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

DOKTORA TEZİ

DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK TEL TAKVİYELİ KIR DÖKMEDEMİR KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

RECAİ KUŞ

KONYA-2007

T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK TEL TAKVİYELİ KIR DÖKME DEMİR KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

RECAİ KUŞ

DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez, 17/01/2007 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Danışman

Prof. Dr. Alaeddin ARPACI
Üye

Prof. Dr. Süleyman YALDIZ
Üye

Doç. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Üye

Doç. Dr. Hacı SAĞLAM
Üye

ÖZET

Doktora Tezi

DÜŞÜK KARBONLU ÇELİK TEL TAKVİYELİ KIR DÖKME DEMİR KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Recai KUŞ

Selçuk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
2007-105 Sayfa

Jüri: Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR
Prof. Dr. Alaeddin ARPACI
Prof. Dr. Süleyman YALDIZ
Doç. Dr. Necmettin TARAKÇIOĞLU
Doç. Dr. Hacı SAĞLAM

Bu çalışmanın amacı düşük karbonlu çelik tel ile güçlendirilmiş kır dökme demir kompozitin mekanik özelliklerini araştırmaktır. Düşük karbonlu tel seçiminin gayesi dökmedemir yapıdaki grafit oluşumunu zayıflatarak mekanik özelliklerde iyileşme sağlamaktır. Çelik tel takviyeli kompozit malzemeden çekme ve darbe deneyi numuneleri üretilerek bu numunelere, 800 ^{0}C, 850 ^{0}C ve 900 ^{0}C de kısa süreli normalizasyon ısıl işlemi uygulanmıştır. 900 ^{0}C de normalizasyona tabi tutulan numunelerin çekme ve darbe dayanımlarının diğerlerinden yüksek olduğu görülmüştür. Kontrol amacıyla aynı testler matriks malzemesi olan takviyesiz kır dökmedemir numunelere de uygulanmıştır. Dökmedemir ve kompozit numunelerde takviye, arayüzey ve matriks bölgelerinin sertlik değerleri ölçülmüş arayüzey sertlik değerlerinin hem dökmedemir hem de takviyeden yüksek olduğu görülmüştür. Darbe ve çekme numunelerinin mikroyapıları incelenmiştir. Kırık yüzeylerinden taramalı elektron mikroskobu cihazı ile görüntüler alınmıştır. Bu görüntülere göre takviye ile matriks arasında serbest grafitin bir geçiş bölgesi oluşturduğu ve dökmedemirden takviye elemanına önemli ölçüde C ve Si difüzyonu olduğu tespit edilmiştir. Takviye elemanındaki karbon artışı ile çekme ve darbe dayanımlarında önemli ölçüde artış elde edilmiştir. %10 hacimsel takviye oranı ile çekme dayanımında %50–70, %12,5 hacimsel takviye oranı ile oda sıcaklığında yapılan darbe testlerinde %300 artış sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Metal Matriks Kompozit, Kır Dökmedemir, Çelik Tel, Mekanik Özellikler, Normalizasyon Isıl işlemi.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF GRAY CAST IRON COMPOSITES REINFORCED WITH LOW CARBON STEEL FIBRE

Recai KUŞ

Selçuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: **Prof. Dr. Ahmet AKDEMİR**

2007-105 Pages

Aim of this study is to investigate mechanical properties of gray cast iron composites which reinforced with low carbon steel wire. The aim of selecting fibre with low carbon is to decrease forming graphite and improve mechanical properties. The metal matrix composite material has been produced by reinforcing with steel wire in order to improve tensile and impact strength of the gray cast iron. Tensile and impact test specimens are produced both from matrix material and the composite material. Then, normalising heat treatment at 800 ^{0}C, 850 ^{0}C and 900 ^{0}C are applied. The effect of the heat treatment temperatures on the mechanical properties of the gray cast iron and the composite materials are examined. It is seen that both tensile and impact strengths at 900 ^{0}C are higher than the others. Hardness tests of the reinforcement, interface and matrix are carried out. It is shown that the hardness values of the interfaces are higher than both the matrix and reinforcement. Fracture surfaces are examined by scanning electron microscope for tensile and impact specimens. It is concluded that considerable Si and C atoms diffusion are occurred from matrix to the low carbon reinforcement and a narrow decarburised transition zone is formed. By increasing of carbon content of the reinforcement, both tensile and impact strengths are increased considerably. Tensile strengths increased 55-70 % by 10% volume fraction of the reinforcement. Absorbed energy at the room temperature is increased 300% by 12.5 % volume fraction of the reinforcement during Charpy tests.

Keywords: Metal Matrix Composite, Gray Cast Iron, Steel Fibre, Mechanical Properties, Normalisation Heat Treatment

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü desteği esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof.Dr. Ahmet AKDEMİR ve S.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Mekanik Anabilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Ahmet AVCI'ya saygı ve şükranlarımı sunarım.

Malzeme üretiminde yardımlarını esirgemeyen KOÇAK Metalurji ve Makine Sanayi firma sahibi Muammer KOÇAK'a ve Doç. Dr. Hakan IŞIK'a, numunelerin hazırlanması ve test cihazlarından faydalanma imkânı sağlayan S.Ü. Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Müdürü Prof. Dr. Süleyman YALDIZ'a, numunelerin hazırlanmasında ve deneylerin yapılamasında bilgi, tecrübe ve yardımlarından dolayı S.Ü. Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Öğretim Üyesi Doç. Dr. Hacı SAĞLAM'a ve S.Ü. Cihanbeyli Meslek Yüksekokulu Öğretim Görevlisi Dr. Hüseyin ARIKAN'a, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Öğretim Görevlisi Dr. Bülent BOSTAN'a, Öğretim Görevlisi Dr. Ahmet GÜRAL ve Araştırma Görevlisi Volkan KILIÇLI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca, bu çalışmalarım süresince büyük bir sabırla bana destek olan, eşime ve çocuklarıma teşekkür ederim.

KISALTMA VE TEMBOLLER

MMK: Metal Matriks kompozit

TEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

EDS: Enerji Dağılımlı Spektroskopi

ASTM: American Society for Testing and Materials

EN : Avrupa Normu

TS : Türk Standardı

HMK : Hacim Merkezli Kübik

YMK : Yüzey Merkezli Kübik

VSD : Vickes Sertlik Değeri

σ : Gerilme

E : Elastisite Modülü

F : Kuvvet

V : Hacimsel Oran

ε : Şekil Değiştirme

A : Kesit Alanı

L : Boy

ρ : Yoğunluk

m **:** Matriks

f **:** Fiber

c :Kompozit

İÇİNDEKİLER

ÖZET…….....i

ABSTRACT..……..ii

TEŞEKKÜR……..iii

KISALTMA VE TEMBOLLER…….iv

İÇİNDEKİLER……v

ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....ix

ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....xii

1. GİRİŞ……..…….....1

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI……...…….....4

3. KOMPOZİT MALZEMELER 11

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması 14

3.1.1. Fiber takviyeli kompozitler 14

3.1.2. Tabakalı kompozitler 17

3.1.3. Parçacık katkılı kompozitler 17

3.2. Yapılarını Oluşturan Malzemelere Göre Kompozitler..... ...17

3.2.1. Plastik - plastik kompozitler ..... …17

3.2.2. Plastik-cam fiber kompozitler ..... …18

3.2.3. Plastik-metal fiber kompozitler..... …19

3.2.4. Plastik-köpük kompozitler..... 19

3.2.5. Seramik kompozitler 19
3.2.6. Kağıt 20
3.3. Metal Matriks Kompozitler ve Üretimi 20
3.3.1. Sıvı metal infiltrasyonu tekniği 21
3.3.2. Sıkıştırmalı veya sıvı dövme döküm tekniği 21
3.3.3. Sıvı metal karıştırması tekniği 21
3.3.4. Hızlı katılaştırma tekniği 22
3.3.5. Plazma Püskürtme Tekniği 22
3.3.6. Sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme tekniği 22
3.3.7. Toz metalürjisi tekniği 22
3.3.8. Yarı katı karıştırma tekniği 23
3.3.9. Difüzyon bağlama ve vakumda presleme tekniği 23
3.4. Metal Matriksli Kompozitlerin Üretimindeki Önemli Hususlar 24

4. ÇELİK VE DÖKMEDEMİRLER 26

4.1. Çelikler 30
4.1.1. Çelik alaşım elementleri 32
4.1.2. Çeliklerin ısıl işlemi 36
4.2. Dökmedemirler 37
4.2.2. Dökmedemirlerin sınıflandırılması 38
4.2.3. Demir-karbon-silisyum sistemleri 39
4.2.4. Ana alaşım elemanlarının dökmedemire etkileri 39
4.2.5. Gri dökmedemirin ısıl işlemleri 41
4.3. Çelik ve Dökmedemirlerin Mekanik Muayenesi 43
4.3.1. Çekme deneyi 43
4.3.2. Sertlik deneyi 48

4.3.3. Darbe deneyi.....49

4.3.4. Kır Dökmedemirde mikroyapılar.....50

5. DENEYSEL ÇALIŞMA 52

5.1. Kompozit Malzeme Üretimi ve Isıl İşlemleri 52

5.2. Metalografik İncelemeler..... …53

5.3. Sertlik Deneyi ..... …55

5.4. Çekme Deneyi.……56

5.4.1.Çekme deneyi numunelerinin hazırlanması.....…56

5.4.2.Çekme deneyi yapılışı..... …56

5.5. Darbe Deneyi 57

5.5.1. Darbe deney numunelerinin hazırlanması .....…57

5.5.2. Darbe deneyi ve Sonuçları.……58

6. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA ..... …59

6.1. Kompozit Numunede Silis Dağılımı .....…59

6.2. Mikroyapı İncelemeleri .....…60

6.2.1. Dökmemir numunelerin grafit yapısı……60

6.2.2. Kompozit numunelerin mikroyapıları .....…62

6.3. Sertlik Deneyi Sonuçları .....…68

6.4. Çekme Deneyi Sonuçları.....…69

6.4.1. Isıl İşlemsiz numunelerin çekme deneyi sonuçları……...69

6.4.2. 800 °C normalizasyon ısıl işlemli numunelerin çekme deney sonuçları..70

6.4.3. 850 °C normalizasyon ısıl işlemli numunelerin çekme deney sonuçları.72.

6.4.4. 900. °C normalizasyon ısıl işlemli numunelerin çekme deney sonuçları.73

6.5. Çekme Deneyi Sonrası Kopma Yüzeylerinin TEM İncelemeleri 75

6.5.1. Isıl işlemsiz numunelerin çekme deneyi sonrası kopma yüzeylerin TEM cihazında incelenmesi 75

6.5.2. 800 °C normalizasyon ısıl işlemli numunelerin çekme deneyi sonrası

kopma yüzeylerin TEM cihazında incelenmesi 77

6.5.3. 850 °C Normalizasyon ısıl işlemli numunelerin çekme deneyi sonrası kopma yüzeylerin TEM cihazında incelenmesi 79

6.5.4. 900 °C normalizasyon ısıl işlemli numunelerin çekme deneyi sonrası kopma yüzeylerin TEM cihazında incelenmesi 81

6.6. Darbe Deneyi Sonuçları ve Numunelerin Kırık Yüzeylerinin TEM Görüntülerinin İncelenmesi 83

6.6.1. Darbe deneyi sonuçları..... 83

6.6.2. Oda sıcaklığında kırılmış Charpy deney numunesi TEM Görüntüleri.....85

6.6.3.0 °C sıcaklıkta kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüleri…… 89

6.6.4. -80 °C sıcaklıkta kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüleri.....83

7. SONUÇ VE ÖNERİLER…….……....98

8. KAYNAKLAR……...……....101

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 4.1. Saf demirin soğuma eğrisi ve farklı sıcaklık ve aralığında kararlı olan kristal yapıları....26
Şekil 4.2. Demir-karbon (Fe-Fe_3C) faz diyagramı.... ...27
Şekil 4.3. Malzemelere uygulanan çekme ve basma yük çeşitleri.... ...43
Şekil 4.4. Gevrek ve sünek malzemelere ait Gerilme-% Uzama grafikleri (a.Gevrek b.Sünek) 44
Şekil 4.5. Gerilme-gerinme eğrisi ve plastik şekil değiştirme.... ...45
Şekil 4.6. a. Akması noktası belli olan malzemenin üst ve alt akma noktaları b. Akma noktası belli olmayan numunenin Gerilme-Gerinim grafiği 46
Şekil 4.7. Yüksek ve düşük karbonlu çeliğin karşılaştırılması 48
Şekil 5.1. Çekme deney numunesi 56
Şekil 5.2. Darbe deney numunesi....58
Şekil 6.1. Kompozit numunede takviye merkezinden dışa doğru Si dağılımının normalizasyon sıcaklığına değişimi (%).... .59
Şekil 6.2. Isıl işlemsiz dökmedemir numunenin grafit yapısı .... .60
Şekil 6.3. 800 °C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir numunenin grafit yapısı ...61
Şekil 6.4. 850 °C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir numunenin grafit yapısı ...61
Şekil 6.5. 900 0C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir numunenin grafit yapısı ...62
Şekil 6.6. Kompozit numune bölgeleri……..63
Şekil 6.7. Isıl işlemsiz kompozit numunede geçiş bölgesi grafit yapısı 63
Şekil 6.8. %2 nital dağlanmış ısıl işlemsiz kompozit numunenin mikroyapısı. 64
Şekil 6.9. 800 °C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin grafit yapısı 65
Şekil 6.10. %2 nital dağlanmış 800 °C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin mikroyapısı 65
Şekil 6.11. 850 °C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin grafit yapısı 66
Şekil 6.12. %2 nital dağlanmış 850 °c normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin mikroyapısı....67
Şekil 6.13. 900 °C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin grafit yapısı 67
Şekil 6.14. %2 nital dağlanmış 900 °C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin mikroyapısı 68
Şekil 6.15. Dökmedemir ve kompozit numunenin sertlik değerleri....69
Şekil 6.16. Isıl işlemsiz dökmedemir ve kompozit malzemenin mühendislik gerilme-şekil değiştirme grafiği ……....70
Şekil 6.17. 800 °C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir ve kompozit malzemenin gerilme-şekil değiştirme grafiği 71
Şekil 6.18. 850 °C Normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir ve kompozit malzemenin

gerilme-şekil değiştirme grafiği 72

Şekil 6.19. 900 °C Normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir ve kompozit malzemenin gerilme-şekil değiştirme grafiği 74

Şekil 6.20. Isıl işlenişiz kompozit numunenin çekme deneyi sonrası kopma yüzeyi geçiş bölgesi TEM görüntüsü 75

Şekil 6.21. Isıl işlemsiz kompozit numunenin çekme deneyi sonrası çelik bölgesi kopma yüzeyi TEM görüntüsü 76

Şekil 6.22. a. Isıl işlemsiz çekme numunelerinin kırık yüzeyleri a.kompozit b.dökmedemir.....76

Şekil 6.23. 800 °C Normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası kopma yüzeyi geçiş bölgesi TEM görüntüsü 77

Şekil 6.24. 800 °C Normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası çelik bölgesi kopma yüzeyi TEM görüntüsü..... ..78

Şekil 6.25. 800 °C Normalizasyon ısıl işlemli çekme numunelerinin kırık yüzeyleri a.kompozit b.dökmedemir..... .79

Şekil 6.26. 850 °C Normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası kopma yüzeyi geçiş bölgesi TEM görüntüsü ..... .80

Şekil 6.27. 850 °C Normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası çelik bölgesi kopma yüzeyi TEM görüntüsü 80

Şekil 6.28. 850 °C Normalizasyon ısıl işlemli çekme numunelerinin kırık yüzeyleri a.kompozit b.dökmedemir..... ..81

Şekil 6.29. 900 °C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası kopma yüzeyi geçiş bölgesi TEM görüntüsü..... ..81

Şekil 6.30. 900 °C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası çelik bölgesi kopma yüzeyi TEM görüntüsü 82

Şekil 6.31. 900 °C Normalizasyon ısıl işlemli çekme numunelerinin kırık yüzeyleri a.kompozit b.dökmedemir ..... .83

Şekil 6.32. Kompozit numunelerin darbe dayanımları ..... .83

Şekil 6.33. Dökmedemir numunelerin darbe dayanımları ..... .84

Şekil 6.34. Oda sıcaklığında kırılmış kompozit Charpy numunelerin kırık yüzeyleri a.ısıl işlemsiz b. 800 °C normalizasyon ısıl işlemli c. 850 °C normalizasyon ısıl işlemli d. 900 °C normalizasyon ısıl işlemli. ..... .85

Şekil 6.35. Isıl işlemsiz oda sıcaklığında kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü..... .86

Şekil 6.36. 800 °C normalizasyon ısıl işlemli oda sıcaklığında kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü..... ..87

Şekil 6.37. 850 °C normalizasyon ısıl işlemli oda sıcaklığında kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü..... ..88

Şekil 6.38. 900 °C normalizasyon ısıl işlemli oda sıcaklığında kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü..... ..89

Şekil 6.39. 0 °C de kırılmış Charpy deneyi kompozit numunelerin kırık yüzeyleri a.ısıl işlemsiz b. 800 °C normalizasyon ısıl işlemli c. 850 °C normalizasyon ısıl işlemli d. 900 °C normalizasyon ısıl işlemli.....90

Şekil 6.40. Isıl işlemsiz 0 °C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü.....91

Şekil 6.41. 800 °C normalizasyon ısıl işlemli 0 °C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü 91

Şekil 6.42. 850 °C normalizasyon ısıl işlemli 0 °C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü 92

Şekil 6.43. 900 °C normalizasyon ısıl işlemli 0 °C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü 93

Şekil 6.44. -80 °C de kırılmış Charpy deneyi kompozit numunelerin kırık yüzeyleri a.ısıl işlemsiz b. 800 °C normalizasyon ısıl işlemli c. 850 °C normalizasyon ısıl işlemli d. 900 °C normalizasyon ısıl işlemli.....94

Şekil 6.45. Isıl işlemsiz -80 °C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü…….95

Şekil 6.46. 800 °C normalizasyon ısıl işlemli -80 °C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü 95

Şekil 6.47. 850 °C normalizasyon ısıl işlemli -80 °C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü 96

Şekil 6.48. 900 °C normalizasyon ısıl işlemli -80 °C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü.....97

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 3.1. Metal, seramik ve plastik malzemelerin bazı özelliklerinin karşılaştırılması.....12

Çizelge 3.2. Plastik metal esaslı kompozit malzemeler ve bunların bazı uygulama alanları.....13

Çizelge 4.1. Fe-C alaşımlarına ait mikroyapı bileşenleri 30

Çizelge 4.2. Dökmedemirlerin kimyasal kompozisyon aralıkları.....38

Çizelge 5.1. Kompozit malzeme bileşenlerinin kimyasal bileşimi 52

Çizelge 5.2. Kompozit malzeme bileşenlerinin mekanik özellikleri 52

Çizelge 5.3. Normalizasyon ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak kompozit numunenin silis dağılımı……54

Çizelge 5.4.Normalizasyon ısıl işlemi ile dökmedemir ve kompozit numunenin ortalama sertlik değerlerinin değişimi…….55

Çizelge 5.5. Dökmedemir ve kompozit malzemenin normalizasyon sıcaklığına bağlı çekme dayanımları ve % uzama değerleri.....57

Çizelge 5.6. Dökmedemir ve kompozit numunelerin normalizasyon ısıl işlem şartlarına ve ortam sıcaklığına bağlı olarak darbe enerjileri…….58

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler, kendilerini meydana getiren malzemelerin en iyi özelliklerini gösterecek tarzda, genellikle matriks adı verilen ana faz ile takviyelendirici tali fazlardan oluşmaktadır. Fazla ağırlık istenmeyen, ancak yüksek mukavemet gerektiren yerlerde çelik ve benzeri metallerin yerlerini alırlar.

Kompozit malzeme grubu içerisinde yer alan Metal Matriks Kompozit (MMK) üzerine yapılan araştırmalar son 20 yıldır çok fazla ve etkileyici boyuttadır. MMK lar üzerinde yapılan çalışmalar, özellikle yüksek sıcaklıklarda kullanılabilecek dayanımı yüksek, rijit malzemelerin geliştirilmesi yönünde yoğunlaşmaktadır. Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak partikül, tabaka ve fiberler yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek performansı sayesinde fiberle takviye edilmiş malzemeler, oda sıcaklığında ve daha yüksek sıcaklıklarda takviye edilmemiş yapılara göre çok iyi yüksek performans sergilemektedirler (Rohatgi, 1990). Ne var ki polimer matriks kompozitlerin araştırma sonuçları kolaylıkla ticari uygulamalara taşınırken; metal matriks kompozitler, bu konuda biraz yavaş kalmıştır. Bunun nedeni, metal matriks kompozitlerin üretim zorluğu ve özellikle ara faz mukavemetinin zayıflığıdır (Taha ve ark. 1993). Bununla birlikte, MMK'ler üretim güçlüğü, işlenme güçlüğü, yüksek maliyet ve diğer malzemeler gibi geriye dönüşümünün (recycle) istenilen düzeyde olmaması gibi bir takım dezavantajlara da sahiptir (Hashim ve ark., 2002, Muller ve ark. 2000).

Dökmedemirler, dünya da ve ülkemizde en yaygın üretilen ve kullanılan malzeme grubundandır. Özellikle, kır dökmedemir, diğer döküm türlerine göre ucuz olması sebebiyle, çelikten sonra en çok tercih edilen ve en yaygın malzemedir. Kır dökmedemirler düşük ergime sıcaklığı, daha az besleme sorunları, iyi kalıp doldurma özelliği, bileşim sınırlarının geniş tutulabilmesi, talaşlı üretime uygunluk ve titreşimleri sönümleme özelliği ile en çok tercih edilen malzemelerden biridir. Bu özellikleri sebebiyle, diğer malzeme türlerine göre birtakım avantajlara sahiptir. Ancak, dökmedemirin katılaşması esnasında karbonun kararlı hali olan grafitlerin üç eksenli sistemde gelişigüzel büyüyerek lameller şeklinde yer alması, içerisindeki kükürdün lamelleşmeyi teşvik etmesi, kır dökmedemirlerin mekanik özelliklerindeki olumsuzluklara yol açmaktadır. Çekme dayanımı, darbe ve kırılma tokluğunun düşük

olması kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu malzemenin korozyon direnci ve ısıl dayanımı, çelik malzemeden daha iyidir.

Kır dökmedemire çelik takviyesi yapılarak bahsedilen olumsuzlukların ortadan kaldırılması mümkündür. Böylece malzemenin daha yaygın bir kullanım alanına sahip olması sağlanabilir. Dökmedemirler içerisinde küresel grafitli dökmedemir, mekanik özelliklerinin kır dökmedemirden çok daha iyi olması nedeniyle, daha yaygın kullanım alanına sahiptir. Fakat küresel grafitli dökmedemir için gerekli hammaddenin bir kısmının ithal ediliyor olması, bu malzemenin en büyük dezavantajı olarak görülebilir. Bu bağlamda, kır dökmedemir kupol ocaklarında bile dökülebilen ve dışa bağımlılık gerektirmeyen bir malzemedir. Bunun yanı sıra, kır dökmedemiri takviye etmek suretiyle küresel grafitli dökmedemir hatta çelik döküm kalitesinde malzeme üretmek mümkündür. Bu üretim için, takviye maliyetinin düşük olması nedeniyle sadece takviye maliyeti ve işçiliği yeterli olacaktır.

Bu çalışmanın amacı düşük karbonlu çelik tel ile güçlendirilmiş kır dökme demir kompozitin mekanik özelliklerini araştırmaktır. Düşük karbonlu tel seçiminin gayesi ise dökmedemir yapıdaki grafit oluşumunu zayıflatarak mekanik özelliklerde iyileşme sağlamaktır. Bu çalışmada, küresel dökmedemir mekanik özelliklerine yakın bir kompozit malzeme üretmek amacıyla, takviye elemanı olarak düşük karbonlu çelik tel, matriks malzemesi olarak da düşük mukavemetli kır dökmedemir kullanılarak kompozit malzeme üretilmiştir. Üretilen kompozit malzeme ile kır dökmedemirden çekme ve darbe deneyi numuneleri imal edilmiştir. İmal edilen kompozit ve dökmedemir numuneler, önce gerilim giderme tavlaması yapılmış; daha sonra bu numunelerin bir kısmı 800 ^{0}C, 850 ^{0}C ve 900 ^{0}C de normalizasyon ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Kompozit ve dökmedemir çekme deneyi numuneleri, çekme deneyine tabi tutulmuşlar ve bunların çekme dayanımları hesaplanmıştır. Kompozit ve dökmedemir numunelerin, çekme dayanımlarının normalizasyon ısıl işlem sıcaklığının çekme dayanımı ve % uzamaya etkileri incelenmiştir. Ayrıca, kompozit ve dökmedemir numunelerin çekme dayanımı ve % uzamalarının karşılaştırılması da yapılmıştır. Kompozit numunede takviye, arayüzey ve matriks bölgelerinin ve dökmedemir numunenin sertlik değerleri ölçülmüş ve yorumları yapılmıştır. Üretilmiş olan darbe deneyi numuneleri ise , -80 ^{0}C, 0 ^{0}C ve 27 ^{0}C de Charpy darbe deneylerine tabii tutulmuş ve darbe enerjileri ölçülmüştür. Kompozit ve dökmedemir numunelerin

normalizasyon ısıl işlemi ile ortam sıcaklığının darbe enerjisine etkisi incelenerek yorumları yapılmıştır. Darbe ve çekme deneyi numunelerinin kırık yüzeylerinden Taramalı Elektron Mikroskobu (TEM) ile görüntüler alınarak, bu yüzeylerin incelemesi gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi numunelerinden mikroyapı görüntüleri elde edilmiş; normalizasyon ısıl işlem sıcaklığının mikroyapıya etkisi incelenerek yorumları yapılmıştır. Ayrıca kompozit numunelerin Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) cihazında analiz yapılarak silis dağılımı incelenmiş ve yorumları yapılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Taha, A.M. (2001), döküm metal matriksli kompozitlerin sanayileşme yönünde ana araştırma noktalarını belirtmektedir. Bu araştırması; başlıca fazların tanımlanması, kriter seçimi ve malzeme dizaynı için gerekli olan ihtiyaçlar, malzemelerin uyumu, üretim gereklilikleri ve maliyet gereksinimleri gibi çeşitli ihtiyaçları kapsamaktadır. Aynı zamanda döküm metal matriksli kompozitlere uygulanan ısıl işlem, şekil verme ve talaşlı işlenebilirlik gibi işlemler tartışılmıştır. Sonuçta mevcut uygulanan döküm metal matriksli kompozitlere örnekler verilerek ham kütük kompozitler veya şekilli dökülmüş kompozitler değerlendirilmiştir

Akdemir ve ark. (2005), gri dökme demir malzemenin mukavemet ve tokluğunu arttırmak için, düşük karbonlu çelik telle takviye etmişlerdir. Çalışmalarında, tel çapı ve diziliminin, döküm ve ısıl işlem koşullarının mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkilerini araştırmışlardır. 800°C ve 850°C'de normalizasyon ısıl işlemi uygulamışlar ve daha sonra numunelere üç noktadan eğme deneyi yaparak mukavemet ve tokluktaki değişiklikleri karşılaştırmışlardır. Sonuçta hacimce %5 oranında çelik tel takviyesi ve normalizasyon ısıl işlemi ile eğilme mukavemeti ve kırılma tokluklarında yüksek oranda artış sağlamışlardır.

Srivatson, T.S. ve Sudarshan, T.S. (1999), çalışmalarında gri dökme demirde fosfor ötektiği oluşumu ve soğuma sırasında mikroyapıdaki etkileri üzerinde çalışmışlardır. Aynı zamanda krom ve molibden gibi alaşım elemanlarının fosfor ötektiğinin oluşumu ve mikroyapısına etkilerini incelemişlerdir. Gri dökme demire krom ve molibden ilavesi ile fosfor ötektiğinin arttığını görmüşlerdir. Ötektik sıcaklıktan soğuma sırasında fosfor ötektiğinin oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bununla beraber gri dökme demirde verilen seviyedeki fosfor içeriğine molibden katılmasıyla mikroporozite artışını ortaya çıkartmışlardır.

Cheng-H. H., ve ark. (2000), gri dökme demire ostemperleme ısıl işlemi uygulayarak, matriks tokluğunun kırılma mekaniğinin davranışına etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak gri dökme demire uygulanan ostemperleme ısıl işlemi ile gevrek metalik malzemelerin kırılma tokluğunu geliştirmişlerdir.

Aslantaş, K. ve ark. (2003), çalışmalarında malzemesi gri dökme demir olan kompresör rotorundaki kırılmayı araştırmışlardır. Parçalanmış rotordan alınan numunelere Charpy çarpma testi yapmışlar ve Brinell sertliğini ölçmüşlerdir. Sonuç olarak gri dökme demirin karbon oranının standartlarda olması gerekenden çok daha yüksek olduğunu ve aynı zamanda çapma enerjisinin düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

Cingi, M. ve ark., (2001), alaşım elemanları katılmış dökme demirlerin aşınma ve oksitlenme davranışları incelemişlerdir. Dökme demirden cam kalıplarının aşınma ve oksitlenme direnci göstermesi için D tipi grafit yapı elde etmişler ve küçük miktarlarda Mo, Ni ve Cu alaşımlanması yapmışlardır. Sonuç olarak Mo, Ni ve Cu alaşım elementleri içeren gri dökme demirlerin, alaşımsız olan gri dökme demirlere göre %20 daha fazla oksitlenme direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Toktaş ve ark., (2006), sünek dökmedemir Charpy darbe numunelerini, değişik ısıl işlemlere tabi tutarak tamamıyla ferritik olan mikroyapıyı, perlitik/ferritik, perlitik, temperlenmiş martenzitik ve düşük ve yüksek ösferritik yapı elde etmişlerdir. Daha sonra numuneleri -80 ^{0}C -100 ^{0}C sıcaklılarda numunelerin darbe enerjilerini ölçmüşlerdir. Ayrıca numunelerin, sertlik, çekme özellikleri ile birlikte metal mikroskobu ile mikroyapılarını ve kırık yüzeyleri de SEM cihazında görüntüleri incelemişlerdir. En iyi darbe özelliklerini ferritik yapıda elde ederken bu yapının akma, çekme ve sertlik değerlerinin en düşük olduğunu tesbit etmişlerdir.

Agarwala ve ark., (1999), alüminyum alaşımını (LM11), 0,4 mm çapında ve % 0,2 C lu çelik tellerle takviye etmek suretiyle metal matriks kompozit üretmişlerdir. Ürettikleri kompozit numunelere 500-525 ^{0}C 1-15 saat arasında değişik ısıl işleme tabii tutmuşlardır. Mikroyapı görüntülerini elde ederek oluşan arayüzeyi incelemişler, ayrıca matriks ve arayüzeyin mikrosertliklerini de ölçmüşlerdir. Arayüzey genişliğinin ve mikrosertlik değerlerinin ısıl işlem sıcaklığı ve süresine bağlı olduğunu tesbit etmişlerdir.

Taylor ve ark. (1997), Yaptıkları bir çalışmada çelik fiber takviyeli, çimento esaslı betonun kırılma tokluğu araştırılmış ve değişik fiber oranları için betonun

kırılma toklukları bulunmuş ve fiber takviyesinin kırılma davranışına etkileri araştırılmıştır.

Berns, H. (2003), çalışmasında beyaz dökme demir ile metal matriksli kompozitlerin mikroyapılarını karşılaştırmıştır. Dökümün tersine, toz karışımlarını sıcak izostatik presleme yöntemiyle ürettiğinde, tokluk ve aşınma direnci gibi belirli özellikleri istediği gibi tasarlamıştır. Yüksek sıcaklık aşınması, korozif ortamlar ve soğuk dövme aletler için yeni metal matriksli kompozitleri üretmiştir. MMC'lerde kullandığı sert parçacıklar yerine demir alaşımı parçacıkları kullanarak maliyeti düşürdüğünü göstermiştir.

Fernand E. ve Zihui X. (2001) Titanyum esaslı matriks malzemeli elyaf takviyesi yapılmış bir lamineye uygulanmıştır. Ayrıca termal genleşme sonucu yapıda oluşan kalıntı gerilmeleri incelemişlerdir. Sonuç olarak kompozit malzemenin şekil değiştirme hızına bağlı olarak mekanik özelliklerini tesbit edip, deneysel ve teorik olarak sonuçların uygunluğunu göstermişlerdir.

Peng H.X. ve ark. (2001), yaptıkları çalışmada alümina elyaf takviyeli alüminyum matriks kompozit bir malzeme üretmiş ve mekanik davranışlarını incelemişlerdir. Süneklik ve elastisite modülü düşmeden, çekme mukavemetinin arttığını görmüşlerdir.

Özdemir, N. ve ark. (2003), çalışmalarında küresel grafitli dökme demir ile gri dökme demir arasında vakumla serbest difüzyon bağı oluşumunda grafit şeklinin etkisini araştırmışlardır. Malzeme çiftlerinin difüzyon bağını, 15 MPa basınç altında atmosfere açık fırında 900°C, 950°C ve 1000°C sıcaklıklarda yapmışlardır. Numuneleri ayrı difüzyon bağı sıcaklığında 50, 100, ve 150 dakika tutmuşlar ve fırın içinde oda sıcaklığına kadar soğutmuşlardır. Bağlanma bölgelerinin sertliklerine bakmışlar ve mikroyapılarını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre grafitlerin şekil ve yüzey alanlarının difüzyon davranışlarına etkilerini gözlemişlerdir.

Taghiabadi R. ve ark. (2003), alüminyum alaşımı (Al-7Si-0,35 Mg) TiB_2 ile dört değişik döküm tekniği ile kompozit üretmişlerdir. Ürettikleri kompozit numunelerin bir kısmına 540 ^{0}C de ısıl işlem uygulamışlardır. Üretilen kompozit numuneler 1mm

min^{-1} çekme hızında çekme deneylerine tabi tutmuşlardır. Kopma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelenerek ısıl işlemin ve değişik üretim metotlarını birbirleri ile mukayese etmişlerdir.

Xu, W. ve ark. (2004), çalışmalarında Cu, Mo, Mn ve Si' un gri dökme demirin mikroyapısal gelişimine etkisini ve bunların mekanik özelliklere etkilerini belirlemişlerdir. Sonuç olarak katılan alaşım elemanlarının dökme demirin tipi ve mikrobikleşenlerin dağılımına kuvvetle etki ettiğini görmüşlerdir.

Arıkan H. ve ark. (2004), çelik tel takviyeli parçacık dolgulu polimer kompozit kirişler farklı çelik tel oranlarında üreterek Mod 1 e göre kırılma davranışlarını araştırmışlardır. Kompozitte ağırlıkça %1, 5, %3, ve %4, 5 oranlarında sürekli çelik tel ve ağırlıkça %16, 5 oranın da polyester reçine kullanmışladır.

Banks L. ve Sills V., (1999) çalışmalarında sürekli elyaflarla takviyeli metal matriks kompozit malzemenin gerilme-şekil değiştirme davranışını incelemişlerdir. Elyafların elastik, matriksin ise elostoplastik davranacağı kabul edilerek, bir birim hacim için gerilme analizi yapmışlardır. Ayrıca bir model kullanarak, düzlem deformasyon şartları altında kare kesitli elyaflarla takviye edilmiş bir kirişin eğilme davranışları incelenmiştir.

Ismar H. ve ark. (2001), çalışmalarında tek yönlü elyaf takviyeli kompozit bir malzemede termal etkiler sonucu oluşmuş kalıntı gerilmeler ve elyaf matriks ara yüzey bağlantısı dayanımını bir nonlineer sonlu elemanlar tekniği kullanarak incelemişlerdir.

Ferguson ve ark. (2005), dört farklı C seviyesine sahip çeliğin Chary darbe numunelerini gerilim giderme tavlamasından sonra 4 saat süreyle 900 ^{0}C ısıl işleme tabii tutmuşlar ve C miktarı ve ısıl işlem sıcaklıkları üzerine faz dönüşümlerini incelemişlerdir.

Gonzaga, R.A., ve Carrasquilla, J.F., küresel dökmedemirde alaşım elementlerinin uygun dengesinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında dört farklı kimyasal bileşime sahip küresel grafitli dökmedemirin çekme, darbe, sertlik özelliklerini ve mikroyapı özelliklerini

incelemişlerdir. Perlit yapıda olmasına rağmen sertlikte bakır elementinin artmasıyla sertlikte ciddi bir azalma olduğunu tesbit etmişlerdir. Darbe özelliklerinde ise ada sıcaklığında yapılan testlerde, silis içeriği arttıkça darbe tokluğunun azaldığını görmüşlerdir.

Novruzov G.D., (999), hypo-ötektik dökmedemir 225 MPa. basınçla döküm gerçekleştirmişlerdir. 1280 ^{0}C de dökülen malzeme 950 ^{0}C de 5 saat süreyle ısıl işleme tabii tutulmuştur. 400 ^{0}C ye kadar fırında kontrollü olarak soğutulan numunelerin mikroyapı, sertlik ve kırılma tokluklarını incelemişlerdir.

Chenje T.W. ve ark. (2004), çalışmalarında, farklı kimyasal bileşime sahip çelik ve dökmedemirlerden 5 değişik 60 mm çapında bilye şeklinde malzeme üretmişlerdir. Bilyelere 750 ^{0}C, 850 ^{0}C ve 1050 ^{0}C de 3 saat süreyle ısıl işlem uygulamışlardır. Bilyelerin daha sonra sertlik ve mikroyapıları incelemişlerdir. Yaptıkları incelemelerde sertlik ve aşınma direncinin çelikten dökmedemire karbon artışı olduğu yerlerde yüksek olduğunu tesbit etmişlerdir. Dökmedemirlerde C içeriği arttıkça aşınma ve sertlikte önemli derecede artış olduğunu görmüşlerdir.

Sun, S. ve Pugh, M. (2001), çalışmalarında matriks malzemesi %0,044 C lu soğuk haddelenmiş çelik levha, takviye malzemesi olarak da %0,8 C lu 1,6 mm çapında çelik tel kullanmışlardır. Sıcak haddeleme yoluyla çift fazlı kompozit üretmişlerdir. Yüksek mukavemet ve uygun süneklik gibi iyi sonuçları, beynitik tel takviyeli kompozitlerden elde etmişlerdir. Son bir ısıl işlemle martenzit beynite ve perlite, fiberde ferrit ağırlık olarak matrikste oluşmuştur. Optimumum fiber mikroyapısı yüksek mukavemetli, mantıklı bir süneklik matriks yapıya olanak sağlayan beynit yapıda olduğunu görmüşlerdir. Martenzitik fiberler düşük mukavet ve sünekliğe sebep olan mikroçatlaklıklar içermektedir. Takviye hacim oranı 20 den fazla olacak şekilde deforme edildiklerinde süreksiz tel kompozitler sürekli kompozitlere göre benzer dayanımlar üretmektedir. Fiber hacim % leri artırıldığında her iki kompozitlerin matriks ve takviyenin uyum sağladıkları görülmüştür Martenzitik tellerde mikro çatlaklar bulunması nedeniyle kompozite zayıf mukavemet ve süneklik özellikleri verdiğini tespit etmişlerdir.

Fang D. ve Liu T. (1999), plastik akışa karşı metal matrikslerin bor elyafla takviye etmişlerdir. Çalışmalarında elyafların şekli dairesel, dikdörtgen ve elmas şeklinde seçmişlerdir. Elyaf şeklinin plastik deformasyona etkisi elyaf dağılımı, elyafın hacimsel oranına, elyafın matiks içerisinde dağılımına bağlı olduğunu da tespit etmişlerdir.

Blucher, J.T. ve ark. (2001), yeni bir sürekli üretim metodu olan sürekli elyaf takviyeli metal matriksli kompozitler üzerinde çalışmışlardır. Matriks malzemesi olarak Al, 2024 Al ve 6061 Al, elyaf malzemesi olarak da 0,5-1,6 mm çapında Al_2O_3, Si-Ti karbür, SiC kullanmışlardır. Metal matriksli kompozit tellerin üretiminde, çalışma yöntemlerini ve mekanik/malzeme özelliklerini ile beraber mikroyapı ve SEM görüntülerini incelemişlerdir. Hacimce değişik oranlarda ve değişik çaplardaki elyaf demetlerinin, çeşitli matrikslerle değişik kombinasyonlarda ve yüksek hızlarda üretimini sağlamışlardır.

Ganesh ve ark., AA1050 alaşımını farklı iki oryantasyonlu ve özel bir bağlama şeklinde 0,8 mm çapında galvanizli demir (AISI 1008) ile takviye ederek metal matriks kompozit üretmişleridir. Üretilen kompozit malzemeye ısıl işlem uyguladıktan sonra sertlik, çekme ve mikroyapı özelliklerini araştırmışlardır.

Xun Y.W. ve ark., (1999), bir çalışmalarında SiC Ti-15V-3Cr metal matriks komposizit malzemesi, Ti-15V-3Cr folyoların tek eksende dizilmiş elyaflar arasına dizerek sıcak preslemek suretiyle imal etmişlerdir. Ayrıca matriks malzemesinin rekristalizasyonu matriks malzemesinin tanelerinin incelediği matriks/matriks ara yüzeyi ve elyaf-elyaf ara yüzeyi arasındaki bağlanmanın iyileştiği görülmüştür. Ayrıca etkileşim oranının kinetiğine bağlı üç ayrı etkileşim mekanizması olduğu öne sürülmüştür.

Wu Y. ve ark. (2003) hacimsel olarak % 5 polypropylene-carbon, karbon-çelik ve çelik- polypropylene fiberleri beton içerisinde takviye amaçlı kullanmışlar ve ürettikleri numunelere mekanik testler uygulamışlardır. Hibrit takviye elemanlarının tek takviye elemanıyla üretilmiş beton kompozitlerle mukayeselerini yapmışlardır. Karbon-çelik takviyeli kompozitin en yüksek gerilme ve eğilme tokluğu verdiğini göstermişlerdir.

Kawamata ve ark. (2002) matriks malzemesi olarak çimento, silika-füme süper plastikleştirici takviye malzemesi olarak polietilen lif kullanarak bir kompozit malzeme üretmişler ve kırılma tokluğu ve sünekliğini çalışmışlardır. Toklukta ve süneklikte de önemli iyileşmeler elde etmişlerdir.

Traino ve ark., (1999), kimyasal bileşimi % 2,9 C, % 2,4 Si, % 0,7 Si, % 0,05 Mg ve % 0,04 Ce olan bir malzemenin değişik ısıl işlemler sonrası mikroyapı ve mekanik özelliklerinin plastik deformasyonunun olabilirliliğini çalışmışlardır. Malzemenin hasar olmadan değişik plastik deformasyon olabileceğini belirlemişlerdir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Tek başlarına uygun olmayan farklı iki veya daha fazla malzemeyi istenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirilerek elde edilen malzemeye kompozit malzeme denilmektedir. Makro boyut, malzemenin çıplak gözle veya büyüteçle görülebilecek boyutta olmasıdır. İçyapıları çıplak gözle incelendiğinde (makroskobik muayene) yapı bileşenlerinin seçilip ayırt edilmesi mümkündür. Yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı klasik alaşımlar ise makro ölçüde homojen olmalarına rağmen mikro ölçüde (mikroskobik muayene ile seçilebilen) heterojen malzemelerdir. Kompozit malzemeler metalik, organik veya inorganik bileşenden oluşabilir. Kompozit malzeme, kendini meydana getiren malzemelerin her birinin özelliklerinden, yani kalitesinden daha yüksek ve daha iyi bir kaliteye sahiptir. Genel olarak bir kompozit malzemeden, daha iyi mekanik veya ısıl özellikler elde etmektir. Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan takviye bulunmakta ve takviyenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matriks malzeme bulunmaktadır. Matriks ve takviyeden daha iyi özelliklere sahip arayüzey ve ara fazlar elde edilebileceği gibi bazı özel durumlarda her iki malzemeden daha zayıf özellikler gösterebilen yapılar da oluşabilmektedir. Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan bileşenler birbiri içinde çözünmezler, kimyasal olarak inert davranırlar. Ancak, özellikle metalik sistemlerde düşük oranlarda bile olsa, bir miktar çözünme bileşenler arasında kompozit özelliklerini etkileyebilen ara yüzey fazları görülmektedir.

Bir kompozit malzeme bünyesinde, çekirdek olarak adlandırılan takviye elemanı ve bunun etrafını saran matriks malzemesini içermektedir. Matriksin en önemli görevi; takviye elemanını bir arada tutmak, malzemeye gelen darbeleri veya yükleri takviye elemanlarına aktarmak, kırılma tokluğunu iyileştirmek, takviye elemanı ile uyum sağlamak, takviye elemanlarını aşınmaya ve korozyona karşı korumaktır (Donald, 1988; Hashim vd., 1999).

Takviye kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matriks malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matriks olarak kullanılan malzemenin bir amacı da takviye elemanlarını yük altında bir arada tutabilmek ve yükü takviye elemanları arasında homojen olarak dağıtmaktır.

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri; matriks ile takviye elemanı arasındaki uyuma ve dolayısıyla çok iyi bir bağ oluşturmaya bağlıdır (Ellis, 1996). Ara yüzey ve ara fazlar, kompozitten istenen özeliklerin elde edilmesi için önemlidir. Ara fazlar kuvvetin matriksten takviyeye aktarıldığı bölgedir. Dolayısıyla, bu bölgenin mekanik özellikleri, kompozitin mekanik özelliklerini belirlemede çok etkilidir. Ara yüzeyde güçlü bir birleşme yapıyı katı fakat gevrek yapar. Zayıf ara yüzey ise, yapıyı esnekleştirir, ancak bu yapı tok bir yapı olur. Eğer ara yüzey matriks yapıdan daha zayıf olursa kırılma ve tabaka ayrılması meydana gelir. Çünkü taşınan yük direk olarak ara yüzey üzerinden ara faza aktarılır, dolayısıyla takviye elemanı matriksten ayrılmış olur. Genel olarak ara yüzeyin sert ve zayıf sınırlar arasında bulunması istenir. Kompozit malzemelerde geliştirilmesi istenen özellikler içerisindeki takviye elemanı aracılığı ile geliştirilirler. Bu özellikler şunlardır;

- Mukavemet
- Rijitlik
- Korozyon direnci
- Yorulma direnci
- Estetik
- Hafiflik
- Termal izolasyon
- Akustik izolasyon

Kompozit malzemelerin bilinen klasik metal malzemelere göre üstün yanları malzeme kombinasyonunun sonsuz sayıda olmasıdır. Kompozitlerin bu avantajları onlara malzeme özelliklerini istenildiği gibi değiştirme imkanı tanır. Kompozit malzemeler metal, seramik ve plastiklerin zayıf yönleri iyileştirilmek maksadıyla endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin birbirine göre üstün ve zayıf yönleri vardır (Çizelge 3.1)

Çizelge 3.1. Metal, seramik ve plastik malzemelerin bazı özelliklerinin karşılaştırılması.

Malzeme Grubu	Yoğunluk	Mukavemet	Tokluk	Isıl Kararlılık	Birleştirilebilme
Metaller	D-O-Y	O	İ	O	O
Seramikler	Y	Y	D	Y	K
Plastikler	D	D	D	D	İ

D:Düşük, O:Orta, Y:Yüksek, I:Iyi K:Kötü

Genel olarak yukarıdaki özelliklerden hepsi bir arada olmayabilir fakat ihtiyaca göre düzenlenebilirler. Yukarıdaki bilgiler doğrultusunda kompozit malzemelerin üretimi ile avantajlı özellikler sağlanabilir (Taya ve ark. 1988). Kompozitlerin bu avantajları onlara malzeme özelliklerini istenildiği gibi değiştirme imkanı tanır. Kompozit malzemeler bu avantalarının yanı sıra bir takım dezavantalarada sahiptir;

- Üretim güçlüğü
- İşlenmesinin güç olması yanında maliyetinin yüksek oluşu ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi
- Diğer malzemeler gibi geriye dönüşümünün (recycle) olmayışı
- Kırılma uzamasının az oluşu gibi dezavantajları da mevcuttur.

Modern kompozit malzemeler evlerden binalara, köprülerden mobilyalara ve mühendislik alanında çok geniş uygulama alanlarına sahiptir. Aşağıda değişik takviye elemanları kullanılarak yapılmış olan plastik ve metal esaslı kompozit malzemeler ve bunların bazı uygulama alanları Çizelge 3.2. de gösterilmiştir (Trumper 1987). Özellikle sivil ve askeri uçaklarda uzun yıllardan beri ileri kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Bu modern malzemelerde öncelikle cam, bor ve aramid fiberler, daha sonraları da silisyum karbür ve alüminyum oksit fiberler kullanılmaya başlanmıştır.

Çizelge 3.2. Plastik metal esaslı kompozit malzemeler ve bunların bazı uygulama alanları.

Endüstrisi	Uygulama Alanı	Kompozit malzeme
Uzay-Uçak	Uçak Kanatları ve Gövdesi, Helikopter Pervanesi, İniş ve Çıkış ve Kapıları, Payandalar, Döşeme Kirişleri, Çerçeveler, Vantilatör ve Türbin Kanatları, Uçak Frenleri, Roket Memeleri, Türbin Pervaneleri, Roket Çıkış Sistemleri	B/Al, SiC/Al, Gr/Al, B/Al Cam/Epoksi, B/Epoksi, C/Epoksi, Kevlar/Epoksi, Süper alaşımlar, Karbon/Karbon kompozitler
Helikopter	Transmisyon Kutusu, Kiriş Destekleri, İtici Çubuklar, İniş Takımları, Rotor Kanatları Arkası.	Al_2O/Mg, Gr/Al, Gr/Mg, B/Al, Al_2O_3/Al, SiC_w/Al, B/A, SiC/Al
Uzay	Uzay Yapıtları, Antenleri, Robot Kolları	B/Al, B/Mg, Gr/Mg
Otomotiv	Gövde Parçaları, Tampon ve Çamurluklar, Ön ve Arka Paneller, Aks Mili, Yaylar, İtici Çubuklar, Biyel Kolları	Kevlar/Epoksi, SiC_p/Al, SiC_w/Al, Al_2O_3/Al, B/Al
Gemi	Gemi Tekneleri, Gemi Güvertesi	Kevlar/Epoksi, Cam/Epoksi
Kimya	Boru, Basınçlı Kaplar, Tanklar	Karbon/Epoksi, Cam/Epoksi
Spor	Olta, Golf Malzemeleri, Yüzme Havuzları, Tenis Raketleri, Bisiklet ve Motosiklet Gövdeleri	B/Epoksi, C/Epoksi, B/Al, SiC/Al, Gr/Al, SiC_w/Al, B/Al,

Elektrik	Motor Fırçaları, Kablo ve Akü Plakaları	Gr/Cu, Gr/Pb, Al_2O_3/Pb
Tekstil	Mekik	C/Al, B/Al, SiC/Al
Tıp	Röntgen Masası, Protezler ve Tekerlekli Sandalyeler	B/Al, SiC/Al

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler bileşenleri açısından çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. Bileşen türü ve yapısal açıdan başlıca üç gruba ayrılabilir. Bir kompozit içerisinde bulunabilecek olan destekleyici yapılar fiber, partikül, pulcuk, lamine yada dolgu olarak bulunabilir. Bunların temel fonksiyonu gelen yükü taşımak ve matriksin rijitlik ve dayanımını arttırmaktır (Kelly ve ark, 1965).

Kompozitler bileşenleri açısından çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. Takviye şekline göre kompozit malzemeler başlıca üç gruba ayrılabilir.

3.1.1. Fiber (elyaf) takviyeli kompozitler

Fiber takviyeli kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılan fiber malzeme bulunmakta, bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matriks malzeme bulunmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, fiber malzeme kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini iyileştirme, matriks malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matriks olarak kullanılan malzemenin bir amacı da fiber malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü fiberler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylece fiber malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çakacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olur.

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin özellikleri, fiber/matriks hacimsel oranlarını değiştirmek ve her birin fazın sahip olduğu nitelikleri düzenlemek suretiyle ayarlanabilir. Özellikleri ve sahip olduğu nitelikleri yönlere göre değişen malzemeler anizotropik malzemedir. Malzemenin anizotropik olmasının en önemli neticelerinden birisi, malzeme davranışlarını izah edebilmek için gerekli olan parametre sayısının artmasıdır. ASTM'ye göre bir malzemenin fiber olabilmesi için bu malzemenin çubuk

şeklinde doğrulanmış ve ve boyutlarının uzunluk/çap oranın 10/1 olması gerekir. Sürekli fiberlere flaman denilmektedir. Flamanın şekli dikdörtgen prizması şeklinde ise bu tür fiberlere de şerit denilmektedir. Fiberli kompozitler yumuşak ve sünek matriks içine sert, dayanıklı rijitliği, yüksek fiberler ilave edildiğinde çekme dayanımı, yorulma dayanımı, özgül modül ve özgül dayanım özellikleri iyileştirilebilir.

Bir kompozitin mekanik özellikleri kompoziti meydana getiren malzemelerin özelliklerine bağlı olmakla beraber, fiber takviyeli kompozitlerde fiberin uzunluğu, yönlenme, geometrisi, dağılımı ve kompozitin üretim yöntemlerine de bağlıdır. Yönlenme, mukavemetin hangi yönde daha yüksek olacağını belirler. Üç tip fiber takviyesi vardır; bunlar tek yönde, düzlemsel ve üç boyutlu takviyedir. Bunlardan tek yönde takviye yönlenme doğrultusunda en yüksek mukavemet ve elastisiteye sahiptir. Düzlemsel takviye her yönde farklı mukavemet gösterir. Tek yöndeki mukavemet o yöndeki fiber sayısıyla orantılıdır. Fiber yönlenmesi ne kadar rasgele olursa herhangi bir yönde mekanik özellikler zayıflayabilir. Karışım kuralı ile fiberle takviye edilmiş kompozit malzemelerin yoğunluğu aşağıdaki eşitlikle belirlenebilir.

$$\rho_c = V_m \rho_m + V_f . \rho_f \quad \text{.....(3.1)}$$

ρ :yoğunluk
V:Hacimsel oran
m: matriks
f : fiber
c: Kompozit

Kompozit malzeme üzerine etki eden toplam kuvvet her bir elemanın taşıdığı kuvvetlerin toplamıdır.

$$F_c = F_m + F_f \quad \text{.....(3.2)}$$

$F = \sigma . A$ olduğundan

$$\sigma_c . A_c = \sigma_m . A_m + \sigma_f . A_f \quad \text{.....(3.3)}$$

eşitliği yazılabilir.

σ: Dayanım
A: Kesit Alanı
F: Kuvvet

Eşitlik düzenlenirse;

$$\sigma_c = \sigma_m \left[\frac{A_m}{A_c} \right] + \sigma_f \left[\frac{A_f}{A_c} \right] \text{……..……...(3.4)}$$

eşitliğini yazmak mümkündür. Fiberler uniform bir kesit alanına sahip ise alan oranı kısmi hacim oranına eşit olduğundan sürekli fiber takviyeli kompozitin gerilmesi eşitlik (3.5) ile hesaplamak mümkündür.

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_f V_f \text{ ……..(3.5)}$$

Hook kanunundan $\sigma = E.\varepsilon$ olduğundan bu nedenle,

$$E_c.\varepsilon_c = E_m.\varepsilon_m.V_m + E_f.\varepsilon_f.V_f \text{ …….....3.7)}$$

E:Elastisite modülü,

eşitliğini yazmak mümkündür. Fiber matrikse rijit bağlanmış ise hem fiber hem de matriks eşit miktarda uzamış olacaktır. Kompozitin elastikiyet modülü sürekli tek yönlü fiberlere yük uygulandığı zaman karışım kuralı uygulanarak eşitlik (3.6) ile hesaplanabilir.

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f \text{ ……..(3.6)}$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Buna karşın uygulanan yük çok büyük olduğu zaman matriks deforme olmaya başlar ve gerilim-gerinim eğrisi fazla doğrusal olarak devam etmez. Düşük gerilmelerde elastik modül karışım kuralı ile verilmekte, yüksek gerilmelerde matriks deforme olmakta ve karışım

Matriks, kompozitin şekil değiştirmezliğine çok etki ettiğinden modül aşağıdaki eşitlikle hesaplanabilir.

$$E_c = E_f.V_f \text{ ……...……(3.8)}$$

Yük fiberlere dik yönde uygulandığı zaman her bir eleman birbirinden bağımsız olarak etki yapar. Bu durumda kompozitin elastikiyet modülü;

$$\frac{1}{E_c} = \frac{E_m}{V_m} + \frac{E_f}{V_f} \quad \text{.....(3.9)}$$

şeklinde ifade edilir.

3.1.2. Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozitler bilinen en eski kompozit şeklidir. En az iki değişik levha malzemenin tabakalar halinde dizilerek oluşturduğu malzemelere tabakalı kompozitler denir. Ayrıca; tabakalar halinde bulunması her tabakanın bir kompozit olmasına imkan vermektedir. Tabakalı kompozitlerde; tasarım, üretim, standartlaştırma ve kontrol diğer kompozitlerden daha kolay olmaktadır. Bu kompozitlerde özel gereksinimleri karşılamak amacıyla birden çok tabaka birlikte kullanılabilir. Bunlara, sandviç malzemeler de denir. Tabakalama işlemiyle kompozit malzemenin mukavemeti, katılığı, korozyon direnci, aşınma direnci, ısıl yalıtım özellikleri iyileşirken güzelliği ve çekiciliği de artabilir. Bu tür iyileştirilmiş özellikler bimetallerde, haddelenmiş metallerde, tabakalanmış camlarda, plastik kaplı tabakalanmış kompozitlerde çok rahat şekilde görülebilir.

3.1.3. Parçacık katkılı kompozitler

Parçacık kompozitler, parçacıkların bir başka matris malzeme içerisinde yerleşmesinden meydana gelir. Parçacıklar ve matrisler metal veya metal olmayan olabilir. Parçacık kompozitler bir veya daha fazla malzemenin taneciklerinin başka bir matris malzeme ile birleştirilmesinden meydana gelir. Parçacık kompozitlere örnek olarak betonu verebiliriz. Beton kum, ve çakıl parçacıklarının çimento ve su ile birleştirilmesi sonucu olur. Betonda ne parçacık ne de matris malzeme metaldir.

3.2. Yapılarını Oluşturan Malzemelere Göre Kompozitler

3.2.1. Plastik - plastik kompozitler

Fiber olarak kullanılan plastik yük taşıyıcı bir özelliğe sahip iken, matriks olarak kullanılan plastik esneklik verici, darbe emici ya da istenen amaca göre kullanılan

plastikler naylon, polietilen, polistren, karbonflorür akrilikler, selülozikler, viniller sayılabilir.

Termoset plastikler: Bu tür plastikler ise ısıtılıp şekillendirildikten sonra soğutulduklarında artık mikro yapıda oluşan değişim nedeniyle eski yapıya dönüşüm mümkün olmamaktadır. Bu grubun belli başlı plastikleri ise polyesterler, epoksiler, alkitler, aminler olarak verilebilir.

Elostomerler: Bir kısım tabi ve sentetik çizgisel polimerler elostomerler olarak adlandırılır, bir kuvvet uygulandığında büyük miktarda bir elastik deformasyon sergilerler. Deformasyon, gerilim kaldırıldığında tamamen geri dönebilirler. Elostomerlere örnek olarak araç lastikleri verilebilir. Elostomerlerde uzun polimer zincirleri, bandların sis diziliminden dolayı kangallaşır. İdeal olarak bir kuvvet uygulandığında doğrusal zincirlerin kangalların açılması ile polimer gerdirilir. Gerilim kaldırıldığında zincirler yeniden kangallaşır ve polimer orjinal boyut ve şekline geri döner.

3.2.2. Plastik–cam fiber kompozitler

İsteğe göre termoplastikler veya termoset plastikten oluşan matriks ve cam fiberlerin uygun kompozisyonundan üretilmektedir. Mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle cam fiberler birçok durumda metal, asbest, sentetik fiber ve pamuk ipliği gibi fiberlere tercih edilebilirler. Ancak cam fiberli kompozitler, büyük kuvvetleri iletmelerine rağmen camın kırılgan olmasından dolayı çok düşük dirençlidirler. Bu tür malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanılan plastik reçineler uygun seçilerek arzu edilen şekle sokulabilir. Plastik reçineler de termoplastik ve termoset türünde olmaktadır. Termoset plastikler, fiberlerinde düzgün oryantasyonu ile yüksek mukavemete ulaşabilirler. Cam fiber takviyeleri ile en çok kullanılan plastik reçineler, polyesterlerdir. Polyesterlerinde bu amaçla kullanılan birçok türü mevcuttur.

3.2.3. Plastik–metal fiber kompozitler

Endüstride çok kullanılan metal fiber takviyeli plastikten oluşan kompozitler oldukça hafif ve mukavim bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kompozitler, metal fiberlerin (Bakır, Bronz, Alüminyum. Çelik v.s.) poli–etilen ve poli–propilen plastiklerini takviyelendirmesi amacı ile elde edilmekte ve kullanılmaktadır. Özellikle deformasyon yönünden takviyelendirme yaygın olarak kullanılmakta ve iyi bir verim alınmaktadır.

3.2.4. Plastik–köpük kompozitler

Bu tür kompozitlerde plastik, fiber olarak görev yapmakta; köpük ise matriks, reçine konumunda olmaktadır. Köpükler, hücreli yapıya sahip, düşük yoğunlukta, gözenekli ve doğal halde bulunduğu gibi, büyük kısmı sentetik olarak elde edilmiş hafif maddelerdir. Köpük, hücre yapısına göre sert, kırılgan, yumuşak ya da elastik olabilmektedir. Matriks olarak kullanılan bu köpük türleri, kullanılan plastiğin çeşitlenebilmesiyle değişik özellikte kompozitlerin oluşumunu sağlar.

3.2.5. Seramik kompozitler

Metal veya metal olmayan malzemelerin bileşiminden oluşan seramik kompozitler, yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım göstermekle birlikte rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca elektriksel olarak çok iyi bir yalıtkanlık özelliği gösterirler. Üç ayrı grupta toplanan seramik kompozitler şu şekilde sıralanabilir:

A) Seramik-seramik: İki seramik fazın karışmasından oluşmaktadır. Örnek olarak saf çini verilebilir.

B) Seramik-cam: Yaşamımızın her alanında kullanılan porselen, bir seramik cam kompozitidir. Kuartz fiberlerin bir cam matriks içersine çini ile birlikte hamurlanıp yerleştirilmesiyle oluşmuştur.

C) Seramik-metal: Bu tür kompozitler, çok fazlı bir yapıya sahiptirler. Bir metal faz, bir seramik faz, bir gözenek fazı ve daha çok karmaşık formlarda seramik ve metalin ilave fazlarından meydana gelmiştir. Endüstride kullanılan kesici uçlar en iyi

örneklerdir. Bir kobalt matriks içine dağılmış tungsten karbür parçalarından oluşan bu kompozit malzeme büyük bir dayanım sağlamaktadır.

3.2.6. Kâğıt

Kompozit malzemelerin günümüzde en çok kullanılan örneklerinden biri olan kağıt, selüloz fiberlerinin dolgu ve bağlayıcılarla bir arada tutulması ile oluşturulmaktadır. Dolgu maddesi içindeki selüloz fiberleri şişerek keçeleşmekte ve ezilip sıcak preslendikten sonra kağıt haline gelmektedir.

3.3. Metal Matriks Kompozitler ve Üretimi

Metal matriksli kompozit malzemelerin üretimlerinde, matriks olarak Al, Mg, Zn, Cu ve Ni gibi malzemeler yaygın olarak kullanılırken, takviye olarak silisyum karbür, bor, grafit, alüminyum oksit, tungsten ve molibden gibi değişik sürekli, kılcal kristalli veya parçaçıklı fiberler kullanılmaktadır. Yüksek performansı sayesinde çelik fiberle takviye edilmiş malzemeler oda sıcaklığında ve daha yüksek sıcaklıklarda takviye edilmemiş yapılara göre daha yüksek performans sergilemektedirler (Rohatgi 1990).

Metallerin ve metal alaşımlarının birçoğu yüksek sıcaklıkta bazı özellikleri sağlamalarına rağmen kırılgan olmaktadırlar. Fakat metalik fiberler ile takviye edilmiş metal matriksli kompozitler her iki fazın uyumlu çalışması ile yüksek sıcaklıkta da yüksek mukavemet özelliklerini vermektedir. Bakır ve alüminyum matriksli, Wolfram ve Molibden fiberli kompozitler ve Al-Cu kompoziti bize bu kompozisyonu en iyi veren örneklerdir. Bu tip kompozitler, matriksin özelliklerini iyileştirdiği gibi bu özelliklere daha ekonomik ulaşılmasını sağlar.

Metal matrisli kompozitlerde en ciddi problem; matris ile takviye arasında kimyasal bir uyumun sağlanmasıdır. Takviyelerin, matris içerisinde kolay ve homojen dağılması için bir ön ısıtma gereklidir. Bazen takviyeler yüksek sıcaklığa maruz kaldıkları taktirde; matris ile takviyeler arasında, takviyelerin özelliklerini bozacak şekilde bir etkileşim meydana gelebilmektedir (Lienert, 1993, Zhu, 1988).

İstenmeyen fazların oluşmaması ve takviye malzemesi ile matris arasında iyi bir bağ oluşması için; düşük sıcaklıkta üretim tekniklerinin geliştirilmesi ve birbiriyle termodinamik olarak dengede bulunan kararlı fazların seçiminin yapılması

gerekmektedir. Kompozit üretimi için uygulamada istenilen teknik özelliklere göre takviye elemanı ve matriks seçiminin yanı sıra üretim tekniği de çok önemlidir (Brent Strong, 1989). MMK ların üretiminde yaygın olarak kullanılan teknikler;

3.3.1. Sıvı metal infiltrasyonu tekniği

Sıvı metal emdirmesi tekniği, hem kısa elyaf hem de sürekli elyafla takviyeli MMK'lerin üretilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu metotta önce uygun preform hazırlanır, yani fiber hacim içeriği ve doğrultuları oluşturulur. Model kalıp içine yerleştirilerek sıvı metal enjekte edilir ve preformun ıslatılması sağlanır. Emdirme işlemi basınçla yapılırsa, matrisin elyaf arasına girmesiyle ortaya çıkan gaz da sıkışmayarak dışarı atılır. Emdirme eğer vakumla yapılırsa, elyaf yüzeyi aktivitesi yüksek olduğundan daha iyi ıslanabilirlik sağlanabilmektedir.

3.3.2. Sıkıştırmalı veya sıvı dövme döküm tekniği

Bu yöntemde takviyeden oluşturulmuş preform veya yatağa, sıvı alaşım hidrolik basınç altında emdirilmektedir. Sıvıyı soğutma etkisinden kaçınmak için kalıp, preform ve zımba ön ısıtmaya tabi tutulmaktadır.

Silisyum karbür, grafit, alüminyum oksit ve paslanmaz çelik gibi takviye elemanları, ergimiş metal içinde gereği kadar ıslanmaz. Bu nedenle sıvı metal emdirilmesi tekniği ile kompozit üretimi daha zordur. Fakat sıkıştırmalı döküm tekniğinde ergimiş metalin elyaf demeti içerisine basınçla emdirme esasına dayandığından mikro boşluklar önlenebilmekte ve dolayısıyla preform içindeki atıl gazlar atılarak daha sağlam, gözeneksiz bir yapı elde edilebilmektedir (Şahin, 2000).

3.3.3. Sıvı metal karıştırması tekniği

Islatmayı geliştirmek için takviye ile etkileşim gösteren bir element ile matrisin alaşımlanması etkili olur. Aynı zamanda parçacıklar da ıslatılabilir bir örtü ile kaplanabilir. Kılcal kristalli ve kırpılmış elyafla takviyeli kompozitlerin üretiminde kullanılan bu metot en uygun ve ucuz olanıdır.

3.3.4. Hızlı katılaştırma tekniği

Basınç altında suyla soğutulan bakır disk üzerine sıvı jeti halinde verilerek 40-60µm kalınlığında, 6-8µm uzunluğunda, 0.5-0.7µm genişliğinde lamelsi tozlar elde edilir. Bunlar bir araya getirilerek değişik ikincil işlemlere tabi tutulur.

3.3.5. Plazma püskürtme tekniği

Püskürtülecek alaşımı indüksiyon fırınında ergitilir ve potaya basınç uygulanır. Ergimiş alaşım püskürtülürken aynı zamanda parçaçıklı elyaflar atomize edilmiş olarak içerisine enjekte edilerek, önceden ısıtılmış alt katman üzerine çökeltilir ve toplayıcı üzerinde katı bir çökelti oluşur. Soğuduktan sonra kaplanmış çökelmiş çubuk haddelenmesi için göbekten çıkartılır. Bu metot da alüminyum gibi ergime noktası nispeten düşük olan metallere uygulanmalıdır.

3.3.6. Sıcak presleme ve sıcak izostatik presleme tekniği

Bu işlem Al, Mg ve Ti gibi metal matrisli kompozit panelleri üretmek için başarılı bir şekilde kullanılır. Bu teknikte, flamentler metal matristen oluşan ince folyo tabakalar arasına yerleştirilir ve kompoziti yerinde tutmak için bir bağlayıcı ile spreylenir ve sonra bağlayıcı yakılarak ayrılır. Daha sonra preform kompozit tamburdan çıkarılır ve istenen ölçüde kesilerek sıcak pres kalıp içine istiflenir. Önce kütle üstüne hafif basınç uygulanır ve bağlama sıcaklığına ulaşıldığında gerekli için tam bağ basıncı uygulanır. Daha sonra basınç kaldırılır ve termal uzamalarda uyumsuzluklardan ileri gelen kalıcı gerilmeleri en aza indirmek için komple parça yavaş şekilde soğumaya bırakılır.

3.3.7. Toz metalurjisi tekniği

Toz metalurjisi; ergime derecesi ve sertliği çok yüksek olup, klasik yöntemlerle biçimlendirilmesi zor veya ekonomik olmayan malzemelerin şekillendirilmeleri için kullanılan bir yöntemdir. Toz metalurjisi ile üretim yöntemleri diğer metal şekillendirme yöntemlerinden tamamen farklı olup seramik parça üretim teknolojisine benzemektedir (Hansner, 1982). Döküm yöntemleri ile üretilemeyen ve şekillendirilemeyen malzemeler ve parçalar bu yöntem ile; homojen, yoğun, ince taneli, segregasyonsuz ve yüksek mukavemetli olarak üretilebilmektedir (Ünlü ve

Öveçoğlu, 1992). Toz metalürjisinde malzeme önce toz zerrecikler haline getirilir. Daha sonra bu tozlar sinterleme denilen, ısıtma ve dövme kalıplarında yüksek güçte presleme işlemi ile belirli bir şekle getirilmektedirler. Toz metalürjisi genellikle demir, bakır, kalay, kurşun, nikel, kobalt, titanyum ve wolfram gibi malzemelere uygulanmaktadır.

3.3.8. Yarı katı karıştırma tekniği

Bu yöntemde katı ile sıvı arasındaki sıcaklığa sahip yarı katı karıştırmak suretiyle yapılan takviye ilave tekniğidir. Alaşım sıcaklığı sıvı sıcaklığının 30 -50 ºC üzerine çıkarılıp hızlı şekilde karıştırılarak yarı katı aralığa kadar soğumasına izin verilir. Devam eden bu hareketlilik, katılaşan dendiritleri kırarak ince küresel parçaçıklara dönüştürmekte ve yarı akışkan viskozitesindeki yükselmeye de engel olur. Karıştırma devam ederken takviye ilavesi yapılır.

3.3.9. Difüzyon bağlama ve vakumda presleme tekniği

Bu metotla birleştirme, yüksek basınç ve sıcaklıkta yapılır. Bor, silisyum karbür, alüminyum oksit, karbon gibi tek filementli elyaf ya da elyaf demetleri ile alüminyum ve titanyum gibi matris malzemeleri tabakalar halinde kullanılarak takviyeli kompozit malzemeler üretilir. Bu teknikte ilk olarak, levha şeklinde metal veya metal alaşımları ile elyaf şeklinde takviye elemanları etkili yayılma sağlamak için kimyasal yüzey işlemine tabi tutulmaktadır. Sonra elyaflar önceden belirlenen yönlerde, açılarda ve istenilen aralıklarda metal tabakalar üzerine düzenlenir. Levha halinde hazırlanan bu malzemeler metal bir kaba yerleştirilerek sızdırmazlık sağlanır ve vakuma alınır.

3.4. Metal Matriksli Kompozitlerin Üretimindeki Önemli Hususlar

Üretim tekniğini belirlerken fibere, matrikse, parça şekline ve istenilen mekanik ve fiziksel özelliklere göre bir yöntem belirlemek lazımdır. MMK malzemeleri üretmek için dikkat edilmesi gereken önemli hususlar vardır.

Üretimde matriks seçimi önemli bir yer teşkil eder. Yoğunluk, çekme mukavemeti, yüksek sıcaklık özelliği ve süneklik gibi faktörlerin yanında üretim metodu ve hepsinin uyumuna bağlıdır. Fakat genelde düşük yoğunluğa sahip Al, Mg

ve Ti gibi matrikslerle en iyi özellikler elde edilebilmektedir. Çünkü karbon fiber hariç diğer fiberlerin yoğunluğu 3000 kg/m^3'ün üstünde olup bunlar yüksek yoğunluklu metaller içerisine katılırsa ağırlık problemi ortaya çıkmaktadır (Clyne ve ark, 1985), (Bader, 1984). Fiberlerı bir arada tutacak ve üretime hazırlarken fiber yüzeylerine zarar vermeyecek şekilde seçilmelidir. Fiberleri eşit aralıklı ve homojen bir şekilde dağıtarak, sürtünme veya yapışma bağıyla yükleri fiberlere taşımalıdır. Fiberlera termal ve kimyasal olarak uyum sağlamalıdır.

MMK üretiminde matriks ile aynı öneme sahip diğer eleman ise takviye elemanıdır. Fiberlerında yüksek elastiklik modülü ve çekme dayanımının yanı sıra her biri arasında düşük dayanım değişikliğinin olması gerekir. Fiberlerın seçiminde düşük yoğunluk, yüksek ergime sıcaklığı, ısıl kararlılık ve maliyet gibi özelliklere de dikkat edilmesi gerekir. Pek çok seramik parçacıklar sıvı metal alaşımları tarafından ıslatılamamaktadır. Bunun sonucu olarak da seramik parçacıkların ilavesi ve sıvı içinde tutulması için sıvıya ıslatmayı geliştirici ilave veya karıştırmadan önce seramik parçacıkların kaplanması gerekebilmektedir. Bu amaçla da genelde kimyasal buhar kaplama (CVD), sol-gel ve elektriksiz kaplama gibi metotlar ile seramik tozların metaller veya metal oksitler ile kaplanması sağlanabilmektedir (Şahin, 2000).

Kompozit malzemelerde çok değişik fiber geometrisi kullanılır. Bunlar üç ana gruba ayrılır (Şahin, 1999).

1. **Tek yönlü;** bütün fiberler bir doğrultuda ve yönde düzenlenmiştir.
2. **Çift yönlü;** bir kısım fiberler 0º 'de yönlenirken, diğerleri (0º/90º) olarak dizilirler.
3. **Rasgele dizilim;** fiberler düzlem içinde rasgele dağılmış ve yönlendirilmiş ise iki yönlülere göre biraz daha düşük mekanik özellikler gösterirler.

Üretimde fiber çapının da etkisi büyüktür. Küçük çaplı çok sayıda fiberi ıslatabilmek güç olduğu için küçük çaplı fiberlerin üretimi zordur. Ancak yeterli ara yüzey bağı temin edilirse çok yüksek mekanik özellikler elde edilir. Fiber çapı arttıkça, mekanik özelliklerde azalma görülür, çap azaldıkça özellikler iyileşir.

Çapın büyüklüğünün yanında boy/çap oranı da önemli bir parametredir. Büyük boy/çap oranına sahip olan kesikli fiberlerin matriks içine daha kolay katılması ile çekme dayanımı ve elastiklik modülünde yeterli artışlar sağlanabilmektedir.

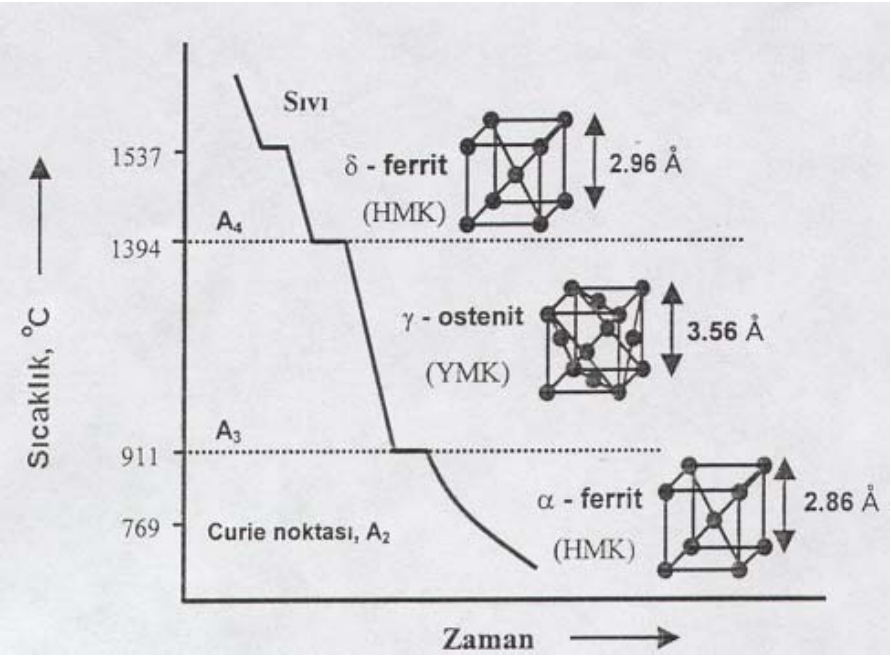
Matriks ve takviye malzemeleri ile ilgili parametrelerden daha önemli bir konu da bunlar arasında yani matriks-fiber arasında kuvvetli bir ara yüzey bağının oluşmasıdır. MMK üretimindeki en büyük güçlük matriks-fiber arasındaki ara yüzey bağının oluşumunu sağlamaktır. Takviye elemanlarının yüksek dayanım ve elastiklik modüllerinden faydalanabilmek için bunlar matrikse kuvvetli olarak bağlanmalıdır. Çünkü kompozitin mekanik özelliği, matriks ile fiber arasında oluşan ara yüzey bağının kararlılığına bağlıdır. Matriksin bütün fiber yüzeylerine kolaylıkla yayılması gerekir. Bu durumda da fiberler iyi ıslanır ve boşluksuz bir kompozit üretilebilir. Ancak genelde seramiklerin ıslanma işlemi karmaşık olduğundan, metaller tarafından kolaylıkla ıslatılamaz. Bu nedenle ıslatma işleminden önce, fiberlerin yüzeyleri matriksle ara yüzey bağı yapacak şekilde başka bir element ile kaplanır.

Basit bir sistemde ara yüzey bağı; matriks ve fiber arasındaki yapışma nedeniyle çekme sonucu meydana gelir. Kararlı bir ara yüzey faz oluşumu için; bağlayıcı matriksin düşük viskozitede ve takviye elemanının kritik yüzey geriliminden daha düşük olması gerekmektedir.

4. ÇELİK VE DÖKMEDEMİRLER

Dünya metal üretiminin yaklaşık %95 i demir olup, demirin karbon ile yapmış olduğu en yaygın kullanılan mühendislik malzemelerini oluşturmaktadır. Bunun başlıca nedeni demirin allotropik (kristal yapısı sıcaklığa bağlı olarak değişen) bir metal olması ve demir-karbon alaşımlarına ısıl işlemler ve/veya alaşımlama yoluyla çok farklı özellikler kazandırılabilmesidir.

Saf demir, hacim merkezli kübik (HMK) ve yüzey merkezli kübik (YMK) olmak üzere iki temel kristal yapıya sahiptir ve bu kristal yapıların her biri belirli bir sıcaklık ve aralığındadır. Düşük sıcaklıklardan itibaren 911 ^{0}C ye kadar kararlı olan kristal yapı α-demir (ferrit) olarak bilinen HMK'dır. HMK kristal yapısı 911 ^{0}C de γ-demir (ostenit) olarak adlandırılan YMK kristal yapısına dönüşür ve 911-1394 ^{0}C arasındaki sıcaklıklarda kararlıdır. 1394 ^{0}C den sonra bir kristallografik dönüşüm daha meydana gelir ve YMK yapı yeniden HMK yapıya dönüşür. Bu ikinci HMK yapısı δ-demir (δ-ferrit) olarak adlandırılır ve ergime sıcaklığı olan 1537 ^{0}C ye kadar kararlıdır.

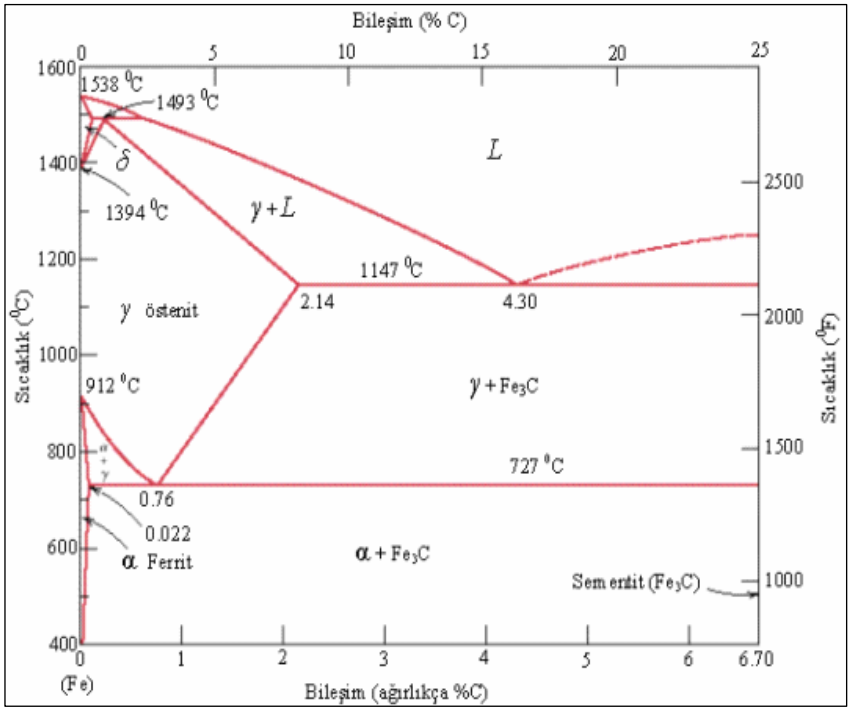


Şekil 4.1. Saf demirin soğuma eğrisi ve farklı sıcaklık ve aralığında kararlı olan kristal yapıları (Baydoğan, 2001).

Fe-C alaşımlarının yapısında bulunan katı eriyiği tipi ilave edilen elementin yarıçapına bağlıdır. Atom yarıçapı 0.77 Å olan karbon ve 0.72 Å olan azot gibi demirden daha düşük atom yarıçapına sahip elementler, kristal yapı içerisindeki arası çeşitli boşluklara yerleşerek arayer katı eriyiği oluşturur.

Yumuşak bir metal olması nedeniyle, mühendislik uygulamalarında saf demirin kullanımı sınırlıdır. Ancak, karbon ile alaşımlandırılma mukavemette mukavemette artış sağlamaktadır. Fe-C alaşımlarında %0.1-%0.2 gibi çok düşük oranlarda bulunması dahi, mukavemetin önemli ölçüde artmasına yeterli olmaktadır. Dolayısıyla karbon yumuşak demir metalini sert ve mukavemetli bir alaşım haline getirebilen önemli bir elementtir. Fe-C alaşımları içerdikleri karbon miktarına göre "çelik" veya "dökmedemir" olarak isimlendirilmektedir. Çelik %2 ye kadar karbon içeren demir-karbon alaşımıdır. Dökmedemir ise %2 den büyük daha fazla oranda karbon içeren demir-karbon alaşımıdır.

Karbonun yanı sıra diğer alaşım elementleri ilavesiyle Fe-C alaşımlarına farklı özellikler kazandırılabilir. Alaşım elementleri, belli oranda demir içinde çözünerek katı eriyik yapmakta ve çözünme sınırının üstünde ilave edildiklerinde ise ikinci faz (örneğin demir karbür) oluşturmaktadır.



Şekil 4.2. Demir–karbon ($Fe–Fe_3C$) faz diyagramı

Normal koşullarda Demir-karbon alaşımlarının mikroyapısı ferrit, ostenit, δ-ferrit-sementit fazlarından oluşmaktadır. Sementit %6.67 oranında C içeren ortorombik kristal yapıya sahip sert ve kırılgan bileşiktir. Gerçekte en kararlı durumda yapı sementit yerine grafit bulunması beklenir. Ancak demir ile grafit arasındaki kararlı durumun dökmedemirler de sağlanmasına rağmen çeliklerde elde edilmesi oldukça zordur. Fe-C denge diyagramı pratikte, demir ile karbon (grafit) arasındaki kararlı ilişkiyi değil, demir ile sementit arasındaki yarı kararlı faz ilişkisini yansıtır ve yatay eksen yapıda % 100 oranında sementitin oluştuğu % 6.67 C oranına kadar çizilir.

Fe-C alaşımlarının mikroyapısı ve özellikleri incelenirken, denge diyagramı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu diyagram, sadece demir ve karbondan ibaret alaşım için çizilmiş olmasına rağmen, en karmaşık Fe-C alaşımları hakkında bile önemli bilgiler sunar. Ancak, çelik yapısında bulunan alaşım elementlerinin Fe-C denge diyagramını etkileyeceği ve önemli sıcaklık ve bileşim noktalarını değişikliğe uğratacağı da göz önünde tutulmalıdır. Fe-C denge diyagramında ostenit faz alanı, ferrit faz alanına göre oldukça geniştir. Bu durum, ostenit içerisinde ferrite göre daha yüksek oranda karbonun çözünebildiğini gösterir. Ostenit ve ferritin karbon çözünürlüğü arasındaki bu fark çeliklerin ısıl işleminin esasını oluşturur.

Fe-C denge diyagramı üzerinde bazı kritik sıcaklık noktaları vardır. Bunların ilki. ötektoid reaksiyonun meydana geldiği 723 °C sıcaklığı olup. A_1 sıcaklığı ya da alt kritik sıcaklık olarak da bilinir. İkinci önemli sıcaklık. A_3 sıcaklığı ya da üst kritik sıcaklık olarak bilinen ostenitin ferrite dönüştüğü sıcaklıktır. Üçüncü nokta. A_4 olarak bilinen ve ostenitin -δ-ferrite dönüştüğü sıcaklıktır. Saf demir için. 1394 °C olup. karbon oranındaki artmaya bağlı olarak artmaktadır.

Fe-C alaşımlarının fiziksel ve mekanik özelliklerini, bileşime ve ısıl işlem koşullarına bağlı olarak oluşan mikroyapıları belirler. Fe-C alaşımlarına ait mikroyapı bileşenleri Çizelge 4.1.de kısaca tanıtılmıştır.

Fosfor, karbon ve silisin etkisi 1 ve 2 no'lu eşitlik kullanılarak karbon sistemine ilişkilendirilebilir. Karbon Denkliği (KD)=4,3 olan demirler ötektik bileşimi olarak düşünülebilir. Genellikle gri dökmedemirler KD=4,3 olduğu durumlarda hipoötektiktir. Gri dökmedemirin fiziksel ve mekanik özelliklerinin hemen hemen tamamı KD değerleri ile yakından ilgilidir. Hipoteknik demirin katılaşması ile ilgili olayların süresi % 2 silisli demir karbon silis üçlü denge diyagramının basitleştirilmiş versiyonu ile çalışılabilir.

Hem karbon, hem silis dökme demirin yapısını etkilemektedir. Böylece katılaşma üzerine onların etkilerinin bir yaklaşımını geliştirmek gerekir. Bu karbon denge içeriğinin gelişmesi boyunca gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım kullanılarak aşağıdaki karbon dengesi hesaplanmıştır.

$$KD=\%C+\frac{\%Si}{3} \quad \text{.....(4.1)}$$

veya tam olarak hesaplanmak istenirse fosfor da dahil edilerek aşağıdaki ifade ile bulunabilir.

$$KD=\%C+\frac{\%Si+\%P}{3} \quad \text{.....(4.2)}$$

Fosfor, karbon ve silisin etkisi 4.1 ve 4.2 no'lu eşitlik kullanılarak karbon sistemine ilişkilendirilebilir. Karbon Denkliği (KD)=4,3 olan demirler ötektik bileşimi olarak düşünülebilir. Genellikle gri dökmedemirler KD=4,3 olduğu durumlarda hipoötektiktir. Gri dökmedemirin fiziksel ve mekanik özelliklerinin hemen hemen tamamı KD değerleri ile yakından ilgilidir. Hipoteknik demirin katılaşması ile ilgili olayların süresi % 2 silisli demir karbon silis üçlü denge diyagramının basitleştirilmiş versiyonu ile çalışılabilir.

Çizelge 4.1. Fe-C alaşımlarına ait mikroyapı bileşenleri (Baydogan ve ark., 2001)

Tanım	Özellikler
Ferrit	α ile gösterilir. HMK kristal yapıdadır. Karbon çözünürlüğü maksimum. % 0.025'tir. Oda sıcaklığında % 0.008 karbon çözündürür. Yumuşak ve sünektir .
Ostenit	γ ile gösterilir. YMK kristal yapıdadır. Maksimum. % 2.11 karbon çözünürlüğüne sahiptir. Çoğu çelikte oda sıcaklığında kararlı değildir. Yüksek tokluğa ve yaklaşık 40 HRC sertliğine sahiptir.
Perlit	Demir ve sementit fazlarının bir araya gelerek oluşturduğu lameler morfolojiye sahip iki fazlı bir yapıdır. Ötektoid reaksiyon sonucu ostenitten oluşur. % 0.8 karbon içeren çeliğin oda sıcaklığındaki mikroyapısında % 100 oranında bulunur. 20 HRC, 95-100 HRB veya 250-300 HB düzeyinde sertliğe sahiptir.
Ledeburit	Ostenit ve sementit karışımı ötektik yapıdır. % 4.3 karbon oranında ve 1148 °C de oluşur.
Sementit	FejC olarak gösterilir. Demir ve karbonun oluşturduğu ortorombik kristal yapıya sahip demir karbürdür. Sert ve kırılgandır. Kararsız bir faz olup, uygun koşullarda demir ve grafite dönüşme eğilimindedir. Ancak bu dönüşüm nisbeten uzun bir zaman aldığı için çoğu çelikte bulunan yaygın bir fazdır.
Beynit	Demir ve sementit fazlarının oluşturduğu bir diğer iki fazlı yapıdır. Üst ve alt beynit olmak üzere iki farklı morfolojidedir. Üst beynine, iğnesel ferrit ve sementit plakaları yan yana dizilmiştir, alt beynine ise partikül halindeki sementit, iğnesel ferrit fazı içinde bulunmaktadır. Morfolojisi ısıl işlem koşullarına bağlıdır. İzotermal bir ısıl işlemle ostenitin dönüşümü sonucu oluşur.
Martenzit	Isıl işlem sırasında ostenit bölgesinden yapılan çok hızlı soğutmayla oluşur. Kristal yapısı hacim merkezli tetragonaldir (HMT) ve karbonca aşırı doymuştur. Morfolojisi, düşük karbon oranına sahip çeliklerde iğnesel, yüksek karbon içeren çeliklerde ise levhasaldır. Orta karbon oranına sahip çeliklerde her iki morfoloji bir arada bulunabilir. Çok serttir.
Grafit	Fe-C alaşımlarının denge fazı olup. çok yavaş soğuma hızlarında oluşur. Dökme demirlerin mikroyapısında bulunur.

Demir-karbon alaşımları, öncelikle demir-karbon esaslı olan sade karbonlu çelik alaşımlarını, paslanmaz çelikleri ve dökmedemirleri içerirler. Demir alaşımlarının bu grubu çok çeşitli özelliklere ve uygulama alanlarına sahiptir.

4.1. Çelikler

Çelik, metalik demirin karbon, mangan, silisyum, fosfor, kükürt ve diğer birçok elementlerle bileşim, alaşım ve karışımı ile oluşan değişik fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerde bir malzeme grubudur.

Metalik demirin çelik özelliklerini kazanmasında en önemli etkiyi yapan element karbon olup, çeliğin yapısında, türüne göre, % 0,02 ile % 1,5 arasında daima bulunur. Mangan, silisyum, fosfor ve kükürt imalat sırasında hammaddeden kaynaklanarak çelik bünyesinde kendiliğinden oluşurlar. İmalat sırasında diğer birçok elementin ortama katılması ile çeşitli türlerde çelikler elde edilir. Su verilince sertleşir ve sertliği 8,5 Mohs'a kadar çıkabilir.

Ağır sanayinin tanımlanması bir bakıma çelikle yapılır. Çeliğin ve çelik olmayan diğer metallerin imalatı, işlenmesi, tekstil, kâğıt, plastik sanayi ürünlerinin imaliyle işlenmeleri, makine, elektrik, elektronik ve akla gelen hemen her konuda ve her yerdeki çalışmalar çelik sayesinde mümkün olmaktadır.

Çeliklerin hammaddesi, sıvı ham demir, çelik hurdası ve daha az oranda pik ve pik hurdasıdır. Katkı maddeleri ise, çeliğe belirli mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler kazandıran ve ferro alaşım halinde verilen diğer elementlerdir. Çelik yapımı sırasında ham demir içinde yüksek oranda bulunan karbon yakılarak düşürülür. Geri analizlerle diğer elementlerin ayarlamaları kontrol altında tutularak istenilen standard bileşimde döküme geçilir. İzabe veya eritme (ergitme) ocağından alınan çelik, kontinü (sürekli) döküm makinelerine verilir, kokillere yada kum kalıplara dökülür. Dökülme şekli düşük karbonlu çelikle "kaynar", "yarı sakin" ve "sakin" dir. Diğer çeliklerde yalnız "sakin"dir. Kum kalıplara dökülen ve biçimlendirilen çelikler "çelik döküm" adını alır. Sade karbonlu çelikler, genel olarak, karbon miktarları esas alınarak, 3 alt gruba ayrılır.

Düşük Karbonlu Çelikler (C %0.30 dan az): İyi şekillendirilebilme ve kaynaklanabilirle özellikleri gösterirler. Önemli bir derinliğe sertleştirebilmek için, yeterli sertleşebilirlikleri yoktur. Yapıları, genellikle Ferrit + Perlit' dir. Soğuk ve sıcak şekil verme uygulamalarına müsaittirler.

Orta Karbonlu Çelikler (C % 0.3-0.6): Düşük karbonlu çeliklerin toklukları ile beraber, daha yüksek karbondan kazanılan mukavemet ve sertlik, birlikte bulunur. Orta karbonlu çelikler, pek çok uygulama alanı bulmaktadır.

Yüksek Karbonlu Çelikler (C >%0.6): Tokluk ve şekillendirilebilme özellikleri oldukça düşüktür, fakat sertlik (yüksek karbondan dolayı) ve aşınma dirençleri yüksektir. Sade karbonlu çelikler, en düşük fiyatlı çelik malzemelerdir ve

birçok uygulamalar için, alaşımlı çeliklerden önce düşünülür. Geliştirilmiş malzemeye ihtiyaç duyulduğu zaman, bir veya daha çok alaşım elemanı ilavesiyle, çeliğin kalite ve derecesi yükseltilir.

Ticari olarak üretildiği zaman, karbondan başka belirli diğer elemanlar (Mn, Si, P, S), küçük miktarlarda, çeliğin içinde bulunur. Bu dört eleman, normal yüzdelerinde bulunduğu zaman ürün, sade karbon çeliği olarak kabul edilir. Çeliğin mukavemeti, esas olarak karbon oranının bir fonksiyonudur. Sade karbonlu çeliğin sünekliği, karbon oranı artırıldıkça azalır ve sertleşebilirliği oldukça düşüktür.

Alaşımlı çelikler, alaşım elemanların (karbon ve arıtılamayan elemanlar dışında kalan diğerleri) toplam miktarı % 5'den az olanlar düşük alaşımlı çelikler ve alaşım elemanlarının toplam miktarı % 5 'den fazla olanlar yüksek alaşımlı çelikler olmak üzere, iki ana gruba ayrılırlar. Temelde alaşımsız çeliklere benzer davranışa sahip olan düşük alaşımlı çeliklerin teknik açıdan en belirgin özeliği, sertleşme kabiliyetlerinin daha yüksek olmasıdır. Ayrıca, sertlik, çekme dayanımı, akma sınırı, elastiklik modülü gibi dayanım özelikleri ile sıcağa dayanıklılık, meneviş dayanıklılığı gibi karakteristikler yükselirken, genellikle kopma uzaması, kesit daralması, çentik darbe dayanımı gibi değerlerde azalma olur. Alaşımsız ve düşük alaşımlı çeliklerde istenilen özeliklerin bulunmaması veya yetersiz olması halinde yüksek alaşımlı çelikler kullanılır. Bu tür alaşımlama, normal sıcaklıklardaki mekanik dayanımın arttırılması yanında, öncelikle sıcağa, ve korozyona dayanım, sıcakta sertlik ve manyetiklenmeme gibi bazı seçilmiş özeliklerin elde edilmesini amaçlar.

4.1.1. Çelik alaşım elementleri

Karbon: Çeliğin en temel alaşım elementidir ve miktarının artmasıyla birlikte alaşımsız çeliklerin dayanımı ve sertliği önemli ölçüde arttırır. Karbon miktarı arttıkça çelikteki perlit oranı arttığından, çeliğin çekme dayanımı ve akma sınırı artar. Ancak, %0,8 ile 0,85 C değerinden sonra dayanım daha fazla artmamasına karşılık, çelik giderek kırılganlaşır. Sertleştirilmiş çeliklerde en yüksek sertlik değerine (yaklaşık $67R_c$) yaklaşık %0,6 C düzeyinde ulaşılır ve karbon miktarının daha da arttırılmasıyla, ani soğutma sonrasında yapıda artık ostenit kalacağından sertlikte artma meydana gelmez. Diğer taraftan, karbon miktarı arttıkça çeliğin sünekliliği,

dövülebilirliği, derin çekilebilirliği ve kaynak edilebilirliği azalır, ısıl işlemde çatlama ve deformasyon eğilimi artar.

Mangan: Çeliğe genellikle cevherden intikal eder, fakat özelikleri iyileştirdiğinden belirli bir oranda çeliğin içerisinde bulunması istenir, hatta alaşım elementi olarak arttırılabilir. Çeliğin dayanımını arttırır, fakat sünekliliğini biraz azaltır. Manganın, çekme dayanımı ile akma sınırı artırış etkileri birbirine benzer. % 3 Mn miktarına kadar, her % 1 Mn artışı ile çekme dayanımı yaklaşık 100 MPa artar, % 3-8 Mn miktarları arasında artış daha azdır ve % 8 Mn miktarından itibaren düşme görülür. Çeliğin dövülebilirliğini ve sertleşebilirliğini iyileştirir. Kaynak kabiliyetini olumsuz olarak etkilemez, bu nedenle düşük karbonlu, fakat nispeten yüksek dayanımlı kaynak edilebilir çeliklerde % 1,6 'ya kadar Mn ilave edilir. Yüksek mangan (% 12-13 Mn) ve yüksek karbonlu çelikler ostenitik yapıya sahiptirler ve aşınma dayanımları yüksektir. Çeliğin yüzey kalitesini iyileştirir.

Silisyum: Çelik üretiminde oksijen giderici olarak kullanılan temel elementlerden biridir. Çelikte bulunan silisyumun miktarı, üretim tarzına bağlı olarak da değişir. Sakin dökülen alaşımsız çeliklerde, en fazla % 0,60 Si bulunabilir. Düşük alaşımlı çelikler ve yay çelikleri, % 2 'ye kadar Si içerirler. Buna karşın, silisyumlu çelikler diye adlandırılan, elektroteknikte kullanılan çeliklerde Si miktarı % 5 'e kadar yükselebilir. Ayrıca, % 14-15 Si içeren çeliklerde de korozyon dayanımı iyidir, fakat dövülemezler ve kırılgandırlar. Silisyum miktarı arttıkça, çeliğin tane büyüklüğü de artar. Silisyum, çeliğin dayanımını ve sertliğini arttırır, fakat etkisi mangandan azdır. Çeliğin sertleşebilirliği, aşınmaya karşı dayanımı ve elastikiyeti yükselir, yüzey kalitesini olumsuz etkiler.

Kükürt: Otomat çeliklerinde kükürt miktarı, talaşlı şekillendirmeyi iyileştirmek için yüksektir. Bunun dışında istenmeyen bir elementtir ve daima azaltılmaya çalışılır. Yeni gelişen teknolojilerle, bugün %0,003 S değerlerine kadar inilebilmektedir. Çelik kalitelerinin belirtilmesinde sınırlanan element olarak fosforla birlikte birinci planda göz önünde tutulur. Kükürt miktarı yükseldikçe, şekillendirmeye dik doğrultuda süneklilik ve darbe dayanımı düşer, boyuna doğrultuda etkilenme azdır. Mangan ile dengelendiğinde, sıcakta kırılganlık yapar. Kaynak edilebilirliği ve sertleşebilirliği kötüleştirir.

Fosfor: Ferritin dayanımını en fazla arttıran elementtir. Bu nedenle, düşük miktarlarda bulunsa bile çeliğin dayanımını ve sertliğini arttırıcı, buna karşın şekillendirme yönünde sünekliliği ve darbe dayanımını azaltıcı etki yapar. Bu etkiler, özellikle yüksek karbonlu menevişlenmiş çeliklerde daha fazladır. Ayrıca, çeliğin korozyon dayanımını iyileştirmesine karşın, kükürtle birlikte çelikte mümkün olduğunca az bulunmasına çalışılır ve kalite belirlemesinde birinci planda rol oynar.

Krom: Çelikte, oksidasyona ve korozyona karşı dayanımı, aşınma direncini, sertleşebilirliği arttırır. Paslanmaz çeliklerin ve alaşımlı takım çeliklerinin büyük bir kısmının temel alaşım elementidir. Karbür yapıcı element olduğundan, çekme dayanımını ve sıcağa dayanımı arttırır, sünekliliği düşürür. Ancak bazı çeliklerde meneviş kırılganlığı doğurabileceğinden ve olumlu etkilerini iyileştirmek için nikel ve/veya molibden ile birlikte kullanılır.

Nikel: Ferritte katı çözelti sertleşmesi sağlayarak, çeliğin dayanımını arttırır. Bu artış, silisyum ve mangana nazaran daha azdır, ancak dayanım artarken süneklikte önemli bir azalma olmaz. Krom kadar olmasa da, sertleşebilirliği de iyileştirir. Nikel içeren yapı çelikleri, özellikle kromla birlikte, yüksek süneklik, yüksek sertleşebilirlik ve yüksek yorulma direnci gösterirler. Ayrıca, paslanmaz çeliklerde kromla birlikte en önemli elementtir, sıcağa ve tufallaşmaya karşı dayanımı da iyileştirir.

Molibden: Kuvvetli karbon ve nitrür yapıcı elementtir ve düşük alaşımlı çeliklerde genellikle krom (nikel) ile birlikte % 0,15-0,30 arasında bulunduğunda çeliğin sertleşebilirliğini, çekme dayanımını ve sıcağa dayanımı arttırır, meneviş kırılganlığını azaltır. Takım çeliklerine daha yüksek miktarlarda katılır, sıcağa ve aşınmaya karşı dayanımı iyileştirir.

Vanadyum: Benzer alaşım elementleri gibi, sertleşebilirliği arttırır. Azot ile birleşip nitrür teşekkül ettirerek, ferritik yapıda tane küçülmesi sağlar. Bu nedenle, çentik dayanımını da yükseltir. Kuvvetli karbür teşekkül ettirici olduğundan, aşınmaya ve sıcağa dayanımı arttırmak için takım çeliklerinde volftamla, sıcağa dayanıklı çeliklerde krom ile birlikte katılır.

Volfram: Çeliğin dayanımını arttırır, En önemli özeliği ise hız çeliklerinde sekonder (ikincil) sertleşme yaratarak, meneviş dayanımını (sıcak sertlik)

arttırmasıdır. Bu etki, karbür teşekkül ettirmesinden dolayıdır ve yarattığı karbürler aşınma direncini de çok arttırırlar.

Niyobyum: Özellikle yüksek dayanımlı düşük alaşımlı (YDDA) çeliklerde kontrollü haddeleme ve soğutmayla özelikleri iyileştirmek için ve sıcağa dayanıklı çeliklerde kullanılır. Kuvvetli karbür ve nitrür yapıcıdır. Sertliği, akma sınırını yükseltir, taneleri inceltir ve şekil değişebilirliği azaltır.

Titanyum: V, Mo, W ve Nb gibi kuvvetli karbür ve nitrür yapıcıdır. Ostenitik çeliklerde yapıda denge sağlar, genel olarak çeliklerde taneleri inceltir. Ayrıca, Al ile birlikte deoksidan madde (oksit giderici) olarak da sakin dökülen çeliklerde kullanılır.

Zirkonyum: Daha çok, YDDA çeliklerinde arıtılamayan elementleri denetleyici olarak kullanılır. Özellikle sülfürlerin biçimlerini değiştirerek, sünekliliği arttırır.

Nadir Toprak Elementleri: YDDA çeliklerinde, arıtılamayan eleman biçim değiştirici olarak kullanılır. Seryum, güçlü bir oksijen ve kükürt gidericidir.

Kobalt: Karbon teşekkül ettirmez, ancak sıcağa dayanımı arttırır. Sertleşebilmeyi azaltır, yüksek sıcaklıklarda tane büyümesini yavaşlattığı için, daha çok hız çeliklerine ve sıcağa dayanıklı çeliklere katılır. Çeliğin manyetik özeliklerini de olumlu olarak arttırır.

Alüminyum: En güçlü oksijen gidericidir. Azot ile kuvvetli nitrür teşekkül ettirir, ısıtmada tane kabalaşması ve çeliğin yaşlanma eğilimini azaltır. Çelik üretiminde, taneleri inceltir.

Bor: Düşük ve orta karbonlu çeliklerin sertleşebilirliğini en etkin olarak arttıran nitrür teşekkül ettiren bir elementtir. Çelikler sakinleştirildikten sonra, % 0,0005 ile 0,003 kadar katılır. Ayrıca, çeliğin yüzeyine bor nüfuz ettirildiğinde 2000 VSD kadar yüzey sertliğine ulaşılabilir. Borun nötron yutma kesit alanı yüksek olduğundan, borlu çelikler nükleer santrallarda da tercih edilir.

Bakır: Çeliğin dayanımını ve sertliğini arttırır, sünekliliği çok fazla düşürür. Korozyona dayanımı iyileştirir. Sıcak şekillendirmede kırılganlık yaratması, çelik üretiminde sorun yarattığından % 0,5 miktarının aşılması pek istenmez.

Kurşun: Çelikte çözülmediğinden, yalnızca otomat çeliklerinde talaşları kırılgan yapmak amacıyla % 0,2 ile 0,5 arasında katılır, fakat yapıda homojen ve ince dağılması gerekir.

Azot: Nitrür teşekkül ettirdiği için önemlidir. Çelikte yaşlanma meydana getirir. Yaşlanmanın sorun olmadığı durumlarda, sertliği, mekanik dayanımı ve atmosfer korozyonuna karşı dayanımı arttırır. Uygun alaşımlı çeliklerin yüzeyine nüfuz ettirilerek, yaklaşık 1100 VSD değerine kadar yüzey sertliğine ulaşılmasını sağlar.

4.1.2. Çeliklerin ısıl işlemi

Çeliklerde içyapıyı düzenlemek, taneleri inceltmek ya da kabalaştırmak, tane ve/veya bileşim homojenliği sağlamak, yapıyı yumuşatmak, iç gerilmeleri azaltmak gibi özellik değiştirme amacıyla uygulanan ısıl işlemlere genel olarak tavlama işlemleri adı verilir.

Normalizasyon Tavlaması: Normal tavlama ile yapıdaki homojensizlikler giderilir ve daha ince taneli yapıya ulaşılır. Bunun için, ötektoid altı çeliklerde, A_3 sıcaklığının (911-923 ºC) 30-50 ºC üzerine kadar sıcaklığa ısıtmak ve pek az beklemeden sonra parçaların sakin havada soğutulması genellikle yeterlidir. Normal tavlama daha çok, yarı mamullerde ve yüksek sıcaklıkta dövülmüş, haddelenmiş ya da kaynak dikişinin çevresi gibi bölgesel farklı ısı etkisi altında kalmış parçalarda, kaba taneli yapının ince taneli hale getirilmesi için veya çelik döküm gibi malzemelerde uygulanır.

Yumuşak Tavlama: Yumuşak tavlama, ferritik matris yapı içerisinde yerleşmiş sementiti küresel hale getirerek, dengeli bir yapı teşekkül ettirmek için uygulanır. Bu işlem, ötektoid altı çeliklerde A_1 sıcaklığının (723 ºC) altında uzun süre tavlamayla gerçekleştirilir. Yumuşak tavlama ile sertlik önemli ölçüde düşer ve süneklik artar.

Gerilme Giderme Tavlaması: Gerilme giderme tavlaması, parçalarda mevcut olan iç gerilmeleri azaltarak sorun yaratmayacak seviyeye indirmek ya da tamamen yok etmek için yapılır. İç gerilmeler, cidar ve çekirdek arasındaki sıcaklık farkından dolayı hızlı soğuma (soğuma gerilmeleri), martenzit dönüşümünde hacim artmasıyla

sertleştirme (dönüşüm gerilmeleri), doğrultma ve bükme gibi plastik şekil verme, kaynakta veya ince yüze tabakalarında talaşlı şekillendirme sonrası çok değişik nedenlerle meydana gelebilir. Gerilme giderme tavlamasında sıcaklık, en yüksek kullanım sıcaklığının üzerinde, fakat özellik değişmelerinin rastladığı sıcaklığın da altında seçilmelidir. Isıl işlem görmemiş parçalar için, gerilim giderme tavlamasında sıcaklık değeri A_1 sıcaklığının altında seçilir.

Difüzyon Tavlaması: Difüzyon tavlaması ile katılaşmada meydana gelen bileşim farklılıklarının dengelenmesi amaçlanır. Bunun için, malzemelerin 1000–200 ºC gibi katılaşma hattına yakın sıcaklıklarda uzun süre tavlanması gerekir. Ancak bu esnada, çok fazla tane kabalaşması da kaçınılmaz olarak ortaya çıkar. Bunun giderilmesi için, malzemelerin difüzyon tavlamasından sonra sıcak şekillendirilmesi ya da normal tavlanması zorunludur.

Kaba Tane Tavlaması: Özellikle % 0,2'den daha az karbon içeren sementasyon çeliklerinde talaşlı şekillendirmeyi iyileştirmek amacıyla yüksek sıcaklık tavlaması yapılır. Bu tavlamanın uygulanması büyük ölçüde normal tavlamaya benzer, ancak kaba tane elde etmek için ostenitleştirme sıcaklığı daha yüksek olarak 950-1100 ºC arasında seçilir ve $\gamma \rightarrow \alpha$ dönüşüm sahasında soğuma çok yavaş yapılır. Tavlama sonrasında kaba yapılı ferrit-perlit taneleri elde edilir.

4.2. Dökmedemirler

Dökmedemirler, demir alaşımı olmakla beraber özellikleri çok farklıdır ve bunların isimleri bu malzemelerin arzulanan şekillere katı durumda şekillendirilmeden farklı olarak dökümle getirildiği belirtmektedir. Genel olarak yaklaşık,%2–4 C ve % 1–3 Si içerirler. Belirli özellikleri kontrol etmek ve değiştirmek için alaşım elementleri ilave edilir. Kimyasal kompozisyonu yanında özellikleri etkileyen diğer önemli faktörler; katılaşma işlemi, katılaşma hızı ve değişik ısıl işlemlerdir. Geniş bir dayanım ve sertlik aralığına sahiptirler ve çoğu durumlarda işlenmeleri kolaydır. Üstün aşınma ve korozyon direnci elde etmek için alaşımlandırılırlar.

4.2.2. Dökmedemirlerin sınıflandırılması

Mikroyapılardaki karbonun dağılımına göre dört temel tip dökmedemir birbirinden ayrılabilir. Kimyasal kompozisyonları üst üste geldiği için bunlar kimyasal analiz ile ayırt edilemezler. Bu metalürjik tipler, beyaz dökmedemir, gri dökmedemir, temper dökmedemir ve küresel grafitli dökmedemirdir. Tipik olarak alaşımlandırılmamış dökmedemirlerin kimyasal kompozisyon aralıkları Çizelge 4.2. de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Dökmedemirlerin Kimyasal Kompozisyon Aralıkları (%), (Baydoğan ve ark., 2001)

Element	Gri Dökmedemir	Beyaz Dökmedemir	Benekli Dökmedemir	Sünek Dökmedemir
Karbon	2.50-4.00	1.30-3.60	2.00-2.60	3.00-4.00
Silisyum	1.00-3.00	0.50-1.90	1.10-1.60	1.80-2.80
Mangan	0.25-1.00	0.25-8.00	0.20-1.00	0.10-1.00
Kükürt	0.02-0.25	0.06-0.20	0.04-0.18	0.03 mak
Fosfor	0.05-1.00	0.06-0.18	0.18-mak	0.10 mak

Beyaz Dökmedemir: Dökmedemirin kimyasal kompozisyonu beyaz dökmedemir aralığında ve soğuma hızı yeterince hızlı ise beyaz dökmedemir oluşacaktır. Beyaz dökmedemirde eriyikteki karbon demirle birleşerek sert, gevrek bileşik olan demir karbür (sementit) olarak kalır. Beyaz dökmedemir bu nedenle sert ve kırılgandır ve beyaz kristal kopma yüzeyi sergiler. Beyaz dökmedemir yüksek basma ve mükemmel aşınma direncine sahiptir.

Gri Dökmedemir: Gri dökmedemirler demir alaşımlarının en akışkanıdır ve sonuç olarak karmaşık ve ince kesitli parçalar üretilebilir. Bu dökmedemirler iyi aşınma direnci sağlayan sertliklerde mükemmel işlenebilirliğe sahiptir. Gri dökmedemirin kopma yüzey görünüşü gerçek bir gri renge sahiptir ve bu nedenle terim ‘gri dökmedemir’ dir.

Temper Dökmedemir: Bu dökmedemir tipi karbonun çoğu düzensiz şekilli grafit modülleri biçimindedir. Temper dökmedemirin ilk dökümü uygun kompozisyonda beyaz dökmedemir olarak yapılır. Daha sonra genellikle temperleme olarak adlandırılan tavlama işleminde grafitler çekirdeklenir ve nodüller (yumrular) oluşmak üzere beyaz dökmedemir sementitinden büyür. Temper dökmedemirde

tavlama ısıl işlemini değiştirmekle çok geniş bir aralıkta özellikler elde edilebilir. Buna karşın ilk olarak beyaz dökmedemir oluşturmak için hızlı soğutma gerektiğinden temper dökmedemirin kalınlığı sınırlıdır.

Küresel Grafitli Dökmedemir: KGDD (küresel grafitli dökmedemir) serbest karbonu lamel yerine küre şeklindedir. Bu dökmedemirdeki küresel grafit dökümden önce eriyik demire çok küçük miktarda magnezyum ilavesi ile elde edilir. KGDD'nin kimyasal kompozisyonu gri dökmedemire benzer, ancak kükürt ve fosfor gibi elementlerin miktarları çok azdır. KGDD'ler uygun sünekliklerinin yanında iyi bir akma dayanımı aralığına sahiptir.

4.2.3. Demir-karbon-silisyum sistemleri

Dökmedemirler yaklaşık % 1-3 miktarında silisyum ve de yüksek miktarda da karbon içerirler ve bu nedenle de üçlü (ternary) Fe-C-Si alaşımları olarak düşünülmelidir. Fe-C alaşımlarında silisyum varlığı grafitleşmeyi artırdığı için dökmedemirler demir-demir karbür veya demir grafit sistemlerinde veya her ikisinde de katılaşabilir. Yüksek sıcaklıklarda uzun bekletme zamanı, yavaş soğuma ve belirli alaşım elementlerinin varlığı grafit çekirdeklerinin oluşumuna yardımcı olur ve bu yüzden yarı kararlı demir karbür fazından kararlı grafit fazına olan değişimi artırır.

Karbon ve silisyum dökmedemirin özelliklerini belirleyen en önemli elementlerdir. Genelde karbon eşdeğerliği azaldığında gri dökmedemirin dayanımı artar.

4.2.4. Ana alaşım elemanlarının dökmedemire etkileri

Karbon: Demir özelliklerinde, özellikle alaşımda en önemli rolü oynar. Sementit ve grafit halinde alaşımda bulunur. Bunların birbirlerine oranı kır dökmedemirin mekanik özelliklerinde esastır. Grafit bağlantısı zayıftır. Buna göre malzemenin metalik bağlantıları grafit yığılmaları olan yerlerde bozulur. Grafit yığılmalarının meydana geldiği yerlerde mevcut kesit gerçekte azalır bu kesit lamel grafitin artması ile sürekli şekilde azalır.

Silisyum: Silisyum değerinin alaşımda artması ile ötektik nokta düşük karbon miktarlarına doğru kayar. Mekanik özelliklere tesir durumu silisyumun grafit

oluşturmadaki rolüne bağlıdır. Sabit karbon değerli bir dökümde arttırılan silisyum miktarı ile ayrışacak grafit miktarı da artar. Dolayısıyla sertlik ve çekme mukavemeti düşer. Lamel grafitli dökmedemirde kırılmış kesit gri (esmer) durumdadır. Bu hal ancak belirli bir Si değeri ile mümkündür. Si değeri aynı zamanda cidar kalınlığına bağlıdır. İnce cidarlı parçalarda fazla Si ve kalın cidarlı parçalarda daha az Si'e ihtiyaç vardır. Soğuma hızı yavaşladıkça grafit ayrışması olur.

Mangan: Mangan dezoksidan ve kükürt azaltıcı rol oynar ve demir karpiti stabil hale getirir. Yani bağlantılı karbon oluşumunu mümkün kılar, grafit ayrışmasını önler. Mangan, istenen mukavemet özelliklerine ulaşılması için lüzumludur. Döküm cinslerine göre değeri değişir (mesela lamel grafitlide % 0,6-0,8).

Fosfor: Genel olarak sert, demir fosfat şeklinde bünyeye girer. Fosfor, grafit meydana gelmesinde önemli rol oynar (hatta silisyumdan daha fazla etkilidir). Eriyik dökmedemirin viskozitesi geniş ölçüde fosfor değerine bağlıdır. Artan fosfor değeri ile eriyik incelir. Döküm kabiliyeti bu nedenle artar. Komplike ve ince cidarlı döküm parçaları, yüksek fosforlu dökmedemirle yapılır.

Mekanik ve fiziksel özelliklere de fosfor geniş ölçüde etki gösterir. Eğme mukavemetini düşürür. Artan fosfor miktarı ile sertlik de artar. Bu artış karbon miktarının azalmasıyla daha fazlalaşır. Çekme mukavemeti, artan fosforla belirli bir değere kadar yükselir, sonra düşme gösterir. Genellikle kırılganlık meydana gelir, darbelere hassas duruma gelir, dinamik zorlanmalara karşı dayanıksızdır. İyi kaliteli dökümlerde fosfor değeri az olmalıdır. Fosfor ince cidarlı parçalarda %0,8–1,6, yüksek dinamik zorlanmalara karşı parçalarda % 0,35'in altında, fazla darbeye karşı olmayan normal dökümlerde % 0,35-0,45 arasında olabilir.

Kükürt: Genellikle karbür oluşumuna yardım eder ve grafit ayrışmasını frenler, dökümde sert parçacıklar oluşturur. Dökümde, kükürdün FeS formunda bulunması yüksek seviyede iç gerilmeleri, dolayısıyla çatlamaya eğilimi artırır. Mekanik özelliklere doğrudan kötü etki yapar. Pratikte kükürt değeri dökmedemirde çok düşük olmamalıdır ve % 0,08–0,15'i geçmemelidir.

4.2.5. Gri dökmedemirin ısıl işlemleri

Isıl işlemlerle elde edilebilecek başlıca avantajlar; daha iyi işlenebilirlik, daha yüksek aşınma direnci ve mukavemet, daha iyi boyutsal kararlılıktır. Gri dökmedemirlerin işlenebilirliğini geliştirmek için genel olarak tavlama veya normalizasyon işlemleri uygulanır. Kritik sıcaklık altı (<723 °C) tavlamada, perlit yapısındaki sementitin küreleşmesi ve bir miktar grafitleşme oluşur. Tam tavlama ise, kritik sıcaklığın (723 °C) üzerinde, 900-930 °C' a ısıtıp, bu sıcaklıkta belirli bir zaman bekleterek, kapalı fırında soğumaya bırakmaktır. Bu işlem neticesinde tamamlanmış grafitleşme olur. Sementitin yapısındaki, sürekli yüksek sıcaklıkta tutma neticesi, karbon ayrışır. Kokil kalıptan elde edilen dökümlere, genellikle tam tavlama uygulanır. Normalizasyon, yüksek sıcaklıkta ısıtma ve bu sıcaklıkta belirli bir zaman beklettikten sonra, parçaları fırından çıkarıp, durgun havada soğutma şeklinde yapılır. Normalleştirme işleminde, tavlamaya göre daha hızlı soğutmadan dolayı, yapıda bulunan ince perlit sayesinde, daha yüksek mukavemete sertlik değerleri elde edilir.

Su verme + meneviş (ıslah) işlemi, gri dökmedemirlerin aşınma dirençlerini artırmak için uygulanır. Gri dökmedemirin 850 -930 °C' a ısıtılması, içinde % 0.6 – 0.8 erimiş karbonu bulunan östenitik bir yapının oluşmasına sebep olur. Yağda veya suda su verme ile, su verilmiş çelik sertliğinde martenzitik bir yapı elde edilir. Yüksek çekme dayanımı elde etmek için, parçanın tamamına su verme işlemi, parçaların distorsiyon (çarpılma) ve çatlama tehlikelerinden dolayı, fazla uygulanmaz. Birçok dökmedemir parça, yüksek sıcaklıktan ani soğutulduğunda çatlarlar. Bundan dolayı bütün parçaya su vermek yerine, alevle veya endüksiyonla yüzey sertleştirme, hemen hemen her zaman tercih edilir. Yüksek çekme mukavemeti için, daha çok alaşımlandırma uygulanır.

Gri dökmedemirde, herhangi bir metal dökümü gibi, yüksek sıcaklıktan itibaren soğutulduktan sonra, iç gerilimler ihtiva eder. Sebebi, dökülen parçalarda değişik kesitlerdeki soğuma hızlarının, hiçbir zaman aynı olmamasıdır. İnce kesitler, daha çabuk soğurlar. Ayrıca kum kalıbın, döküm parçasının büzülmesine (çekmesine) karşı dayanımı iç gerilimlere sebep olabilir. Bundan dolayı döküm parçalara genellikle gerilim giderme tavlaması uygulanır. Gerilim giderme tavlaması,

alaşımsız, düşük alaşımlı ve yüksek alaşımlı gri dökmedemirler için belirtilen sıcaklıklara yavaş olarak ısıtmak, bir saat veya daha fazla zaman bu sıcaklıkta tutmak ve bilhassa 300–200 °C arasını 50 °C/saat hızla soğutmak, şeklinde uygulanır.

Sertleştirme: Sertleştirilebilen temel doku yapısına sahip (perlit veya ferrit+perlit) dökmedemirler, 800–900 °C arasındaki sıcaklıklara kadar ısıtılıp, genelde yağda soğutma yapılarak sertleştirilirler. Böylece sertliğin yanı sıra aşınma dirençleri de artmaktadır.

Yüzey sertleştirme: Ötektik oranda karbon ihtiva eden dökmedemirlerin nitrürasyonla, alevle veya endüksiyon yöntemleri ile yüzeyleri sertleştirilebilmektedir. Böylece iç dokunun yumuşak, yüzeyin ise aşınmalara karşı sert bir yapıda olması sağlanmaktadır.

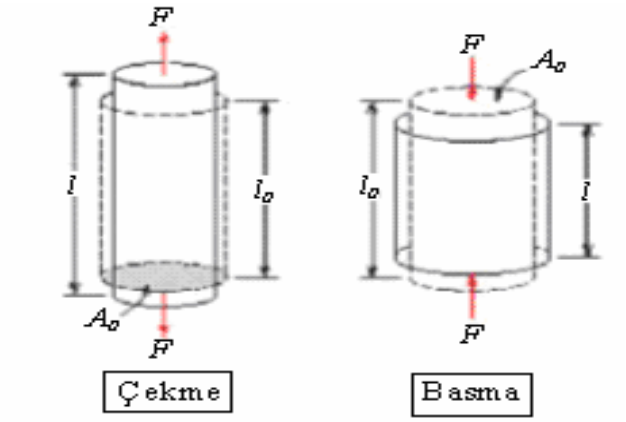
Yumuşatma: Talaşlı işlemeye elverişli hâle getirmek için dökmedemirler 750-825 °C arasındaki, çelik dökümler ise 1000°C civarındaki sıcaklıklarda tavlanarak, serbest karbon miktarının artırılması sonucu yumuşatma işlemi yapılmaktadır.

Gerilim giderme: Bazı dökmedemirlerin dış yüzeyleri ile iç kısımlarındaki doku farklılıkları veya düzensiz grafit dağılımı gerilimlere neden olmaktadır. Bu gerilimleri azaltmak için küçük kesitli dökmedemir parçalar 200–400 °C, büyük kesitli parçalar ise 800–900 °C arasındaki sıcaklıklarda gerilim giderme tavlamasına tabi tutulmaktadır.

Ostemperleme: Bu ısıl işlem genellikle grafitti yapıdaki dökmedemirlere uygulanır. Ostemperleme işleminde, önce malzeme austenit sıcaklığa kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta bir süre beklenir. Daha sonra bu sıcaklık, martenzit yapıya dönüşüm sıcaklığından biraz fazla olacak şekilde düşürülür. Malzeme bu sıcaklıkta iken, sıcaklığı 250–300 °C arasında olan tuz banyosuna atılır ve 20–60 dakika arasında bekletilir. Bu sürenin sonunda tuz banyosundan çıkarılan malzeme açık havada soğumaya bırakılır. Ostemperleme işlemi sonucunda malzeme sertlik ve aşınma direnci kazanmaktadır (Güngör, 2001, Davis, 1996).

4.3. Çelik ve Dökmedemirlerin Mekanik Muayenesi

Çeşitli şekillerde uygulanan kuvvetlere karşı malzemelerin davranışlarını, malzemelerin mekanik özellikleri belirler. Mekanik özellikler, çeşitli mühendislik uygulamalarında malzeme seçimi açısından önemli olan, mukavemet, süneklik, sertlik, darbe direnci, yorulma direnci, sürünme direnci ve aşınma direnci gibi özellikleri kapsar. Mekanik deneyler sırasında deney numuneleri yüke maruz bırakılarak gerçekleştirilirler. Deney numunelerinin maruz kaldığı yükler Şekil 4.3. da görülmektedir.



Şekil 4.3. Malzemelere uygulanan çekme ve basma yükleri

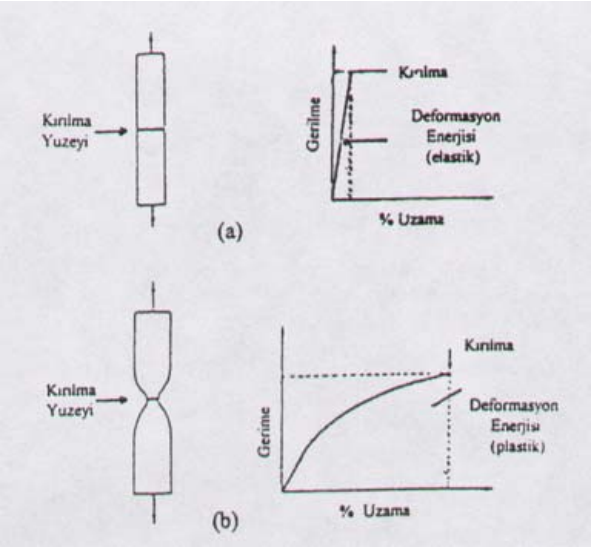
Mekanik deneyler arasında en önemlileri, mukavemet ve sünekliğin ölçüldüğü "çekme deneyi", sertliğin ölçüldüğü '"sertlik deneyi" ve kırılma enerjisinin (darbe direncinin) ölçüldüğü "darbe deneyi" olup, bu deneylerden elde edilen özellikler, aşınma direnci, yorulma direnci gibi diğer mekanik özellikler hakkında da fikir verebilmektedir.

4.3.1. Çekme deneyi

Malzemelerin mukavemet ve sünekliklerini belirlemek amacıyla yapılan çekme deneylerinde, standart boyutlarda hazırlanan test Örneklerinin sürekli olarak artan tek eksenli çekme kuvveti etkisiyle uzaması sağlanır. Genellikle dairesel ve dikdörtgen kesitli olan deney numunelerinin çekme deney cihazında kopartılıncaya kadar çekilmesiyle deney numunesine ait "kuvvet-uzama" grafiği elde edilir. "kuvvet-uzama" grafiği, örneğin deney öncesindeki orijinal kesit alanı (Ao) ve ölçü

uzunluğu (Lo) kullanılarak, deney numunesinin çıkarıldığı malzemenin deformasyon davranışını karakterize eden Gerilme-% Uzama grafiğine dönüştürülür Gerilme -% Uzama grafiğinde ordinatta yer alan gerilme, kuvvetin orijinal kesit alanına bölünmesiyle bulunur ve malzemenin birim kesitinin yükleme durumunu belirtir. Apsisteki % uzama ise, örnek boyundaki uzamaların, örneğin orijinal boyuna (ölçü uzunluğu), % cinsinden oranıdır ki, böylece malzemenin birim boyundaki uzama miktarı tespit edilmiş olur.

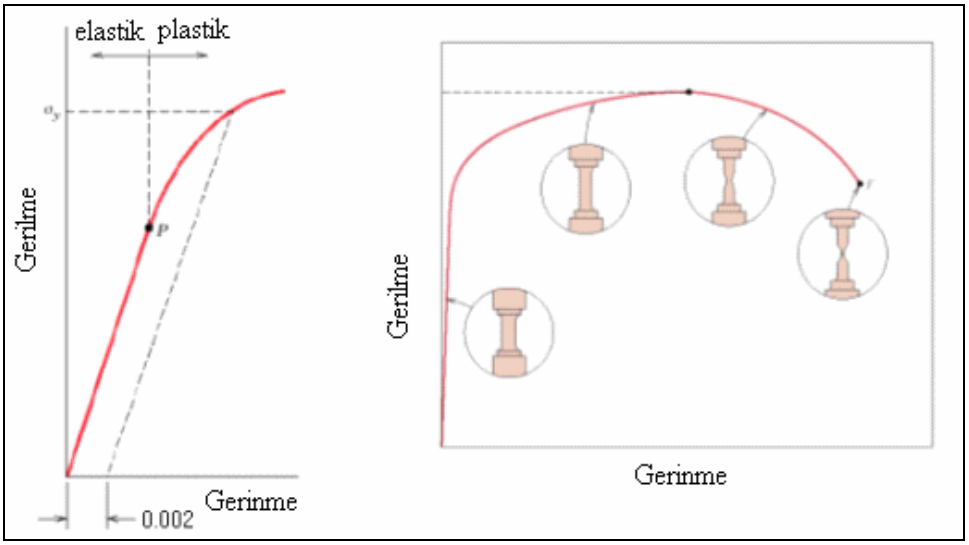
Çekme deneyi ile malzemenin hem mukavemeti hem de şekil değiştirme kabiliyeti ile ilişkili bir özelliği olan ve şekil değişimi sırasında absorbe edilen enerjiyi belirten tokluk hakkında da fikir sahibi olunabilir. Çekme eğrisinin altında kalan alan deney esnasında yapılan işi belirtir ve tokluğun bir ölçüsüdür. Şekil 4.4'de tokluğu yüksek ve düşük iki malzemenin çekme grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.4. Gevrek ve sünek malzemelere ait Gerilme-% Uzama grafikleri a.Gevrek b.Sünek (Kayalı ve ark., 1983)

Tokluğu düşük malzemeler (gevrek malzemeler) kırılıncaya kadar çok az şekil değişimine uğramakta, buna bağlı olarak da çok az enerji absorbe etmektedir. Kopma öncesinde önemli miktarda kalıcı şekil değişimine uğrayan malzemelerin (sünek malzemeler) ise, çekme eğrilerinin altında kalan alan büyüktür ve bu tür malzemeler kırılıncaya kadar daha fazla enerji absorbe ederler

Kuvvet numuneye ilk uygulandığında, atomlar arası bağlar gerilir ve numune uzar. Kuvvet ortadan kaldırıldığında bağlar orijinal uzunluğuna ve numune ilk boyutuna geri döner. Şekil 4.5.'de görülen gerilme-gerinme eğrisinin elastik kısmında oluşan metaldeki bu uzama eski haline dönebilir. Büyük kuvvetler uygulandığında malzeme plastik davranış gösterir. Gerilme arttığında dislokasyonlar hareket etmeye başlar. Kayma olur ve malzeme plastik (kalıcı) olarak şekil değiştirir. Kuvvet kaldırıldığında malzeme ilk boyutuna geri dönmez.



Şekil 4.5. Gerilme-gerinme eğrisi ve plastik şekil değiştirme

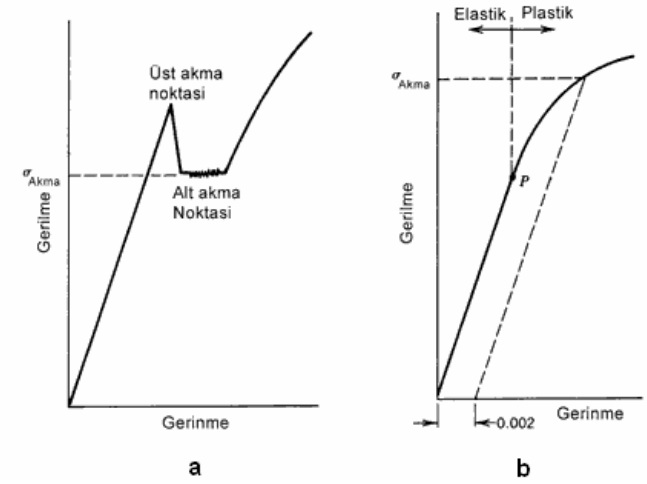
Akma Dayanımı: Uygulanan çekme kuvvetinin yaklaşık olarak sabit olmasına karşılık, plastik şekil değiştirmenin önemli ölçüde arttığı ve çekme diyagramının düzgünsüzlük gösterdiği bölgeye karşı gelen gerilme değeridir. Akmanın başladığı gerilme değerine üst akma sınırı, akmanın devam ettiği ortalama gerilmeye de alt akma sınırı adı verilir.

$$\sigma_a = \frac{P_{akma}}{A_0} \quad \text{.....(4.1)}$$

σ_a :Akma gerilmesi

P_{akma} :Akma yükü (N)

A_0 :Numunenin kesit alanı (mm^2)



Şekil 4.6. a. Akması noktası belli olan malzemenin üst ve alt akma noktaları b. Akma noktası belli olmayan numunenin Gerilme-Gerinim grafiği (Dieter, 2001).

Bariz şekilde akma göstermeyen malzemelerde de çekme diyagramı üzerinden belirli bir kalıcı uzamaya (e = % 0,01 den % 0,2 ye kadar) karşıt olan bir gerilme olarak tanımlanır.

$$\sigma_a = \frac{P_{(e=0,002)}}{A_0} \quad \text{.....(4.2)}$$

olarak hesaplanır. Bu nedenle akma göstermeyen malzemelerin çekme diyagramında belirli bir kalıcı uzama (örneğin; e = % 0,2) oranından elastik doğruya bir paralel çizildiğinde, eğriyi kestiği noktaya karşıt olan gerilme akma gerilmesi olarak alınır

Elastisite Modülü: Gri dökme demirler Hooke kanununa göre davranmazlar. Gerilmedeki elastikiyet modülü gerilme-gerinim eğrisinin başlangıç noktasındaki çizginin eğimi olarak hesaplanabilir. Başka bir ifade ile sekant modülü kullanılır. Secant modülü maksimum çekme dayanımın ¼'üne karşılık gelen noktadır. Sekant modülü birçok mühendislik çalışması için radikal bir modüldür. Tasarım yükleri nadiren çekme gerilmesinin ¼'ünden daha yüksek olur. Gerilme-gerinim eğrisinin linerlikten sapması bu yükler altında % 0,01'den daha azdır. Ancak makine için kesin tip ekipmanlarda tasarım gerilmelerinin düşük olduğu yerlerde tanjant modülü kullanımı gerçek durumlara daha yakın sonuçlar verebilir. Gri dökme demirin modülleri diğer birçok metalin modülünün daha farklı bir değişim gösterir. Böylece gerilimi hesaplamak için kullanılan gözlenmiş gerilmedeki özellikle düşünülen özel gri dökme demir numunenin ölçümleri kullanılabilir. Modül değerlerindeki kayda

değer oran deneysel olarak tespit edilir. Çünkü kimyasal analiz değişimleri ve boyut büyüklüğüne bağlıdır. Azalmadaki oran alaşım elementlerinin azaltılmasına rağmen, buna ek olarak modüller sıcaklığın artmasıyla lineer bir azalma gösterirler.

Çekme Dayanımı: Bir malzemenin kopmadan veya kırılmadan dayanabileceği en yüksek çekme gerilmesi olarak tanımlanır. Bu gerilme, çekme diyagramındaki en yüksek gerilme değeridir.

$$\sigma_{ç} = \frac{F_{max}}{A_0} \quad \text{.....(4.3)}$$

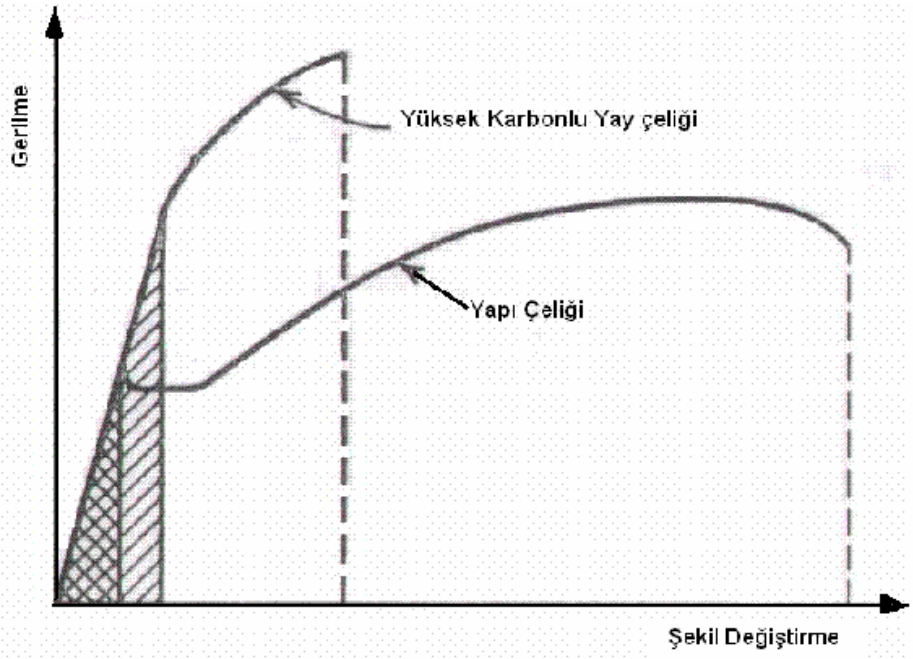
$\sigma_{ç}$:Çekme mukavemeti (MPa)
F :Yük (N)
A_0: Numunenin kesit alanı (mm^2)

Rezilyans: Bir malzemenin elastik olarak şekil değiştirdiğinde absorbe ettiği enerjiyi, şekil değişimini yapan kuvvetin kaldırılmasıyla geri verme özelliğine Rezilyans denir. Rezilyans, rezilyans modülü ile ölçülür. Rezilyans modülü, çekme eğrisinin elastik sınıra kadar olan kısmı altında kalan alandır.

$$\text{Rezilyans Modülü (Ur)} = \frac{\sigma_a . \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_a^{\,2}}{2E} \quad \text{.....(4.4)}$$

σ_a :Akma gerilmesi
ε :Elastik uzama oranı
E :Elastisite modülü

Tokluk: Malzemenin kırılıncaya kadar enerji absorbe etme yeteneğidir. Birim hacim başına düşen plastik şekil değiştirme enerjisi olarak tanımlanabilen tokluk, malzemenin kırılmaya karşı direncinin bir ölçüsü olarak kabul edilir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Yüksek ve düşük karbonlu çeliğin karşılaştırılması (Dieter, 2001)

4.3.2. Sertlik deneyi

Malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemede en yaygın olarak sertlik deneyi kullanılmaktadır. Bunun başlıca sebebi, sertlik deneyinin basit oluşu ve deney örneklerini daha az tahrip etmesidir. Ayrıca, malzemenin sertliği ile diğer mekanik özellikleri arasında paralel ilişkiler de mevcuttur.

Sertlik izafi bir ölçü olup, malzemelerin aşınmaya, şekil değişimine ve kesmeye karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Sertlik ölçümü, yüzeyine batırılan standart bir ucun batmasına karşı, malzemenin gösterdiği direncin belirlenmesi prensibine dayanır.

Gri dökmedemir Brinell Sertlik Değeri (BSD) ve Rockweell Sertlik Değeri (RSD) olarak ölçülen sertlik değeri daha sarf metalik matris ile dökmedemirdeki yumuşak grafitin sertliği arasında ortalama bir değerdir. Grafit dağılımı ve boyutundaki değişimler özellikle RSD sertliğinde geniş bir değişime neden olur.

Herhangi bir sertlik korelasyonunu denemek için mukayese edilmiş demirlerdeki grafit miktarı ve tipi sabit olmak zorundadır. Rockwell sertlik deneyleri sadece kam milleri gibi sertleştirilmiş dökümler için düşünülür. Brinell testler ise sertleştirilmemiş dökümler için her hangi bir korelasyonda çalışıldığı zaman kullanılmak zorundadır.

4.3.3. Darbe deneyi

Darbe deneyi servis koşullarında özellikle dinamik zorlanmaya maruz kalan malzemeler için önemli olan bir mekanik deneydir. Darbe deneyleri Şekil 4.12.'de görülen sarkaç tipi bir cihazla yapılır. Bu deneyde amaç, malzemede bulunabilecek gerilme yoğunlaşmasını darbe esnasında suni olarak oluşturulup, malzemenin bu durumda dinamik zorlanmalara karşı göstereceği direnci belirlemektir. Darbe deneylen, numunenin deney cihazına yatay yerleştirilmesi durumunda Charpy darbe deneyi, dikey yerleştirilmesi durumunda ise İzod darbe deneyi olarak isimlendirilmektedir. Charpy darbe deneyi daha yaygın olarak kullanılmaktadır.

Darbe deneylerinin prensibi, belirli bir ağırlıktaki sarkacın belirli bir yükseklikten serbest bırakılarak, deney numunesini kırması ve böylece numunenin kırılması için gerekli enerjinin bulunması esasına dayanır. Deney sonucu, çoğunlukla darbe numunenin kırılma enerjisi olarak "kg.m" veya "N.m (J)" cinsinden, bazen deney numunesinin birim kesiti başına düşen kırma enerjisi olarak "kg.m/cm^2", "N.m/m^2" cinsinden ifade edilir.

Yüksek sıcaklıklarda numunenin kopmasını sağlamak için büyük bir emilme (absorbsiyon) enerjisi gereklidir. Halbuki düşük sıcaklıklarda malzeme daha az enerji ile kopar. Bir malzemenin değişik sıcaklıklarda yapılan darbe deneyleri, o malzemenin darbe direnci hakkında daha detaylı bilgi verir. Şekil 4.10'de farklı sıcaklıklarda yapılan %5 molibden içeren çeliğin darbe deneyinden elde edilen sonuçlar grafik olarak görülmektedir.

Yüksek sıcaklıklarda, örneğin kırılması için yüksek enerji gerekirken (sünek kırılma), düşük sıcaklıklarda kırılma düşük enerjiyle gerçekleşmiştir (gevrek kırılma). Şekil 4.14.'deki darbe enerjisi-sıcaklık grafiğinde, darbe direncinin aniden düştüğü sıcaklık, "sünek-gevrek geçiş sıcaklığı" veya sadece "geçiş sıcaklığı" olarak isimlendirilmektedir. Bazı malzemelerde sünek-gevrek geçişi nispeten geniş bir sıcaklık aralığında olabilmektedir.

Yüksek sıcaklıklarda, malzeme yoğun şekil değiştirmeli sünek bir davranış gösterir ve numune kopmadan önce gerilir. Düşük sıcaklıklarda, malzeme gevrektir ve

kopma noktasında çok az şekil değiştirme gözlenir. Geçiş sıcaklığı; malzemenin sünek kopmadan gevrek kopmaya geçtiği sıcaklıktır.

4.3.4. Kır Dökmedemirde mikroyapılar

Kır dökmedemirlerde mekanik ve fiziksel özellikleri belirleyen lamellerin yapı içerisindeki şekli, büyüklüğü ve dağılımıdır. Grafitin yapı içerisindeki değerlendirmeler ASTM A-247 standardına göre yapılmaktadır. Grafit kır dökmedemirde en önemli yapı bileşenidir. Grafitin çekme mukavemeti çok düşük olduğu için, kesit küçültücü etki yapar ve dökmenin mukavemetini azaltır. Diğer dökmedemirlerde olduğu gibi kır dökmedemirde de, basma mukavemeti çekme mukavemetinden yüksektir. Bunun da sebebi grafitin basma mukavemetinin yüksek olmasındandır.

Dökmede grafitin miktarı fazla olursa sertlik, çekme mukavemeti ve demirin karbürü azalır, buna mukabil çentik etkisi artar. Grafitin tiplerinin de mukavemet üzerine dolaysız veya dolaylı etkileri vardır. A tipi grafit eğer küçük veya ince dallı olursa, sertlik ve çekme mukavemeti yükselir, fakat uçların sivri olması sebebiyle çentik tesiri artar. A grafiti ince olursa, ötektik hücreler iri ve kaba olur. Bu dolaylı sebepten çekme mukavemeti azalır, fakat sertlik değişmez.

Yapı içerisinde sementit, perlit ve ferrit olmak üzere üç ana faz bulunur.

Sementit: Kır dökmedemirde sementit ancak perlitin içinde bulunabilir. Zira grafitin ötektik sıcaklığın hemen altındaki sıcaklıklarda meydana gelen sementit katı hal grafitleşmesine gelinceye kadar grafit ve ferrite ayrışır.

Perlit: Perlit yapısı bilhassa, perlitik kır dökmelerde görülür. Perlit, ferrit ve sementit tabakalarının üst üste binmesiyle meydana geldiği için mukavemeti yüksektir. Mikroskopta, dağlanmış kır dökmedemir incelenirse perlit ince, uzun veya kısa, paralel tabakalar halinde görülür. İnce tabakalı perlitin mukavemeti daha yüksektir. Perlit sementitten dolayı bir dereceye kadar kır dökmedemire kırılganlık verir.

Ferrit: Ferrit özellikle ferritik kır dökmedemirde görülür. Çok yumuşak olup çekme mukavemetinin düşük olması sebebiyle, dökmenin mukavemetini de azaltır.

Ferrit saf demirin (Si) ihtiva eden şeklidir. Silisyum, ferriti sertleştirir ve kuvvetlendirir. Ferrit kır dökmedemirde, serbest veya perlitin bileşeni olarak bulunabilir. Fakat bilhassa perlitik halde bulunur.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

5.1. Kompozit Malzeme Üretimi ve Isıl İşlemleri

Kompozit malzeme üretimi için matriks malzemesi olarak kır dökmedemir (DDL 28), takviye elemanı olarak düşük karbonlu çelik tel seçilmiştir. Düşük karbonlu çelik telin seçilme nedeni, matriks yapıdan takviye elemanına karbon difüzyonu ile arayüzey bağını iyileştirmek amacıyla seçilmiştir. Takviye elemanının, elde edilen kır dökmedemir kompozit numunede matriks yapının kimyasal bileşimleri Çizelge 5.1.'de, bazı mekanik özellikleri Çizelge 5.2.'de verilmiştir. Matriks malzemesi olarak seçilen dökmedemir düşük darbe tokluğu ve düşük çekme dayanımına sahip bir malzemedir.

Çizelge 5.1. Kompozit malzeme bileşenlerinin kimyasal bileşimi (%)

Malzeme	C	Si	S	Mn	P
Dökmedemir (DDL 28)	3.50	2.50	0.10	0.72	0.42
Çelik Tel (EN 756- S1)	0.07	0.04	0.04	--	--

Takviye elemanı olarak OERLIKON marka EN 756 standardında, 4 mm çapında, S1 tozaltı kaynak teli kullanılmıştır. Kompozit malzeme üretimi için kum kalıp tekniği kullanılmıştır.

Çizelge 5.2. Kompozit malzeme bileşenlerinin mekanik özellikleri

Malzeme	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Darbe Dayanımı (J)*
Dökmedemir	283.39	-	2,0
Çelik Tel	530	430	35

* -40 ^{0}C de

Çekme deney numuneleri için 100x110x220 mm ebadında kum kalıp hazırlanmıştır. Daha sonra kalıp içerisine Ø90x22 mm boyutlarında 5 adet boşluk oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kalıp boşluğuna 1250 ^{0}C de numunelerin yatay

olarak dökümü yapılmıştır. Kalıp içerisine çelik tel yerleştirilerek ergimiş dökmedemirin kalıba dökülmesiyle kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. 1250 ^{0}C nin seçilme sebebi daha önceki ön denemelerde, takviye elemanının çarpılma ya da arayüzey oluşmaması gibi problemlerin aşılmasında kritik sıcaklık olarak belirlenmiştir. Deneme dökümler 1100 ile 1400 ^{0}C arasındaki sıcaklıklarda yapılmıştır. 1250 ^{0}C nin üzerindeki sıcaklıklarda takviye elemanında çarpılma ve erimeler olmuştur. 1250 ^{0}C nin altındaki sıcaklıklarda da arayüzey oluşma ve nüfuziyet azlığı problemleri ortaya çıkmıştır.

Darbe deneyi numuneleri çekme deneyi ile aynı yöntem kullanılmıştır. Çekme deneyi için hazırlanan aynı şarjdan 14X14X60 mm ebatlarında, 1250 ^{0}C sıcaklıkta darbe deneyi numunelerinin dökümü gerçekleştirilmiştir. Kompozit numunelerin üretimi için önceden kum kalıplar içerisine takviye elemanları yerleştirilmiştir. Kompozit çentik darbe numunelerinde; kalıpta ani soğuma ve sıvı madenin kalıp içerisinde ilerleme problemlerini azaltmak, arayüzey bağı ve nüfuziyeti iyileştirmek amacıyla takviye elemanlarına; üzerinden kontrollü akım geçirilerek 400 ^{0}C de ön ısıtma yapılmıştır. Sıcaklık ısılçift yardımıyla ölçülmüştür.

Çekme ve darbe deneyleri için döküm halinde denenecek numunelere; gerilim giderme işlemi yapılmıştır. Numuneler, Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuarındaki Protherm PLF 130/12 model ısıl işlem fırınında, 25 ^{o}C/dak ısıtma hızında, 550 ^{o}C sıcaklığa kadar ısıtılıp, bu sıcaklıkta 10 dakika bekletildikten sonra oda sıcaklığına soğutulmuştur. Normalizasyon işlemi yapılacak diğer numuneler yine 25 ^{o}C/dak ısıtma hızında 800 ^{o}C, 850 ^{o}C ve 900 ^{o}C sıcaklığa kadar ısıtılıp, bu sıcaklıkta 15 dakika beklendikten sonra durgun havada oda sıcaklığına soğutulmuşlardır.

5.2. Metalografik İncelemeler

Metalografik incelemeler Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metalurji Bölümünde, LEICA-PFC–320 metal mikroskobunda yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri ASTM-A247 ye göre yapılmıştır. Mikroyapı numunelerinden grafit yapıyı incelemek için dağlanmadan ve ana yapıları incelemek amacıyla %2 nital dağlandıktan sonra 50, 100 ve 200 büyütmelerde mikroyapı görüntüleri elde edilmiştir.

Kompozit numunelerden elde edilen görüntüler de, matriks ile takviye arasında farklı bir yapı oluştuğu görülmüştür. Bu yapının oluşmasında ısıl işlemsiz numunelerde katılaşma esnasında, normalizasyon ısıl işlemli numunelerde ise katılaşmaya ek olarak ısıl işlem süresince önemli ölçüde C ve Si difüzyonunun meydana geldiği anlaşılmaktadır. C ve Si difüzyonu sonucu oluşan matriks ve takviye elemanı yapısından farklı bu bölge geçiş bölgesi olarak adlandırılmıştır.

Isıl işlemin mikroyapıya etkisini incelemek amacıyla takviye elemanı, geçiş bölgesi ve matriks bölgelerinin grafit yapılarının görüntüleri elde edilmiştir. Bu görüntülerin detay ve yorumları Bölüm 6. 2. de verilmiştir.

Çekme numunelerinin kırık yüzeyleri Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metalurji Bölümü laboratuarlarında JSM marka 6060LV model taramalı elektron mikroskobunda (TEM) incelenmiştir. İncelenen kırık yüzeylerden 50, 100 ve 1000 büyütmelerde kırık yüzey görüntüleri elde edilmiştir. Görüntüler, dökmedemir numunelerden, kompozit numunelerin matriks bölgesi ve geçiş ve takviye bölgelerinden alınmıştır. Darbe numunelerinin kırık yüzeylerinin de; aynı cihazda 20, 50, 100 ve 1000 büyütmelerde TEM görüntüleri elde edilmiştir. Elde edilen görüntülerin yorumları Bölüm 6. 2. de verilmiştir.

Kompozit malzeme çekme deney numuneleri, Kırıkkale Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Bölümü laboratuarlarında JSV-5600LV model TEM cihazında ve Enerji Dağılımlı Spektroskopi (EDS) ile matriks yapıdan takviye elemanının merkezine kadar Si dağılımı incelenmiştir. Si değerlerinin ölçüm noktaları takviye elemanının merkezinden başlayarak matriks yapıya 5 noktadan ölçüm yapılmıştır. Elde edilen Si değerleri Çizelge 5.3. te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Normalizasyon ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak kompozit numunenin silis dağılımı (%)

Numune	0	1.8	2.2	3	4
Isıl İşlemsiz	0.04	0.11	0.20	2.40	2.50
800 ^{0}C	0.04	0.10	0.20	2.20	2.50
850 ^{0}C	0.04	0.12	0.20	2.00	2.50
900 ^{0}C	0.04	0.17	0.21	2.10	2.50

Takviye elemanının merkezi olan 0 noktasında Si miktarı takviyenin başlangıç Si değeri olup %0.04 tür. Bu noktada ki Si miktarında normalizasyon ısıl işlemi ile herhangi bir değişiklik olmamıştır. Takviye elemanının merkezinden matriks yapının

ortasına kadar, mesafe olarak 1.8, 2.2, 3 ve 4 mm aralıklarla dışa doğru yapılan ölçümlerde Si miktarının arttığı ve 4 nolu noktada dökmedemir numunenin Si değeri olan %2.5 olduğu görülmektedir. 4 nolu noktadaki Si değeri matriks yapının Si değeridir.

5.3. Sertlik Deneyi

Isıl işlemsiz ve normalizasyon ısıl işlemine tabi tutulan numunelerin serlik ölçümleri, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metalurji Bölümünde Instron Wolpert marka sertlik ölçme cihazında Vickers ASTM E92-72 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Ölçümler takviye, matriks ve takviye ile matriks arasında meydana gelen geçiş bölgesinin ortasında için çevresel olarak 5 değişik noktadan yapılmıştır. Kompozit numune de matriks yapıda numunenin en dış noktası ile geçiş bölgesine yakın noktalardan ölçüm yapılmıştır. Çelik telde ise çeliğin merkezi ile çelikte karbon alan bölge arasında ölçüm noktaları seçilmiştir. Ayrıca dökmedemir numune ve kompozit numune dökmedemir bölgesi Rockwell sertlik ölçme yöntemi ile sertlikleri ölçülerek Vickers sertlik değerine çevrilmişlerdir. Elde edilen setlik değerleri kısmının ölçümü kontrol amacıyla çizelge 5.4.'te verilmiştir. Daha sonra yapılan ölçümlerin ortalamaları alınarak dökmedemir, takviye ve geçiş bölgeleri için sertlikler tespit edilmiştir. Isıl işlem sıcaklığı ile sertlik değerlerinin değişimi incelenmiştir. Sertlik değişiminin değerlendirmeleri Bölüm 6.3 te verilmiştir. Ayrıca uygulanan ısıl işlemlerinin etkisinin sertlik üzerine etkisi incelenmiştir. Dökmedemir numune ve kompozit numunenin matriks, takviye ve geçiş bölgesinden elde edilen sertlik değerleri Çizelge 5.4.'te verilmiştir.

Çizelge 5.4. Normalizasyon ısıl işlemi ile dökmedemir ve kompozit numunenin ortalama sertlik değerlerinin değişimi (HV)

Numune	Isıl İşlemsiz	800 ^{0}C	850 ^{0}C	900 ^{0}C
Dökmedemir	108	110	116	129
Kompozit Dökmedemir Bölgesi	107	113	120	130
Kompozit Çelik Bölgesi	175	185	181	180
Kompozit Geçiş Bölgesi	315	325	384	399

Kompozit numune dökme demir bölgesi ve dökmedemir numune de sertlik değerleri birbirine yakındır ve normalizasyon ısıl işlem sıcaklığı ile çok fazla

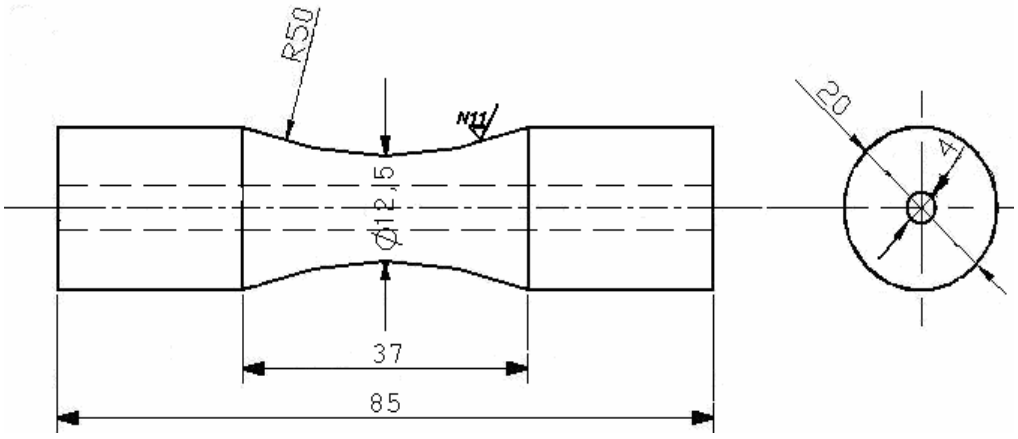
değişmemiştir. Kompozit numunede çelik bölgesinin sertliği dökmedemir bölgesi ve dökmedemirinkinden de fazla çıkmıştır. Kompozit numunenin geçiş bölgesi sertliği diğer bölgelere göre en yüksek serlik değerine sahiptir. Sertlikle yapılan değerlendirmeler Bölüm 6.3. de verilmiştir.

5.4. Çekme Deneyi

5.4.1. Çekme deneyi numunelerinin hazırlanması

Silindirik olarak Ø90X22 mm ebatlarında dökülen malzemeler tornalama işlemleri ile ASTM E8-69 (TS EN 138) standardında verilen numune ölçülerine getirilmiştir (Şekil 5.1).

Deney numuneleri 20 adet dökmedemir ve 20 adet de kompozit malzeme olarak toplam 40 adet üretilmiştir. Kompozit malzeme takviye elemanı hacimsel oranı, V_f= 0,10 dir.



Şekil 5.1. Çekme deney numunesi

5.2.2. Çekme deneyinin yapılışı

Çekme deneyleri Selçuk Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Makine Bölümünde, LLOYD INSTRUMENTS T50 K model çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneyler 1 mm/dak çekme hızında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Deneyler üç kez tekrarlanmış ve ortalamaları alınmıştır. Gerilme-şekil

değiştirme grafikleri incelenerek, dökmedemir ve kompozit malzemede normalizasyon ısıl işlem sıcaklığının çekme özelliklerine etkileri araştırılmıştır (Bölüm 6.). Bütün numunelerin çekme dayanımları ve % uzama değerleri Çizelge 5.3. de verilmiştir.

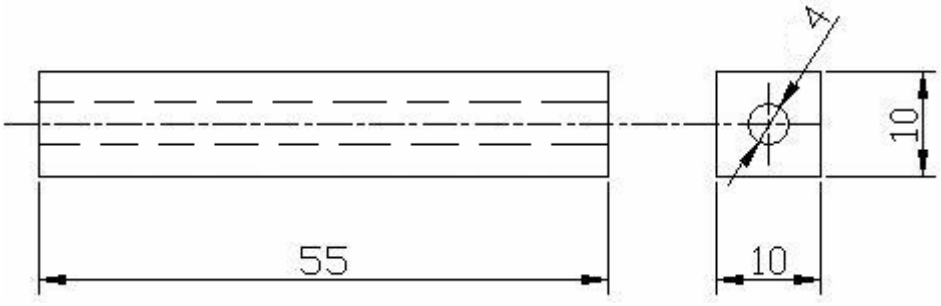
Çizelge 5.5. Dökmedemir ve kompozit malzemenin normalizasyon sıcaklığına bağlı çekme dayanımları ve % uzama değerleri

Dökmedemir Numune	**Elastisite Modülü (GPa)**	**Akma Dayanımı (MPa)**	**Çekme Dayanımı (MPa)**	**Kopma Uzaması (%)**	**Statik Tokluk (J)**	**Rezilyans (J)**
Isıl işlemsiz	130.0	206,88	283.39	1.02	71,28	98,27
800 ^{0}C	142.5	228,20	303.28	1.33	60,67	172,83
850 ^{0}C	162.5	262,32	362.71	1.35	121,48	175,53
900 ^{0}C	195.0	312,00	455.96	1.42	207,39	193,05
Kompozit Numune						
Isıl işlemsiz	176.5	282,40	464,80	1,36	352,14	170,27
800 ^{0}C	262.5	420,08	580.31	1,47	380,28	296,53
850 ^{0}C	275.5	432,05	624.43	2.28	360,23	486,06
900 ^{0}C	305.0	487,94	686.26	1.80	333,93	434,13

5.5. Darbe Deneyi

5.5.1. Darbe deney numunelerinin hazırlanması

14X14X60 mm ebatlarında dökülmüş olan darbe deneyi numunelerini frezelemek suretiyle numuneler ASTM E-23 standardı ebatları olan 10X10X55 mm ye getirilmiştir (Şekil 5.2.). 60 adet dökmedemir ve 60 adet de kompozit numune üretilmiştir. Lamel grafitli dökmedemir numunelerde lameller çentik etkisi yaptığından numunelere ayrıca çentik açılmamıştır. Kompozit malzeme darbe deneyi numunelerinde takviye hacimsel oran V_f=12.56 olarak yer almıştır.



Şekil 5.2. Darbe deney numunesi

5.5.2. Darbe deneyinin yapılışı ve sonuçları

Çentik darbe deney numuneleri Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metalurji Bölümünde, INSTRON WOLPERT PW 30 Izod-Charpy test cihazında -80 ^{0}C, 0 ^{0}C ve 27 ^{0}C sıcaklıklarda Charpy testine tabii tutulmuşlardır. Sıvı azot kabında 10 dakika bekletilen numuneler cihaza yerleştirildikten sonra termokupl yardımıyla sıcaklıkları ölçülmüştür. Deneyler en az üç numunede tekrarlanmış olup ortalamaları alınarak darbe enerjileri bulunmuştur. Darbe deney sonuçları Çizelge 5.4. de verilmiştir.

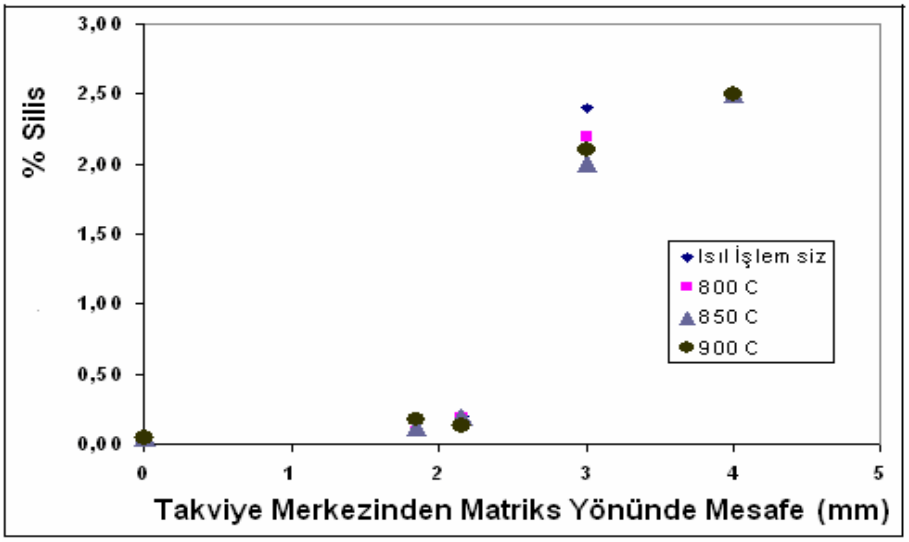
Çizelge 5.6. Dökmedemir ve kompozit numunelerin normalizasyon ısıl işlem şartlarına ve deney sıcaklığına bağlı olarak darbe enerjileri (J)

Dökmedemir	**-80 ^{0}C**	**O ^{0}C**	**27 ^{0}C**
Isıl işlemsiz	2.0	2.5	3.0
800 ^{0}C	2.1	2.0	2.5
850 ^{0}C	2.0	2.5	2.8
900 ^{0}C	2.0	2.8	3.0
Kompozit			
Isıl İşlemsiz	2.2	3.5	10.0
800 ^{0}C	3.0	3.0	10.2
850 ^{0}C	3.0	3.5	11.0
900 ^{0}C	4.0	5.0	10.5

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Kompozit Numunede Silis Dağılımı

Silisyum değerinin dökmedemirde artması ile ötektik nokta düşük karbon miktarlarına doğru kayar. Mekanik özelliklere tesir durumu silisyumun grafit oluşturmadaki rolüne bağlıdır. Sabit karbon değerli bir dökümde arttırılan silisyum miktarı ile ayrışacak grafit miktarı da artar. Dolayısıyla sertlik ve çekme mukavemeti düşer. EDS analizinde elde edilen kompozit numunedeki % Si dağılımı Şekil 6.1.de görülmektedir. Ayrıca elde edilen Si değerleri Çizelge 5.3. te verilmiştir.



Şekil 6.1. Kompozit numunede takviye merkezinden dışa doğru Si dağılımının normalizasyon sıcaklığına bağlı değişimi (%).

Bu şekilde de görüldüğü gibi takviye elemanının merkezinden (0 noktası) dışa doğru silis miktarında bir azalma olduğu görülmektedir. Isıl işlem sıcaklığı ile silisin takviye elemanında arttığı da görülmektedir. Geçiş bölgesinde normalizasyon ısıl işlemli numunelerde Si değerleri birbirine yakın çıkmasına karşın, ısıl işlemsiz numunede silis miktarı düşüktür. Bu durum, ısıl işlemle silis bakımından zengin bölgelerden düşük silisli bölgelere doğru kısmi difüzyon olduğunu göstermektedir. Sertlik deneylerinde de görüldüğü gibi geçiş bölgesinin diğer bölgelere göre daha sert olduğu görülmektedir. Bunun nedeni bu bölgedeki C miktarındaki artış olarak izah edilebilir.

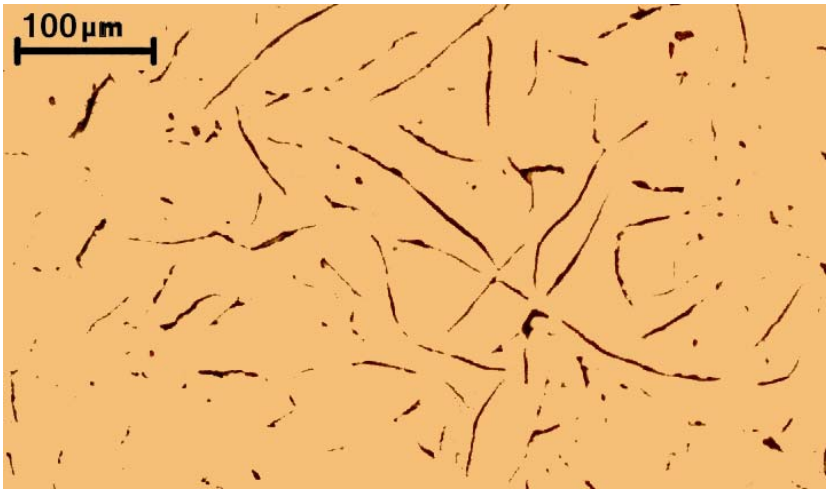
Matriks yapıda her ne kadar Si oranı fazla olmasına rağmen sertliğin geçiş bölgesine göre düşük olması matriks yapıdaki serbest grafitten kaynaklanmaktadır. Yüksek Si oranı ve grafitten arınmış geçiş bölgesi en yüksek sertliği vermektedir.

6.2. Mikroyapı İncelemeleri

Kır dökmedemirlerde dökümün özelliğini büyük ölçüde oluşan grafitin büyüklüğü, biçimi ve dağılımı belirlemektedir. Katılaşma süresinin uzunluğuna bağlı olarak grafit lamelleri değişik büyüklüklerde oluşabilmektedir. Bu çalışmadaki mikroyapı incelemeleri ASTM-A247 ye (American Society for Testing and Materials) göre yapılmıştır.

6.2.1. Dökmedemir numunelerin grafit yapısı

Isıl işlemsiz dökmedemir numunenin mikroyapısı Şekil 6.2.de görüldüğü gibi lameller, doğrultusu ve yönü belli olmayan düzensiz yapraksı bir yapı grafitin yapısı ve dağılımı incelendiğinde homojen bir dağılım görülmektedir. Bu dağılım 1A3-5 şeklindedir ve lamel haline dönüşmemiş grafitler de görülmektedir.



Şekil 6.2. Isıl işlemsiz dökmedemir numunenin grafit yapısı.

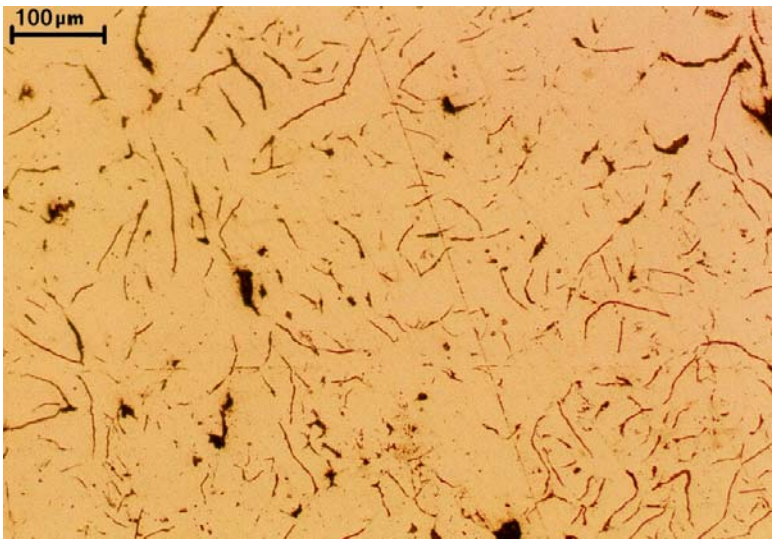
Şekil 6.3.'te 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir numunenin grafit yapısı görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi lamellerin kalınlaştığı fakat 1A tipi grafit yapısının muhafaza edildiği görülmektedir. Bazı bölgelerde ötektik üstü malzemelerde ve köpük (kish) adı verilen kalın grafit yaprakları şeklindedir. Yani

yapı 1A3-6 şeklinde olmakla beraber bu numunede de lamelleşmemiş kalın ve yumru grafitler görülmektedir.



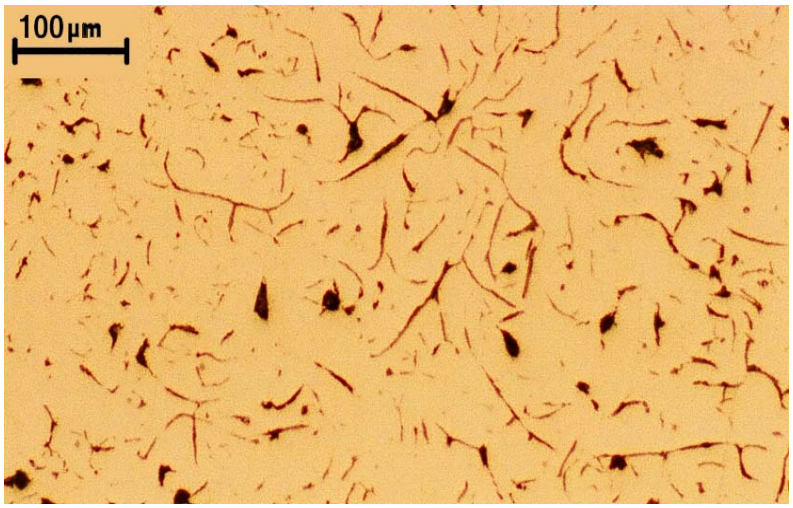
Şekil 6.3. 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir numunenin grafit yapısı.

Şekil 6.4. de 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir numunenin grafit dağılımı 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli numunede olduğu gibi lamellerin biraz daha kalınlaştığı fakat A tipi grafit yapının ağırlıklı olduğu görülmektedir. Yapının 1A4 şeklinde grafit yapısı olduğu söylenebilir.



Şekil 6.4. 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir numunenin grafit yapısı.

Şekil 6.5. te görüldüğü gibi 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir numunenin grafit dağılımı A tipi grafit yapısının hakim olmasına rağmen lamel grafitler daha da kalınlaşmıştır. Yapının 1A3 şeklinde grafit yapısı olduğunu söylemek mümkündür.



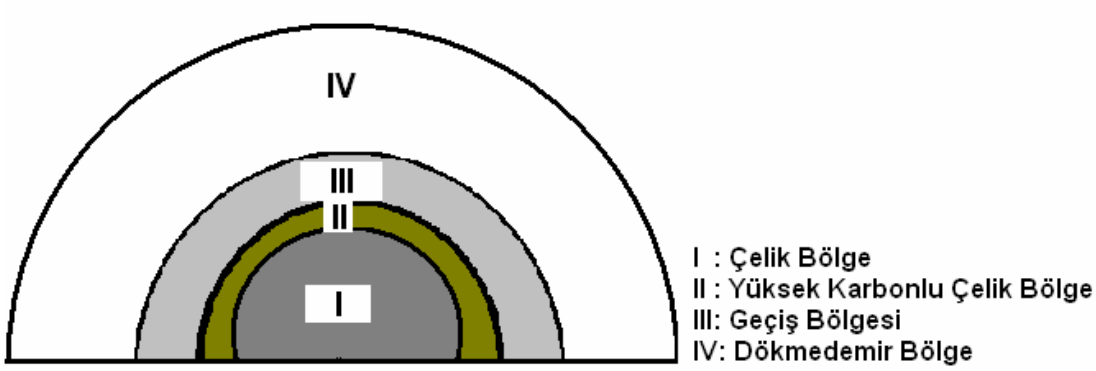
Şekil 6.5. 900 0C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir numunenin grafit yapısı.

Dağlanmamış mikroyapı görüntüleri birlikte incelendiğinde, difüzyonun sıcaklıkla artması sonucu, kaba lamellerin inceldiği yumruların arttığı görülmektedir. Kaba grafit yapıda kısmen erime görülürken düşük karbonlu matrikste grafit çökelmesi de görülmektedir. Bunun sonucunda kaba grafit yapıda azalmada ince lameller oluşmaktadır.

6.2.2. Kompozit numunelerin mikroyapıları

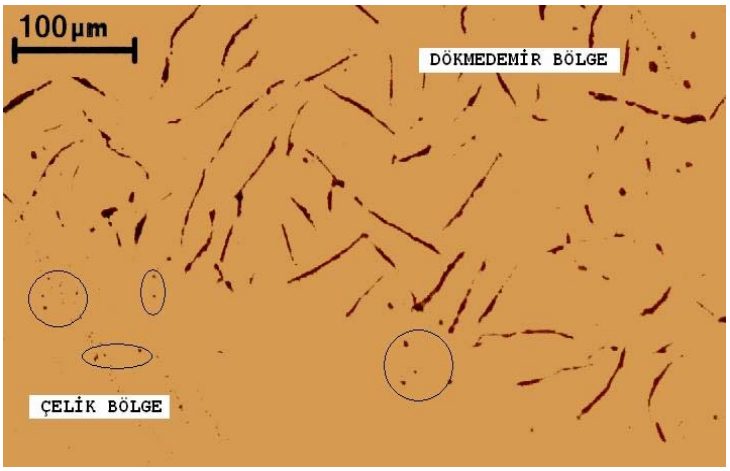
Kompozit numunelerden elde edilen görüntülerde matriks ile takviye arasında farklı bir farklı bir yapının oluştuğu görülmüştür. Bu yapının oluşmasında ısıl işlemsiz numunelerde döküm esnasında sıcaklığın etkisi ile, normalizasyon ısıl işlemli numunelerde ise ısıl işlem sıcaklığının ilave etkisi ile dökmedemirden takviye elemanına C ve Si difüzyonu meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca dağlamala sırasında silisin dağlamayı geciktirdiğini ve geçiş bölgelerinin iyi dağlanamadığını söylemek mümkündür. C ve Si difüzyonu ile matriks ve takviye elemanı yapısından

farklı yapıya sahip bu bölge geçiş bölgesi olarak adlandırılmıştır. Kompozit numunedeki bölgeler Şekil 6.6. da görülmektedir.



Şekil 6.6. Kompozit numune bölgeleri

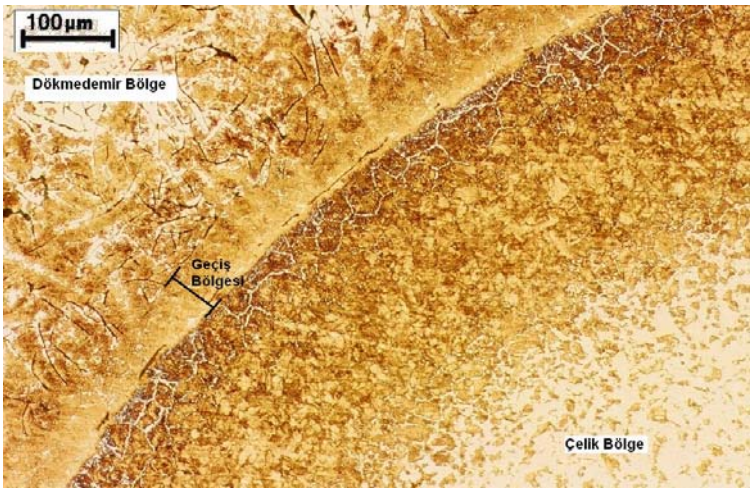
Şekil 6.7.'de ısıl işlemsiz kompozit numunenin grafit yapısı görülmektedir. Kompozit numunenin dökmedemir bölgesi dökmedemir numune ile aynı grafit yapı görülmektedir (Şekil 6.2). Çelik tel ile matriks arasında ki geçiş bölgesinde az da olsa C çökeltileri görülmektedir.



Şekil 6.7. Isıl işlemsiz kompozit numunede geçiş bölgesi grafit yapısı.

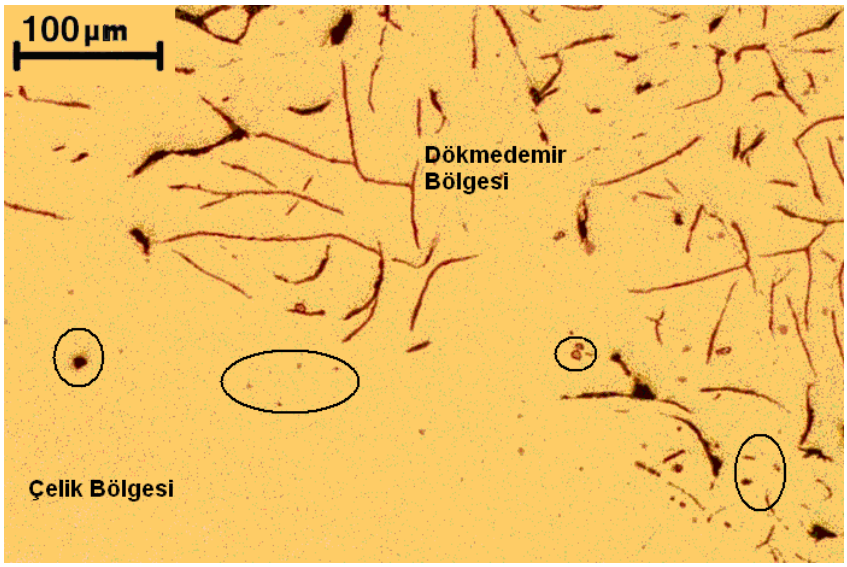
Şekil 6.8.'de %2 nital dağlanmış ısıl işlemsiz kompozit numunenin geçiş bölgesi görülmektedir. Burada görüldüğü gibi matriks yapıdan takviye elemanına karbon difüzyonu olduğu görülmektedir. Ayrıca geçiş bölgesinde ötektoit ürün olan kaba taneli %100 perlitik bir yapı görülürken, geçiş bölgesinden çeliğin merkezine doğru C oranı düştüğünden ötektoit altı bir yapı mevcuttur. Takviye elemanının iç

bölgelerinde daha ferritik bir yapı daha hakimdir. Geçiş bölgesine yakın bölgelerde kaba perlitik yapının varlığı görülmektedir. Kompozit numunede karbonun çeliğin merkezine kadar karbon aldığı görülmektedir. Buradaki yapı ince taneli perlitik-ferritik ideal yapı olduğunu söylemek mümkündür.



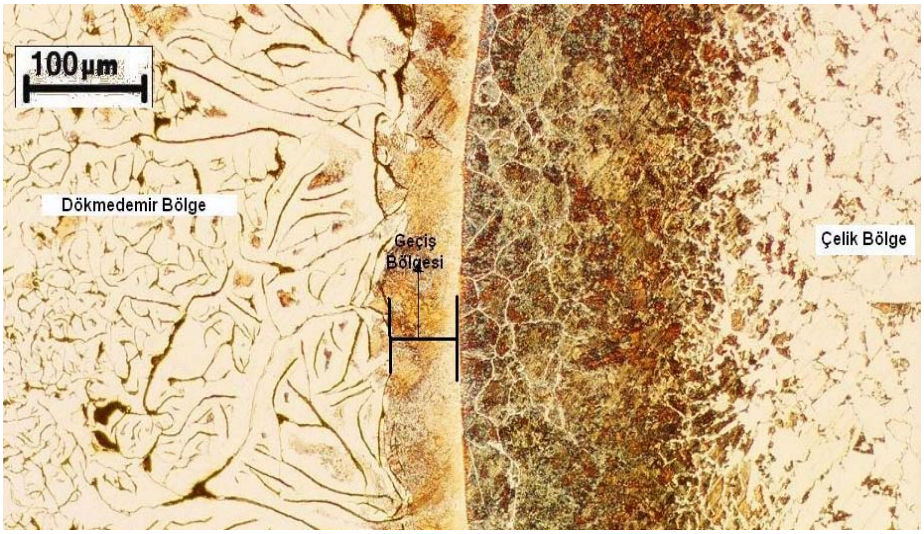
Şekil 6.8. %2 nital dağlanmış ısıl işlemsiz kompozit numunenin mikroyapısı.

Şekil 6.9.'da 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin grafit yapısı görülmektedir. Kompozit numunenin dökmedemir bölgesinde ise dökmedemir numuneye Şekil 6.3.'te görüldüğü gibi benzer bir yapı görülmektedir. Dökmedemirden takviye elemanına C ve Si difüzyonunu ile oluşan geçiş bölgesine yakın noktalarda grafit yapı düzensizleşmiştir. Ayrıca geçiş bölgesinde ısıl işlemsiz numunede görülen çökelti ve azda olsa grafitlerde nodülleşme bu yapıda da görülmektedir.



Şekil 6.9. 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin grafit yapısı.

Şekil 6.10. da %2 nital dağlanmış 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunede geçiş bölgesinin mikroyapısı görülmektedir. Kompozitin dökmedemir bölgesinde grafitin 1AB şeklinde dağılım gösterdiği görülmektedir. Bu numune de takviye elemanının merkezinde iç bölgeleri ferritik iken geçiş bölgesi perlitikdir.



Şekil 6.10. %2 nital dağlanmış 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin mikroyapısı.

Çelik geçiş bölgesine bakıldığında, yakın bölgelerde taneler irileşmiş, normalizasyon sıcaklığı yetersiz anlaşılmaktadır. Perlitik bölge genişletilebilir,

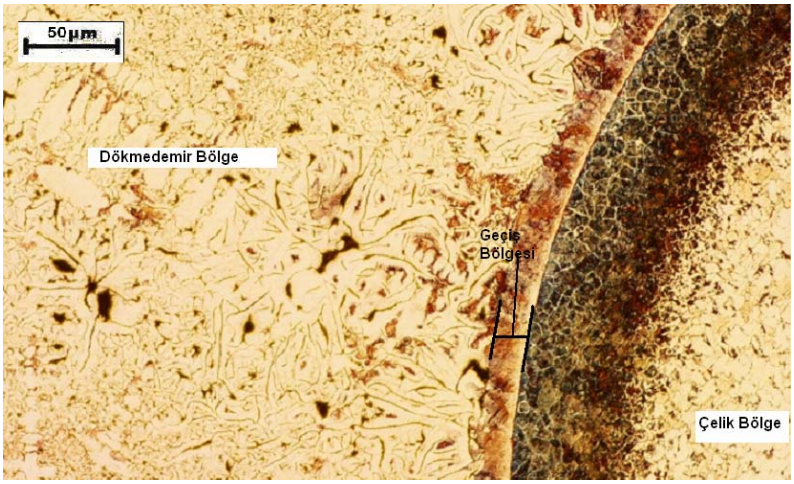
böylece çekme dayanımı biraz daha artırabilir fakat darbe dayanımında düşme olabilir. Takviye elemanında perlit ve aynı zamanda tanelerin küçüldüğü görülmektedir. Takviye elemanında perlit oranının iç bölgelerde daha da arttığı görülmektedir. Böylece karbon takviye elemanına difüzyonunun arttığı anlaşılmaktadır.

Şekil 6.11. de 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin geçiş bölgesinin grafit dağılımı görülmektedir. Şekil 6.10.'da kompozit numunenin dökmedemir bölgesinde grafit dağılımının 1A şeklinde olduğu ve grafit haline dönüşmemiş kalın ve eğri yumru şeklinde grafitle bulunduğu görülmektedir.



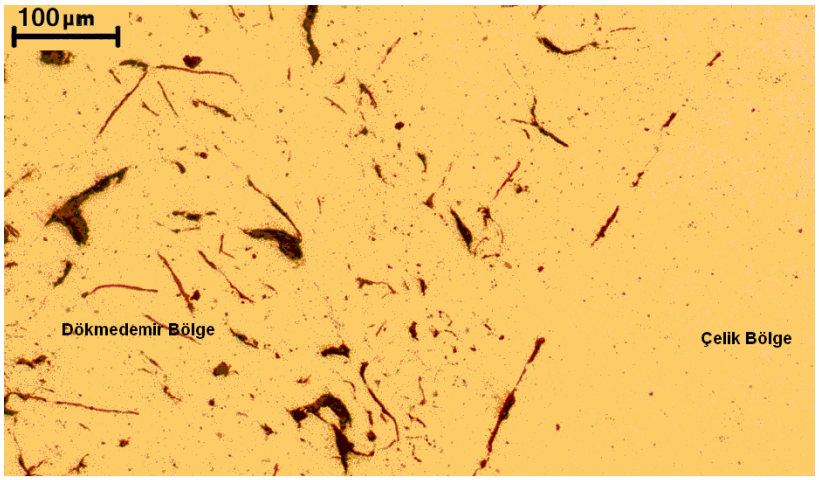
Şekil 6.11. 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin grafit yapısı.

Şekil 6.12.'de %2 nital dağlanmış 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemi görmüş kompozit numunenin mikroyapısı görülmektedir. Burada da takviyesiz numunelerde olduğu gibi takviye elemanına uzak bölgelerde yine ferritik ve düzensiz grafit yapısı görülürken, geçiş bölgesinde perlitik yapı hakimdir. Dökmedemir bölgede dağılımın 1A4 şeklinde olduğunu söylemek mümkündür. Isıl işlem sıcaklığının artması ile geçiş bölgesinde C difüzyonu ile geçiş bölgesinin daha da genişlediği görülmektedir. Perlit kolonileri çoğalmış ve boyutlarının da küçüldüğü görülmektedir.



Şekil 6.12. %2 nital dağlanmış 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin mikroyapısı.

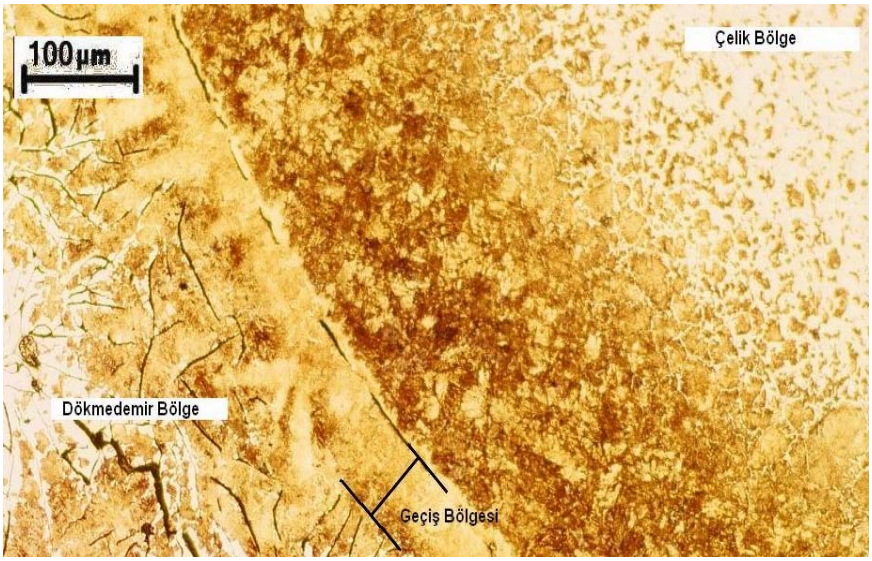
Şekil 6.13.'te 900 °C normalizasyon ısıl işlemi görmüş kompozit numunenin grafit yapısı görülmektedir. Şekil 6.13. de kompozit numunenin dökmedemir bölgesinde 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir numune ile benzer bir yapı görülmektedir.



Şekil 6.13. 900 °C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin grafit yapısı.

Şekil 6.14.'de de görüldüğü gibi, 900 ^{0}C ısıl işlem görmüş numunede, takviye elemanına uzak bölgeler ferritik ve düzensiz grafit yapısı görülürken geçiş bölgesi perlitikdir. Normalizasyon ısıl işlem sıcaklığının artması ile karbon difüzyonu ile geçiş bölgesinin daha da genişlediği ve tanelerin küçüldüğü de görülmektedir. Çeliğin neredeyse tamamen perlitik yapıda olduğunu söylemek mümkündür. Bu durum

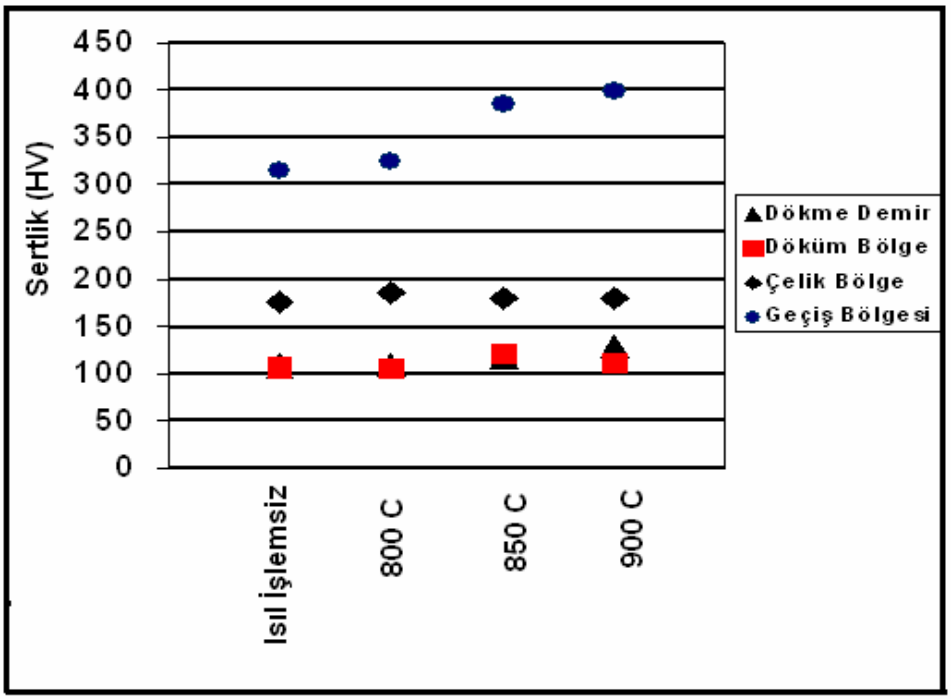
normalizasyon ve ısıl işlem sıcaklığının uygunluğunu göstermektedir. Bu bölgelerdeki sertlik artışı ısıl işlem sıcaklığının artmasıyla daha da artmıştır. Buda ısıl işlem sıcaklığının artmasıyla matriksten takviye elemanına C ve Si difüzyonunun arttığını göstermektedir.



Şekil 6.14. %2 nital dağlanmış 900 °C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin mikroyapısı.

6.3. Sertlik Deneyi Sonuçları

Dökmedemir ve kompozit numunelerin çelik, geçiş ve dökmedemir bölgesine ait sertlik değerleri Şekil 6.15.'de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi kompozit numunenin dökmedemir bölgesinin ve dökmedemir numunenin sertlik değeri beklendiği gibi düşük ve benzerlik göstermektedir. Isıl işlemle çelikte ve dökmedemir bölgelerde sertlikte çok fazla değişiklik olmamıştır. Isıl işlemsiz numunede sertlik geçiş bölgesinde 315 VSD iken 800 ^{0}C ısıl işlemli numunede 325 VSD değerleri elde edilmiştir. Isıl işlemsiz numune ile 800 ^{0}C ısıl işlemli numune arasında çok az değişim olmuştur. Bunun yanı sıra ısıl işlemsiz numuneye göre 850 ^{0}C ve 900 ^{0}C ısıl işlemli numunelerde sertlik oldukça yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni; geçiş bölgesi ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak karbon ve silisce Geçiş bölgesi ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak karbon ve silisce zenginleşmesi ile açıklanabilir.



Şekil 6.15. Dökmedemir ve kompozit numunenin sertlik değerleri.

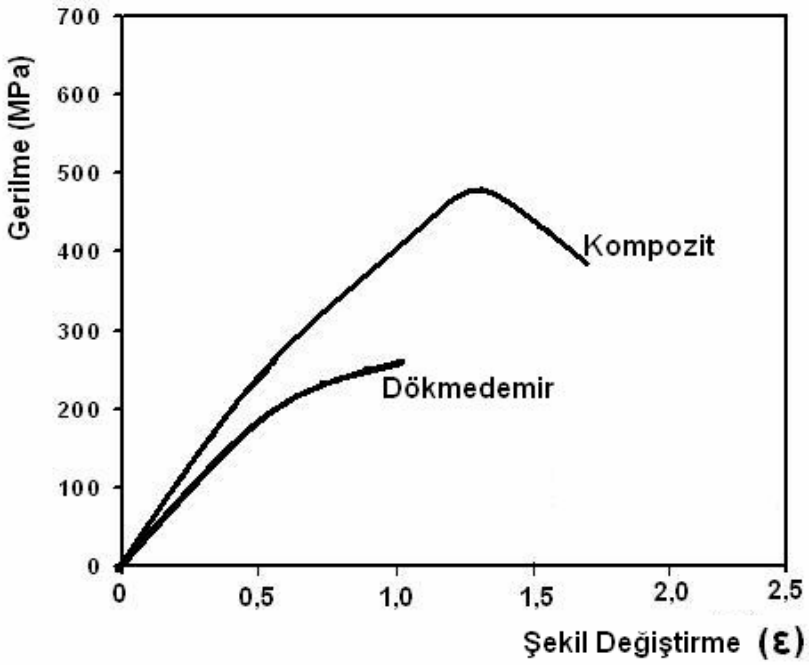
6.4. Çekme Deneyi Sonuçları

6.4.1. Isıl işlemsiz numunelerin çekme deney sonuçları

Isıl işlemsiz dökmedemir ve kompozit malzemenin gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 6.16. görülmektedir. Isıl işlemsiz dökmedemir numune, tamamen gevrek bir kopma davranışı göstermiş, çekme dayanımı σ=283.39 MPa ve %1.02 uzama olmuştur. Kompozit malzeme %1.33 lik uzama ve σ=464,80 MPa lık çekme dayanımı göstermiştir. Yani, uzamada %31, çekme dayanımında %65 artış elde edilmiştir. Kompozit numunede kopma, matriks yapı ile takviye elemanı birbirinden bağımsız gerçekleşmiştir. Matriks yapı gevrek olduğundan σ =464,80 MPa'da çevresel kenar çatlağı oluşmuş ve aniden kopmuştur. Fakat takviye elemanı sünek olduğundan yük taşımaya ve uzamaya devam etmiş σ=395.32 MPa da kopmuştur, kopma sırasında uzama %1.76 olarak ölçülmüştür. TEM görüntüsündende matriks

yapı ile takviye arasındaki seviye farkından da anlaşılmaktadır. Kompozit numune dökmedemir numuneye göre %74 daha fazla uzama göstermiştir.

Dökmedemirin elastiklik modülü E=130.0 GPa iken kompozit numunenin elastiklik modülü E=176.5 GPa olarak hesaplanmıştır. Elastiklik modülünde de dökmedemir numuneye göre kompozit numunede %35 artış olduğu tesbit edilmiştir.



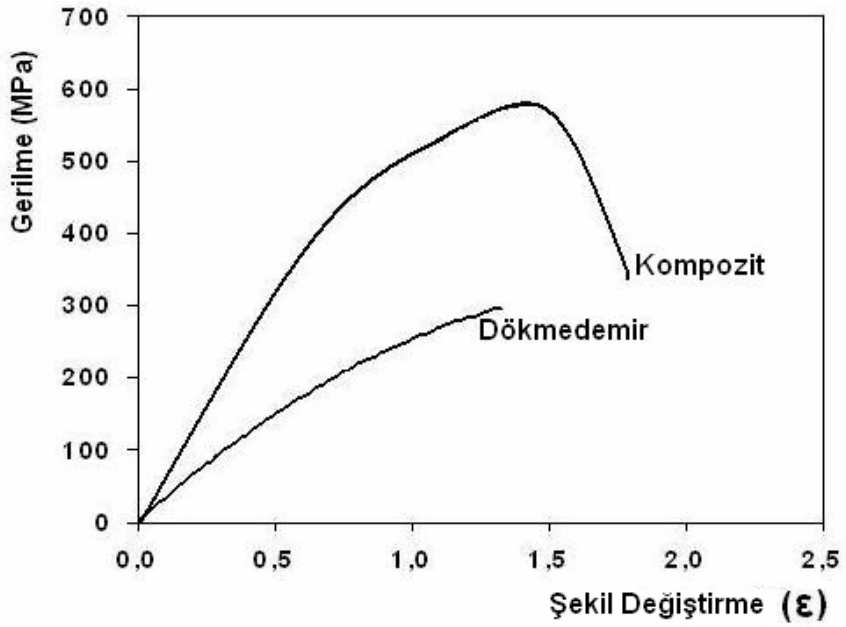
Şekil 6.16. Isıl işlemsiz dökmedemir ve kompozit malzemenin mühendislik gerilme-şekil değiştirme grafiği.

Isıl işlemsiz numunelerin rezilyans ve statik statik tokluklarında da kompozit numunede dökmedemir numuneye göre önemli artış olduğu görülmüştür. Rezilyans ta dökmedemire göre kompozit numunede %73, statik toklukta ise %390 artış kaydedilmiştir.

6.4.2. 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli numunelerin çekme deney sonuçları

800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir ve kompozit malzemenin gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 6.17.'da görülmektedir. Bu şekilde de görüldüğü gibi 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir numunenin çekme gerilme σ =303.28 MPa, uzama %1.21 olarak hesaplanmıştır. Dökmedemir numune tipik

gerilme-şekil değiştirme eğrisi sergilemiştir. Maksimum çekme gerilmesinden sonra numune oluşan kenar çatlağının bulunduğu noktadan aniden kopmuştur. Kompozit numunenin çekme dayanımı σ =580.31 MPa ve uzama % 1.47 olarak bulunmuştur. Isıl işlemin etkisi ile ısıl kompozit numune dökmedemir numuneye göre çekme gerilmesinde %90, uzamada ise %14 lük artış tesbit edilmiştir. Isıl işlemsiz kompozit numunede olduğu gibi bu numunede de matriks yapı ile takviye elemanı birbirinden bağımsız gerçekleşmiştir. Matriks yapı gevrek olduğundan, çevresel bir kenar çatlağı oluşmuş ve aniden kopmuştur. Kompozit numune maksimum dayanımdan sonrada ısıl işlemsiz kompozit numunede olduğu gibi, takviye elemanı yük taşımaya devam etmiş σ=320.58 MPa da kopmuş ve uzama %1.76 olarak ölçülmüştür.



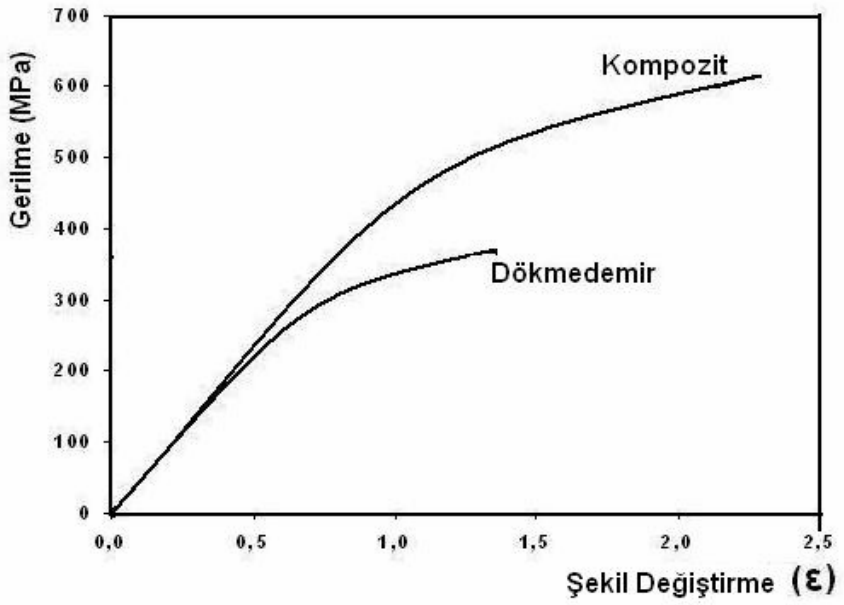
Şekil 6.17. 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir ve kompozit malzemenin gerilme-şekil değiştirme grafiği.

Bu artış ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak oluşan arayüzey fazının güçlenmesi ile açıklanabilir. Matriks yükleme esnasında arayüzey den yükü takviye elemanına transfer etmekte ve % uzamayı artırmaktadır. Ayrıca, Şekil 6.6.'da görüldüğü gibi bu numunenin mikroyapısında da görüldüğü gibi grafit lamelleri bir miktar nodülleşmiştir. Dökmedemir numunenin çekme dayanımı-% uzama grafiği ise ısıl işlemsiz dökmedemir numunenin ve diğer dökmedemir numunelerinkine benzerdir.

Dökmedemirin elastiklik modülü 142.5. GPa kompozit numunenin elastiklik modülü E 262.5 GPa olarak hesaplanmıştır. Dökmedemir numunelerin rezilyans ve statik tokluklarında da kompozit numunede dökmedemir numuneye göre önemli artış olduğu görülmüştür. Rezilyans dökmedemire göre kompozit numunede %71, statik toklukta ise %52.6 artış kaydedilmiştir.

6.4.3. 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli numunelerin çekme deney sonuçları

Şekil 6.18.'de 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir ve kompozit malzemenin gerilme-şekil değiştirme grafiği görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi, kompozit numune de maksimum çekme dayanımı σ=624.43 MPa ve uzama %2.28 olmuştur. Numunede önce matrikste kenar çatlağı meydana gelmiş ve aniden kırılmıştır. Numune dökmedemir numuneye benzer bir kopma davranışı sergilemiştir.



Şekil 6.18. 850 ^{0}C Normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir ve kompozit malzemenin gerilme-şekil değiştirme grafiği.

Dökmedemir numune gevrek bir kopma şekli göstermiş ve σ=362,71 MPa da kopmuştur. Dökmedemir numunenin uzaması %1.07 hesaplanmıştır. Dökmedemire oranla kompozit malzemenin çekme dayanımında %72, uzamada ise %121 lik bir artış olmuştur.

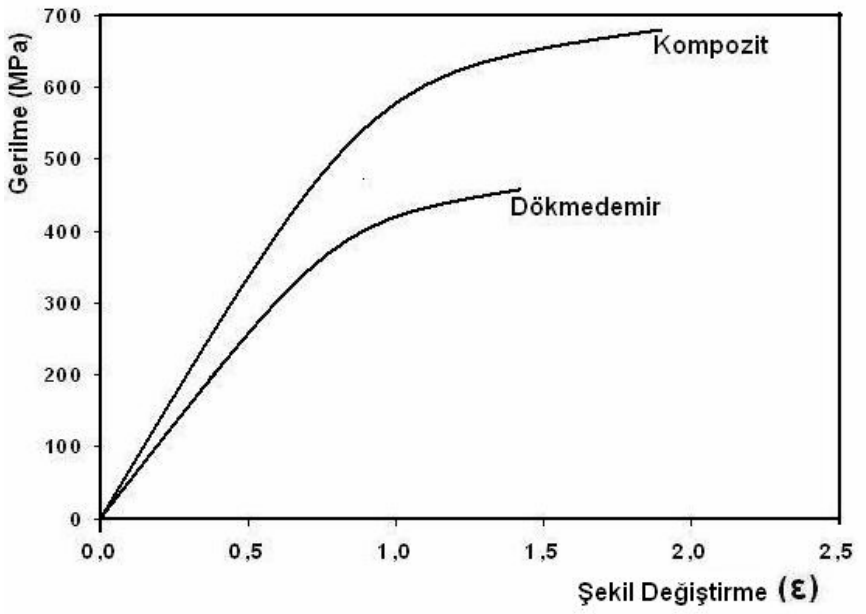
Bu numunenin çekme dayanımı ısıl işlemsiz numunelere ve 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli numunelere oranla daha fazla elde edilmiştir. 850 ^{0}C de uygulanan normalizasyon ısıl işlemi sonrasında arayüzeyinin daha da iyileştiği görülmektedir. Yani kompozit numunelerde genelde görülen matriksten takviye elemanına yük transfer ilişkisinin etkinliğinin arttığı söylenebilir. Bu artış % uzamaya da olumlu yansımıştır.

Dökmedemirin elastiklik modülü E=162.5 GPa kompozit numunenin elastiklik modülü E=275.5 GPa olarak hesaplanmıştır. Dökmedemir numunelerin rezilyans ve statik tokluklarında da kompozit numunede dökmedemir numuneye göre önemli artış olduğu görülmüştür. Rezilyansta dökmedemire göre kompozit numunede %176, statik toklukta ise %196 artış kaydedilmiştir.

Ayrıca bu numunede her ne kadar grafitin nodülleşmesi gerçekleşmiş olsa da grafit lamellerinin daha da kalınlaşması çekme dayanımının artmasına sebep olabilir. Aynı zamanda bu numunenin uzama değerlerinin de yüksek çıkması grafit nodüllerinin boyutunun büyümesine bağlanabilir.

6.4.4. 900. ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli numunelerin çekme deney sonuçları

900 ^{0}C Normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir ve kompozit malzemenin gerilme-şekil değiştirme grafiği Şekil 6.19.da görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi dökmedemir numune de çekme dayanımı σ=455.96 MPa ve %0,99 uzama hesaplanmıştır. Kompozit numune de ise %1,80 lik uzama ve σ=685,26 MPa çekme dayanımı hesaplanmıştır. Kompozit numunenin çekme dayanımı dökmedemire oranla %50 ve uzama %81 daha fazla olmuştur.



Şekil 6.19. 900 ^{0}C Normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir ve kompozit malzemenin gerilme-şekil değiştirme grafiği.

Kompozit numunenin çekme dayanımının diğer numunelere göre daha fazla çıkmasının nedeni geçiş bölgesinin sertliğine bağlanabilir. Takviyeni yapısı ve geçiş bölgesinin büyümesi de bu artışın sebebi olarak söylenebilir. Ayrıca bu numunede daha da irileşen grafitler ve nodülleşme eğilimini ortadan kalkmıştır. Numunede çok köşeli grafitler çekme dayanımının artmasına neden olurken çentik etkisinden dolayı % uzama değerlerinin düşmesine sebep olduğu söylenebilir.

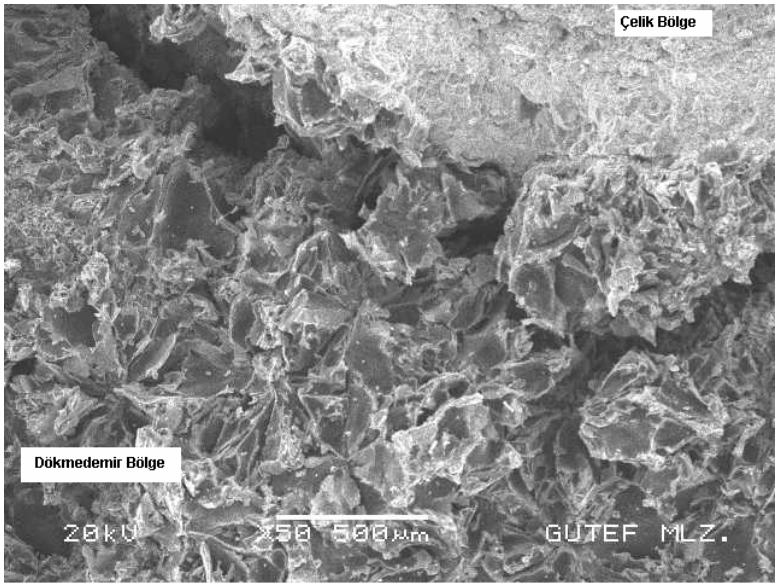
Dökmedemirin elastiklik modülü=195.0 GPa, kompozit numunenin elastiklik modülü E=305.0 GPa olarak hesaplanmıştır. Diğer numunelerde olduğu gibi rezilyans ve statik tokluklarında da kompozit numunede dökmedemir numuneye göre önemli artış olduğu görülmüştür. Rezilyans dökmedemire göre kompozit numunede %124, statik toklukta ise %61 artış kaydedilmiştir.

Diğer kompozit numunelerdeki gibi 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunede de matriks yapıda meydana gelen kenar çatlağı oluşmuş ve aniden kopmuştur. Fakat diğer kompozit numunelerde meydana gelen matriks ve takviye elemanının bağımsız kopması bu numunede meydana gelmemiştir.

6.5. Çekme Deneyi Sonrası Kopma Yüzeylerinin TEM İncelemeleri

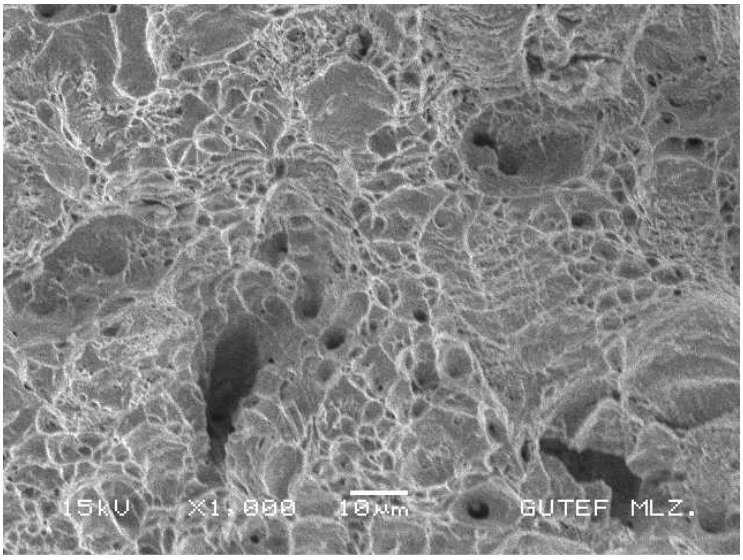
6.5.1. Isıl işlemsiz numunelerin çekme deneyi sonrası kopma yüzeylerin TEM cihazında incelenmesi

Şekil 6.20.'de görüldüğü gibi ısıl işlemsiz numunenin geçiş bölgesinde takviye ve matriks arasında iyi bir arayüzey oluşmadığı görülmektedir. Kopma şeklini belirleyen bu bölgedeki arayüzeydir ve iyi bir arayüzey oluşmadığı anlaşılmaktadır. Kompozit numunenin dökmedemir bölge ve çelik bölgede karbon alan bölgenin gevrek bir kopma sergilediği görülmektedir. Çekme deneyi sonuçlarında görüldüğü gibi, bölge gevrek ve takviye takviyeye göre daha önce kopmuştur.



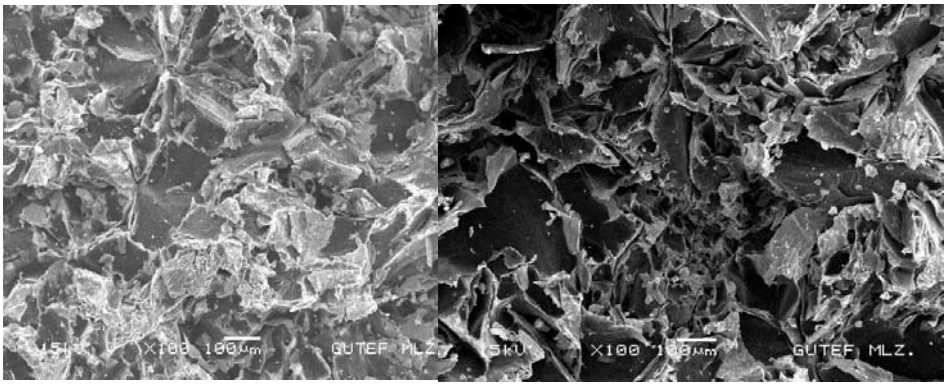
Şekil 6.20. Isıl işlemsiz kompozit numunenin çekme deneyi sonrası kopma yüzeyi geçiş bölgesi TEM görüntüsü.

Şekil 6.21.'de ısıl işlemsiz kompozit numunenin çekme deneyi sonrası çelik bölgesi kopma yüzeyi TEM görüntüsü görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi kompozit numunenin çelik bölgesi düşük karbonlu çeliklerde gözlenen sünek kopma şekli burada da görülmektedir.



Şekil 6.21. Isıl işlemsiz kompozit numunenin çekme deneyi sonrası çelik bölgesi kopma yüzeyi TEM görüntüsü.

Şekil 6.22.'de ısıl işlemsiz kompozit numunenin çekme deneyi sonrası dökmedemir bölgesi ve dökme demir numunenin kopma yüzeyi TEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 6.22. de görüldüğü gibi, kompozit numunenin dökmedemir bölgesi ile dökmedemir numune benzer kopma şekli göstermiştir. Her iki numunenin kopma şekli gevrektir. Kompozit numune dökmedemir bölgesi ve dökmedemir numunede lamellerin çentik etkisi açıkça görülmekte, kopmanın bu bölgede başlayıp gevrek bir tavır sergileyerek koptuğu anlaşılmaktadır.

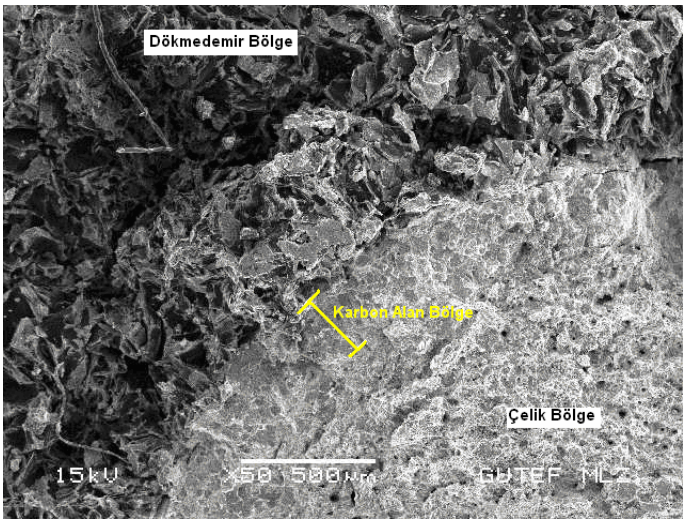


a b

Şekil 6.22. Isıl işlemsiz çekme numunelerinin kırık yüzeyleri a.kompozit b.dökmedemir

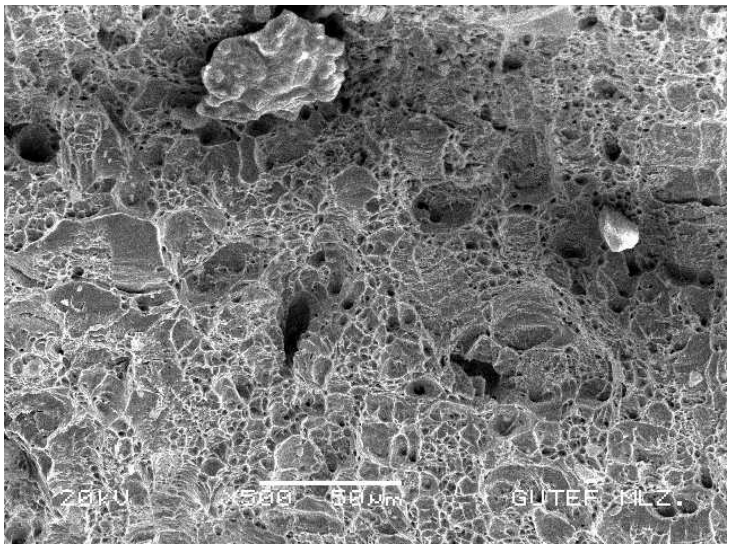
6.5.2. 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli numunelerin çekme deneyi sonrası kopma yüzeylerin TEM cihazında incelenmesi

Şekil 6.23.'te 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası kopma yüzeyi geçiş bölgesi TEM görüntüsü görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi bakıldığında ısıl işlemsiz numuneye göre geçiş bölgesinde kısmen bir birleşmeden söz edilebilir, ancak geçiş bölgesindeki birleşmenin sürekli olmadığı görülmektedir. Bu nedenle kopma şekli olarak takviye elemanı ile matriksin birbirinden bağımsız kopma şeklinde ayrıldığı anlaşılmaktadır. Takviye elemanında karbon alan bölgenin gevrek koptuğunu söylemek mümkündür. Çekme deneyi sonuçları bu görüntüleri desteklemektedir.



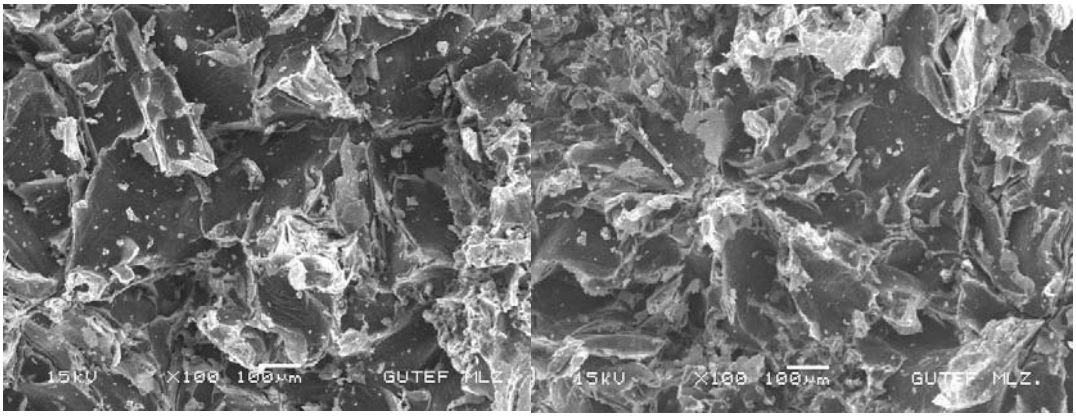
Şekil 6.23. 800 ^{0}C Normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası kopma yüzeyi geçiş bölgesi TEM görüntüsü.

Şekil 6.24.'te 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası çelik bölgesi kopma yüzeyi TEM görüntüsü görülmektedir. Düşük karbonlu çeliğin sergilemiş olduğu tipik sünek kopma bu numunenin takviye elemanında da meydana gelmiştir. Bu numunede ısıl işlemsiz kompozit numuneye göre süneklik biraz daha artmış fakat daha düzlemsel, iri dimple ve klivaj ayrılmasıda görülmektedir. Bu artış normalizasyon ısıl işlem sıcaklığı ile tanelerin küçülmesine bağlanabilir.



Şekil 6.24. 800 ^{0}C Normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası çelik bölgesi kopma yüzeyi TEM görüntüsü.

Şekil 6.25.'te 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin dökmedemir bölgesi ve dökmedemir numunenin çekme deneyi sonrası TEM görüntüleri görülmektedir. Isıl işlemsiz numunelerde olduğu gibi bu numunelerde gevrek kopma tavrı göstermiştir. Kompozit numunenin dökmedemir bölgesi ve dökmedemir numune de lamellerin çentik etkisi açıkça görülmekte ve kopmanın bu noktalarda başlayıp gevrek bir şekilde gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

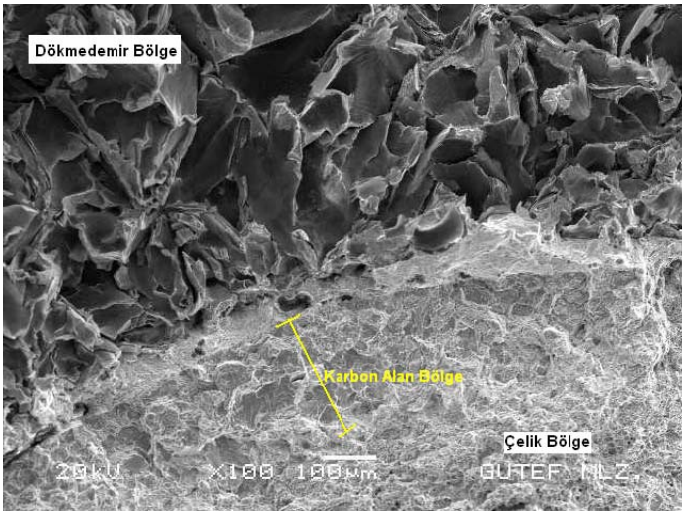


a **b**

Şekil 6.25. 800 °C normalizasyon ısıl işlemli çekme numunelerinin kırık yüzeyleri a. kompozit b. dökmedemir

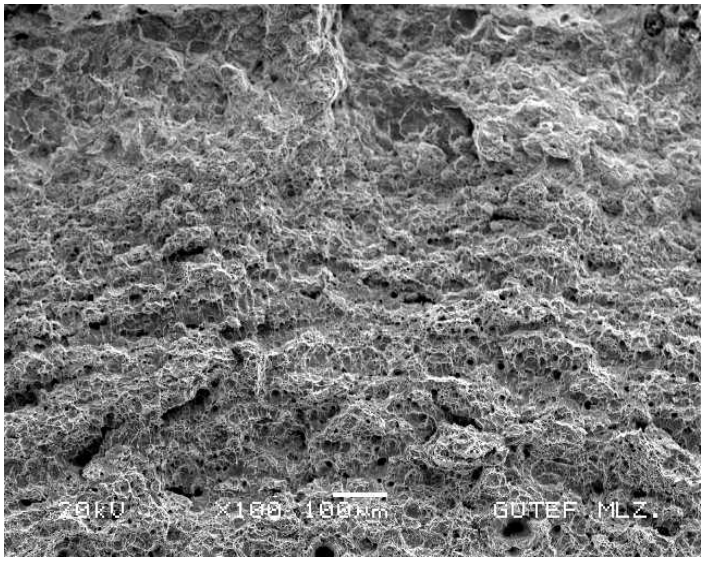
6.5.3. 850 ^{0}C Normalizasyon ısıl işlemli numunelerin çekme deneyi sonrası kopma yüzeylerin TEM cihazında incelenmesi

Şekil 6.26.'da 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası kopma yüzeyi geçiş bölgesinin TEM görüntüsü görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi ısıl işlemsiz ve 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin geçiş bölgesine göre bu numunede geçiş bölgesi daha iyi bir arayüzey oluştuğu görülmektedir. Fakat geçiş bölgesindeki birleşmenin sürekli olmadığı da görülmektedir. Bu numunede de karbon alan bölgenin de gevrek kopma sergilediği anlaşılmaktadır. Bu nedenle bu numunede de kopma tavrı takviye elemanı ve matriksin bireysel kopma şeklinde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 6.26. 850 ^{0}C Normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası kopma yüzeyi geçiş bölgesi TEM görüntüsü

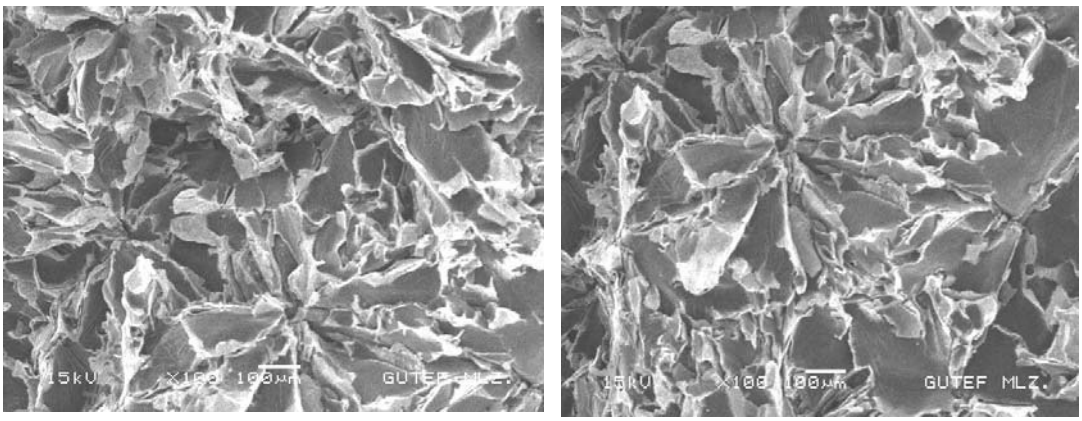
Şekil 6.27.'de 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası çelik bölgesi kopma yüzeyi TEM görüntüsü görülmektedir. Takviye elemanının ısıl işlemsiz ve 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunede olduğu gibi olarak sünek bir kopma şekli sergilediği görülmektedir.



Şekil 6.27. 850 ^{0}C Normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası çelik bölgesi kopma yüzeyi TEM görüntüsü

Şekil 6.28.'de ısıl işlemsiz numunelerde olduğu gibi gevrek kopma tavrı göstermiştir. Dökmedemir numunede lamel sınırlarında çentik etkisi açıkça

görülmekte, kopmanın bu bölgede başlayıp gevrek bir tavır sergileyerek tamamlandığı anlaşılmaktadır.

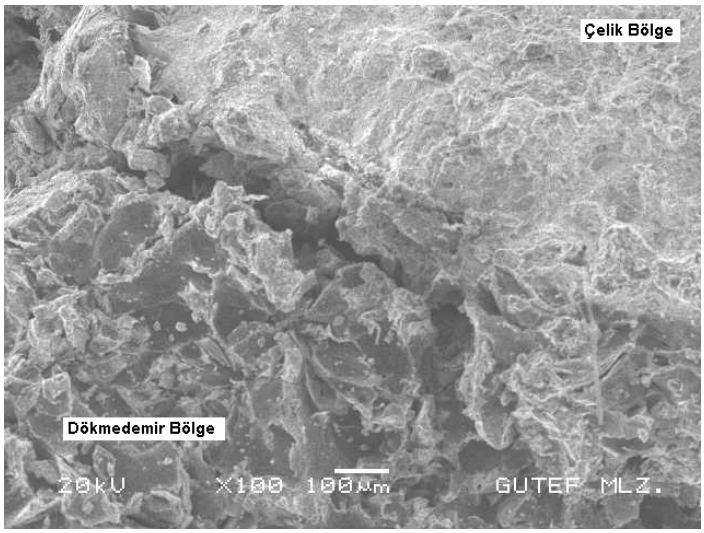


a b

Şekil 6.28. 850 °C normalizasyon ısıl işlemli çekme numunelerinin kırık yüzeyleri a. kompozit b. dökmedemir

6.5.4. 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli numunelerin çekme deneyi sonrası kopma yüzeylerin TEM cihazında incelenmesi

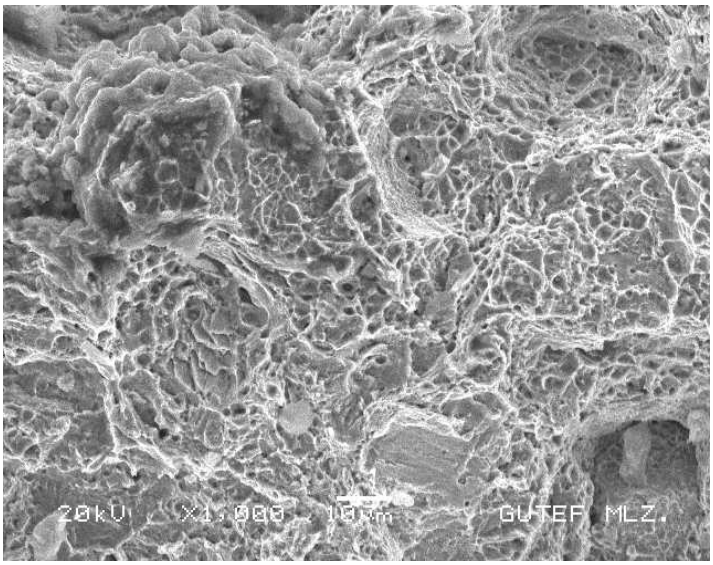
Şekil 6.29.'da 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası kopma yüzeyi geçiş bölgesi TEM görüntüsünü göstermektedir. Burada ısıl işlem sıcaklığının artışı ile matriks ve takviye elemanı arasındaki birleşmenin iyileştiğini söylemek mümkündür.



Şekil 6.29. 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası kopma yüzeyi geçiş bölgesi TEM görüntüsü

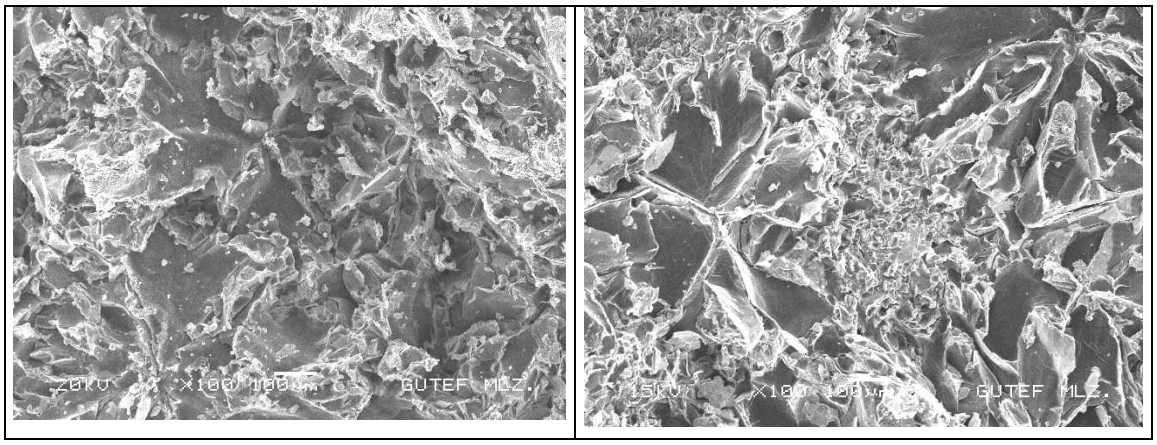
Bu iyileşme çekme deneyinde de görüldüğü gibi numunenin kopma tarzı dökmedemir gibi davranmıştır. Isıl işlem sıcaklığının artışı ile diğer kopmalarda gözlenen matriks ve takviye arasında görülen kotlu kopma burada hemen hemen kaybolmuştur.

Şekil 6.30.'da 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası çelik bölgesi kopma yüzeyi TEM görüntüsü görülmektedir. Burada görüldüğü gibi takviye elemanı olan çeliğin diğer kompozit numunelerde ki sünek kopma şekli bu numunede de görülmektedir.



Şekil 6.30. 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin çekme deneyi sonrası çelik bölgesi kopma yüzeyi TEM görüntüsü

Şekil 6.31.'de 900 °C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numune dökmedemir bölgesi ve 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir numunenin TEM görüntüleri görülmektedir. Diğer kompozit numunelerin dökmedemir bölgesinde ve dökmedemir numunelerde görülen gevrek kopma şekli bu numunelerdede görülmektedir. 900 °C normalizasyon ısıl işlemli dökmedemir numune de bölgesel ve diğer numunelerden farklı olarak sünek kopma tavrı gösteren bölgeler saptanmıştır. Bu bölgeler dışındaki genel kopma tavrı gevrektir.



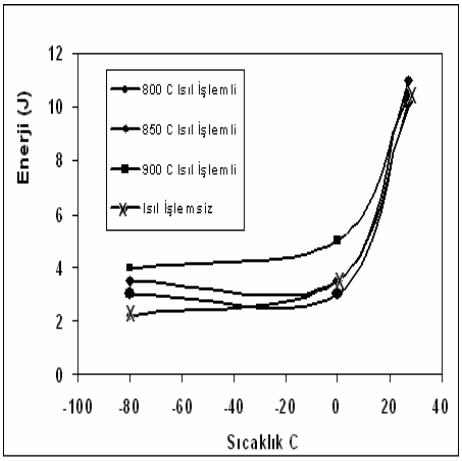
a **b**

Şekil 6.31. 900 °C normalizasyon ısıl işlemli çekme numunelerinin kırık yüzeyleri a. kompozit b. dökmedemir

6.6. Darbe Deneyi Sonuçları ve Numunelerin Kırık Yüzeylerinin TEM Görüntülerinin İncelenmesi

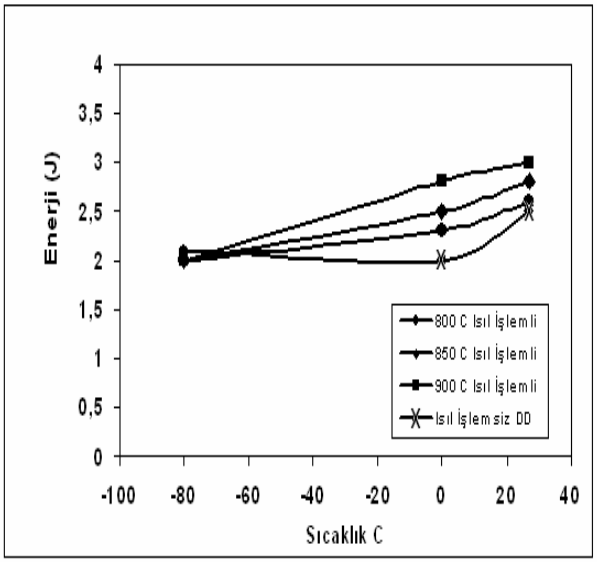
6.6.1. Darbe deneyi sonuçları

Şekil 6.32.'de kompozit numunelerin darbe dayanımları görülmektedir. Kompozit numunelerin darbe deneylerinde maksimum absorbe edilen enerji 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit malzeme numunesinde 27 ^{0}C de 10,5 J, 0 ^{0}C de 5 J, -80 ^{0}C ise 4 J ölçülmüştür.



Şekil 6.32. Kompozit numunelerin darbe dayanımları

Şekil 6.33.'te dökmedemir numunelerde ise ısıl işlemin çok fazla etkisinin olmadığı görülmektedir. Dökmedemir numune bütün ısıl işlem sıcaklıklarında oda sıcaklığı deneylerinde 2,8-3 J'lük enerji absorbe ederken -80 ^{0}C de yapılan deneylerde 2 J'lük bir enerji absorbe etmiştir. Yapılan bu deneylerde geçiş sıcaklığı tam olarak tespit edilememiştir.

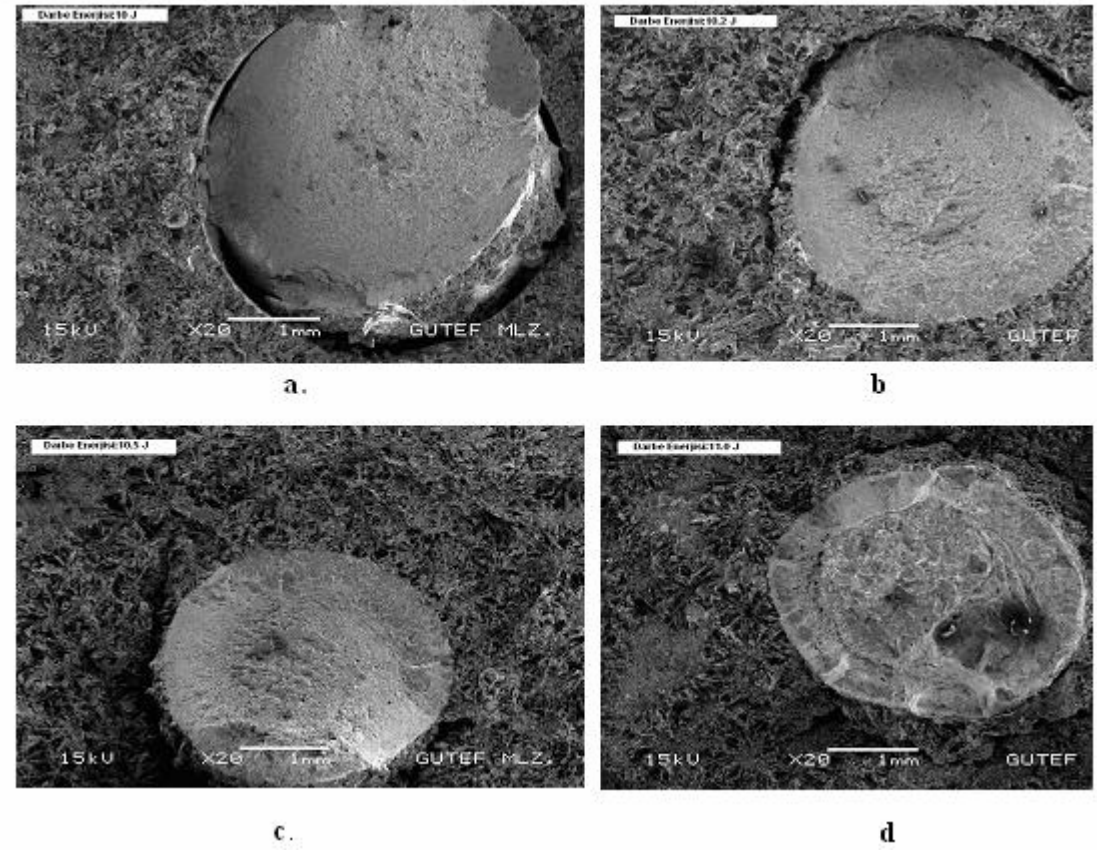


Şekil 6.33. Dökmedemir numunelerin darbe dayanımları

Statik tokluk değerlerinin geneline bakıldığında etkin parametrenin çelikten kaynaklandığı görülmektedir. Yani kompozit numunelerde darbe enerjisi (J) yüksek olmasının nedeni, matriksin yükü takviye elemanına transfer etmesidir. Normal haldeyken tel tek başına -40 ^{0}C'de 35 J lük darbe dayanımına sahipken, kompozit halindeyken bu enerji düşmektedir. Bu düşüş kompozitteki matriks yapının kırılgan takviye elemanının döküm sıcaklığı ile normalizasyon ısıl işlem sıcaklıklarının etkisinin yapıyı değiştirmesinden kaynaklanmaktadır. Burada kompozitin dökmedemire göre darbe enerjisinin yüksek olmasının takviye elamanıdır. Kompozitteki darbe enerjisi değişiklikleri arayüzey oluşumuna bağlıdır. Metalografik incelemelerde de görüldüğü gibi 900 ^{0}C ısıl işlemli kompozit numunede ara yüzey oluşumunun daha iyi olduğu söylenebilir.

6.6.2. Oda sıcaklığında kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüleri

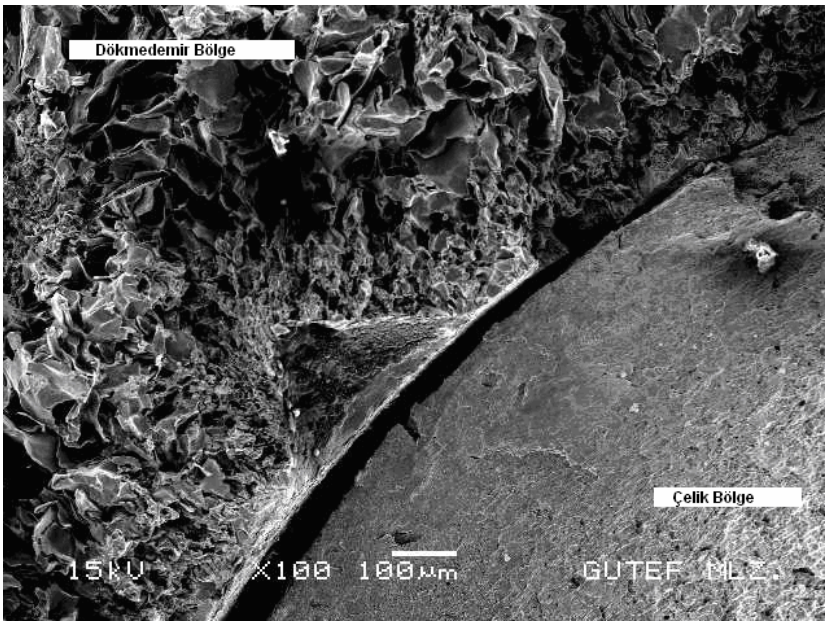
Oda sıcaklığında darbe deneyine tabii tutulan kompozit numunelerin kırık yüzeylerinin TEM görüntüleri Şekil 6.34.'te görülmektedir. Bu numunelerde matriks yapı, geçiş bölgesi ve takviye elemanında karbon alan bölgenin gevrek, takviye elemanının ise sünek kırıldığı görülmektedir. Normalizasyon ısıl işlem sıcaklığının artışı ile takviye elemanındaki karbon alan ve gevrek kırılan bölgenin genişlediği açıkça görülmektedir. Bu numunelerde kırılmanın; darbenin etkisi ile matriks yapıda bir kenar çatlağı oluşması ve çatlağın takviye elemanı yönünde büyüyerek ilerlemesi sonucu gerçekleşmiştir.



Şekil 6.34. Oda sıcaklığında kırılmış kompozit Charpy numunelerin kırık yüzeyleri a. ısıl işlemsiz b. 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli c. 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli d. 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli

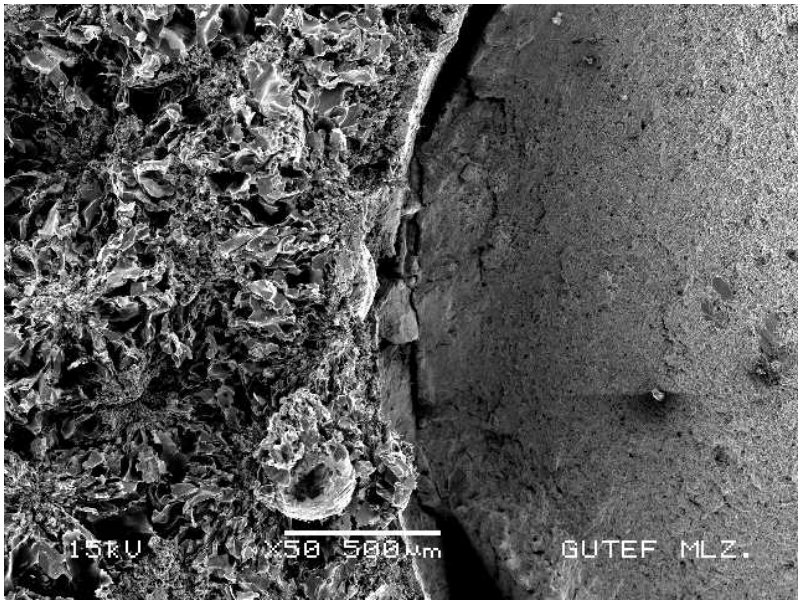
Şekil 6.35.'te oda sıcaklığında Charpy deney numunesine tabi tutulmuş kompozit numunenin geçiş bölgesi kopma görüntüsü görülmektedir. Numunenin geçiş bölgesinde matriks ile takviye elemanı arasında iyi bir arayüzey oluşmadığı,

dolayısıyla matriks takviye ayrışması olduğu görülmektedir. Numunede matriks yapının gevrek kırılma davranışı takviyenin ise özellikle takviyenin merkezine doğru sünek bir tavır sergilediğini söylemek mümkündür.



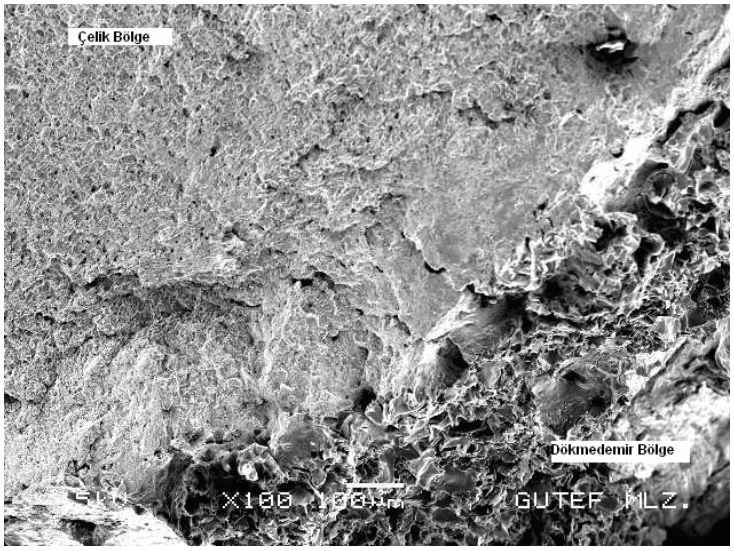
Şekil 6.35. Isıl işlemsiz oda sıcaklığında kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü

Şekil 6.36.'da oda sıcaklığında Charpy deney numunesine tabi tutulmuş 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli numunenin geçiş bölgesi kopma görüntüsü görülmektedir. Burada numunenin matriks yapısının gevrek takviye elemanının ise sünek koptuğu görülmektedir. Ayrıca ısıl işlemsiz numunede görülen matriks takviye elemanı ayrışması bu numunede normalizasyon sıcaklığının etkisi ile biraz daha azalmıştır.



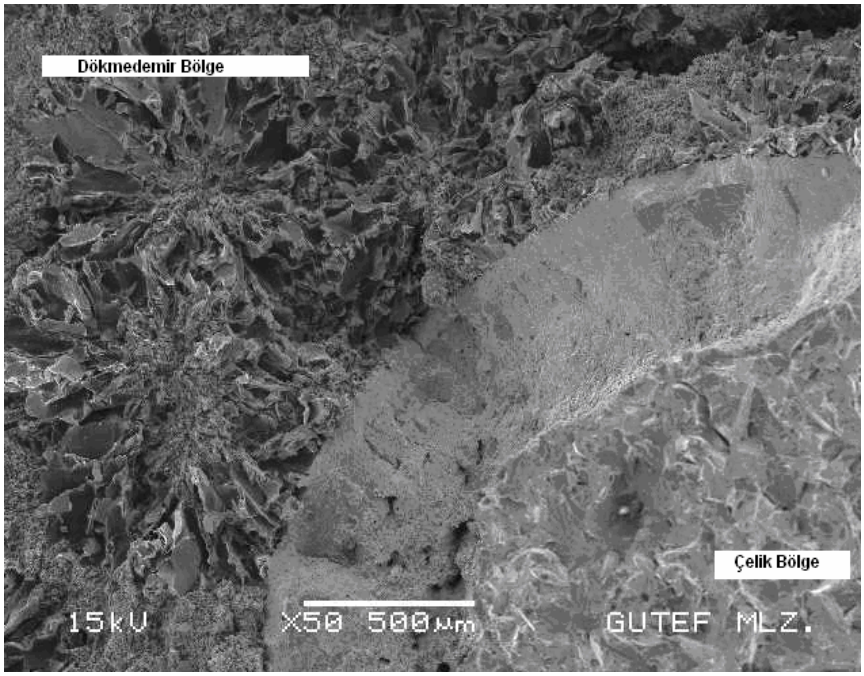
Şekil 6.36. 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli oda sıcaklığında kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü

Şekil 6.37.'de oda sıcaklığında Charpy deney numunesine tabi tutulmuş 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin geçiş bölgesi kopma görüntüsü görülmektedir. Darbe enerjisi en yüksek olan 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli numunelerde takviye elemanının merkezinde sünek çukurların çok fazla olduğu görülmektedir. Aynı zamanda bu numunede sünek kırılmanın matriks yapıda daha belirgin olduğu görülmektedir. Tüm numunelerin geçiş bölgesi daha düzgün tavırda kopmuştur. Bunun nedeni tüm numunelerde geçiş bölgesinin sertliğinin daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.37. 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli oda sıcaklığında kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü

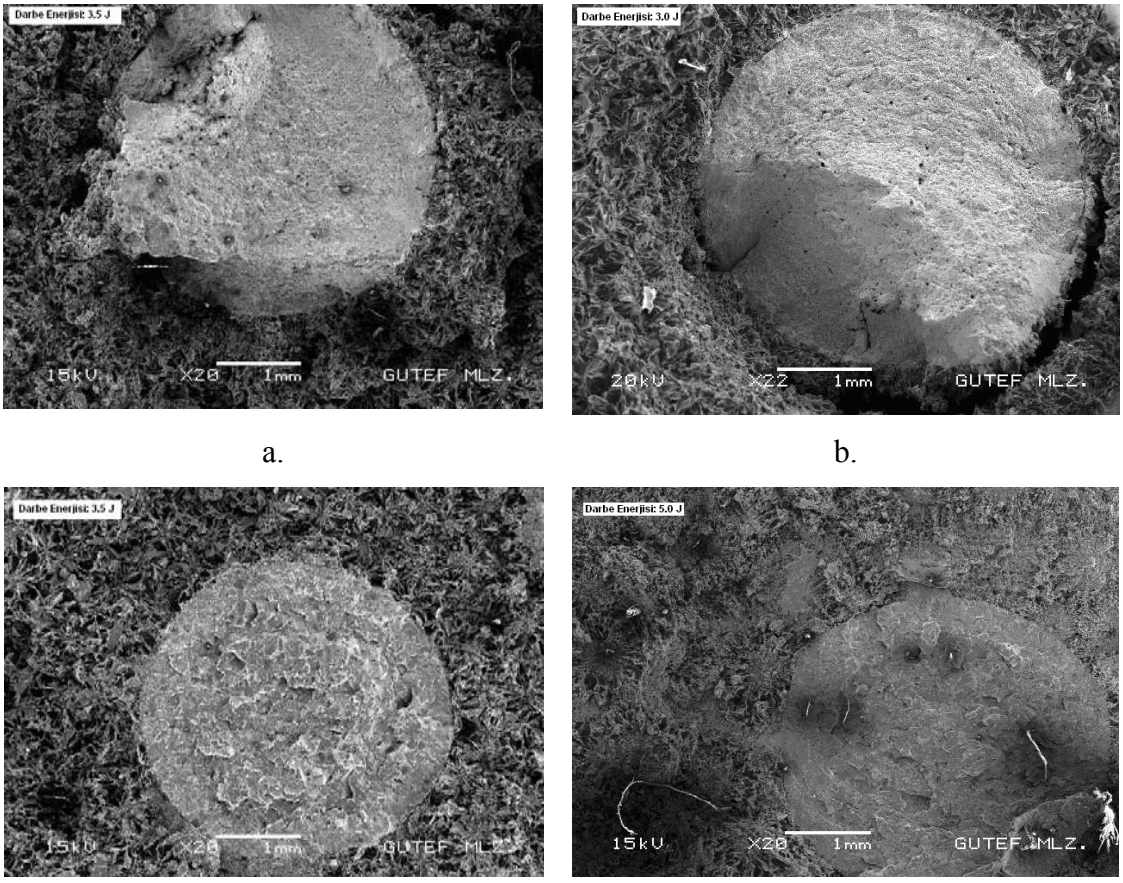
Şekil 6.38.'de oda sıcaklığında Charpy deney numunesine tabi tutulmuş 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli kompozit numunenin geçiş bölgesi kopma görüntüsü görülmektedir. Bu numunede oda sıcaklığında darbe deneyine tabi tutulan diğer numunelerde görülen matriks takviye ayrışmasının bu numunede normalizasyon ısıl işlem sıcaklığının etkisi ile, hemen hemen kaybolduğu görülmektedir. Bu numunede de diğer numunelerdeki gibi matriks, geçiş bölgesi ve yüksek karbonlu çelik bölgesi gevrek kırılmış, takviye elemanının merkezine doğru gevrek kırıldığı görülmektedir.



Şekil 6.38. 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli oda sıcaklığında kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü

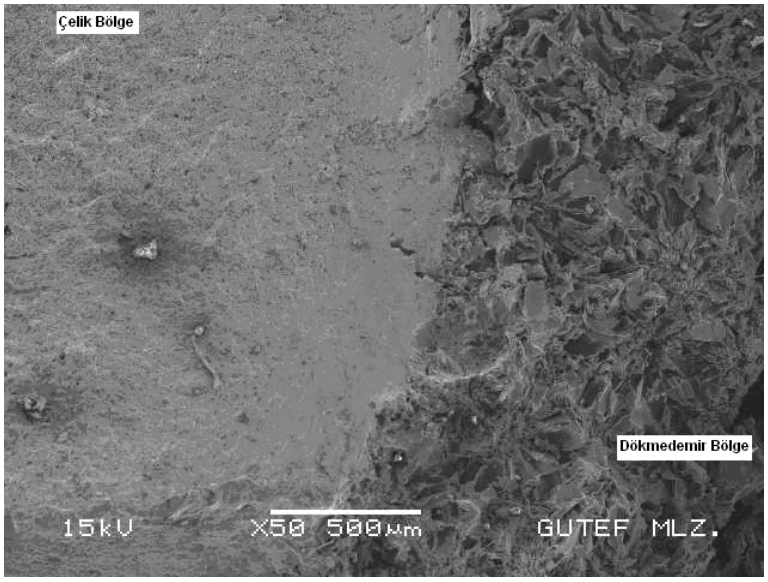
6.6.3. 0 ^{0}C sıcaklıkta kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüleri

Şekil 6.39.'da 0 ^{0}C de darbe deneyine tabii tutulan kompozit numunelerin kırık yüzeylerinin TEM görüntüleri görülmektedir. Isıl işlemsiz numune ve 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli numunelerde matriks takviye ayrışması meydana gelmiştir. Kırılmanın nedeni darbenin etkisi ile bir kenar çatlağı oluşması ve takviye elemanına doğru büyüme sonucu gerçekleşmiştir. Isıl işlemsiz numunede matriks gevrek kırılma, takviye elemanında ise sünek kırılma olduğunu söylemek mümkündür. Isıl işlemsiz numunelerin dışındaki numunelerin tamamında ise gevrek kırılma şeklinde gerekleşmiştir. Genel olarak tüm numunelerin kırılma tavrının oda sıcaklığındakiler daha benzer olduğu görülmektedir.



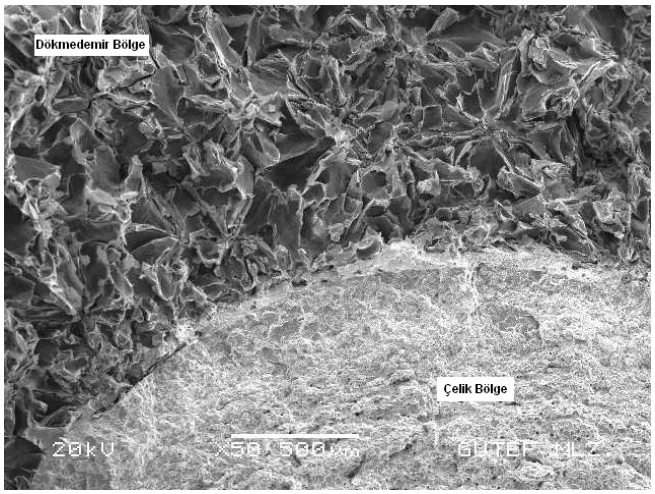
Şekil 6.39. 0 ^{0}C de kırılmış Charpy deneyi kompozit numunelerin kırık yüzeyleri a. ısıl işlemsiz b. 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli c. 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli d. 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli

Şekil 6.40.'da ısıl işlemsiz 0 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü görülmektedir. Bu numunede oda sıcaklığında kırılan numuneler gibi davranmış takviye matriks arasında iyi bir bağ oluşmamasından dolayı takviye matriks ayrışması meydana gelmiştir. Bu ayrışma oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen görüntülerden de a numunelerden elde edilen görüntülerde görüldüğü gibi 0 ^{0}C de takviyeli numunelerin geçiş bölgesi kırılma yüzeylerinde görüldüğü gibi ısıl işlemsiz 800–850 ^{0}C ısıl işlemleri numuneleri takviye ve matriks ara yüzeylerinde ayrışma vardır.



Şekil 6.40. Isıl işlemsiz 0 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü

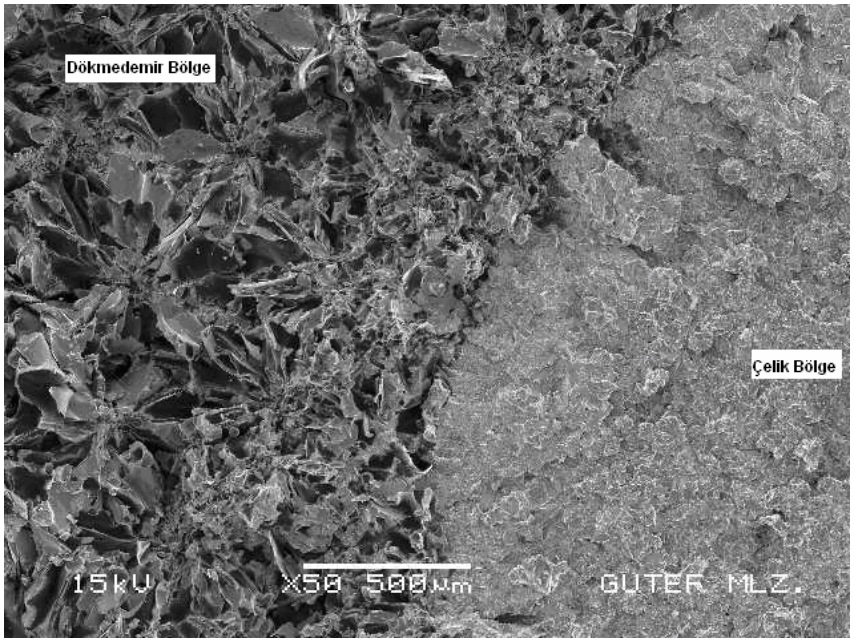
Şekil 6.41.'de 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli 0 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü görülmektedir. Şekilde de görüldüğü numune matriks ve takviyenin geçiş bölgesinde düzgün kırılma (gevrek kopma) belirgin bir şekilde görülmektedir. Takviyenin merkezine doğru kırılma sünek olarak gerçekleşmiştir. Numunede iyi bir arayüzey oluşmadığı da görülmektedir.



Şekil 6.41. 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli 0 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü

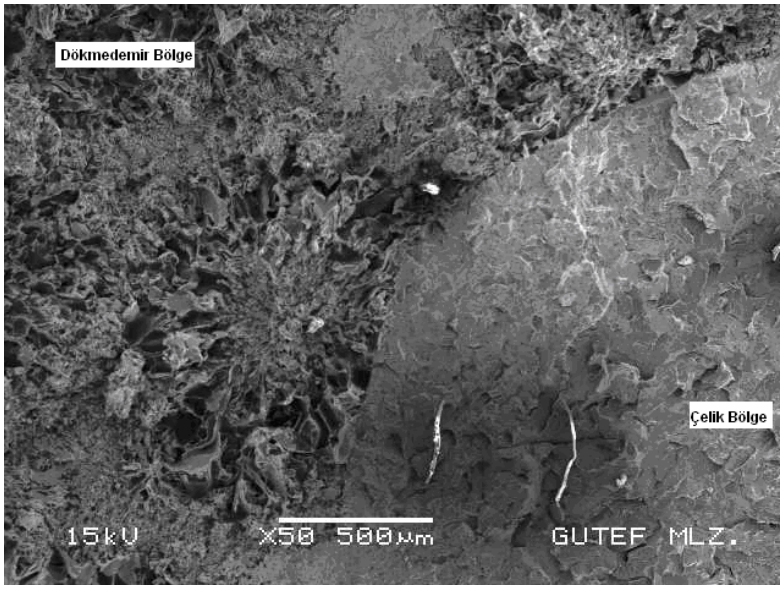
Şekil 6.42.'de 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli 0 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü görülmektedir. Bu numunede kırılmanın genel olarak

gevrek gerçekleştiği görülmektedir. Oda sıcaklığında kırılan deney numunelerinde matriks ve takviye elemanının karbon alan bölgelerindeki gevrek kırılma şekli bu numunenin genelinde hakimdir.



Şekil 6.42. 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli 0 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü

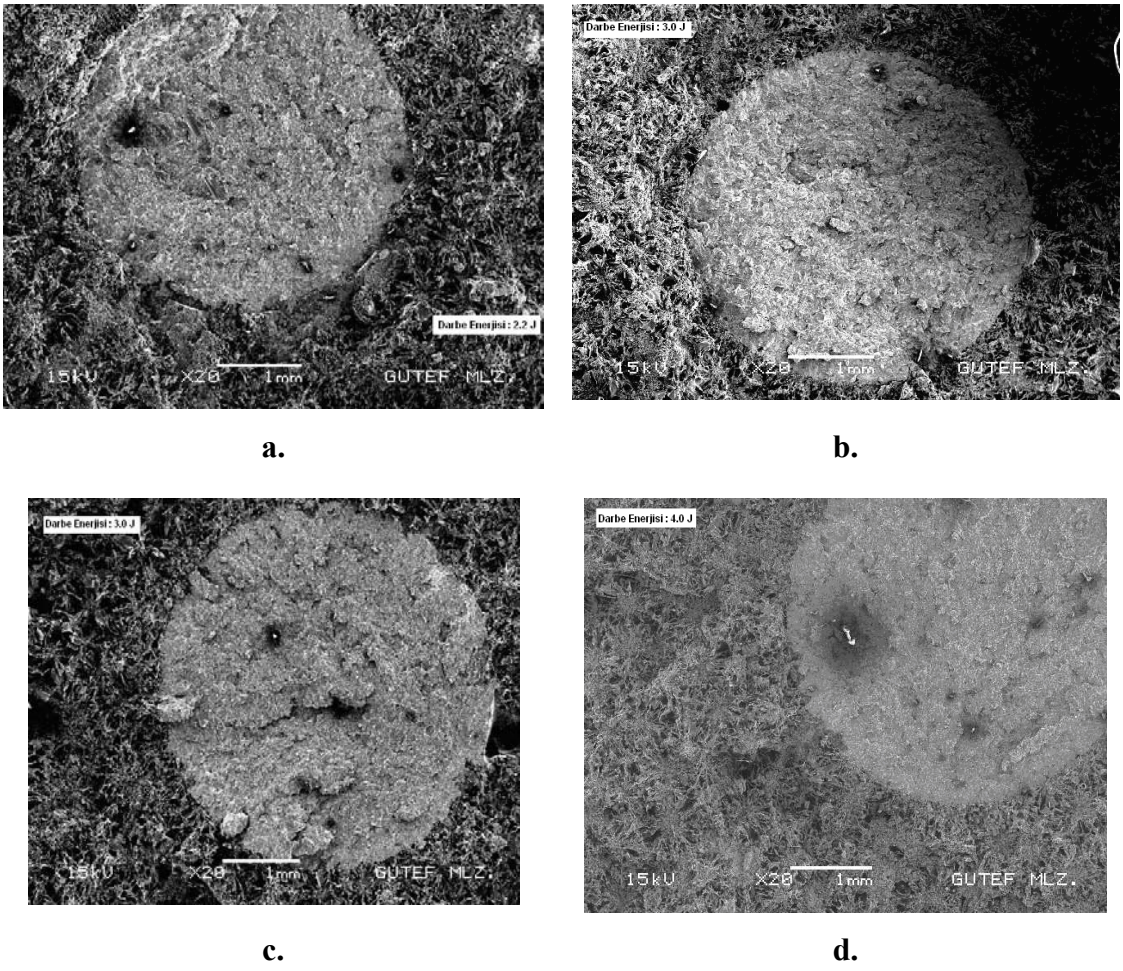
Şekil 6.43.'de 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli 0 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü görülmektedir. Ancak 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli numunenin takviye ve matriks ara yüzeyinde ayrışma yoktur. Bu gösteriyor ki darbe enerjisinin takviye elemanı iletmiştir. Böylece bu numunenin takviye elemanındaki ince sünek kırılmalara neden olmuştur. Bu nedenle bu numunenin (900) darbe direnci bu sıcaklıkta fazla çıkmıştır. Isıl işlemsiz numunenin matriks yapısı her ne kadar sürek tavırda ise de, ara yüzeyin ayrışması darbe enerjisinin düşüşüne neden olmuş olabilir.



Şekil 6.43. 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli 0 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü

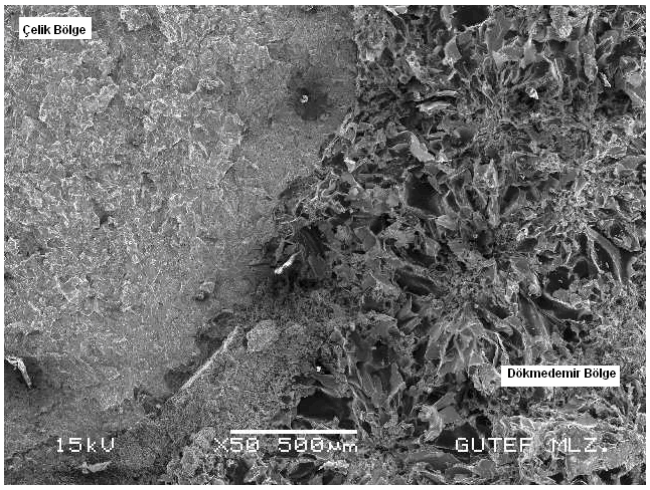
6.6.4. -80 ^{0}C sıcaklıkta kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüleri

Şekil 6.44.'te -80 ^{0}C de darbe deneyine tabii tutulan kompozit numunelerin kırık yüzeylerinin TEM görüntüleri görülmektedir. -80 ^{0}C de yapılan deneylerde numunelerin yüzeylerinde düzgün bir kırılma gerçekleşmiştir. -80 ^{0}C de kırılan kompozit numunelerin her ne kadar bölgesel süneklik olsa da, tamamının gevrek kırıldığını söylemek mümkündür.



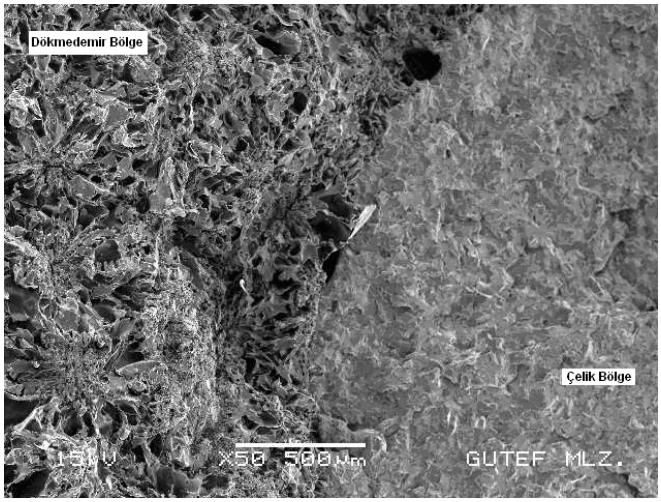
Şekil 6.44. -80 ^{0}C de kırılmış Charpy deneyi kompozit numunelerin kırık yüzeyleri a. ısıl işlemsiz b. 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli c. 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli d. 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli

Şekil 6.45.'te ısıl işlemsiz -80 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü görülmektedir. Isıl işlemsiz numunede hem takviye hem matrikste diğerlerine göre nispeten daha sünek kopma meydana gelmiştir. Ama numunelerin tamamında çelik sünekliğini kaybetmiştir ve gevrek kırılma meydana gelmiştir. Isıl işlemsiz tane boyutu diğer numunelere göre daha büyük olduğundan dolayı sünek alanların daha iri boyutta ve belirgin bir şekilde ortaya çıkmasına neden olmuştur.



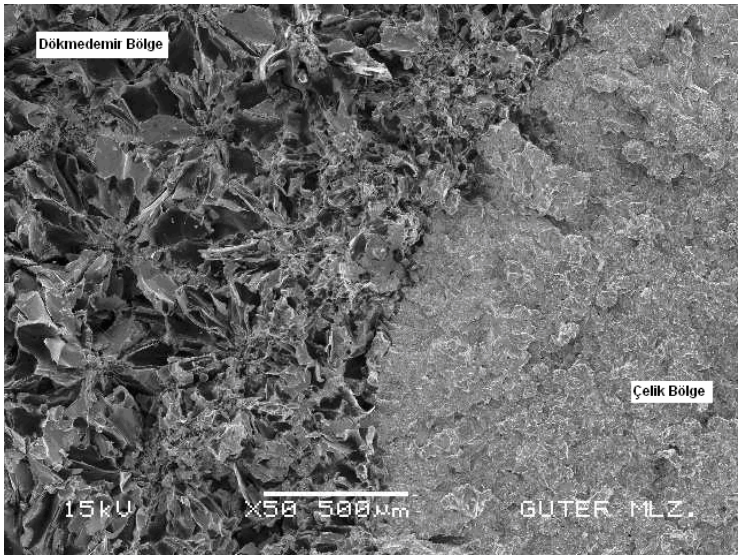
Şekil 6.45. Isıl işlemsiz -80 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü

Şekil 6.46.'da 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli -80 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü görülmektedir. Isıl işlem sıcaklığı arttıkça bu sünek alanların azaldığı gözlenmektedir. 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli numunenin, özellikle matriksinin kırılma tavrı ısıl işlemsiz numuneye benzerlik göstermektedir. Aynı zamanda, bu numunede takviye elemanının kırılma şeklinin tane boyutunun ince olması ve kırılma sıcaklığından dolayı daha düzgün gerçekleştiği görülmektedir.



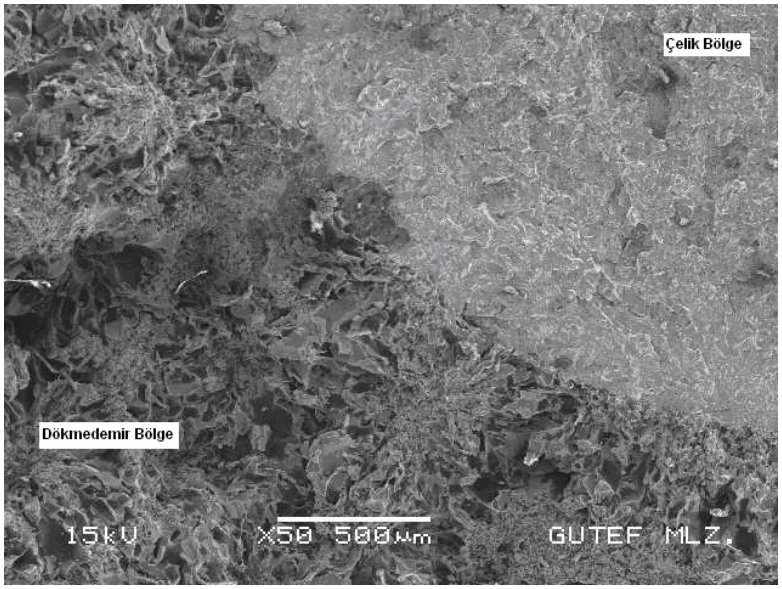
Şekil 6.46. 800 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli -80 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü

Şekil 6.47.'de 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli -80 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü görülmektedir. Bu numunede genel olarak kopma şekli gevrektir, fakat az da olsa takviye elemanının merkezine doğru sünek bölgeler vardır.



Şekil 6.47. 850 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli -80 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü

Şekil 6.48.'de 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli -80 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü görülmektedir. 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli numunelerde takviye elemanının çok daha düzgün ve gevrek koptuğu görülmektedir. Matriks yapının kopma yüzeyleri ince sünek çukurları (dimple-hole) şeklinde gerçekleşmiş, bu da bu numunelerde matriks yapının diğerlerine göre daha ince taneli olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 6.48. 900 ^{0}C normalizasyon ısıl işlemli -80 ^{0}C de kırılmış Charpy deney numunesi TEM görüntüsü

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Düşük karbonlu çelik elyaf takviyeli kır dökmedemir kompozit malzemenin üretildiği bu çalışmada, çekme numunelerinde hacimsel olarak % 4.76 takviye oranı elde edilmiştir. Darbe numunelerinde hacimsel olarak %12.5 çelik kullanılmıştır. Çekme ve darbe numuneleri ısıl işlem yapılmayacak numunelere gerilim giderme işlemi yapılmış diğer numuneler ise sonra 800, 850 ve 900 ^{0}C de normalizasyon ısıl işlemine tabii tutulmuşlardır. Gerilim giderme ve normalizasyon ısıl işlemine tabi tutulan numuneler çekme deneyine yapılmış ve aynı numunelerin mikroyapı ve kırık yüzeylerinin TEM görüntüleri de incelenmiştir. Darbe numuneleri -80, 0 ve 27 ^{0}C sıcaklıklarda darbe dayanımları ölçülmüş ve kırık yüzeyleri TEM cihazında incelenmiştir. Yapılan deneyler ve incelemelerle aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Çekme dayanımı açısından dökmedemir numunelere göre kompozit numunelerin çekme dayanımında %50-90 arasında artış gösterimiştir.

2. Normalizasyon ısıl işleminin çekme dayanımına etkisi olduğu da görülmüştür. Isıl işlemsiz kompozit numuneye göre 900 ^{0}C ısıl işlemli kompozit numunenin çekme dayanımı %47 daha fazla olmuştur.

3. Kompozit deney numunelerinde mekanik özelliklerin iyileşmesinde etkin parametrenin takviye elemanı olduğu görülmüştür. Mekanizma olarak da kompozitin mekanik özelliklerinin iyileşmesinde en önemli faktör arafaz oluşumudur. Arafaz oluşumu hem döküm esnasında hem de yapılan normalizasyon ısıl işlemi sırasında oluşmuş, sıcaklık artışı ile de etkisi artmıştır.

4. Normalizasyon ısıl işlem sıcaklığı ile hem dökmedemir hemde kompozit numunelerin test edilen mekanik özelliklerinde artışlar meydana gelmiştir.

5. Numunelerin sertlik dağılımında kompozit numunelerin tamamında geçiş bölgesinde sertlik en fazla, dökmedemir ve takviye elemanındaki sertlik normalizasyon ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak önemli bir değişim göstermemiş ancak geçiş bölgesindeki sertlik değerlerinde artmıştır. Geçiş bölgesindeki sertlik ısıl işlemin etkisiyle %26 artmıştır.

6. Normalizasyon ısıl işlem sıcaklığı ile matriks yapıdan takviye elemanına C difüzyonun arttığını göstermektedir. Bunun nedeni; geçiş bölgesi ısıl işlem sıcaklığına

bağlı olarak karbon ve silisce Geçiş bölgesi ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak karbon ve silisce zenginleşmesi ile açıklanabilir.

7. Geçiş bölgesi mikroyapıları incelendiğinde takviye elemanı matriks arasında bir arayüzey bağının oluştuğu gözlenmiştir. Bu bağ ısıl işlemsiz numunelerde döküm esnasında meydana gelirken ısıl işlemli numunelerde ısıl işlem sıcaklığının artışı ile matriks ile takviye arasındaki nüfuziyetin iyileştiği tespit edilmiştir. Oluşan arafazlarda matriks ile kompozitin difüzyona bağlı olarak tane boyutlarının değişiklik gösterdiği görülmüştür.

8. Normalizasyon ısıl işlem sıcaklıklarının darbe dayanımına çok fazla etkisinin olmadığı, darbe dayanımında asıl etkin parametrenin takviye elemanı ve deneylerin yapıldığı ortam sıcaklığının olduğu görülmüştür.

9. Darbe deneyine tabii tutulmuş kırık yüzeylerin incelemelerinde oda sıcaklında kompozit numunelerde matriks ile takviye elemanı farklı modda kırılmıştır. Bu numunelerde takviye elemanının sünek matriksin in ise gevrek kırıldığı görülmüştür.

10. Darbe deneylerinde takviye elemanı ile matriks arasında belirgin bir ayrılma gözlenmiştir. 0 ve -80 ^{0}C de yapılan darbe deneylerinde kırılma yüzeyleri hem matriks hem de takviye elemanı için daha çok gevrek modda olduğu görülmüştür. Bu durum, oda sıcaklığında sünek kırılan takviye elemanının sıcaklık düştüğünde gevrekleştiğini göstermektedir.

Kır dökmedemir kompozit malzemeleri çalışmaları için aşağıdaki öneriler getirilebilir.

1. Dökmedemir kompozit çalışmalarında, ısıl işlem sıcaklıkları, ısıl işlem süresi ve ilave ısıl işlemler uygulamak suretiyle daha iyi mekanik özellikler elde edilebilir.
2. Daha net mikroyapı görüntüleri elde etmek için dağlama esnasında silisin dağlamayı geciktirdiği dolayısıyla matriks, takviye ve geçiş bölgesi için farklı dağlama ve dağlama süresi uygulanabilir.
3. Matriks ve takviye elemanının kimyasal bileşimi değiştirilerek farklı MMK üretilebilir.
4. Darbe deneylerinde geçiş sıcaklığını tespit edebilmek için ortam sıcaklığının daha sık aralıklarla yapılabilir.

5. Matriks ve takviye elemanın kompozit içerisindeki oranları, geometrisi, orayantasyonu değiştirilerek, bu faktörlerin mekanik özellikler araştırılabilir.

8. KAYNAKLAR

Akdemir, A., Arıkan, H., Kuş, R., 2005, Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of Steel Fibre–Cast Iron Composites, Materials Science and Technology, Vol. 21, No: 9, pp 1099-1102.

Arikan H., Avci A., Akdemir A., 2004, Fracture Behavior of Steel Fibre Reinforced Polymer Composite, Polymer Testing, Vol. 23, No: 6, pp 615-619.

Agarwala V., Satyanarayama K.G., Agarwala R.C., 1999, Studies on Development of Aluminum Alloy-Mild Steel Reinforced Composite, Material Science and Engineering A, 270, pp 210-218.

Aslantaş, K., Talaş, S., Taşgetiren, S., 2004, Fracture of a Compressor Rotor Made from Gray Cast Iron, Engineering Failure Analysis, Vol. 11, pp 369-373.

ASTM-A247-67, Standard Method for Evaluation the Microstructure of Graphite in Iron Castings, American Society for Testing and Materials.

ASTM-E92-72, Standard Method of Hardness Vickers of Materials, American Society for Testing and Materials.

ASTM-E23-82, Impact Testing of Metallic Materials, American Society for Testing and Materials.

ASTM- E8-69, Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials, American Society for Testing and Materials.

Bader, M., 1984, Alumina Fiber Reinforced Aluminum Alloy Casting for Automotive Applications, International Association for Vehicle Design Congress, Geneva, Switzerland.

Banks L., Sills, Leiderman, V., 1999, Macromechanical Material Model for Fibre Reinforced Metal Matrix Composites, Composite Part B, Vol. 30, pp 443–452.

Baydoğan M., Çimenoğlu H., 2001, Demir-Karbon Alaşımlarının Fiziksel Metalurjisi, Çelik ve Dökmedemirlerin Metalografisi ve Mekanik Muayenesi Kursu, Metalurji Mühendisleri Odası Yayını, İstanbul.

Berns, H., 2003, Comparison of Wear Resistant MMC and White Cast Iron, Wear, Vol.254, p 47.

Blucher, J.T., Narusawa, U., Katsumata, M., Nemeth, A., 2001, Continuous Manufacturing of Fiber Reinforced Metal Matrix Composite Wires-Technology and Product Characteristics, Composites: Part A, Vol.32, pp 1759-1766.

Cingi, M., Arısoy, F., Başman, G., Şeşen, G., 2002, The Effect of Metallurgical Structure of Different Alloyed Glass Mold Cast Irons on the Mold Performance, Materials Letters, Vol.55, pp 360-363.

Chenje, T.W., Simbi, D.J., Navara, E., (2004), Relationship Between Microstructure, Hardness, Impact Toughness and Wear Performance of Selected Grinding Media for Mineral Ore Milling Operations, Materials and Design, Vol.25, pp 11–18.

Clyne, T.W., Bade, M.G., Cappleman, G.R. and Hubert, P.A., 1985, The Use of Alumina Fibre for Metal Matrix Composites, Journal of Material Science, Vol. 20, p 25.

Çıtak, R., 1998, Metalik Baryum-Alüminyum Başlangıç Tozlarının Düşük Sıcaklıkta Oksidasyonu ile Alüminyum Metal Kompozit Üretimi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Davis, J. R., (Ed.), (1996), Cast Irons, ASM Specialty Handbook, US.

Dieter G.E., 2001, Mechanical Metallurgy, McGraw Hill Book Co. London.

Donald, R.A. (Ed.), 1988, Composite Materials, The Science and Engineering of Materials, SI Edition, Van Nostrand Reinhold. Co. Ltd., pp 507-546.

Ellis, J., 1996, Joining of Aluminium Based Metal Matrix Composites, International Materials Reviews, Vol. 41, No.2, pp 41-58.

Fang. D., Liu T., 1999, Fiber Reinforcement of Metal Matrices Against Plastic Flow, Materials Characterization, Vol.43, pp 1–9.

Ferguson B.L., Li, Z., Freborg A.M., 2005, Modeling Heat Treatment of Steel Parts, Computational Materials Science, Vol. 34, pp 274-281.

Fernand E. Zihui X., 2001, Rate-dependent Constitutive Modeling and Micromechanical Analysis of Fibre Reinforced Metal Matrix Composites, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 49, No:11, pp 2543-2555.

Fukunage, H., 1998, Advanced Material Manufacturing Process, 4, 669.

Ganesh, V.V., Lee, C.K., Gupta, M., 2002, Enhancing the Tensile Modulus and Strength of an Aluminum Using Interconnected Reinforcement Methodology, Materials Science and Engineering, No.A333, pp 193–198.

Gonzaga, R.A., Carrasquilla, J. F., 2005, Influence of an Appropriate Balance of the Alloying Elements on Microstructure and on Mechanical Properties of Nodular Cast Iron, Journal of Materials Processing Technology, Vol.162–163, pp 293–297.

Hashim, J., Looney, L., Hashmı, M.S.J., 1999, Metal Matrix Composites Production by the Stir Method, Journal of Material Process Technology, Vol. 1, pp 92-93.

Hashim, J., Looney, L., Hashmi, M. S. J., 2002, Particle Distribution in Cast Metal Matrix Composites-Part 1, Journal of Materials Processing Technology Vol. 123, pp 251-257.

Hayden H.W., Moffat W.G., Wulff J., 1965, The Structure and Properties of Materials, Vol. 3, p 12.

Hoover W.R., 1994, The Commercialization of Castable Aluminum Composites, Proc 2nd International Conference on Cast Metal Matrix Composites, USA, AFS, pp 1-8,

Hsu, C.H., Shy, Y.H., Yu, Y.H., Lee, S.C., 2000, Effect of Austempering Heat Treatment on Fracture Toughness of Copper Alloyed Gray Iron, Materials Chemistry and Physics, Vol. 63, pp 75-81.

Ismar H., Schröter F., Streicher F., 2001, Effects of Interfacial Debonding on the Transverse Loading Behavior of Continuous Fibre-Reinforced Metal Matrix Composites, Computers & Structures, Vol. 79, No:18, pp 1713-1722.

Kawamata A. Mishai H. Kaneko Y. Kirikoshi K., Controlling Fracture Toughness of Matrix for Ductile Fibre Reinforced Cementatious Composites, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 69, pp 249-265.

Kayalı, E., S., Ensari, C., ve Dikeç, F., 1983, Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İ.T.Ü. Matbaası, Istanbul.

Kelly, A., Davies, G.J., 1965, The Principles of the Fibre Reinforced Metals, Met. Rev., pp 10-37.

Lienert, T., Lane, C.T., Gould, J.E., 1993, Selection and Weldability of Aluminum Metal Matrix Composites, Welding, Brazing and Soldering, ASM Handbook, Vol:6, pp 554-559.

Muller F., Monaghan J., 2000, Non-conventional Machining of Particle Reinforced Metal Matrix Composite, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 40, pp 1351–1366.

Nozruzov, G.D., 1999, Process of Graphization in Gray Cast Iron, Metal Science and Heat Treatment, Vol. 41, No.11-12, pp 491-494.

Özdemir, N., Aksoy, M., Orhan, N., 2003, Effect of Graphite Shape in Vacuum-Free Diffusion Bonding of Nodular Cast Iron with Gray Cast Iron, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 141, pp 228-233.

Peng HX. Fan Z., Muther D.S., Evans J.R.G., 2001, Microstructures and Mechanical Properties of Engineered Short Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites, Journal of Material Science and Engineering, Vol. 335, No:1-2, pp 207-216.

Rohatgi P. (Ed.), 1990, Solidification of Metal Matrix Composites, USA: TMS publication.

Srivatsan, T.S., Sudarshan, T.S., 1999, The Influence of Phosphorus on Shrinkage Porosity in Cast Irons, Materials Letters, Vol.41, pp 186-191.

Sun, S., Pugh, M., 2001, Fabrication and Mechanical Properties of Steel-Steel Composites, Materials Science and Engineering A, Vol. 300, pp 135-141.

Surappa M.K., (Ed.), 1996, Inorganic Matrix Composites, USA, TMS.

Şahin, Y., 2000, Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitapevi, Ankara.

Taghiabadi R., Mahmoudi M., Emamy G.M., Jampbell J., 2003, Effect of Casting Techniques on Tensile Properties of Cast Aluminum Alloy (Al-Si-Mg) and TiB_2 Containing Metal Matrix Composite, Materials Science and Technology, Vol. 19, pp. 497-502.

Taha M. A., El Mahallaawy NA. (Ed.), 1993, Advances in Metal Matrix Composites, Trans Teach Publications, Switzerland.

Taha, A.M., 2001, Practicalization of Cast Metal Matrix Composites (MMCCs), Materials and Design, Vol.22, pp 431-441.

Taya, M. and Arsenault RJ., 1988, Metal Matrix Composites-Thermal and Mechanical Behavior, Pergamon Press.

Taylor, M., Lydon, F.D., Barr, B.I.G., 1997, Toughness Measurements on Steel Fiber-Reinforced High Strength Concrete, Vol. 19, pp 329-340.

Toktaş G., Tayanç M., Toktaş A., 2006, Effect of Matrix Structure on the Impact Properties of an Alloyed Ductile Iron, Materials Characterization, Vol. 57, pp 290-299.

Traino A.I., Yusupov V.S., Kugushin A.A., Formation of the Microstructure and Properties in Deformation Heat Treatment of High-Strength Cast Iron with Globular Graphite, Metal Science and Heat Treatment, Vol. 41, No:11, pp 486-490.

Trumper, RL, 1987, Metal Matrix Composites Applications and Prospects, International Journal of Metals, Vol. 663, pp 3-11.

TS EN 138, 1978, Çekme Deneyleri, Türk Standartları.

Wu Y., Jie L., Keru W., 2003, Mechanical Properties of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete at Low Fiber Volume Fraction, Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp 27–30.

Xu, W., Ferry, M., Wong, Y., 2004, Influence of Alloying Elements on As-Cast Microstructure and Strength of Gray Cast Iron, Materials Science and Engineering A, Vol. 390, pp 326-333.

Xun, Y. W., Tan M. J., Zhou, J. T., 2000, Processing and Interface Stability of SiC Fiber Reinforced Ti-15V, 3Cr Matrix Composites, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 102, pp 215-220.