncesi, aşınma esnası ve aşınma sonrasında ölçümler yaparak malzeme üzerindeki aşınma miktarını 10 μm'lik hassasiyette kalınlık azalması olarak tespit etmektedir. Motorun herhangi bir zorlanma karşısında güçten düşmesini engellemek için volan kullanılmış olup ayrıca numune üzerine gelen yükün sabit kalmasını sağlaması amaçlanmıştır. Kullanılan bu algılayıcı ve cihazlar 4 kanallı veri toplayıcısına bağlanarak, toplanan değerler yardımcı programlar vasıtasıyla bilgisayara aktarılıp gerekli analiz ve değerlendirmelerde kullanılacaktır. Şekil 4.12.b'de gösterilen A bölgesi detayında örnek kam profili ve aşındırıcı eleman teması görülmektedir. Kam profilleri delinerek yada içi boş şekilde imal edilmek suretiyle mil üzerine yerleştirilebilecektir. Aşındırıcı eleman üniversal olarak tasarlanmış olup değiştirilebilen başlık sayesinde dönebilen bir rulman olabileceği gibi, sabit aşındırıcı bir pimde olabilmektedir.

İmal edilen kam profillerinin tamamının aşınma test cihazına monte edilebilmesi için profilin tam merkezden hassas olarak delinmesi sağlanmalıdır. Numune delmede merkezlemeyi ve tüm numunelerin aynı hassasiyette delinmesini sağlamak amacıyla Şekil 4.13'deki kalıp tasarlanıp imal edilmiştir. Numune kalıp üzerine yerleştirilerek merkezlenmesi sağlanıp, bu merkezden delme işlemi gerçekleştirilmektedir.

Kompozit kam profillerin aşınma performansını incelemek için kam test düzeneği kullanılmaktadır. Bu düzenek sadece aşınma testi amaçlı değil aşınma öncesinde kam numunenin yüzey profilini çıkartmak amacıyla da kullanılmaktadır. Gerekli sertlik ve pürüzlülük ölçümleri yapılan kompozit kam profilleri Şekil 4.14.a'da görülen sisteme monte edilmektedir. Önce yaydaki sıkıştırma iptal edilip karşı elemanın kompozit kam profiline değmesi engellenmektedir. Daha sonra sistemde komparatör 2 olarak belirtilen 0.01 mm hassasiyetteki komparatör ucu kompozit kam profili yüzeyine dokundurulmaktadır (Şekil 4.14.b). Komparatör iğnesinin arkasına monte edilen levha sayesinde kam profilinin dairesel hareketi komparatörün doğrusal hareketine dönüştürülerek lazer sensörün algılaması sağlanmıştır. Numune 40 d/d ile döndürülerek veri toplayıcısından profil yani yer değiştirme verileri



Şekil 4.13. Kam profili üzerine delik delme kalıbı.



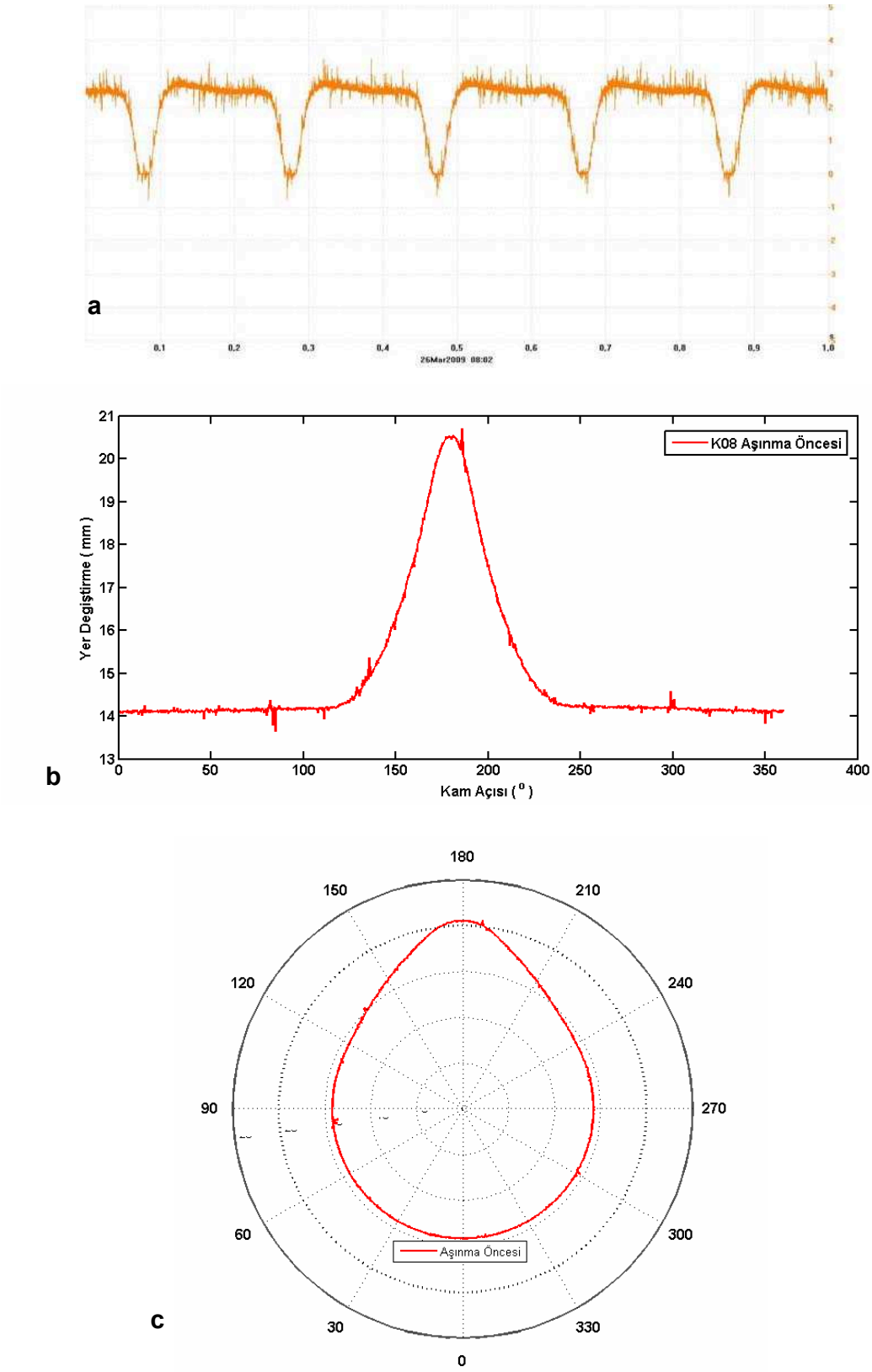
(a) (b)

Şekil 4.14. Kam profili aşınma test cihazı a) profil çıkartma sistemi b) detay A.

alınmıştır. Cihaz sadece yer değiştirmeyi ölçtüğü için, elde edilen değer, kam profilinin burun kısmının ana daireden sapmasını vermektedir. Kam profilinin dönüşü sırasında, Şekil 4.15.a'da görüldüğü gibi, birden fazla tepe noktalarının olduğu ve binlerce veri noktasından oluşan bilgiler alınmaktadır. Bu bilgiler kullanılarak ve MATLAB programı yardımıyla bilgiler işlenerek tek bir profil değeri

çıkartılmaktadır (Şekil 4.15.b). Bu değerler x ekseninde kamın dönüş açısı ve y ekseninde yer değiştirme (mm) miktarı kullanılarak grafikle ifade edilebilmektedir. X eksenindeki toplam yer değiştirme kam alt göbek çapından kam burnunun çap değerine kadar olmaktadır. Bu değerlerle polar koordinat sisteminde grafik çizildiği zaman tüm olarak kam profil yapısı çizilebilmekte ve karşılaştırmalar daha kolay yapılabilmektedir (Şekil 4.15.c).

Toz metalürjisi yöntemiyle imal edilen AA2124 matrisli %10, 20 ve 30 takviye oranında SiC (2μm), B_4C (1-7μm) ve SiC (20μm) partikül içeren kompozit kam profilleri 615°C sıcaklıkta 300 MPa basınç altında 30 dakika sinterlenerek imal edilmiştir. Kompozit kam profillerinin yüzey pürüzlülükleri Mitutoyo Surftest 201 markalı yüzey pürüzlülük ölçüm cihazıyla alınmış olup, yoğunlukları ve ağırlıkları ölçülerek gerçek şartlarda kam profili aşınma test cihazında aşınma davranışları ve performansları incelenmiştir. Deneyler kuru ve yağlı olmak üzere iki farklı ortamda yapılmış olup, deneyler farklı aşınma sürelerinde ve farklı yüklerde gerçekleştirilmiştir. Yağlı şartlardaki testler için kam profilinin bulunduğu kısıma içerisinde ısıtıcı olan borudan imal edilmiş bir hazne yerleştirilmiştir. Isıtıcı sayesinde yağın sıcaklığı deney süresince 90°C'de tutulup araç motor sıcaklığında deneylerin yapılması sağlanmıştır (Şekil 4.12.c). Aynı deneylerde karşılaştırmak maksadıyla küresel grafit dökme demir ile takviyesiz AA2124 kam profilleride kullanılmıştır. Kompozit kam sonuçlarıyla KGDD kam profilleri aşınma sonuçları karşılaştırılarak birbirine en yakın çıkan kompozit kamların diğer imalat yöntemleri olan ekstrüzyon ve karıştırmalı döküm yoluyla imalatları gerçekleştirilmiştir. İlerideki kısımlarda açıklanacağı gibi ekstrüzyon ve karıştırmalı döküm yöntemleriyle imal edilen kam profillerde bulunan hasarlar ve malzemenin yumuşaması gibi sorunlardan dolayı tüm numunelere aşınma testleri uygulananamıştır.



Şekil 4.15. a) Ham veri b) işlenmiş profil bilgisi c) polar koordinatta profil gösterimi.

4.1.1.7. İmalat Sistematiği

Kam profillerinin imalatına geçilmeden önce, imalat şartlarının belirlenmesi, elde edilecek kompozit tiplerinin aşınma davranışlarının belirlenmesi ve gerçek şartlardaki performanslarının test edilmesi, imalatı planlanan kam profillerinin hangi karışım ve tipte malzemelerden oluşacağı gibi konuların karara bağlanması amacıyla ön imalatlar ve ön deneyler yapılmıştır. Genel olarak MMK numunelerin imalat aşaması üç temel yöntemle gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisi toz metalürjisi (TM) , ikincisi karıştırmalı döküm (KD), üçüncüsü ise ekstrüzyon yöntemidir. Bu yöntemlerlerden ağırlıklı olarak toz metalürjisi yöntemi kullanılmıştır.

4.1.1.7.1. Uygun İmalat Şartlarının Belirlenmesi

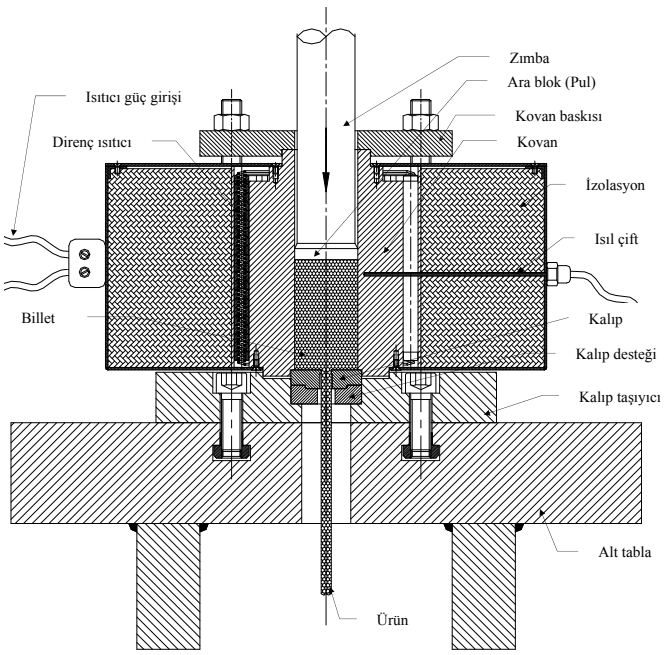
Bu çalışmanın ardından imal edilen kompozitlerin pratik-teorik yoğunluk arasındaki farkın nekadar olduğunun tespit edilmesi ve bu farka imalat şartlarının etkisinin incelenmesi amacıyla farklı sıcaklık ve basınçlarda AA2124 matrisli %20 SiC (20μm) takviyeli kompozitler imal edilmiştir. Bu numunelerin yoğunlukları Precisa XB220 marka yoğunluk ölçüm cihazıyla ölçülmüş, ağırlıkları hassas teraziyle tartılmış, sertlik değerleri de ölçüldükten sonra aşınma testine tabi tutulmuşlardır.

Yapılan bu ön deneme ve testler sonucunda belirlenen 600 MPa basınç ve 30 dakika sinterleme süresi şartlarıyla B_4C, SiC ve Al_2O_3 takviyesi kompozitler %10, 20 ve 30 takviye oranlarında imal edilmiştir. Bu numunelerin sertlikleri, yoğunlukları ölçülmüş, aşınma deneyi yapılmadan önce ağırlıkları tartılıp yüzey pürüzlülük profilleri çıkartılmıştır. Ardından kuru şartlarda aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler sonrasında aşınma davranışı iyi olan SiC (2μm), B_4C (1-7μm) ve SiC (20μm) takviyeli kompozitlerden kam profillerinin toz metalürjisi yöntemiyle imalatına karar verilmiştir.

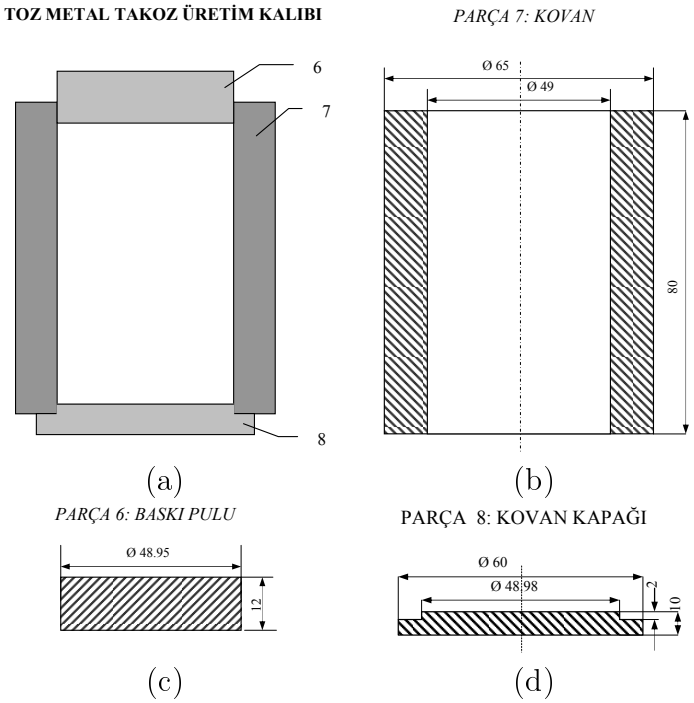
4.1.1.7.2. İmalat Yöntemleri

Ekstrüzyon, imalatta kullanılan yöntemlerden birisidir. Hidrolik pres üzerine, Şekil 4.16'de detayı verilen sıcak ekstrüzyon fırın ve kalıp gurubu konularak imalat yapılmıştır. Kalıp haznesine konulan billet, fırın yardımıyla istenilen sıcaklığa çıkartılmakta ardından da zımba vasıtasıyla uygulanan kuvvetle birlikte kalıp alt boşluğundan kompozit ürün olarak çıkmaktadır.

Kullanılan billetler Şekil 4.17'da detayı ve montajlı hali verilen kalıp yardımıyla hazırlanmaktadır. Ekstrüzyon kalıp boyutlarına göre uygun olarak hazırlanan billet kalıbının alt kapağı kapatılarak elde edilen iç boşluğa bahsi geçen tozlar konulur ve üst baskı pulu kapatılır. Üzeri kapatılan kovana baskı pulu üzerinden basınç uygulanarak tozların birbiriyle birleşip katı bir hal alması sağlanır. Bu billet kovan içerisinden çıkartılarak fırın içerisindeki ekstrüzyon kalıbı boşluğuna konulur ve ekstrüzyon için gerekli hazırlık tamamlanmış olur. Ardından billetler belirli bir sıcaklıkta ekstrüzyon kalıplarından kuvvet uygulanarak kalıp boşluğundan akmaya zorlanacaktır. Uygulanan bu kuvvetin malzemenin yönlenmiş mekanik

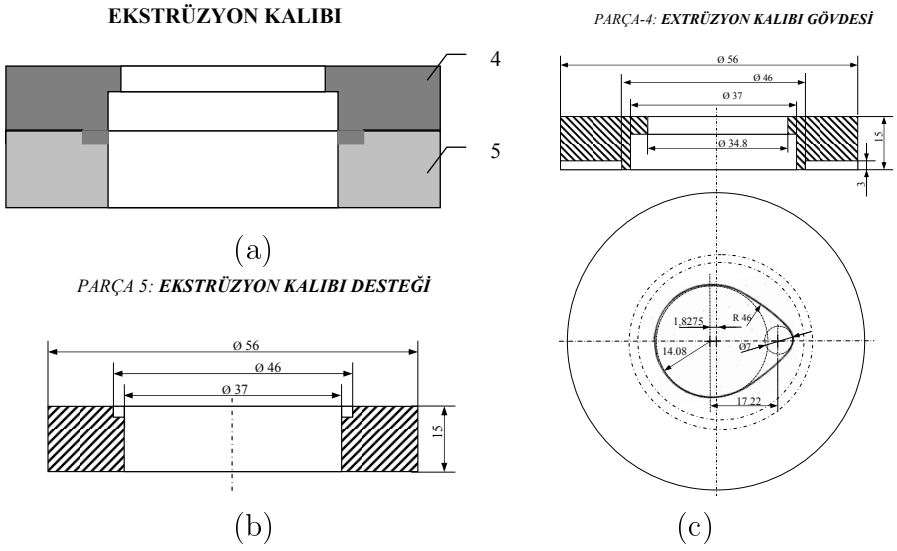


Şekil 4.16. Ekstrüzyon ünitesi [92]



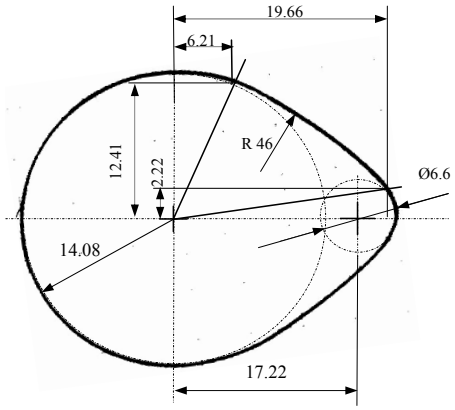
Şekil 4.17. Billet kalıpları a) montaj resmi, b) kovan, c) baskı pulu, d) kovan kapağı.

özelliklerini ve mukavemetini arttırdığı bilinmektedir. Ekstrüzyon kalıbı Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'de görüldüğü gibi kalıp gövdesi ile kalıp desteğinden oluşmaktadır. Numuneler önce billet kalıbında ön şekillendirilerek billetler elde edilecektir. Ekstrüzyon ve toz metalürjisi kalıplarında imalatı gerçekleşen kompozit kamların geometrileri Şekil 4.20'da görülmektedir.



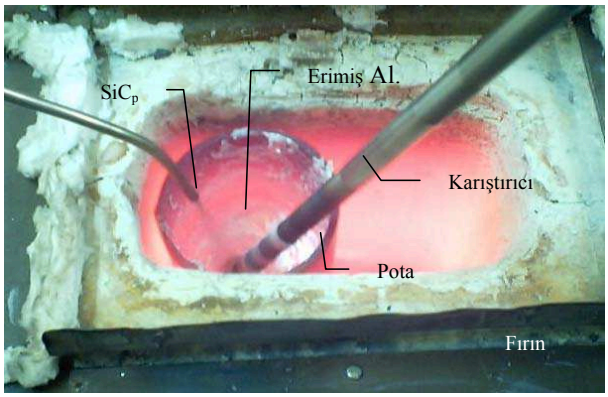
Şekil 4.18. Ekstrüzyon kalıbı a) montaj resmi, b) kalıp gövdesi, c) kalıp desteği.

Şekil 4.19. Ekstrüzyon kalıbı, a) ekstrüzyon kalıp parçaları, b) billet kalıbı.



Şekil 4.20. İmal edilen kam profilleri parça detayları.

Kompozit imalatında kullanılan bir diğer yöntemde karıştırmalı döküm yöntemidir. Açık fırın içerisinde potada eritilen alüminyum metali içerisine istenilen takviye eklenerek karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.21). Ergimiş alüminyum ve SiC partikülleri bir süre karıştırıldıktan sonra kam profili döküm kalıbı içerisine aktarılır ve burada soğuması beklenir (Şekil 4.21). Kullanılan partikül boyutlarının küçülmesi karıştırmayı zorlaştırmakta daha fazla topaklanmalar ve iç boşluklar meydana gelmekte dolayısıyla malzemenin homojenliği ve mukavemeti azalmaktadır. Partikül boyutunun büyük olduğu durumlarda kullanılması daha uygundur.



Şekil 4.21. Karıştırmalı dökümle imalat.

4.2. İmalat ve Testler

4.2.1. Metal Matrisli Kompozit Ön Deneme İmalat ve Testleri

4.2.1.1. AA1080 Matrisli SiC Takviyeli Kompozit İmalatı ve Testleri (sertlik, aşınma)

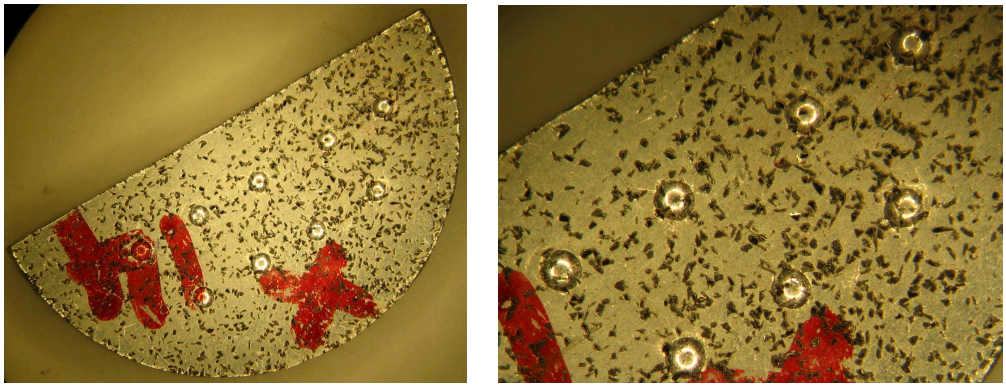
Toz metalürjisiyle kompozit imalatında kullanılacak olan kalıpların imal edilmesiyle birlikte, ihtiyaç duyulan alüminyum AA2124 alüminyum tozları gelene kadar eldeki imkânlarla deneme imalatları yapılmıştır. Toz metalürjisinin tabiatı gereği imalat sırasında baskı kuvveti, sıcaklık altında sürekli uygulanarak tozlar arasında tam birleşme sağlanmıştır. İmalat sırasında kalıp ve malzeme sıcaklığının 610 °C'a ulaşması için sürekli ısıtma yapılmış, istenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra sinterleme ve kalıplama amacıyla 30 dakika süreyle 400 MPa basınç uygulanmıştır. Malzemenin kalıp içerisinde soğuması beklendikten sonra, kalıplar birbirinden ayrılarak üst kalıp içerisindeki numune alınmıştır. Burada numunelerin kalıplara yapışmaması için grafit kullanılmıştır.

Deneme imalatlarında %99 saflıktaki boyutları 44-400 μm arasında olan AA1080 alüminyum tozları kullanılmıştır. AA1080 ile farklı boyutlardaki (20, 53, 167 ve 478 μm) SiC seramik tozları karıştırılarak kompozit numuneler imal edilmiştir. İmal edilen AA1080/SiC kompozitler %10, 20 ve 30 hacim oranlarına sahiptir. Sadece 20 μm'lik boyutun kullanıldığı kompozitlerde hacim oranları yüksek seviye olan

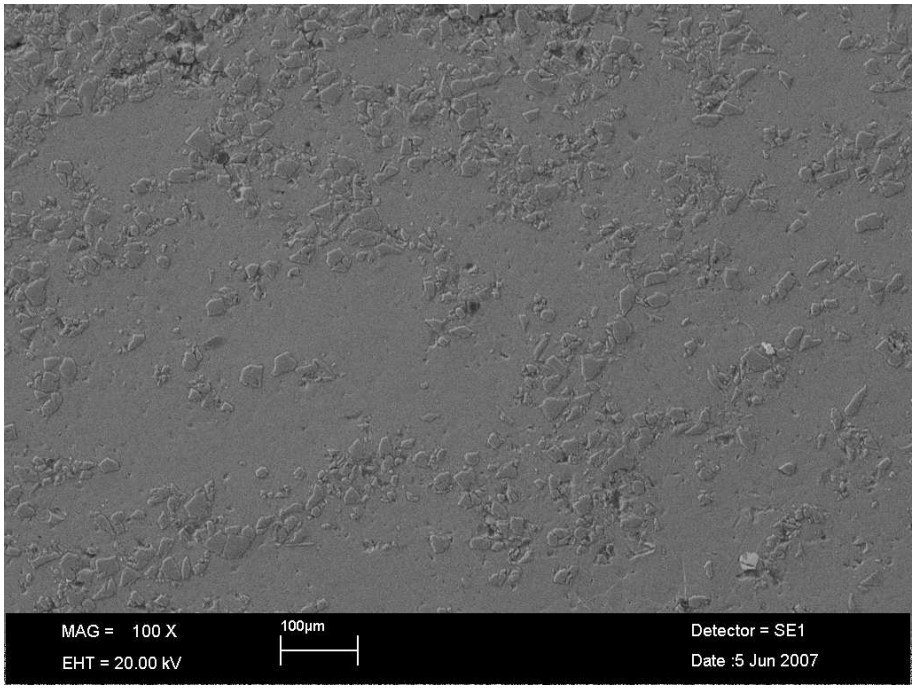
%40 ve 50'ye çıkarılarak, takviye hacim oranının malzemenin sertliğine ve aşınma davranışına olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek amacıyla herhangi bir takviye içermeyen saf AA1080 numunelerde imal edilmiştir. İmal edilen kompozitler 16 mm çapa ve 5 mm kalınlığa sahiptirler (Şekil 4.22). Alüminyum 1080 matrisli, tane boyutu 167 μm olan SiC'den %20 hacim oranında takviyeli (AA1080/SiC167μm/20) kompozitin yüzey makro görüntüsü Şekil 4.23'deki gibidir. Malzeme yumuşak olduğu için düşük yük kullanılan Rockwell T (15 kg) ile sertlik ölçümü yapılmıştır. Her numune için üçten fazla sertlik değeri alınarak bu değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Tablo EK-1.1'de AA1080-SiC kompozit numunelerin sertlik değerlerine birkaç örnek verilmiştir. Ayrıca takviye boyutu ve hacim oranına göre düzenlenmiş veriler ise Tablo EK-1.2'de sınıflandırılmıştır. Bunlara ilave olarak yüzeydeki takviye dağılımı ve sertlik ölçümü sırasında oluşan izler açıkça görülmektedir. İmalat aşamasında karışımın istenilen homojenlikte olması için karıştırma işlemi dikkatlice yapılmaktadır. %20 SiC (20 μm) içeren AA1080 matrisli kompozitin iç yapısındaki takviye dağılımı Şekil 4.24'de görülmektedir. Anlaşıldığı üzere homojen bir dağılım yaklaşık olarak elde edilmiş durumdadır.

Şekil 4.22. İmal edilen kompozitin genel görünüşü.

Şekil 4.25.a'da görüldüğü gibi hacim oranının artmasıyla malzemenin sertlik değerinde artış olmaktadır. Hacim oranının %40'ı geçmesiyle malzemenin sertliğinde bir düşüş görülmektedir. Bu düşüş hacim oranının yüksek olduğu durumda matris ile takviye arasında bağların zayıf olmasından kaynaklanmaktadır. Buda malzemenin sertliğini olumsuz etkilemektedir. Bir diğer hususta herhangi bir takviye kullanılmadığı durumlarda malzemenin sertliğinin yüksek çıkması, takviye katılmasıyla ilk başta sertliğinin düşmesi ve takviye hacim oranının artmasıyla sertlik



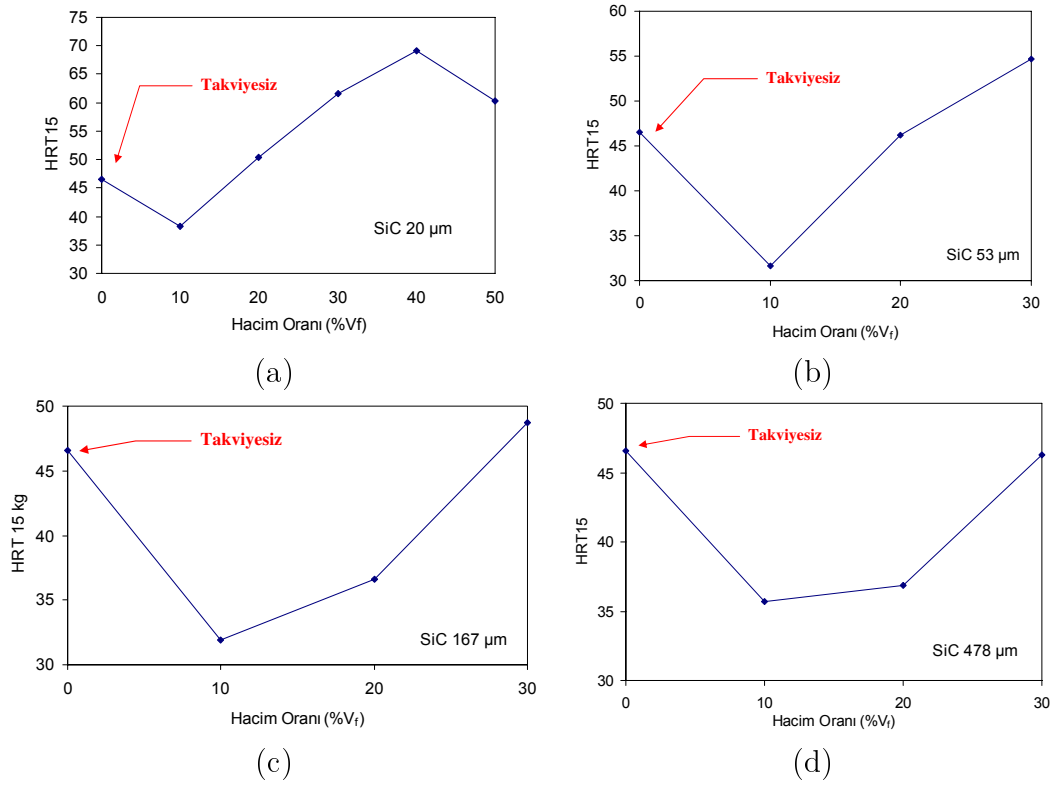
Şekil 4.23. AA1080/SiC 167μm/20 kompozitin makro görüntüsü.



Şekil 4.24. AA1080/SiC 20μm/20 kompozitte takviye elemanı dağılımı.

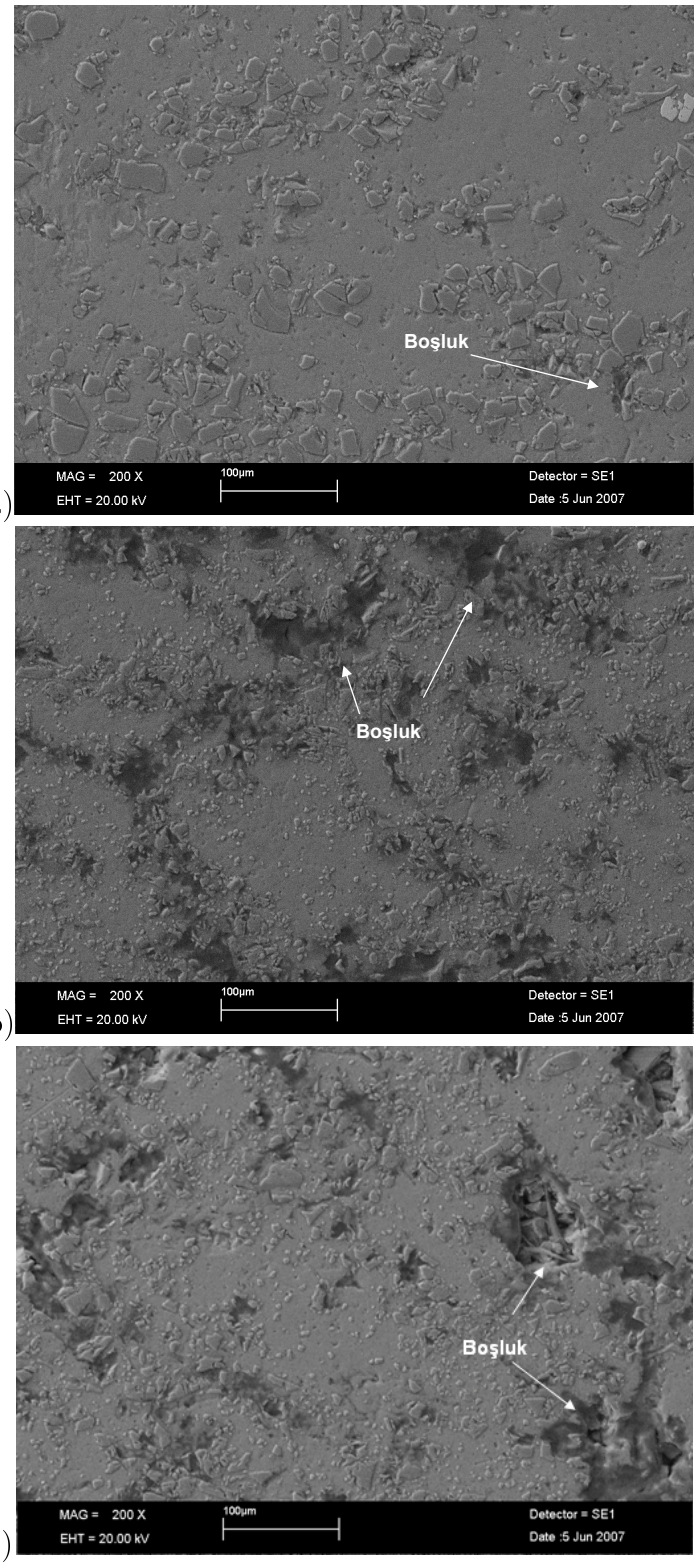
değerinin artmasıdır. Takviye karıştırılmasıyla meydana gelen bu düşüş partikül etrafındaki ve malzeme içerisindeki porozitelerden kaynaklanmaktadır. Grafiklerden çıkarılabilecek bir diğer sonuçta takviye malzemesinin boyutlarının düşmesiyle birlikte kompozitin sertlik değerinin de artmış olmasıdır (Şekil 4.25.a-b-c-d). Burada malzeme boyutunun küçülmesiyle ıslanma yüzey alanının artması sağlanmıştır ve birim alana düşen partikül sayısı artarak herhangi bir yük durumunda partiküller birbirine kuvvetin dağılmasında yardımcı olmaktadır.

Kompozit malzemedeki takviye hacim oranının artmasıyla matris-takviye arasında bağ oluşturma etkisi hızla azalmaktadır. Şekillerden anlaşıldığı gibi %20 takviye



Şekil 4.25. Hacim oranı-Rockwell T (15 kg) sertlik değişim grafikleri a) AA1080/SiC 20μm b) AA1080/SiC 53μm c) AA1080/SiC 167μm d) AA1080/SiC 478μm.

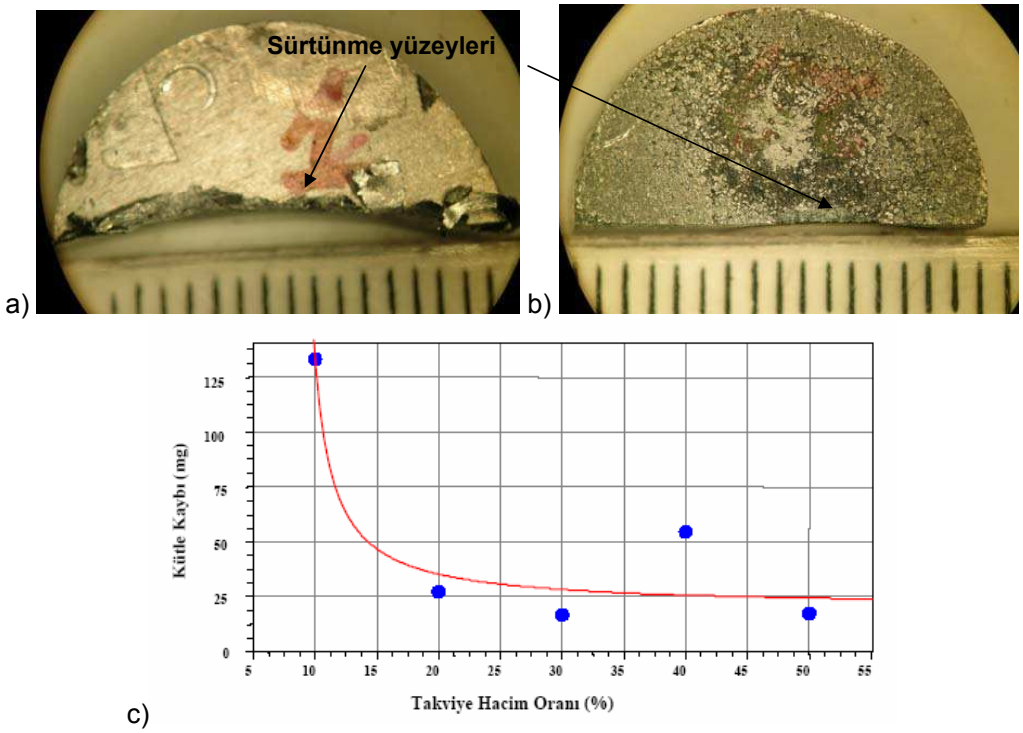
hacim oranında çok az miktarda boşluk göze çarparken, takviye hacim oranının %40 ve 50 olduğu durumda yetersiz bağ oluşumunun etkisiyle boşluk miktarı göreceli olarak artmıştır (Şekil 4.26.a-b-c).



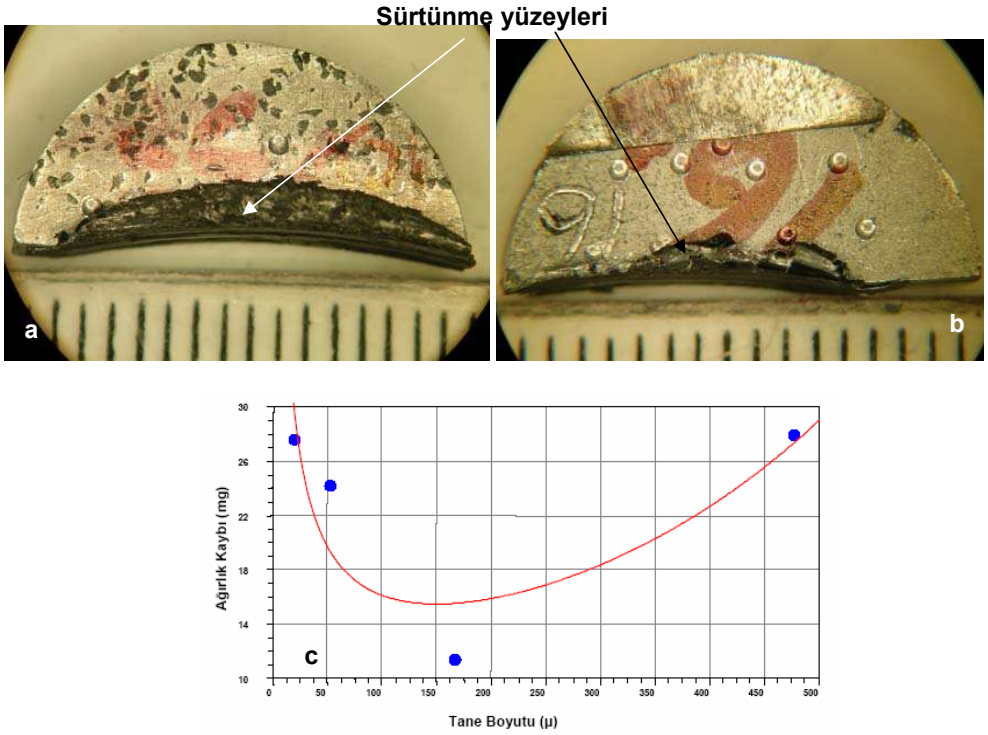
Şekil 4.26. Kompozit iç yapısındaki boşluk hataları a) AA1080/SiC 20μm/20 b) AA1080/SiC 20μm/40 c) AA1080/SiC 20μm/50.

İmalatları ve sertlik ölçümleri tamamlanan AA1080 matrisli SiC takviyeli kompozitlerin aşınma davranışları incelenmiştir. Aşınma deneyinde numuneler üzerine 75 N yük uygulanmış, 62 HRC sertlik değerine sahip karşı aşındırıcı disk kullanılmış, kayma mesafesi 2000 m olarak hesaplanmıştır. Deney öncesi ve sonrası numunelerin ağırlıkları ölçülerek kütle kayıpları tespit edilmiştir. Kompozit numunedeki SiC takviye oranının artırılması, takviye toplam yüzey alanın artmasını dolayısıyla malzemede meydana gelen aşınma miktarının ve ağırlık kaybının azalmasını, aşınma direncinin artmasını sağlamaktadır (Şekil 4.27).

Literatüre uygun olarak [93, 94] takviye partikül boyutunun azalmasıyla aşınma direncinin artması beklenirken testler sonucunda Şekil 4.27'deki grafik elde edilmiştir. Deney sırasında sürtünmeyle birlikte aşınan bölgelerdeki yumuşak alüminyum, sürtünme sıcaklığının etkisiyle yüzey kenarlarına sıvanmakta ve dolayısıyla tam ağırlık kaybı ölçülemediğinden sonuçlar beklenenden farklı çıkmaktadır (Şekil 4.28). Şekilden de görüleceği gibi aşınma bölgesinde 478μm boyutunda takviye içeren numunelerdeki kayıp 53μm boyutunda takviye içeren



Şekil 4.27. Aşınma sonrası numune makro görüntüleri a) AA1080/SiC 20μm/10, b) AA1080/SiC 20μm/50, c) takviye oranı-kütle kaybı grafiği.



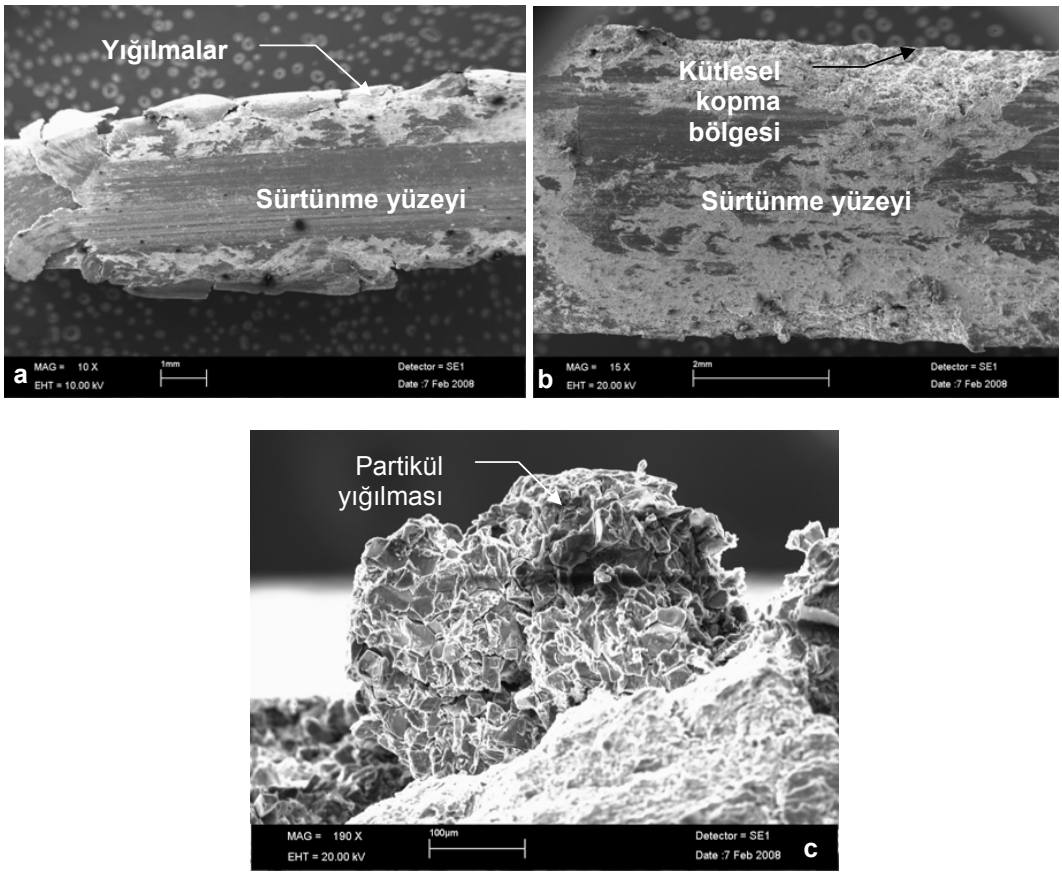
Şekil 4.28. AA1080 matrisli kompozitin aşınma sonrası makro görüntüleri a) AA1080/SiC(478μm)/20, b) AA1080/SiC 53μm/20, c) takviye boyutunun aşınmaya etkisi.

kompozite göre daha fazla olmasına rağmen alüminyumun yan yüzeylere sıvanması sebebiyle kayıp daha az olarak ölçülmüştür.

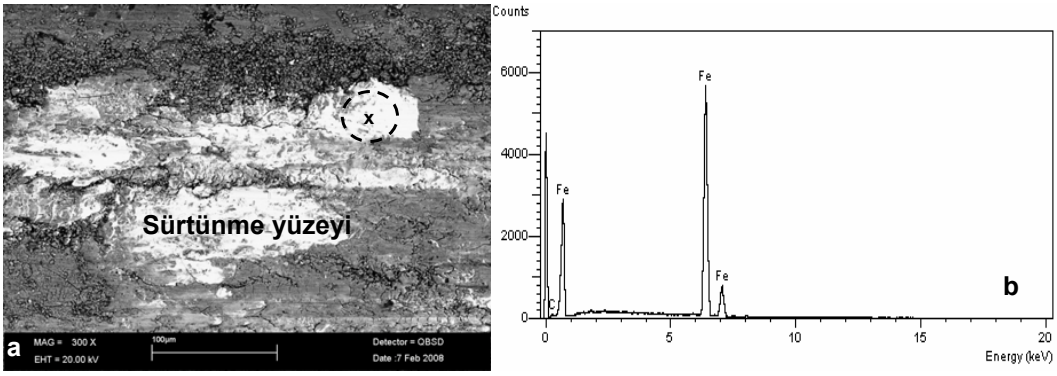
Uygulanan 75 N'luk yük altında oluşan sürtünme sıcaklığı alüminyum matris malzemesinin yumuşamasına sebep olurken, yumuşayan bu malzeme sürtünme kuvvetinin etkisiyle sürtünme yüzeyi kenarlarına itilmekte ve orada yığılma meydana gelmektedir (Şekil 4.29.a). Yığılan bu malzemeler ilerleyen sürtünme ile kenarlardan koparak yüzeyden ayrılmakta ve kütlesel kopmalar gerçekleşmektedir (Şekil 4.29.b-c).

Aşınma deneyleri sırasında kompozit numune ve aşındırıcı disk arasındaki karşılıklı etkileşim sonucunda, kompozit yüzeylerinde aşındırıcı disk yüzeyinden kompozit yüzeyine transfer olan Fe'e rastlanmıştır. Şekil 4.30.a'da aşınma sonrası kompozit yüzeyi görülmektedir. Analizler sonucunda bu resimdeki beyaz bölgelerin Fe olduğu Şekil 4.30.b'de EDX analizleriyle anlaşılmıştır.

SiC takviyeli AA1080 matrisli kompozitlerin takviye oranı ve partikül boyutuna



Şekil 4.29. AA1080 matrisli numunenin aşınma sonrası görüntüleri: a) AA1080/SiC 20μm/10, b) AA1080/SiC 20μm/50, c) AA1080/SiC 20μm/50 kompozit kenar yüzeyde malzeme yığılması.

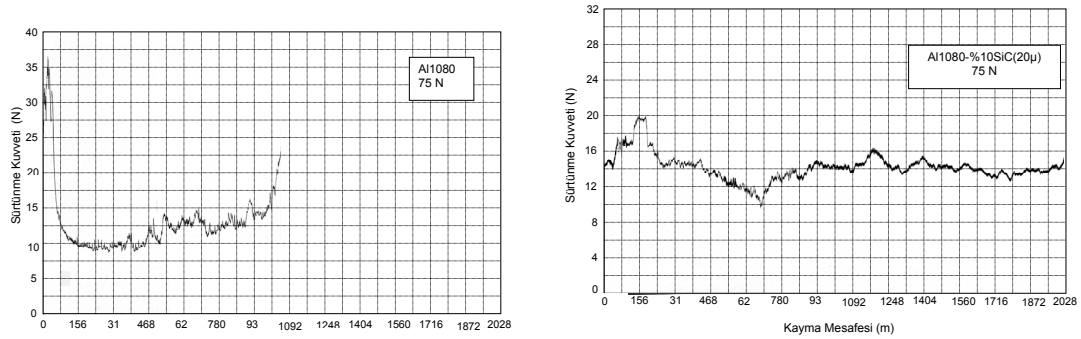


Şekil 4.30. Kompozit sürtünme yüzeyindeki Fe'in tespit edildiği bölgeler a) sürtünme yüzeyi b) x noktasının EDX analizi.

göre değişen kayma mesafesi ile sürtünme kuvveti grafikleri Şekil 4.31-4.35'deki gibidir. Takviyesiz AA1080 numune deney esnasında 1000 m kayma mesafesine kadar dayanabilmiştir. Ardından sürtünmeden dolayı oluşan sıcaklığın da etkisiyle yumuşak malzemede yapışmalar oluşmuş ve titreşimden dolayı deneye devam

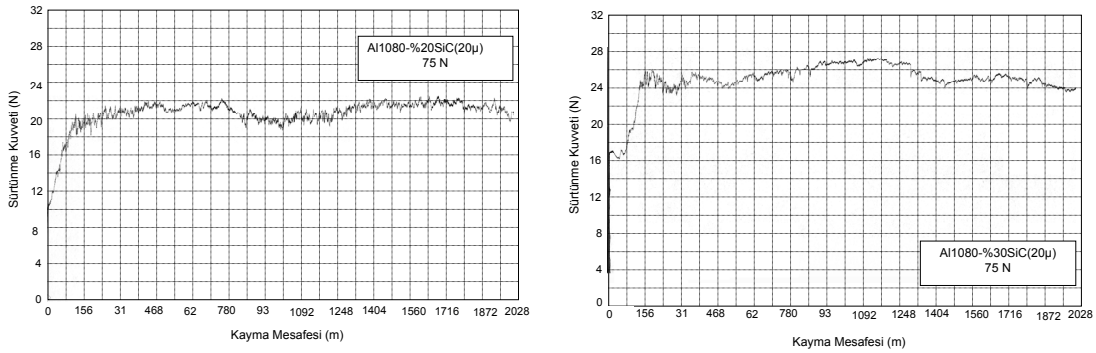
edilememişken (Şekil 4.31.a), diğer testler 2000 m aşınma yolu sonuna kadar devam edilebilmiştir (Şekil 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35).

Numuneler başlangıçta farklı sürtünme kuvveti değerleri sergilese de, daha sonra birbirine yakın sabit seviyede kararlı sürtünme bölgesine sahip olmuşlardır. Numunelerin aşınma testleri esnasında göstermiş oldukları sürtünme kuvveti karakteristikleri Şekil 4.31, 4.32, 4.33, 4.34, 4.35'da verilmiştir. Karşılıklı etkileşim sırasında kompozit içerisinden çıkan ve yüzeyler arasına sıkışan seramik partiküller aşınma modunun adhesivden abrasive ani olarak değişmesine sebep olmaktadır.



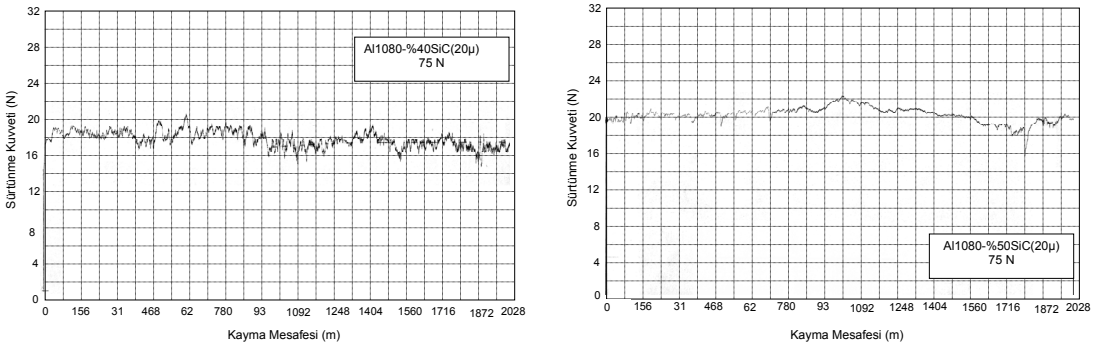
(a) (b)

Şekil 4.31. Sürtünme kuvveti-aşınma yolu eğrisi a) AA1080 takviyesiz b) AA1080/SiC 20μm/10.



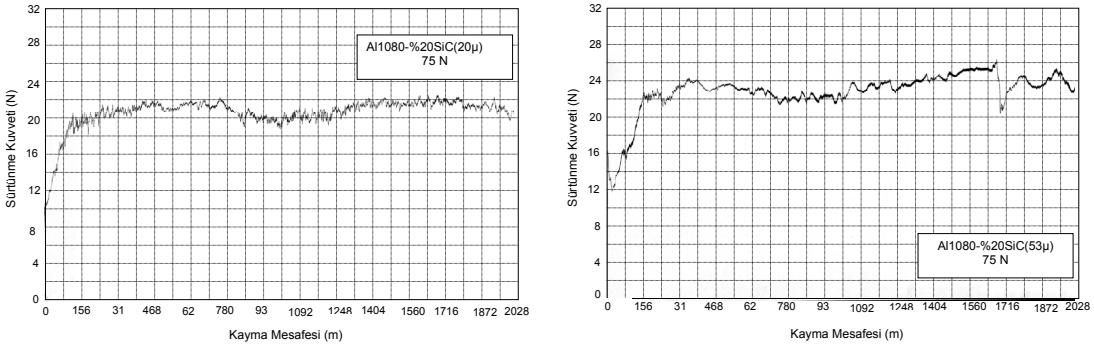
(a) (b)

Şekil 4.32. Sürtünme kuvveti-aşınma yolu eğrisi a) AA1080/SiC 20μm/20 b) AA1080/SiC 20μm/30.



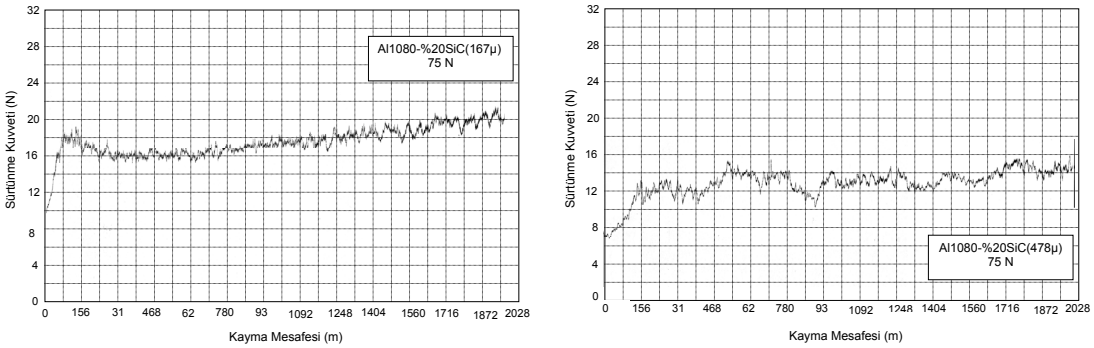
(a) (b)

Şekil 4.33. Sürtünme kuvveti-aşınma yolu eğrisi a) AA1080/SiC 20μm/40 b) AA1080/SiC 20μm/50.



(a) (b)

Şekil 4.34. Sürtünme kuvveti-aşınma yolu eğrisi a) AA1080/SiC 20μm/20 b) AA1080/SiC 53μm/20.



(a) (b)

Şekil 4.35. a) AA1080/SiC 167μm/20 b) AA1080/SiC 478μm/20 kompozit sürtünme kuvveti-aşınma yolu eğrisi.

4.2.1.2. AA2124 Matrisli SiC Takviyeli Kompozit İmalatı ve Testleri (sertlik, aşınma, imalat şartları)

Tez çalışma planı doğrultusunda ve destek alınan projeler kapsamında temin edilen, boyutu 24-34 μm olan AA2124 tozlarıyla deneme imalatları yapılmıştır. Alüminyum 2124 serisi tozların sahip olduğu kimyasal bileşim Tablo 4.1'de verilmiştir. 2xxx serisi alüminyumlar ısıl işlem yapılabilirliği ve yüksek mukavemeti gibi sebeplerden dolayı uygulama alanlarında oldukça fazla tercih edilmektedir. Bu seri alaşımlarda bakır içeriği diğer serilere nazaran daha fazladır. Bu sebepten dolayı Al-Cu alaşımı olarak ta adlandırılmaktadır.

AA2124 matrisli kompozit ön deneme imalatlarında Al_2O_3 (1μm), SiC (2 μm), B_4C (1-7 μm) takviye elemanları kullanılmış olup, karşılaştırma yapabilmek maksadıyla katkısız AA2124 numuneler de imal edilmiştir. Burada amaç asıl numunelerin imalatı sırasında kullanılabilecek optimum imalat şartlarını tespit etmektir. Bu nedenle her takviye malzemesinden aynı hacim oranında karışımlar hazırlanmıştır. İmalat önce sıcaklık sabit tutulup basınç artırılarak, daha sonra basınç sabit tutulup sıcaklık arttırılarak gerçekleştirilmiş, bunlara ek olarak normal şartlardan daha yüksek basınç uygulanarak şartlarındaki değişimlerin malzemenin sertliğine olan etkisi ve hangi şartların kompozit imalatına daha uygun olacağının incelenmesi amaçlanmıştır. Her iki duruma ait sıcaklık ve basınç değerleri Tablo 4.2'de görülmektedir.

AA2124 matrisli ön denemeler de AA1080 matrisli kompozit imalatında kullanılan 16 mm iç çapa sahip H13 çeliğinden imal edilip sertleştirilen kalıplar kullanılmıştır. Dolayısıyla elde ettiğimiz ürünler yine aynı boyutlardadır (çap 16 mm, kalınlık 5 mm). Bir önceki dönemlerde test edilen AA1080 matrisli ve farklı hacim oranlı (%10, 20, 30) kompozit numunelerin sertlik ve aşınma davranışları dikkate alınmış

Tablo 4.1. AA2124 alüminyumun kimyasal bileşimi.

Malzeme	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
AA2124	94.7	0.1	4.9	0.3	1.8	0.9	0.2	0.15	0.25

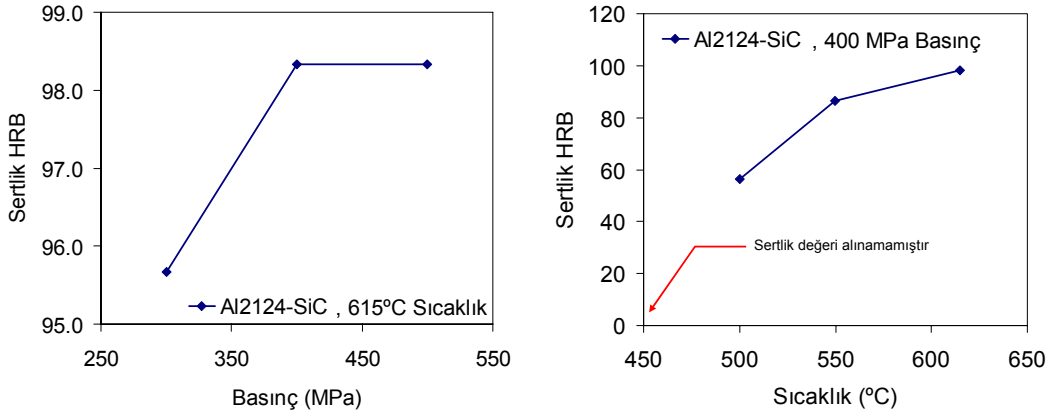
Tablo 4.2. İmalat şartları.

I. İmalat Şartları		II. İmalat Şartları	
Basınç (MPa)	Sıcaklık(°C)	Basınç (MPa)	Sıcaklık(°C)
300	615	400	450
400	615	400	500
500	615	400	550
		700	500

(en az aşınan numune %30 takviye oranlı olduğundan) ve AA2124 matrisli kompozit numunelerin imalatında bu sonuçtan yararlanılarak %30 takviye oranı kullanılmıştır. Öncelikle her bir takviye elemanı için (Al_2O_3, SiC, B_4C) %30 hacim oranına sahip karışımlar hazırlandı, daha sonra bu karışımdan yeterli miktarı kalıbın içerisine konuldu. Kalıpla malzeme arasında yapışmayı engellemek maksadıyla kalıp yüzeyleri önceden grafit tozuyla kaplanmıştır. Daha sonra kalıp fırın içerisine konularak üst kapak kapatılıp, gerekli olan soğutma suyu ve koruyucu gaz bağlantıları yapılmıştır. Karışım malzeme üzerine küçük miktardaki ön yük uygulanarak sistem istenilen sıcaklığa ulaşana kadar bekletilip, istenilen sıcaklıkta malzeme 30 dakika belirli bir basınç altında sinterlenerek takviye ve matris tozlarının birbirine yapışması sağlanmıştır. İmalat şartları her bir numune için ayrı ayrı değerlere ayarlanıp kaydedilmiştir. İmalat sonrasında SiC takviye içeren AA2124 matrisli kompozitin yüzeyi Şekil 4.36'de görülmektedir.

I. İmalat şartında, sıcaklık 615°C iken, basınç ayrı ayrı 300, 400 ve 500 MPa olacak şekilde, Al_2O_3, SiC, B_4C takviyeli AA2124 matrisli kompozitler 30 dakika sinterlenerek elde edilmiştir. II. İmalat şartında, basınç 400 MPa'da sabit tutulup,

Şekil 4.36. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit yüzey görüntüsü.



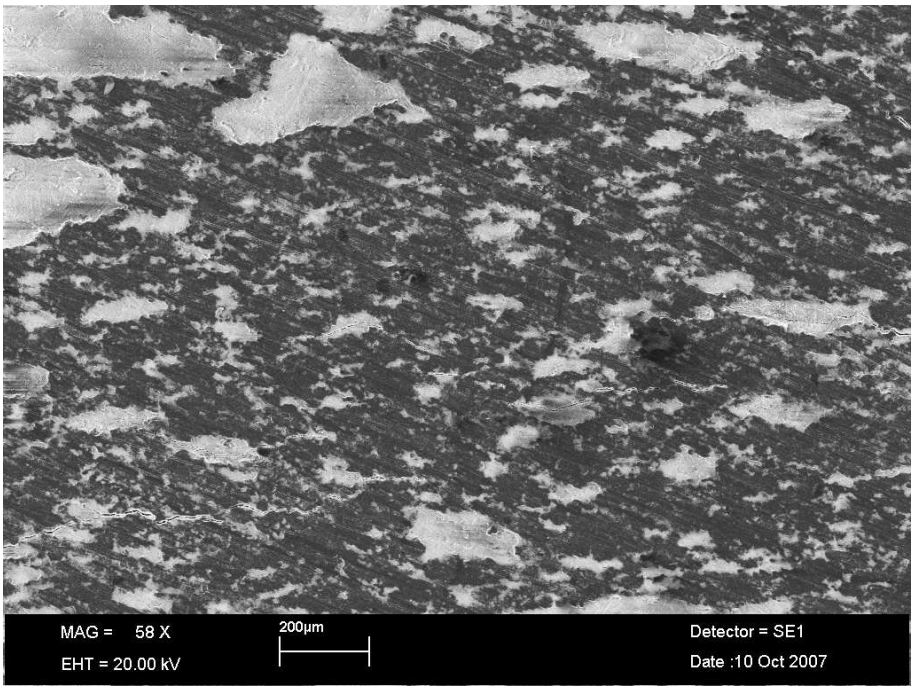
(a) (b)

Şekil 4.37. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit sertlik değerleri.

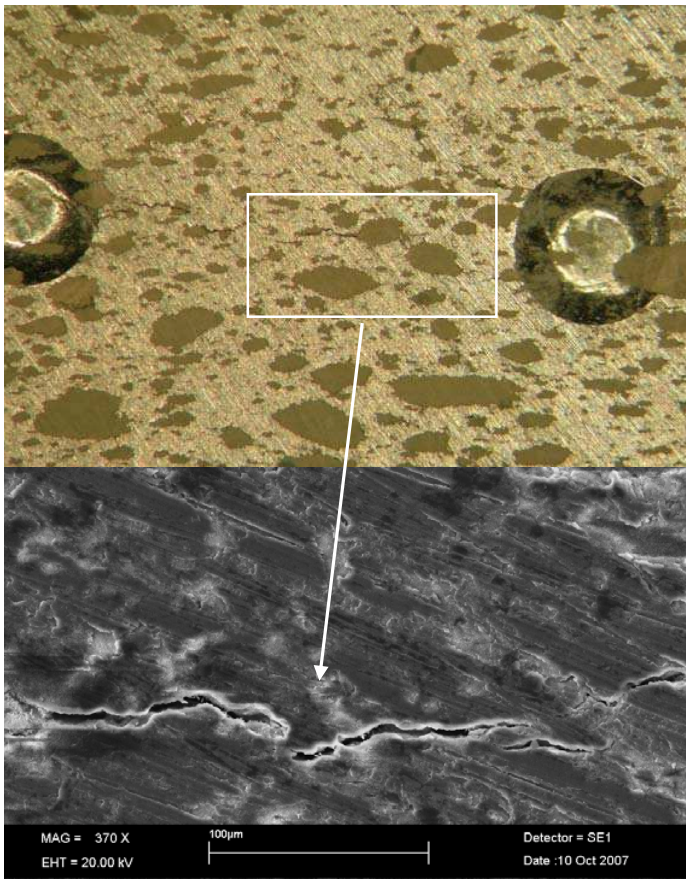
sinterleme süresi 30 dakika ve sıcaklılar 450, 500, 550 ve 615°C olacak şekilde kompozit imaline devam edilmiştir. Kompozitlerin sertlik testleri yapılarak en uygun şartların tespit edilmesi amaçlanmıştır. Kompozitlerin imalat şartları, kompozit bileşimi ve sertlik değerleri Tablo EK-1.3'da verilmiştir.

%30 SiC takviyeli AA2124 matrisli kompozitin sertlik sonuçları (Şekil 4.37.a) incelendiğinde, sıcaklık sabit iken, basınç arttırıldıkça sertliğinde çok azda olsa bir artış meydana geldiği (96 HRB'den 99 HRB'ye), basıncın sabit tutularak sıcaklığın arttırılmasıyla sertlik değerinde belirgin bir artış (Şekil 4.37.b) görülmektedir (60 HRB'den 100 HRB'ye).

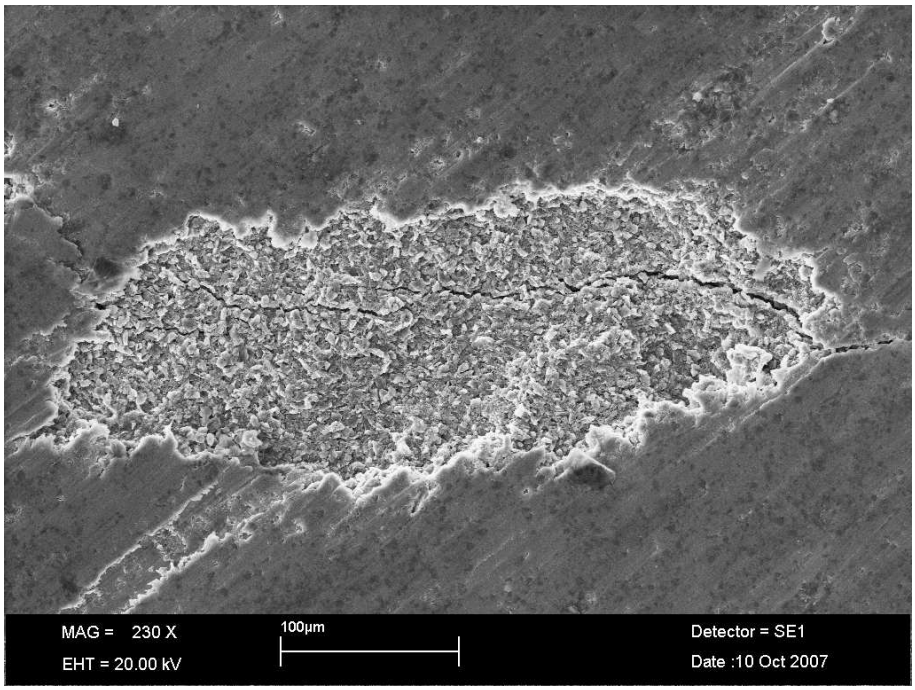
Genel olarak SiC takviyeli kompozitin iç yapısındaki takviye dağılımının homojen görülmesine rağmen yer yer topaklanmalara rastlanmıştır (Şekil 4.38). 450 °C sıcaklık ve 400 MPa basınç altında 30 dakika sinterleme sonrasında imal edilen numuneden sertlik değeri alınamamış, 100 kg'lık yükün uygulanmasıyla beraber malzeme kırılarak hasara uğramıştır. Bunun sebebi, ise imalat şartlarının takviye ve matrisin yeterince birleşme gösterememesi, matrisin yeteri kadar pişememesidir. Ayrıca bazı numunelerde ise sertlik izleri etrafında çatlaklar ve kırıklara rastlanmıştır (Şekil 4.39). Buna ek olarak çatlakların topaklanmış partiküllerin de içlerine nüfuz ettiği görülmüştür (Şekil 4.40). Sonuç olarak SiC takviyeli AA2124 matrisli kompozit için imalat sıcaklığının artışı sertlik değerinde sürekli iyileştirme sağlarken, sıcaklık sabit iken uygulanan basıncın artırılmasının (400-500 MPa) sertlik değerlerini arttırmak için etkili olmadığı anlaşılmıştır.



Şekil 4.38. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit iç yapısı.



Şekil 4.39. AA2124/SiC 2μm/30 kompozitte oluşan sertlik izi ve çatlakları.

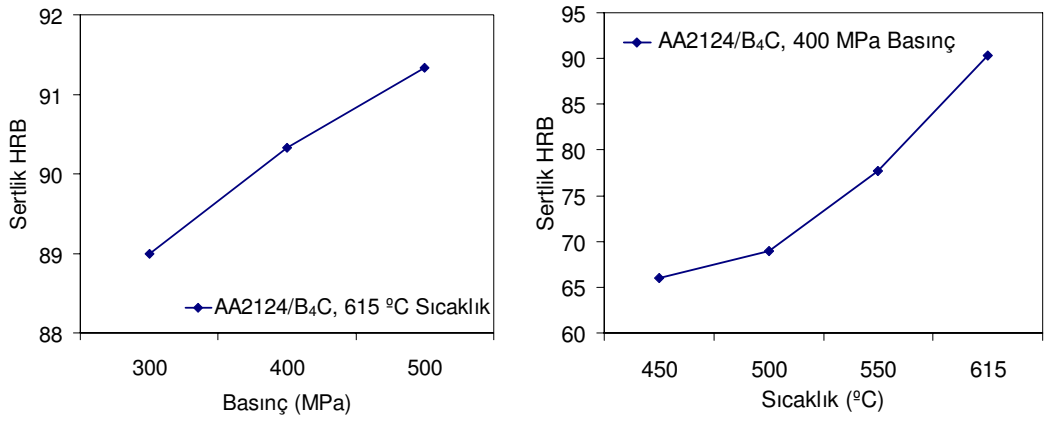


Şekil 4.40. AA2124/SiC 2μm/30 partikül kümelenmesinde görülen kırılma.

Al2124/B_4C 1-7μm/30 kompozit sertlik grafikleri Şekil 4.41'deki gibidir. Grafikler incelendiği zaman sıcaklık 615°C'de sabitken basınç artırılınca sertlik değerinde az miktarda değişim olmuştur (88 HRB'den 91 HRB'ye). Basınç sabitken sıcaklığın artırılmasıyla sertlik değeride 68 HRB'den 92 HRB'ye çıkmıştır. Bu artış kabul edilebilir artış değeridir. SiC'de olduğu gibi bor karbür takviyeli kompozittede basınç artırılırken sertlik değerlerindeki değişim miktarı küçük olurken sıcaklık artışıyla sertlik artışının hızlandığı görülmüştür. Ancak her iki durumda da ulaşılan sertlik değeri hemen hemen aynıdır.

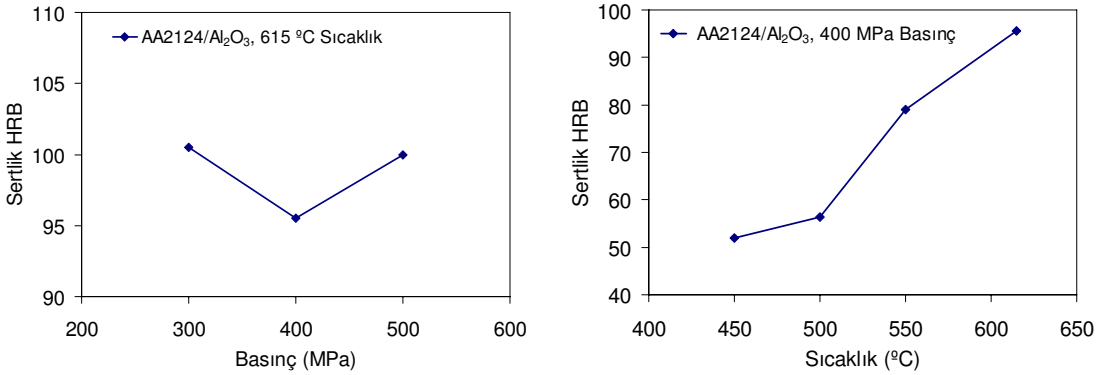
AA2124/Al_2O_3 1μm/30 kompozitine ait sertlik grafikleri Şekil 4.42'da görülmektedir. Sıcaklık sabitken basınç artışıyla birlikte sertlik değeri çok az değişmiştir. Ancak basınç sabit tutulup sıcaklık artırıldığı zaman sertlik değerlerinin 50 HRB'den 100 HRB'ye kadar çıktığı görülmüştür.

Takviyesiz AA2124 numunenin, sıcaklık 615°C'de sabit tutulup basıncın arttırıldığı imalat sonrasında sertlik değerlerinde düşüş gözlenmiştir (Şekil 4.43). Basınç 400 MPa'da tutulup sıcaklığın arttırılmasıyla gerçekleşen imalat sonrasında sertlik yine düşmüştür.



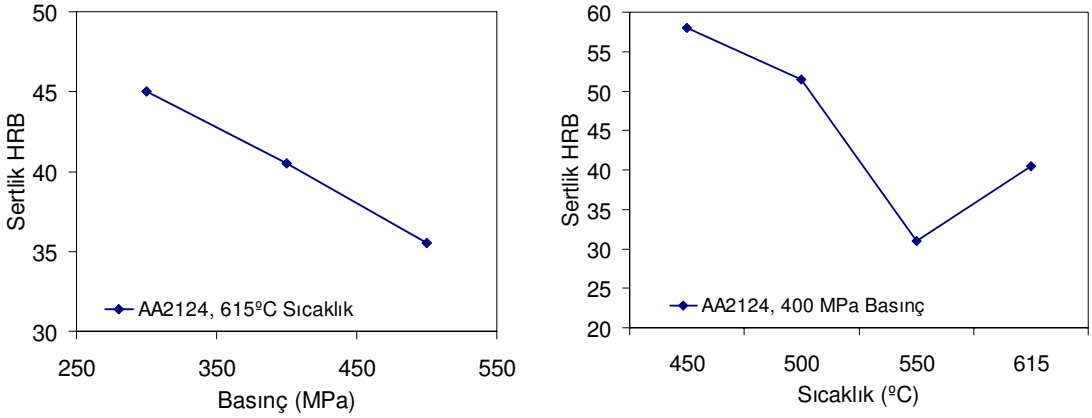
(a) (b)

Şekil 4.41. AA2124/B_4C/30 sertlik değişimi, a) basınçla, b) sıcaklıkla.



(a) (b)

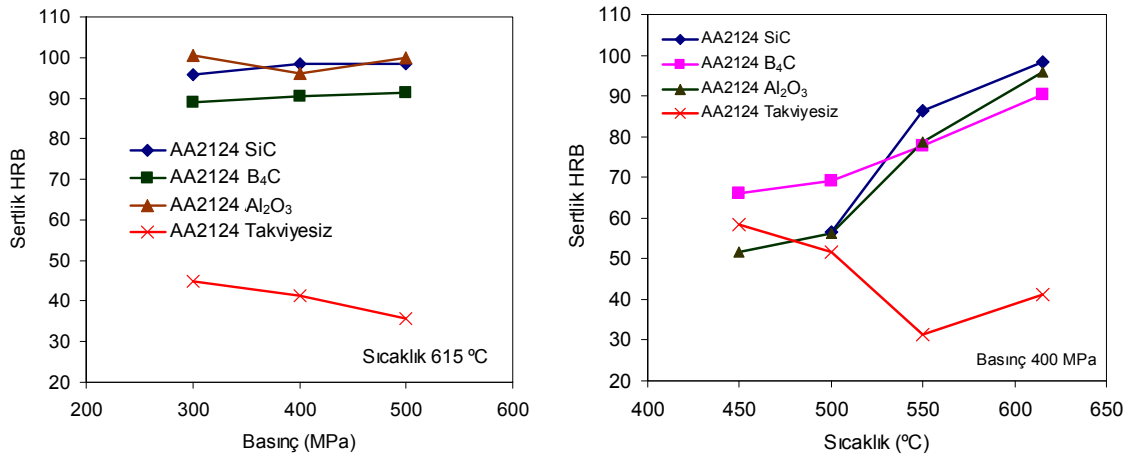
Şekil 4.42. AA2124/Al_2O_3/30 sertlik değişimi, a) basınçla, b) sıcaklıkla.



(a) (b)

Şekil 4.43. AA2124 takviyesiz numune sertlik değişimi, a) basınçla, b) sıcaklıkla.

Elde edilen sonuçlar çerçevesinde, 615°C sabit sıcaklıktaki imalatta, takviyesiz AA2124 numunenin sertliği diğerlerine göre en düşüktür. Al_2O_3 ve SiC takviyeli kompozit numunelerin sertlikleri en yüksektir. Basınç artışıyla birlikte sertlik değerlerinde belirgin bir değişiklik görülememektedir (Şekil 4.44.a) 400 MPa sabit basınç altında imal edilen kompozitlerin sertlikleri sıcaklığın artmasıyla artmaktadır. Yine en düşük sertlik takviyesiz AA2124 numunede görülürken, sıcaklık artışı bu numunenin sertlik değerlerini düşürmektedir. Sıcaklığın en yüksek olduğu 615°C'daki şartlarda imal edilen koMpozitlerde en yüksek ortalama sertlik sırasıyla SiC, Al_2O_3 ve B_4C numunelerdedir. En yüksek sertlik artışı ise Al_2O_3 takviyeli kompozitte meydana gelmiştir.



(a) (b)

Şekil 4.44. AA2124 matrisli kompozitlerde sertlik değişimi, a) basınçla, b) sıcaklıkla.

Bu bilgiler ışığında imalat şartları olarak sertliğin istenilen düzeyde olabilmesi için yüksek sıcaklıklar tercih edilirken, malzemedeki oluşabilecek hasarı azaltmak ve enerji tasarrufunu sağlamak amacıyla orta seviyedeki basınç değerlerinin tercih edilebileceği anlaşılmaktadır.

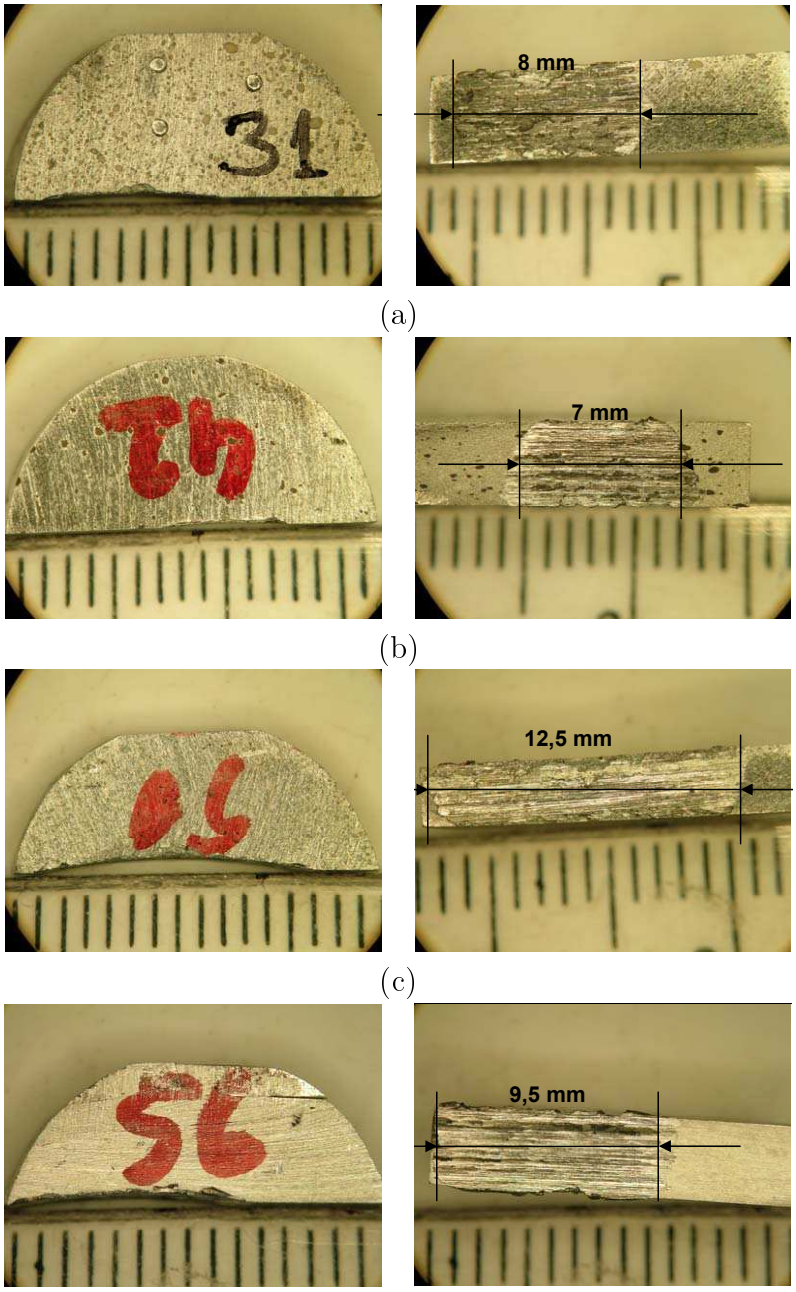
Öte yandan ortalama 25 μm boyutunda (EK-2.1) bu araştırmanın asıl matris malzemesi olarak AA2124 alüminyum tozu kullanılarak, B_4C, Al_2O_3 ve SiC tozları %30 hacim oranında karıştırılmış ve kompozit numuneler imal edilmiştir (AA2124/Al_2O_3 1μm/30), (AA2124/B_4C 1-7 μm/30), (AA2124/SiC 2μm)/30). Bu takviyelerden Al_2O_3 (1μm), B_4C (1-7μm), SiC (2μm) boyutlarındadır. AA2124 alüminyum tozlarıyla imal edilen numunelerin sertlik değerlerinin alaşımsız AA1080

serisi numunelere göre yüksek olduğu tespit edilmişti. Aşınma deneyleri sonrasında aşınma dirençlerinin daha iyi olduğu görülmüştür. Şekillerden de anlaşılacağı üzere B_4C takviyeli kompozitin aşınma yüzey alanı diğerlerine göre en düşüktür. Ayrıca SiC takviyeli numunelerin aşınma yüzeyleri takviyesize nazaran daha küçüktür (Şekil 4.45). Al_2O_3 takviyeli numunenin aşınma miktarı takviyesize göre daha büyük çıkmasından dolayı yeniden numune imal edilip deney tekrarlanmıştır.

Sürtünme kuvveti bakımından incelediğimizde en yüksek sürtünme kuvvetinin B_4C ve SiC takviyeli kompozitlerde oluştuğu Şekil 4.46'da görülmektedir. Bunu dikkate alarak bu malzemelerin aşınma direncinin düşük olduğunu söylemek mümkün değildir. Aşınma yolunu ağırlık kaybına oranladığımız zaman malzemenin aşınma direncini (m/mg) bulabiliriz. Bu durumda en yüksek aşınma direncine B_4C takviyeli kompozit sahip olmakta, bunu sırasıyla SiC, takviyesiz ve Al_2O_3 takviyeli kompozitler takip etmektedir. Bu sonuçları ağırlık kaybı ve birim aşınma yüzeyine düşen ağırlık kaybıda desteklemektedir. En çok kayıp Al_2O_3 takviyeli numunede gözlenirken, en az kayıp B_4C takviyeli kompozitte olmuştur (Şekil 4.47). Ayrıca aşınma direncinin artmasıyla birim alanda meydana gelen kayıp en az olmaktadır. Yaklaşık olarak 800 m'lik bir sürtünme yolundan sonra numunelerin kararlı bir aşınma eğilimi gösterdikleri Şekil 4.46'da görülmektedir.

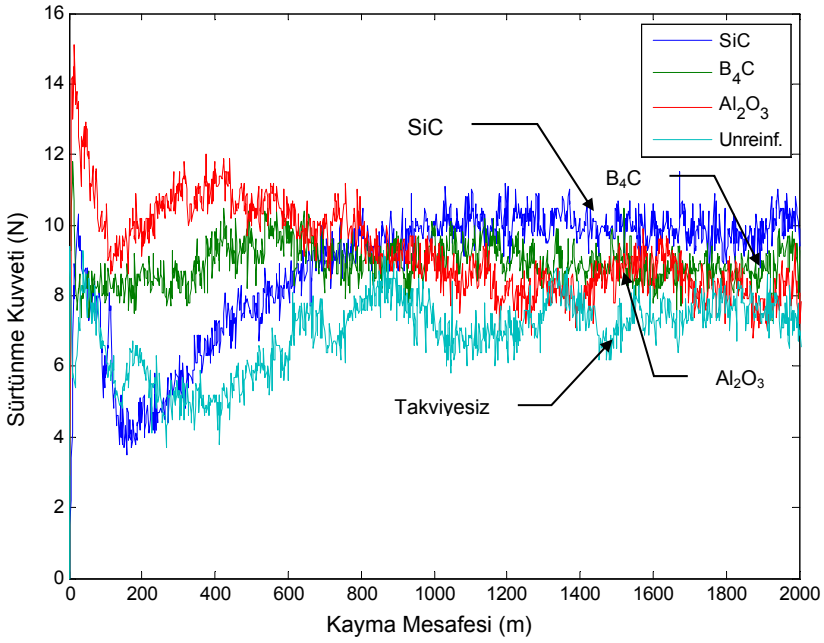
Daha önce bahsedildiği üzere, elle karıştırılan tozlarda kümelenme meydana geldiği görülmüş ve metal bilyeli mekanik bir karıştırma sisteminin çözüme yardımcı olabileceği düşünülmüştür. Şekil 4.48'de tozları iki farklı şekilde karıştırılmış numunenin yüzey makro görüntüleri vardır. A numunesi, Al_2O_3 takviyeli kompozittir. Bu numunenin imalatı sırasında küçük boyutlardaki tozlar el ile karıştırılmıştır. İmalat sonrasında yüzeyde ve iç yapıda takviye topaklanmalarına rastlanmıştır. Bu topaklanmalar toz metalürjisinde oldukça sık karşılaşılan ve çözülmesi gereken bir problemdir. Hazırlanılan karıştırma ünitesinde, topaklanma probleminin görüldüğü numunelerle aynı özelliklere sahip kompozit karışımı elde edilerek imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu numunenin yüzey karakteristiği Şekil 4.48.b'de görülmektedir.

Bu numunelerin detay görüntülerinden de anlaşılabileceği gibi önceden imal edilen

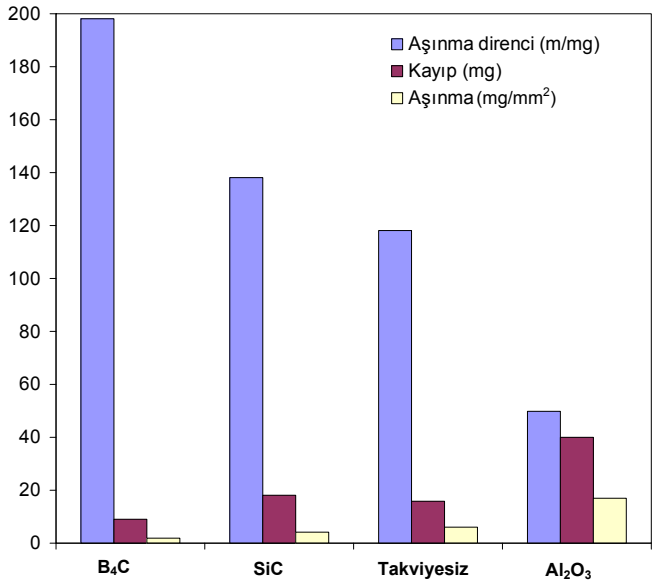


Şekil 4.45. Aşınma sonrasında kompozit numuneler a) AA2124/SiC 2μm/30, b) AA2124/B_4C 1-7μm/30, c) AA2124/Al_2O_3 1μm/30, d) Takviyesiz AA2124

numunelerde açıkca görülebilen topaklanmalar son numunelerde görülmemekte dolayısıyla homojen bir dağılım elde edilmiş olmaktadır (Şekil 4.49). Topaklanmalar takviye boyutunun 1 μm olmasına rağmen oldukça büyük boyutlarda olmaktadır. Bu topaklar içerisinde çok sayıda takviye partikülü bulunmaktadır (Şekil 4.50.a). Mekanik karıştırma sistemiyle karıştırılmış numunelerde ise AA2124 alüminyum

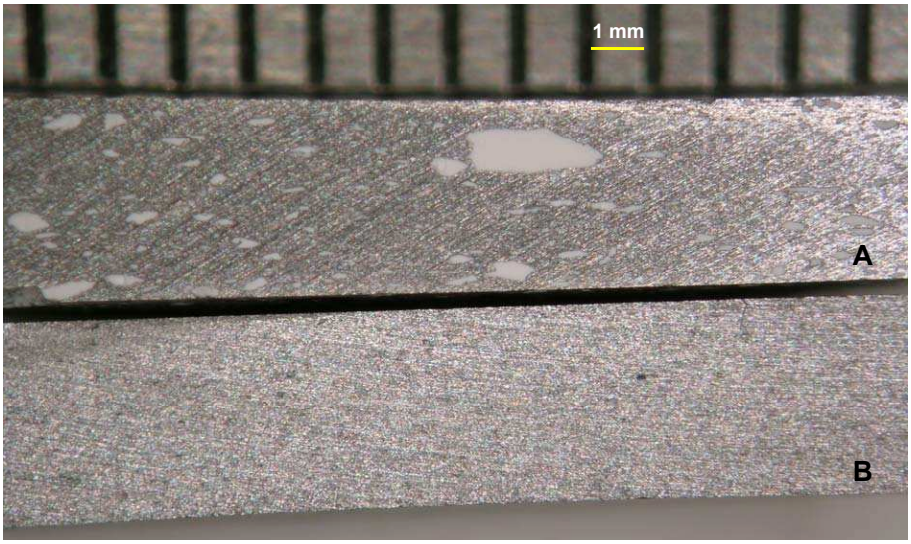


Şekil 4.46. Takviye türünün AA2124 matrisli kompozitin aşınma davranışına etkisi.

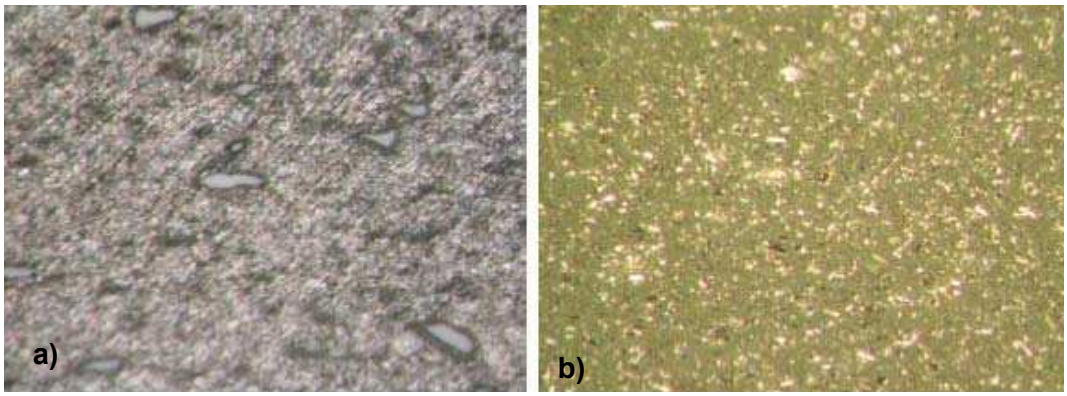


Şekil 4.47. Kompozit numunelerdeki aşınma direnci ve ağırlık kayıp miktarları.

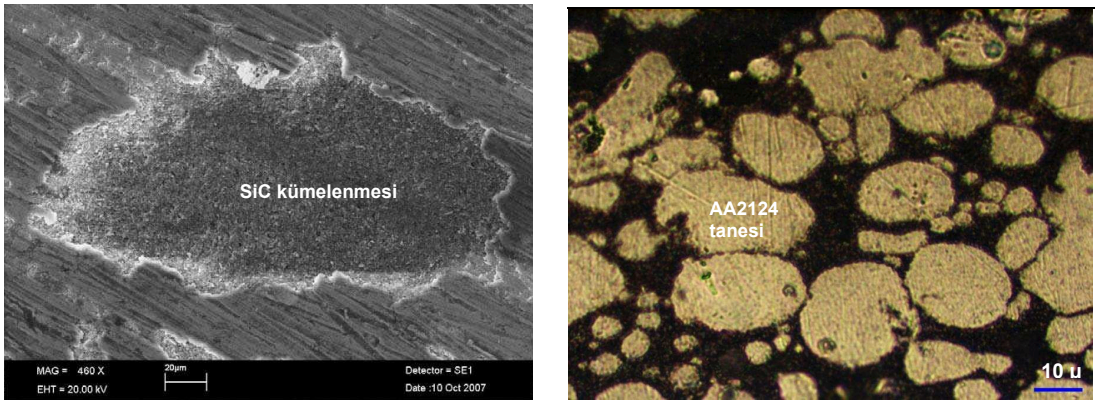
toz tanecikleri belirgin durumdayken takviye ve alüminyum karışımı bu tanelerin etrafında homojen dağılmaktadır (Şekil 4.50.b, 4.51). Açık renkteki bölgeler alüminyum olduğundan dolayı daha büyük mikro sertlik izine sahip, ancak diğer bölgelerin sertlik izinin daha küçük boyutlarda olması bu bölgelerinde sert seramik takviyeden oluştuğunu kanıtlamaktadır (Şekil 4.52).



Şekil 4.48. Farklı toz karıştırma yöntemleri kullanılarak imal edilen kompozitlerin iç yapı makro görüntüleri a) El ile karıştırılmış numune b) Makine ile karıştırılmış numune

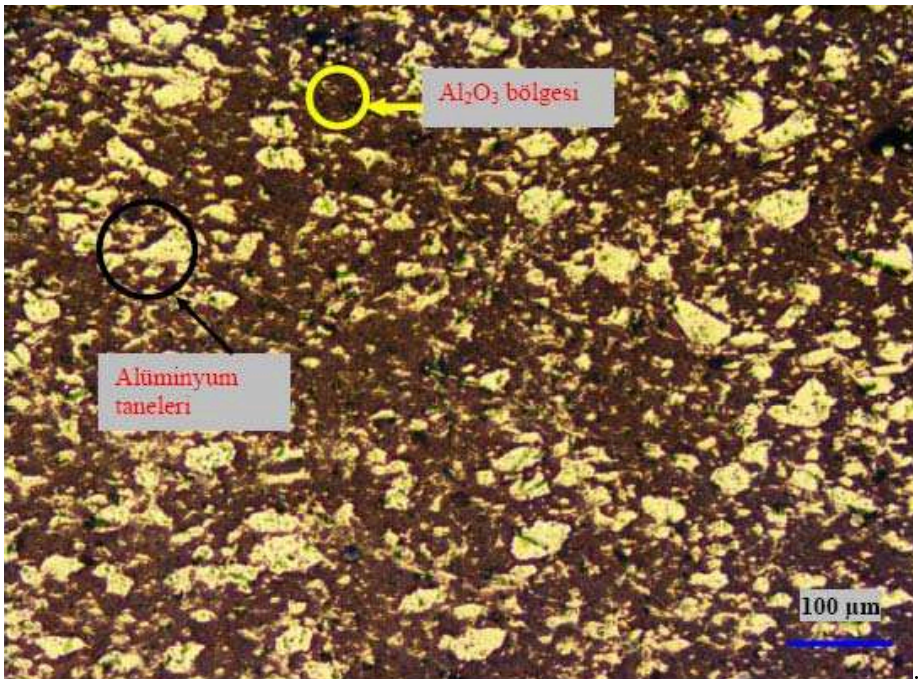


Şekil 4.49. Şekil 4.48'deki a) A yüzeyi detayı b) B yüzeyi detayı

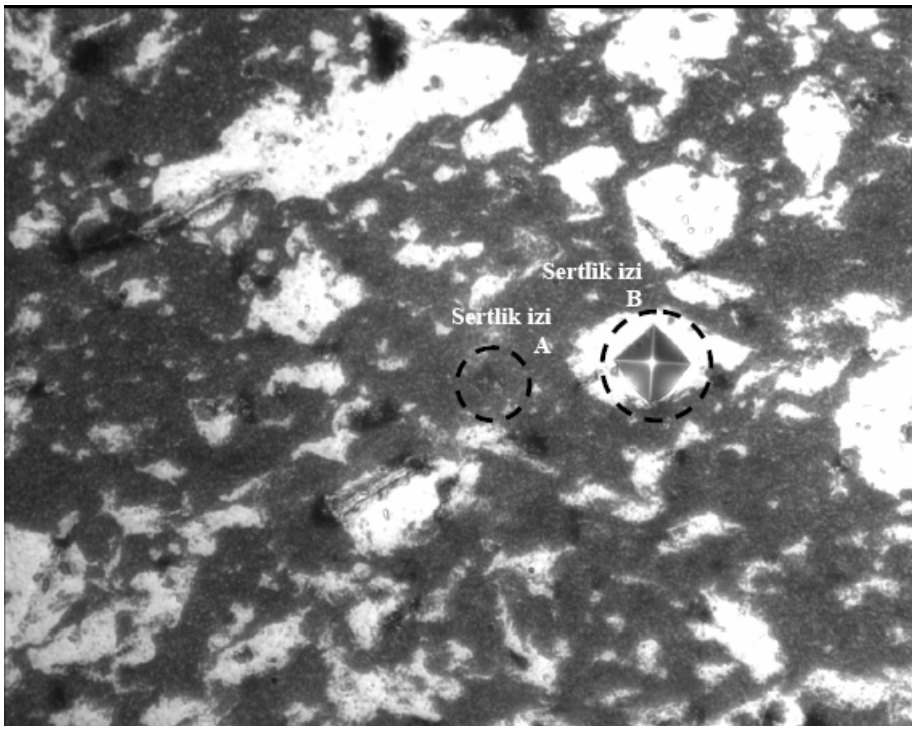


(a) (b)

Şekil 4.50. a) Elle karıştırılan kompozit içyapısındaki SiC kümelenmesi b) Makine ile karıştırılan kompozit içyapısı (ışık mikroskop).



Şekil 4.51. AA2124/Al_2O_3 1μm/30 kompozit iç yapısı.



Şekil 4.52. AA2124/Al_2O_3 1μm/30 kompozit üzerindeki mikro sertlik izleri.

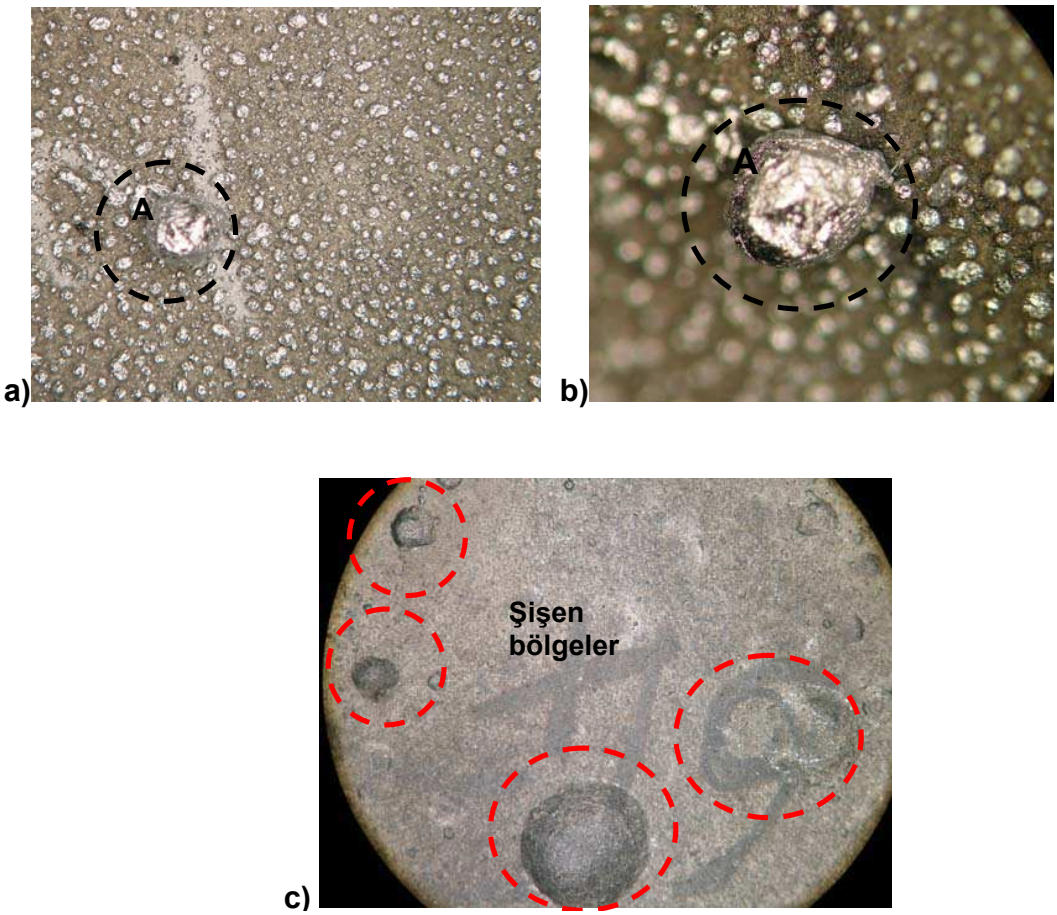
4.2.1.3. İmalat Şartlarının Kompozit Özelliklerine Etkisi (sıcaklık, basınç)

AA2124 alüminyum tozları kullanılarak yeni numunelerin imalatı gerçekleştirilmiştir. İmalat esnasında uygulanan sıcaklık, basınç ve karışım oranlarının malzemenin mekanik özelliklerine (sertlik, yoğunluk vb.) olan etkisinin incelenmesi amacıyla, 23°C, 250°C, 450°C ve 650°C sıcaklıklarda 200, 400, 600 ve 800 MPa basınçlar kullanılarak saf, %10, 20, 30 takviye oranlarında SiC (20μm) takviyeli kompozitler imal edilmiştir.

Bu numuneler kapalı argon atmosferi altında herhangi bir basınç uygulanmadan fırın içerisinde toplu olarak sinterleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Sinterleme öncesi ve sonrasındaki sertlik değerleri ölçülmüştür. Düşük sıcaklıklarda imal edilen numunelerin sertliği oldukça düşük değerdedir. Sertlik ölçümleri sırasında bu malzemeler kırılıp parçalanmış ve bir kısmından da sertlik değeri alınamamıştır. Bu durum imalat şartlarının yeterli bağlanmaya imkân vermediğini göstermektedir. Basınç ve sıcaklık artırıldığı zaman sertlik değerlerinde de artış görülmüştür. 650 °C sıcaklık, 600 MPa basınç şartlarındaki sertlik değerleri ile 800 MPa 650 °C şartlarındaki sertlik değerleri birbirine oldukça yakındır. Dolayısıyla yüksek basınç uygulanarak kalıp ve malzemenin yıpranması yada hasara uğraması yerine aynı işlemleri düşük basınçta yapmak daha uygun bulunmaktadır (Tablo EK-1.4). Basınç uygulanmadan yapılan sinterleme işlemi sonrasında malzemenin sertlik değerlerinde azalma olduğu tespit edilmiştir. Yumuşak malzemelerin sertliğinin ölçülmesinde kullanılan Rockwell T (HRT) 15 kg yükle numunelerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca kapalı fırında basınçsız sinterleme sonrasında malzemenin yüzeylerinde bozulmalar, şişmeler ve iç yapıdaki malzemenin dışarı taşması gibi hasarlar görülmüştür (Şekil 4.53). Bu sebeple 70 adet numune oluşan hasar nedeniyle ıskartaya ayrılmıştır, sinterleme sırasında meydana gelen bu olaydan dolayı sertlik ölçüm sonrasında aşınma testine tabi tutulacak numunelerden mantıklı sonuçlar alınamayacağı düşüncesiyle bu numunelerin aşınma testi yapılmamıştır.

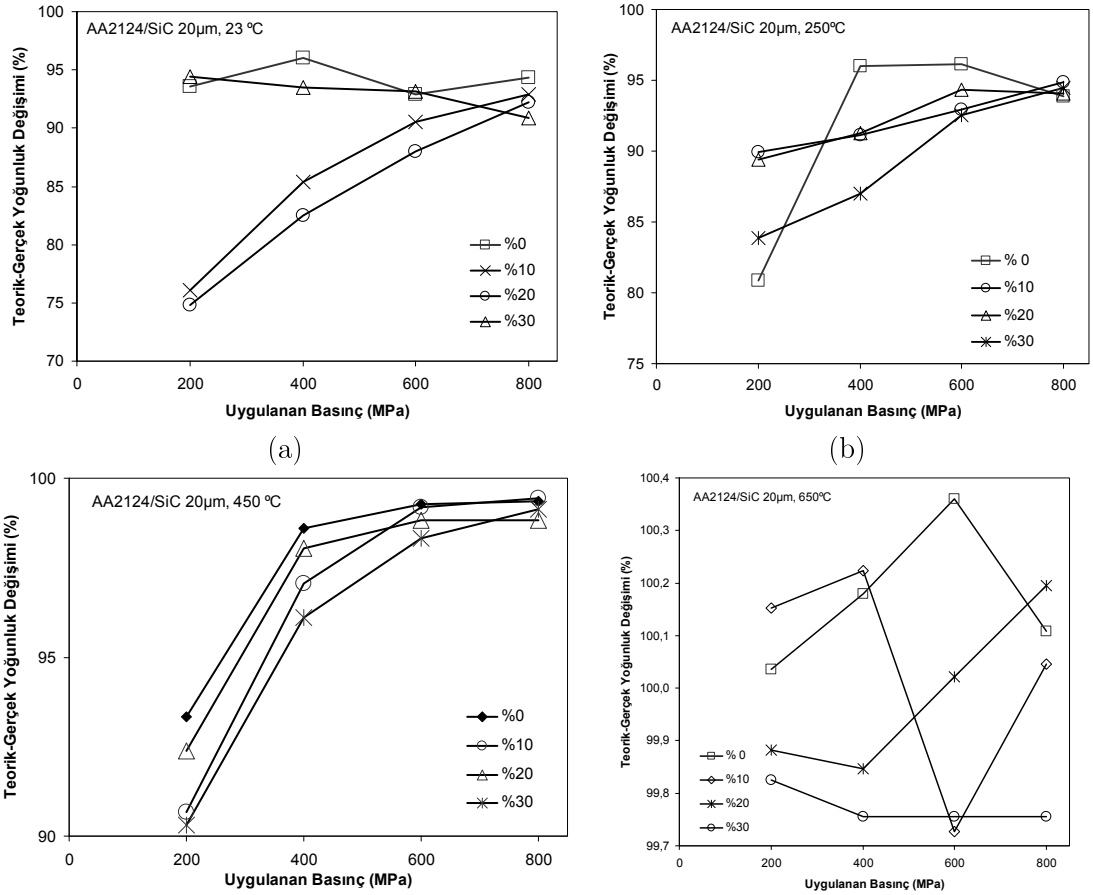
Bu nedenle aşınma deneyleri için yeniden numune imal edilmesi gerekmiştir. Bu imalat için şartlar; öncekilerde elde edilen sertlik değerleri ve gerçek-teorik

yoğunluklar arasındaki uyum yüzdesi göz önüne alınarak 615 °C sıcaklık, 600 MPa basınç ve 30 dakika sinterleme süresi belirlenmiştir. Bu şartlar altında B_4C (1-7μm), Al_2O_3(1μm, 20-50μm),SiC (2μm, 20μm) takviyeli AA2124 matrisli kompozitlerin amalatı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.53. Kompozit numunelerde sinterleme sonrasında meydana gelen hasarlar.

AA2124 matrisli SiC (20μm) takviyeli kompozitin % teorik-gerçek yoğunluk fark grafikleri Şekil 4.54'deki gibidir. Basıncın artmasıyla bu iki yoğunluk değerinin birbirine oldukça yaklaşmakta olduğu görülmektedir (Şekil 4.54.a-b-c-d). Bu sayede imalat sonrasında kompozit gerçek yoğunluğu ve teorik yoğunluk değerlerinin aynı olmasıyla malzeme içerisinde istenmeyen boşluk ve hataların ihmal edilebilecek kadar az olduğu sonucuna varılmaktadır. Aynı sıcaklık şartlarında imal edilen numuneler açısından; takviye oranı arttırılırken, düşük basınçlarda yoğunluk farkının arttığı, basınç arttırıldığı zaman ise yoğunluk farkının azaldığı, aynı zamanda takviye oranından dolayı oluşan farklarında azaldığı görülmektedir. Düşük sıcaklık



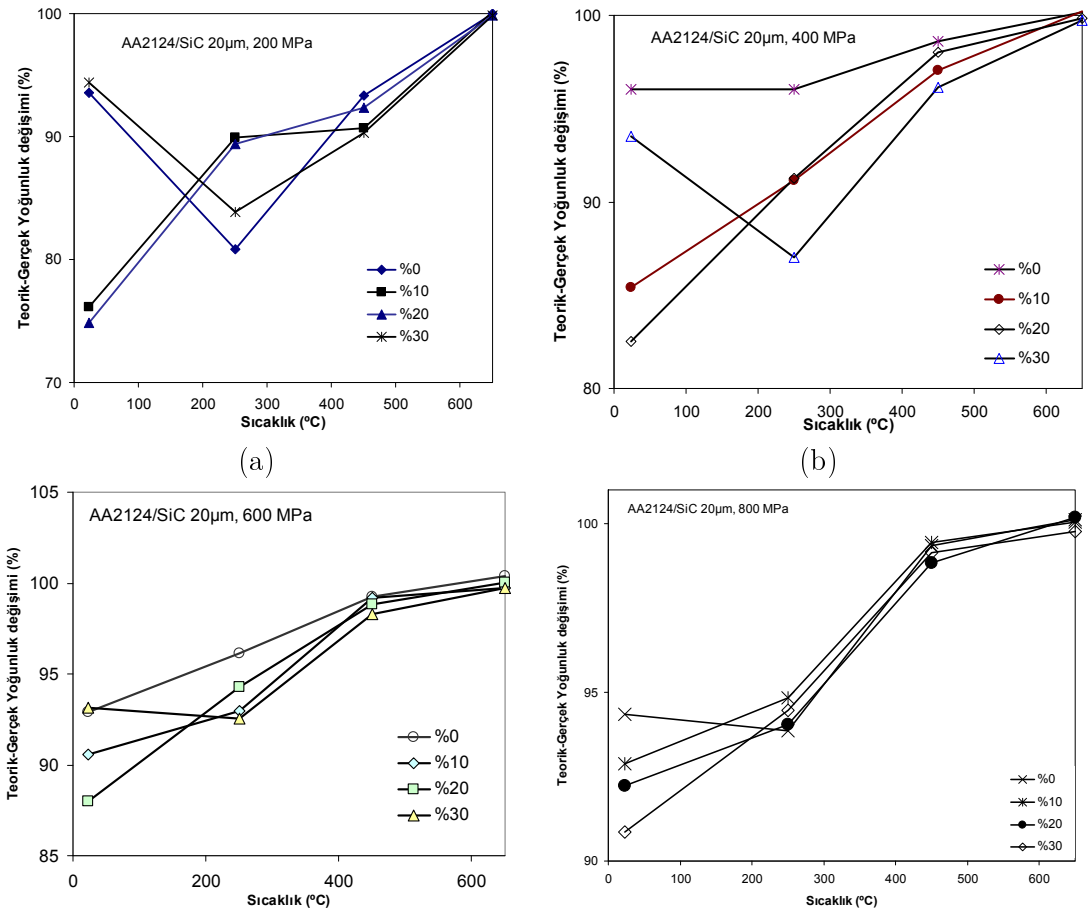
Şekil 4.54. AA2124/SiC 20μm, Teorik-Gerçek Yoğunluk Değişimine (%) basıncın etkisi.

ve düşük basınçlarda yoğunluk farkları oldukça yüksek değerlerde olmaktadır (%10-15). Aynı sıcaklıkta basıncın artması yoğunluk farkının azalmasına neden olur. Düşük sıcaklıklarda takviyesiz malzemenin yoğunluk farkı takviyelilerinkinden daha düşüktür. Bu olay takviyeyle birlikte malzeme içerisinde oluşabilen boşluklardan kaynaklanmaktadır ve basıncın artırılmasıyla boşlukların yanı sıra yoğunluk farkı da azalmaktadır (Şekil 4.55.a-b-c-d). Sıcaklık değerinin en yüksek olduğu 650°C'de malzeme takviyesiz iken yada takviyenin farklı orandaki değerlerinde yoğunluk farkı 0,1-0,2 değerlerine kadar düşmektedir. Dolayısıyla teorik ve gerçek yoğunluk birbirine hemen hemen eşit değerlerde oluşmaktadır (Şekil 4.54.d). Yine bu sıcaklıkta basınç artışının yoğunluk değişiminde çok etkili olmadığı görülmektedir.

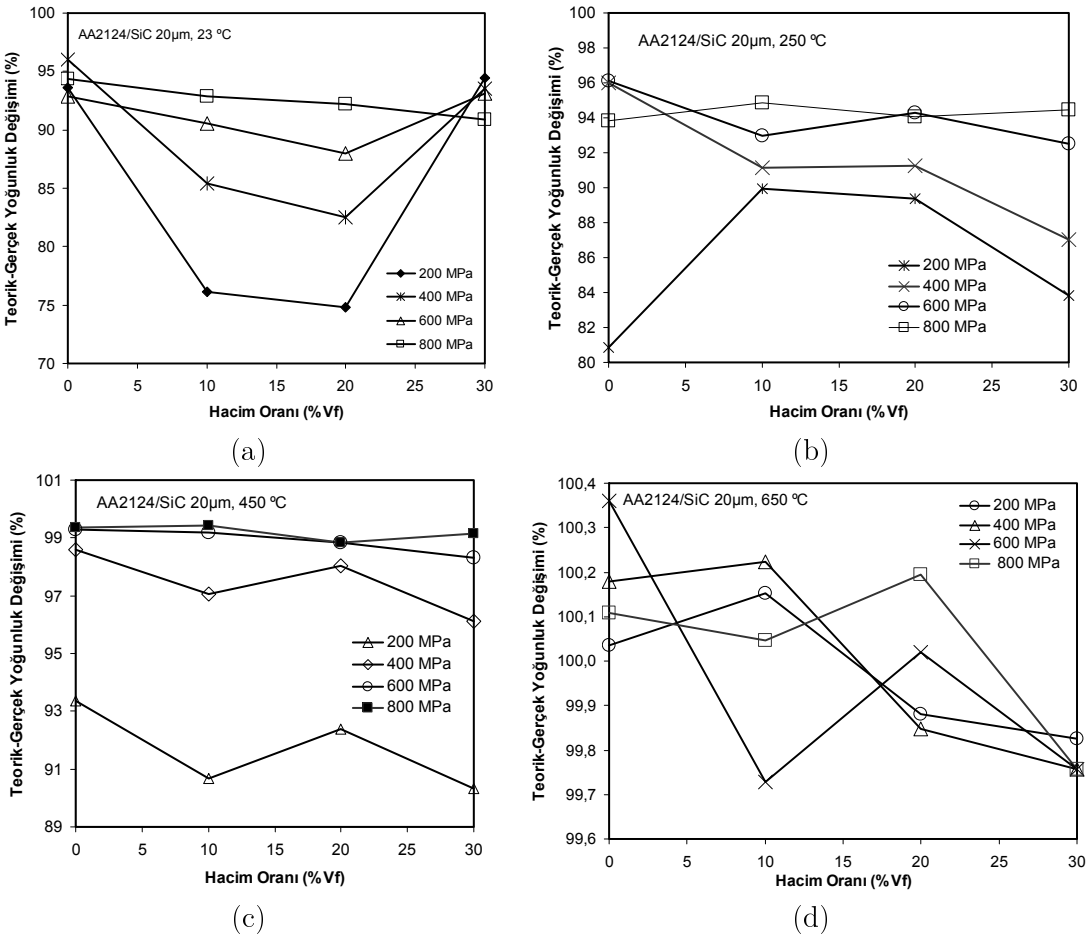
B_4C, Al_2O_3 ve SiC takviye oranlarının artmasıyla kompozitin sertliğide artmıştır (Tablo EK-1.5). Farklı boyutlarda kullanılan Al_2O_3 ve SiC takviyelerinin

boyutlarının sertlik değişimine etkisi çok az miktarda olmuştur. Basınç değerleri 200, 400, 600 ve 800 MPa'da sabit tutulup sıcaklık artırıldığı zaman %teorik-gerçek yoğunluk farkı azalmakta ve %100'e yakın değerler elde edilmektedir (Şekil 4.55.a-b-c-d). Bu fark düşük basınçlarda oldukça fazlayken sıcaklığın artırılmasıyla fark azalmaktadır (Şekil 4.55.a). Düşük sıcaklıkta takviyesiz malzemenin %teorik-gerçek yoğunluk farkı partikül takviyesiyle artmaktadır (Şekil 4.56.a-b-c-d) Yüksek sıcaklıklarda hacim oranının %teorik-gerçek yoğunluk farkında önemli rol oynamadığı göze çarpmaktadır.

Kompozit numuneler 30 dakika süresince, 800 devirde döndürülerek 75 N yük altında aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Her bir numuneye aşınmadan önce hassas teraziyle ağırlık ölçümü yapılmış, aşınma sonrası tekrar tartılmak suretiyle ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. %30 hacim oranına sahip, 20, 53 ve 167μm

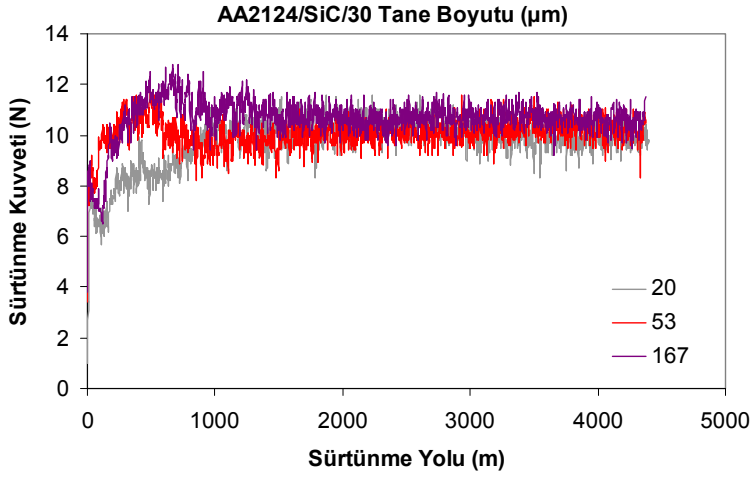


Şekil 4.55. AA2124/SiC 20μm, Teorik-Gerçek Yoğunluk Değişimine (%) sıcaklığın etkisi.

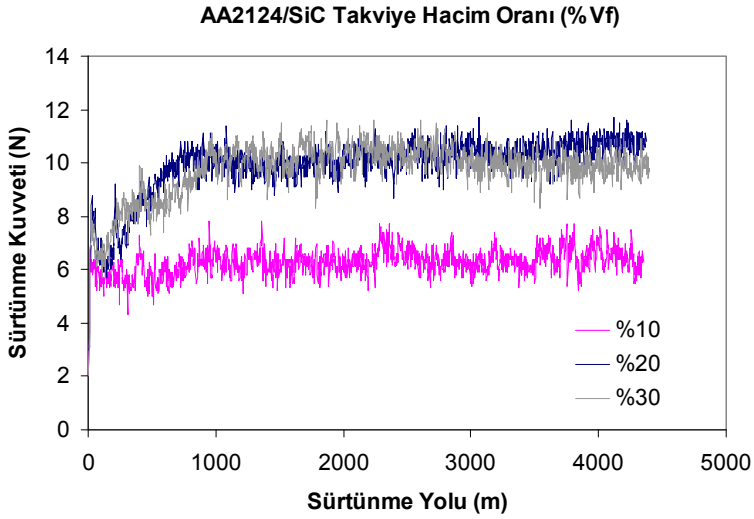


Şekil 4.56. AA2124/SiC 20μm, Teorik-Gerçek Yoğunluk Değişimine (%) hacim oranının etkisi.

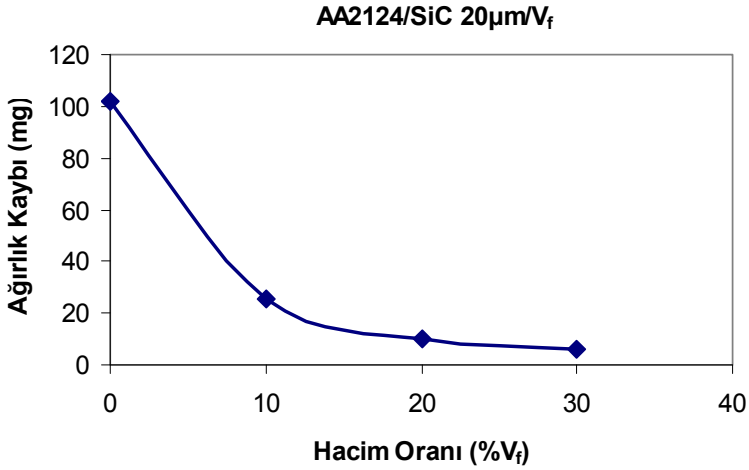
boyutundaki SiC takviyeli kompozit numunenin aşınma yolu-sürtünme kuvveti grafiği Şekil 4.57.a'da görülmektedir. Küçük boyutlu partikül takviyesine sahip numunede oluşan sürtünme kuvveti diğerlerinden daha düşüktür. Dolayısıyla sürtünme katsayısı da düşük ve aşınma direncide yüksektir. 20μm SiC partikül takviyeli farklı hacim oranlarına sahip numunelerin aşınma grafikleri Şekil 4.57.b'de görülmektedir. %10 hacim oranına sahip numunenin aşınma davranışının diğerlerine oranla daha iyi olduğu şekilden görülmektedir. Bu tür farklılıklar malzeme içerisindeki dağılımdan, boşluklardan ve hatalardan kaynaklanabilmektedir. Aynı numunelerin ağırlık kayıp grafiğini incelediğimizde, sürtünme kuvveti büyük olmasına rağmen ağırlık kaybının %30 hacim takviyeli kompozitte en az olduğu görülmektedir (Şekil 4.57.c). Hacim oranı artarken malzemenin ağırlık kaybı azalmaktadır.



(a)

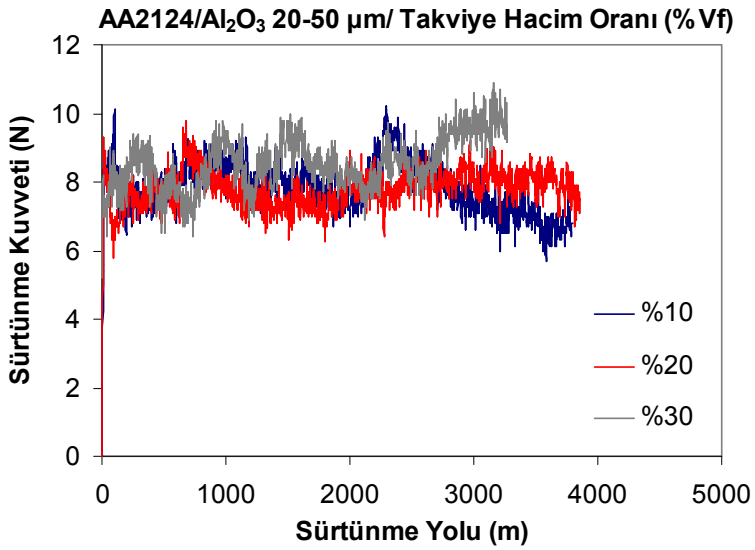


(b)



(c)

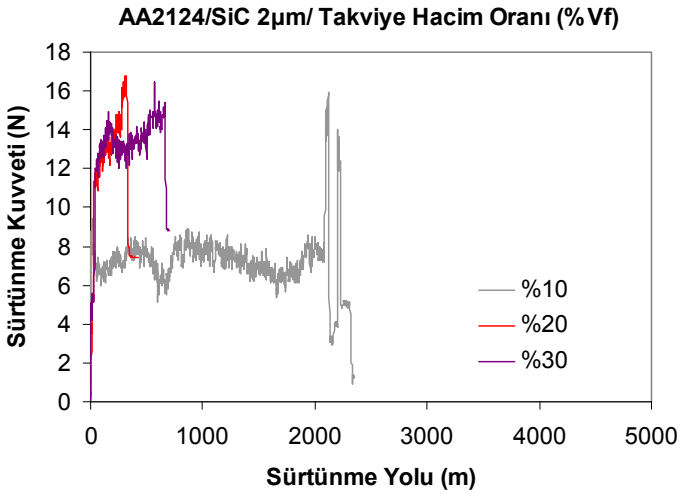
Şekil 4.57. SiC takviyeli kompozite ait a,b) sürtünme yolu-sürtünme kuvveti c) hacim oranı-ağırlık kaybı grafiği.



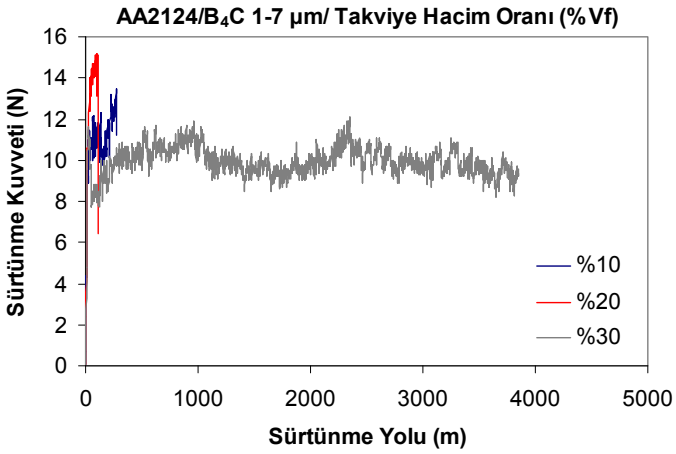
Şekil 4.58. Alumina takviyeli kompozitin sürtünme yolu-sürtünme kuvveti grafiği.

20-50μm Al_2O_3 takviyeli kompozit numunelerin sürtünme yolu-sürtünme kuvveti grafiğinden görüldüğü gibi (Şekil 4.58) tam stabil bir durum izlenmemektedir. Bu durum sürtünme sırasında yüzey profilinin devamlı değişiminden kaynaklanmaktadır. Kimi zaman malzeme aşındırıcı disk yüzeyine yapışmakta, karşılıklı alüminyum sürtünmesi meydana gelmekte dolayısıyla sürtünme kuvveti ve aşınma artmakta, kimi zaman kompozit yüzeyinden kopan partiküller iki yüzey arasında sıkışmakta ve aşınmayı hızlandırıcı etki yapmaktadır.

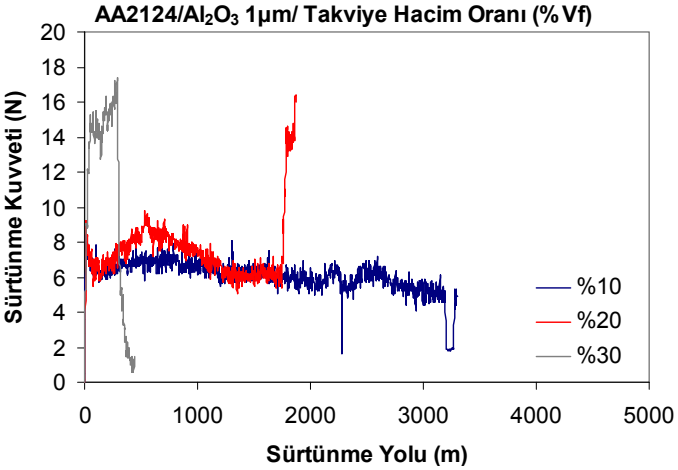
AA2124/SiC (2μm), AA2124/B_4C (1-7μm) ve AA2124/Al_2O_3 (1μm) kompozitlerin farklı takviye oranlarına ait aşınma yolu-sürtünme kuvveti grafikleri Şekil 4.59.a-b-c'de görülmektedir. Numuneler aşınma testi başladıktan bir süre sonra aşındırıcı disk üzerine kompozit malzeme yapışma eğilimi göstermekte ve yapışmanın başlamasıyla birlikte yüzeyler bozulmakta ve oldukça fazla seviyede titreşim görülmekte, ardından aşınma testi devam edemeyecek duruma gelmektedir. Şekil 4.60.a ve b'de AA2124 matrisli 20μm boyutunda %20 SiC (AA2124/SiC 20μm/20) içeren kompozitin, Şekil 4.60.c ve d'de alüminyum 2124 matrisli 1-7μm boyutunda %20 B_4C içeren kompozitin aşınma yüzeyleri görülmektedir.



(a)

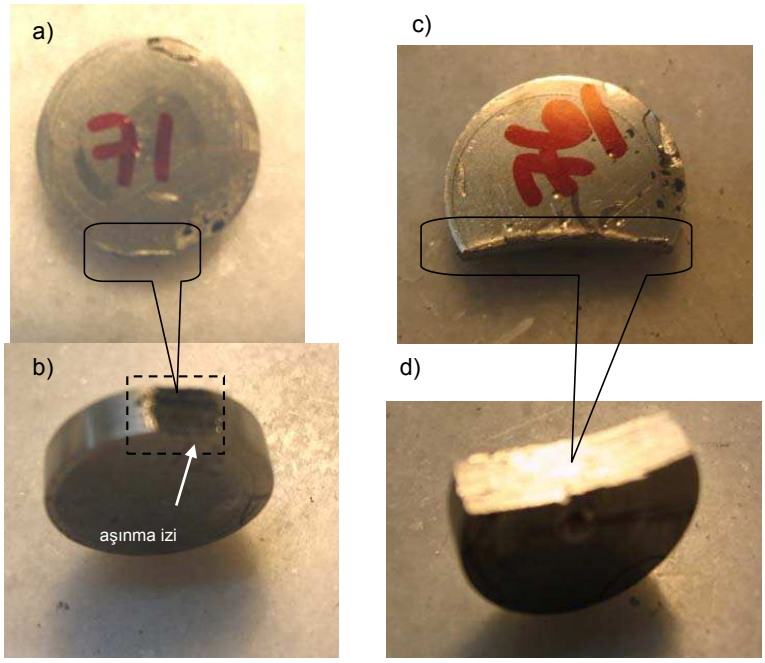


(b)



(c)

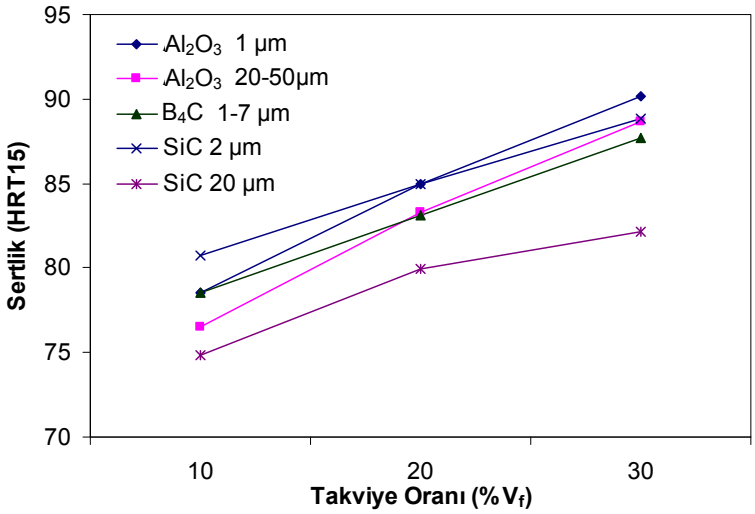
Şekil 4.59. Kompozitlerin sürtünme yolu-sürtünme kuvveti grafikleri.



Şekil 4.60. Kompozit numunelerde meydana gelen aşınma yüzeyleri a,b) AA2124/SiC20μm/20 c,d) AA2124/B_4C 1-7μm/20.

Bu deneylerin daha düşük yüklerde tekrarı için aynı takviye tipine ve aynı takviye oranına sahip yeni numuneler imal edilmiştir. Önceki numunelerde olduğu gibi imalat şartları 600 MPa'lık basınç, 615°C sıcaklık ve 30 dakika sinterleme süresidir. Numunelerin imalat şartları, takviye boyut ve tipleri, gerçek ve teorik yoğunluklarıyla sertlik değerleri Tablo EK-1.6'da verilmiştir. Gerçek yoğunluk ve teorik yoğunluk değerleri birbirine oldukça yakın olduğundan malzeme içerisinde gözenekliliğin en az seviyede olduğu anlaşılmakta ve basınç değerlerinin yeterli olduğu kanısına varılmaktadır. Bu değerler dikkate alınarak çizilen grafiği (Şekil 4.61) incelediğimizde takviye oranının artmasıyla malzemenin sertliğinin arttığı görülmektedir. Bu artışlar %10 değerindedir ve her tür takviye için aynı eğilimin olduğu grafikte açıkça görülmektedir. En yüksek sertlik değerlerine, %30 takviye oranlı numunelerde ulaşılmıştır.

Aşınma testleri sırasında bazı numunelerde bu yük altında aşırı titreşim ve karşı yüzeye sıvanma gözlenmiş, sürtünmenin arttırmasından dolayı deneylerin bazıları tamamlanamamıştır. Bu numuneler 50N normal kuvvet, 900 d/d sürtünme hızı ve 30 dakika süre boyunca aşınmaya tabi tutulmuştur. Deneyler pin-on-disk prensibiyle çalışan deney düzeneğinde kuru sürtünme şartlarında gerçekleştirilmiş olup karşı

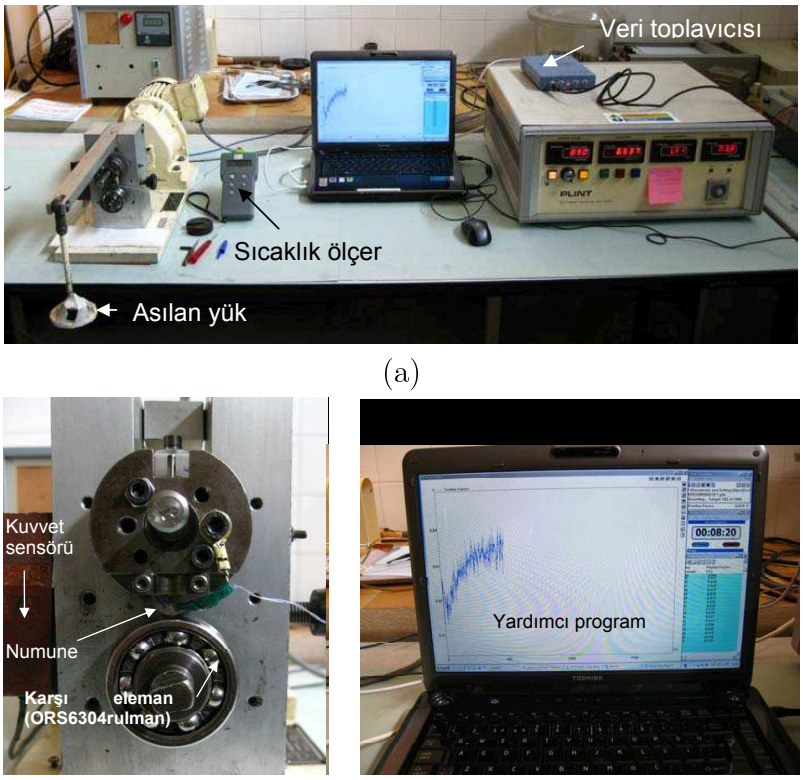


Şekil 4.61. Kompozit malzeme takviye oranı-sertlik (HRT15kg) grafiği.

malzeme olarak 100Cr6 rulman çeliği kullanılmıştır (Şekil 4.62). Deney sırasında malzeme sıcaklığı belirli aralıklarla ölçülmüştür. Numune - karşı eleman temas durumu Şekil 4.62.b'de görülmektedir. Kuvvet sensöründen okunarak elde edilen sürtünme kuvvet (Fs) veri toplayıcı sayesinde bilgisayara aktarılmakta ve yardımcı programlar vasıtasıyla bu değerler kullanılarak hesaplamalar yapılabilmekte ve grafik haline getirilmektedir. Dikkat edileceği gibi aşırı aşınma ve olumsuzluklardan kaçınabilmek için bir önceki deneylere göre yük azaltılmış ancak devir sayısı, dolayısıyla aşınma yolu, arttırılmıştır.

Numuneler aşınma deneyine tabi tutulmadan önce yüzeyleri zımparayla parlatılmış ardından ultrasonik temizleme yöntemiyle kirlerinden arındırılmıştır. Daha sonra hassas teraziyle tartılıp yüzey pürüzlülükleri alınırken, numuneyle temas edecek olan karşı eleman rulmanların aşınma öncesi yüzey pürüzlülükleri aşınma sonrasındaki pürüzlülükle karşılaştırmak maksadıyla ölçülmüştür.

Parlatma sonrasında elde edilen numune yüzeyleri Şekil 4.63'de görülmektedir. Takviye tane boyutunun artması ile partiküller yüzeyde daha net görülebilmektedir. Parlatma sonrasında pürüzlülük değerleri en düşük yüzey, %20 hacim oranında B_4C takviyeli (1-7μm) AA2124 matrisli kompozitte (AA2124/B_4C 1-7μm/20) ve %20 hacim oranında SiC takviyeli (20μm) kompozitte (AA2124/SiC 20μm/20) elde edilmiştir (Şekil 4.64). Diğer kompozit numunelerin ortalama pürüzlülük değerleride birbirine yakın değerlerdedir. Takviyesiz alüminyumda ve SiC'nin büyük tane



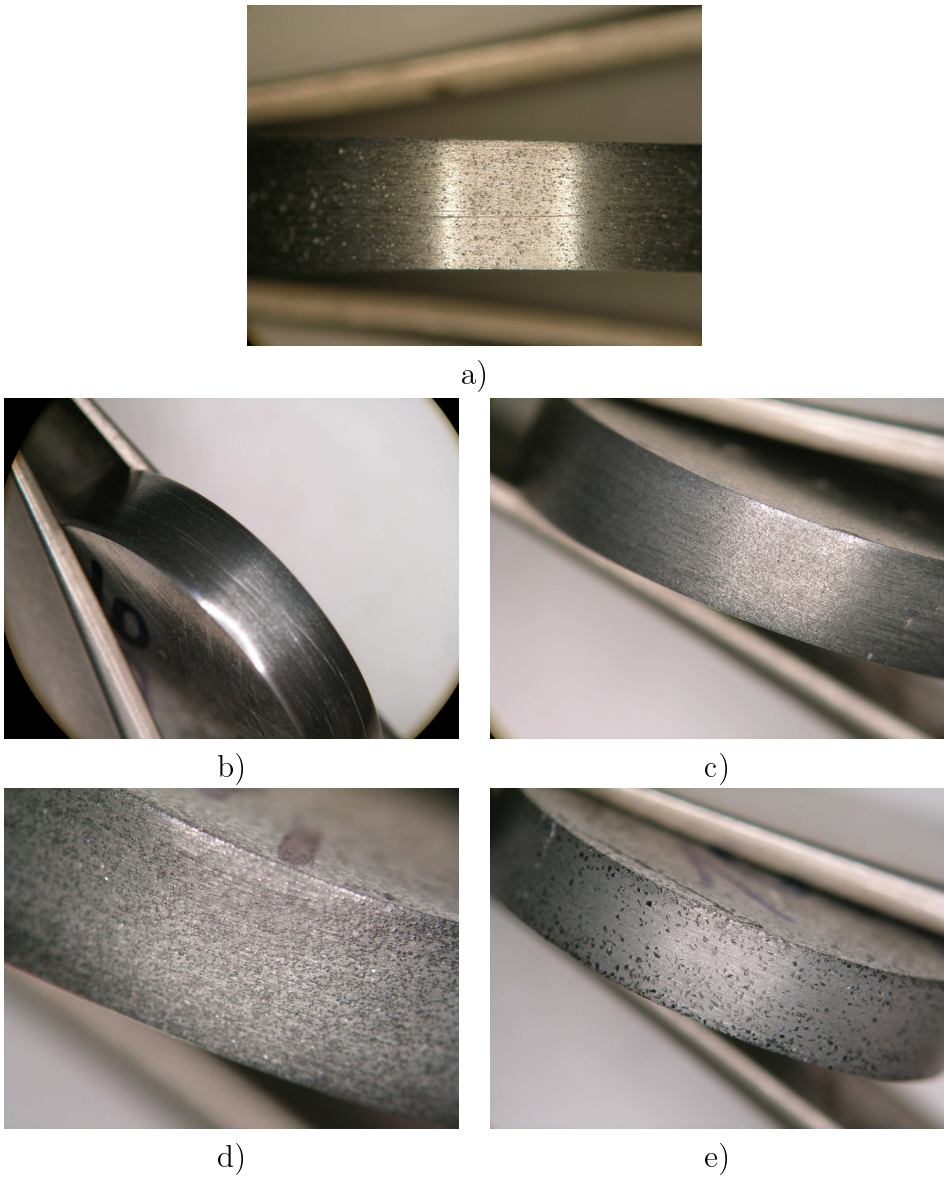
Şekil 4.62. Aşınma test düzeneği.

boyutlarında pürüzlülük değerleri oldukça yüksektir.

Tane boyutu büyüdükçe birim alana düşen tane sayısı dolayısıyla yüzeydeki tane yüzey alanı azalmakta, yumuşak matris yüzey artarken pürüzlülükte artmaktadır. Takviye oranının artmasıyla genelde yüzey pürüzlülükleri azalırken, B_4C takviyeli kompozitlerde tam tersi bir davranış görülmekle birlikte, B_4C takviyeli kompozitlerin pürüzlülükleri diğer kompozitlerin pürüzlülük ortalamalarında çok daha düşüktür.

Gerçek kam malzemesi olan indüksiyonla sertleştirilmiş küresel grafitli dökme demirin (GGG40) aşınma özellikleriyle mukayese edebilmek amacıyla gerçek kam milinden kesilerek çıkarılan dökme demir numuneler de aynı şartlarda aşınmaya tabi tutulmuşlardır. GGG40 kam milleri çalışmaya destek veren ESTAŞ, Sivas firması tarafından temin edilmiştir.

Deneylere öncelikle dökme demir numunelerden başlanılmıştır. Dökme demir kam mili kesilip işlenerek, kompozit numunelerle aynı ebatlarda numuneler çıkartılmıştır,

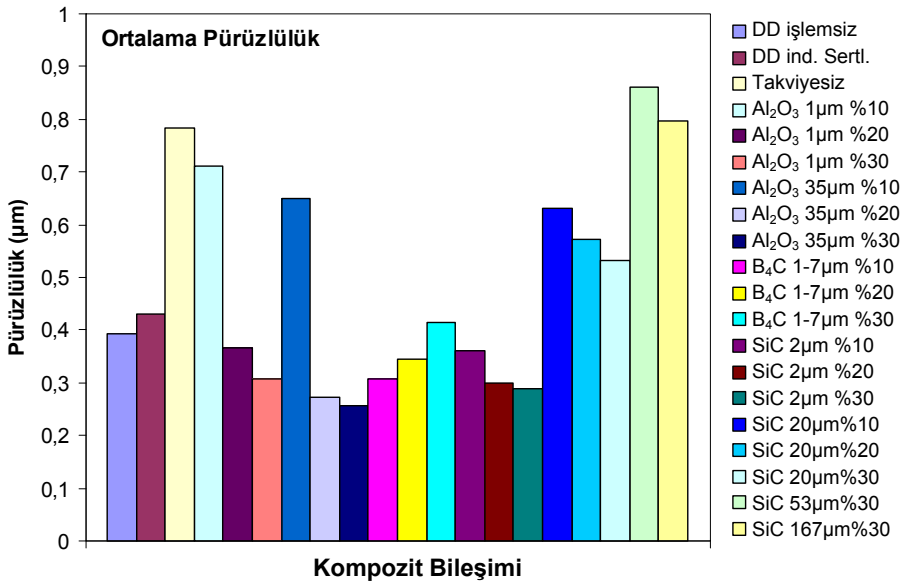


a) b) c) d) e)

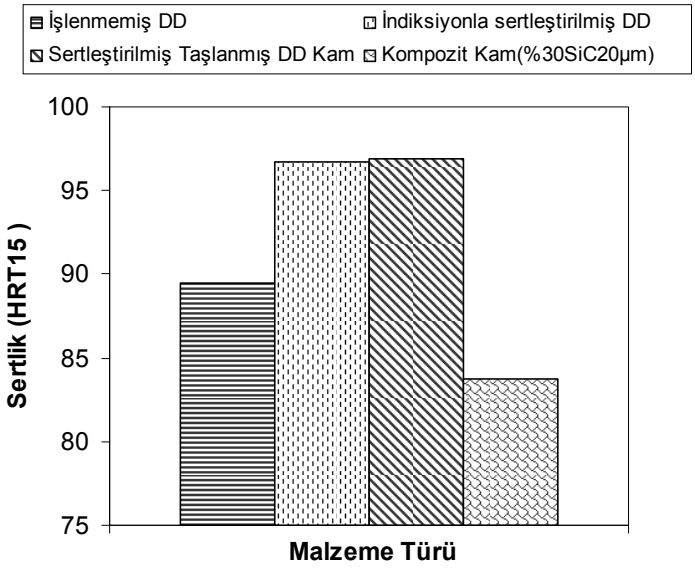
Şekil 4.63. Kompozit numune yüzey görüntüleri a) AA2124/Al_2O_3 20-50μm/10, b) AA2124/B_4C 1-7μm/20, c) AA2124/SiC 20μm/20, d) AA2124/SiC 53μm/30, e) AA2124/SiC 167μm/30.

ayrıca KGDD kam profilleriyle aynı şartlarda indüksiyonla sertleştirmiş dökme demir çubuktan benzer ebatlarda numuneler elde edilmiştir. Şekil 4.65'da görüldüğü gibi işlenmemiş dökme demirin sertlik değeri (HRT15kg) kam profili ve indüksiyonla sertleştirilmiş dökme demirinkinden daha düşüktür. Kam profil yüzey sertliği ile indüksiyonla sertleştirilmiş dökme demir yüzey sertlikleri yaklaşık olarak aynı değerde iken, kompozit malzeme yüzey sertliği dökme demirinkilerden %10 daha düşüktür.

Aşınma sırasında alınan sürtünme kuvveti değerleriyle elde edilen aşınma yolu



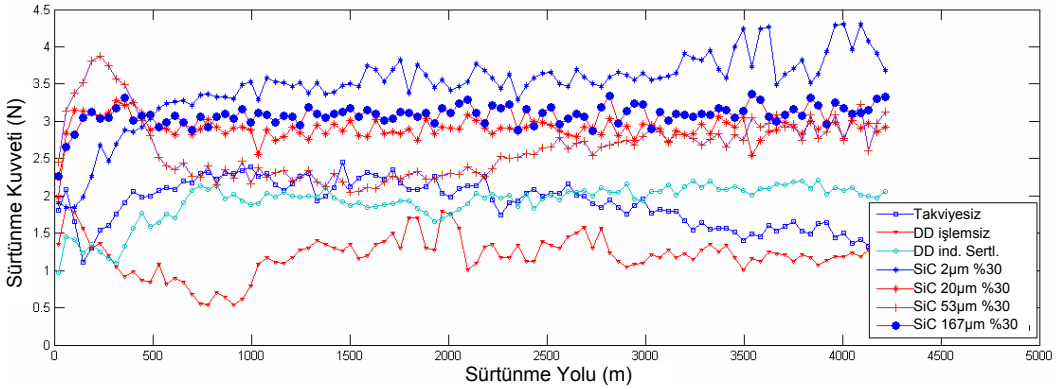
Şekil 4.64. Aşınma testi yapılacak numunelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri.



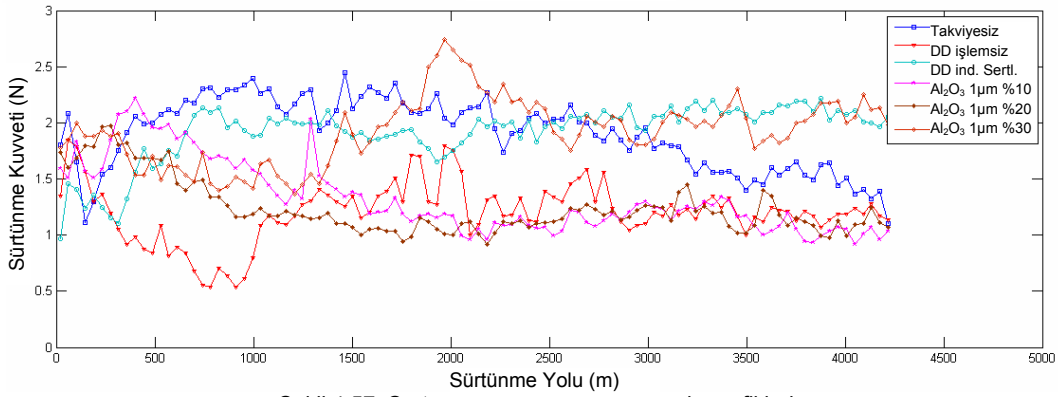
Şekil 4.65. Dökme demir ve kompozit numune yüzey sertlikleri.

grafikleri Şekil 4.66, 4.67, 4.68'deki gibidir. SiC'nin farklı takviye boyutlarındaki sürtünme kuvvetlerinin birbirine yakın değerlerde olduğu görülmektedir (Şekil 4.68.c). Ek olarak indüksiyonla sertleştirilmiş dökme demirin sürtünme kuvveti bu değerlere göre daha düşük olarak ölçülmüştür. Al_2O_3 takviyeli kompozit, aşınma sırasında SiC'de olduğu gibi bir rejim bölgesine sahip olmamış, sürtünme kuvveti sürekli olarak değişim göstermiştir. Bu olay kompozit içerisinden kopan partiküllerin aşınmayı dolayısıyla sürtünme kuvvetini artırmasından

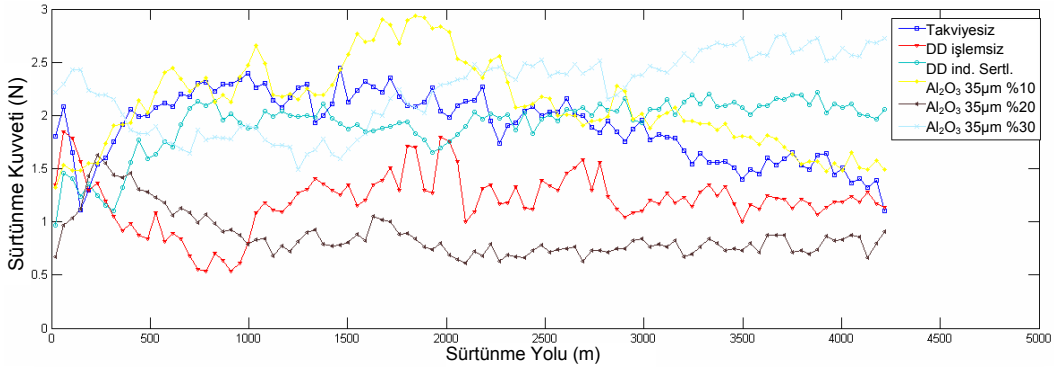
kaynaklanmaktadır. Alümina (1μm) takviyeli kompozit, indüksiyonla serleştirilmiş dökme demirinkine yakın sürtünme kuvveti verirken, 20-50μm'lik alümina takviyeli kompozit bu değerlerin üzerine çıkmaktadır (Şekil 4.66.b, 4.67.b). B_4C takviyeli kompozit numuneler aşınma sırasında rejim bölgesi karakteristik özelliğini göstermektedir. %10 B_4C takviyeli numunenin sürtünme kuvveti daha yüksek çıkarken, %20 ve %30'luk numune indüksiyonla sertleştirilmiş dökme demire yakın özellikler göstermiştir (Şekil 4.67.a).



(a)

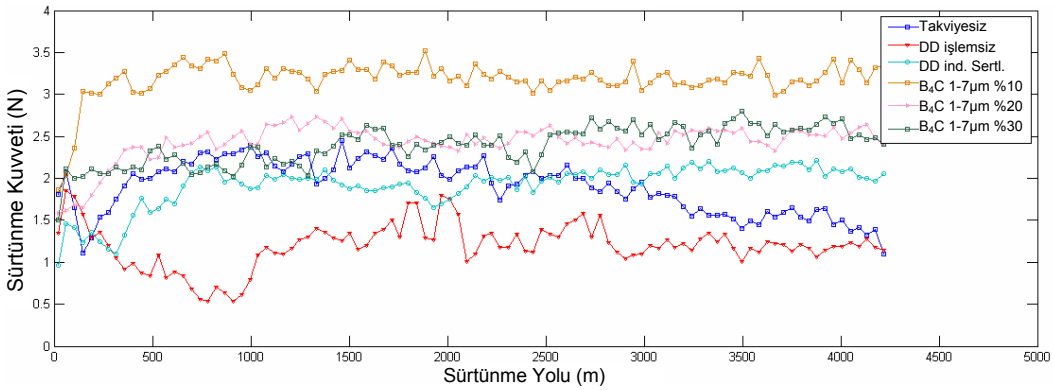


(b)

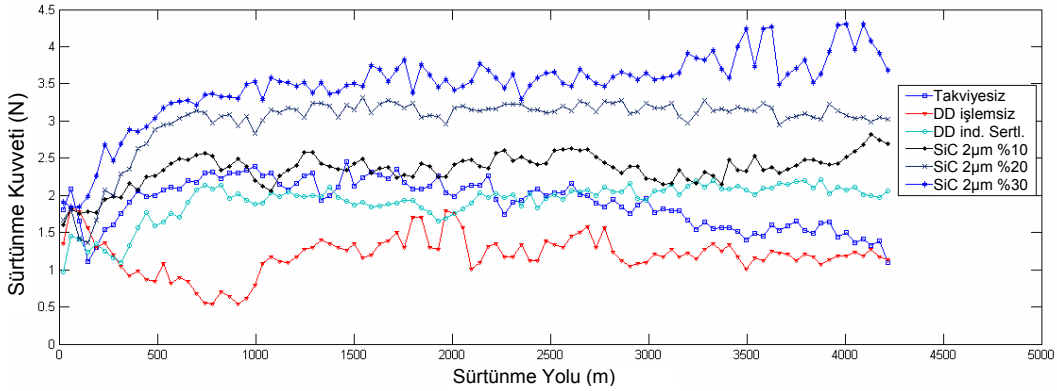


(c)

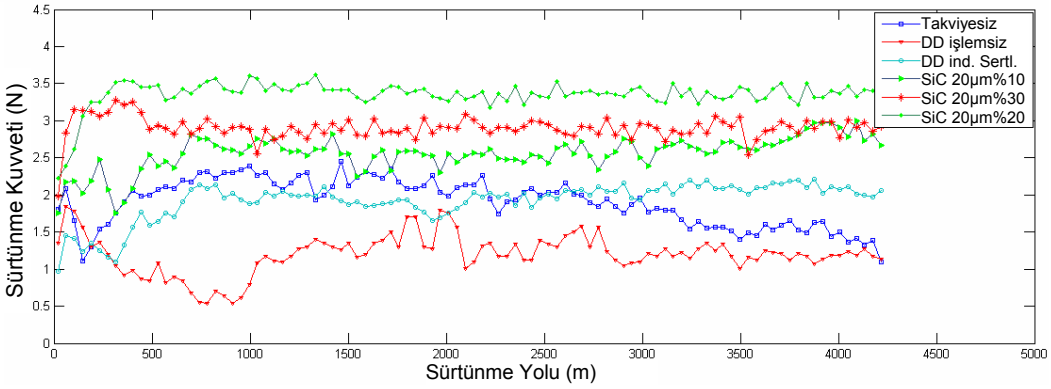
Şekil 4.66. Sürtünme kuvveti - Aşınma yolu grafikleri.



(a)



(b)



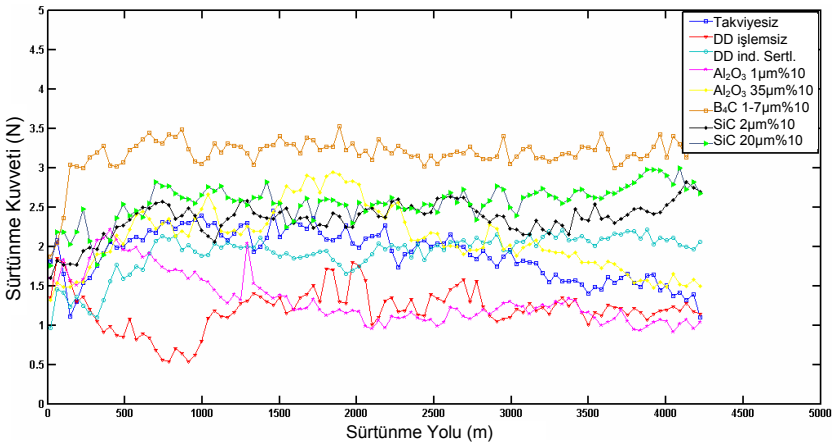
(c)

Şekil 4.67. Sürtünme kuvveti - Aşınma yolu grafikleri.

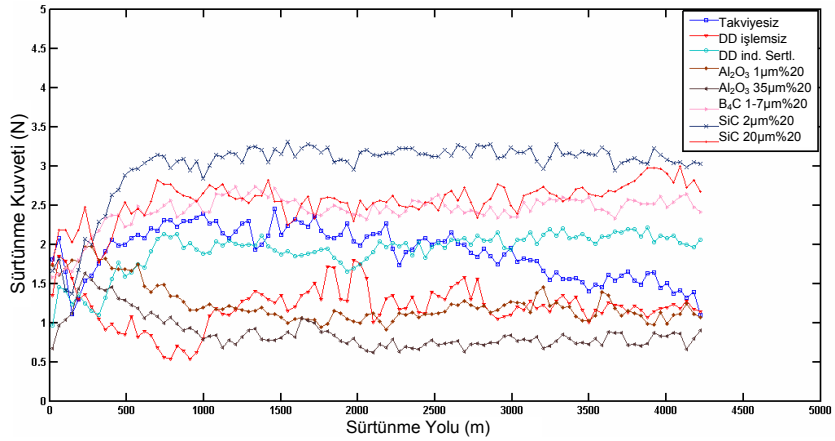
2μm SiC takviyeli numunelerde takviye oranının artmasıyla sürtünme kuvvetinin artmakta olduğu görülmüştür ve bu değerler indüksiyonla sertleştirilmiş dökme demirinkinden yüksektir (Şekil 4.66.a). 20μm SiC takviyeli kompozitte, 2μm'likte olduğu gibi deney başladıktan sonra sürtünme kuvveti ani olarak artmakta, bir süre sonra yüzeylerin karşılıklı sürtünerek alışmasıyla rejime girmektedir (Şekil 4.67.b). Kompozitlerin, sürtünme kuvveti-sürtünme yolu grafiklerini takviye oranlarına göre değerlendirdiğimiz zaman %10 takviyelilerde B_4C takviyeli olan kompozitin

ortalama sürtünme kuvvetinin en yüksek olduğu, sırasıyla 20μm SiC, 2μm SiC, ve indüksiyonla sertleştirilmiş dökme demirde azalarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 4.67.c). Ek olarak Al_2O_3 takviyeli kompozitlerde daha düşük sürtünme değerlerine rastlanmıştır. Takviye oranının artmasıyla birlikte yüksek sürtünme kuvveti değerleri SiC takviyeli kompozitlerde görülmektedir (Şekil 4.68.a,b). İşlemsiz dökme demirin aşınma miktarları daha çok olmakla birlikte sürtünme kuvvetleri kompozit numunelere göre daha düşük çıkmaktadır. Dökme demir ile karşı disk yüzeyleri direkt olarak temas ederken (metal-metal teması), kompozit numunelerde yüzeyde bulunan takviye partikülleri karşı eleman yüzeyine temas etmekte dolayısıyla sürtünmeyle oluşan kuvveti de arttırmaktadır (partikül-metal teması).

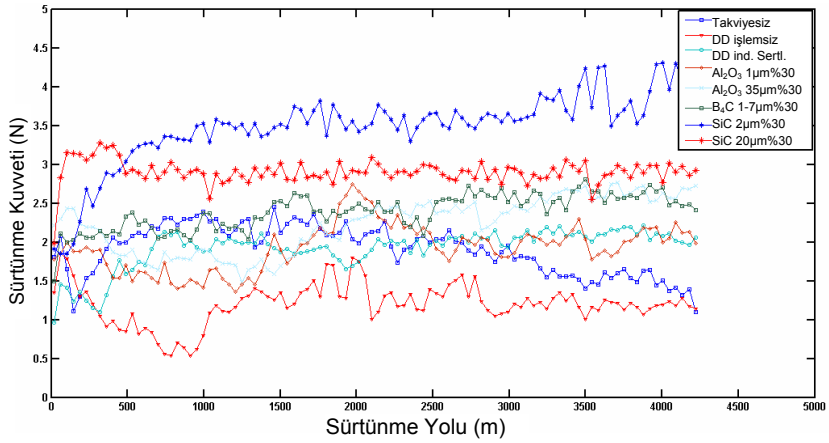
Aşınma deneyleri sonrasında malzemeler tartılarak ağırlık kaybı ölçülmüştür. Daha sonra bulunan ağırlık kayıpları malzemenin gerçek yoğunluğuna bölünerek kayıp malzemenin hacmi bulunup, yük ve aşınma yoluna bölünerek özgül aşınma miktarı ($mm^3/(N.m)$) elde edilmiştir. Şekil 4.69'de imal edilen tüm kompozit numuneler ve dökme demir için hesaplanmış olan özgül aşınma miktarları görülmektedir. Alümina takviyeli kompozitin her iki takviye boyutunda da takviye hacim oranının artırılmasıyla özgül aşınma miktarı dolayısıyla aşınma artmaktadır. Bu değerler takviyesiz AA2124 numunenin ve indüksiyonla sertleştirilmiş dökme demir metalin aşınma değerlerinden daha yüksektir. Takviyeyle birlikte malzemenin aşınma davranışının iyileşmesi ve aşınmanın azalması beklenirken, alümina takviyeli kompozitlerde bu yaklaşımın görülememesi takviye ile matris arasındaki ara yüzey bağının yeterince kuvvetli olamaması ve takviyelerin kendi aralarında toplanarak aralarına matris malzemesi girmesine engel olmasından dolayıdır. Bor karbür ve silisyum karbür takviyeli kompozit numunelerde takviyesiz numuneye göre özgül aşınma miktarları daha düşük olmuştur. Bor karbür tüm hacim oranlarında indüksiyonla sertleştirilmiş dökme demirden daha iyi özgül aşınma miktarına sahipken silisyum karbür takviyeli kompozitler %20 ve %30 takviye oranlarında indüksiyonla sertleştirilmiş dökme demirden daha iyi özgül aşınma davranışı göstermektedir. Hacim oranı %30 takviyeli olan numuneleri dikkate aldığımız zaman en iyi davranışı 20μm boyutunda SiC takviyeli kompozit gösterirken SiC



(a)



(b)

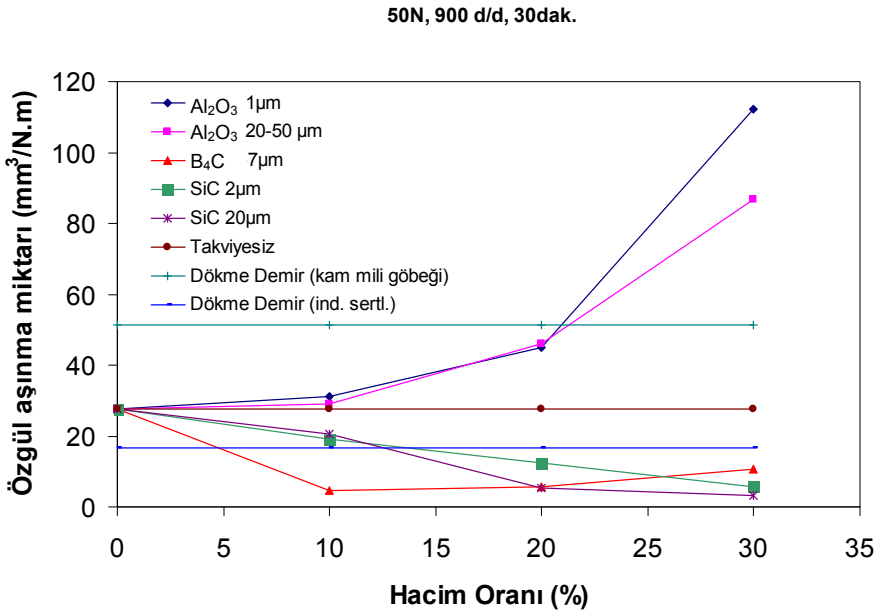


(c)

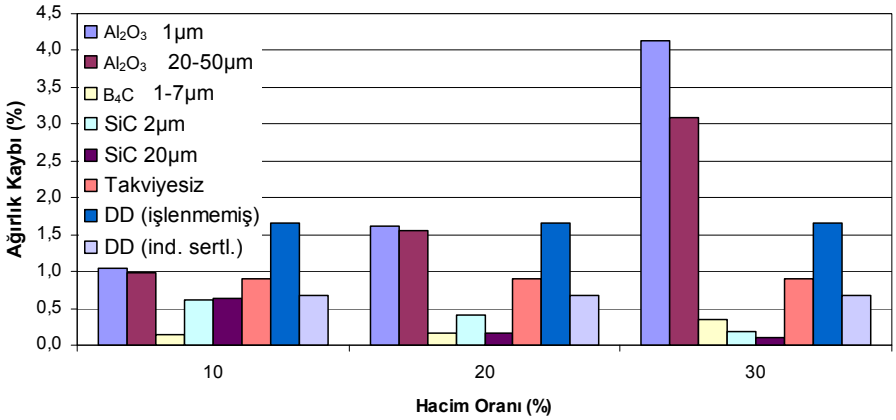
Şekil 4.68. Sürtünme kuvveti - Aşınma yolu grafikleri.

2μm takviyeli kompozit ile 1-7μm takviyeli bor karbür bunu takip etmektedir. Takviye oranı %20' olan SiC 20μm, B_4C 1-7μm ve SiC 2μm takviyeli kompozitler daha iyi davranış sergilerken, %10 hacim oranında en iyi davranış bor karbür takviyeli kompozit tarafından gösterilmektedir. İlave olarak AA2124/Al_2O_3 2 ve

20-50μm takviyeli kompozitte takviye oranı arttıkça yüzde ağırlık kaybı da artmıştır (Şekil 4.70). Yüzde ağırlık kaybı açısından %10 hacim oranında B_4C, %20 ve %30'da B_4C, SiC 2μm, SiC 20μm takviyeli kompozitlerin daha dirençli olduğu görülmüştür.



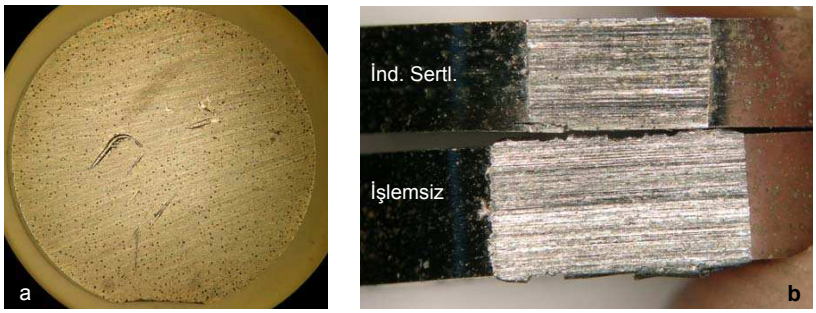
Şekil 4.69. Özgül aşınmanın takviye hacim oranıyla değişimi.



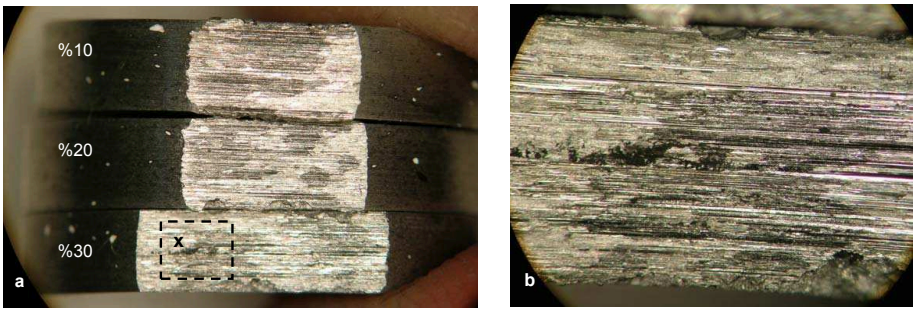
Şekil 4.70. Aşınma deneyi sonrasında malzemelerdeki % ağırlık kaybı.

Otomobil kamlarında kullanılan sertleştirilmiş dökme demirin aşınma performansının incelenmesi ve otomobil kamlarında kullanılmak üzere imal edilen kompozit numunelerle karşılaştırılması oldukça önemlidir. Bu sebeple işlem görmemiş ve indüksiyonla sertleştirilmiş dökme demir numuneler aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Sertlik değeri işlem görmemiş dökme demire göre yüksek ve orijinal dökme demir kam profili sertliğine eşit olan indüksiyonla sertleştirilmiş

dökme demir daha iyi aşınma performansı göstermiştir. Teste tabi tutulan dökme demir genel görüntüsü Şekil 4.71.a'daki gibidir. Dökme demirlerin yüzeylerinde oluşan aşınma izleri incelendiğinde indüksiyonla sertleştirilmiş dökme demirin daha küçük aşınma izi yüzey alanına sahip olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 4.71.b). Aşınmış yüzey kenarlarında daha az sıvanma ve genişleme olmuştur. Bu dar aşınma yüzeyleri, özgül aşınma miktarındaki azlığında göstergesidir.



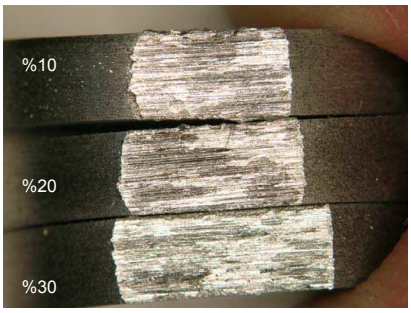
Şekil 4.71. Dökme demir numunesinin a) genel görünüş, b) aşınma yüzeyleri.



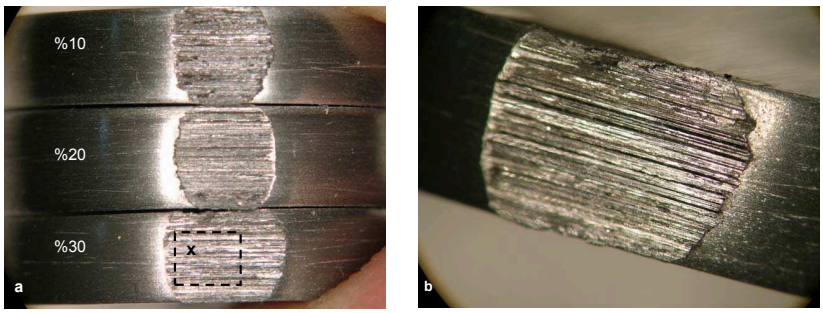
Şekil 4.72. AA2124/Al_2O_3 2μm takviyeli kompozitin a) aşınma bölgeleri, b) x detayı.

Kompozit numuneler kendi aralarında takviye oranına, tane boyutunda farklı tip takviyeler aynı hacim oranlarında ve dökme demirlerle karşılaştırılmaktadır. Örneğin 2μm tane boyutundaki Al_2O_3 takviyeli kompozitlerin test sonrasındaki aşınma bölgeleri Şekil 4.72'de görülmektedir. Takviye oranı arttıkça aşınma miktarı da artmaktadır. Bu sebeple aşınma bölgesi %30 takviyelide en büyük alana sahiptir. Aynı belirgin artış Al_2O_3'ün 20-50μm'lik boyutlardaki takviyeli kompozitler içinde geçerlidir (Şekil 4.73). Bunun sebebi olarak matris takviye arasındaki tutunmanın yeterli derecede olamaması gösterilebilir. Buna ek olarak alümina partikülleri kendi arasında topaklanma-yapışma eğilimi göstermektedir. Topaklanan partiküller arasına matris malzemesi yeterince girememekte ve kendi aralarındaki bağ ise zayıf

kalmaktadır. Sürtünme sırasında bu partiküller daha kolay yüzeyden kopmakta, koparken temas eden yüzeyler arasında ekstra aşındırıcı olarak işlev görmektedir. Aşınma bölgesi yüzey yapısı incelendiğinde, derin çizikler, yüzey sıvanma bölgeleri, köşe kısımlarda yapraklaşma ve kopmalar görülmektedir (Şekil 4.72.b).

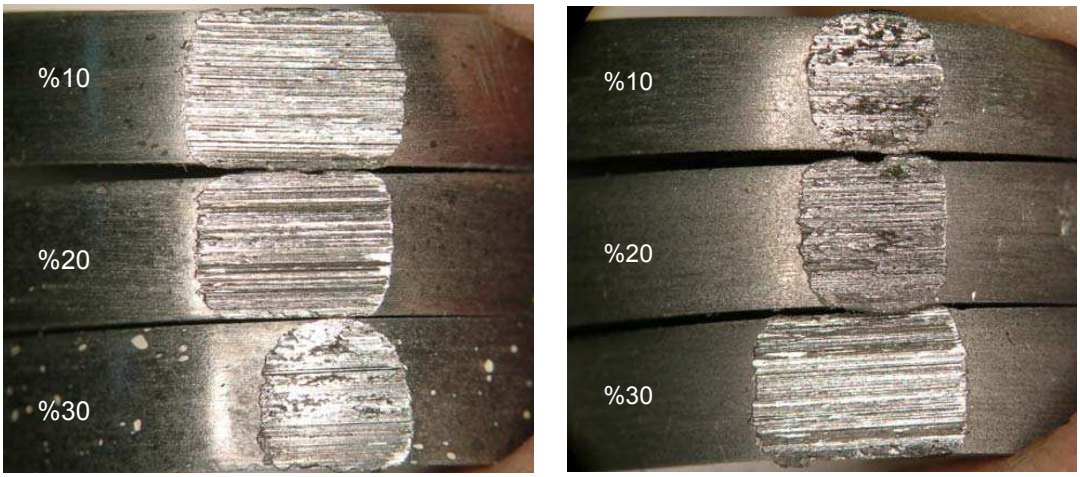


Şekil 4.73. AA2124/Al_2O_3 20μm ve farklı oranlarda takviyeli kompozitlerin aşınma sonrası yüzeyleri.



Şekil 4.74. a) AA2124/B_4C 1-7μm ve farklı oranlarda takviyeli kompozitlerin aşınma sonrası yüzeyleri, b) x bölgesi detayı.

Bor karbür takviyeli kompozit numunelerin aşınma sonrasında incelenmesiyle aşınma miktarlarının (Şekil 4.69) ve aşınma bölgesi yüzey alanlarının birbirine yakın değerlerde olduğu görülür (Şekil 4.74). Bor karbür takviyeli kompozit aşınma yüzeylerinde sıvanmadan ziyade derin çizikler oluşmuştur. SiC takviyeli kompozitte takviye oranı arttıkça aşınma yüzeyi küçülmüştür (Şekil 4.75.a). 20μm SiC kompozitte aşınma yüzeylerinde takviye oranıyla artış olduğu görülmektedir (Şekil 4.75.b). Ancak görsel olarak ifade edilebilen bu artışın özgül aşınma miktarındaki değişime paralel olduğu görülmektedir (Şekil 4.69). Aşındırılan kompozitlerden %30 takviye oranlarına sahip olanların aşınma sonrası yüzeyleri Şekil 4.76'da karşılaştırmak amacıyla topluca verilmiştir. Bu numuneler arasında en çok aşınma Al_2O_3 takviyeli olanda meydana gelirken, en az aşınan numuneler ise 2 ve 20μm SiC takviyeli kompozitler olmuştur. Bu kompozitin aşınma

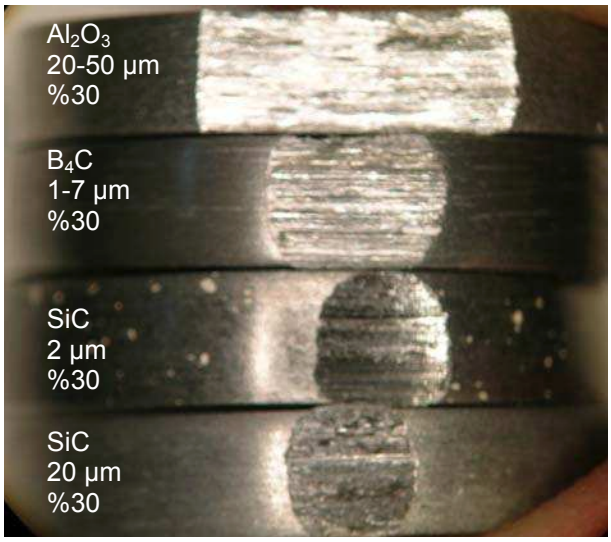


(a) (b)

Şekil 4.75. AA2124 farklı oranda SiC takviyeli kompozitlerin aşınan yüzeyleri a) SiC 2μm b) SiC 20μm.

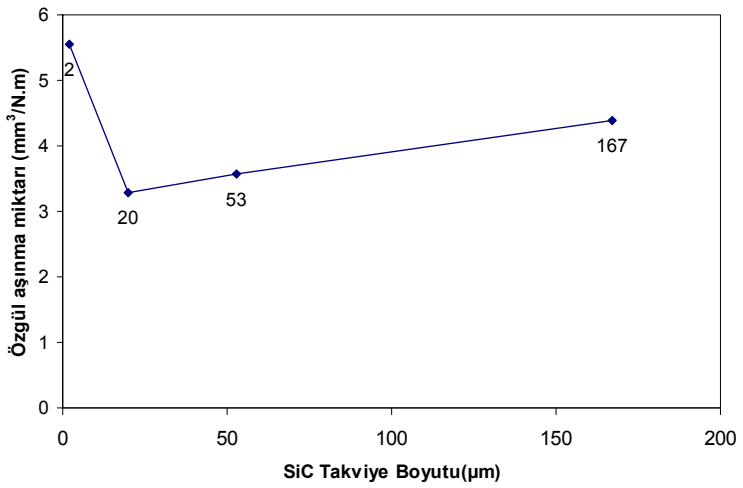
yüzeyi ile sertleştirilmiş dökme demirin aşınma sonrasındaki yüzeyi Şekil 4.77'de görülmektedir. 20μm ve %30 SiC takviyeli kompozitin özgül aşınma miktarının dökme demirinkinden daha düşük olmasıyla birlikte aşınma bölgesi yüzey alanı da oldukça dardır.

Takviye boyutunun aşınma davranışına olan etkisi farklı boyutlarda (2, 20, 53, 167μm) ve hacim %30 oranında SiC takviyeli numunelerde incelenmiştir. Aşınma sonrasında yapılan ölçüm ve hesaplamalarla elde edilen tane boyutu -



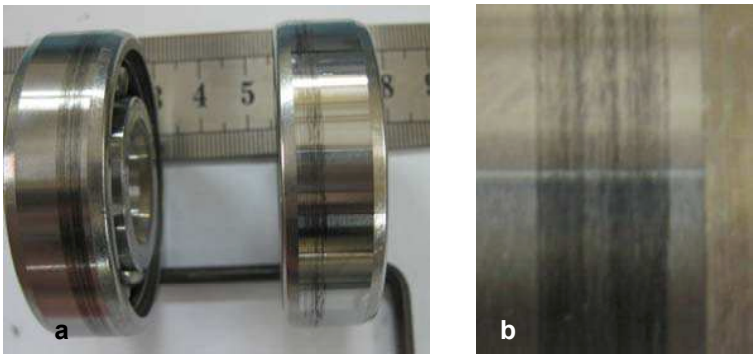
Şekil 4.76. %30 ve farklı boyutlarda partikül takviyeli kompozitlerin aşınma yüzeyleri.

Şekil 4.77. AA2124/SiC 20μm/30 ve İndüksiyonla Sertleştirilmiş Dökme Demirin aynı şartlarda aşınma bölgeleri.



Şekil 4.78. Tane boyutunun özgül aşınma miktarına etkisi.

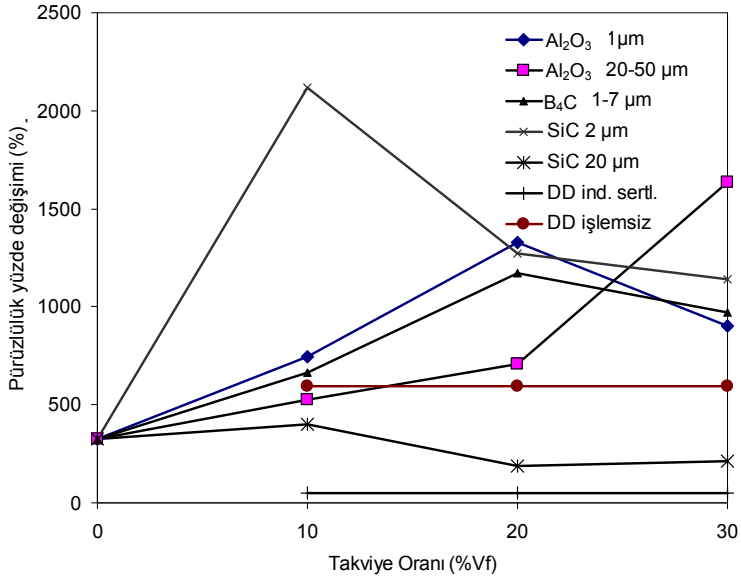
özgül aşınma miktarı grafiği Şekil 4.78'de verilmiştir. Buna göre 2μm'lik tane boyutunda özgül aşınma miktarı 5,5 mm^3/N.m olarak ölçülmüştür. Tane boyutunun 20μm olması durumunda bu değer 3,2 mm^3/N.m'ye düşmektedir. Takviye boyutunun artmasıyla bu değerlerde artmaktadır. Matris malzemesinin boyutlarının ortalama 25μm olduğu düşünülürse, takviye partikülleri küçük boyuttan matris boyutuma yaklaşırken özgül aşınma miktarı azalmakta, yine matris boyutundan uzaklaştıkça özgül aşınma miktarı artmaktadır. Buradan yola çıkarak SiC için, matris tane boyutlarındaki takviyelerin kompozitin aşınma direncini iyileştirdiği söylenebilmektedir.



Şekil 4.79. Aşındırıcı karşı eleman (ORS® 6304) aşınmış yüzeyleri.

Aşınan numunelerin yüzey özellikleri kadar aşındırıcı karşı elemanın yüzey ve aşınma özellikleride önem taşımaktadır. Deney öncesi ve sonrası karşı eleman yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Karşılıklı temas esnasında kompozit içerisinde bulunan sert seramik taneleri aşındırıcı rulman yüzeyini çizmekte ve yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır (Şekil 4.79).

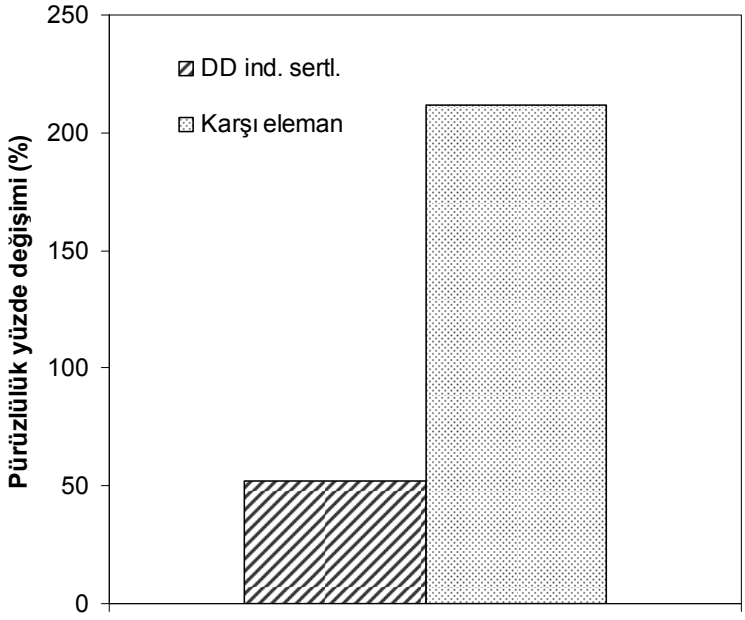
Aşınma sonrasında ve aşınma öncesinde numune yüzeylerinden farklı noktalardan yapılan pürüzlülük ölçümleri ortalamasında elde edilen değerler arasındaki yüzde (%) değişimler Şekil 4.80'de görülmektedir. İndüksiyonla sertleştirilmiş dökme demirin aşınma öncesi ve sonrası pürüzlülük farkı en iyi sonuç olarak göze çarpmaktadır. Buna sebep olarak karşı elemana yapışmanın meydana gelmemesi



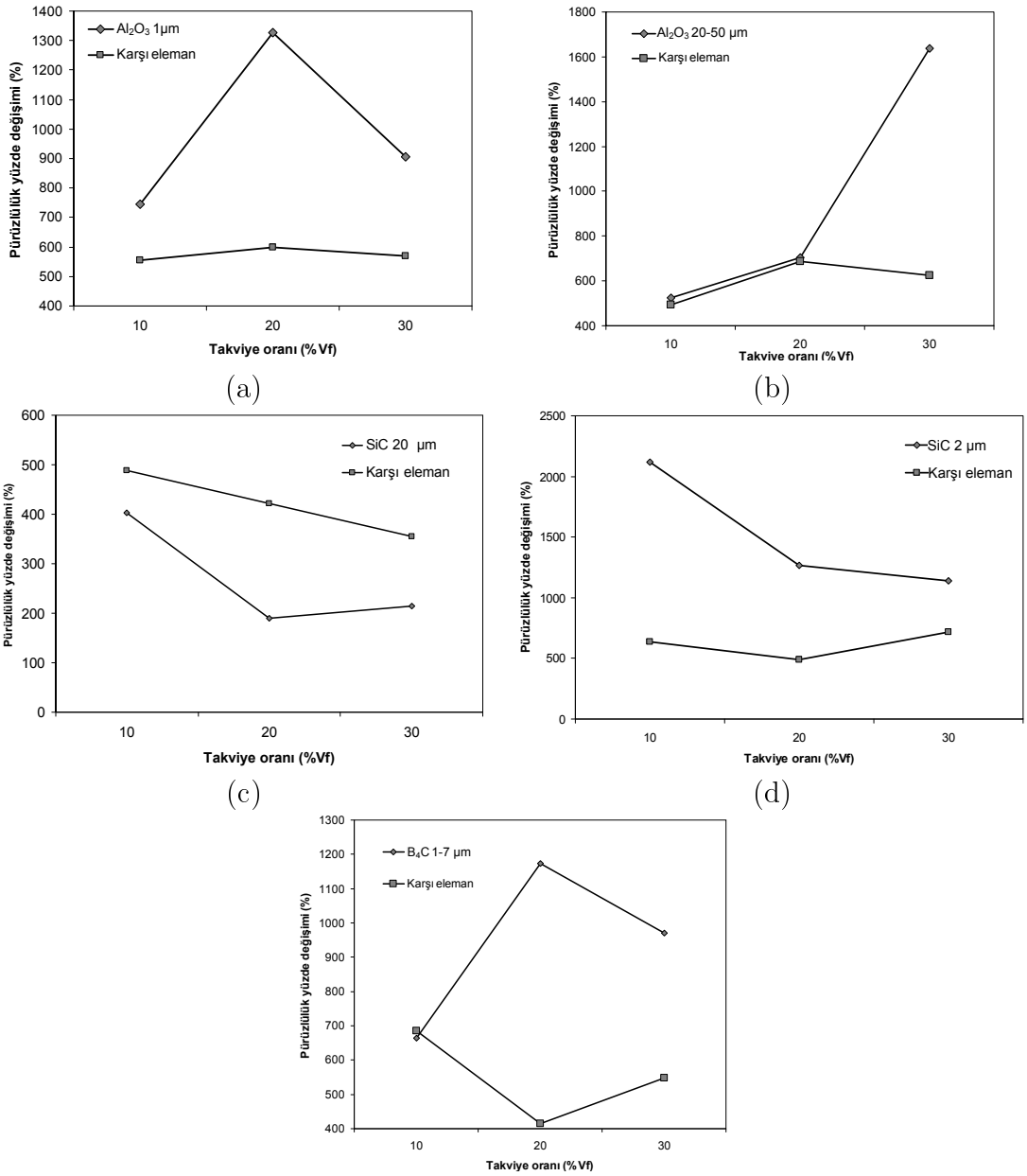
Şekil 4.80. Kompozit numunelerin aşınma sonrasındaki pürüzlülük değişimleri.

ve içerisinde seramik gibi sert ve aşındırıcı partiküllerin olmaması gösterilebilir. Kompozitler arasında en düşük pürüzlülük farkı 20μm takviyeli kompozitlerde ölçülürken, Alümina ve Bor karbür takviyeli kompozitlerde %20 hacim oranına kadar artış görülürken, %30 oranlarında düşüşler meydana gelmektedir. Buda takviye oranının artmasıyla yüzeydeki partiküllerin karşı elemana temas oranını artırmakta ve metal/metal teması azalmaktadır. Yani aşınma modu adhesivden abrasive değişmektedir.

Kompozit malzemelerin aşınma davranışları kadar karşı yüzeye verdikleri aşınma hasarıda önemlidir. Bu sebeple her numunenin ve temas edip aşındırdığı karşı elemanın aşınma öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Son pürüzlülük (Ra_2) ve ilk pürüzlülüğün (Ra_1) arasındaki fark, ilk pürüzlülüğe bölünüp 100 ile çarpılınca malzemeye pürüzlülük değişimi (%Ra=((Ra_2-Ra_1)/Ra_1)*100)) hesaplanmış olur. Numunelere ait olan pürüzlülük değişim grafikleri Şekil 4.81 ve Şekil 4.82'te verilmiştir. Detaylı incelediğimizde indüksiyonla sertleştirilmiş dökme demirin pürüzlülük yüzde değişiminin karşı elemanınkinden daha düşük olduğu görülmektedir (Şekil 4.81). Dökme demir aşınmış olsa da karşı yüzeye de hasar vermiş olduğu aşikârdır. Ancak buna ek olarak karşı malzeme pürüzlülük değişimi diğer kompozit karşı elemanlarınınkinden daha düşük olmuştur (Şekil 4.82.a-e).



Şekil 4.81. İnd. Sertleştirilmiş dökme demir ve karşı eleman pürüzlülük değişimi.



Şekil 4.82. Aşınma çiftlerinin takviye oranına bağlı pürüzlülük değişimleri.

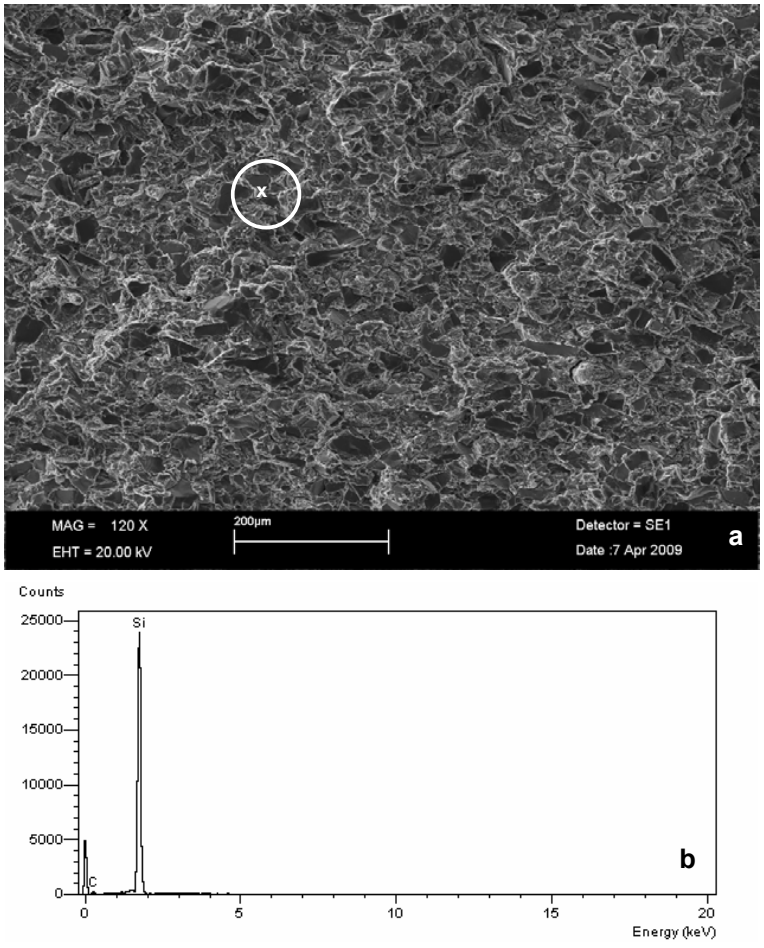
Genel olarak incelendiğinde Al_2O_3 takviyeli kompozit numunelerde pürüzlülük değişimi takviye oranının artmasıyla artmakta iken SiC takviyeli kompozit numunelerde azalmaktadır (Şekil 4.82.a-d).

SiC 2μm'lik takviyeli kompozitte takviye oranıyla pürüzlülük azalması görülmesine rağmen değerleri oldukça yüksektir. Bor karbür takviyeli kompozitte de pürüzlülük artışı söz konusudur (Şekil 4.82.e). Grafiklerden yola çıkarak pürüzlülük değişimi açısından en iyi değerler AA2124/SiC 20μm'lik kompozitlerin farklı

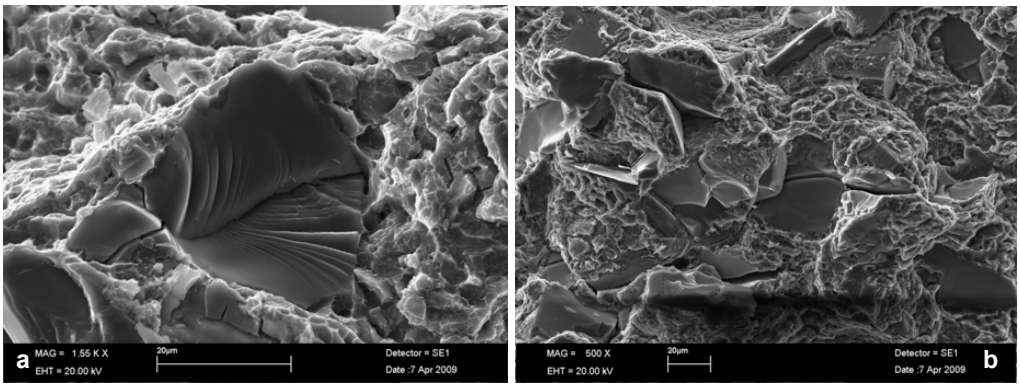
takviye oranlarında elde edilmiştir. Karşı eleman açısından incelendiğinde genel yapının pürüzlülük azalması eğiliminde yada yakın değerlerde olduğu görülmektedir (Şekil 4.82.a-e).

Aşınma bölgelerinde malzeme iç yapıları taramalı elektron mikroskobuyla incelenmiştir. AA2124/SiC 20μm/30 kompozitinin iç yapısı Şekil 4.83.a'da görülmektedir. Takviye dağılımının yoğun ve homojen olduğu açıktır. Yapı içerisindeki SiC varlığı malzeme içerisindeki x noktasıyla gösterilen partikül üzerinden alınan analizle doğrulanmıştır (Şekil 4.83.b). Takviye elemanları imalat sırasında uygulanan yüksek basınç etkisiyle farklı yer ve şekillerde kırılarak hasara uğramaktadır (Şekil 4.84.a,b).

Alümina takviyeli kompozit iç yapısında alümina tanecikleri etrafında bakırca zengin bölgelere rastlanmıştır. Tane sınırları etrafında oluşan bu bakır yoğunlaşması



Şekil 4.83. a) AA2124/SiC 20μm/30 iç yapısı b) x noktası analizi.

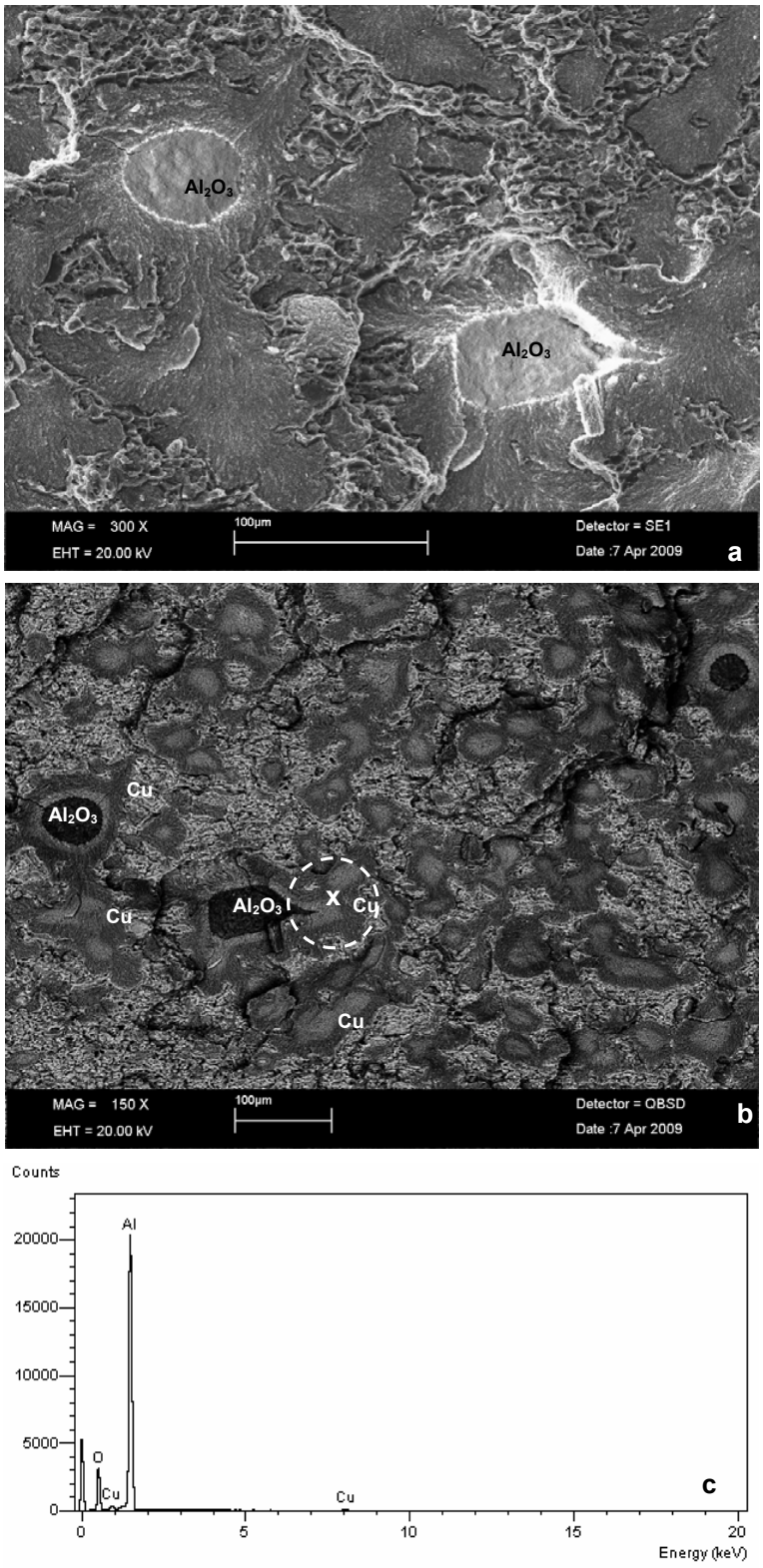


Şekil 4.84. AA2124/SiC 53μm/30 içerisindeki kırılmış partiküller.

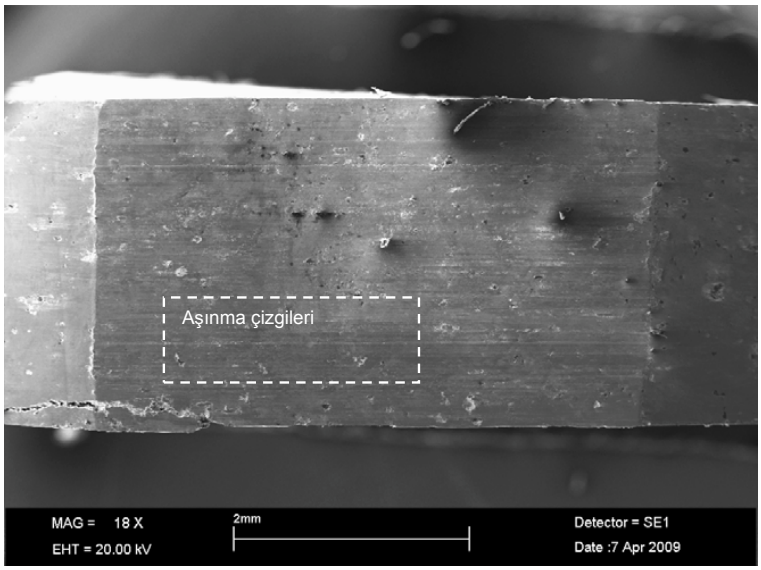
matris-takviye etkileşimini engellemiş olabileceğinden bu kompozitlerin aşınma miktarları yüksek seviyelerde olmuştur. İçyapıda bulunan Al_2O_3 partikülleri Şekil 4.85.a-b de görülmektedir. Şekil 4.85.a'da beyaz olarak karşımıza çıkan partiküller, bakır birikmelerini görmek için aldığımız diğer görüntüde siyah olmaktadır (Şekil 4.85.b). Bu resimdeki tane sınırlarında ve içyapıda görülen gri birikinti bölgeleri bakırca zengin bölgelerdir. Tane sınırı ve gri bölgelerden alınan analizlerden de anlaşılacağı üzere bu bölgeler alümina ve bakır ihtiva etmektedir (Şekil 4.85.c).

Kompozit numunelerin bazılarına ve indüksiyonla sertleştirilmiş dökme demire ait olan genel aşınma yüzey durumları Şekil 4.86, 4.87, 4.88 ve Şekil 4.89'de görülmektedir. Aşınma sonrasında dökme demir numune yüzeyinde ince çizikler meydana gelmiştir. Kenar bölgelerde aşırı sıvanma, şişme ve yırtılmalara rastlanmamıştır (Şekil 4.87, 4.88). SiC takviye oranının artmasıyla aşınma miktarıda azalmaktadır (Şekil 4.89.a-d). Aşınan kompozit yüzeylerin yan bölgelerinde genişleme ve şişme bölgelerine rastlanmıştır (Şekil 4.89). Takviye oranının artmasıyla daralan aşınma bölgesinde sıvanmalar yoğunlaşmakta, takviye oranının az olduğu numunelerdeki uzun aşınma çizgilerinin yerini yüzey yırtılmaları almaktadır. Aşınma öncesi ve sonrasında numune aşınma yüzeyindeki pürüzlülük profilleri ve ölçüm doğrultuları şekiller üzerinde görülmektedir.

Yüzeylerde oluşan sıvanmalar, kayma izleri, kazınmış bölgeler aşınma modunun adheziv ve abraziv aşınma mekanizmaları karışımı olduğunu göstermektedir. Takviyesiz ve takviyeli kompozit numunelerde benzer sıvanma ve plastik



Şekil 4.85. AA2124/Al_2O_3 20-50μm/30 a) iç yapı b) bakır bölgeleri c) x bölgesi analiz.

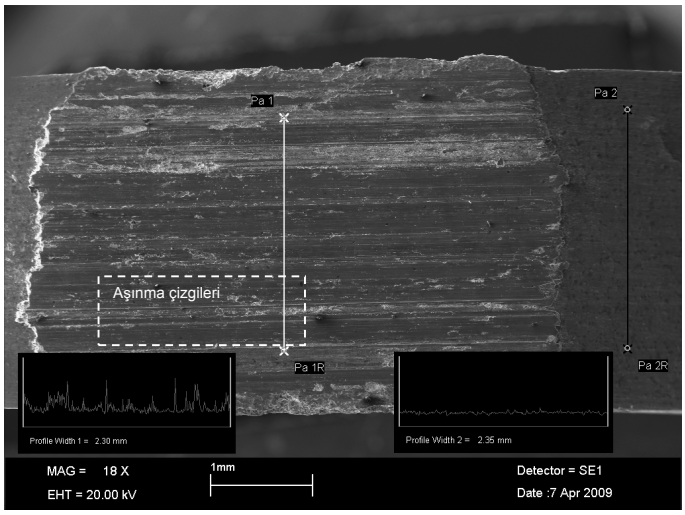


Şekil 4.86. İndüksiyonla Sertleştirilmiş Dökme Demir aşınma bölgesi.

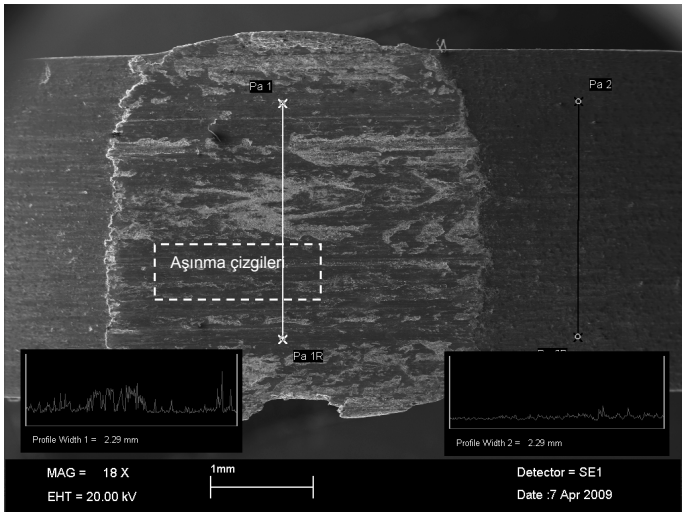
deformasyonlu yüzey yapısına rastlanmıştır (Şekil 4.89.a,b). Aşınma sırasında karşılıklı temas eden yüzeylerde sürtünme yönünde aşınma yüzeyi kenar bölgelerinde yığılmalar olmaktadır (Şekil 4.89.c).

Bu yığılma ve yüzey deformasyonları sürtünme kuvveti etkisiyle kayma yönünde plastik akmayla oluşan matris malzemesi ve çeşitli partiküllerden oluşmaktadır. Yüzeydeki plastik akmalar Şekil 4.89.b-d'de daha yakından görülmektedir. Bu plastik akmalar delaminasyona sebep olmakta (plastik akma ile üst üste sıvanma) ve takiben sürtünme ile aşınma oluşmaktadır. Aşınma yüzeyindeki izler ise takviye partiküllerinin yüzeyi çizmesi ile oluşan abrasyon oluklarıdır. Bu durum aşınma mekanizmasının adhesiv, abrasiv ve plastik akma (delaminasyon) karışımı olduğunu göstermektedir.

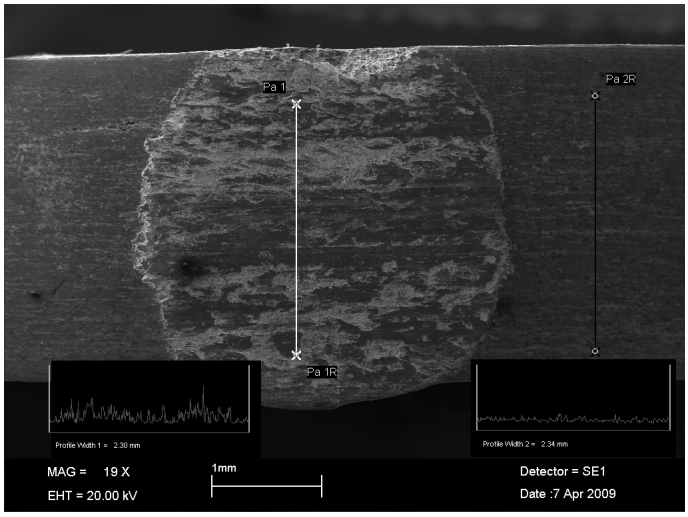
Aşınma bölgesi yüzeylerinin incelenmesi sırasında sıvanmış bölge sınırlarında tane birikintilerine rastlanmıştır. Şekil 4.90.a'da x bölgesi olarak verilen bu bölge detayına bakıldığında çok miktarda partikülün bir arada yapışık durumda olduğu görülmektedir (Şekil 4.90.b). Bu partikül tanelerinin analizleri yapılarak demir (Fe) ve krom (Cr) tanelerinden bir araya geldikleri tespit edilmiştir (Şekil 4.90.c). Kompozit içerisinde ve bileşiminde bulunmayan bu metaller aşındırıcı olarak kullanılan rulman yüzeyinden kopmuş ve numune yüzeyinde birikmiştir. Buda numune yüzeyiyle birlikte karşı eleman yüzeyinin de aşındığını göstermektedir.



(a)

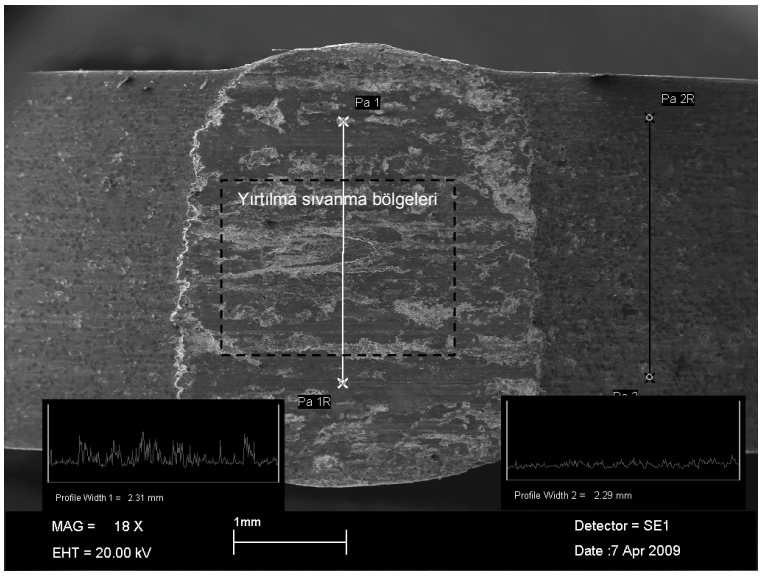


(b)

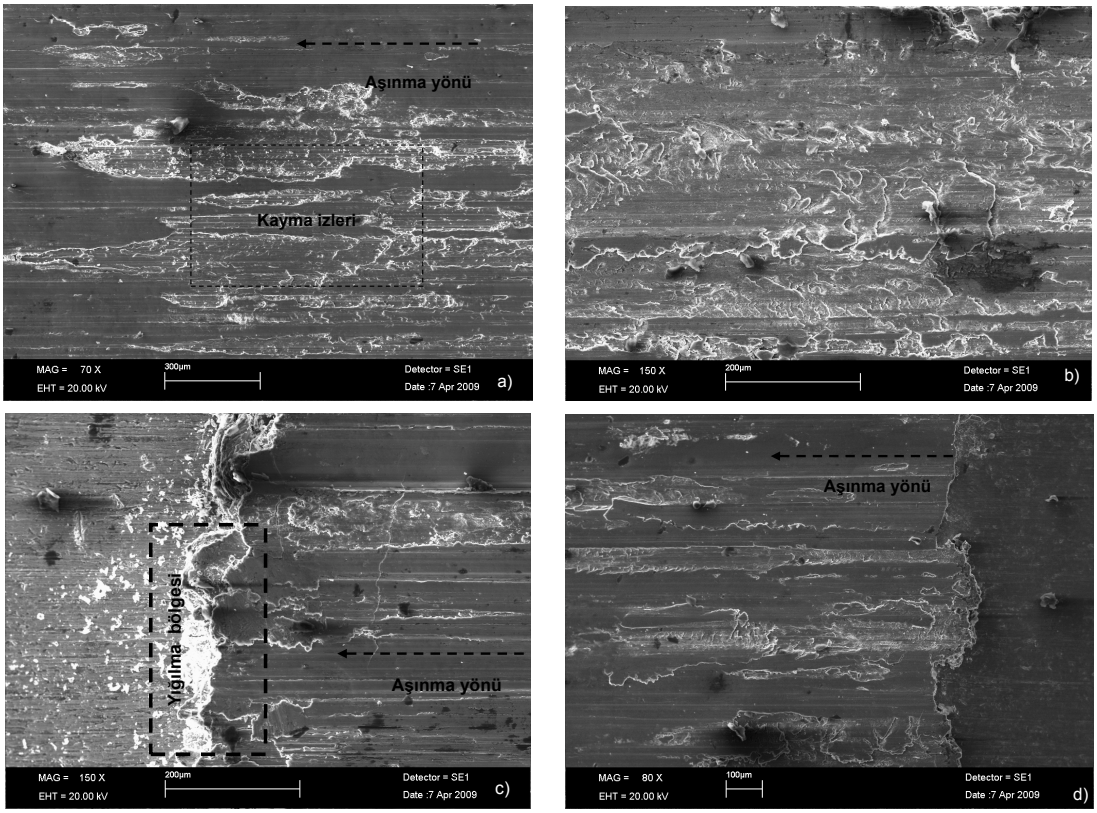


(c)

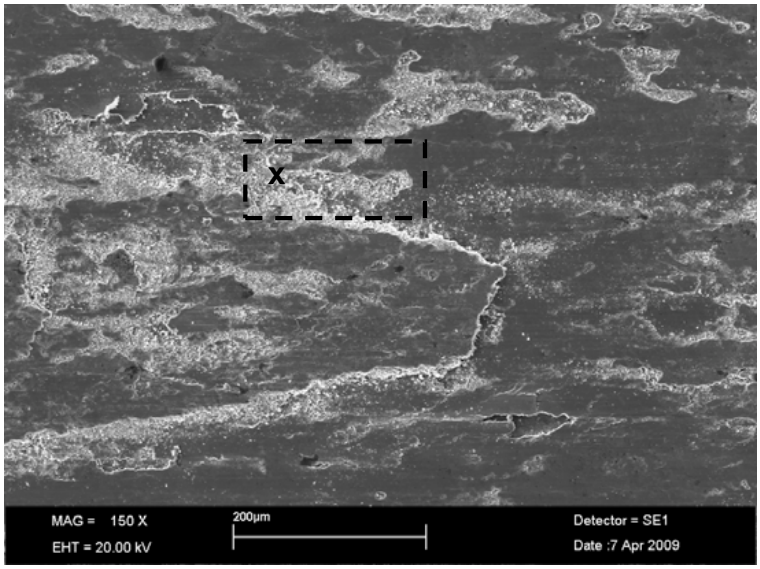
Şekil 4.87. AA2124/SiC 20μm takviyeli kompozit aşınma bölgeleri a) %10 b) %20 c) %30.



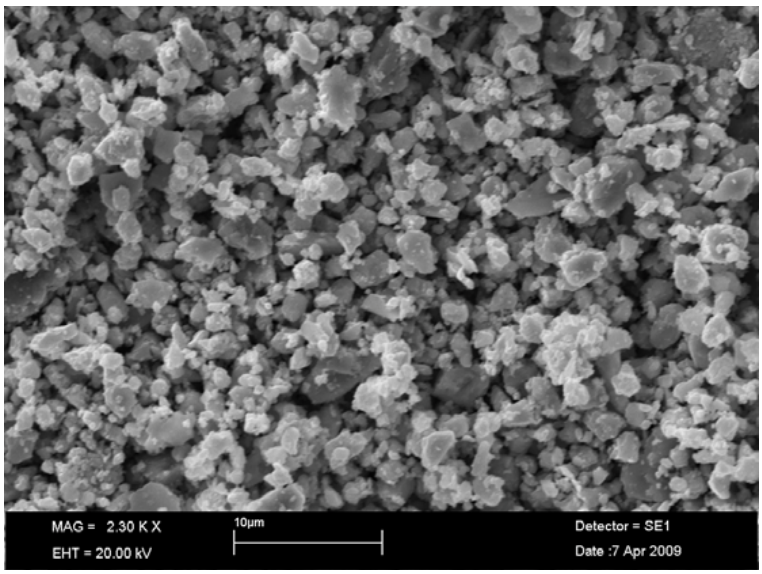
Şekil 4.88. AA2124/SiC 53μm/30 aşınma bölgesi.



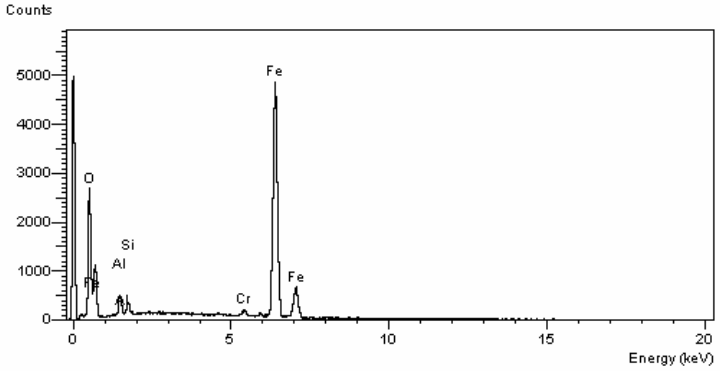
Şekil 4.89. a) AA2124 Takviyesiz numune aşınma bölgesi yüzey detayı b) AA2124/Al_2O_3 1μm/30 kompozit aşınma bölgesi yüzey detayı c) AA2124 Takviyesiz aşınma yönü kenar bölgesi d) AA2124/$Al_2O_3$1μm/30 aşınma yönüne zıt kenar bölgesi.



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.90. AA2124/SiC 20μm/20 aşınma bölgesi a) aşınma yüzeyi, b) x bölgesi detayı, c) x bölgesi analizi.

4.2.2. Kam Profili İmalatı ve Testleri

Aşınma testleri sonrasında geniş bir şekilde incelenen numuneler içerisinde en iyi sonuçların B_4C, ve SiC takviyeli kompozitlerle elde edildiği sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda 20μm'lik SiC takviyeli kompozit kam profilleri imal edilmiştir (Şekil 4.91). %10, 20 ve 30 hacim oranlarında takviyeler ile AA2124 alüminyum tozları 300 MPa yük altında 615°C sıcaklıkta 30 dakika koruyucu atmosfer gazı kullanılarak sinterlenmiştir (Tablo 4.3). İmal edilen kompozitlerin gerçek yoğunlukları, teorik yoğunluklarına %99,8 oranında yaklaşmıştır.

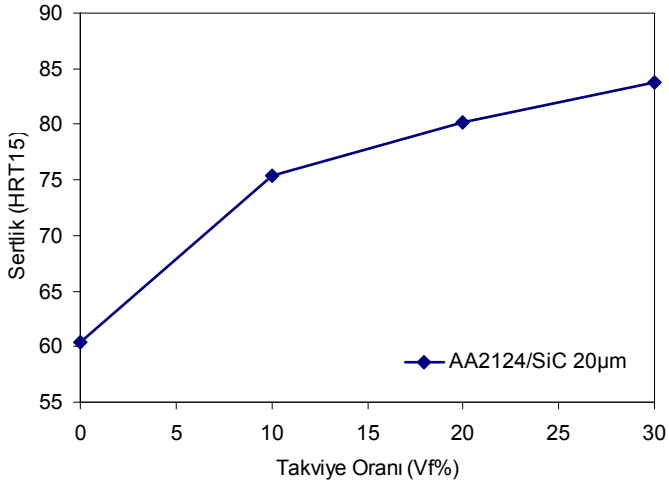
Aşınma testlerine tabi tutulmadan önce numunelerin yüzeyleri ince zımparalarla temizlenerek çapakları yok edilmiştir. Daha sonra ultrasonik temizleme yöntemiyle temizlendikten sonra üzerinden sertlik ve pürüzlülük değerleri alınıp hassas terazide tartılmıştır. Malzemelerin sertlikleri (HRT15) takviye oranıyla birlikte artmaktadır (Şekil 4.92). En düşük sertlik takviyesiz numunede olurken en yüksek sertlik %30 SiC takviyeli kompozit numunede ölçülmüştür. Kam profillerinin aşınma test cihazına monte edilebilmesi için imal edilen ve ayrıntısı verilen profil delme kalıpları kullanılarak merkezlerinden delinmektedir (Şekil 4.91.c).

Kompozit kam profili aşınma sırasında farklı bölgelerde farklı temas durumlarıyla

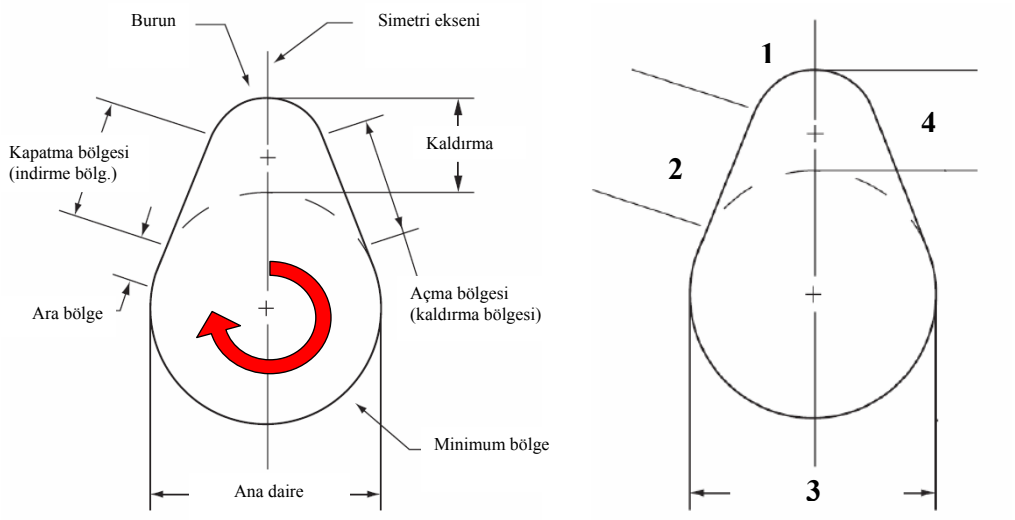
Tablo 4.3. Kam profili özellikleri ve imalat şartları.

Kodu	Matris	Tak.El.	Vf%	Basınç (MPa)	Sıcaklık-Süre	Yg	Yt	Yt%	Sertlik (HRT15)
K08	2124	Takviyesiz.	0	300	615°C 30'sinter	2.780	2.780	100	60.38
K09		SiC 20μm	10			2.818	2.820	99.8	75.40
K10			20			2.866	2.867	99.95	80.20
K05			30			2.905	2.911	99.80	83.80

Şekil 4.91. Sıcak preslemeyle imal edilen kompozit kam profil numuneleri.



Şekil 4.92. Kompozit kam profil numunelerinde takviye oranıyla sertlik değişimi.



Şekil 4.93. Kam profili üzerindeki bölgelerin şematik gösterimi.

ve değişken yüklerle karşı karşıya kalmaktadır. Profil bir simetri eksenine sahiptir (Şekil 4.93.a). Yan yüzeylerde açma-kaldırma ve alt kısımda ana daire bölgeleri mevcuttur. Bu bölgeler anlatımda Şekil 4.93.b'deki gibi numaralandırılarak verilecektir. En büyük yük tepe noktasında (1.bölge) en yüksek sıkıştırma oranına sahip olduğu bölgede uygulanmaktadır. Hareket yönü saat yönü olarak gerçekleştiği için, tepe noktasından sonra açma bölgesi (2.bölge) , ardından ana daire (3.bölge) ve en son olarakta kaldırma bölgesi (4.bölge) gelmektedir.

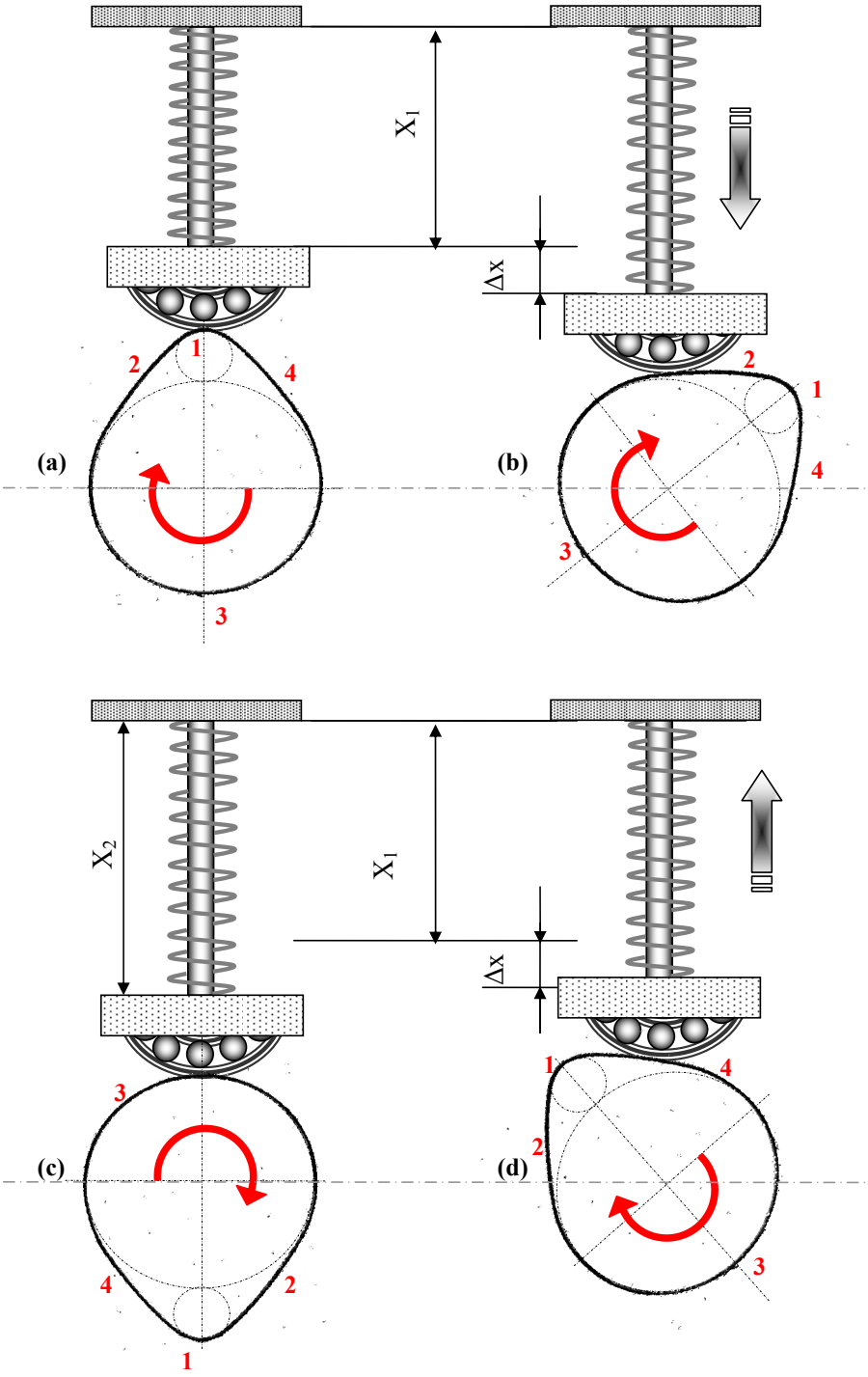
Test düzeneğinde kuvvet yay vasıtasıyla kompozit kam üzerine uygulanmaktadır. Kullanılan yayın yay sabiti k=1.2 olarak ölçülmüştür. Yay üzerine herhangi bir

yük gelmeyecek şekilde mil yukarı çekilir ve yay bu konumdayken iki somun sıkılarak milin aşağı inmesi engellenir. Ardından yükleme mili ucundaki geniş disk birinci komparatörun ucuna kadar getirilerek sıfırlama işlemi gerçekleştirilir. Mil üst bölgesine 5 kg'lık yük yerleştirilir. Bu esnada mil ve üzerindeki yükün toplam miktarı 6,860 kg olarak hesaplanmıştır. Ardından somunlar gevşetilerek yükün yaya iletilmesi sağlanırken bu esnada birinci komparatördeki sıkışma miktarı okunur (x). Numune üzerine gelen normal yük F=k.x formülüyle hesaplanır. Uygulanan normal kuvvet tepe noktasında (1.bölge) maksimum değerdedir (Şekil 4.94.a). Sonra açma bölgesinde (2.bölge) yokuş aşağı inmesinden dolayı azalmakta (Şekil 4.94.b) 3. bölgenin tamamında aynı değerlerde olurken (Şekil 4.94.c), kaldırma bölgesinde (4.bölge) yayı yukarı doğru sıkıştırmaya çalıştığı için artış göstermektedir (Şekil 4.94.d) .

Bu bilgiler ışığında kompozit kam üzerine gelen kuvvet dağılımı Şekil 4.95'de görülmektedir. Normal kuvvet kamın burun kısmında (1.bölge) maksimum 150 N değerine ulaşırken, 3. bölgeler olan 0-120 ve 240-360°'ler arasında 70 N, kaldırma bölgesi (4.bölge) olan 180-240°arasında artmakta ve 120-180°arasındaki açma bölgesinde (2.bölge) kuvvet azalmaktadır.

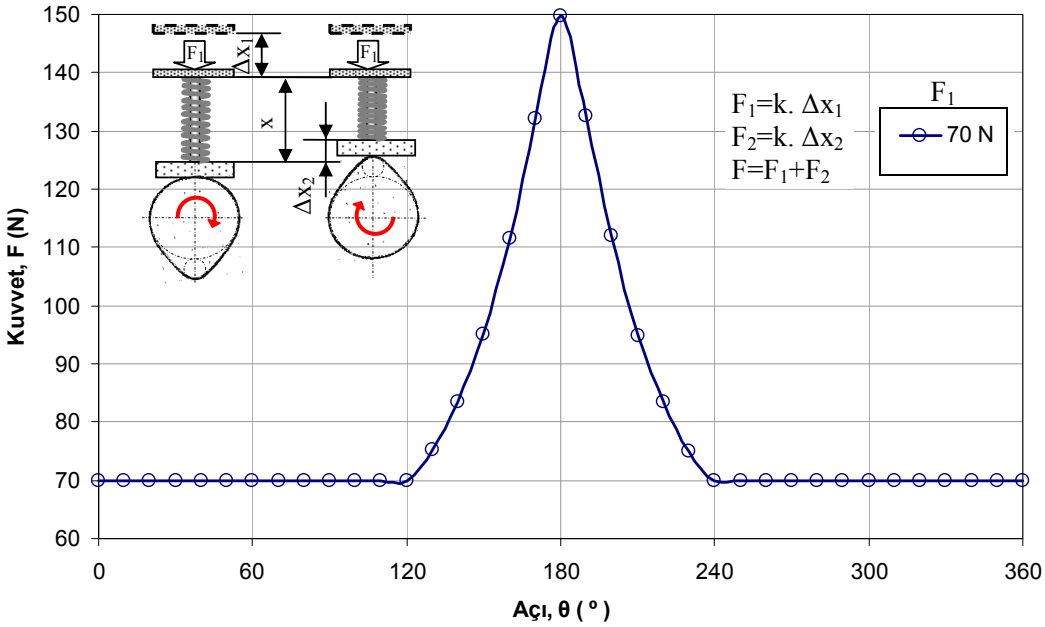
4.2.2.1. Toz Metalürjisi Yöntemiyle Kam Profili İmalatı ve Testleri

Aşınma öncesi temizlenen, özellikleri incelenen ve tartılan kompozit kam profil numuneleri bu hazırlıklar ardından aşınma testine tabı tutulmuşlardır. 30 dakika süreyle karşı elemanla teması sağlanmıştır. Deney süresi sonunda kompozit kam profilleri yeniden tartılarak aşınma kayıpları ölçülmüştür. Bir önceki aşınma çalışmasında bahsedildiği üzere özgül aşınma miktarı – takviye oranı grafiği elde edilmiştir (Şekil 4.96). AA2124 matrisli 20μm SiC takviyeli olan bu kam profillerinde %20'lik takviye oranlı numune %10'luğa göre daha düşük özgül aşınma miktarına sahipken takviye oranının %30 olmasıyla bu miktar artmıştır. Takviyesiz kam numune deney sırasında karşı elemana sıvanarak Al-Al teması meydana getirmiştir. Bu sebeple yüzeyler birbirine tutunarak 4.bölgede gerçekleşen kaldırma işlemine gücü yetmemiş ve deney 15. dakikasında sonlanmıştır. Numune üzerindeki 2.bölgede aşağı hareketten dolayı izler aşağı kayma şeklini almışken (Şekil 4.97.a),

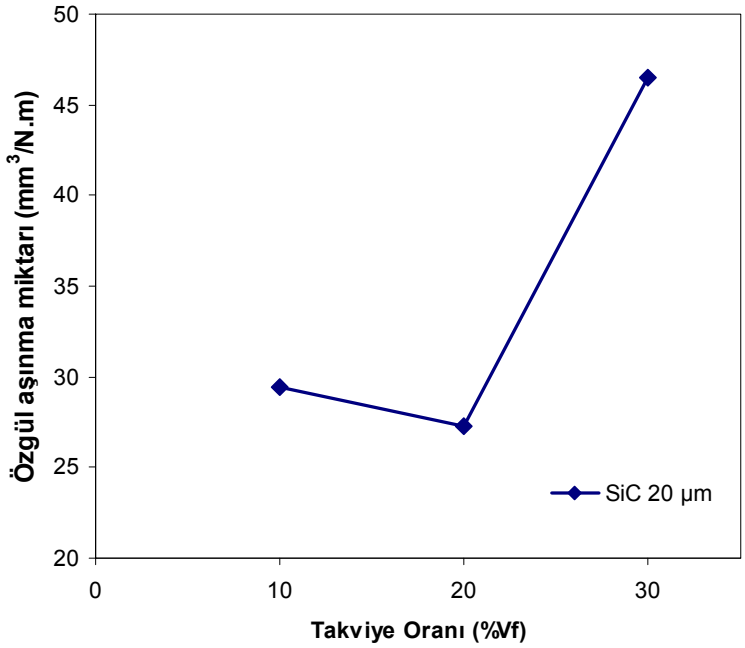


Şekil 4.94. Kam profili hareket şematiği a) üst temas (1.bölge) b) açma bölgesi teması (2.bölge) c) ana daire teması (3.bölge) d) kaldırma bölgesi teması (4.bölge).

en çok aşınma miktarı kaldırma bölgesinde ve tepe noktasında meydana gelmiştir (Şekil 4.97.b). 3. bölgedeki aşınma, karşı elemana sıvanan alüminyumlar ve karşı eleman aşınma yüzeyi Şekil 4.97.c,d'de görülmektedir.

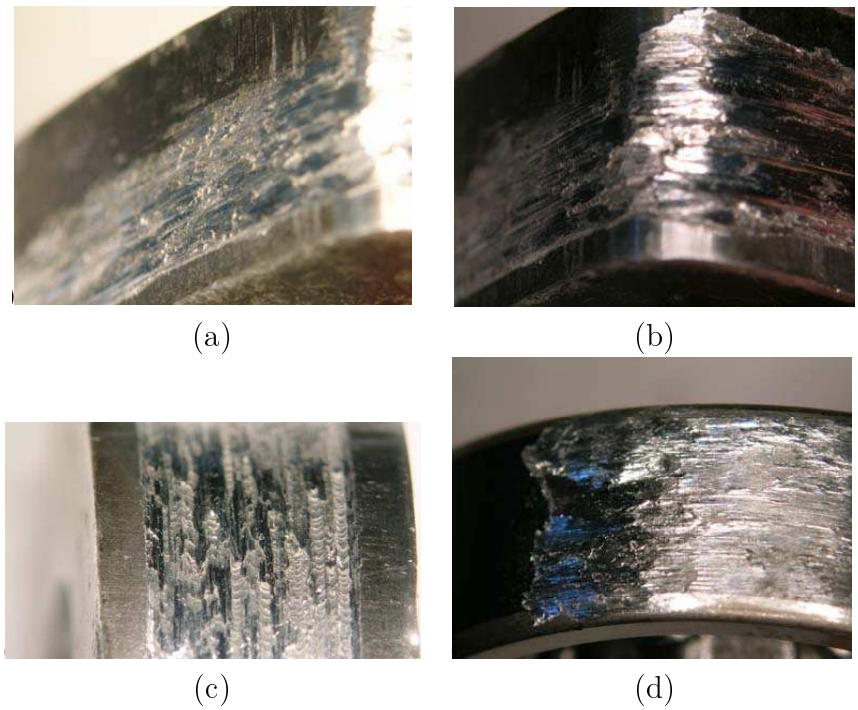


Şekil 4.95. Kam üzerine uygulanan normal kuvvetin bölgesel dağılımı.



Şekil 4.96. Kompozit kam profillerinin takviye oranı – özgül aşınma miktarı grafiği.

Aşınma deneyi sonrasında, aşınma öncesi profille karşılaştırmak amacıyla yeniden profil çıkartılmıştır. Deney öncesi ve sonrasında elde edilen profiller Şekil 4.98.a'da görülmektedir. Aşınma sonrasındaki profil öncekinden daha içeridedir. Buda ölçüm noktalarında aşınma olduğunu göstermektedir. 3. bölgedeki aşınma dağılımının hemen hemen eşit olduğu ancak açma ve kaldırma bölgelerine yaklaşıldığı zaman



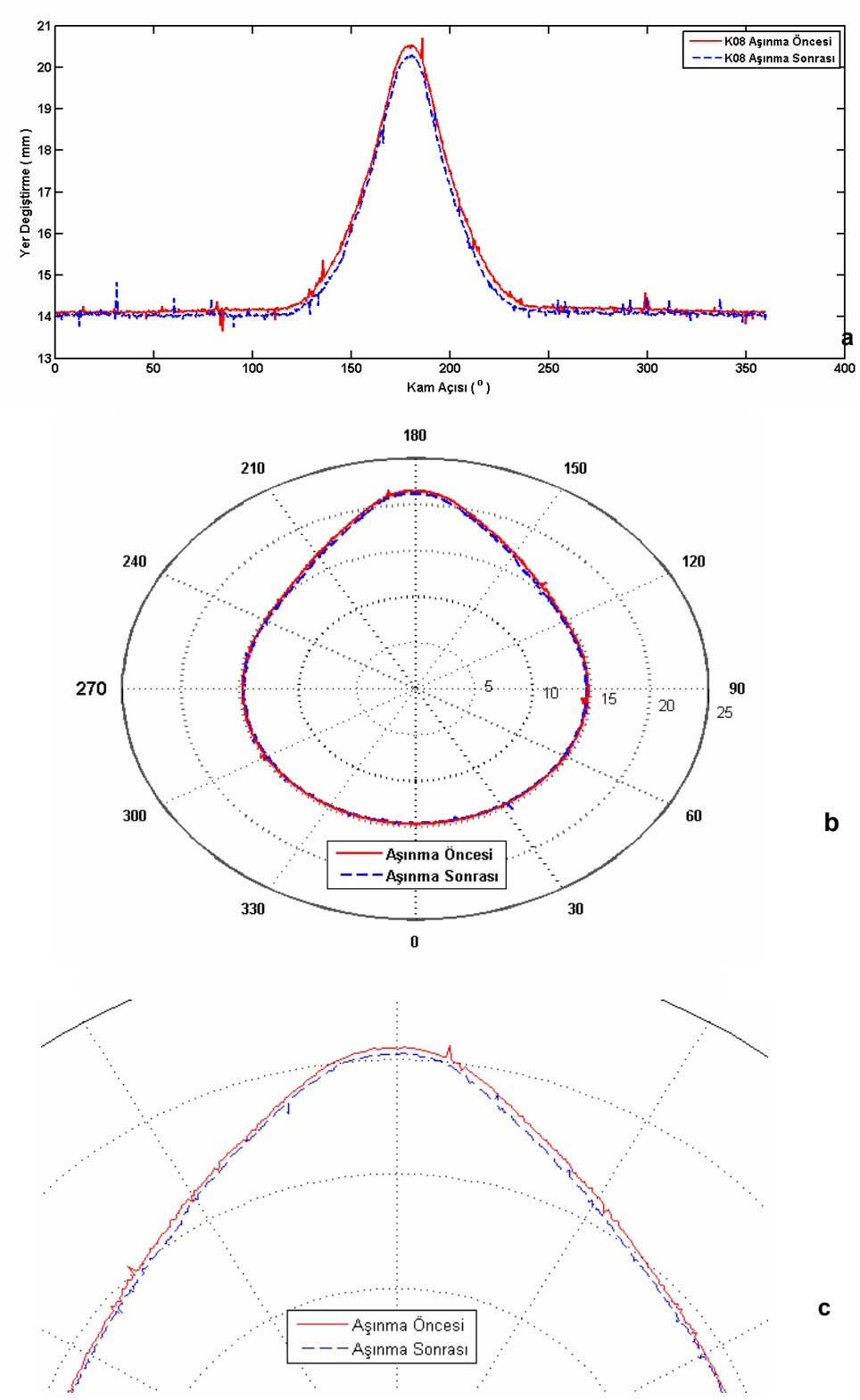
(a) (b)

(c) (d)

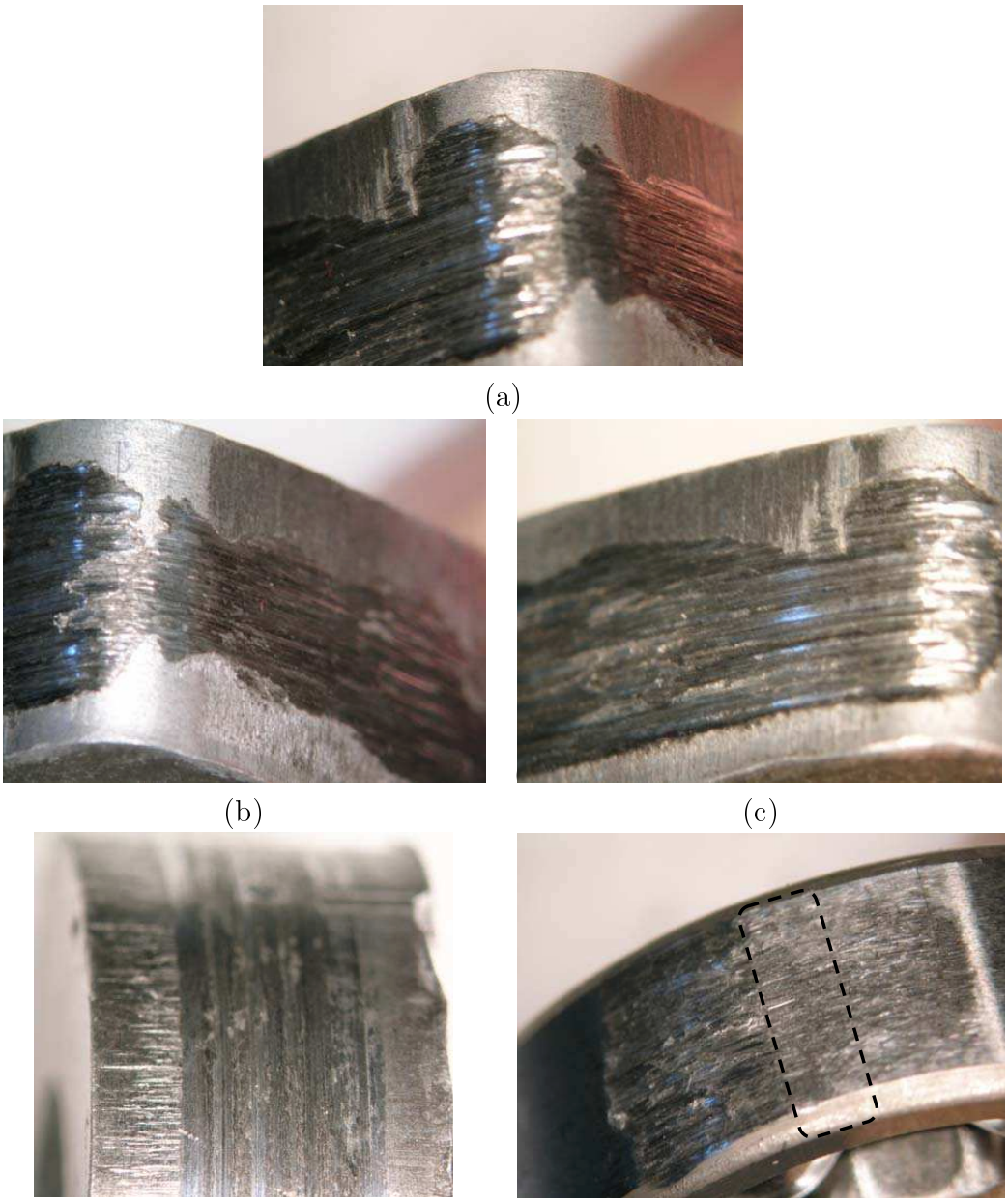
Şekil 4.97. Takviyesiz kompozit kam profili (AA2124) aşınma yüzey görüntüleri a) 2.bölge b) 1 ve 4.bölge c) 3.bölge d) karşı eleman yüzeyi.

aşınma miktarında artış meydana gelmediği gözlenmiştir (Şekil 4.98.a,b). Yukarıda bahsedildiği ve beklendiği gibi aşınma miktarının kaldırma bölgesinde (4.bölge) daha çok olduğu görülmektedir (Şekil 4.98.c).

Kompozit kam profillerine ait olan deney sonrası aşınma bölgeleri görüntüleri Şekil 4.99, 4.100, 4.101'da verilmiştir. Aşınma artışları daha ziyade 4. bölgelerde ve 1. bölge kenarlarında meydana gelmiştir (Şekil 4.99.a,c. 4.100.a, 4.101.a-c.). Bu bölgelerde derin aşınma izleri ve çizikler meydana gelmiştir. Kaldırma bölgesinde kuvvetin artması ve karşı elemanın direnci aşınma artışına sebep olmaktadır. İkinci bölgelerdeki aşınma miktarlarının kaldırma bölgesine göre daha az olduğu görülmektedir (Şekil 4.99.b, 4.100.b, 4.101.b). Bu bölgelerde aşınma izlerinin çok derin olmadığı yüzeysel sıvanma ve kaymalar şeklinde ortaya çıktığı görülmüştür. Numunelerin 3. yani ana daire bölgesi boyunca aynı miktarda yüke maruz kalmalarından dolayı benzer tipte aşınma hasarı ortaya çıkmıştır (Şekil 4.100.d, 4.101.d). Diğer bölgelerle karşılaştırıldığı zaman aşınma miktarının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Buda düşük yükten ve yüksekliğin sabit olmasından kaynaklanmaktadır. Bunlara ek olarak karşı aşındırıcı elemanın yüzey yapılarıda

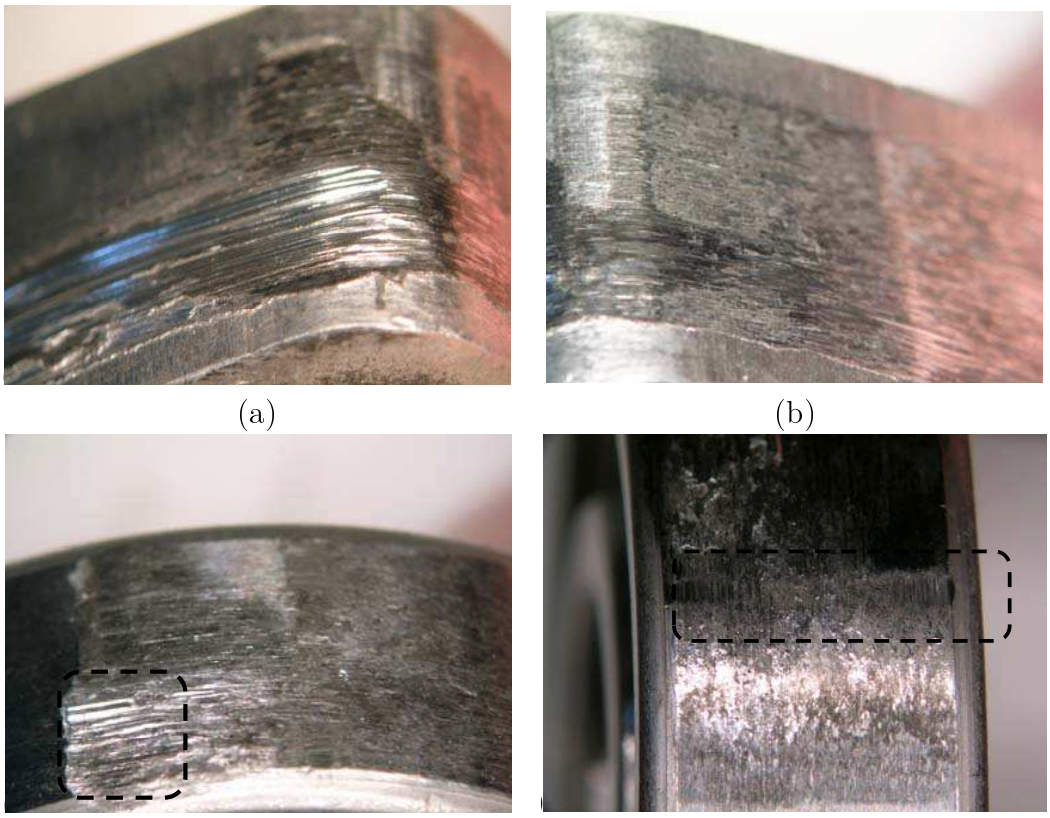


Şekil 4.98. a) aşınmadan önce ve sonra profil b) polar gösterim c) 1, 2 ve 4. bölge detayı.



Şekil 4.99. AA2124/SiC 20μm/10 kompozit aşınma görüntüleri a) 1.bölge b) 2.bölge c) 4.bölge d) 3.bölge e) karşı eleman yüzeyindeki çukurluk.

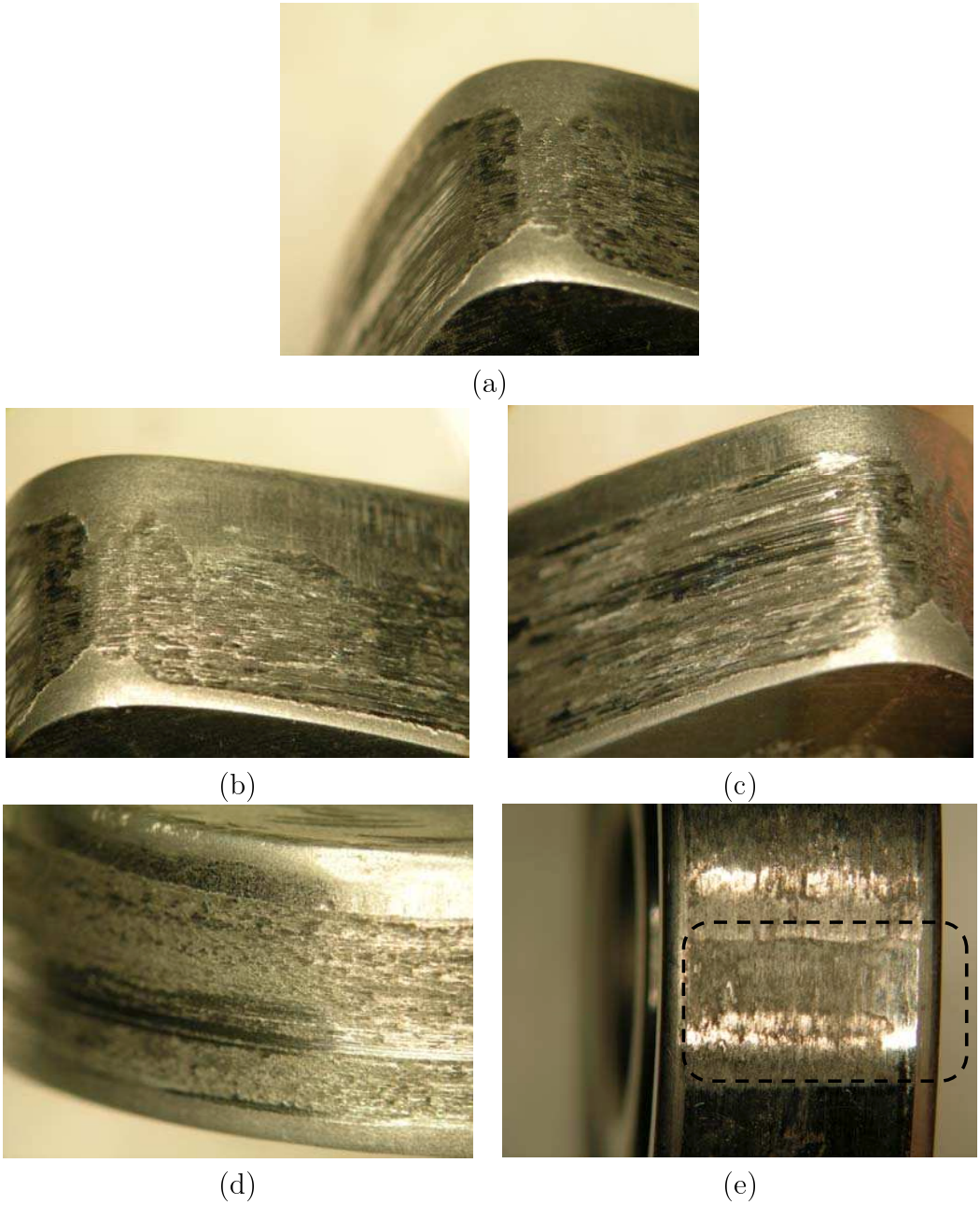
incelenmelidir (Şekil 4.99.e, 4.100.c-d, 4.101.e). Karşı eleman yüzeyinde geniş bir alana yayılmış aşınma izleriyle karşılaşılmaktadır. Kam profili yan yüzeyleri sürekli olarak sürtünerek rulman yüzeyinde bu izi oluştururken, kam profili tepe noktasının temas ettiği geçiş bölgeside bu geniş izin orta noktasında derin bir çukur olarak hasar meydana getirmektedir (Şekil 4.99.e, 4.100.d, 4.101.e). Ayrıca aşınma yönünde rulman yüzeyindeki aşınma bölgesi köşelerinde metal yığılmaları görülmüştür (Şekil 4.100.c).



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.100. AA2124/SiC 20μm/20 kompozit aşınma görüntüleri a) 1 ve 4.bölge b) 2.bölge c) karşı eleman yüzeyi sıvanma d) karşı eleman yüzeyindeki çukurluk.



(a) (b) (c) (d) (e)

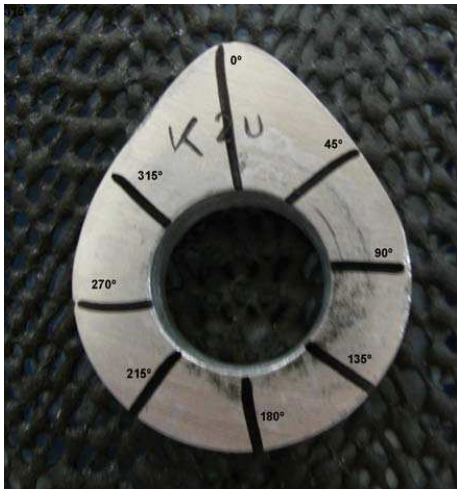
Şekil 4.101. AA2124/SiC 20μm/30 kompozit aşınma görüntüleri a) 1.bölge b) 2.bölge c) 4.bölge d) 3.bölge e) karşı eleman yüzeyi çukurluk.

4.2.2.2. Kam Profili Performans Testleri

Ön aşınma deneyleri sonrasında aşınma davranışları iyi olan SiC 2μm, SiC 20μm ve B_4C takviyeli kompozitlerden kam profili imal edilmesine karar verilmiştir. Kompozit kamlar %10, 20 ve 30 takviyelendirilerek kalıp içerisinde fırın ortamında 615°C sıcaklıkta 300 MPa basınç altında 30 dakika sinterlenerek imal edilmişlerdir (Tablo 4.4). Numuneler merkezlerinden delindikten sonra delme yüzeylerindeki imalat çapakları temizlenip ultrasonik yıkama banyosunda kirlerden arındırılmıştır (Şekil 4.102).

Tablo 4.4. Kam performans testlerine tabi tutulacak kompozit kamların imalat şartları.

No	Matris Malzemesi	Takviye Tipi	Boyut (μm)	Hacim Oranı	Basınç (MPa)	Süre (dak.)	Sıcaklık (°C)	Yoğunluk (gr/cm^3)
K11	2124	B_4C	1-4	10	300	30	615	2.754
K12				20				2.732
K13				30				2.699
K14		SiC	20	10				2.818
K15				20				2.859
K16				30				2.897
K17			2	10				2.815
K18				20				2.855
K19				30				2.890
K20		Takviyesiz						2.700



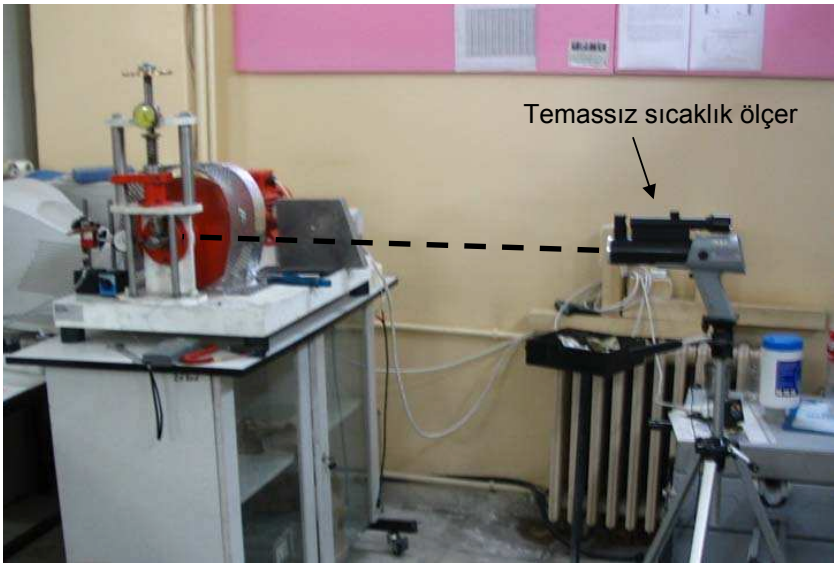
Şekil 4.102. Takviyesiz AA2124 kam profili.

Aşınma öncesi ve sonrasında yüzeylerde meydana gelen pürüzlülükleri karşılaştırmak için tepe noktası 0°kabul edilerek saat yönünde 45°'lik açıklarda yüzey pürüzlülükleri alınmıştır (Şekil 4.102). Bu bölgelerde kaldırma bölgesi 45°'ye, indirme bölgesi 315°'ye denk gelmektedir. Ardından numuneler hassas terazide tartılmışlardır.

Kam profillerinin performans testleri kuru ve yağlı şartlar olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Her iki şartta da karşı eleman olarak ORS® 6000 100Cr6 rulman kullanılmıştır. Rulman, tutucu içerisine sabitlenerek deney sırasında dönmesi engellenmiştir.

Kuru şartlarda yapılan deneylerde, kompozit kam üzerine alt bölgesinde 70 N yük uygulanmıştır. Kamın hareketi sırasında bu kuvvet üst bölgede 150 N'a kadar ulaşmaktadır. Deney süresi 150 dakika (2.5 saat), kamın dönme hızı ise 500 d/d'dır (F70D500S150). Deney sırasında Omegascope® marka lazer ısı algılayıcı cihaz ile kam üzerinden, karşı eleman yüzeyinden ise ısıl çift vasıtasıyla sıcaklık ölçümleri yapılmıştır (Şekil 4.103).

Kuru şartlardaki aşınma testlerinde daha önceki deneyler dikkate alınarak AA2124 takviyesiz kompozit aşındırılmamıştır. Karşılaştırmak amacıyla KGDD kam milinden kesilip çıkartılan, tartılıp pürüzlülüğü alınan dökme demir kam profilide aşınma testine tabi tutulmuştur. Aşınma deneyleri sonrasında numuneler tekrar

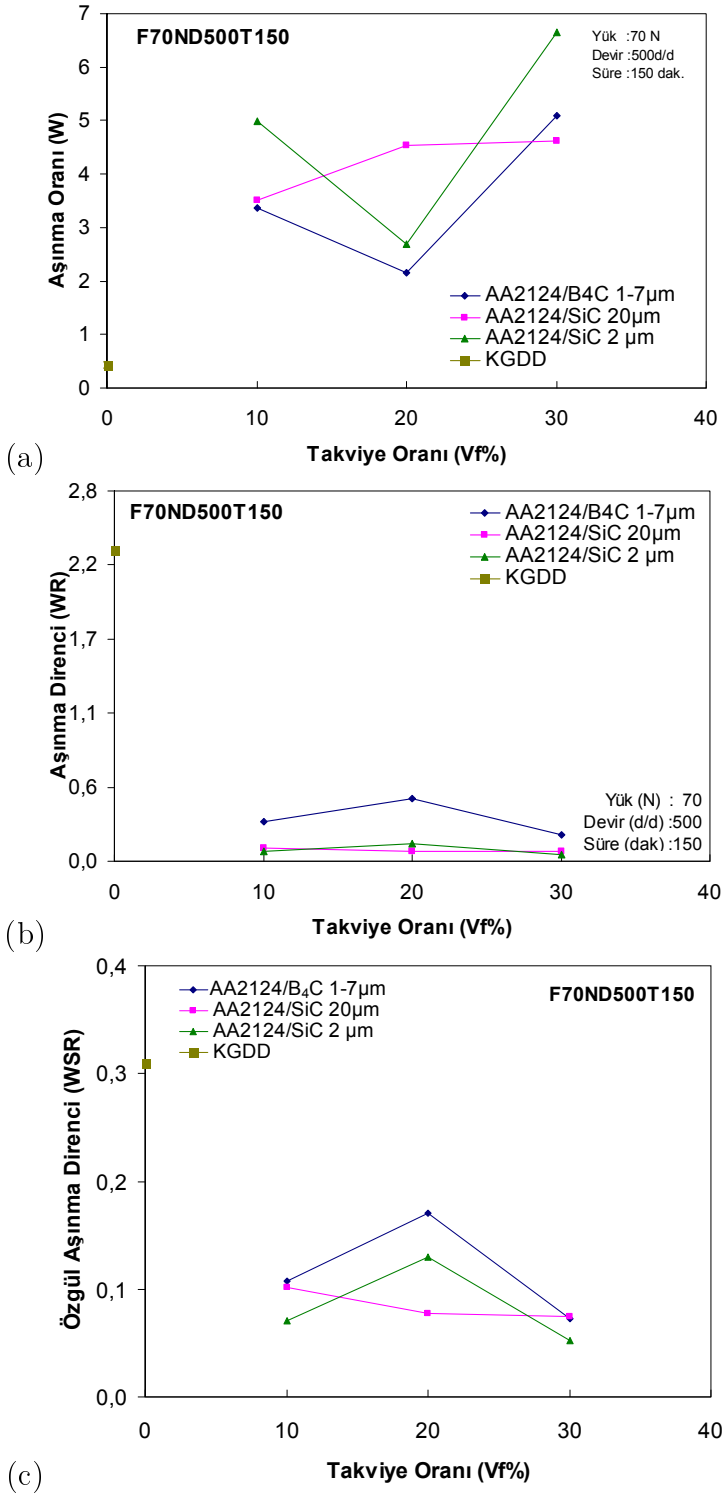


Şekil 4.103. Kuru şartlar sıcaklık ölçüm düzeneği.

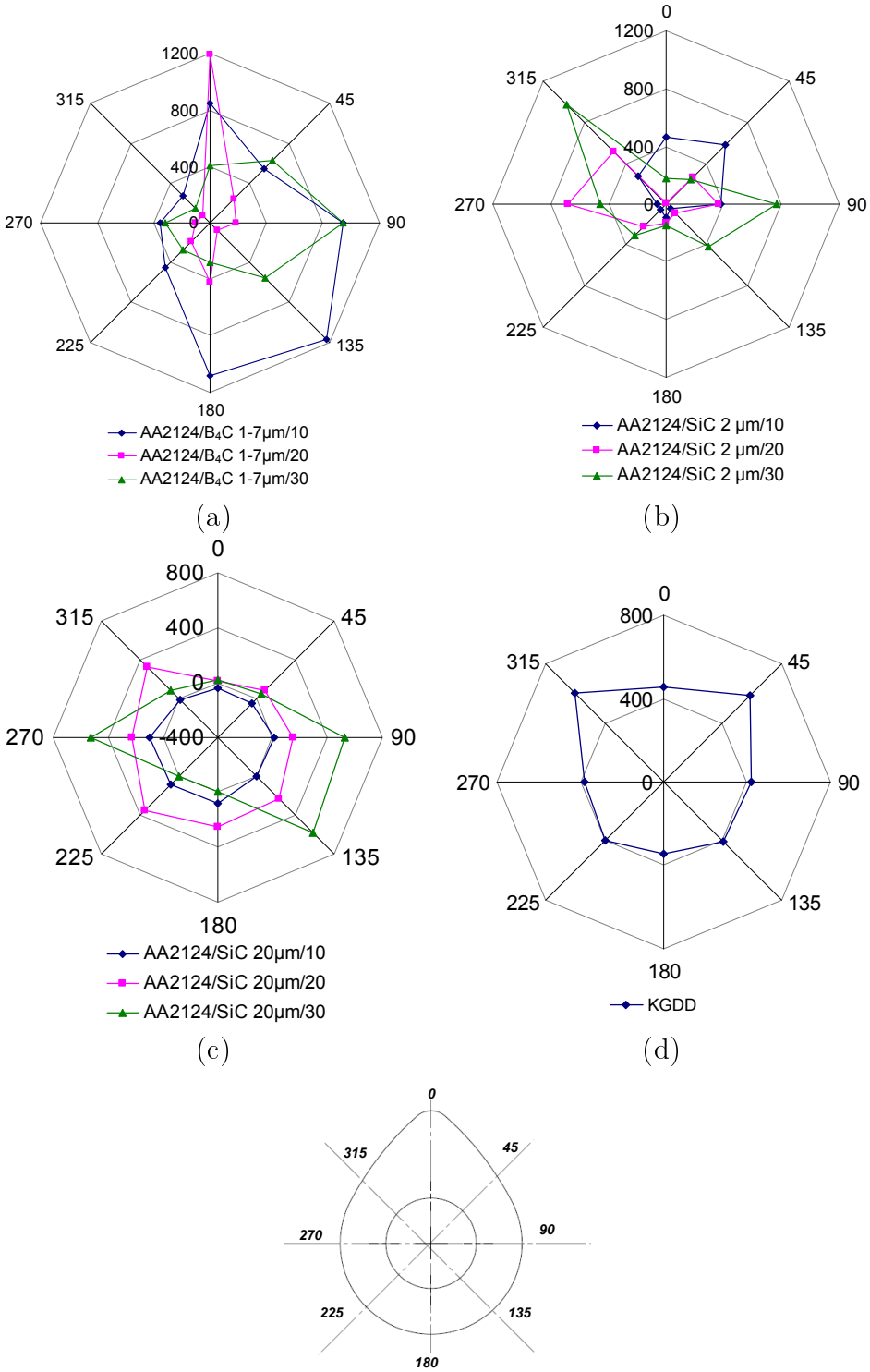
ultrasonik banyoda temizlenerek tartılmış, yüzeylerinden 45°'lik açılarla aynı bölgelerden pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır.

Numunelerdeki kayıp miktarı dikkate alınarak, aşınan miktarının hacmi uygulanan yük ve aşınma süresine bölünerek Aşınma oranı (W, mm^3/N.dak) hesaplanmıştır. Aşınma oranın tersi alınarakta Aşınma direnci (W_R, N.min/mm^3) bulunmuştur. Bu hesaplar sonunda malzemenin yoğunluğunun dikkate alındığı ve aşınma direncinin malzeme yoğunluğuna bölünmesiyle özgül aşınma direnci (W_{SR}) bulunmuştur.

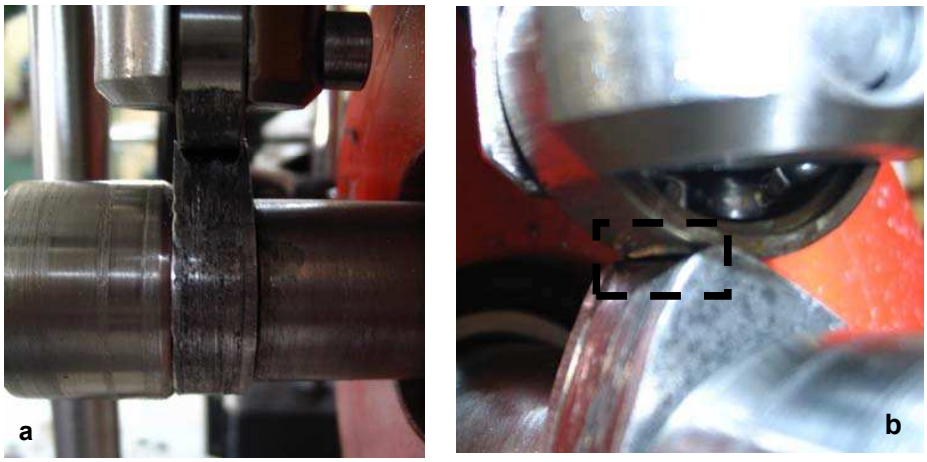
Kuru şartlardaki aşınma deneyi sonrasında en düşük aşınma miktarı KGDD kam profilinde meydana gelirken, kompozit kam profilleri arasında en az aşınma oranı B_4C %20 takviyeli kompozitte ölçülmüştür (Şekil 4.104.a). Aşınma direnci ve özgül aşınma direnci KGDD kam profilinde en iyi olurken kompozit kam profillerin kendi aralarında yakın değerlerde olduğu görülmüştür (Şekil 4.104.b-c). Aşınma öncesinde ve sonrasında alınan pürüzlülük değerleriyle çizilen pürüzlülük % değişim grafikleri Şekil 4.105'de verilmiştir. Kompozit numune pürüzlülük değişim grafikleri numune ve kam açısına göre farklılık göstermiştir (Şekil 4.105.a-b-c). KGDD'de ise pürüzlülük değerleri beklendiği gibi kaldırma (45°) ve indirme (315°) bölgelerinde artış göstermiştir (Şekil 4.105.d). Aşınma deneyleri sırasında meydana gelen temas yapısı Şekil 4.106.a'de görülmektedir. Yüzeyler karşılıklı tam temas ve sürtünme halindedirler. Özellikle kam burun bölgesinde ve rulman yüzeyinde sıvanma ve birikmeler oluşmaktadır (Şekil 4.106.b). Aşınma sonrası yüzeylerde meydana gelen hasarlar incelendiğinde, B_4C takviyeli kompozitteki aşınmanın azaldığı yüzey hasar miktarından da belli olmaktadır (Şekil 4.107, 4.108). B_4C %10 takviyeli kamın tepe bölgesinde ezilmelere rastlanırken (Şekil 4.107.a) %30 takviyeli olanın tepe noktasında bu tür hasarlar görülmemektedir. Buda takviye oranı az olan %10 katkılı kamın ezilip daha çok aşındığını(Şekil 4.107.a, 4.108.a) ve karşı elemana %30 takviyeliye göre daha fazla miktarda yapıştığını göstermektedir (Şekil 4.107.d, 4.108). Aşınma sonrasında numune yüzeyindeki bölgeler SEM'de incelenmiştir. Tepe noktasında meydana gelen yüzey kaymaları ve üst çöküntü Şekil 4.109.a-b'de görülmektedir. Kaldırma bölgesinde aşınma çizgileri daha belirgindir ve diğer bölgelere göre daha yoğundur (Şekil 4.110, 4.111).



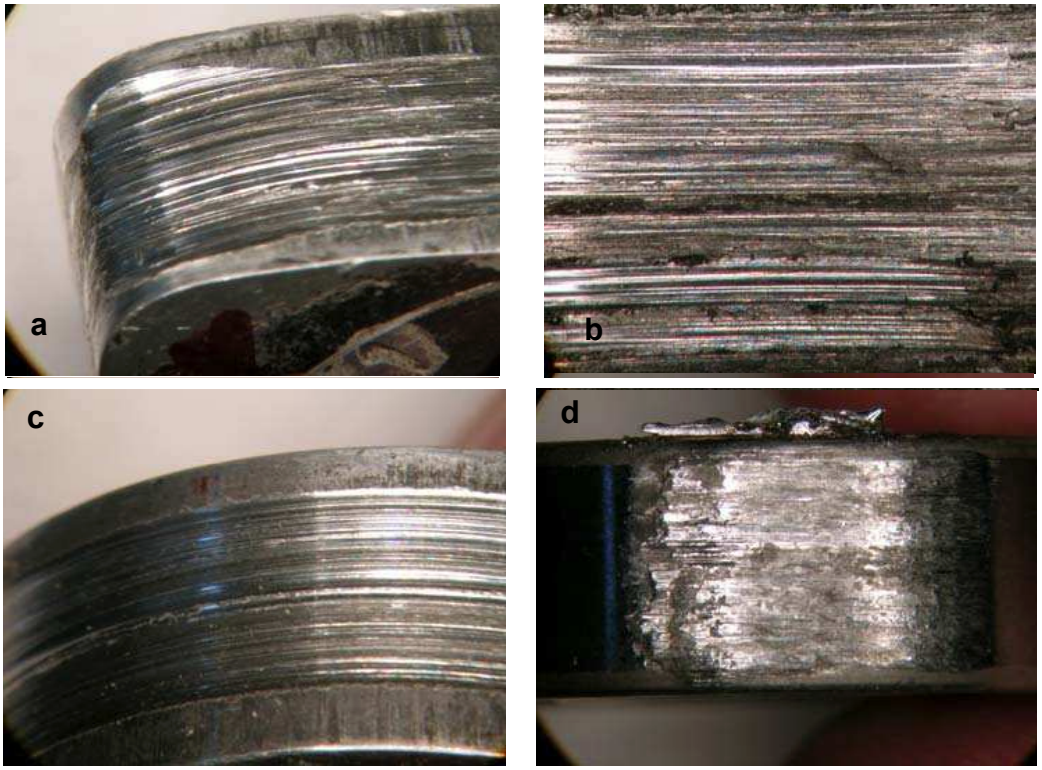
Şekil 4.104. Kuru şartlar kam profili aşınma grafikleri a) aşınma oranı b) aşınma direnci c)özgül aşınma direnci (F70D500S150).



Şekil 4.105. Pürüzlülük % değişimleri a) B_4C b) SiC 2μm c) SiC 20μm d) KGDD e) ölçüm açılarının şematik gösterimi.

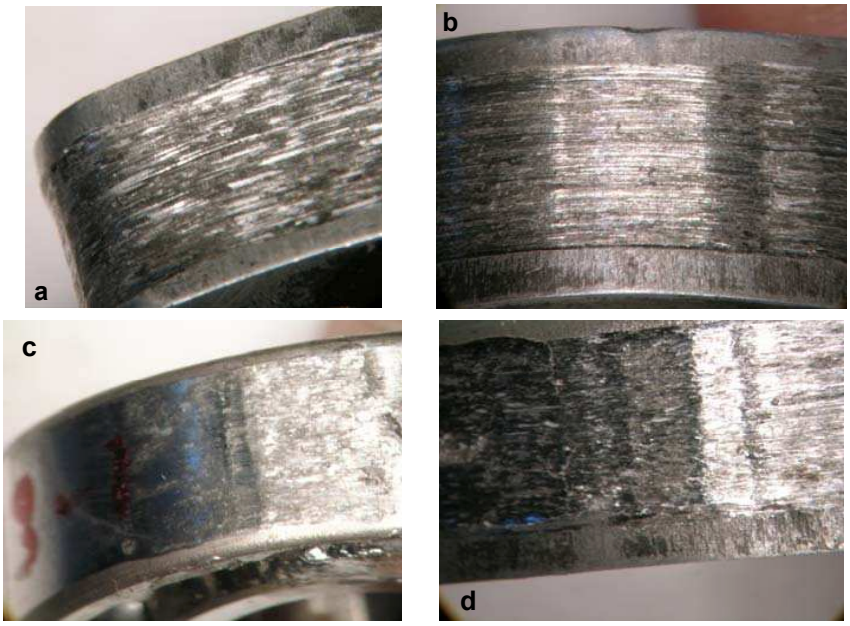


Şekil 4.106. Aşınma sırasında a) kam-rulman teması b) yığılma.

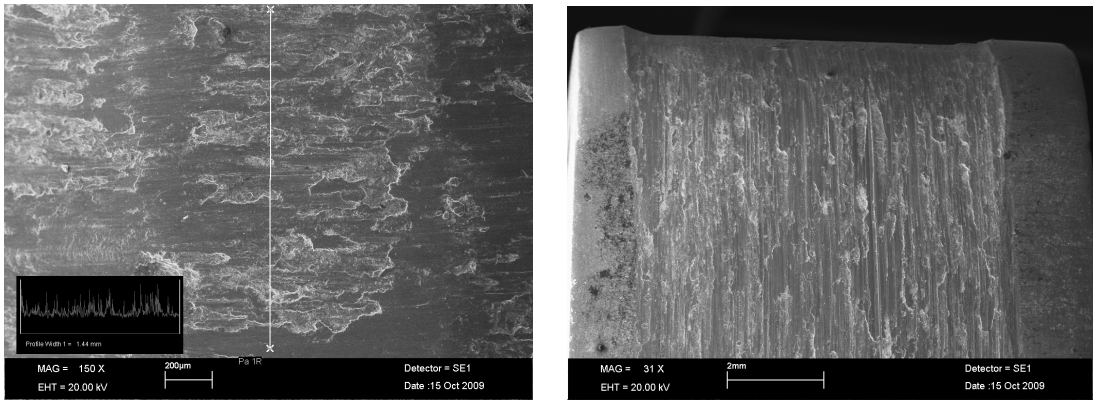


Şekil 4.107. AA2124/B_4C/10 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası a) tepe ve kaldırma bölgesi b) kaldırma bölgesi c) ara bölge d) karşı eleman yüzeyi.

Ayrıca B_4C takviyeli kompozit yüzeyinde aşınma sonrası yeniden katılaşarak şekillenen bölgelere rastlanmıştır (Şekil 4.112.a). Bu bölgeler sürtünme sırasında oluşan yüksek sıcaklıkla birlikte eriyen alüminyumun yeniden hızlıca katılaşıp çatlamasıyla oluşmaktadır. Bu sürtünme sırasında alüminyum üzerinde oksitler oluşmakta ve karşı elemandan Fe ve Cr geçişi meydana gelmektedir (Şekil 4.112.b-c).



Şekil 4.108. AA2124/B_4C/30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası a) tepe ve kaldırma bölgesi b) ara bölge c) karşı eleman yüzeyi d) indirme bölgesi.

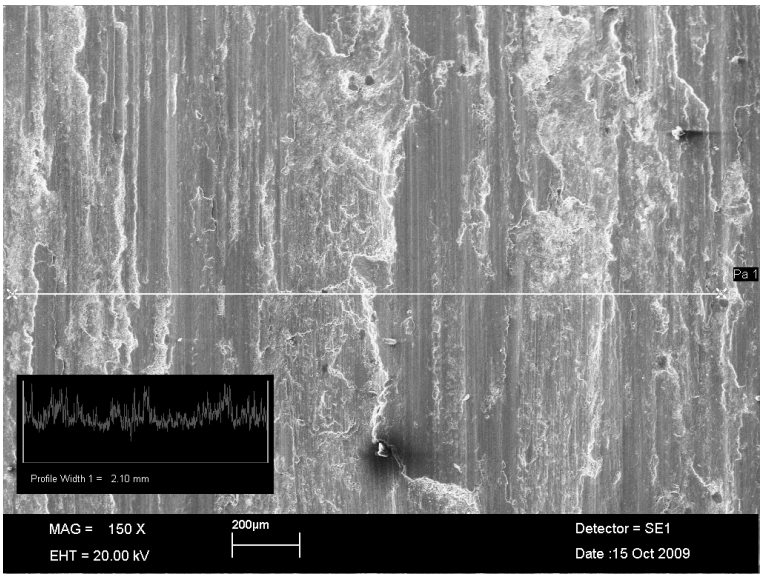


(a) (b)

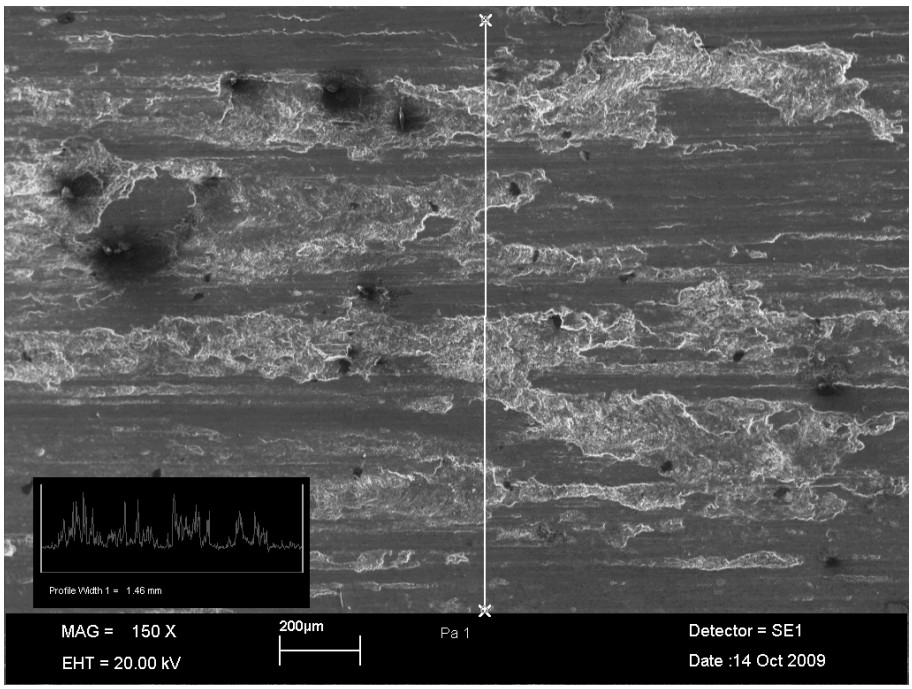
Şekil 4.109. AA2124/B_4C/30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası SEM görüntüsüleri a) üst bölge yüzey b) üst bölge yandan görünüş.

Aşınma sırasında karşı eleman yüzeyine alüminyum sıvanmış ve yüzey pürüzlülüğü kompozite göre daha az olmuştur (Şekil 4.113).

AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam profilinin aşınma sonrası yüzey yapısı Şekil 4.114'de görülmektedir. Kaldırma ve indirme bölgesindeki çizik ve aşınmalar diğer numunelerdeki kadar derin değildir (Şekil 4.114.a-b). Karşı eleman yüzeyine sıvanmalar görülmekle birlikte, yüzeyde derin çökme ve kayıplar olmamıştır (Şekil 4.114.c). Tepe noktasındaki sürtünmeden dolayı oluşan kayma bölgeleri ve aşınmayla birlikte yüzey altından çıkan SiC partikülleri Şekil 4.115.a'da

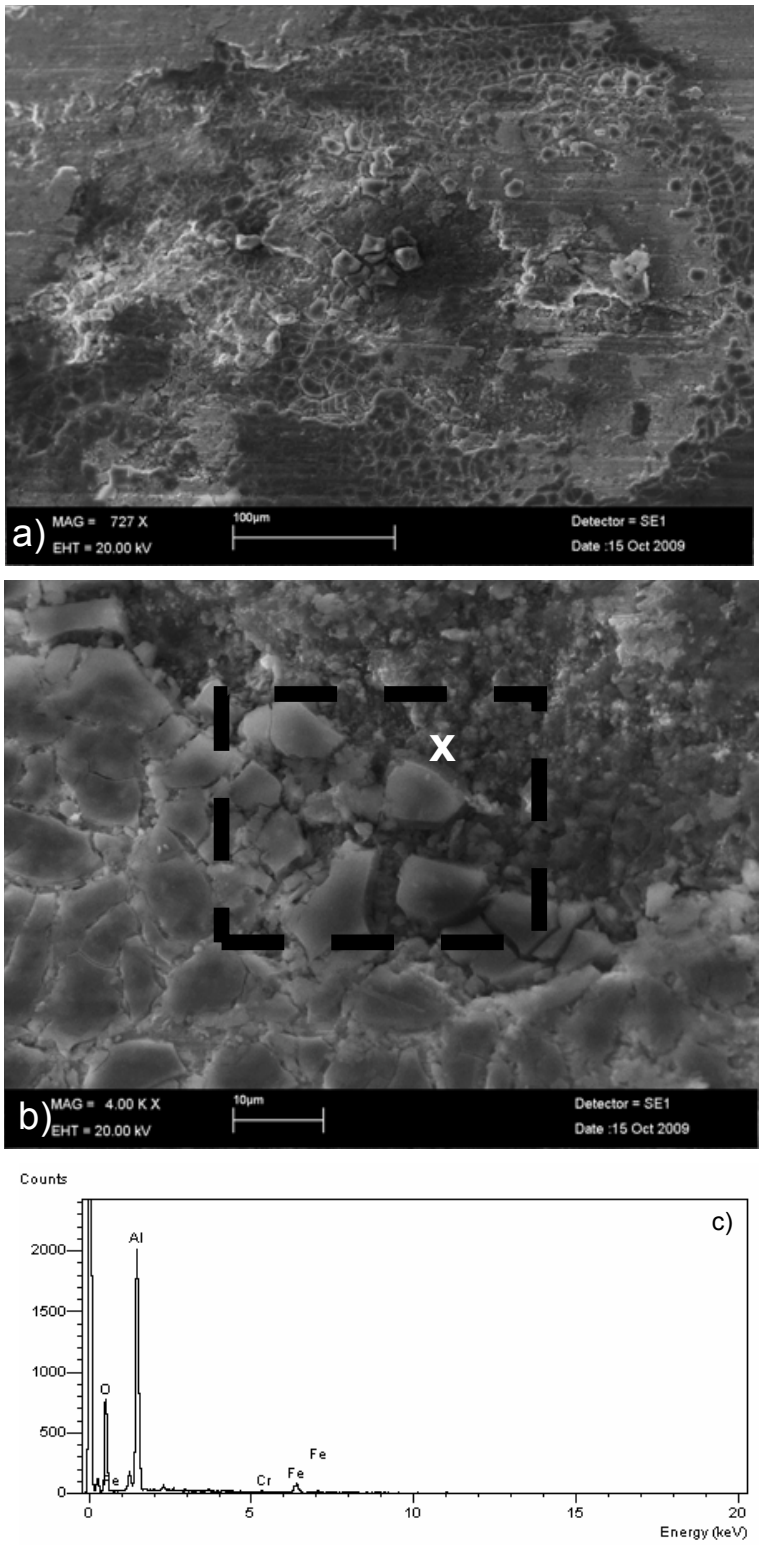


Şekil 4.110. AA2124/ B_4C /30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası kaldırma bölgesi yüzey SEM görüntüsü.

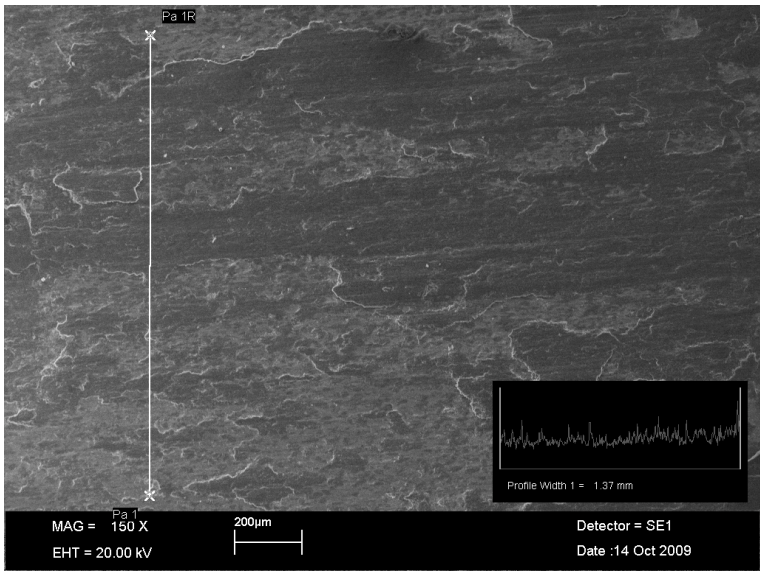


Şekil 4.111. AA2124/ B_4C /30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası ara bölge yüzey SEM görüntüsü.

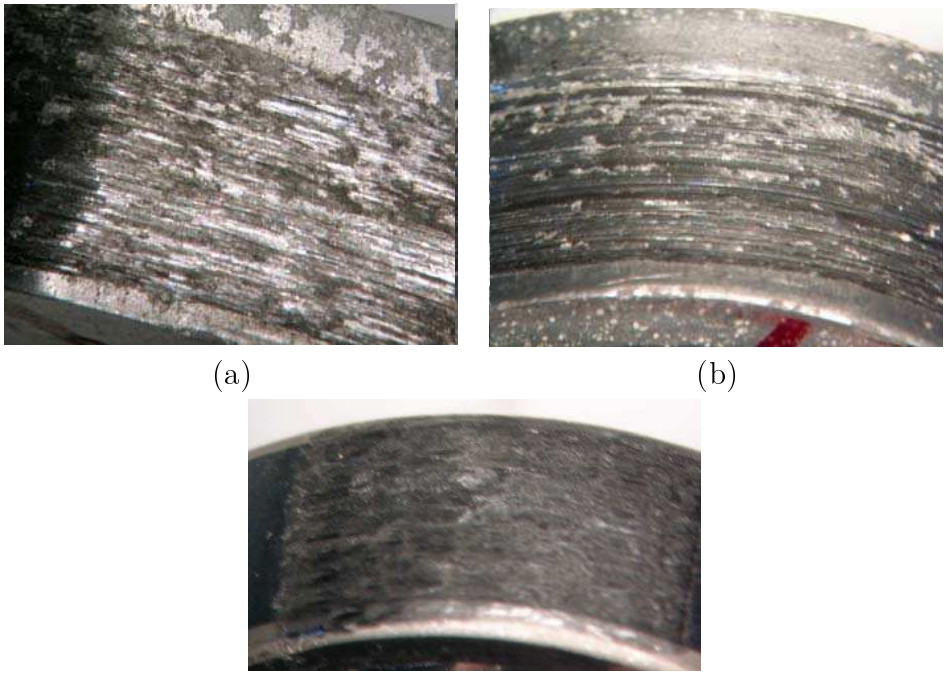
görülmektedir. Aşınma çizgileriyle birlikte kayma bölgelerinin olması aşınma karakteristiğinin adhezyon ve abraziv aşınmadan meydana gelen bileşik aşınma olduğunu göstermektedir. Tepe bölgedeki SiC taneciklerinin üzerinin sıvanmış olduğu, bu sıvama içerisinde alüminyum, oksit ve Fe bulunduğu görülmüştür. Kaldırma bölgesi ile tepe bölgesi arasındaki geçiş çizgisi Şekil 4.115.c'de



Şekil 4.112. AA2124/ B_4C /30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası yüzeydeki yeniden katılaşma bölgesi a) SEM görüntüsü b) x bölgesi detay c) x bölgesi analizi.



Şekil 4.113. AA2124/ B_4C /30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası karşı eleman yüzey SEM görüntüsü.



(a) (b)

(c)

Şekil 4.114. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası a) tepe ve kaldırma bölgesi b) indirme bölgesi c) karşı eleman yüzeyi.

görülmektedir. Ayrıca tepe noktasındaki aşınma izi derinliği de görülmektedir. Ancak bu derinlik tepe noktasında diğer bölgelere göre daha fazladır. Bu ise maksimum yükün tepe noktasına uygulanmasından dolayıdır.

Geçiş bölgesindeki pürüzlülük indirme bölgesindeki pürüzlülükten daha azdır ve

kuvvet farkından kaynaklanmaktadır (Şekil 4.116.a, 4.117). İndirme bölgesinde aşınma izleri arasında içyapıda bulunan alüminyum ve SiC partiküllerinin görüntüsü Şekil 4.116.b'deki gibidir. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam profili karşı elemanı yüzeyinde alüminyum sıvanması görülürken, bu izler ve çevresinde aşınma çizgilerine (Şekil 4.118.a), kayma bölgelerine ve özellikle karşı eleman üzerindeki izin kenar bölgelerinde yığılma ve tabakalaşmalara rastlanmaktadır (Şekil 4.118.b). Ayrıca bu yüzeylerde sürtünme ve sıcaklıkla oluşan oksitlerede rastlanmıştır. Kam profili üzerinde aşınan bölge ile aşınmamış kam yüzeyi geçiş bölgesi Şekil 4.119'da görülmektedir. Aşınma dolayısıyla oluşan kayma ve sıvanma izleri bu resimde çok daha kolay anlaşılmaktadır.

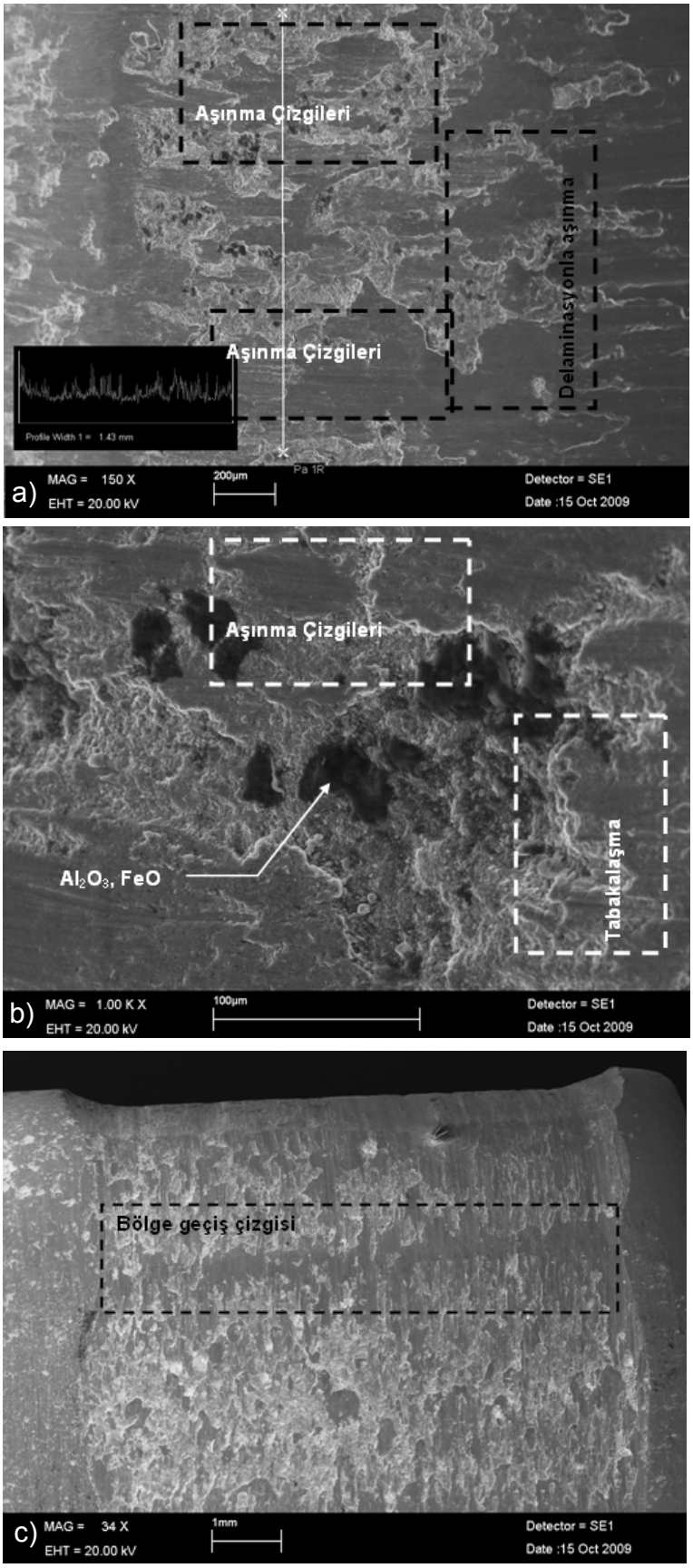
AA2124/SiC 20μm/20 kompozit kam profilinin aşınma testi sonrasında meydana gelen yüzey yapıları Şekil 4.120'da verilmiştir. Aşınma izleri belirgin durumdadır. İndirme bölgesiyle alt bölge arasında geçiş çizgisi rahatlıkla görülmektedir (Şekil 4.120.c). Karşı eleman üzerinde sıvanmadan daha çok ayrılma olduğu hatta orta bölümde çukurlaşmanın meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.120.d).

Yağlı şartlarda aşınma deneyleri için sistemimize araç motorlarındaki şartları karşılaması maksadıyla yağ haznesi monte edilmiştir (Şekil 4.121.a). Şematiğinden de görüldüğü gibi yağ, kontrollü ısıtıcı vasıtasıyla 90°C' kadar ısıtılıp sıcaklığı deney sonuna kadar sabit tutulmaktadır (Şekil 4.121.b). Hazneye her deneyde standart olarak 60 mlt DEW® marka SAE10W40 yağ konulmuştur. Kam profili hareketi sırasında yağa dalmakta ve yağlama gerçekleşmektedir. Yağ miktarı profilin burnunun içerisine dalmasına müsade edecek seviyededir. Yağlı şartlarda kam profili aşınma deneyleri dört aşamada gerçekleştirilmiştir.

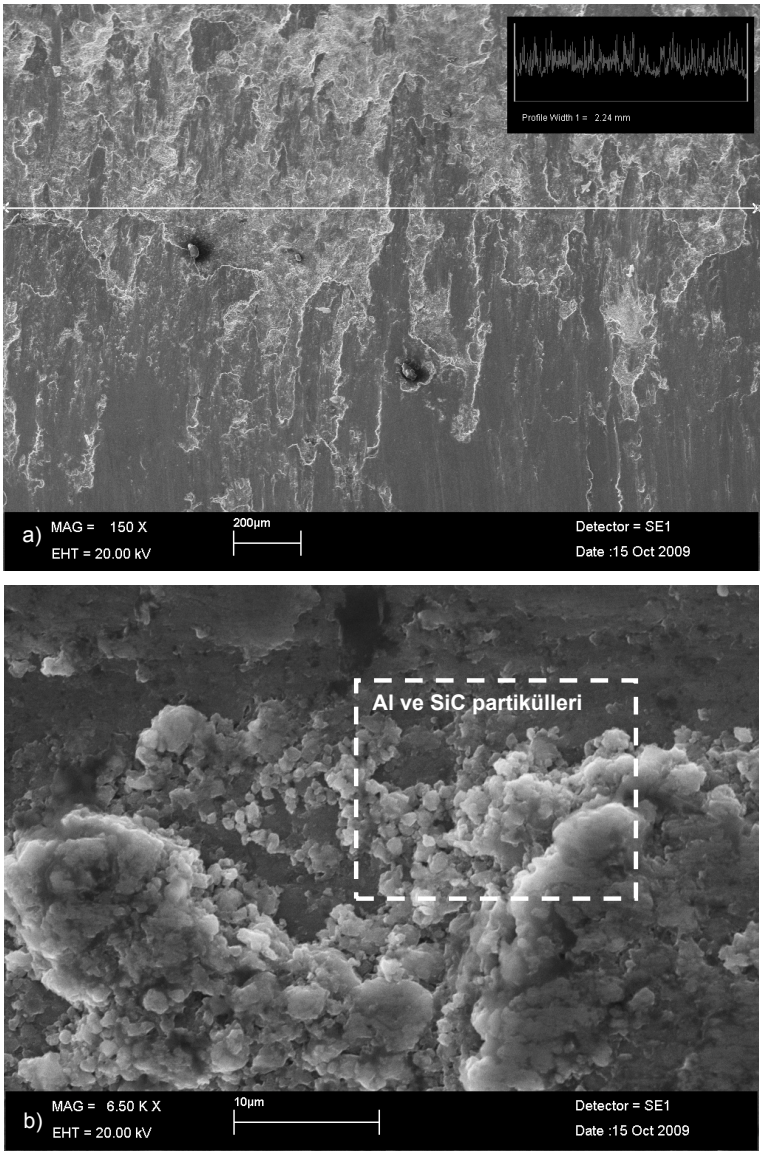
Birinci aşamada numuneler en düşük 70 N yük altında (F), 500 d/d döndürülerek (D) 150 dakika (F70D500S150) süreyle (S) aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Bu deney sırasında maksimum yük üst noktada 150 N'a ulaşmaktadır. 150 dakika sonra malzemelerin temizlenip tartılmasıyla ortaya çıkan ağırlık kayıplarıyla yapılan hesaplar sonrasında elde edilen grafikler Şekil 4.122'deki gibidir. Aşınma oranı en az KGDD kam profilinde çıkarken, kompozitlerin aşınma kayıplarının takviye oranının artmasıyla azaldığı, SiC 2μm ve B_4C %30 takviyeli kompozit

kam profillerinin KGDD'e yakın aşınma miktarına sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.122.a). Aşınma direnci en yüksek olan KGDD kam profili gibi görünmekle birlikte (Şekil 4.122.b) yoğunluğu dikkate alarak özgül aşınma direncini hesaplayıp grafik olarak incelediğimizde AA2124/SiC 2μm/30 kompozitin KGDD'den daha iyi olduğu açıkça görülebilmektedir (Şekil 4.122.c). Aşınma öncesi ve sonrasında 45°'lik açılarda alınıp % değişimi hesaplanan pürüzlülük grafikleri (Şekil 4.123) incelendiğinde, B_4C takviyeli kompozitte 45 ve 225°lik açılarda pürüzlülük % değişimi daha fazla artarken 2μm'lik SiC takviyeli kompozitlerde, KGDD kam profilinde ve takviyesiz AA2124 kam profilinde genel olarak pürüzlülük % değişimi azalmaktadır (Şekil 4.123.a-b-c-d).

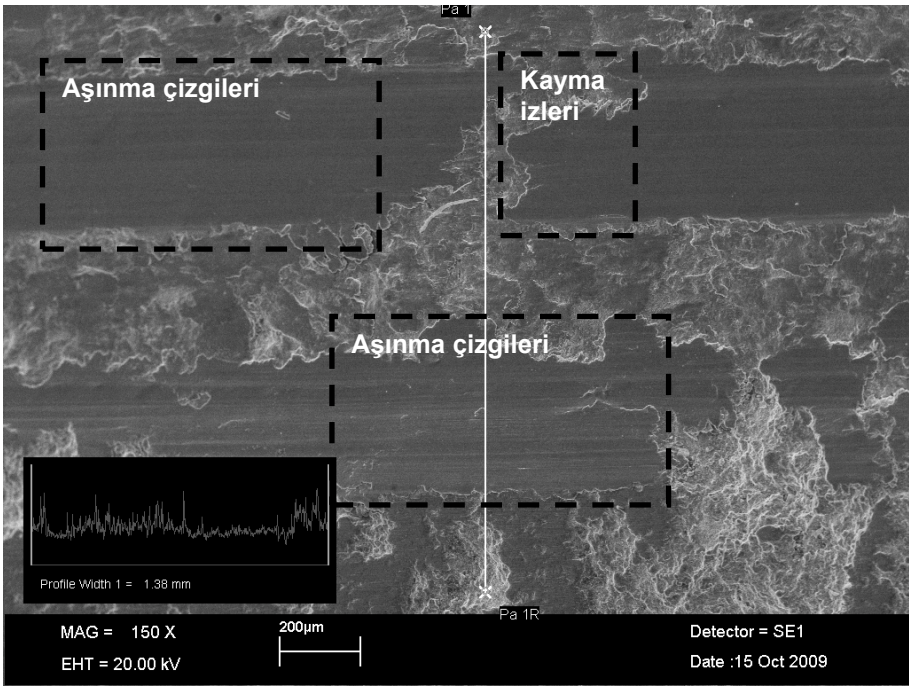
AA2124/ B_4C /30 takviyeli kompozitin yağlı şartlarda aşınma deneyi sonrasında yüzeyi incelendiğinde sadece temas izleri görülmektedir (Şekil 4.124). Aşırı çizik yada ezilmelere rastlanmamıştır. Kuru şartlardaki çiftiyle karşılaştırıldığı zaman aşınma miktarı ve yüzey izleri oldukça azdır (Şekil 4.108). Numune yüzeyleri SEM'de incelendiği zaman en pürüzlü bölgenin kaldırma bölgesi, ardından indirme ve geçiş bölgesi, son olarak tepe noktasının geldiği görülmüştür (Şekil 4.125.a-b, Şekil 4.126.a-b). Tepe noktasındaki görüntü incelendiğinde sağ bölgeden sola doğru kaymaların, (Şekil 4.125.a), kaldırma bölgesinde yukarı doğru malzemenin akma bölgelerinin, indirme bölgesinde izin az olduğu fakat yan bölgede aşınmanın olduğu görülürken alt bölgede de aynı kaymalara rastlanmıştır. Karşı eleman yüzey pürüzlülüğü kompozit yüzey bölgelerine göre daha düşük olurken (Şekil 4.127.a), yüzey çizgileri daha belirgindir (Şekil 4.127.b). Ayrıca kompozit kam profilinden karşı eleman yüzeyine transfer olmuş B_4C partükülleride bulunmaktadır (Şekil 4.127.c).



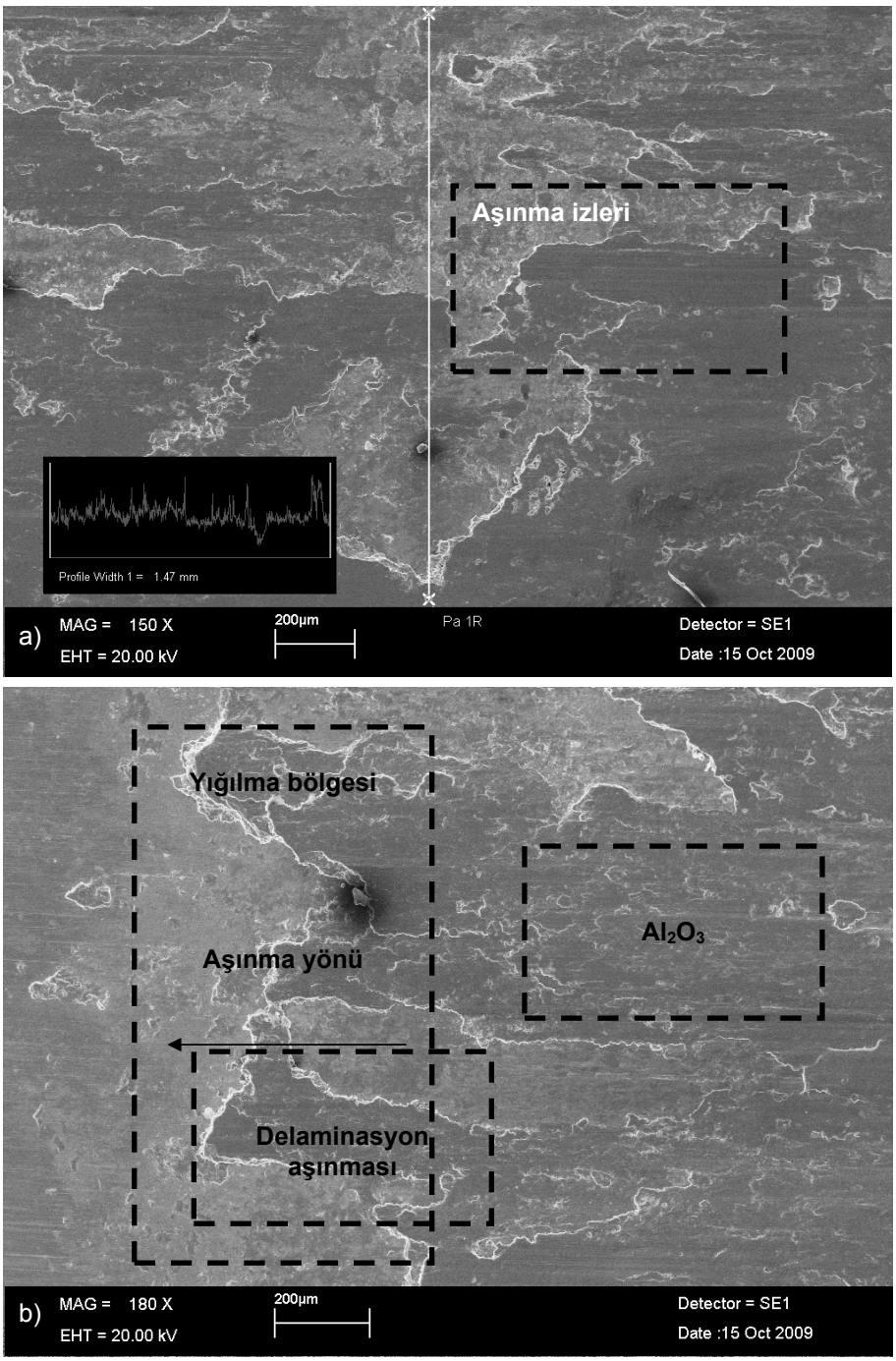
Şekil 4.115. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası tepe noktasındaki a) aşınma çizgileri ve kayma bölgeleri b) partikül üzerine sıvanmış alüminyum, oksit ve Fe c) tepe noktası ve kaldırma bölgesi SEM görüntüsü.



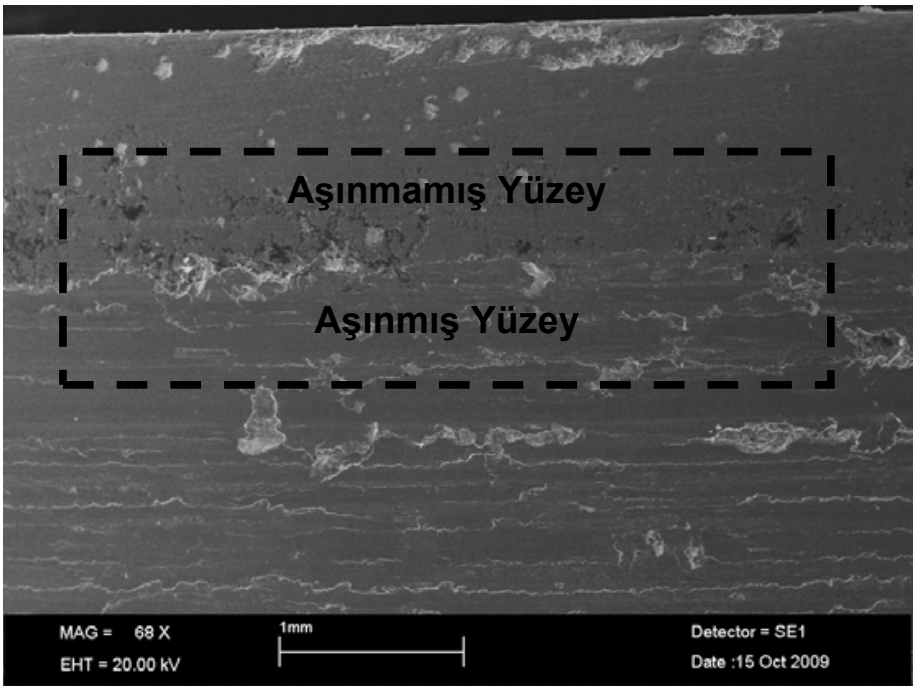
Şekil 4.116. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası a) indirme bölgesi SEM ve pürüzlülük b) indirme bölgesi detayı.



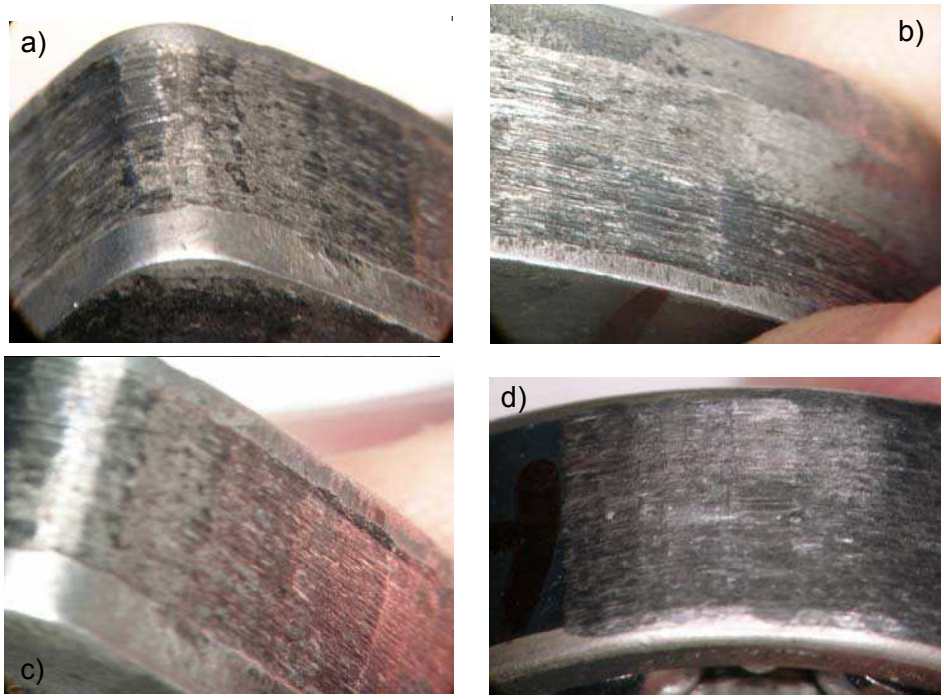
Şekil 4.117. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası ara bölge SEM görüntüsü.



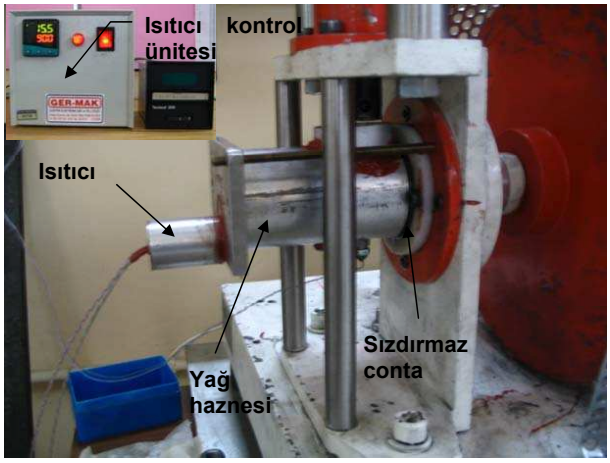
Şekil 4.118. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam karşı eleman kuru şartlar aşınma sonrası yüzey a) SEM görüntüsü ve pürüzlülük b) yan yığılma bölgesi.



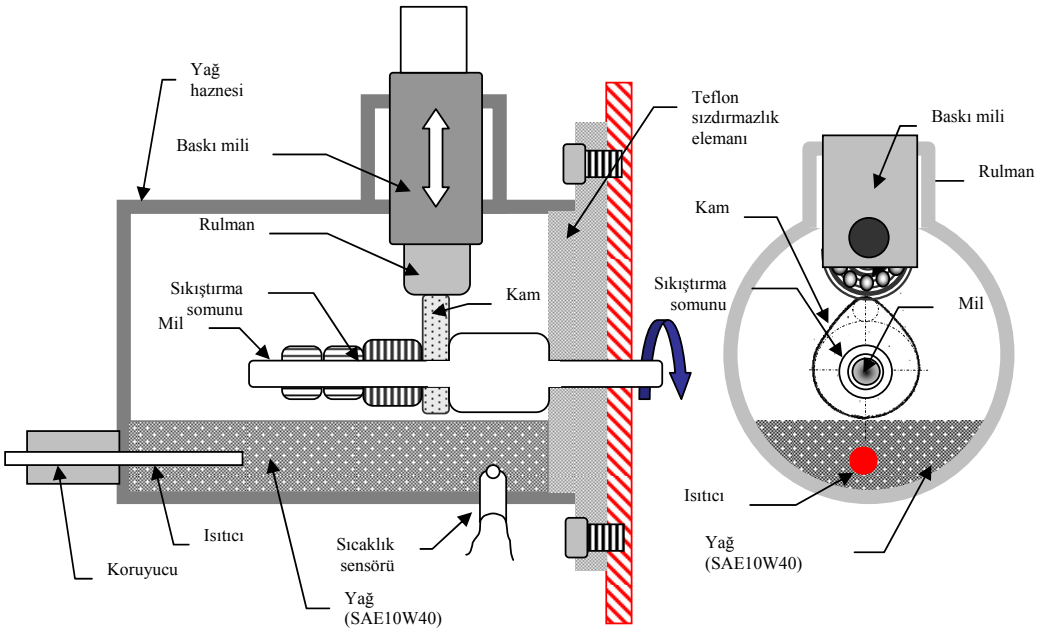
Şekil 4.119. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası yüzey SEM görüntüsü.



Şekil 4.120. AA2124/SiC 20μm/20 kompozit kam kuru şartlar aşınma sonrası yüzeyleri a) üst bölge b) kaldırma bölgesi c) indirme bölgesi d) karşı eleman yüzeyi.

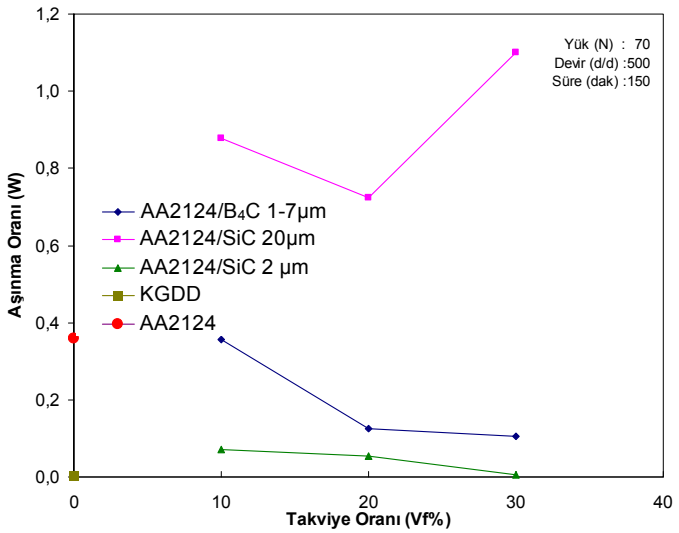


(a)

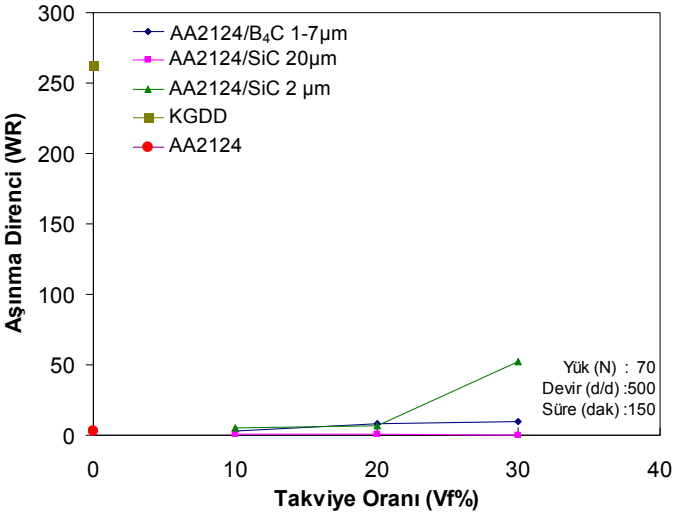


(b)

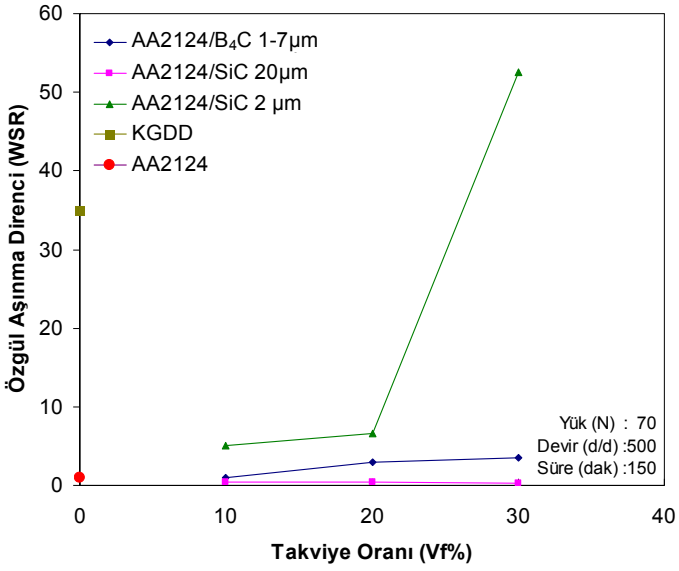
Şekil 4.121. Yağ haznesi a) sistem görünümü b) sistem şematiği.



(a)

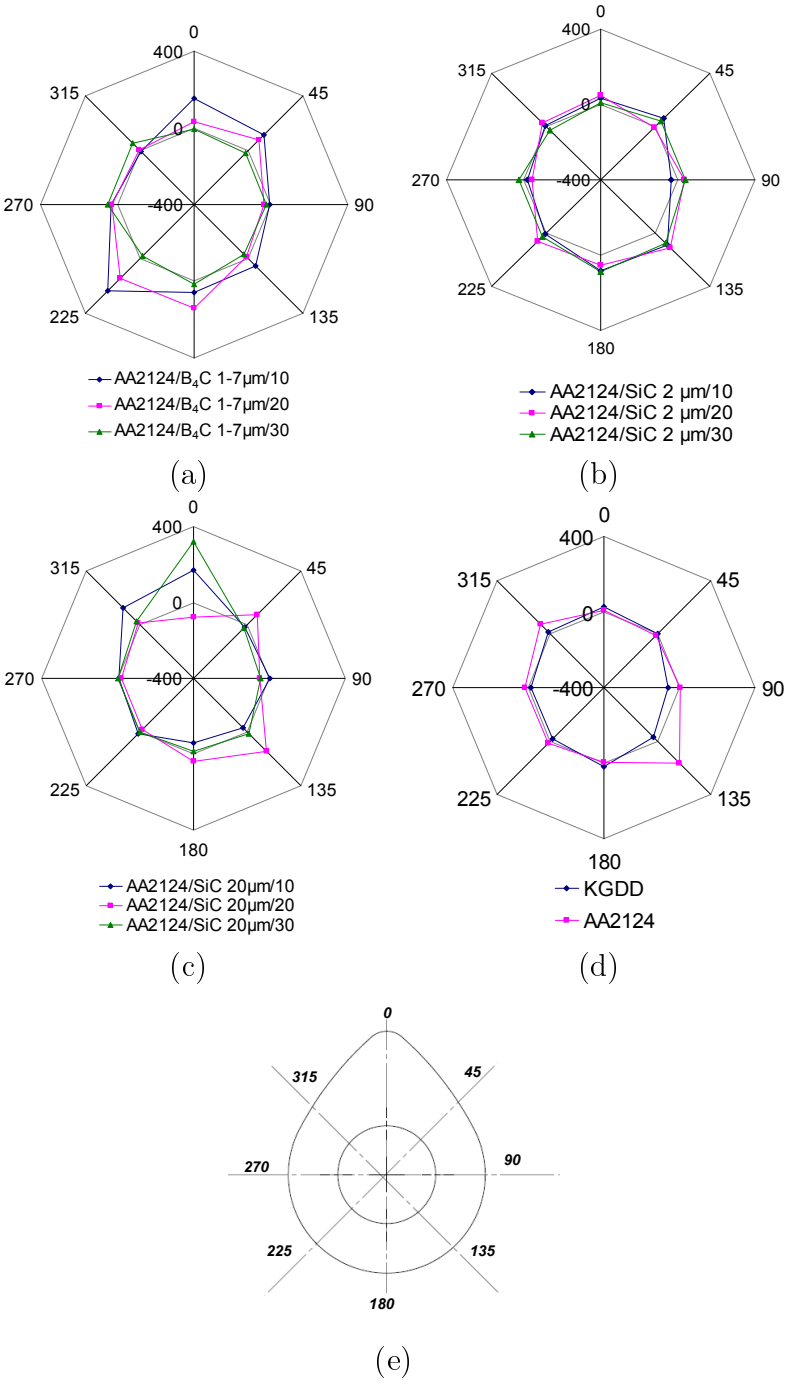


(b)

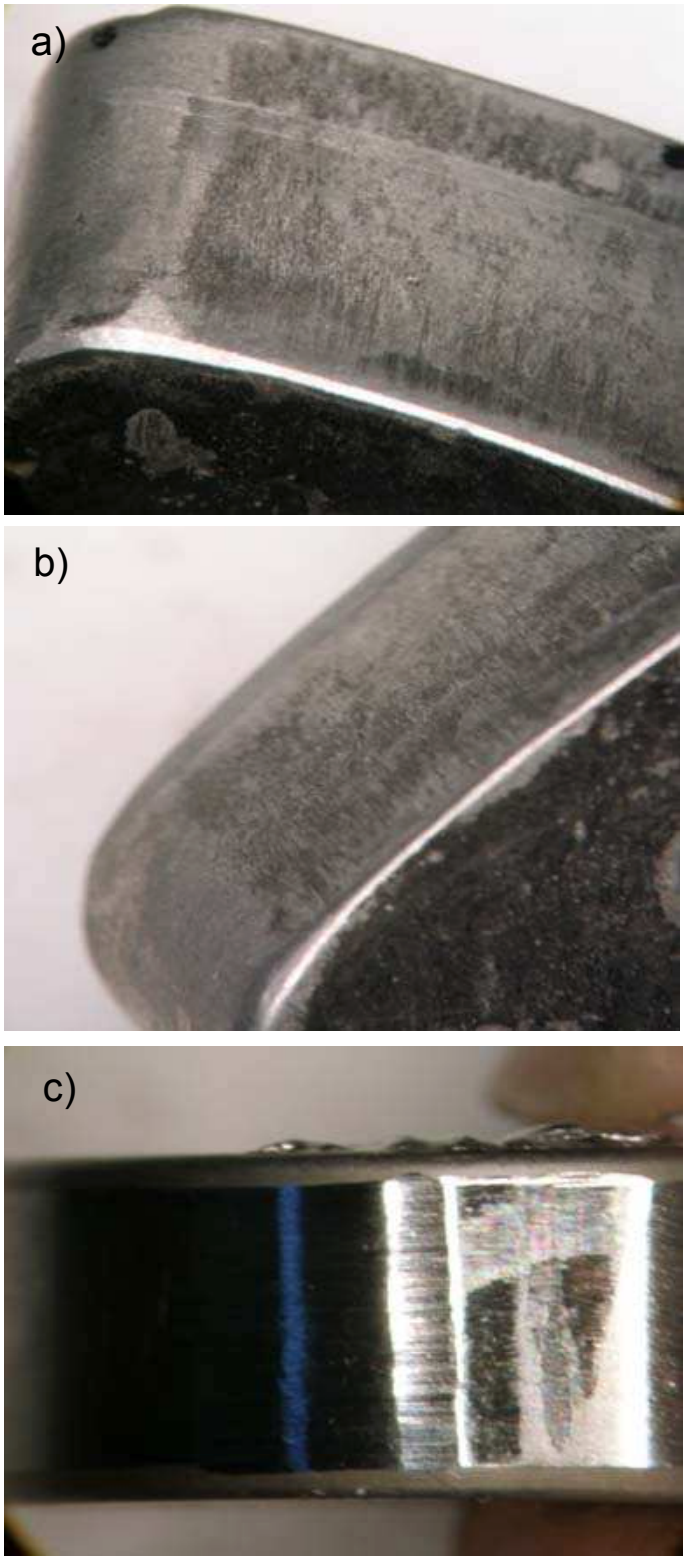


(c)

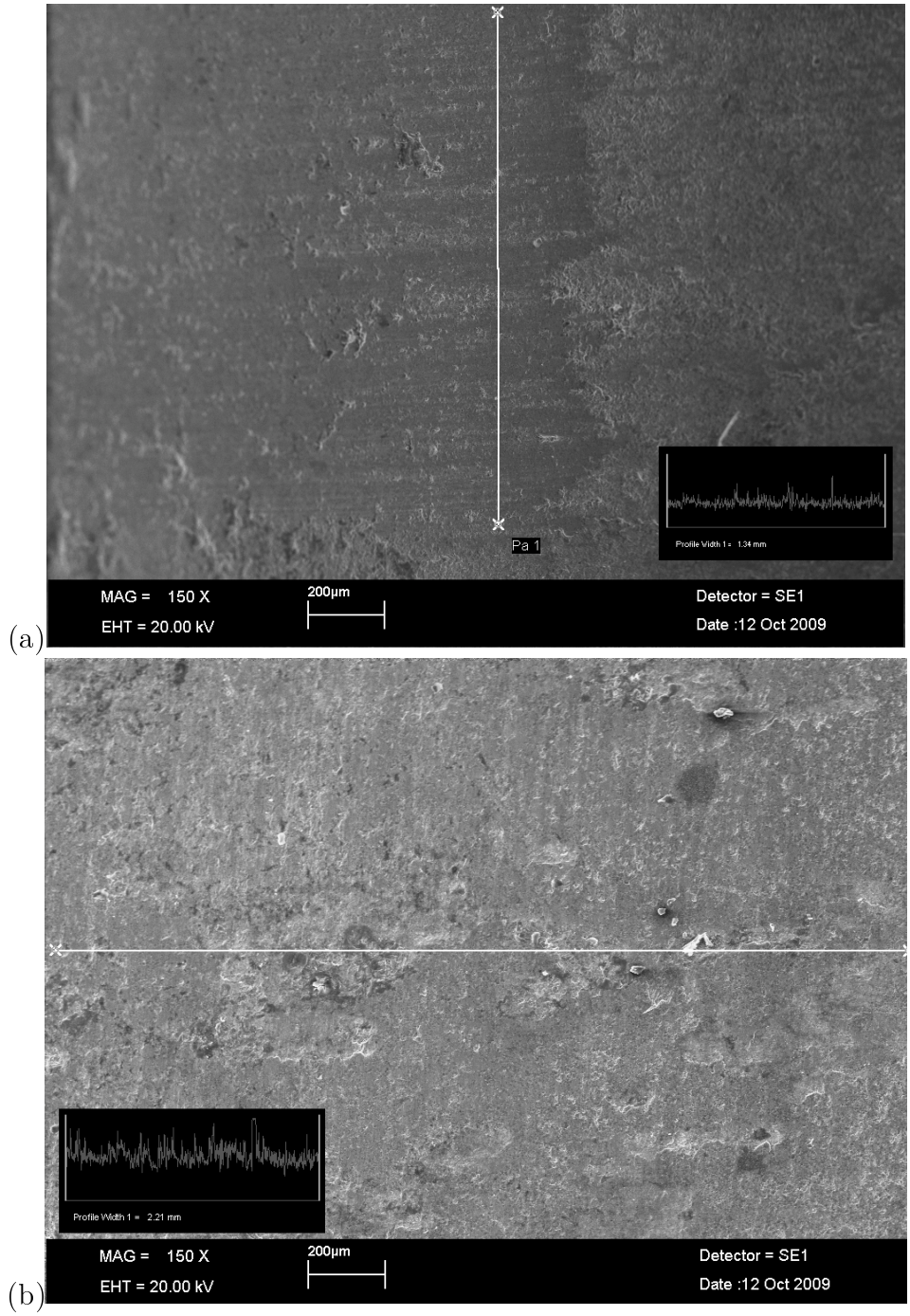
Şekil 4.122. Yağlı şartlarda 2.5 saat aşınma sonrasında numunelerde meydana gelen aşınma grafikleri a) aşınma oranı b) aşınma direnci c) özgül aşınma direnci (F70D500S150).



Şekil 4.123. Yağlı şartlarda 70 N yük, 500 d/d ve 150 dakika aşınma sonrasında numune yüzeylerinde meydana gelen yüzde pürüzlülük değişimi (F70D500S150).



Şekil 4.124. AA2124/B_4C/30 kam profili yağlı şartlarda aşınma sonrası görüntüleri a) kaldırma bölgesi, b) indirme bölgesi, c) karşı eleman yüzeyi.

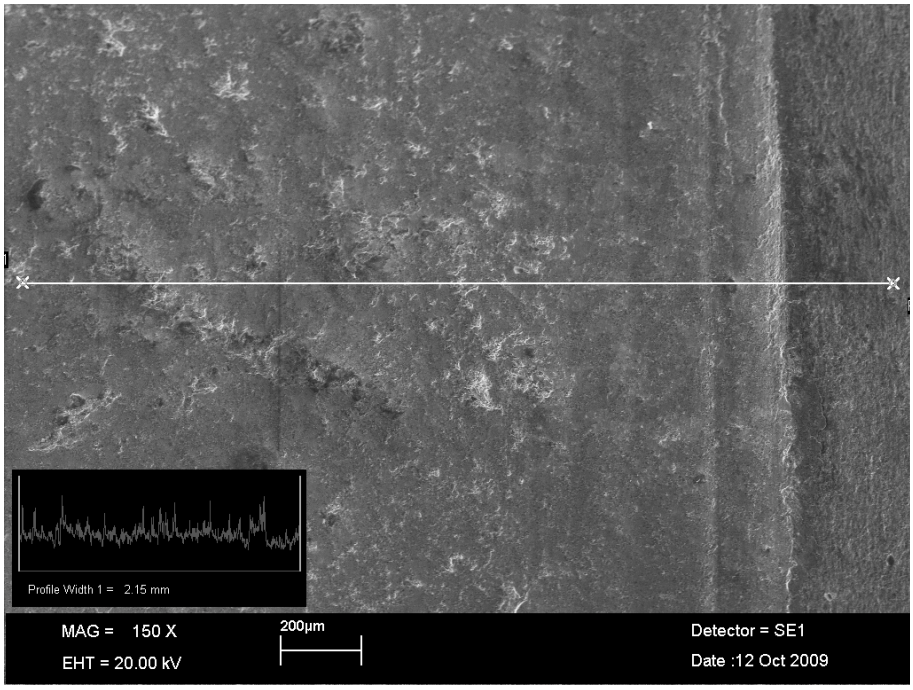


(a)

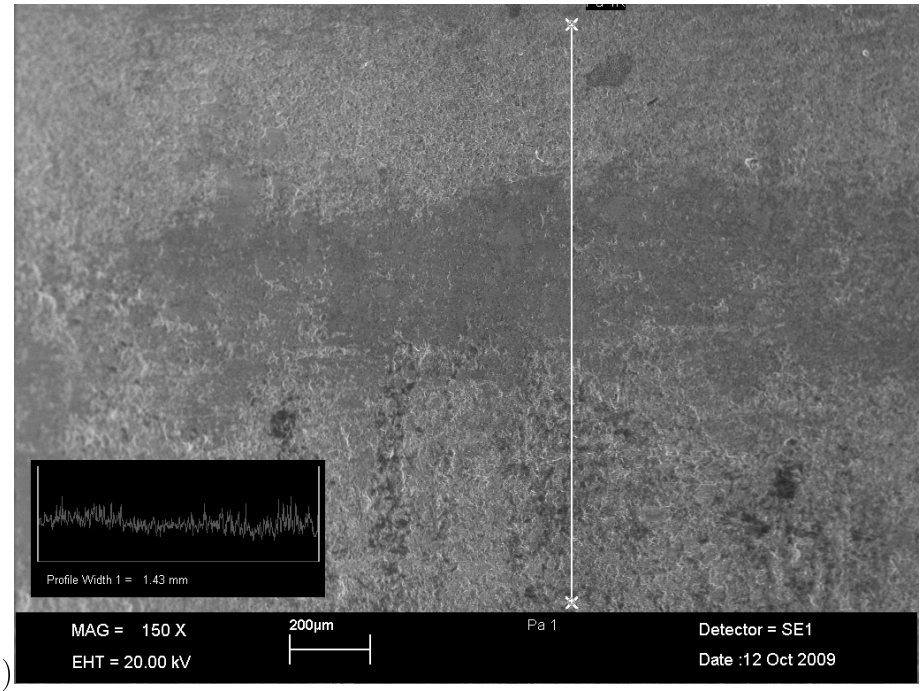
(b)

Şekil 4.125. AA2124/B_4C/30 kam profili yağlı şartlarda aşınma sonrası SEM görüntüleri a) indirme bölgesi b) geçiş bölgesi.

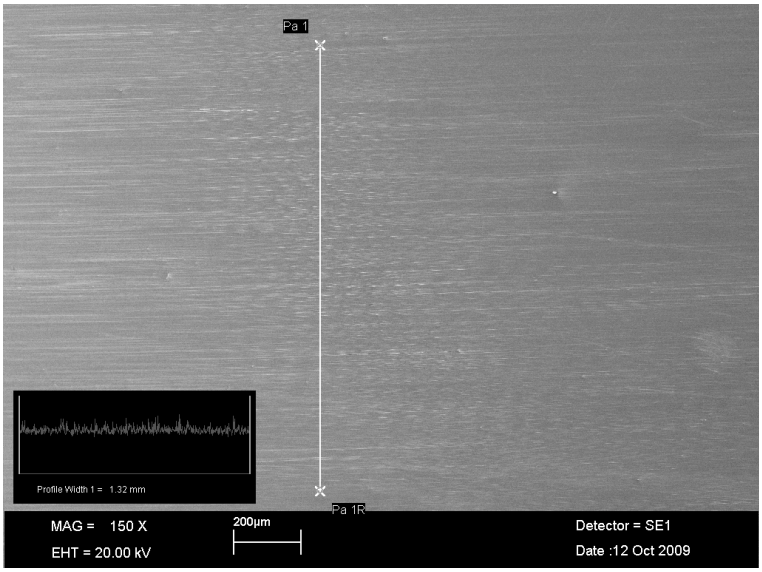
(a)



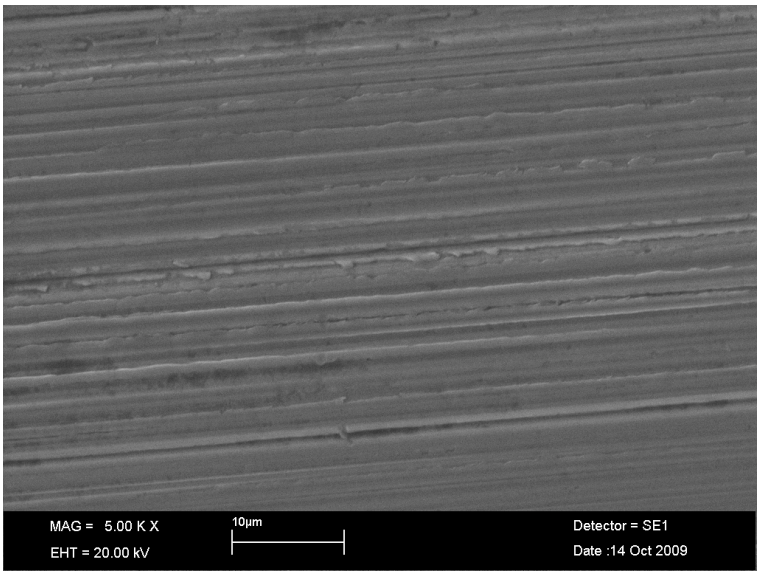
(b)



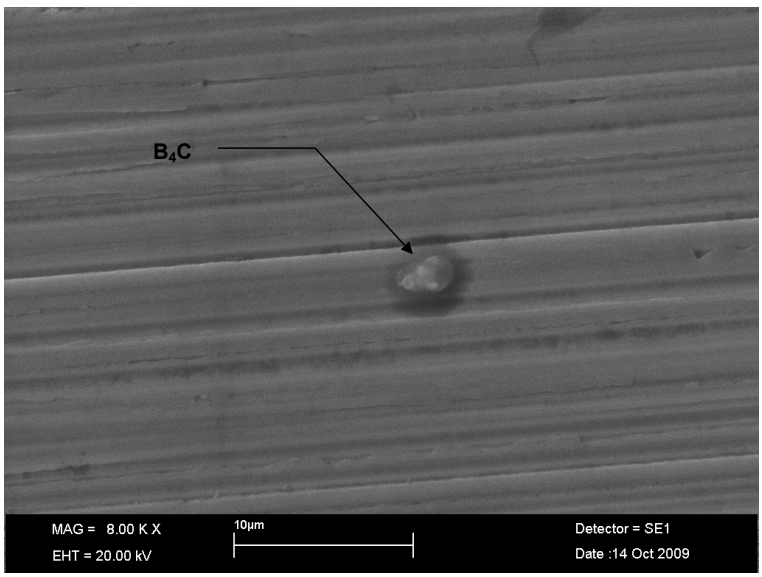
Şekil 4.126. AA2124/ B_4C /30 kam profili yağlı şartlarda aşınma sonrası SEM görüntüleri a)tepe bölgesi b) kaldırma bölgesi c) indirme bölgesi d) geçiş bölgesi.



(a)



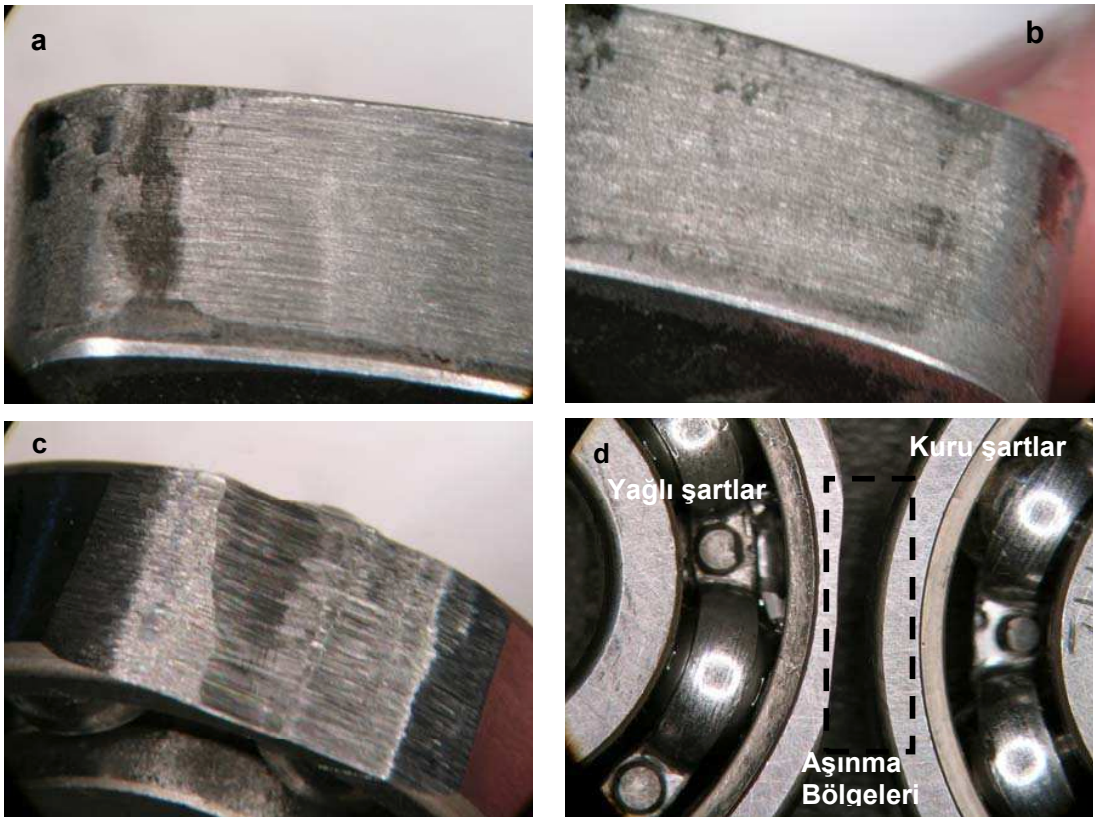
(b)



(c)

Şekil 4.127. AA2124/B_4C/30 kam profili karşı eleman yağlı şartlarda aşınma sonrası SEM görüntüleri a) genel yüzey b) aşınma çizgileri c) yüzeydeki partikül.

AA2124/SiC 20μm/20 takviyeli kompozitlerin kuru şartlardaki aşınma miktarı diğer numunelerinkinden düşük çıkmış olsada aralarındaki farklar aşırı derecede olmamıştı. Yağlı şartlarda ise kompozit kamlar arasında en fazla aşınan numuneler 20μm SiC takviyeli kompozitlerde olmuştur. Ayrıca kompozitteki takviye oranı arttıkça hem numunenin kendisindeki hemde karşı elemandaki aşınma giderek artmıştır. Kuru şartlarda en çok aşınma kaldırma bölgesinde olurken yağlı şartlarda en çok aşınma indirme bölgesinde meydana gelmiştir (Şekil 4.128.a-b). Yağlı deney sonrası karşı eleman yüzeyinde meydana gelen derin iz Şekil 4.128.c'de görülmektedir. Karşılaştırmak amacıyla kuru ve yağlı şartlardaki karşı elemanlar yan yana koyulduğunda aşınma miktarının çokluğu daha net ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.128.d).



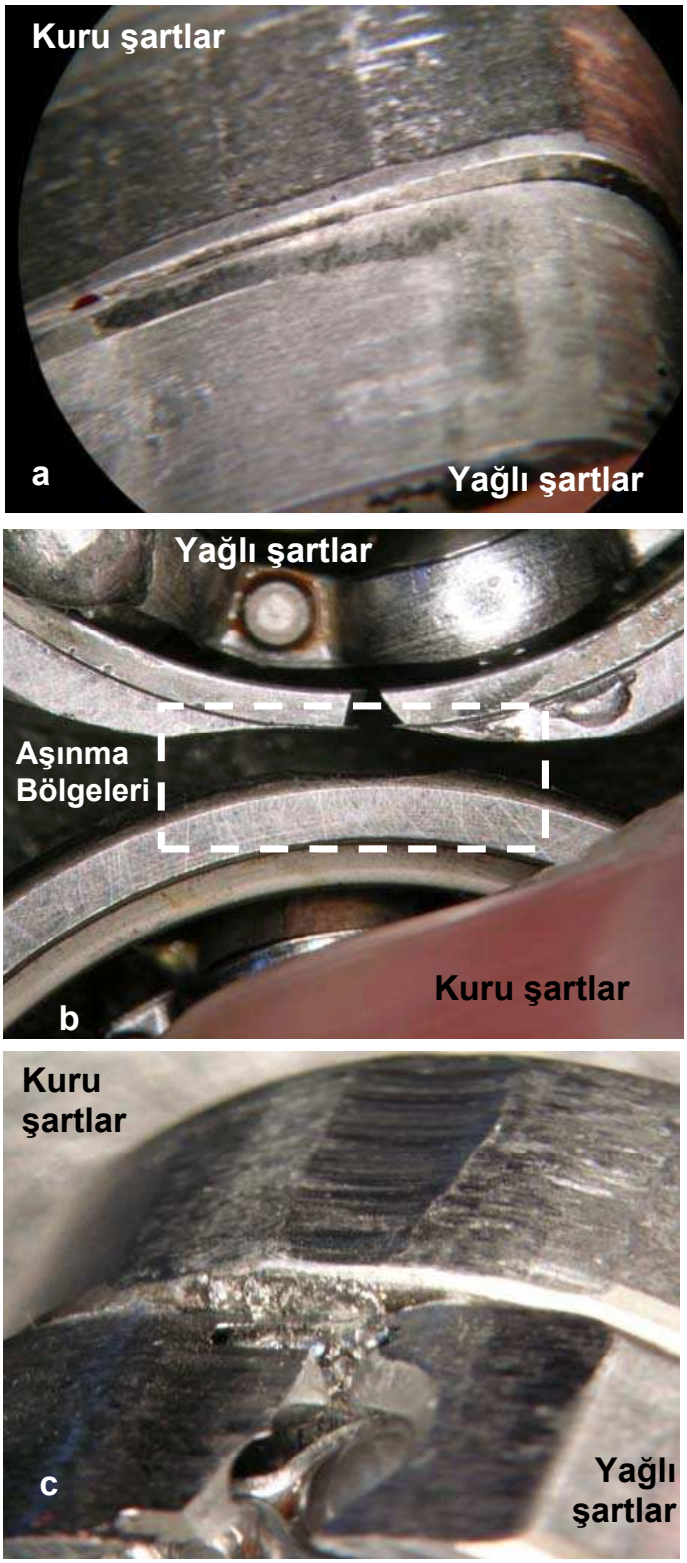
Şekil 4.128. AA2124/SiC 20μm/20 kompozit kam profili yağlı şartlarda aşınma sonrası yüzeyleri a) indirme bölgesi, b) yağlı şartlar kaldırma bölgesi, c) yağlı şartlar karşı eleman yüzeyi, d) yağlı ve kuru şartlar karşı eleman yüzeyleri.

Yağlı şartlarda test edilen bir diğer numunede AA2124/SiC 20μm/30 kam profilidir. Takviye oranının artmasıyla %20 takviyeli olana göre kendi daha fazla aşınırken,

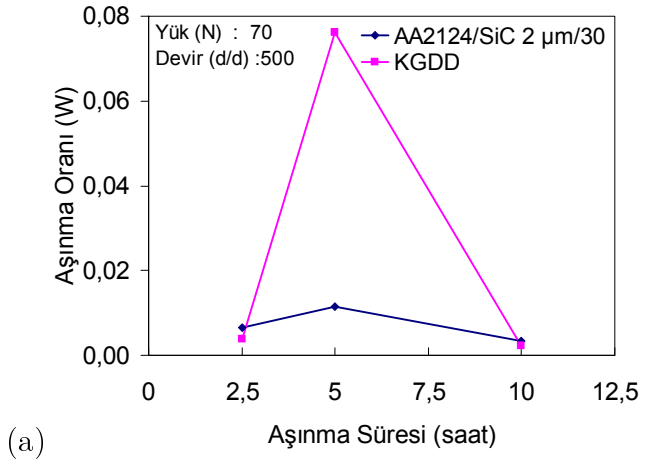
karşı elemanı tamamen aşındırmıştır. Karşı elemandaki fazla aşınmanın sebebi, kompozit içerisinde bulunan partiküller aşınmayla birlikte yüzeyden ayrılıp yağ içerisine karışmakta, hareketin devamıyla birlikte yağ içerisindeki partiküller temas yüzeyini fazladan aşındırıcı eleman olarak etkilemekte dolayısıyla beklenmeyen miktarda aşınmalar meydana gelmektedir (Şekil 4.129.a-b-c).

Yağlı şartlardaki aşınma deneylerinin ikinci aşamasında birinci aşamada en iyi sonucun elde edildiği AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam profili 500 d/d döndürülüp 70 N yük uygulanırken, deneyler farklı aşınma sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Kompozitler 150, 300 ve 600 dakikalık sürelerde sürtünmeye maruz bırakılmıştır. Karşılaştırma yapabilmek maksadıyla aynı şartlar KGDD kam profilinede uygulanmıştır. Yine 60 ml yağ kullanılıp 90°C'ye ısıtılmıştır. Her iki malzemede aşınma süresinin artmasıyla aşınma oranları önce artmakta daha sonra düşmektedir (Şekil 4.130.a). 10 saatlik deneylerde her iki malzemede aşınma direnci açısından iyi özellik gösterirken (Şekil 4.130.b), malzemenin yoğunluğunun etkili olduğu özgül aşınma direncinde AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam profili daha iyi sonuç vermektedir (Şekil 4.130.c). Burada önemli olan etken yoğunluktur. Farklı iki malzeme aynı oranda (mm^3) aşınabilir veya gram cinsinden aynı aşınabilir. Yumuşak olan malzeme yoğunluğu az olmasından dolayı yüzey daha fazla aşınmakta, yüzeydeki izlerden dolayı daha çok aşınmış gibi görülebilmektedir. Sert olan malzeme ise yok denecek kadar az aşınma izine sahipken, az aşınan yüzeydeki çiziklerden kopan malzeme miktarı az bile olsa yoğunluktan dolayı yumuşak olanınkiyle aynı ağırlığa denk gelebilmektedir. Burada her iki malzeme aynı oranda aşınıyorsa, ağılıktan tasarruf etmek amacıyla yoğunluğu ve ağırlığı daha az olan malzeme seçilmelidir. Malzemenin aşınma davranışı kadar karşı malzemeye verdiği hasarlarda dikkate alınmalıdır (Şekil 4.131). KGDD kam profili karşı elemanında sürenin artmasıyla birlikte ilk başlarda yüksek olan aşınma kaybı azalırken, genelde düşük olan AA2124/SiC 2μm/30 karşı eleman kayıp miktarına yaklaşmıştır (Şekil 4.131).

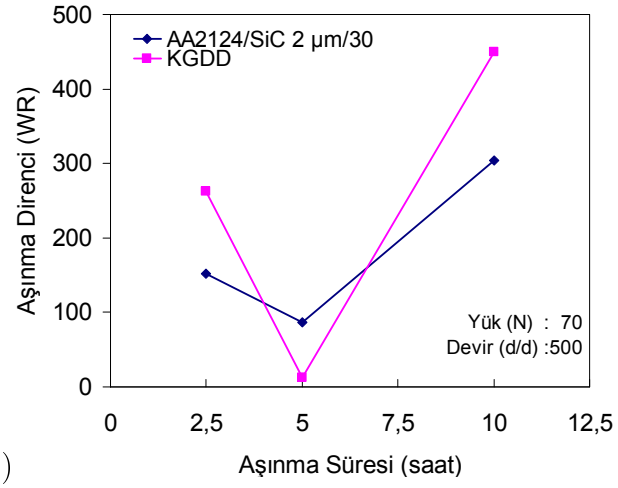
Diğer aşamada AA2124/SiC 2μm/20 takviyeli kompozit kam profili üzerine uygulanan yük artırılmış ve sonuçları incelenmiştir. Kam üzerine 70, 90, 115 ve 140 N yük uygulanmıştır. Bahsedilen yükler kam profili üzerindeki minimum yüklerdir.



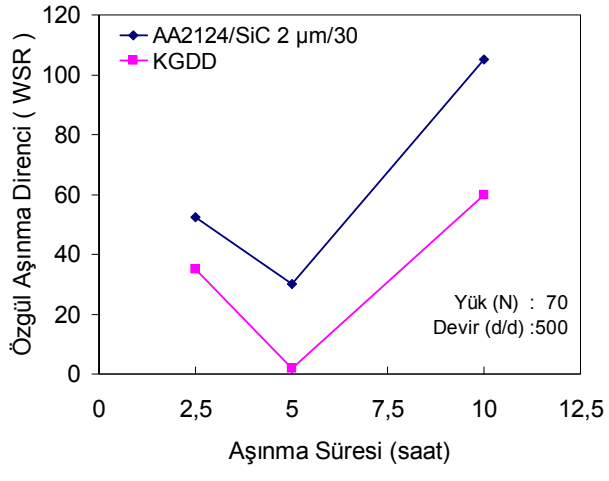
Şekil 4.129. AA2124/SiC 20μm/30 kuru ve yağlı şartlar a) kam profili aşınma yüzeyleri, b) karşı eleman aşınma bölgesi yan profili, c) karşı eleman aşınma yüzeyleri.



(a)



(b)

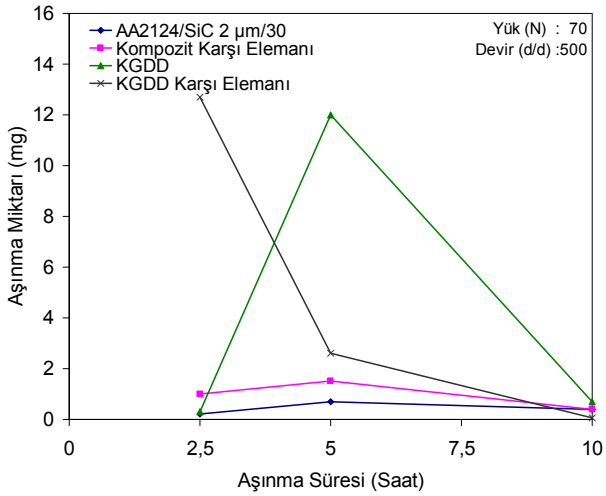


(c)

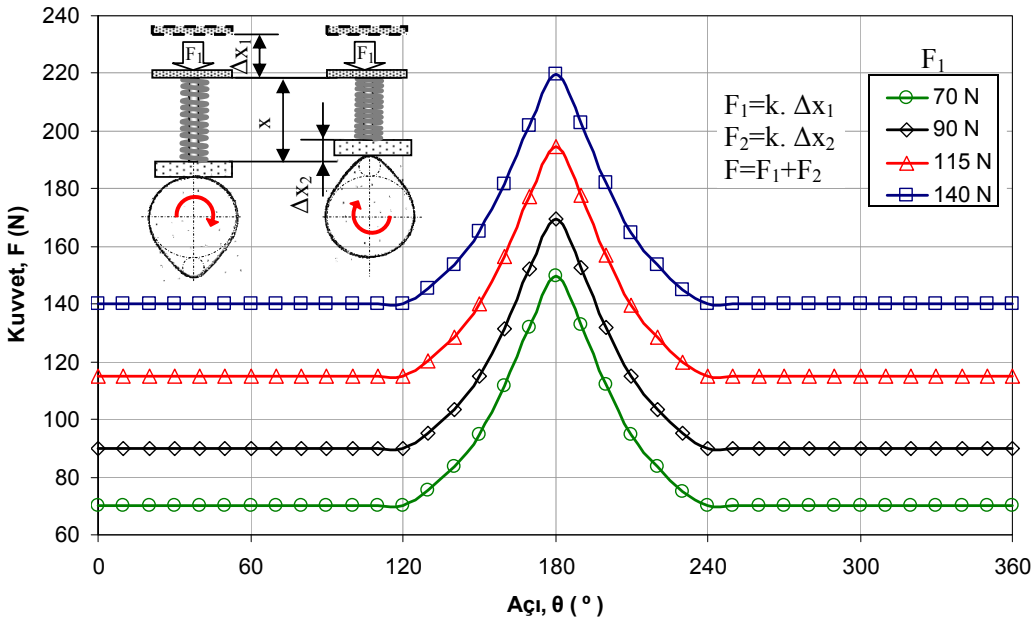
Şekil 4.130. Yağlı şartlarda farklı deney süreleri sonrasında numunelerden hesaplanan aşınma direnci a) aşınma oranı b) aşınma direnci c) özgül aşınma direnci (F70D500S150-300-600).

Üst bölgede bu yükler sırasıyla 150, 170, 195 ve 220 N'a ulaşmaktadır (Şekil 4.132).

Uygulanan yük arttıkça kompozit kam profilindeki kayıp (W) azalmakta, dolayısıyla aşınma direnci (W_R) ve özgül aşınma direnci (W_{SR}) artmaktadır (Şekil 4.133.a-b-c).

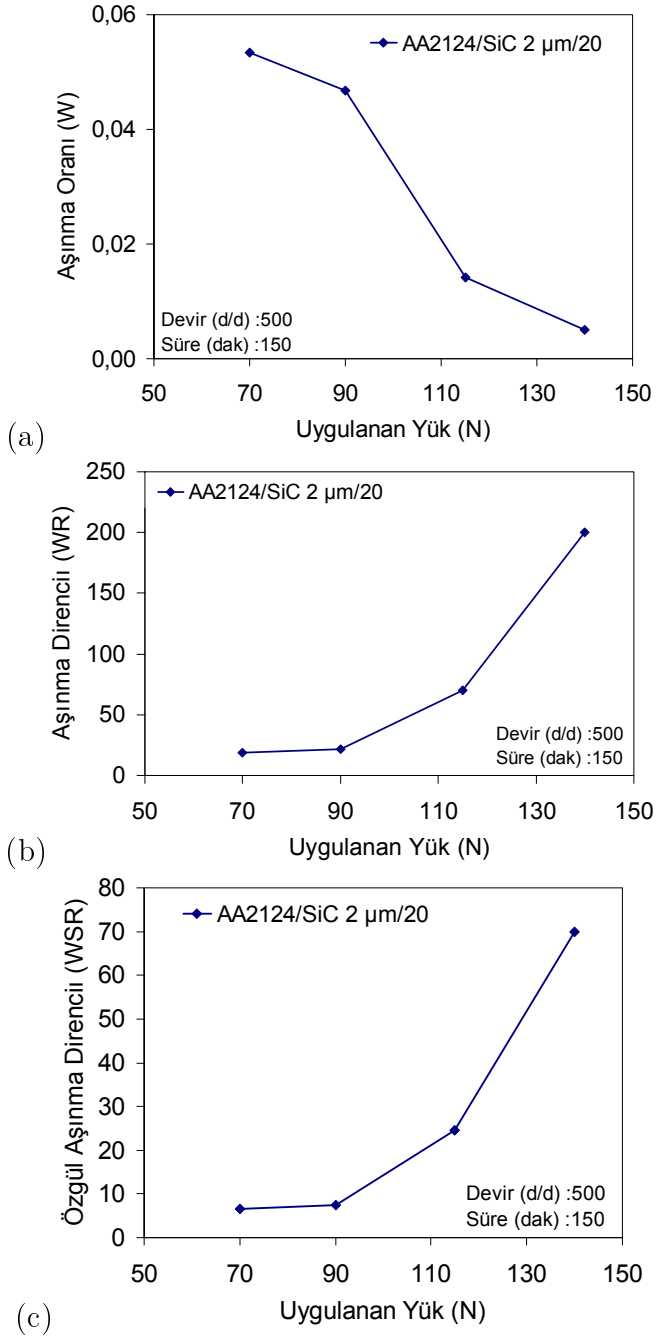


Şekil 4.131. Yağlı şartlarda farklı deney süreleri sonrasında numunelerde ve karşı elemanlarda meydana gelen aşınma miktarları (F70D500).



Şekil 4.132. Kam profili üzerine uygulanan kuvvetlerin profil üzerindeki açıya bağlı olarak değişimi.

Yükün artması, yük kolundaki yayı sıkıştırmakta, karşı eleman ve kam numune arasındaki temas artmakta ve sistemde titreşim azalmaktadır. Titreşim genliğinin azalması numune üzerindeki vuruntu ve ani yük değişimini engellemektedir. Buna ek olarak SiC 2μm %20 ve 30 oranında takviyeli kompozitleri kendi aralarında karşılaştırmak maksadıyla yük 115 N'a çıkartılıp 150, 300 ve 600 dakika sürelerinde aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Bu deneyde performans testlerinde KGDD kam ile karşılaştıracağımız kompozit numune seçimini doğru ve kesin olarak yapmak



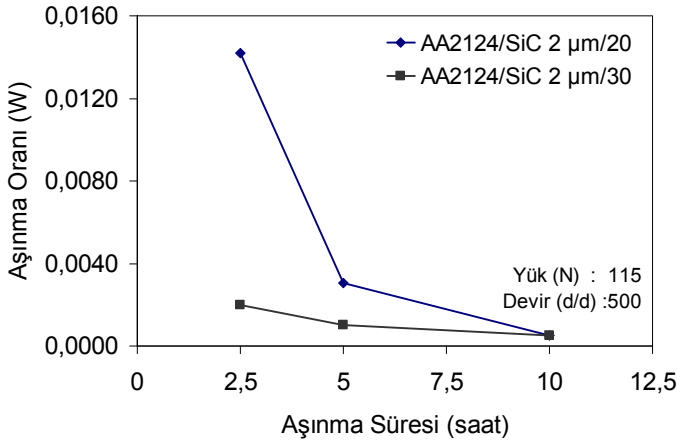
Şekil 4.133. Yağlı şartlarda farklı yükler uygulanan deneyler sonrasında AA2124/SiC 2μm/20 kompozit kam profilinde meydana gelen aşınma direnci, a) Aşınma oranı, b) aşınma direnci, c) özgül aşınma direnci (D500S150).

amaçlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, (Şekil 4.134) %30 takviyeli kompozitin genel olarak diğerine göre daha az aşınmış dolayısıyla aşınma direnci ve özgül aşınma direnci daha fazla olmuştur. Deney sonrasında karşı eleman kayıpları incelendiğinde 150 ve 300 dakikalık deneylerde kayıplar birbirine yakın olurken 600

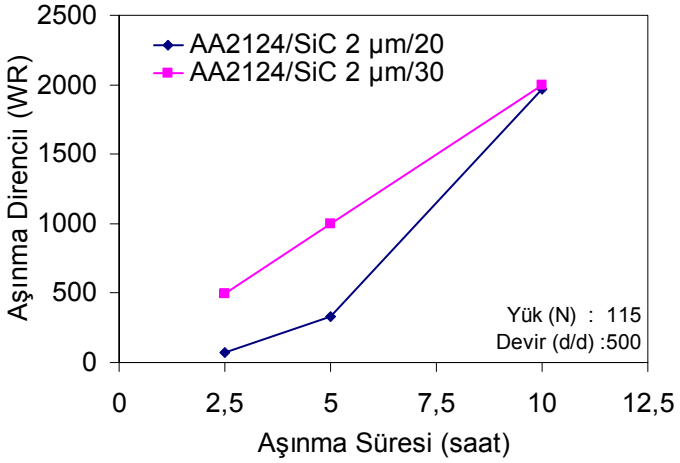
dakikalık deneyde %30 takviyeli kompozit kam karşı elemanı daha fazla aşınmıştır (Şekil 4.135). 1200 dakikalık yağlı şartlarda gerçekleştirilen performans testi sonrasında karşı elemanlardaki kayıp miktarları karşılaştırıldığında en çok kayıp SiC takviyeli kam profili karşı elemanında meydana gelirken en az aşınma KGDD kam profili karşı elemanında ölçülmüştür (Şekil 4.137).

Gerçekleştirilen bu aşamalardan sonra yükün ve sürenin arttırılarak malzemelerin performans testlerinin yapılması kararlaştırılmıştır. KGDD, AA2124/SiC 2μm/20 ve AA2124/SiC 2μm/30 kam profilleri son performans testine tabi tutulmuştur. Performans testinde minimum yük 140 N, maksimum yük 210 N olurken, deney süresi 1200 dakika (20 saat) olarak belirlenmiştir. Uygulamada kullanılan kam profilleri üzerine ortalama 110 N (11 kg) yük geldiğine göre bu değerler oldukça yüksek deney şartları olarak karşımıza çıkmaktadır. Deneyler yağlı şartlarda 60 ml yağ kullanılıp, yağın 90°C'a kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta sabit tutulduğu hazne içerisinde gerçekleştirilmiştir. aşınma sonrasında malzemelerdeki kayıplar hesaplandığında %20 takviyeli kompozit kam diğerlerine göre daha fazla aşınmıştır. KGDD ve AA2124/SiC 2μm/30 kamların aşınma miktarları birbirine yakın değerlerdedir (Şekil 4.136.a). Diğerlerine göre daha az aşınan AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam profilinin aşınma direnci diğerlerine göre daha fazladır (Şekil 4.136.b), yoğunluğun etkin olduğu özgül aşınma direncinde ise AA2124/SiC 2μm/30 kam profilinin KGDD'den oldukça iyi olduğu Şekil 4.136.c'de görülmektedir.

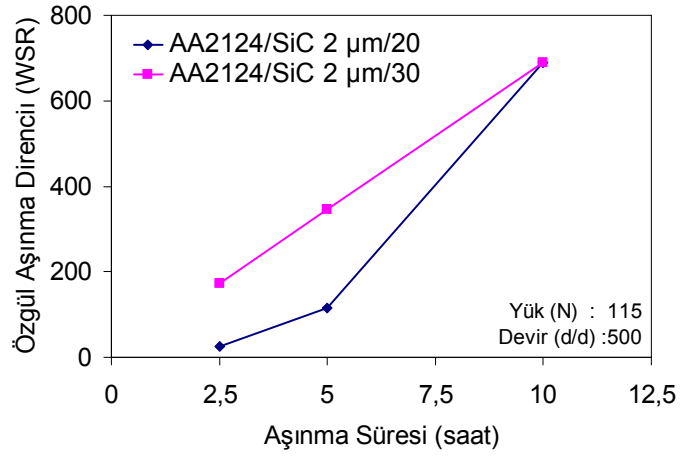
Performans testleri sonrasında AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam profilin yüzeyleri SEM'de incelenmiştir. Deney sonrasında kam burnunda herhangi bir çöküntüye, fazla aşınmaya rastlanmamıştır (Şekil 4.138.a). Sadece tepe bölgesinden indirme bölgesine geçişten sonra yan kısımlarda temas bölgesinin yeri belirgin bir şekilde izlenebilmektedir. Aşınma izleri ve kayma bölgelerine kaldırma bölgesinde rastlanmıştır (Şekil 4.138.b). Bu bölgede de aşınma karakteristiğinin, kayma ve aşınma çizgilerinden yola çıkarak abraziv ve adheziv aşınmanın karışımı olduğu söylenebilir. Aynı aşınma yapısı indirme ve geçiş bölgesinde de mevcuttur (Şekil 4.139.a-b). Kaldırma bölgesinin pürüzlülüğü diğer bölgelerden fazla olurken, en düşük pürüzlülük geçiş bölgesindedir (Şekil 4.138.b, 4.139.a-b). Kompozit kam karşı eleman yüzeyinde aşırı pürüzlülük oluşmamıştır ve yüzeyi kompozite göre daha



(a)

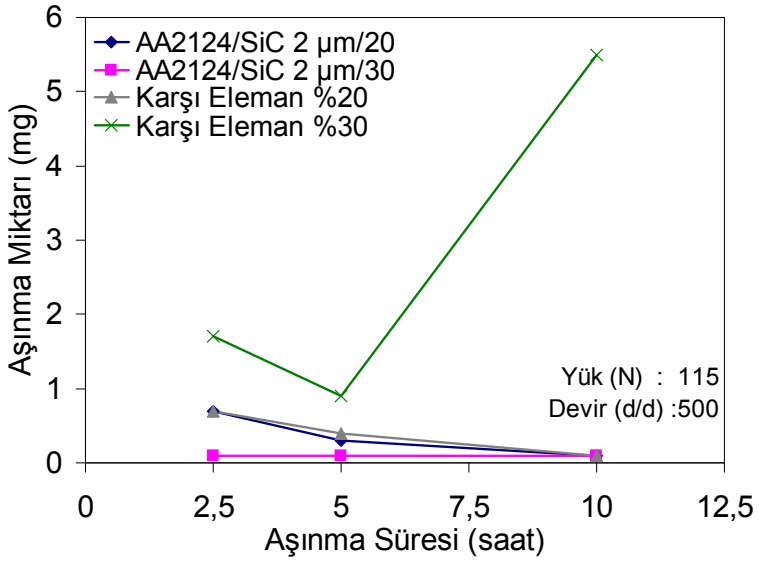


(b)



(c)

Şekil 4.134. Yağlı şartlarda farklı deney süreleri sonrasında AA2124/SiC 2μm/20 ve AA2124/SiC 2μm/30 ve kompozit kam profilinde numunelerde meydana gelen aşınma direnci a) aşınma oranı b) aşınma direnci c) özgül aşınma direnci (F115D500).

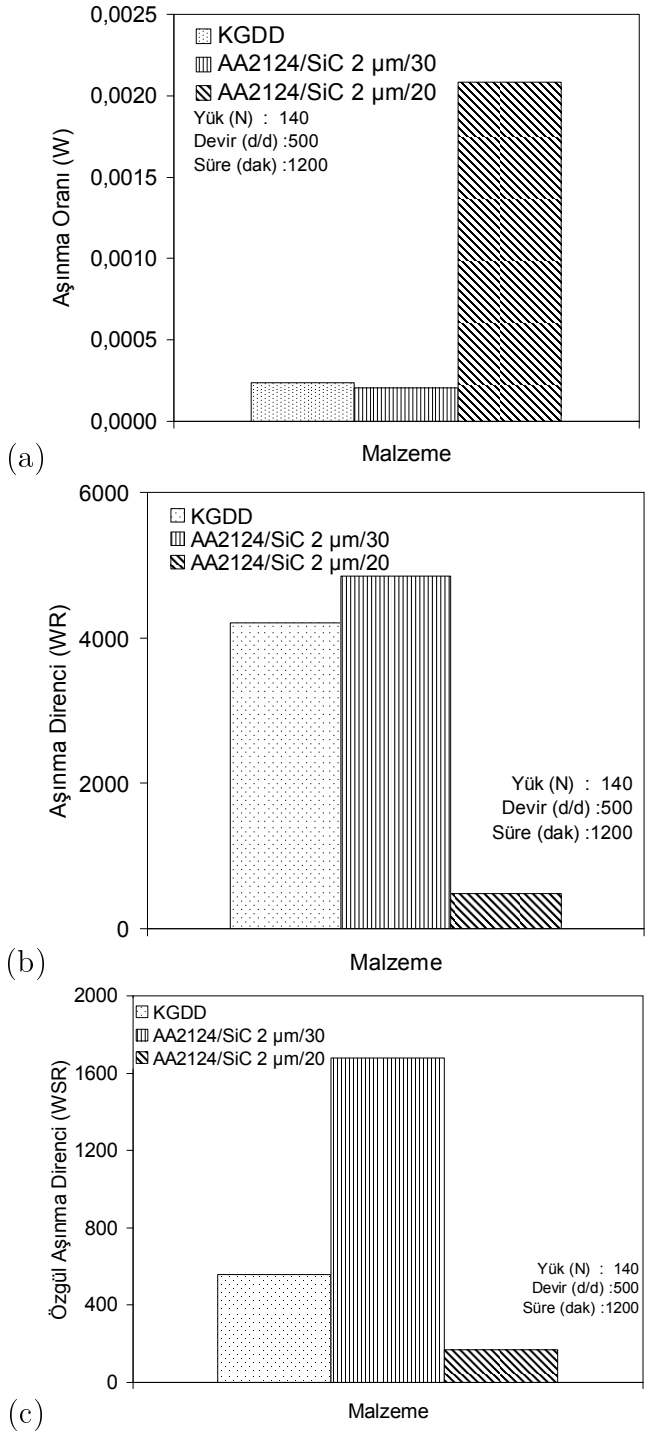


Şekil 4.135. Yağlı şartlarda farklı deney süreleri sonrasında numunelerde ve karşı elemanlarda meydana gelen aşınma miktarları (F115D500).

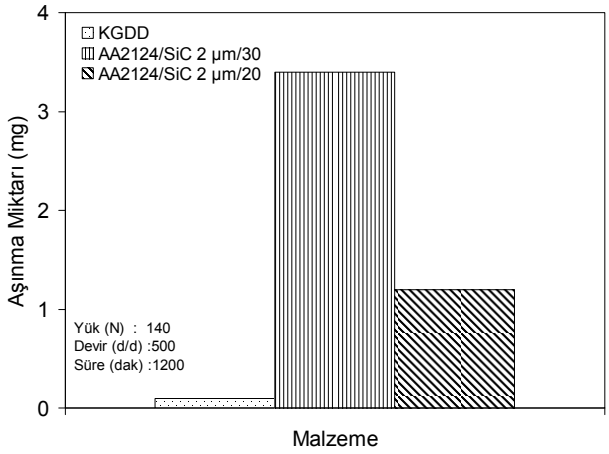
pürüzsüzdür (Şekil 4.140.a). Yüzeyde oluşan aşınma çizgileri herhangi bir sıvanma olmadığı için belirgin durumdadır (Şekil 4.140.b).

Karşı eleman yüzey incelemeleri sırasında, rulmanın kendinden kopup tekrar üzerine yapışan Fe ve Cr parçalarına rastlanmıştır (Şekil 4.141). Ayrıca aşınma sırasında kompozit üzerinden karşı elemana transfer olup yüzeyde yada yüzeye gömülmüş durumdaki SiC partikülleride Şekil 4.142.a-b de görülmektedir. Partikül üzerindeki noktasal analizlerde, partikülün SiC olduğu, üzerinde Fe ve Cr varlığı tespit edilmiştir.

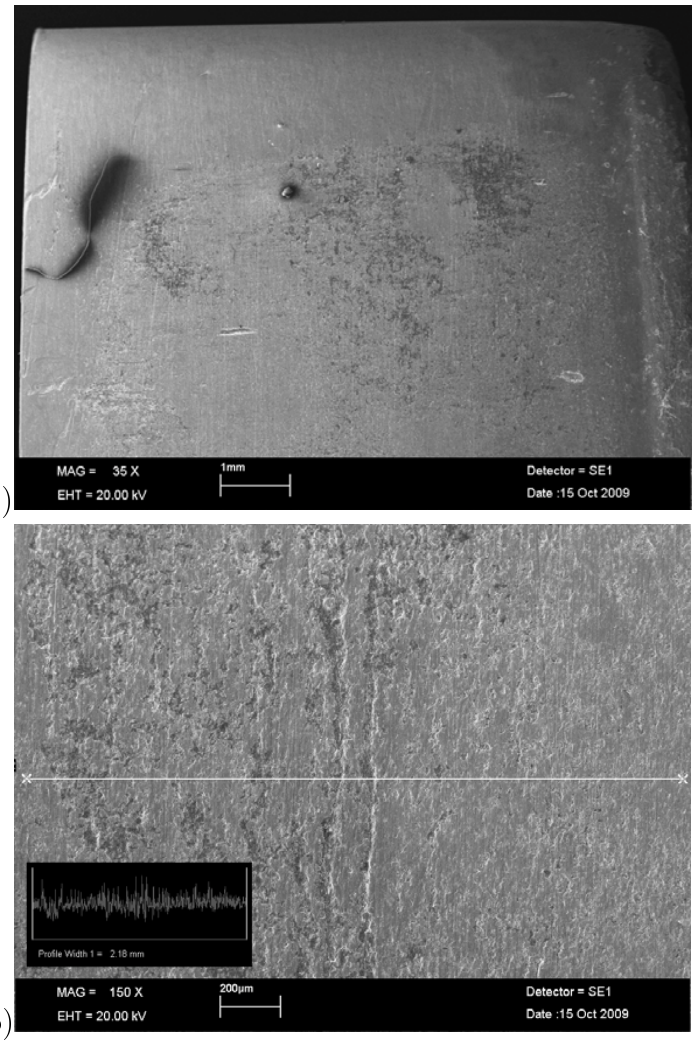
Aşınma sonrasında KGDD kam profili ve karşı eleman yüzeyinde aşınma çizgileri rahatlıkla görülebilmektedir. Kam üzerinde abraziv aşınma izleri mevcuttur, adheziv aşınma karakteristiği olan kayma bölgelerine rastlanmamıştır (Şekil 4.143).



Şekil 4.136. Yağlı şartlarda farklı deney süreleri sonrasında numunelerdeki a) aşınma oranı b) aşınma direnci c) özgül aşınma direnci (F140D500S1200).



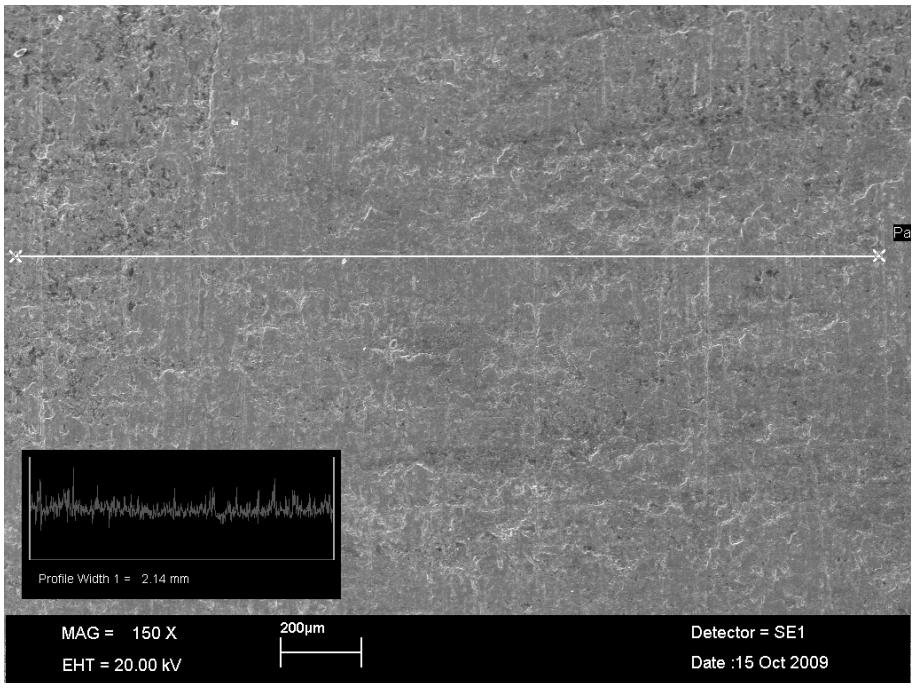
Şekil 4.137. Yağlı şartlarda karşı malzemelerdeki kayıp miktarları (F140D500S1200).



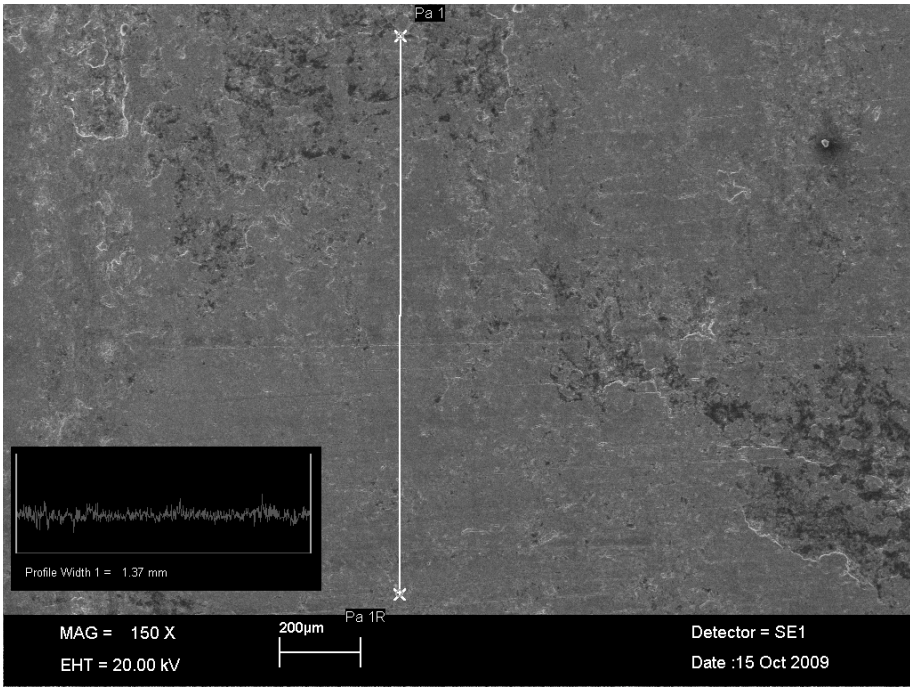
(a)

(b)

Şekil 4.138. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam aşınma sonrası yüzey SEM görüntüleri a) tepe ve indirme bölgesi b) kaldırma bölgesi.

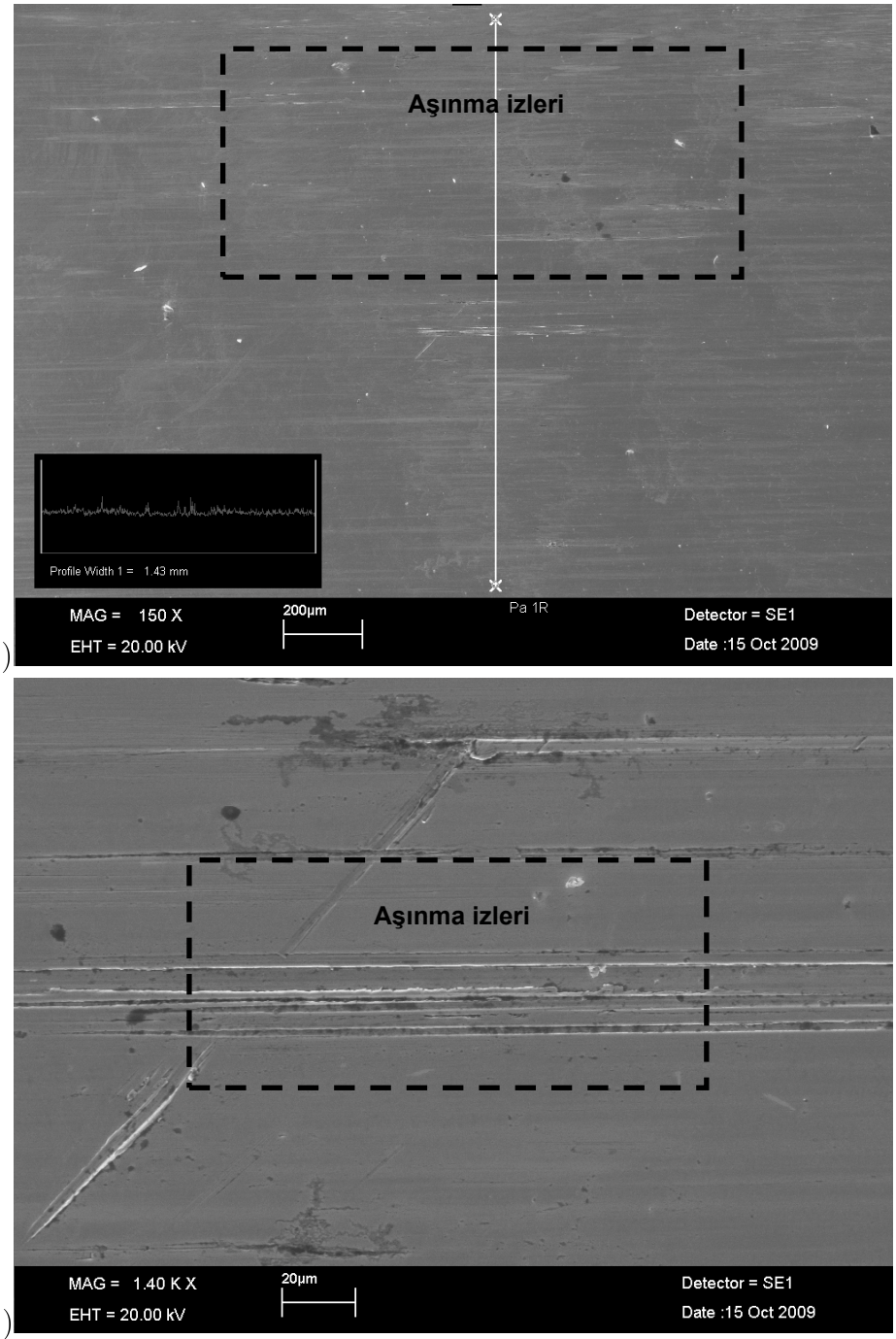


(a)

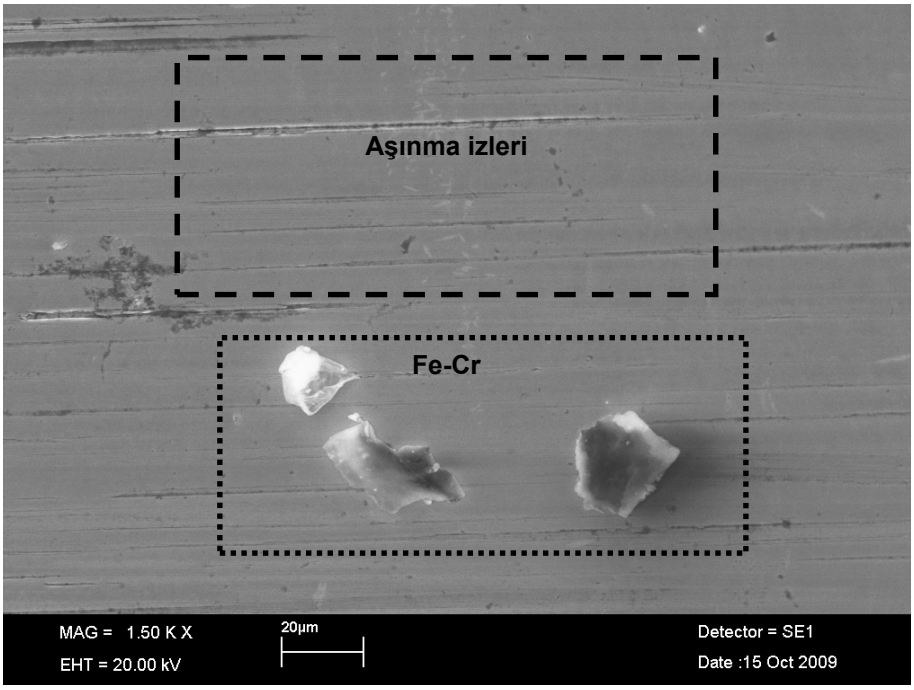


(b)

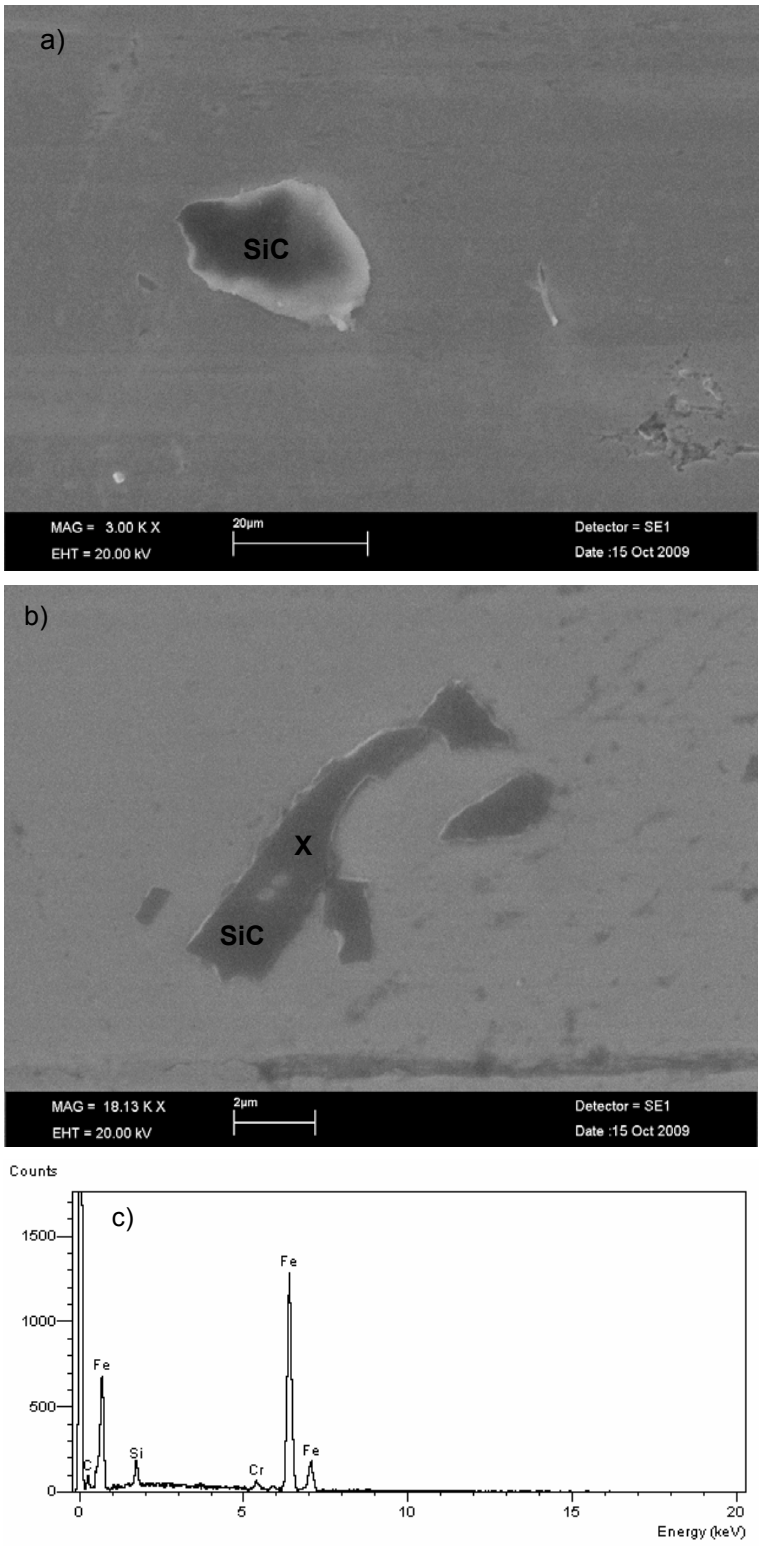
Şekil 4.139. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam aşınma sonrası yüzey SEM görüntüleri a) indirme bölgesi b) geçiş bölgesi.



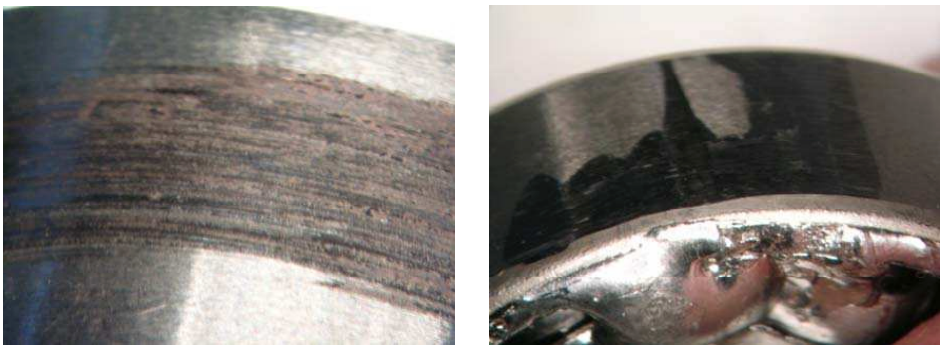
Şekil 4.140. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam karşı eleman yüzey SEM görüntüleri a) genel görüntü ve pürüzlülük, b) aşınma izleri detayı.



Şekil 4.141. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam karşı eleman yüzeyindeki Fe-Cr varlığı.



Şekil 4.142. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam karşı eleman yüzeyindeki a) SiC partikülü, b) yüzeye gömülmüş SiC partikülü c) x noktası analizi.

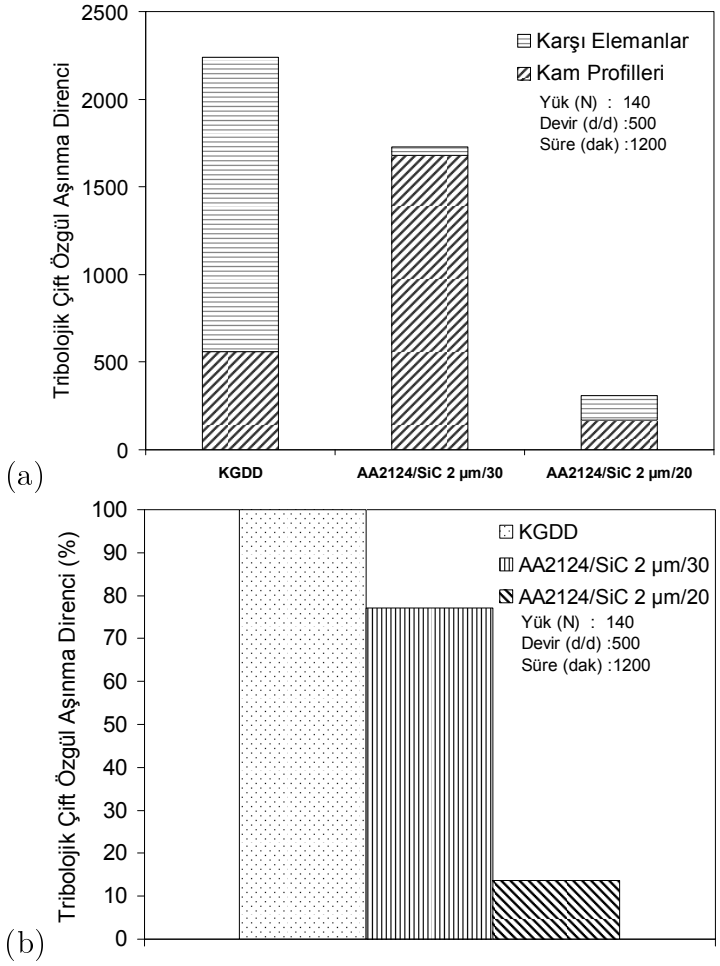


(a) (b)

Şekil 4.143. 20 saatlik yağlı şartlarda aşınma sonrası a) KGDD kam yüzeyi b) karşı eleman yüzeyi.

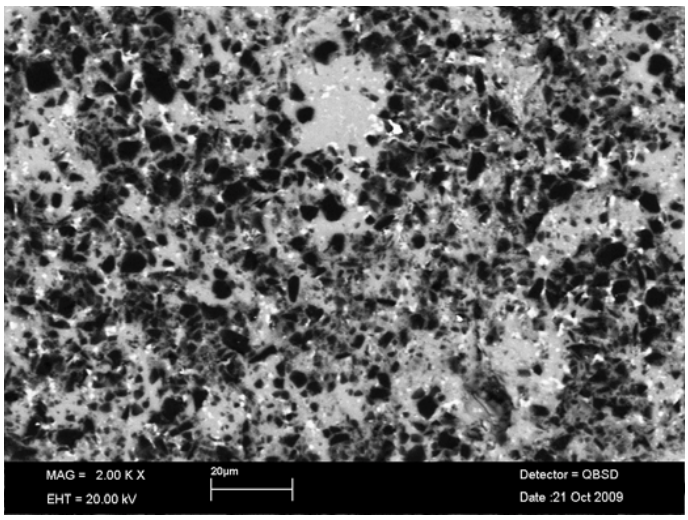
Aşınma karşılıklı iki yüzey arasında olduğu için hangi malzeme çiftinin daha iyi sonuç verdiğini değerlendirmek gerekmektedir. Bir malzemenin tek başına aşınmaya iyi direnç göstermesi önemlidir ancak karşı malzemeyi temas sonrasında ne kadar hasara uğrattığıda önemlidir. Bu bakımdan her iki malzemenin aşınmasında dikkate almak gerekmektedir. Örneğin az aşınan bir malzeme karşısındakini çok aşındırıyorsa bu istenen bir durum olmaz ve fazla aşınmadan dolayı sistemde yada malzemelerde beklenmedik hasarlar ortaya çıkabilir. Malzemenin az aşınmasıyla birlikte karşı elemanı da az aşındırması beklenir. Bu ayrımı yapabilmek için karşılıklı sürtünen malzemelerin özgül aşınma direnci hesaplanıp (W_{SR}) birbirine eklenerek tribolojik çift özgül aşınma direnci bulunmalıdır (W_{SRT} (N.min/mg)). Yağlı şartlardaki performans testleri sonunda KGDD kam ile AA2124/SiC 2μm/30 kam profili aşınma değerleri birbirine yakın olmuştur. Ancak alüminyumun yoğunluğunun düşük olması avantajından dolayı kompozit kamın özgül aşınma direnci daha yüksek çıkmıştır. Ancak karşı elemanlardaki hasar değerlendirildiğinde kompozit kamın karşı malzemesinin KGDD karşı elemana göre daha fazla aşındığı görülmüştür. Bunu dikkate alarak her iki deney çiftlerinin özgül aşınma değerleri toplandığında, KGDD ve karşı elemanın tribolojik çift özgül aşınma direnci daha yüksek olmuştur (W_{SRT}). Özgül aşınma direnci bakımından sıralamayı 2μm %30 SiC takviyeli kam alırken ardından %20 takviyeli kompozit gelmektedir (Şekil 4.144.a). Grafikte kam profillerinin ve karşı elemanların özgül aşınmaları farklı alanlarda gösterilip üst üste eklenerek toplam değer bulunmuştur. Tüm bu çalışmaların amacı hali hazırda kullanılan KGDD sistemleri yerine yeni bir malzeme önerebilmek

olduğu için KGDD tribolojik çifti özgül aşınma direncine nekadar yaklaştığımız önemlidir ve hesaplanması gerekmektedir. KGDD tribolojik çifti özgül aşınma direnci %100 kabul edilerek yapılan hesaplar sonrasında AA2124/SiC 2μm/30 kam profili tribolojik çift özgül aşınma değerlerin KGDD çiftine %77,21 oranında yaklaşırken, AA2124/SiC 2μm/20 kam profili tribolojik çiftinde ise bu yaklaşma %13,75 seviyesinde kalmıştır (Şekil 4.144.b).

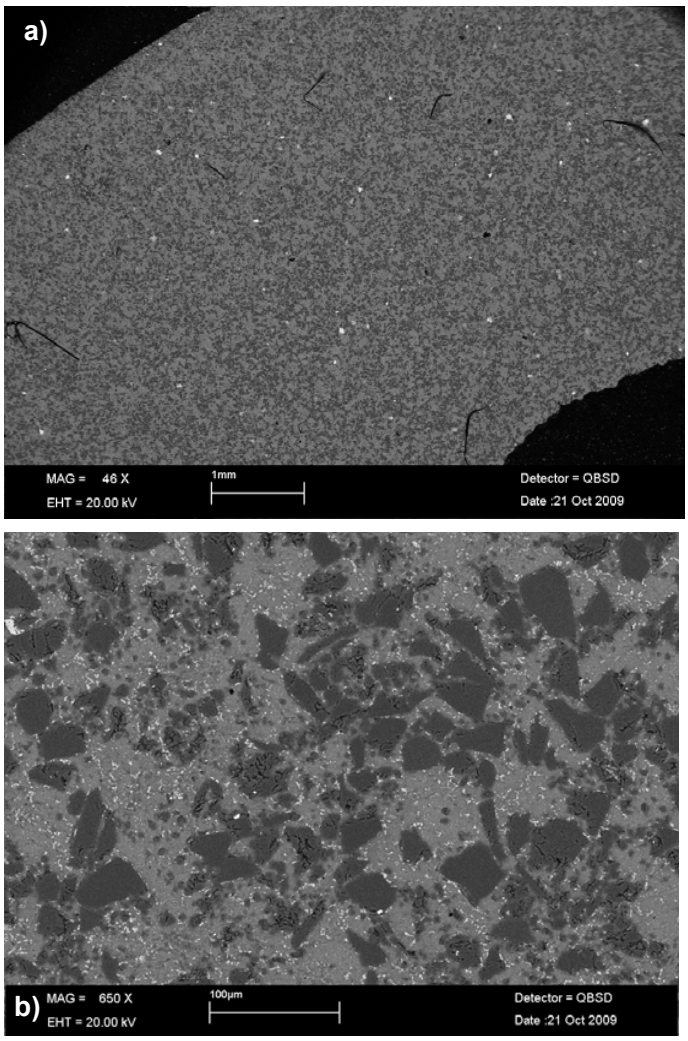


Şekil 4.144. Tribolojik çift özgül aşınma direnci grafiği, a) toplam aşınma direnci b) % yaklaşım.

Testleri tamamlanan kompozit numunelerin mikro yapıları ve tane dağılımları incelenmiştir. B_4C takviyeli kompozit içyapısında, tane boyutlarının küçük olmasına rağmen dağılımın homojen olduğu görülmektedir (Şekil 4.145). Tane boyutunun daha büyük olduğu (20μm) AA2124/SiC/30 takviyeli kam profilinin içyapısı da aynı homojenliktedir. Hem düşük hem yüksek büyütme oranlarında topaklanmanın meydana gelmediği açıkça görülmektedir (Şekil 4.146.a-b).



Şekil 4.145. AA2124/B_4C/30 kompozit kam profilinin iç yapısı ve tane dağılımı.



Şekil 4.146. a) AA2124/SiC 20μm/30 takviyeli kam profili iç yapısı b) a'nın detayı.

4.2.2.3. Ekstrüzyon Kam Profili İmalatı

Karıştırmalı döküm yöntemiyle takviyesiz alüminyum ve 53 μm SiC takviyeli kompozit ekstrüzyon billetleri imal edilmiştir. Daha sonra bu billetler fırın içerisinde 450°C'a kadar ısıtılmış, ardından basınç uygulanarak kompozit ekstrüzyon ön deneme kam profillerinin imalatı gerçekleştirilmiştir. İmal edilen numunelerin ekstrüzyon oranı 3'dür ve billet kesit alanının ekstrüzyon ürünü kesit alanına bölünmesiyle bulunur. Takviyesiz alüminyumdan imal edilen kompozit kam profili Şekil 4.147'de görülmektedir. Yaklaşık olarak 13 cm boyunda olan bu ürün kesilerek birden fazla kam profili elde edilmesi mümkün olabilmektedir. Bu numunenin ekstrüzyon sırasında kalıp yüzeyine sürtünmesinden dolayı imalat sonrası sahip olduğu yüzey istenilen şartlarda olmadığı için numune kullanılamamıştır. 53 μm boyutunda SiC takviyeli kompozit kam profil ekstrüzyon ürünü ise Şekil 4.148'da görülmektedir. Bu imalat sırasında bilinçli olarak billetin tamamı basılmamış sadece bir kısmı ürün olarak çıkartılmıştır. Ürünün devamında billet rahatlıkla görülebilmektedir (Şekil 4.148.a). Bu numunenin kesit yüzeyine bakıldığında yüzeyin normal düzgünlükte olduğu görülürken (Şekil 4.148.b) yan yüzeylerde kalıba herhangi bir temas olmamasına rağmen kesit daralması olan bölgelerdeki aşırı gerilme yığılmalarının (kırılma ve mekanik) sebep olduğu yılan derisi şeklinde ayrılma hasarlarına rastlanmıştır. Bir diğer ekstrüzyon numunesi de Şekil 4.149'de görülmektedir. Bu numunede ise yan yüzeyler çok pürüzsüz ve temiz olmasına rağmen ürünün ilk çıkan uç kısmında derin yırtılmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.149.a-b).

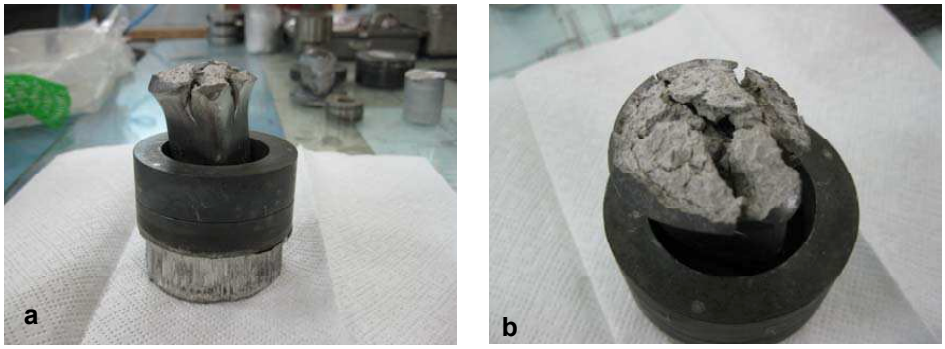
Ayrıca toz metalürjisi yöntemini kullanarak ta ekstrüzyon billetleri hazırlanmakta ve kompozit numuneler imal edilmektedir. Şekil 4.150.a'da görüldüğü gibi billet kalıbı içerisine daha önce karıştırma düzeneğinde belirli süre karıştırılarak homojen dağılması sağlanan Al-Seramik tozları billet kalıplarına yerleştirilmiştir. Ardından fırın içerisinde 615°C sıcaklıkta, uygun basınç altında 30 dakika tutularak sinterlenme ve pişme sağlanmıştır. Kalıptan çıkarılan ekstrüzyon billeti (AA2124/SiC 20μm/10) Şekil 4.150.b'de görülmektedir. Bu ürünlerde

kesilip yüzeyleri düzeltildikten ve ortaları delindikten sonra aşınma testine tabi tutulacaktır.

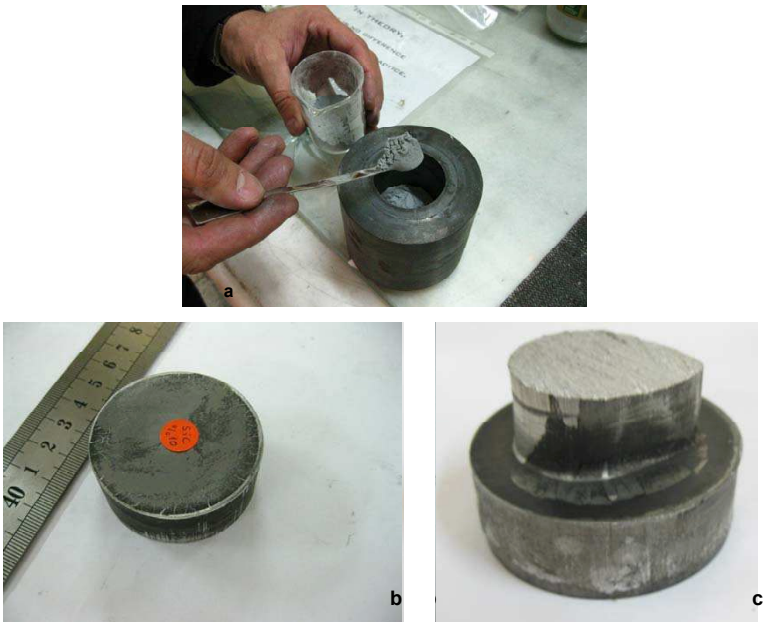
Toz metalurjisi yöntemiyle imal edilen ve aşınma davranışları iyi olan AA2124/SiC $2\mu m/30$ kompozit kamlarının aşınma ve diğer özelliklerine imalat yönteminin etkisini incelemek maksadıyla ekstrüzyon yöntemiyle imalatına karar verilmiştir. Bu doğrultuda öncelikle AA2124 alüminyum matrisli $2\mu m$ SiC partiküllerinden %30 hacim oranında toz karışımı hazırlanmıştır. Bu toz karışımından 170 gr kadarı billet kalıbına konularak 150 bar basınç altında 615°C sıcaklıkta sinterlenerek billet hazırlanmıştır. Billet boyu yaklaşık 40 mm kadardır. Ekstrüzyon ünitesi içerisindeki boşluğa önce ekstrüzyon kalıbı ardından billet ve üzerine de baskı

Şekil 4.147. a) Takviyesiz Alüminyum kam profili ekstrüzyon ürünü b) kesilmiş profil.

Şekil 4.148. a) $53\mu m$ SiC takviyeli alüminyum kam profili ekstrüzyon ürünü b) kesit görüntüsü c) hasarlar.



Şekil 4.149. AA2124/SiC $20\mu m/10$ kompozit kam ekstrüzyon ürün hasarı.



Şekil 4.150. a) Toz metalurjisi yöntemiyle ekstrüzyon takozların hazırlanması b) AA2124/SiC $20\mu m/10$ kompozit billeti c) ekstrüze edilmiş kam profili ve takoz artığı (Takviyesiz AA2124).

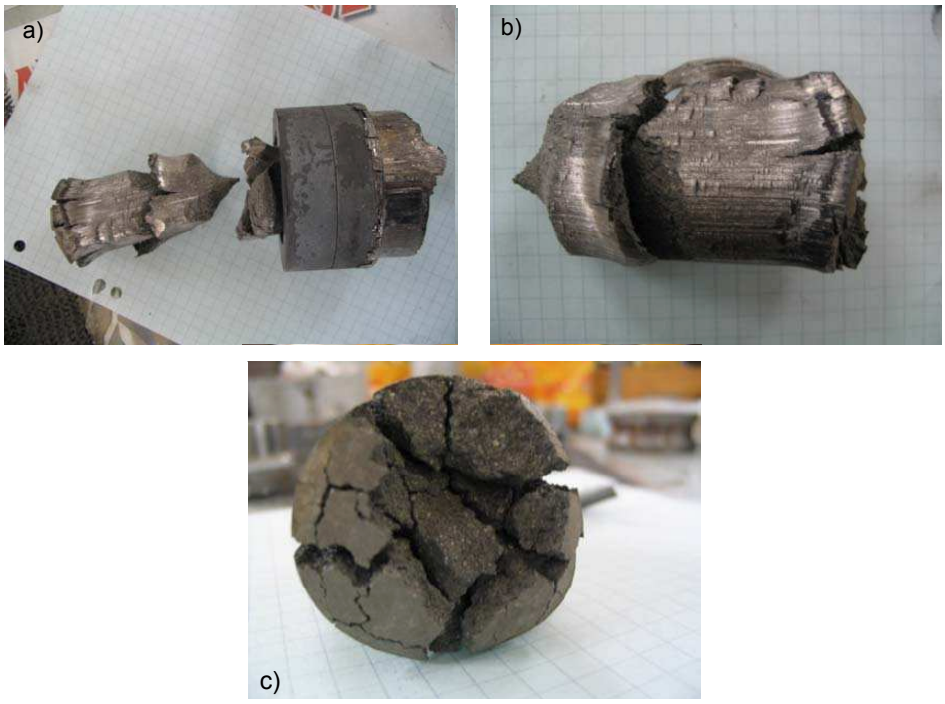
pulu konularak 450°C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Ardından zımba yardımı ile 1000-1200 MPa basınç uygulanarak, billet kalıp boşluğundan akmaya zorlanmıştır. Bu işlem sonrasında elde edilen ürün Şekil 4.151'de görülmektedir. Partikül boyutu küçük ve takviye oranının yüksek olması sebebiyle malzeme kalıp içerisinden akarken kalıp yüzeylerine kademeli olarak yapışmakta dolayısıyla palmiye hasarı denilen hasar mekanizması ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.151.a). Özellikle numunenin kalıp içersinden ilk olarak dışarı çıkan kısmı ani gerilmeler sebebiyle aşırı hasara uğramakta ve tamamen dağılıp parçalanmaktadır (Şekil 4.151.b). Takviye oranının yüksek olması malzemeyi gevrekleştirmiş malzemenin kolay şekil alabilme kabiliyeti azalmış dolayısıyla ekstrüzyon sırasında parçalanmalar ve aşırı hasarlar meydana

(a) (b)

Şekil 4.151. AA2124/SiC $2\mu m/30$ billetin ekstrüzyon sonrası görünümü a) palmiye şeklinde hasar b) uç bölgedeki ayrılma hasarları.

gelmiştir.

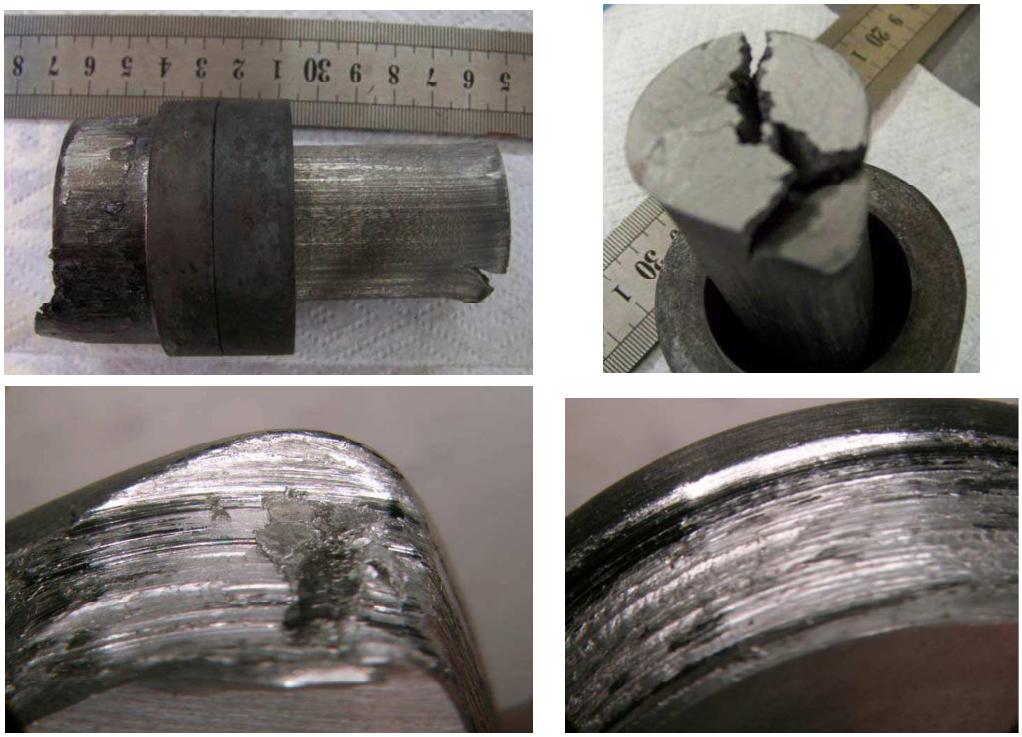
Takviye oranının azalmasıyla birlikte ekstrüzyonun yapılabilirliğini düşünerek aynı şartlarda AA2124/SiC $2\mu m/20$ ve AA2124/SiC $2\mu m/10$ billetler hazırlanıp ekstrüze edilmiştir. Takviye oranının azalmasıyla malzeme akışında azda olsa kolaylaşma meydana gelmiş olsada %20 takviyeli kompozitte benzer şekildeki palmiyeye benzer yırtılmalar ve gövde bölgesinde kopmalar görülmüştür (Şekil 4.152.a-b). Ekstrüze edilen numunenin kalıptan çıkan ilk bölümünde termal gerilmelerden dolayı yine derin çatlaklar oluşmuşsa da %30'daki gibi aşırı bir parçalanma gözlemlenmemiştir (Şekil 4.152.c). Takviye oranının %10 olduğu durumda ekstrüzyon gerçekleşmiştir (Şekil 4.153.a). Yüzeyde oldukça fazla çizik olmasına rağmen aşırı bir şekil bozukluğuna rastlanmamıştır. Ekstrüzyon ürününün uç kısmında derin çatlaklar oluşmuştur, ancak bu bölgeler daha sonra kesilerek alt kısımlardan numune çıkartıldığı için sorun teşkil etmemektedir (Şekil 4.153.b). Bu imalat yönteminin en büyük avantajı diğer imalat yötemleriyle aynı süre içerisinde bir seferde çok sayıda numune elde edilmesidir. nitekim ekstrüzyon ürününden dört adet kam profili kesilmiştir. Aşınma testine tabi tutulmadan önce yüzeyler parlatılmış ve sertlikleri alınmıştır. Aynı karışımda sıcak presle imal edilen kompozit 150HB10 sertlikte iken ekstrüzyon kam profili 101HB10 sertliğindedir. Sertlik farkı sıcak preste malzeme soğuyana kadar kalıp içerisinde basınç altında tutulmasından, ekstrüzyonda ise yüksek sıcaklıkta ekstrüze olan numunenin havayla teması ve basınçsız sekilde dışarıda ani soğumasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca daha önce sıcak preste imal edilen billetlerin tekrar ekstrüzyon sıcaklığına ısıtılması ve



Şekil 4.152. AA2124/SiC $2\mu m/20$ billetin ekstrüzyon sonrası görünümü a) palmiye hasarı ve gövde ayrılması b) yüzey derin çizikleri ve yırtılmaları c) uç bölgedeki derin çatlak ve ayrılma hasarları.

bu sıcaklıkta bir süre bekletilmesi de bu yumuşamada önemli rol oynamaktadır. Ölçümler tamamlandıktan sonra kuru şartlarda 70N yük uygulanarak aşınma testi yapılmıştır. Malzemenin diğerlerine göre yumuşak olması sebebiyle deney başladığı andan itibaren aşırı aşınma ve karşı yüzeye sıvanmalar meydana gelmiştir. 10 dakika sonra kompozit ekstrüzyon kam karşı yüzeye yapışarak kamın yükü kaldırma gücü sona ermiştir. Şekil 4.153.c-d'dende görüldüğü gibi kam uç bölgesinde derin ezik ve kayıplar, diğer bölgelerde ise aşınma izi çukurları oluşmuştur. Deneme imalatı sırasında 53 μm SiC tane boyutunda partikülleri içeren yine aynı ekstrüzyon oranında aynı kalıplarda basıldığında aşırı hasar görülmemiştir. Dolayısıyla karşımıza çıkan bu hasarlar esas itibarıyla takviyenin boyutunun küçük olması sebebiyledir. Ancak ekstrüzyon oranının küçük (3) olmasınında hasarların oluşmasında etkili olduğu tahmin edilmekle birlikte konunun bir başka araştırma konusu olduğu düşüncesiyle sonraya bırakılmıştır.

Bir başka ekstrüzyon denemeside %30 B_4C takviyeyle hazırlanan billetle gerçekleştirilmiştir. 450°C'ta 1000-1200 MPa yük uygulanarak gerçekleşen ekstrüzyon işlemi sonrasında SiC takviyeli kompozitte olduğu gibi malzemede



Şekil 4.153. AA2124/SiC $2\mu m/10$ billetin ekstrüzyon sonrası görünümü a) numune genel görünümü b) uç bölgedeki çatlaklar.

palmiye hasarı görülürken (Şekil 4.154.a), malzeme uç bölgesinde termal gerilmelerden dolayı ayrılmalarda meydana gelmiştir (Şekil 4.154.b).

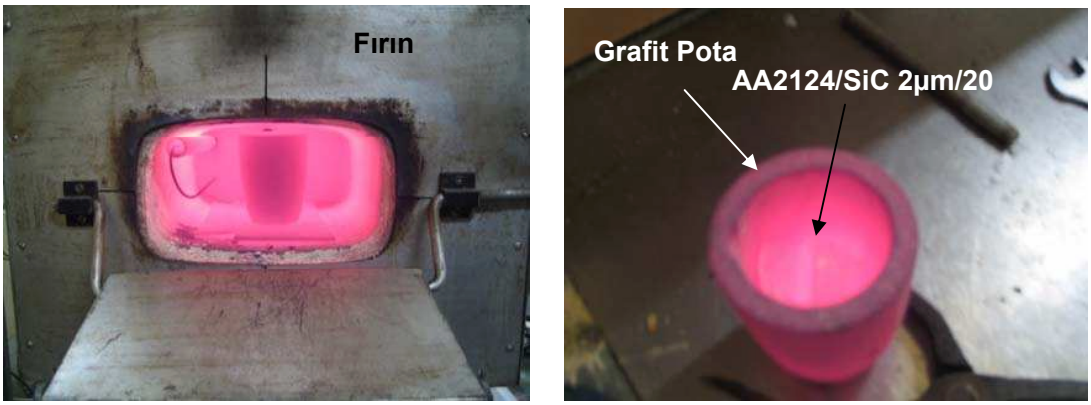
Ekstrüzyon yöntemiyle imal edilip tüm testlerinin yapılması düşünülen kam profilleri yukarıda açıklandığı gibi, imalatın gerçekleşememesi sebebiyle, planlanan çerçeve paralelinde test edilememiş ancak detaylı araştırmaya ve çözüme muhtaç olduğu görülmüştür.

(b)

Şekil 4.154. AA2124/B_4C 1-7μm/30 billetin ekstrüzyon sonrası görünümü a) palmiye şeklinde hasar b) uç bölgedeki ayrılma hasarları.

4.2.2.4. Karıştırmalı Döküm Kam Profili İmalatı

Karıştırmalı döküm yöntemiyle kam profili imalatında en önemli safha takviye ile matrisin iyi karıştırılmasıdır. Bu yöntem için iki farklı yol izlenmiştir. Birincisinde, AA2124 alüminyum tozları ile $2\mu m$'lik SiC partikülleri %20 hacim oranında karıştırılmış, grafit pota içerisine koyularak fırın içerisinde sıcaklık 600°C oluncaya kadar sürekli ısıtılmıştır (Şekil 4.155.a-b). Bu sıcaklıkta ergimesi beklenen toz karışımın ergimediği görülerek sıcaklık 850°C'ye çıkartılmıştır. Bu sıcaklıkta bile toz karışım potadan kalıba akmayacak kadar sertleşmiş ve taneler birbirine yapışmıştır, dolayısıyla bu yolla kam profili imal edilememiştir. İkinci yöntem ise, AA2xxx serisi bir çubuktan kesilen parçalar grafit pota içerisine konulmuş ve ergitilmiştir. İçi ergimiş alüminyum dolu olan pota fırın dışarısına çıkartılıp etrafı yalıtım malzemesiyle doldurularak sıcaklık kaybı azaltılmaya çalışılmıştır. Karıştırma işleminden önce takviye partikülleri fırında bekletilerek, ergimiş metalle teması sırasında metali çabuk soğutmaması ve yapışmanın iyi olması nedeniyle ısıtılmıştır. Ardından $2\mu m$'lik SiC takviyesi ergimiş AA2124 içerisinde karıştırılmaya çalışılmıştır, partikül tane boyutunun küçük olması, partiküllerin bir araya toplanmasına ergimiş metal üzerinde yüzmesine sebep olmuştur. Ardından aynı işlem 20 μm'lik SiC takviyesi kullanılarak denenmiştir. Bir önceki imalattakine göre birazda olsa karıştırma gerçekleşmiştir. Ancak yine sıvı bir karışım yerine tozlu yarı sıvı bir yapı elde edilmiştir. Bu karışım kalıp içerisine konularak çok soğumadan 350 MPa basınç altında katılaşması beklenmiştir. Elde edilen numunede yer yer alüminyum ve takviye tozları birikmeleri, bölgesel boşluklar görülmüştür (Şekil 4.156.a-b). Bu sebeplerden, toz metalürjisi imalatı sonrasında en iyi sonuçların elde edildiği $2\mu m$ SiC takviyeli kompozit kam karıştırmalı döküm tekniği kullanılarak imal edilememiştir. İmal edilen $20\mu m$ SiC takviyeli kompozit gevrek özellik gösterdiği ve yüzey kalitesi kötü olduğu için üzerinde performans testi yapılmamıştır. Bu çalışmalardan yola çıkarak, karıştırmalı döküm yönteminde $50\mu m$ boyutunun altındaki tozların takviye olarak kullanılması durumunda karıştırma problemiyle karşı karşıya kalınıp istenilen kalitede ürün elde edilemeyeceği sonucuna varılmıştır.



(a) (b)

Şekil 4.155. a) ergitme fırını, b) grafit pota ve toz karışımı.

(a) (b)

Şekil 4.156. Karıştırmalı döküm kam profili a) yüzeyde birikme bölgeleri b) burundaki gözeneklilik.

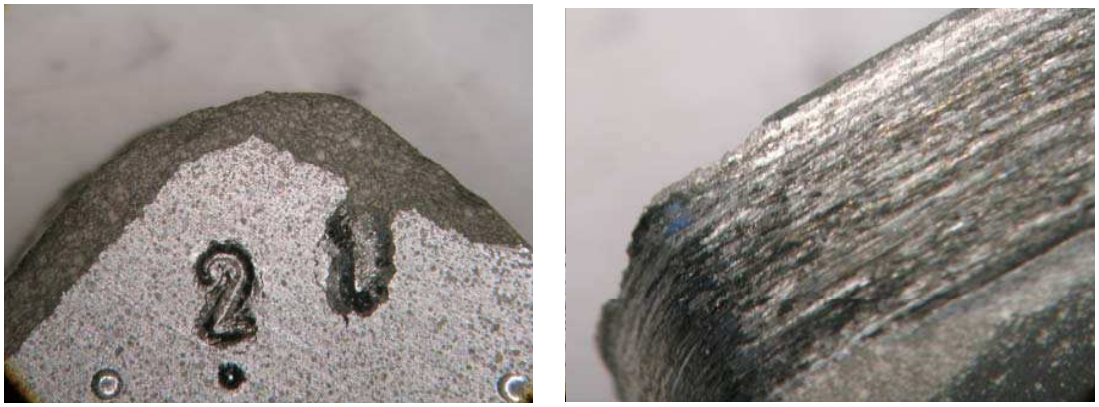
4.2.3. Elde Edilen Sonuçları İyileştirme Çalışmaları

Aşınma deneylerinin tamamlanmasıyla elde edilen sonuçların iyileştirilmesine çalışılmıştır. Bu kısım çalışmaları iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

4.2.3.1. Grafit Katkısının İncelenmesi

Birinci aşama kompozitlerin içerisine grafit (karbon) eklenerek imal edilmesi sebebiyle, malzemenin aşınma davranışının iyileştirilmesinin denenmesi aşamasıdır. Aşınma deneylerinde iyi sonuçlar elde edilen SiC 2 μm takviyeli AA2124 matrisli kompozitler yeniden %10, 20 ve 30 takviye oranlarında hazırlanıp içerisine %5 hacim oranında grafit eklenmiştir (2-15μm). Numuneler 300 MPa basınç altında 615°C sıcaklıkta 1 saat sinterlenerek imal edilmişlerdir. Ardından numuneler gerçek

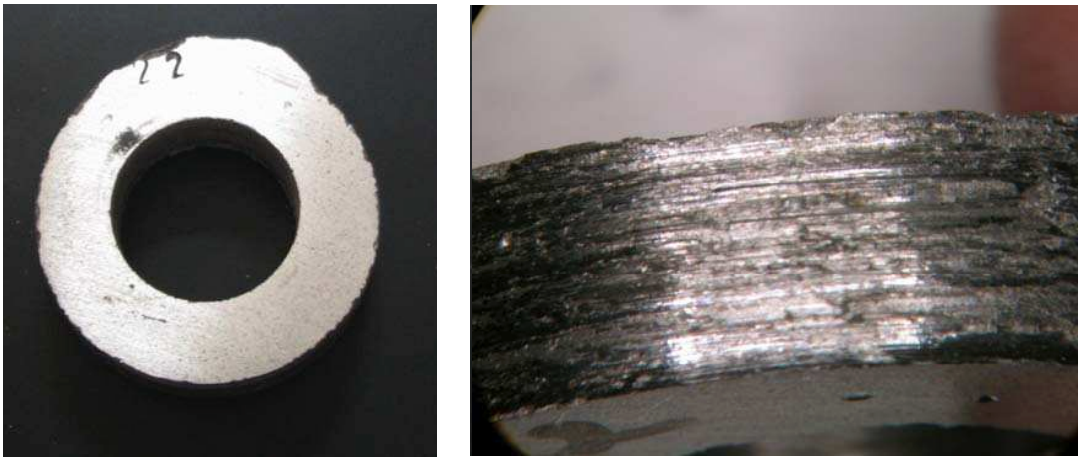
şartlarda kam profili aşınma test cihazında 70 N yük uygulanarak (en düşük noktada) aşınma testine tabi tutulmuşlardır. Hacimce %30 takviyeli olan kompozit deney sırasında kırılgan özellik göstermiş olup malzemeden partikül boyutuna göre oldukça büyük parçalar koparak hasara uğramıştır (Şekil 4.157).



Şekil 4.157. AA2124/SiC2μm/30+%5 Grafit takviyeli hibrid kompoziti aşınma sonrası a) üst bölge b) yan bölge.

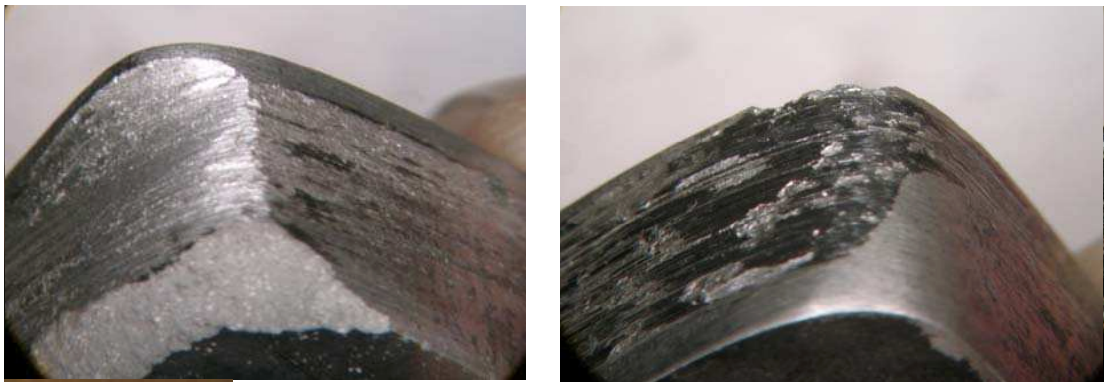
%20 ve 10 takviye oranında takviyeli kam numuneler ise kütlesel kayıplar yerine sürekli aşınma eğilimi göstermiş, deney sırasında malzeme yüzeyinde toz şeklinde dağılmalar meydana gelmiştir (Şekil 4.158- 4.159). Bu deneylerde bir süre sonra kam üzerindeki tepe kısmının tamamen aşınarak dairesel bir görünüm almasıyla sonlanmıştır. %5 grafit katkısının taneler arası yapışmayı kötü olarak etkilediği düşünülerek grafit katkısı %2 ve 1 olacak şekilde AA2124/SiC 2μm/20 hacim oranında yeniden imal edilmiştir. Aşınma testleri sonunda grafit katkısının azalması aşınma davranışını iyi yönde etkilemiştir. %1 grafit katkılı numune 2 ve 5 katkılı olan numuneden daha iyi sonuç vermiştir (Şekil 4.160). Deneylerde numuneler şekillerden de anlaşılacağı gibi ya aşırı ağırlık kaybına uğramışlar yada bir süre sonra karşı malzemeye yapışma göstererek hareketini sürdürememiştir. Grafit, yağlayıcı ve yapışmayı azaltıcı etkisinden dolayı toz metalürjisi yönteminde olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Toz metalürjisinin temelinde bulunan tozların yeterince birbirine yapışamaması problemini artırmakta dolayısıyla malzemenin dayanımı ve aşınma direnci düşmektedir.

Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalarda genellikle malzemeler döküm yoluyla yapılmakta ve büyük tane boyutlarıyla imalat gerçekleştirilmektedir. Büyük



Şekil 4.158. AA2124/SiC2μm/20+%5 Grafit takviyeli hibrid kompoziti aşınma sonrası a) ön görünüş b) yan bölge

Şekil 4.159. AA2124/SiC2μm/10+%5 Grafit takviyeli hibrid kompoziti aşınma sonrası a) üst bölge b) yan bölge.



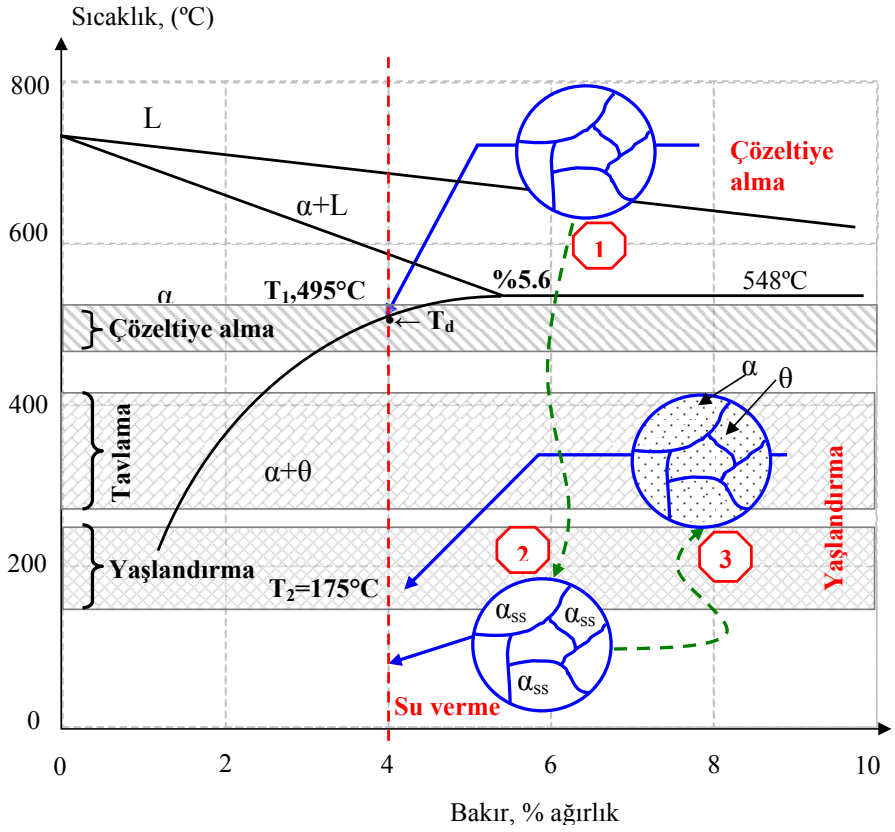
Şekil 4.160. AA2124/SiC2μm/20 Grafit takviyeli hibrid kompoziti aşınma sonrası a) grafit katkısı %2 b) grafit katkısı %1

tane boyutlu partiküllerde imalat ve karıştırma işlemleri daha kolay olmaktayken, kullanıdığımız toz boyutlarının döküm yönteminde kullanılması karıştırma ve homojenlik için mümkün olmamaktadır [97–107]. Ayrıca bu çalışmalardaki grafit katkılı kompozitler sabit geometrilidir yani şekillerinde herhangi bir eksantriklik yoktur. Dolayısıyla geometride değişim olmadığı için deney sırasındaki uygulanan yükte herhangi bir değişim olmamaktadır. Grafit katkılı kompozit kamlar ise aşınma testinde en düşük 70 N yüke maruz kalırken bu miktar kam profilinin yayları sıkıştırmasıyla birlikte 150 N'a ulaşmaktadır. Sürekli olarak yük değişimine maruz kalan kamlarda, grafitinde taneler arasındaki bağı zayıflatmasıyla birlikte aşınma miktarı hızla artmaktadır.

4.2.3.2. Kompozitlere Çökeltme Sertleştirmesi İşleminin Uygulanması

Çökeltme sertleştirmesi (yaşlandırma) üç aşamada yapılır; çözeltiye alma, hızlı soğutma ve yaşlandırma. Çökeltme işlemi, oda sıcaklığında uzun zamanda yapılır ise yaşlandırma sertleştirmesi; tavlama ile kısa sürede yapılırsa çökeltme sertleştirmesi olarak adlandırılır. Al-Cu alaşımlı malzeme sadece α fazının bulunduğu T_1 çözeltiye alma sıcaklığına kadar ısıtılır (Şekil 4.161), bu aşamada aşırı doymuş α mikro yapısı meydana gelir. Dengeli soğutma sırasında T_d sıcaklığında α fazı Cu atomlarıyla doymuş hale gelir ve α dan θ fazı çökelmeye başlar. T_0 oda sıcaklığında iki fazlı yapı elde edilir. θ'nın α'dan çökelmesi bir katı hal reaksiyonudur, dolayısıyla atomların yayınması belirli bir süreyi gerektirir. Eğer α fazı T_1 sıcaklığından hızlı soğutulursa, çökelme oluşamaz ve oda sıcaklığında aşırı doymuş α_{ss} fazı elde edilir. Aşırı doymuş α_{ss} fazı yeterli bir T_2 sıcaklığına kadar ısıtılırsa atomsal yayınım başlar ve mikroskopaltı boyutta küçük θ parçacıkları çökelmeye başlar, T_2 sıcaklığı yayınım için yeterli düzeyin altında ise θ parçacıklarının çökelmesi sınırlı olur ve kararlı hale gelir. Isıtma süresi uzun ve T_2 sıcaklığı yüksek olursa θ parçacıkları birleşerek büyür ve iki fazlı aşırı yaşlanmış yapı oluşur buda dayanımı ve sertliği düşürür [108–111].

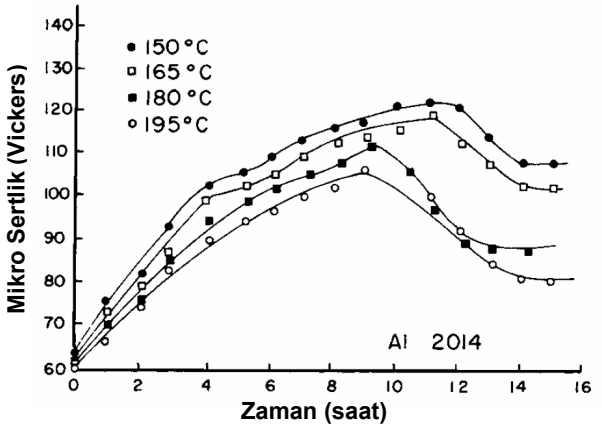
İmal edilen kompozit numunelere çökeltme sertleştirmesi yapmadan önce çok sayıda çalışma incelenmiştir. Alüminyum 2014 alaşımı ve SiC takviyelendirilmesiyle elde edilen kompozitler ile yapılan çalışmalar da 150, 165, 180 ve 195°C sıcaklıkta farklı sürelerde yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Her iki deneyde yaşlandırma



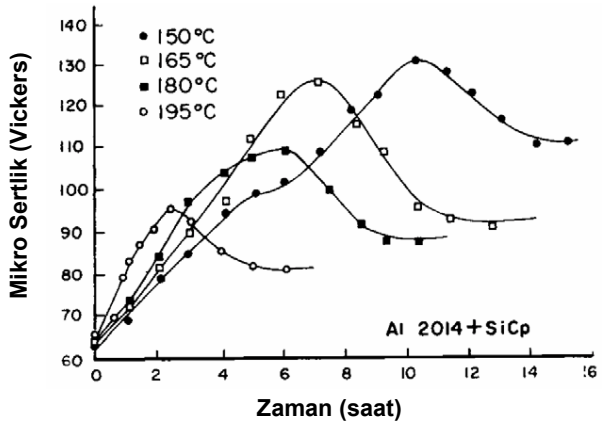
Şekil 4.161. Alüminyuma ait yaşlandırma faz diyagramı.

sıcaklığı ve süresinin malzemenin sertliğine olan etkisi ölçülmüştür (yük 0.25 N). Takviyesiz 2014 ele alındığında en iyi sertlik değeri en düşük sıcaklık olan 150°C'ta 12 saat yaşlandırma sonrasında elde edilmiştir (Şekil 4.162). Sıcaklığın artmasıyla sertlik değerlerinde düşüş görülmektedir. Yaşlandırma süresinin 11 saate kadar artmasıyla sertlik artarken bu süreden sonra sertlik azalmaktadır. SiC takviyeli AA2014 matrisli kompozitin yaşlanma sertleştirmesi çalışmalarında ise yine sıcaklık artışıyla sertlikte bir azalma olduğu görülmüştür (Şekil 4.163). Ayrıca sıcaklığın artmasıyla birlikte sertlik düşüşlerinin görüldüğü tepe noktalarına daha kısa sürede ulaşıldığı tespit edilmiştir. Takviyesiz numune bu tepe noktasına 150°C'ta 9.5 saatte ulaşırken takviyeli kompozit 195°C'ta 2.5 saatte tepe noktasına ulaşmıştır [112–122].

Yapılan bir başka çalışmada ise matris içerisindeki takviye oranının yaşlandırma sonrası sertliğe ve yaşlandırma süresine etkisi incelenmiştir. Matris %3.5 Cu içeren alüminyumdur. Yaşlandırma işlemi 190°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Takviyesiz numunenin 60 saat yaşlanma sonrasındaki sertik değeri, %20 takviyeli



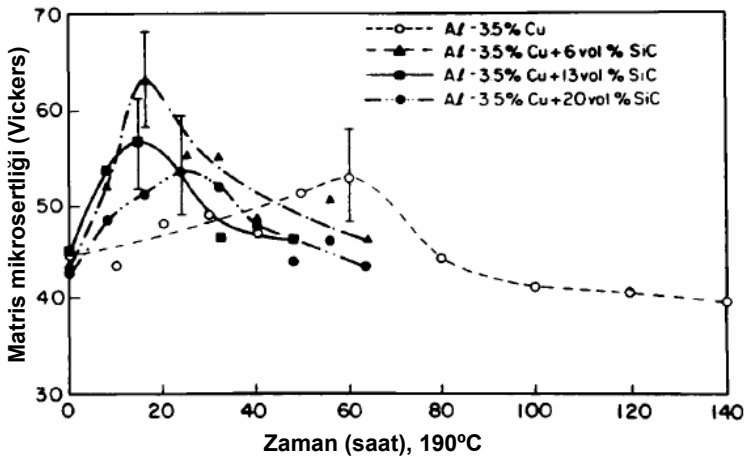
Şekil 4.162. AA2014'e ait sıcaklığın yaşlanmaya olan etkisinin grafiği [112].



Şekil 4.163. AA2014 matrisli SiC_p takviyeli kompozite ait sıcaklığın yaşlanmaya olan etkisinin grafiği [112].

kompozitin 25 saat yaşlanma sonrasındaki sertlik değeriyle yaklaşık olarak aynı seviyededir (Şekil 4.164). %6 takviyeli olan kompozit 20 saat sonrasında aralarında en yüksek sertliğe sahip olan numune olarak karşımıza çıkmıştır. Garfik incelendiği zaman takviye oranının artmasıyla yaşlandırma işlemi sonrasında sertliğin düştüğü görülmektedir [112].

Bu çalışmaların haricinde hızlandırılmış yaşlandırma olarak adlandırılan yöntem, takviyeli kompozitler üzerinde denenmiştir. Partikül yada fiber takviyesiyle elde edilen kompozitlerde matris ile takviye farklı termal genleşme katsayılarına sahiptir, bu iki katsayı arasındaki fark $\Delta\alpha$ ile gösterilmekte olup örneğin Al-SiC arasında 4.7 değerindedir. Sıcaklıktaki en küçük değişim bile matris içerisinde artık gerilmelere sebep olmakta, bu gerilmeler malzeme içerisindeki dislokasyonları



Şekil 4.164. AA2014 matrisli SiC_p takviyeli kompozite ait takviye oranının yaşlanmaya olan etkisinin grafiği [112].

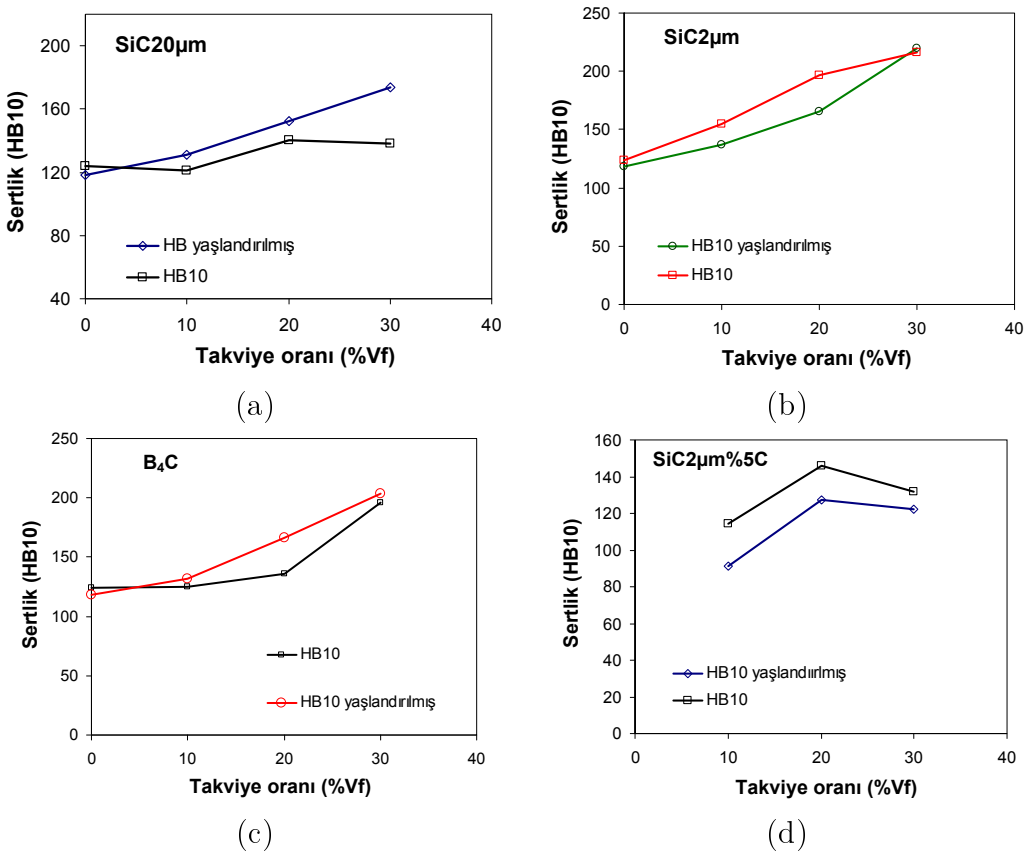
takviyesize göre artırmakta ve daha kısa sürede yaşlanma-sertlik eğrisi tepe noktalarına ulaşılmasını sağlamaktadır [112, 123–127]. Bir başka çalışmada ise 50 ve 80μm boyutunda SiC partikülleriyle %5 ve 10 olarak takviyelendirilmiş AA2024 alüminyum matrisli kompozit karıştırmalı döküm yöntemiyle imal edilmiş ve ardından yaşlandırma sertleştirmesi işlemine tabi tutulmuştur. Önce 495°C sıcaklıkta 8 saat çözeltiye alma gerçekleştirildikten sonra yağda su verilmiş ardından 175°C'de 6 saat yaşlandırıldıktan sonra tekrar yağda su verilmiştir. Bu işlem sonrasında numunelerde sertlik artışları sağlanmıştır [128–130].

Bu bilgiler ışığında imal edilen kompozitlerin 495°C'de 8 saat çözeltiye alındıktan sonra suda soğutulmasına, 175°C sıcaklıkta 8 saat yaşlandırma sertleştirilmesine tabi tutulmasına karar verilmiştir. Burada amaç; kompozit numunelere yaşlandırma sertleştirmesi uygulanarak sertliklerinin artırılması dolayısıyla aşınma özelliklerinin iyileştirilmesidir. Yaşlandırma sertleştirmesi öncesinde malzemelerin sertlikleri alınarak sertleştirme işlemi sonrasındaki malzeme sertlikleri ile karşılaştırılması sağlanmıştır. Sertleştirme işlemi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada malzemeler atmosfer kontrollü fırın içerisinde 495°C sıcaklığa kadar ısıtılıp 8 saat fırın içerisinde bekletilmiştir. Bu aşama çözeltiye alma işlemi olarak adlandırılmaktadır. Ardından numuneler fırından çıkartılarak suda soğutulmuşlardır. Daha sonra 175°C sıcaklığa fırın içerisinde ısıtılarak bu sıcaklıkta 8 saat süreyle yaşlanmaya bırakılmışlardır. Son olarak malzemeler fırından çıkartılıp

oda sıcaklığında soğumaya bırakılmışlardır.

Yaşlandırma işlemi ve sonrasında numunelerin sertlik ölçümleri Brinell sertlik cihazıyla yapılmıştır. Ölçümler sırasında 2.5 mm çapında çelik bilye kullanılmış olup uygulanan yük 62.5 kg'dır, sertlik değerleri Tablo EK-1.7'de verilmiştir. Sertlik grafikleri incelendiği zaman AA2124/SiC 20μm kompozitte takviye oranı artarken yaşlandırma sertleştirmesi sonrasında sertliğinde arttığı görülmüştür (Şekil 4.165.a). Sertleştirme öncesi ve sonrasındaki sertlik değerleri arasındaki fark %30 takviyeli kompozitte diğerlerine göre daha fazla olmuştur. AA2124/SiC2μm kompozit numunelerde ise %10 ve 20 takviye oranlarında yaşandırmayla birlikte sertlik azalışı görülürken %30 takviyeli kompozitte %2'lik bir artış meydana gelmiştir (Şekil 4.165.b). AA2124/B_4C takviyeli kompozitte takviye oranıyla birlikte yaşlandırma sonrasında sertlik artışları meydana gelmiştir. Ancak artış miktarı en çok %20 takviyeli kompozitte %25'lik sertlik artışı tespit edilmiştir (Şekil 4.165.c). Grafit katkısı numune sertiliğini düşürürken yaşlandırmayla birlikte sertlik artışı aynı numunenin grafitsiz olandaki artış kadar olmamıştır (Şekil 4.165.d)

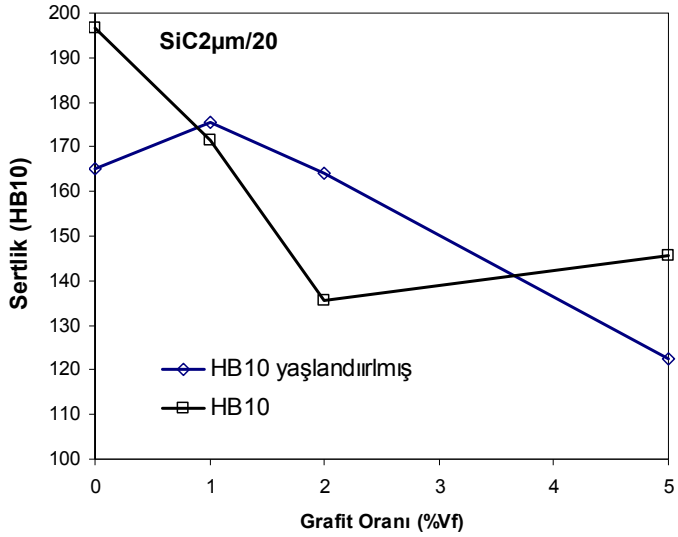
AA2124/SiC2μm/20 kompozit içerisine %1, 2 ve 5 oranlarında, aşınma sırasında yağlayıcı özellik göstermesi amacıyla, 2-15μm boyutuna sahip grafit (karbon) tozu katılarak hibrid kompozitler imal edilmiştir. Yaşlandırılmış ve yaşlandırılmamış olarak iki gurupta olan bu numunelerde grafit miktarının artmasıyla genel olarak sertlikte azalma eğilimi görülmüştür. Ayrıca yaşlanmanın da sertliği azalttığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi ise yağlayıcı olarak kullanılan grafitin matris ve takviye arasında oluşan bağı zayıflatmakta oluşudur. Bu olay aynı zamanda kompozitin dayanımını düşürmekte daha gevrek bir yapı meydana gelmesine sebep olmaktadır (Şekil 4.166.a). Benzer sonuçlar AA2124/SiC 2μm/30 kompozitte de karşımıza çıkmaktadır (Şekil 4.166.b). %5 grafit katkılı kompozit katkısızdan sertlik olarak %50 daha yumuşak olurken, bu numunenin yaşlandırılmasıyla bu fark daha da artmaktadır. Grafitsiz numunenin yaşlandırılması da yumuşamasına sebep olmuştur. Bu konuların çalışmaya açık olduğu görülmektedir. Genel olarak sertlik değerlerine baktığımız zaman en sert numunenin performans testlerinde kullandığımız AA2124/SiC 2μm/30 kompozit olduğu görülmektedir (216HB10). Bu numenin sertliği yaşlandırmayla birlikte 219 HB10 sertlik değerine çıkmıştır



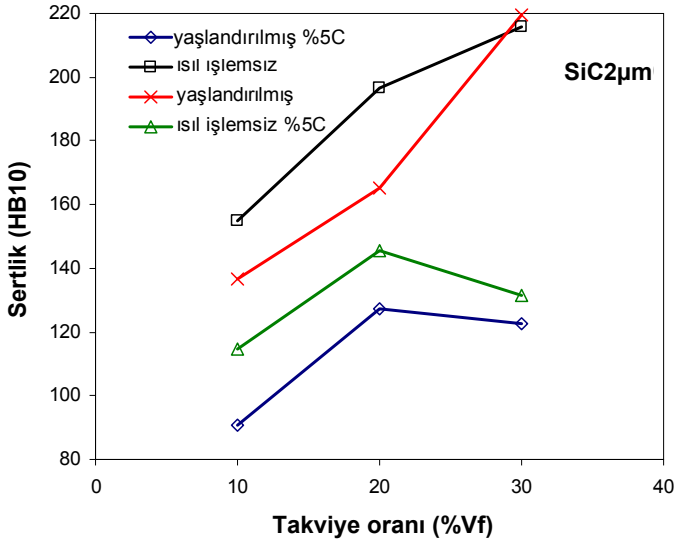
Şekil 4.165. Kompozit kamların 175°C'de 8 saat yaşlandırılması sonrasında sertliklerindeki değişim a) AA2124/SiC 20μm b) AA2124/SiC 2μm c) AA2124/B_4C d) AA2124/SiC 2μm+%5 Grafit.

(Şekil 4.166.b). Aradaki farkın düşük olması sebebiyle yeniden kam aşınma testi yapılmamıştır. Ayrıca takviyesiz AA2124 kam sertliği yaşlandırma işlemi sonrasında %4 düşerken (118HB10), AA2124/SiC2μm/10 kompozit billetinden elde edilen ekstrüzyon kam profillerinin sertlikleri %35 oranında artarak 136HB10 değerine ulaşmıştır (Şekil 4.166.b). Ekstrüzyon ürünü kamlar ısıl işlem görememiş durumda takviyesiz ısıl işlemsiz AA2124 kam profilinden %19 daha az sert iken, numunenin sertleştirilmesiyle ekstrüzyon ürününün sertliği %15 daha fazla olmaktadır. Ekstrüzyon ürünüyle aynı içerikteki toz metalürjisiyle imal edilen numuneler karşılaştırıldığında, ısıl işlem yapılmamışken ekstrüzyon ürünü kompozit %35 daha az sert iken, yaşlandırma sertleştirmesi sonrasında sertlik değerleri aynı olmuştur.

Bu bilgiler ışığında farklı takviye tipleri farklı alüminyum matriste farklı yaşlanma karakteristikleri ortaya çıkartmaktadır. Yapılan ısıl işlemler sonrasında



(a)

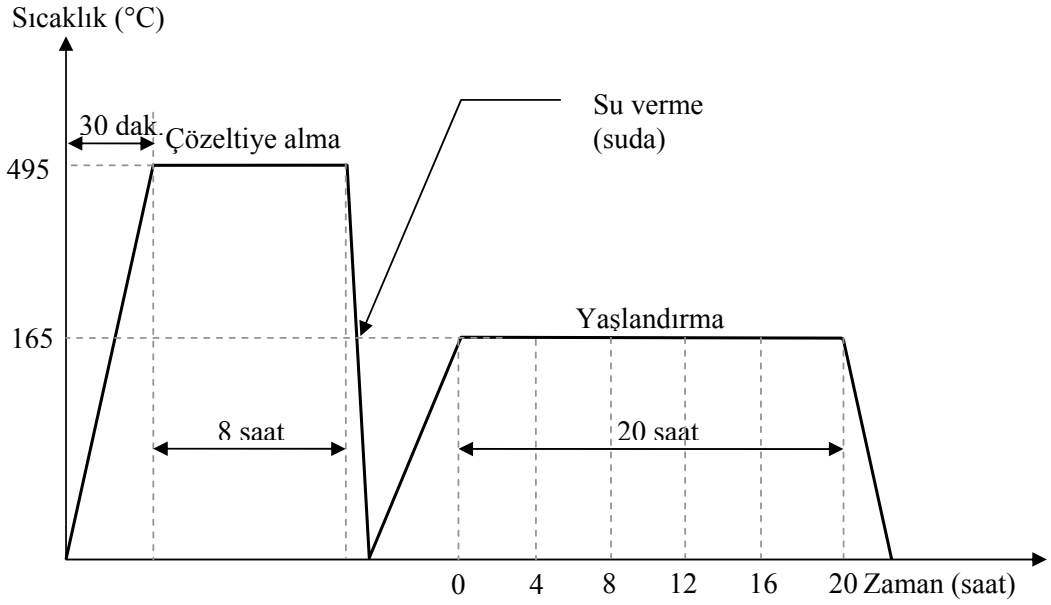


(b)

Şekil 4.166. Kompozit kamlardaki yaşlandırma ve grafit katkısı etkilerinin birlikte değerlendirilmesi.

malzemelerde istenilen sertlik artışları gerçekleşmediğinden dolayı, imalatını yaptığımız kompozitlerde takviye tiplerinin ve yaşlandırma süresinin malzemenin sertliğine olan etkilerinin incelenerek optimum yaşlandırma süresi ve sertliğin tespit edilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu sebeple toz metaürjisi yöntemiyle üç farklı tipte numune hazırlanmıştır. İmalatlar tozların kalıp içerisinde soğuk olarak 150 MPa basınç altında preslenmesi ve 615°C sıcaklıkta 1 saat sinterlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeyleri 400, 600, 800, 1000 ve 1200'lük su zımparalarıyla zımparalandıktan sonra 0,25 μm tane boyutunda Al_2O_3 taneleri içeren struers alümina sıvı solüsyonu kullanılarak keçeyle parlatılmıştır. Ardından

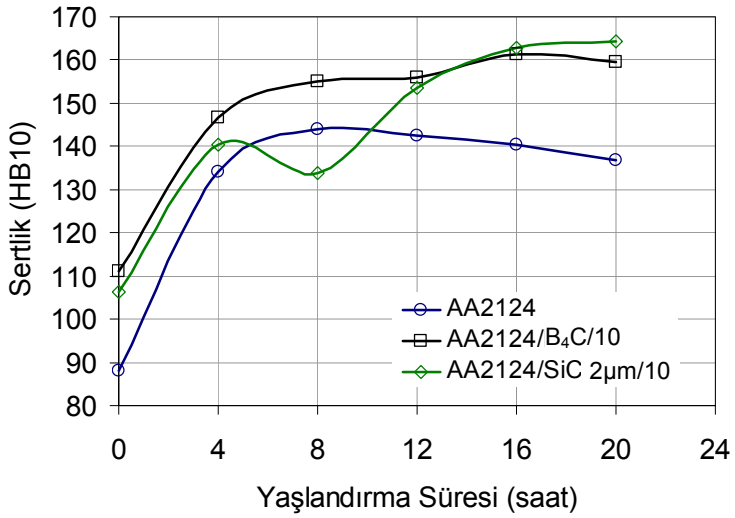
numuneleri ısıl işlem öncesi sertlikleri Brinell sertlik ölçme cihazıyla, 2.5 mm bilya çapı ve 62.5 kg'lık yük kullanılarak ölçülmüştür (HB10). Çökeltme sertleştirmesi işlemi çözeltiye alma ve yaşlandırma olarak iki aşamada yapılmıştır. Numuneler 495°C sıcaklıkta 8 saat fırında çözeltiye alma işlemine tabi tutulup sürenin dolmasıyla birlikte suda soğutulmuşlardır. Ardından 165°C sıcaklıkta numuneler 4, 8, 12, 16 ve 20 saat yaşlandırma serleştirmesine tabii tutularak suda soğutulmuşlardır (Şekil 4.167). Yaşlandırma işlemi sonrasında da numunelerin sertlikleri (Tablo EK-1.8) ölçülerek zamana bağlı olan AA2124 takviyeli ve takviyesiz kompozitlerin yaşlanma sonrası sertlik grafikleri çizilmiştir.



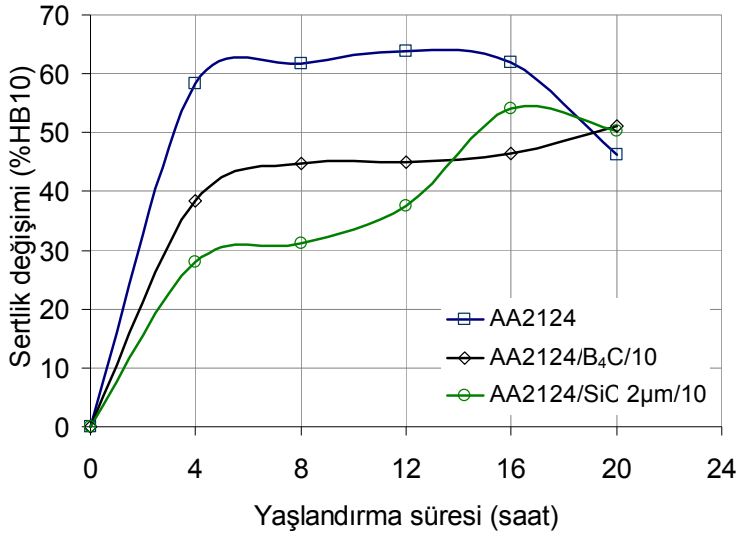
Şekil 4.167. AA2124 için çözeltiye alma ve yaşlandırma deneyi sıcaklık-süre şematiği.

Yaşlandırma işlemi sonrasında B_4C ve SiC takviyeli kompozitlerin en yüksek sertlik değerlerine 20 saat sonrasında ulaştıkları görülürken, takviyesiz AA2124 numune için maksimum sertlik değeri 8 saatlik yaşlandırma işlemi sonrasında elde edilmiştir (Şekil 4.168). Ancak B_4C takviyeli kompozit dikkate alındığında 8 saatlik yaşlandırma, SiC takviyeli kompozit dikkate alındığında ise 12 saatlik yaşlandırma süreleri sonrasında elde edilen sertlik değerlerinde aşırı bir değişim olmadığı görülmektedir (Şekil 4.168). Zaman ve enerji açısından tasarruf sağlanmak istenirse bahsi gecen sürelerde yaşlandırma yapmak mümkündür. Takviyesiz numunede maksimum noktadan sonra düşüş başlarken takviyeli numunelerde sertlik

artışları tespit edilmiştir. Başlangıç sertliği dikkate alınıp numune sertliğinin yüzde (%) değişim grafiği çizilmiştir (Şekil 4.169). Bu grafikte 8 saat sonrasındaki % sertlik değişimi AA2124 malzemede olurken, takviyeli kompozitlerde 20 saat sonrasında en yüksek sertlik değişimi elde edilmiştir (Şekil 4.169). Başlangıç sertliği saf alüminyumda daha düşük olduğu için sertlik değişimi oldukça fazla görülürken sertliklerinin diğerlerinden daha düşük olduğu gözden kaçmamalıdır.



Şekil 4.168. AA2124, yaşlandırma süresinin malzeme sertliğine olan etkisi.



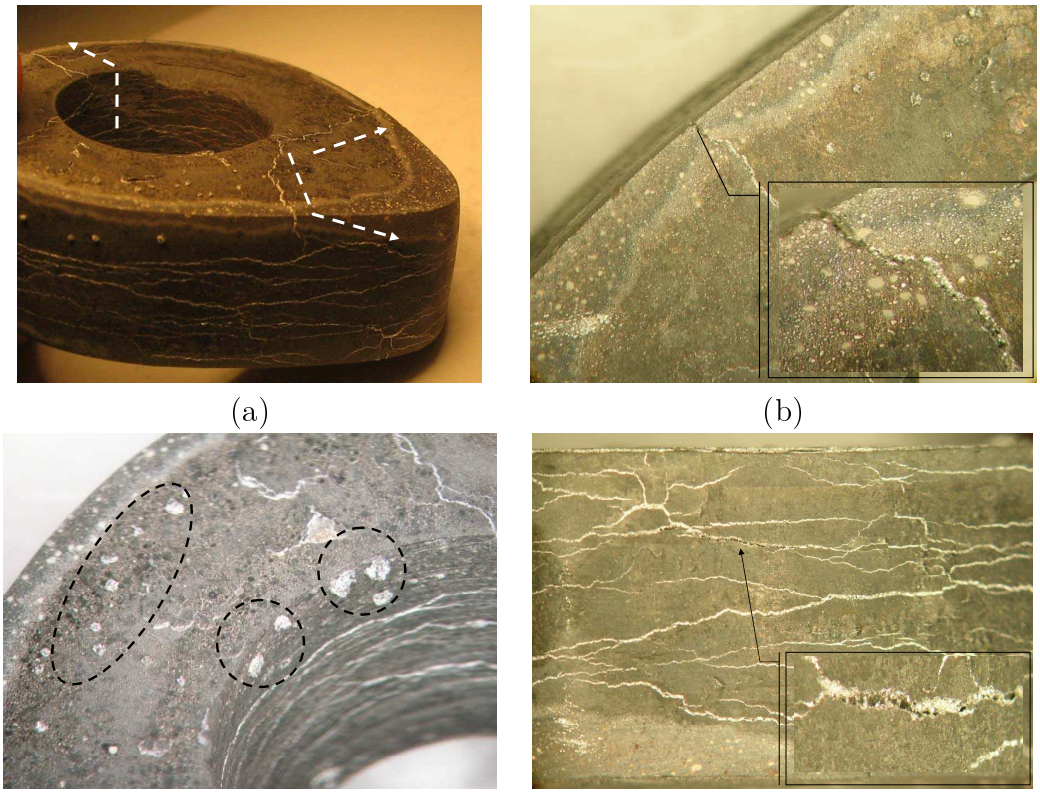
Şekil 4.169. AA2124, yaşlandırma süresinin malzeme sertliğine olan etkisi (%değişimi).

Literatürde bu konudaki yapılan çalışmalardan bazılarında partikül takviyesiyle yaşlanma sonrasındaki sertlik artışının daha kısa sürede görüldüğü tespit edilmiştir.

Ayrıca takviye oranının artmasıyla birlikte malzemenin sertliğinde düşüşlerin olduğu ve aşırı takviye kullanılması durumunda yaşlandırma sonrasında sertlik değerlerinin takviyesiz numunelere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışmaların genelinde imalat yöntemi olarak karıştırmalı döküm seçilirken, takviye boyutları çalışmamızda kullandıklarımızdan çok daha fazla olmaktadır. Dolayısıyla bu farklılıklar değişik sonuçların elde edilmesine neden olmaktadır. deney sonrasında partikül takviyeli kompozitlerin sertliklerinde aşırı düşüşün olmaması ani sıcaklık değişimlerinde yada sıcaklığın uzun süre yüksek sıcaklıkta seyretmesi durumunda malzemelerin aşırı yumuşamayacağı söylenebilmektedir. Tüm bu ifadelerin ışığında yaşlandırma işlemi sonrasında takviyesiz alüminyum numunede 8 saat yaşlanma sonrası sertliği maksimum %62, B_4C takviye kullanılması durumunda 16 saat yaşlanma sonrasında %50 ve SiC takviyeli kompozitin 20 saat yaşlanma sonrasında sertlik değişimi %52 olmaktadır.

Yaşlandırma süresi-sertlik karakteristikleri deneyinden elde edilen grafiklerden yola çıkarak performans testlerinde iyi sonuçların alındığı AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam profiline çökeltme sertleştirmesi uygulanmıştır. Kam numune 495°C sıcaklıkta 8 saat çözeltiye alma işleminden sonra suda soğutulmuş ve 165°C sıcaklıkta 20 saat yaşlandırılmıştır. Isıl işlem uygulanmadan önce 225 HB10 olan sertlik değeri yaşlandırma işleminden sonra 204 HB10'a düşmüştür. Çözeltiye alma işleminden sonra malzeme yüzeylerinde derin çizik ve çatlakların oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.170).

Numuneler imal edilirken kalıp içerisinde sürekli bir basınç uygulanmasından dolayı malzeme içerisindeki gazların hareketi sınırlandırılmakta, ayrıca matris-takviye arasındaki termal genleşme farklarından dolayı oluşabilecek şekil bozuklukları engellenmekteydi. Fırın içerisinde herhangi bir kısıtlayıcı kuvvet olmadan 495°C gibi yüksek bir sıcaklıkta bu etkiler serbest kalmakta dolayısıyla malzeme yüzeyinde çatlaklar, kabarmış bölgeler ve matris terlemesinin meydana geldiği bölgeler oluşmuştur (Şekil 4.170). Yüzey çatlaklarının yan yüzeylerden sürtünme yüzeylerine doğru oradan da üst tepe noktasına doğru devam ettiği görülmüştür. Yüzeyde ve içyapıda oluşan bu hatalar dolayısıyla numune yeniden aşınma testine tabi tutulmamıştır.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 4.170. AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam profilinde çökeltme sertleştirmesi sonrasında meydana gelen hasarlar.

5. BÖLÜM

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

"Otomobil kam imalatı için ikame malzemesi olarak metal matrisli kompozitlerin kullanabilirliğinin araştırılması" genel başlığını taşıyan bu çalışmada hali hazırdaki uygulamalarda kullanılan Küresel Grafitli Dökme Demir kam profilleri yerine AA2124 alüminyum matrisli ve %10, 20, 30 oranlarında B_4C, SiC ve Al_2O_3 takviyeli kompozitlerden imal edilen kam profillerinin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Öncelikle kam imalatı için optimum imalat şartları belirlenmiştir. Ardından bu şartlarda imal edilen deneme numunelerinin sertlik, yüzey pürüzlülüğü, yoğunluk ve aşınma gibi özellikleri incelenmiştir. Bu testler sonrasında en iyi sonuç veren kompozitlerden kam profilleri imal edilmiştir. Bu kam profilleri tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen gerçek şartlarda kam profili aşınma deney düzeneğinde kuru ve yağlı şartlarda olmak üzere, farklı yük ve süreler belirlenerek performans testlerine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen sonuçlar, aynı şartlarda test edilen KGDD kam profilindeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca numune yüzeyleri, mikro yapıları taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenerek yüzey ve iç yapılarının, aşınma bölgelerinin karakteristikleri çıkartılmıştır.

Bu tezde elde edilen bulgulardan çıkarılan sonuçlar ve bu sonuçlar ışığında yapılabilecek öneriler genel hatlarıyla aşağıda verilmiştir.

5.1. Araştırmada Elde Edilen Önemli Sonuçlar

1. Metal matrisli seramik partikül takviyeli kompozitlerin sertlikleri takviye oranının artmasıyla artmaktadır. Takviye oranının optimum değerinden sonra matris-takviye bağı azalmakta dolayısıyla sertlikte azalmaktadır. Bu çalışma

şartlarında takviye oranının optimum değeri %30 olarak belirlenmiştir. Çünkü daha yüksek takviye oranlarında matris-takviye bağ oluşumu azalmakta boşluklar oluşmaktadır.

2. Sıkıştırmalı toz metalürjisi yöntemiyle kompozit imalatında basıncın arttırılmasının numune sertlik değerinde çok fazla bir değişim meydana getirmezken imalat sıcaklığının arttırılmasıyla sertlik değerinde artış olmaktadır.

3. Toz metalürjisi yöntemi için karıştırma mekanizmasının çok önemli olduğu tespit edilmiştir. Elle karıştırma yerine, uzun süreli karıştırma imkanı veren otomatik düzenek yada sistemlerin kullanılması gerektiği, bu şekilde homojene yakın bir karışımın elde edilebileceği görülmüştür.

4. Takviyeli kompozitlerin aşınma direnci ve sertlik değerleri takviyesiz monolitik matris malzemelerinden imal edilen numuneye göre daha yüksektir.

5. Alüminyum matrisli kompozitler için basınç altında sinterleme sıcaklığı 610-615^{o}C olarak tespit edilmiştir.

6. Sinterleme işlemi fırın içerisinde basınç altında yapılmalıdır, aksi taktirde kompozit içerisindeki elemanların farklı ısıl genleşme katsayılarından dolayı malzeme hasara uğramaktadır.

7. Basınç sabit iken imalat sıcaklığı artırıldığı zaman deneysel ve teorik yoğunluk birbirine %99,9 oranında yaklaşmaktadır.

8. Kompozit kam imalatı için en uygun yöntem basınç ve sıcaklık içeren toz metalürjisidir. Partikül boyutu küçük, takviye oranı yüksek kompozitlerin ekstrüzyonu mümkün olmamaktadır. Ekstrüzyon sırasında partiküller kalıp yüzeylerini çizerek kazımakta ve malzemenin gevrek olması durumunda yüzeylerinde ağır hasarlar meydana gelmektedir. Karıştırmalı dökümde ise, alüminyum matris ve takviye toz halinde kalıpta fırınlanır ise yüksek sıcaklıklara kadar ergimeden durabilmekte ve aynı zamanda tozlar birbirine yapışarak farklı bir yapı meydana getirmekte, bu yapının ergitilip dökülmesi mümkün olmamaktadır. Matris, malzemesi ergitilip içerisine partikül katılması durumunda, takviye boyutunun küçük olması sebebiyle ergiyik matrise dökülen

takviye tozları topaklanmakta ve karışmayı zorlaştırmaktadır. Büyük tane boyutlarında topaklanma ve karışmama zorluğu azalmaktadır.

9. Alümina takviyeli kompozitlerin aşınma dirençleri diğerlerine göre daha düşük olurken, SiC 2μm tane boyutunda %30 takviye içeren kompozit en iyi direnci vermektedir. Deneyde ağır hasara uğrayan numuneler matris-takviye bağlantısının yeterli olmamasından dolayı çok aşınmışlardır.

10. %10, 20, 30 oranlarında B_4C ve SiC takviyeli kompozit kam profillerinin 70N yük altında 150 dakika yağlı ortamda aşınma testleri sonrasında, aşınma oranı (W) açısından en yüksek olanı AA2124/SiC 20μm/30 en düşük olanı AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kamdır. Aşınma direnci (W_R) dikkate alındığında en yüksek değer AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kamda elde edilmiştir. Aşınma oranı ve direnci kompozitlerden daha düşük olan KGDD kamlar yoğunluğun dikkate alınmasıyla hesaplanan özgül aşınma direnci (W_{SR}) bakımından da AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kamdan düşük değere sahiptir.

11. Ön aşınma testlerinde aşınma performansının en iyi olduğu tespit edilen AA2124/SiC 2μm/30 kam profili ile KGDD kam profili ön denemelerden farklı şartlarda gerçekleştirilen performans testlerine tabi tutulmuşlardır (ölü yük 140 N, deney süresi 1200 dakika). Performans testleri sonunda adı geçen kam profillerinin aşınma oranları (W) birbirine çok yakındır. Ancak aşınma direnci (W_R) ve özgül aşınma direnci bakımından AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kam KGDD kamdan daha performanslıdır. Ancak sürtündükleri karşı elemanın aşınmasıda dikkate alınarak birlikte değerlendirildiklerinde (tribolojik çift toplam aşınması) kompozit kam az aşınmasına rağmen karşı elemanı KGDD kamın karşı elemanını aşındırdığından daha fazla aşındırıp zarar verir. Karşılıklı temas eden elemanların özgül aşınma dirençlerinin toplanmasıyla bulunan tribolojik çift özgül aşınma dirençleri açısından (W_{SRT}) karşı elemanın az aşınma miktarından dolayı KGDD'li tribolojik çift özgül aşınma değerleri AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kamlı tribolojik çift özgül aşınma değerinden daha yüksek olmuştur. KGDD tribolojik çift referans alındığında, AA2124/SiC 2μm/30 kompozit kamlı tribolojik çift özgül aşınma direnci KGDD'li tribolojik çift özgül aşınma direnci değerine %77 oranında yaklaşmıştır.

12. Performans testleri sonrasında kam yüzeylerinde en büyük hasar kaldırma ve indirme bölgelerinde görülürken, takviye oranının düşmesiyle bu bölgelere tepe noktasıda eklenmiştir.

13. Kompozit içerisine grafit katkısının yükün değişken olduğu durumlarda malzemenin aşınma davranışını ve dayanımını kötüleştirdiği görülmüştür. Grafit oranının artmasının aşınma direncini daha fazla düşürdüğü tespit edilmiştir. Grafitin yağlayıcı ve yapışmayı engelleyici özelliği, tozların birbiriyle güçlü bağ oluşturmasını engelleyerek malzemenin kırılgan olmasına sebep olmaktadır.

14. AA2124/SiC 2μm/10 ve AA2124/B_4C 1-7μm/10 kompozitler ve takviyesiz AA2124 numunelerle yapılan 4, 8, 12, 16, ve 20 saatlik yaşlandırma serleştirmesi işlemi sonucunda; takviyesiz numune en yüksek sertlik değerine 8 saat sonra ulaşıp daha yüksek yaşlanma sürelerinde sertiliği düşerken, kompozit numune sertlikleri sürekli bir artış eğilimi göstererek en yüksek sertlik 20 saat sonunda elde edilmiştir. Numunelerdeki sertlik artışı takviyesizde %60 olurken, kompozitlerde ortalama %40-50 arasındadır.

15. Sıcak pres yöntemiyle imal edilen kompozitler diğer yöntemlerle imal edilen kompozitlere göre daha sert olmaktadır. Ekstrüzyon ürünleri sertleştirilebilmekte ancak sıcak pres numunelerin sertlik değerine ulaşamamaktadır.

5.2. Araştırma Sonuçları Dikkate Alınarak Yapılabilecek Öneriler

1. Kompozit yüzey kalitesinin arttırılması karşı malzemedeki hasarların azalmasını sağlar, bu sebeple yüzey kalitesini arttıracak kaplama yada fonksiyonel kademelendirme tekniklerinin araştırılıp uygulama çalışmaları yapılmalıdır.

2. Sürtünme sırasında aşınan yüzeylerden yağa geçen partiküllerin yüzeylerden uzak tutulmaya çalışılması faydalı olacaktır. Bunun için sürtünme ara yüzeyinden akan yağın filtrelenerek ara yüzeye temiz yağ gönderilmesi testler için daha faydalı olacaktır.

3. Takviye oranı yüksek, partikül boyutu küçük kompozitlerin ekstrüzyonu sırasında oluşan hasarların sebeplerinin araştırılması ve bu sebeplerin ortadan kaldırılması

için yapılması gerekenlerin belirlenmesi konusunda detaylı araştırmaların yapılması faydalı olacaktır. Aynı paralelde ekstrüzyon oranının kompozit ürün mekanik ve yüzey özelliklerine olan etkiside incelenebilecek konulardan birisidir.

4. Farklı matris ve takviye elemanlarıyla benzer çalışmalar yaparak karşılaştırma imkanı elde edilebilir ve diğer malzemelerinde davranışları hakkında bilgi sahibi olunmalıdır.

5. Kompozitlerin sertliklerinin artırılmasıyla aşınma dirençlerinin iyileştirimesi konularında çok sayıda parametre kullanılarak optimum süre ve sıcaklık tespit edilmelidir.

6. Deneysel çalışmalar bilgisayar simülasyonlarıyla desteklenip, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalıdır.

7. Tamamlanan çalışmalar ışığında kompozit malzemeleri tribolojik özellikleri, toz metalürjisi ve kam milleri konularında çalışanlara referans olabileceği gibi, kompozitlerin kullanımı diğer makine elemanları içinde araştırılarak önemli bulgular elde edilmelidir.

8. Bu çalışmada aşınma performansı açısından mevcut kamlara %77 oranında yaklaşıldığı halde, kompozit kamın hafif olması nedeniyle sağlayacağı yakıt tasarrufuda dikkate alınarak yeniden ekonomik bir karşılaştırma yapmaya yönelik araştırmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Ermolaeva N.S., Kaveline K. G., Spoormaker J. L., Materials selection combined with optimal structural design: concept and some results, Material and Design, 23, 459-470, 2002.

2. Jambor A., Beyer M., New cars-new materials, Materials and Design, 18 (4/6), 203-207, 1997.

3. Hunt W. H., New automotive directions for Al-based PM, Metal Powder Report, 55(15), 28-36, 2000.

4. Trends in engine technology and tribology, Tribology International, 27(1), 3-7, 1994.

5. Hoover W.R., Duralcan composite drive shafts, Duralcan,USA, 1999.

6. Miller W.S., Zhuang L., Bottema J., Wittebrood A.J., Smet P., Haszler A., Vieregge A, Recent development in aluminium alloys for the automotive industry, Materials Science and Engineering A, 280, 37-49, 2000.

7. Miracle D. B., Metal matrix composites-from science to technological significance, Composite Science and Technology, 65, 2526-2540, 2005.

8. Xiandong S., Chengping L., Zhuoxuan L., Liuzhang O., The fabrication and properties of particle reinforced cast matal matrix composites, Journal of Materials Processing Technology, 63, 426-431, 1997.

9. Cholewa M., Gawronski J., Ignaszak Z., Technological aspects of particle-reinforced composites production, Materials Design, 18(4), 401-405,1997.

10. Michalski J., Marszalek J., Kubiak K., An experimental study of diesel engine cam and follower wear with particular reference to the properties of the materials, Wear, 240, 168-179, 2000.

11. Nayak N., Lakshminarayanan P.A., Babu M.K.G., Dani A.D., Predictions of cam follower wear in diesel engines, Wear, 260(1-2), 181-192, 2006.

12. Metal Powder Report, PM camshaft technology, 47(1), 16-19, 1992.

13. Metal Powder Report New developments in PM composite camshafts, 49(12), 66, 1994.

14. Metal Powder Report, Joint venture to produce PM camshafts in USA , Product Review, 51(1), 3, 1997.

15. Metal Powder Report, Process economics and technological advances in PM automotive part production, 34(4), 53-62, 1998.

16. MCRS, Automotive Tech Articles, www.musiccityrodshop.com.

17. Ellis O., Russelburg J.r., understanding camshafts, Lunati chamshats inc., http://www.holley.com, 2004.

18. Nunney M. J., Light and Heavy Vehicle Technology, Newnes Ltd. UK, 1992.

19. Eyre T.S., Crawley B., Camshaft and cam follower materials, Tribology International, 13, 4, 147-152, 1980.

20. Bayrakçeken H., Ucun I., Tasgetiren S., Fracture analysis of a camshaft made from nodular cast iron , Engineering Failure Analysis, 13, 1240-1245, 2006.

21. Ipek R., Selçuk B., The dry wear profile of cam shaft, Journal of Materials Processing Technology, 168, 373-376, 2005.

22. Sert H, Can A., Arıkan H., Selcuk B., Toprak H., Wear behavior of different surface treated cam spindles, Wear , 260, 1013-1019, 2006.

23. Wang G., Taylor D., Bouquin B., Devlukia J., Ciepalowicz A., Prediction of fatigue failure in a camshaft using the crack modelling method, Engineering Failure Analysis, 7, 189-197, 2000.

24. Hagedorn M., Weinert K., Manufacturing of composite work pieces with rolling tools, Journal of Material Processing Technology, 153-154, 323-329, 2004.

25. Ibrahim I.A., Mohamed F.A. Lavernia E.J., Particulate reinforced metal matrix composites-a review, Journal of Materials Science, 26, 1137-1156, 1991.

26. Goswami R.K., Sikand R., Dhar A., Grover O.P., Jindal U.C., Gupta A.K., Extrusion characteristics of aluminium alloy /SiCp metal matrix composites, Materials Science Technology, 15, 443-449, 1999.

27. Suresh S., Mortensen A., Needleman A., Fundamentals of Metal-Matris Composites, Butterworth-Heinnemann, USA, 1993.

28. Hashim J., Looney L., Hashmi M. S. J., Particle distribution in cast metal matrix composites Part I, Journal of Materials Processing Technology, 123(2), 251-257, 2002.

29. Posmyk A., Influence of material properfies on the wear of composite coating, Wear, 254, 399-407, 2003.

30. Hutchings I.M., Tribology in Friction and Wear of Engineering Materials, Edward Arnold, London, 1992.

31. Sahin Y., Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitapevi, Ankara, 2000.

32. Chein C. W., Lee S. L., Lin J. C., Jahn M. T., Effects of SiCp size and volume fraction on properties of Al/SiCp composites, Materials Letters, 52, 4, 334-3415, 2002.

33. Peng Y., Cheng-Ji D., Nan-Gang M. and Dickon H. L. Ng., A new method of producing uniformly distributed alumina particles in Al-based metal matrix composite, Materials Letters, 58, 5, 679-682, 2004.

34. Lee J.C., Ahn J.P., Shi Z., Shim J.H., Lee, H.I., Methodology to Design The Interfaces in SiC/Al Composites, Metallurgical and materials Transactions A, 32A, 1541-1550, 2001.

35. Kevorkijan M.K., An Ideal Reinforcement for Structural Composites, American Ceramic Society Bulletin, 76(12), 61-67, 1997.

36. Matthew D.V., Johnson C.W., Lelonis, D., Alt C., et al., Advanced Materials and Powders Handbook, American Ceramic Society Bulletin, 78(6), 69-81, 1999.

37. Moussa B., James E.S., Suresh V.G., Concentration fields in the solidification processing of metal matrix composites, International Journal of Heat and Mass Transfer, 45(21), 4251-4266, 2002.

38. Kaczmar J.W., Pietrzak K. Wlosinski W., The production and application of metal matrix composite materials, Journal of materials processing technology, 106, 58-57, 2000.

39. William C., Harrigan J., Commercial processing of metal matrix composites, Materials science and engineering, A244, 75-79, 1998.

40. Li X.Y., Tandon K.N., Microstructural characterization of mechanically mixed layer and wear debris in sliding wear of an Al alloy and an Al based composite, Wear, 245, 148-161, 2000.

41. Straffelini G., Bonolo F., Molinari A., Tiziani A., Influence of matrix hardness on dry sliding behaviour of 20 vol.% Al_2O_3-particulate-reinforced 6061 Al metal matrix composite, Wear, 211, 192-197, 1997.

42. Yılmaz O., Buytoz S., Abrasive wear of Al_2O_3-reinforced aluminium-based MMCs, Composite Science and Technology, 61, 2381-2392, 2001.

43. Bindumadhavan P.N., Wah H.K., Prabhakar O., Dual particle size composites: effect on wear and mechanical properties of particulate metal matrix composites, Wear, 248, 112-120, 2001.

44. Dasgupta R., Meenai H., SiC particulate dispersed composites of an Al-Zn-Mg-Cu alloy: property comparison with parent alloy, Materials Characterization, 54, 438-445, 2005.

45. Thakur S. K., Dhindaw B. K., The influence of interfacial characteristics between SiCp and Mg/Al metal matrix on wear, cofficient of frintion and microhardness, Wear, 247, 191-201, 2001.

46. Karamış M.B., Cerit A.A., Nair F., Surface characteristics of projectiles after frictional interaction with metal matrix composites under ballistic condition, Wear, 261, 738-745, 2006.

47. Yang L.J., A methodology for the prediction of standard steady-state wear coefficient in an aluminium-based matrix composite reinforced with alumina particles, Journal of Materials Processing Technology, 162-163, 139-148, 2005.

48. Yang L.J., The transient and steady wear coefficients of A6061 aluminium alloy reinforced with alumina particles, Composite Science and Technology, 63, 575-583, 2003.

49. Li X.Y., Tandon K.N., Subsurface microstructures generated by dry sliding wear on as-cast and heat treated Al metal matrix composites, Wear, 203-204, 703-708, 1997.

50. Totik Y., Sadeler, R., Kaymaz, I. and Gavgali, M., The effect of homogenisation treatment on cold deformations of AA 2014 and AA 6063 alloys, Journal of Materials Processing Technology, 147(1), 30, 60-64, 2004.

51. Jeong J.H., Kim Y., Lee J.C., Mechanical properties of 2014Al/SiC composites with oxidized SiC particle, Metallurgical and materials characterization, 47(1), p 75-77, 2003.

52. Seo Y. H., Kang, C. G., Effects of hot extrusion through a curved die on the mechanical properties of SiCp/Al composites fabricated by melt-stirring, Composites Science and Technology, 59(5), 643-654, 1999.

53. Sauerborn M., McQueen H.J., Modelling extrusion of 2618 aluminium alloy and 2618-10%Al_2O_3 and 2618-20% Al_2O_3 composites, Materials Science and Technology, 14, 1029-1038, 1998.

54. Carvalho M.H., Marcelo T., Carvalhinhos H., Sellars C., Extrusion and mechanical properties of mixed powder and spray co-deposited Al 2014/SiC metal matris composite, Journal of Materials Science, 27, 2101-2109, 1992.

55. Dutta B., Samajdar I., Surappa M.K., Particle redistribition and matrix microstructure evoluation during hot extrusion of cast SiCp reinforced aluminium alloy matrix composites, Materials Science and Technology, 14, 36-46, 1998.

56. Chu H.S., Liu K.S., Yeh, J.W., Study of 6061- Al2O3p Composites Produced by Reciprocating Extrusion, Metallurgical and materials Transactions A, 31A(10), 2000-2587, 2000.

57. Turenne S., Legros N., Laplante S., Ajersch F., Mechanical behaviour of aluminium matrix composite during extrusion in the semisolid state, Metallurgical and materials Transactions A, 30A, 1137-1442, 1999.

58. Chen W.C., Davies C.H.J., Samarasekera I.V., Brimacombe J.K., Hawbolt E.B., Mathematical modelling of the extrusion of 6061/Al2O3/20p composites, Metallurgical and materials Transactions A, 27A, 4095-4110, 1996.

59. Herba E.M., Queen H.J., Extrusion modelling of 6061 aluminium alloy and particle reinforced MMCs, Materials Science and Technology, 14, 1057-1064, 1998.

60. Lieblich M., Gonzalez-Doncen G., Aveda P., Ibanez J., Torrabla M., Caruana G., Extrudability of PM 2124/SiCp aluminium matrix composite, Journal of Materials Science letters, 16, 726-728, 1997.

61. Morsi K., McShane H.B., McLean M., Effect of particle size and volume fraction on hot extrusion Reaction synthesis of SiCparticle reinforced NiAl, Metallurgical and materials Transactions A, 31A, 1163-1670, 2000.

62. Abouelmagd G., Hot deformation and wear resistance of P/M aluminium metal matrix composites, Journal of Materials Processing Technology 155–156, 1395–1401, 2004.

63. Harris S.J., Cast metal matrix composites, Materials Science and Technology, 4, 231–238, 1988.

64. Long S., Beffort O., Cayron C., Bonjour C., Microstructure and mechanical properties of a high volume fraction SiC particle reinforced AlCu4MgAg squeeze casting,Materials Science and Engineering A, 269, 175–185, 1999.

65. Modi O.P., Two-body abrasion of a cast Al–Cu (2014) alloy—Al_2O_3 particle composite: influence of heat treatment and abrasion test parameters, Wear, 248, 100–111, 2001.

66. Poundens A., Bacroix B., Bretheau T., Influence of microstructures and particle concentrations on the development of extrusion textures in metal matrix composites, Materials Science and Engineering A, 196(1-2), 15, 219-228, 1995.

67. Lawrence C.W., Mummery P.M., Tweed J.H., Observations of extrusion-induced damage of metal -matris composites, Journal of Materials Science letters, 12, 647-649, 1993.

68. Jiang J., Collado C., Keeley D., Dodd B., Room temperature formability of particle reinforced metal matrix composites: forging, extrusion and deep drawing, Composites, 26(11), 785-789, 1995.

69. Das, S., Mondal D.P., Yegneswaran A.H., Effect of particle reinforcement on the upsetting and cold indirect extrusion behaviour of 2014 Al-alloy, Advances in production and processing of Aluminium (APPA), Bahrain, 2001.

70. Vaidya R.U., Zurek A.K., Effect of matrix ageing conditions on the low strain rate response of a B_4C particle reinforced 6061 aluminium matrix composite, Journal of Materials Science letters, 15, 385-387, 1996.

71. Mooi H. G., Koenis P. T. G and Huitink, J., An effective split of flow and die deformation calculations of aluminium extrusion, Journal of Materials Processing Technology, 88(1-3), 67-76, 1999.

72. Zawrah M.F., Aly M.H., In situ formation of Al2O3–SiC–mullite from Al-matrix composites, Ceramics International, 32, 21–28, 2006.

73. Janney M.A., Microstructural development and mechanical properties of SiC and SiC–TiC composites, American Ceram. Soc. Bull., 65(2), 357–362, 1986.

74. Wei M., Zhi D., Brandon D., Microstructure and texture evolution in gel-cast α-alumina/alumina platelet ceramic composites, Scripta Materialia, 53, 1327–1332, 2005.

75. Hashim J., Looney, L., and Hashmi M. S. J., Particle distribution in cast metal matrix composites-Part II, Journal of Materials Processing Technology, 123(2), 258-263, 2002.

76. Sarıtaş S., Türker M., Durlu N, Toz metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri, Uyum Ajans, Ankara, 2007.

77. Blau P.J., Meyer H.M., Characteristics of wear particles produced during friction tests of conventional and unconventional disc brake materials, Wear, 255, 1261-1269, 2003.

78. Eriksson M., Jacobson S., Tribological surfaces of organic brake pads, Tribology International, 33(12), 817-827, 2000.

79. Gudmand-Höyer L., Bach A., Neilsen G.T., Morgen P., Tribological properties of automotive disc brakes with solid lubricants, Wear, 232, 168-175, 1999.

80. Borrego A., Ricardo F., Maria C., Joaquin I., Gaspar G., Influence of extrusion temperature on the microstructure and the texture of 6061Al-15 vol.% SiCw PM composites, Composites Science and Technology, 62(6), 731-742, 2002.

81. Wakil E., S.D., Extrusion of P/M Composites in the semi-solid state, The international Journal of Powder Metallurgy, 28, 2, 1992.

82. Sritharan T., Chan L. S., Tan L. K., Hung N. P. A, Feature of the reaction between Al and SiC particles in an MMC , Materials Characterization, 47(1), 75-77, 2001.

83. Semiatin S. L., Davis J.R., Forming and Forging, ASM International, Volume 14, USA, 1996.

84. Cabanettes F., Claret-Tournier J., Mohlin J., Nilsson P.H., Rosén B.G., Xiao L., The evolution of surface topography of injection cams, Wear, 266(5-6), 570-573, 2009.

85. Berns H., Koch S., Influence of abrasive particles on wear mechanism and wear resistance in sliding abrasion tests at elevated temperatures,Wear, 233-235, 424-430, 1999.

86. Shorowordi K.M., Haseeb A.S.M.A, Celis J.P., Velocity effects on the wear, friction and tribochemistry of aluminum MMC sliding against phenolic brake pad, Wear, 256(11-12), 1176-1181, 2004.

87. Tavakoli A.H. , Simchi A., Seyed Reihani S.M., Study of the compaction behavior of composite powders under monotonic and cyclic loading, Composites Science and Technology, 65, 2094–2104, 2005.

88. Taya M., Metal Matrix Composites-Thermomechanical Behaviour, Pergamon Pres., New York, 9-109, 1988.

89. Brown A., Criteria for Selecting the Component of Composites, Acta Metal. Mater., 41(5), 1313-1335, 1993.

90. Trumper R. L., Metal Matrix Composites-Application and Prospects, Metals and Mater., 3, 662-667, 1987.

91. Kerr J., Auto Tech: BMW's 3.0 Litre magnesium/aluminium composite engine block, www.canadiandriver.com, 2005.

92. Nair F., Al/SiCp Kompozitlerin Ekstrüzyonunda Kalıp Sürtünme-Aşınma özelliklerinin incelenmesi ve Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, 2005.

93. Kwok J.K.M., Lim S.C., High-speed tribological properties of some Al/SiCp composites. I. Frictional and wear-rate characteristics, Composite Science Technology, 59, 55-63, 1999.

94. Lee H., Lu W-H., Chan S., Abrasive wear of powder metallurgy. Al alloy 6061-SiC particle composites, Wear ,159, 223-231, 1992.

95. Gupta M., Surappa M. K., Qin S., Effect of interfacial characteristics on the failure-mechanism mode of a SiC reinforced A1 based metal-matrix composite, Journal of Materials Processing Technology, 67(1-3), 94-99, 1997.

96. Roebuck B., Gorley T.A.E., McCartney L.N., Mechanical property test procedures for metal matrix composites, Material science and technology, 5, 105-117, 1989.

97. Guo M.L.T., Tsao C.Y.A., Tribological behavior of self-lubricating aluminium/SiC/graphite hybrid composites synthesized by the semi-solid powder-densification method, Composite Science and Technology, 60, 65-74, 2000.

98. Hunt M., Making metal matrix composşstes stronger and tougher, Mech. Eng., 7, 43-46, 1989.

99. Liu Y., Rohatgi P.K., Ray S., Tribological characteristics of aluminum-50vol%graphite composite. Metall. Trans. A, 24A, 151-159, 1992.

100. Rohatgi P.K., Ray S., Liu Y., Tribological properties of metal matrix-graphite particle composites, Int. Mater. Rev. , 37(3), 129-135, 1992.

101. Liu Y., Lim S.C., Rohatgi P.K., Ray S., Friction and wear of aluminium-graphite composites: the smearing process of graphite during sliding, Wear, 159, 201-205, 1992.

102. Rohatgi P.K., Liu Y., Barr T.L., Tribological behaviour and surface analysis of tribodeformed Al alloy-50% graphite particle composites, Metall. Trans. A, 22A, 1435-1441, 1991.

103. Chen B., Bi Q., Yang J., Xia Y., Hao J., Tribological properties of solid lubricants for Cu based PM friction composites, Tribology International, 41, 1145-1152, 2008.

104. Hao HQ., Ding HD.,Li YW., Effect of graphite content on friction and wear properties of copper base material, J. Nonferrous Met., 7, 3, 120-123, 1997.

105. Lu D., Gu M., Shi Z., Materials transfer and formation of mechanically mixed layer in dry sliding wear of metal matrix composites against steel, Tribology Letter, 6, 57-61, 1999.

106. Zhan Y., Zhang G., Friction and wear behavior of copper matrix composites reinforced with SiC and graphite particles, Tribology Letter, 17, 91-98, 2004.

107. Allam I.M., Solid lubricants for applications at elevated temperatures, J. Materials Science, 26, 3977-3984, 1991.

108. Can A. Ç., Tasarım Mühendisleri için Malzeme Bilgisi, Birsen Yayınevi, Istanbul, 2006.

109. Onaran K., Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, Istanbul, 2006.

110. Özbek İ., A study on the re-solution heat treatment of AA2618 aluminum alloy, Materials Characterization, 58, 312-317, 2007.

111. Huda Z., Precipitation Strengtehening and Age-Hardening in 2017 Aluminum Alloy for Aerospace Application, European Journal of Scientific Research, 24, 4, 558-564, 2009.

112. Suresh S., Mortensen A., Needleman A., Fundamentals of Metal-Matrix Composites, Stoneham, USA, 1993.

113. Chawla K.K, Esmaeili A.H, Datye A.K, Vasudevan A.K, Effect of homogeneous/heterogeneous precipitation on aging behavior of SiCp/Al 2014 composite, Scripta Metallurgica et Materialia, 25(6), 1315-1319, 1991.

114. Appendino P., Badini C., Marino F., Tomasi A., 6061 aluminium alloy-SiC particulate composite: a comparison between aging behavior in T4 and T6 treatments, Materials Science and Engineering: A, 135, 275-279, 1991.

115. Kumai S, Hu J, Higo Y, S Nunomura, Hardness characteristics in aged particulate SiC/A356 cast aluminium alloy composites, Scripta Metallurgica et Materialia, 27(1), 107-110, 1992.

116. Christman T., Suresh S., Effects of SiC reinforcement and aging treatment on fatigue crack growth in an Al—SiC composite, Materials Science and Engineering: A, 102(2), 211-216, 1988.

117. Lee W.S., Lai C.H., Chiou S.T., Numerical study on perforation behavior of 6061-T6 aluminum matrix composite, Journal of Materials Processing Technology, 117(1-2), 125-131, 2001.

118. Torres B., Lieblich M., Ibáñez J., García-Escorial A, Mechanical properties of some PM aluminide and silicide reinforced 2124 aluminium matrix composites, Scripta Materialia, 47(1), 45-49, 2002.

119. Christman T., Suresh S., Microstructural development in an aluminum alloy-SiC whisker composite, Acta Metallurgica, 36(7), 1691-1704, 1988.

120. Christman T., Needleman A., Suresh S., An experimental and numerical study of deformation in metal-ceramic composites, Acta Metallurgica, 37(11), 3029-3050, 1989.

121. Mahon G.J., Howe J.M., Vasudevan A.K., Microstructural development and the effect of interfacial precipitation on the tensile properties of an aluminum/silicon-carbide composite, Ultramicroscopy, 30(1-2), 132-142, 1989.

122. Thomas M.P., King J.E., Quench sensitivity of 2124 Al alloy and Al/SiCp metal matrix composite, Scripta Metallurgica et Materialia, 31(2), 209-214, 1994.

123. Vaidya R., Chawla K.K, Thermal expansion of metal-matrix composites, Composites Science and Technology, 50(1), 13-22, 1994.

124. Gladysz G. M., Chawla K. K., ,Coefficients of thermal expansion of some laminated ceramic composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 32(2), 173-178, 2001.

125. Xu Z.R., Chawla K.K., Mitra R., Fine M.E., Effect of particle size on the thermal expansion of image TiC/Al XD™ composites,Scripta Metallurgica et Materialia, 31(11), 1525-1530, 1994.

126. Dutta I., Bourell D.L., Influence of dislocation density and distribution on the aging behavior of 6061 Al-SiCw composites, Acta Metallurgica et Materialia, 38(11), 2041-2049, 1990.

127. Arsenault R.J., Shi N., Dislocation generation due to differences between the coefficients of thermal expansion, Scripta Metallurgica et Materialia, 28(5), 623-628, 1993.

128. Mondal D.P, Das S., Suresh K.S., Ramakrishnan N., Compressive deformation behaviour of coarse SiC particle reinforced composite. Effect of age-hardening and SiC content, Materials Science and Engineering A, 460, 550-560, 2007.

129. Kent D., Schaffer G.B., Drennan J., Age hardening of a sintered Al-Cu-Mg-Si-(sn) alloy, Materials Science and Engineering A, 405, 65-73, 2005.

130. Sharmilee P., Mitra R., Bhanuprasad V.V., Aging behaviour of Al-Cu-Mg alloy-SiC composites, Materials Science and Engineering A, 480, 496-505, 2008.

EK-1

Kompozit Numunelerin Boyut, Sertlik, Yoğukluk Değer Tabloları

Tablo EK-1.1. Numunelerin sertlik test sonuçları.

Num.	Hacim Oranı	Takviye Boyutu	Sertlik HRT (15 Kg)			Num.
No	(%Vf)	(μm)	1	2	3	Ort.
4	0		46.68	47.44	48.68	47.95
2	10	20	47.32	47.72	45.52	46.48
5	10	20	36.76	36.16	33.60	34.73
6	10	20	31.16	35.50	35.24	33.39
9	20	20	63.16	44.28	52.92	53.52
10	30	20	73.72	72.48	75.32	69.23
12	30	20	60.32	56.08	59.44	60.29
14	20	167	32.08	32.72	35.00	36.58
15	20	478	40.80	37.44	31.56	36.87
16	20	53	46.76	50.84	45.16	46.18
20	10	478	36.48	33.40	39.28	35.68
21	30	478	50.60	46.36	38.72	46.31
22	10	167	29.40	34.92	30.60	31.95
23	30	167	52.24	45.00	48.72	48.69
24	30	53	55.84	53.68	54.56	54.69
25	10	53	31.04	33.36	29.68	31.64
26	10	20	33.92	32.62	32.40	32.98
27	10	20	31.48	35.40	35.08	33.80
28	40	20	68.44	70.04	70.20	69.10
29	50	20	58.80	58.16	62.92	60.26

Tablo EK-1.2. Sertlik değerlerinin hacim oranı ve takviye boyutuna göre sınıflandırılması

Takviye Boyutu Hacim Oranı (%V_f)	20μm Sertlik HRT15Kg	53μm Sertlik HRT15Kg	167μm Sertlik HRT15Kg	478μm Sertlik HRT15Kg
0	46.54	46.54	46.50	46.54
10	38.20	31.64	32.00	35.68
20	50.47	46.18	36.60	36.87
30	61.54	54.69	48.70	46.31
40	69.10			
50	60.26			

Tablo EK-1.3. Kompozit numunelerin sertlik değerleri

No	İçerik	Boyut Matris	(μm) Takviye	Basınç (MPa)	Sıcaklık (^oC)	Süre (dak.)	Sertlik 1	HRB 2	100 Kg 3	Ortalama Sertlik
30				300	615		93	95	99	96
31				300	615		96	101	98	98
32				500	615		97	99	99	98
33	AA2124/SiC%30	24-34	2	400	550	30	83	84	92	86
34				400	500		58	55	57	57
35				400	450		×	×	×	×
36				700	500		55	59	62	59
37				400	450		66	65	67	66
38				400	500		69	70	68	69
39				400	550		79	78	76	78
40	AA2124/B_4C%30	24-34	1-7	700	500	30	76	83	81	80
41				300	615		91	89	87	89
42				400	615		90	91	90	90
43				500	615		92	91	91	91
44				400	450		52	50	53	52
46				400	500		49	60	60	56
47				400	550		78	80	78	79
48	AA2124/Al_2O_3%30	24-34	1	700	500	30	63	68	66	66
49				300	615		101	100	101	101
50				400	615		97	96	95	96
51				500	615		100	99	101	100
52				400	450		53	63	59	58
53				400	500		52	51	52	52
54				400	550		31	30	33	31
55	AA2124	24-34	×	700	500	30	61	60	55	59
56				400	615		40	41	43	41
57				300	615		51	50	34	45
58				500	615		37	34	36	36

Tablo EK-1.4. SiC takviyeli kompozit sertlik ve yoğunluk değerleri

Basınç	**Sıcaklık**	SiC (20 μm) Hacim Oranı (%V_f)															
		0%				10%				20%				30%			
(MPa)	(^oC)	**Yg**	**Yt**	**%U**	**HRT15**	**Yg**	**Yt**	**%U**	**HRT15**	**Yg**	**Yt**	**%U**	**HRT15**	**Yg**	**Yt**	**%U**	**HRT15**
200	23	2.602	2.780	93.6	x	2.149	2.824	76.1	x	2.146	2.867	74.8	x	2.749	2.911	94.4	x
	250	2.248		80.9	37.0	2.540		90.0	61.9	2.563		89.4	41.4	2.441		83.9	66.5
	450	2.595		93.3	63.5	2.560		90.7	62.8	2.649		92.4	67.8	2.629		90.3	64.2
	650	2.781		100	79.6	2.828		100	77.1	2.864		99.9	82.4	2.906		99.8	86.2
400	23	2.669		96.0	x	2.412		85.4	30.6	2.366		82.5	x	2.722		93.5	x
	250	2.453		88.2	x	2.574		91.2	72.5	2.617		91.3	58.3	2.533		87.0	x
	450	2.741		98.6	77.6	2.741		97.1	79.2	2.811		98.0	78.4	2.798		96.1	77.2
	650	2.785		100	77.8	2.830		100	75.2	2.863		99.8	82.3	2.904		99.8	84.6
600	23	2.583		92.9	63.6	2.557		90.6	41.1	2.523		88.0	31.9	2.712		93.2	40.1
	250	2.672		96.1	68.1	2.625		92.3	73.8	2.704		94.3	67.8	2.694		92.5	x
	450	2.760		99.3	77.2	2.801		99.2	78.4	2.834		98.8	79.3	2.862		98.3	79.9
	650	2.790		100	75.9	2.816		99.7	79.7	2.868		100	85.6	2.904		99.8	84.1
800	23	2.623		94.4	23.3	2.623		92.9	59.9	2.645		92.2	45.5	2.645		90.9	50.2
	250	2.609		93.9	x	2.678		94.8	75.7	2.697		94.1	70.0	2.750		94.5	58.1
	450	2.762		99.4	78.7	2.808		99.5	77.3	2.834		98.8	79.2	2.886		99.1	82.0
	650	2.783		100	82.0	2.825		100	79.5	2.873		100	81.6	2.904		99.8	85.8

Yt: Teorik yoğunluk
Yg: Gerçek yoğunluk
%U: % uygunluk
x: Ölçülemedi

Tablo EK-1.5. Kompozitlerin sertlik-yoğunluk değerleri

Numune Kodu	Matris Malzemesi	Takviye Elemanı	Takv. Oranı Vf, %	Sıcaklık (^oC)	Basınç (MPa)	Gerçek Yoğ. Yg, (gr/cm^3)	Teorik Yoğ. Yt, (gr/cm^3)	Yoğ. uygunluğu (%)	Ham Sertlik (HRT15)	Sint. Sertlik (HRT15)
D01	AA2124	Takviyesiz	0	23	200	2.602	2.780	93.6		
D02					400	2.669		96.0		
D03					600	2.583		92.3	63.57	39.28
D04					800	2.623		94.4	28.30	18.70
D05	AA2124	SiC 20 μm	10		200	2.149	2.824	76.1		
D06					400	2.412		85.4	30.55	
D07					600	2.557		90.6	41.07	
D08					800	2.623		92.9	59.90	29.30
D09			20		200	2.146	2.867	74.8		
D10					400	2.366		82.5		
D11					600	2.523		88.0	31.87	
D12					800	2.645		92.2	45.53	22.97
D13			30		200	2.749	2.911	94.4		
D14					400	2.722		93.5		
D15					600	2.712		93.2	40.13	
D16					800	2.645		90.9	50.20	12.83
D17	AA2124	Takviyesiz	0	250	200	2.248	2.780	80.9	37.00	
D18					400	2.453		88.2		
D19					600	2.672		96.1	68.07	21.07
D20					800	2.609		93.8		24.23
D21	AA2124	SiC 20μm	10		200	2.540	2.824	90.0	61.90	
D22					400	2.574		91.2	72.50	42.68
D23					600	2.625		93.0	73.80	45.90
D24					800	2.678		94.8	75.70	31.05
D25			20		200	2.563	2.867	89.4	41.43	38.28
D26					400	2.617		91.3	58.30	20.02
D27					600	2.704		94.3	67.77	28.27
D28					800	2.697		94.1	69.95	32.64
D29			30		200	2.441	2.911	83.9	66.48	
D30					400	2.533		87.0		
D31					600	2.694		92.5		
D32					800	2.750		94.5	58.05	
D33	AA2124	SiC 20μm	0	450	200	2.595	2.780	93.4	63.45	35.40
D34					400	2.741		98.6	77.60	69.80
D35					600	2.760		99.3	77.15	65.58
D36					800	2.762		99.4	78.68	70.73
D37			10		200	2.560	2.824	90.7	62.80	37.48
D38					400	2.741		97.1	79.15	72.10
D39					600	2.801		99.2	78.43	71.30
D40					800	2.808		99.4	77.30	73.26
D41			20		200	2.649	2.867	92.4	67.78	55.00
D42					400	2.811		98.0	78.43	77.58
D43					600	2.834		98.8	79.25	76.83

D44					800	2.834		98.4	79.23	76.93
D45			30		200	2.629	2.911	90.3	64.15	47.33
D46					400	2.798		96.1	77.20	71.68
D47					600	2.862		98.3	79.90	76.80
D48					800	2.886		99.1	82.00	73.20
D49	AA2124	Takviyesiz	0	650	200	2.781	2.780	100.0	79.63	60.05
D50					400	2.785		100.2	77.83	75.23
D51					600	2.790		100.4	75.90	50.68
D52					800	2.783		100.1	81.98	66.03
D53	AA2124	SiC 20μm	10		200	2.828	2.824	100.2	77.08	57.10
D54					400	2.830		100.2	75.23	57.94
D55					600	2.816		99.7	79.70	65.78
D56					800	2.825		100.0	79.50	53.1
D57			20		200	2.864	2.867	99.9	82.34	65.78
D58					400	2.863		99.8	82.25	70.86
D59					600	2.868		100.0	85.60	74.46
D60					800	2.873		100.2	81.58	62.46
D61			30		200	2.906	2.911	99.8	86.18	71.58
D62					400	2.904		99.8	84.60	69.50
D63					600	2.904		99.8	84.08	70.63
D64					800	2.904		99.8	85.75	68.48
D65	AA2124	Takviyesiz	0	500	600	2.760	2.780	99.3	74.84	62.90
D66		SiC 20μm	10			2.830	2.824	100.2	77.78	68.20
D67			20			2.829	2.867	98.7	81.90	72.52
D68			30			2.889	2.911	99.3	83.15	78.10
D69		Takviyesiz	0	615	600	2.782	2.824	98.5		77.30
D70		SiC 20μm	10			2.823	2.867	98.5		76.74
D71			20			2.863	2.911	98.4		79.34
D72			30			2.906	2.911	99.8		82.84
D73		SiC 2μm	10			2.798	2.824	99.1		79.28
D74			20			2.833	2.867	98.9		85.76
D75			30			2.863	2.911	98.3		87.56
D76		B_4C 1 7μm	10			2.749	2.682	102.5		78.64
D77			20			2.717	2.664	102.0		84.82
D78			30			2.682	2.646	101.4		87.66
D79		Al_2O_3 20-50μm	10			2.901	2.827	102.6		81.88
D80			20			3.020	2.954	102.2		82.92
D81			30			3.137	3.081	101.9		89.10
D82		Al_2O_3 1μm	10			2.867	2.827	101.4		78.34
D83			20			2.970	2.954	100.5		82.86
D84			30			3.077	3.081	99.9		88.60
D85		SiC 53μm	30			2.914	2.911	100.1		81.14
D86		SiC 167μm	30			2.912	2.911	100.0		84.2

Tablo EK-1.6. Üretim şartları, numunelerin yoğunluk ve sertlik değerleri.

Numune Kodu	Matris Tipi	Takviye Tipi	Hacim Oranı (Vf,%)	Basınç (MPa)	Sıcaklık (°C)	Gerçek Yoğ. (Yg, gr/cm^3)	Teorik Yoğ. (Yg, gr/cm^3)	Yoğunluk Uygunluğu (%U)	Sertlik HRT15
D87	AA2124	Takviyesiz	0	600	615	2.77	2.78	99.60	74.28
D88		Al_2O_3 1μm	10			2.90	2.83	102.37	78.54
D89			20			2.99	2.95	101.29	85.00
D90			30			3.10	3.08	100.71	90.18
D91		Al_2O_3 20-50μm	10			2.87	2.83	101.45	76.52
D92			20			3.02	2.95	102.30	83.28
D93			30			3.14	3.08	101.98	88.66
D94		B_4C 1-7μm	10			2.74	2.68	102.31	78.52
D95			20			2.71	2.66	101.73	83.12
D96			30			2.69	2.65	101.78	87.70
D97		SiC 2μm	10			2.82	2.82	99.87	80.70
D98			20			2.85	2.87	99.39	84.96
D99			30			2.89	2.91	99.10	88.84
D100		SiC 20μm	10			2.81	2.88	98.03	74.80
D101			20			2.85	2.91	97.80	79.98
D102			30			2.87	2.91	98.73	82.16
D103		SiC 53μm	30			2.91	2.91	100.07	81.02
D104		SiC 167μm	30			2.91	2.91	99.82	81.20

Tablo EK-1.7. Kam profillerinin yaşlandırma sonrası sertlik ölçümleri

Kompozit Kam Numune No	**Kompozit Bileşimi ×**	**HB10 (HBS2.5/62.5) Isıl işlemsiz**	**HB10 (HBS2.5/62.5) Yaşlandırılmış**	**Sertlik Değişimi (%)**
11	AA2124/B4C/10	124.67	132.00	05.88
12	AA2124/B4C/20	135.75	166.00	22.28
13	AA2124/B4C/30	195.80	203.67	04.02
14	AA2124/SiC20/10	121.00	131.00	08.26
15	AA2124/SiC20/20	140.00	152.33	08.81
16	AA2124/SiC20/30	138.25	174.00	25.86
17	AA2124/SiC2/10	154.75	136.67	-11.69
18	AA2124/SiC2/20	196.75	165.25	-16.01
19	AA2124/SiC2/30	216.00	219.75	01.74
20	AA2124	124.00	118.00	-04.84
21	AA2124/SiC2/30+5C	131.67	122.50	-06.96
22	AA2124/SiC2/20+5C	145.67	127.50	-12.47
23	AA2124/SiC2/10+5C	114.50	91.00	-20.52
24	AA2124/SiC2/20+2C	135.50	164.25	21.22
25	AA2124/SiC2/20+1C	171.50	175.50	02.33
Ekstrüzyon	AA2124/SiC2/10	101.00	136.67	35.31

Tablo EK-1.8. AA2124 takviyesiz ve partikül takviyeli kompozitin yaşlandırma süresiyle sertliğinin değişimi

Numune Bileşimi	Yaşlanma Süresi (saat)	Sertlik HB10 Isıl İşlemsiz	Sertlik HB10 Yaşlandırılmış	Sertlik Değişimi (%)
AA2124	0	88.2	–	0
	4	84.8	134.2	58.25
	8	89.0	144.0	61.80
	12	87.0	142.6	63.91
	16	86.7	140.4	62.00
	20	93.6	136.8	46.15
AA2124/B_4C/10	0	111.0	–	0
	4	106.0	146.6	38.30
	8	107.0	155.0	44.86
	12	107.6	156.0	44.98
	16	110.2	161.4	46.46
	20	105.5	159.4	51.09
AA2124/SiC2μm/10	0	106.2	–	0
	4	109.6	140.4	28.10
	8	102.0	133.8	31.18
	12	111.6	153.6	37.63
	16	105.6	162.8	54.17
	20	109.4	164.4	50.27

EK-2

Toz Boyutu Analizleri ve Aşınma Test Cihazı Model-Teknik Resimleri

MALVERN INSTRUMENTS MASTERSIZER E

Version 1.2b 12 Feb 2008 Tue 15:09

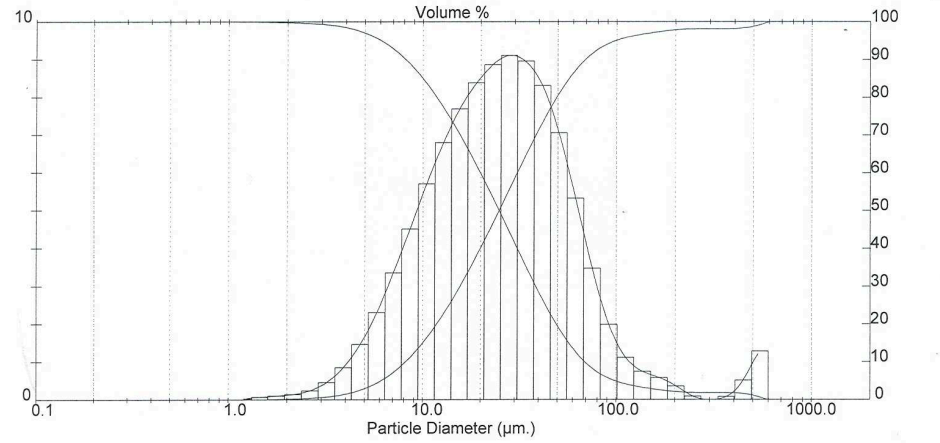
AL2124 :Run Number 6

Sample File Name: LEVENT , Record: 139 Source: Analysed
Measured on: 23 Jan 2008 Wed 00:42 Last saved on: 23 Jan 2008 Wed 00:42

Presentation: 2OHD
Polydisperse model Volume Result Focus = 300 mm.

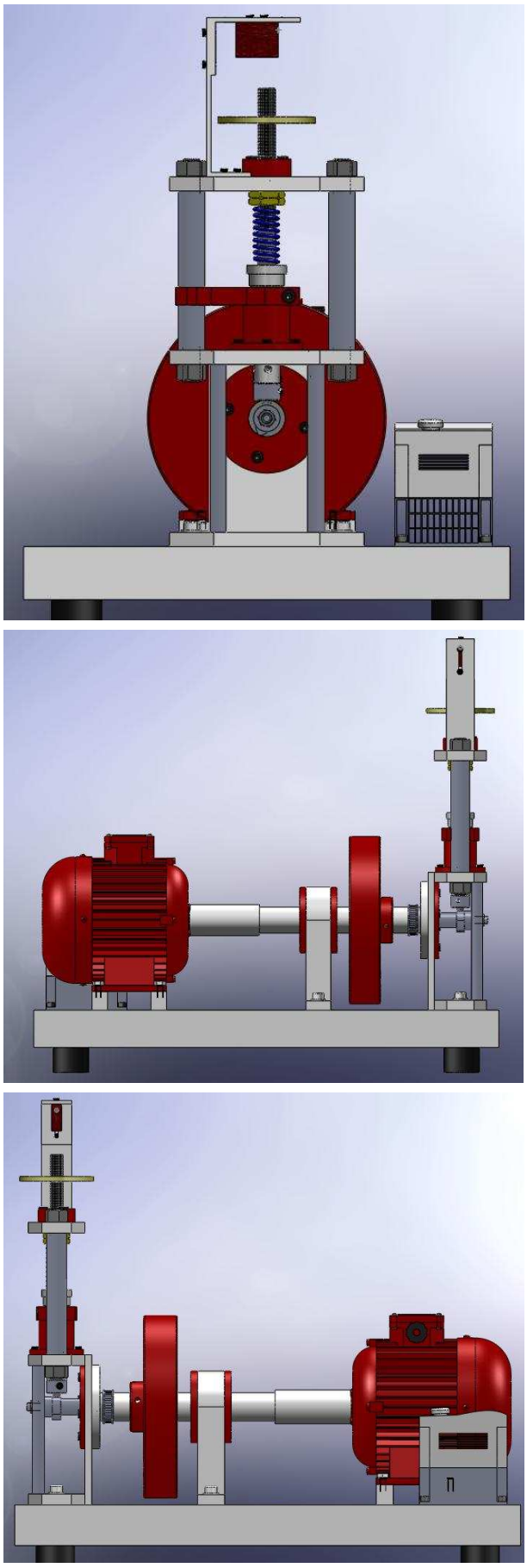
Residual = 0.292 % Concentration = 0.023 % Obscuration = 9.57 %
d (0 .5) = 24.91 µm d (0.1) = 8.16 µm d (0.9) = 69.08 µm
D [4, 3] = 41.34 µm Span = 2.45
Sauter Mean (D[3,2]) = 17.01 µm Mode = 28.72 µm
Specific Surface Area = 0.3526 sq. m. / gm Density = 1.00 gm. / c.c.

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	0.03	1.32	0.03
1.32	0.07	1.60	0.10
1.60	0.10	1.95	0.21
1.95	0.15	2.38	0.35
2.38	0.24	2.90	0.60
2.90	0.45	3.53	1.05
3.53	0.85	4.30	1.90
4.30	1.46	5.24	3.36
5.24	2.30	6.39	5.66
6.39	3.36	7.78	9.02
7.78	4.51	9.48	13.53
9.48	5.70	11.55	19.24
11.55	6.80	14.08	26.04
14.08	7.70	17.15	33.74
17.15	8.39	20.90	42.13
20.90	8.87	25.46	51.00
25.46	9.11	31.01	60.11
31.01	8.96	37.79	69.07
37.79	8.31	46.03	77.38
46.03	7.06	56.09	84.44
56.09	5.32	68.33	89.77
68.33	3.47	83.26	93.24
83.26	1.99	101.44	95.23
101.44	1.11	123.59	96.34
123.59	0.75	150.57	97.09
150.57	0.58	183.44	97.67
183.44	0.36	223.51	98.03
223.51	0.10	272.31	98.13
272.31	0.00	331.77	98.13
331.77	0.09	404.21	98.21
404.21	0.52	492.47	98.73
492.47	1.27	600.00	100.00

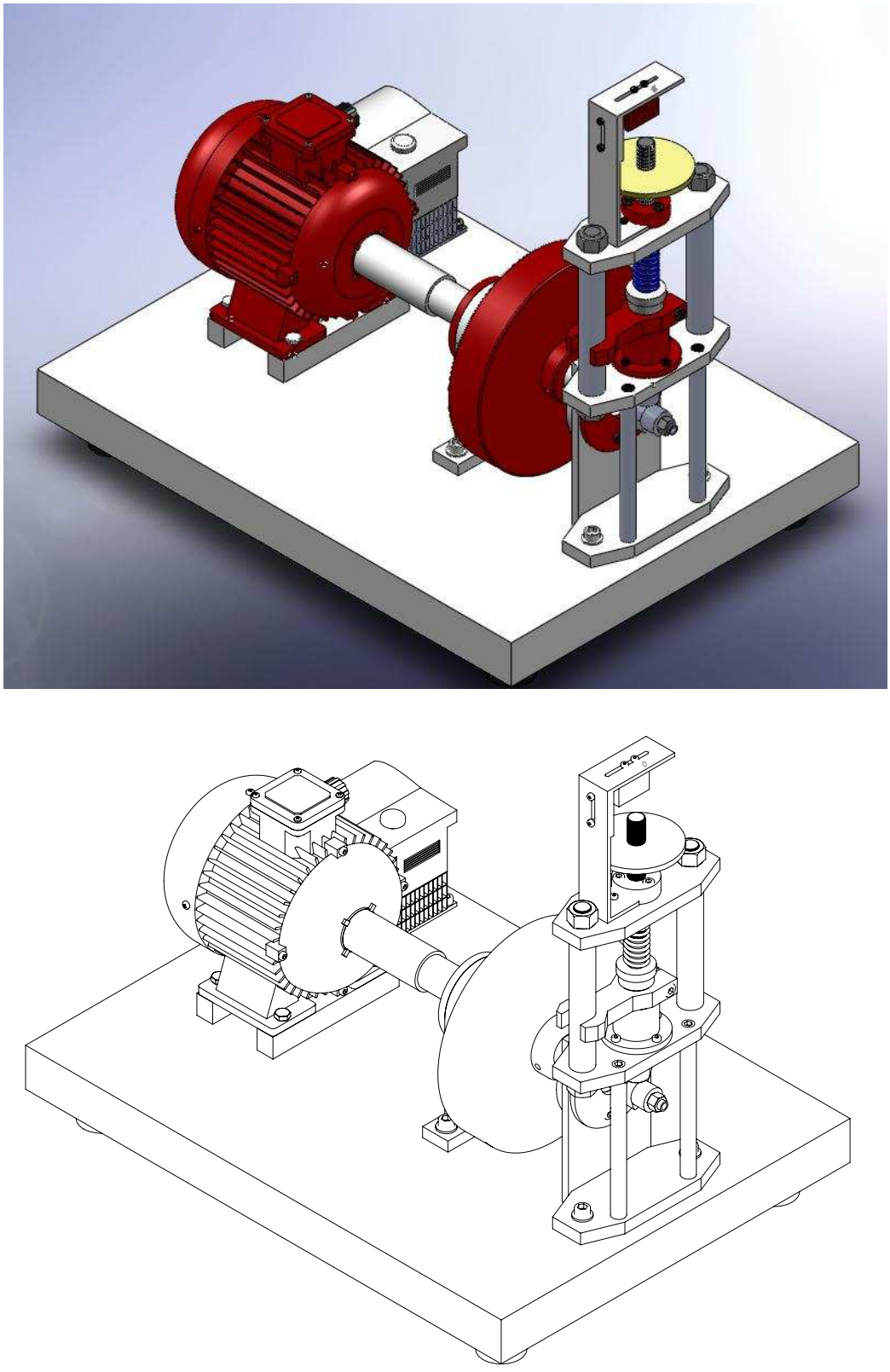


Malvern Instruments Ltd. MasterSizer E Ver. 1.2b p. 4
Malvern, U.K. Serial No. 12 Feb 08 15:09

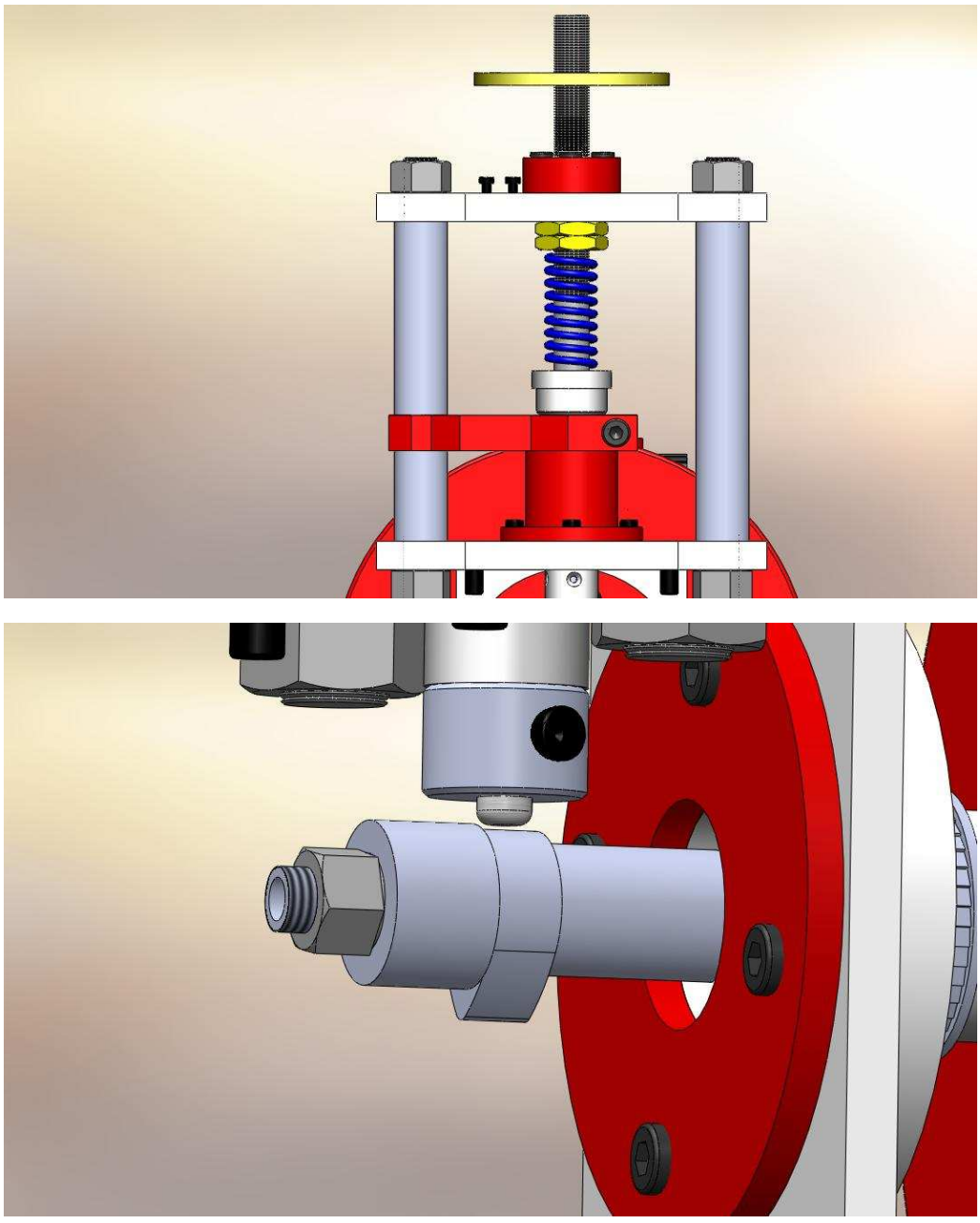
Şekil EK-2.1. AA2124 tane boyutu analiz sonucu.



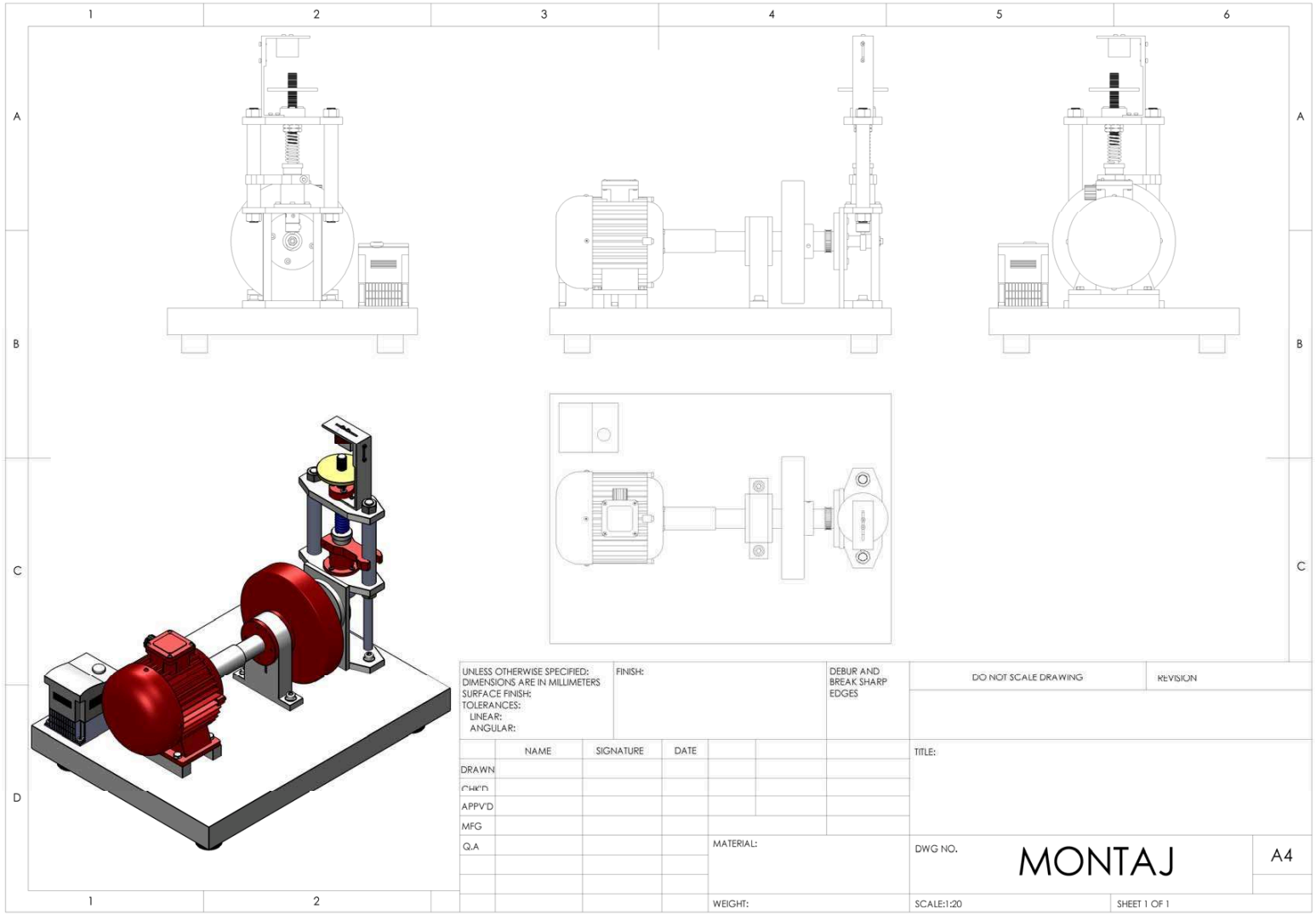
Şekil EK-2.2. Kam aşınma cihazı üç boyutlu model görünüş resimleri.



Şekil EK-2.3. Kam aşınma cihazı üç boyutlu perspektif görünüş resimleri.



Şekil EK-2.4. Yük ünitesi ve temas durumu üç boyutlu model resmi.



Şekil EK-2.5. Kam profili aşınma test cihazı teknik resimleri.

ÖZGEÇMİŞ

Afşın Alper CERİT, 1976 yılında Ordu'da doğdu. İlköğretim ve lise tahsilini ülkenin çeşitli şehirlerinde tamamladı. 1996 yılında Erciyes Üniversitesi Kayseri Meslek Yüksek Okulu Bilgisayar Programcılığı bölümünden, 2001 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2004 yılında Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalından iyi derece ile mezun olarak yüksek mühendis ünvanını aldı. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında 2004 yılında doktoraya başladı. 2005 yılında Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü İmalat ve Konstrüksiyon Ana Bilim Dalına araştırma görevlisi olarak atandı ve halen aynı görevi sürdürmektedir.

Adres	:	Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü 38039 - KAYSERİ
Telefon	:	0 352 437 49 01 - 32090
Belgegeçer	:	0 352 437 57 84
e-posta	:	acerit@erciyes.edu.tr