

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**PARÇACIK TAKVİYELİ AL MATRİSLİ
KOMPOZİTLERİN YORULMA ÇATLAK İLERLEME
HIZI VE YORULMA ÇATLAK İLERLEME
MEKANİZMALARI**

**Hazırlayan
Eşref ÇAKIR**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Adem KARCI**

Yüksek Lisans Tezi

**Ağustos 2016
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SİVİL HAVACILIK ANABİLİM DALI**

**PARÇACIK TAKVİYELİ AL MATRİSLİ
KOMPOZİTLERİN YORULMA ÇATLAK İLERLEME
HIZI VE YORULMA ÇATLAK İLERLEME
MEKANİZMALARI**

(Yüksek Lisans Tezi)

**Hazırlayan
Eşref ÇAKIR**

**Danışman
Yrd. Doç. Dr. Adem KARCI**

**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
Tarafından FYL-2014-5612 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Ağustos 2016
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Eşref ÇAKIR

YÖNERGEYE UYGUNLUK

“Parçacık Takviyeli Al Matrisli Kompozitlerin Yorulma Çatlak İlerleme Hızı ve Yorulma Çatlak İlerleme Mekanizmaları” adlı Yüksek Lisans, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Hazırlayan

Eşref ÇAKIR

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Adem KARCI

Anabilim Dalı Başkanı

Prof. Dr. İlker YILMAZ

Yrd. Doç. Dr. Adem KARCI danışmanlığında **Eşref ÇAKIR** tarafından hazırlanan “**Parçacık Takviyeli Al Matrisli Kompozitlerin Yorulma Çatlak İlerleme Hızı ve Yorulma Çatlak İlerleme Mekanizmaları**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Sivil Havacılık** Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

..... / /

JÜRİ:

Danışman :

Üye :

Üye :

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun tarih vesayılı kararı ile onaylanmıştır.

..... / /

Prof. Dr. Mehmet AKKURT

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmamda büyük katkı sahibi olan, yakın ilgi ve yardımlarını esirgemeyen, farklı bakış açıları ve bilimsel katkılarıyla beni aydınlatan tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Adem KARCI 'ya ve özellikle deneysel çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Doç. Dr. Fehmi NAİR, Yrd. Doç. Dr. Veysel ERTURUN ve Yrd. Doç. Dr. Murat AYDIN hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca; çalışmalarım süresince sabır göstererek beni daima destekleyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Eşref ÇAKIR

Kayseri, Ağustos 2016

PARÇACIK TAKVİYELİ AL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN YORULMA ÇATLAK İLERLEME HIZI VE YORULMA ÇATLAK İLERLEME MEKANİZMALARI

Eşref ÇAKIR

**Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 2016
Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Adem KARCI**

ÖZET

Bu çalışmada Al esaslı SiCp takviyeli alüminyum alaşımlı kompozitlerde partikül oranına bağlı olarak yorulma çatlak ilerleme hızının ve mekanizmalarının sabit genlikli yükleme altında belirlenmesi amaçlanmıştır. Alüminyum matrisli seramik parçacık takviyeli kompozitler, ticari Al alaşımları ile karşılaştırıldığında, yüksek spesifik mukavemet, rijitlik, yüksek aşınma direnci, artan sertlik ve bazı koşullarda iyi yorulma direncinden dolayı uçak, uzay araçları ve otomotiv komponentlerinin yapısal parçalarında kullanımı artmaktadır. Bu malzemelerin özellikleri; matris malzeme ve parçacık özellikleri, parçacık hacim oranı, boyutu, üretim yöntemi, üretim sonrası uygulanan haddelme, ekstrüzyon ve ısıt işlemlerden etkilenmektedir. SiCp takviyeli Al matrisli malzemelerin yorulma çatlak ilerleme davranışlarının anlaşılması, mikro-yapı kompozisyonlarının tasarlanması ve optimizasyonu sonucunda bu malzemelerin yorulma çatlak ilerleme dayanımlarının geliştirilmesi hasar toleranslı yapısal parça uygulamaları açısından çok önemlidir. Bu çerçevede literatürde henüz araştırılmakta olan SiCp takviyeli Al matrisli kompozit malzemelerin hasar toleranslı yapısal parçalarda kullanılabilme potansiyeli olmasına rağmen bu alanda kullanımları günümüze kadar sınırlı kalmıştır.

Çalışma kapsamında yorulma çatlak başlangıç, yorulma çatlak ilerleme mekanizmalarının belirlenmesi ve yorulma dayanımlarının geliştirilmesi öngörülen %5, 10, 15 hacim oranında SiCp takviyeli 2124 Al alaşım kompozit toz metalurjisi (TM) üretim tekniği ile üretilerek ve ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra ASTM E647 standartlarına göre yorulma numuneleri ile ASTM E399 standartlarında göre çekme numuneleri üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin temel mekanik özelliklerini belirlemek için çekme ve yorulma testleri yapılmıştır. Gerilme oranı $R=0,1$ alınarak sabit genlikli yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mikro yapı analizleri ile

homojen partikül dağılımı, yorulma ve çekme numunelerinin kırık yüzeyleri incelenmiştir.

Özellikle uçak yapısal parçaları için bu malzemelerin, hasar tolerans tasarımının bir gereği olarak, yorulma çatlak başlangıcı, yorulma çatlak ilerleme hızı ve davranışının karakterize edilmesi hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Metal Matriks kompozit, Yorulma çatlak ilerlemesi, sabit genlikli yükleme

FATIGUE CRACK GROWTH RATE AND FATIGUE CRACK GROWTH MECHANISMS IN PARTICLE REINFORCED AL MATRIX COMPOSITES

Eşref ÇAKIR

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M. Sc. Thesis, August 2016

Thesis Supervisor: Assis. Prof. Dr. Adem KARCI

SUMMARY

The goal of this work is to obtain that based Al reinforced SiCp Al alloy composites under constant load amplitude depending on particle ratio to determine the fatigue crack growth rate and mechanisms. Aluminum matrix ceramic particles reinforced composites, compared with the commercial Al alloys, high specific strength, stiffness, high wear resistance, increased hardness and due to the good fatigue resistance in some circumstances are increasingly used in aircraft, space vehicle and the structural parts of automotive components. The characteristics of these materials; matrix material and the particle properties, the particle volume fraction, size, manufacturing method, applied after rolling production is affected by extrusion and heat treatment. SiCp reinforced Al matrix understanding of the fatigue crack growth behavior of materials, the design of the micro-structure of the composition and the development of fatigue crack growth resistance of these materials as a result of the optimization is very important in terms of damage tolerant applications of structural parts. In this context, the literature which is still under investigation SiCp reinforced Al matrix composite materials, although the potential for damage tolerant structural parts can be used up to now, their use has been limited in this area.

Within the scope of the work fatigue crack initiation , determination of fatigue crack growth mechanisms and the development of fatigue strength of predicted % 5, 10, 15 volume percent SiCp reinforced 2124 Al alloy composite with powder metallurgy (TM) production techniques have been produced and to be applied to the extrusion process. Then, according to ASTM E399 standard tensile specimens and fatigue specimens in ASTM E647 standard have been manufactured. Hardness and fatigue tests have been done to determine the basic mechanical properties of the produced composite. Stress ratio $R = 0.1$ based on constant amplitude fatigue tests have been done fatigue crack

growth under cyclic loading tests. Further, the homogeneous particle distribution and microstructural analysis, fatigue and tensile fracture surfaces of the samples were examined.

In particular, these materials for aircraft structural parts, as a requirement of damage tolerance design, the fatigue crack initiation, the fatigue crack growth rate and behavior is aimed to be very well characterized.

Keywords: Metal matrix composite, Fatigue crack growth, constant amplitude loading

İÇİNDEKİLER

PARÇACIK TAKVİYELİ AL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN YORULMA ÇATLAK İLERLEME HIZI VE YORULMA ÇATLAK İLERLEME MEKANİZMALARI

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK.....	ii
ONAY	iii
ÖNSÖZ/TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
SUMMARY	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMA VE SİMGELER.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv
GİRİŞ	1

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Giriş	3
1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
1.2.1. Yapısal bileşenlerinin şekline göre kompozit malzemeler partikül esaslı kompozitler	4
1.2.1.1. Partikül esaslı kompozitler	4
1.2.1.2. Fiber esaslı kompozitler	5
1.2.1.3. Tabaka yapılı kompozitler (Lamine kompozitler).....	6
1.2.1.4. Dolgu yapılı kompozitler	6
1.2.2. Ana yapıda kullanılan malzeme türüne göre	6

1.2.2.1. Polimer matrisli kompozitler	6
1.2.2.2.Seramik matrisli kompozitler	7
1.2.2.3. Metal matrisli kompozitler	8
1.2.3. Metal matrisli kompozitlerin kullanım yerleri ve uygulama alanları	9
1.3. Metal matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri	10
1.3.1.Katı faz üretim yöntemleri	10
1.3.2. Sıvı faz üretim yöntemleri	11
1.4. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri	13
1.5. Yorulma	15
1.5.1. Giriş	15
1.5.2. Çevrimsel yük tipleri ve yorulma teknik terimleri.....	16
1.5.3. Yorulma olayı aşamaları.....	18
1.5.4. Yorulma çatlak ilerleme mekanizmaları.....	23
1.5.5. Yorulma ömrünü etkileyen faktörler	27
1.5.6. Çatlak ucunda oluşan gerilmeler	30
1.5.7. Çatlak ucu plastik bölgesi	32

2. BÖLÜM

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzeme	41
2.2. Toz Metalurjisi Yöntemi İle Billet Üretimi	42
2.3. Biletlerin Ekstrüzyonu.....	44
2.4. Numune Hazırlama.....	47
2.4.1. Çekme numunesi hazırlama	47
2.4.2. CT Yorulma numunesinin hazırlanması.....	48
2.5. Yapılan Deneyler.....	49
2.5.1. Çekme deneyleri	49

2.5.2. Yorulma deneyleri.....	51
2.6. Mikroyapı ve Kırıkyüzey Analizleri.....	53
2.6.1. Mikroyapı çalışmaları.....	53
2.6.2. Optik mikroskop inceleme.....	53
2.6.3. SEM incelemeleri.....	54

3. BÖLÜM

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1. Çekme Deneyi Sonuçları	55
3.2. Yorulma Deney Sonuçları	60
3.2.1. Manuel çatlak boyu çevrim sayısı grafikleri.....	60
3.2.2. CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiği	63
3.2.3. Manuel ve CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiklerinin karşılaştırılması	66
3.2.4. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesi için geçen toplam çevrim sayısı	67
3.3. Mikroyapı İncelemeleri	68
3.3.1. Optik mikroskop incelemeleri	68
3.3.2. SEM İncelemeleri	71
3.3.2.1. Çekme numunelerinde kırık yüzeylerinin incelenmesi	71
3.3.2.2. Yorulma numunelerinin kırık yüzeylerinin İncelenmesi	72

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

KAYNAKÇA	80
ÖZGEÇMİŞ.....	84

KISALTMA VE SİMGELER

<u>Sembol</u>	<u>Anlamı</u>
MMK	Metal matrisli kompozit
TM	Toz metalürjisi
a	Çatlak boyu
N	Çevrim
σ_{max}	Maksimum gerilme
σ_{min}	Minimum gerilme
$\Delta\sigma$	Gerilme aralığı
σ_a	Gerilme genliği
R	Gerilme Oranı
K_t	Gerilme konsantrasyon faktörü
ΔK	Gerilme şiddet faktörü aralığı
ΔK_{th}	Eşik gerilme şiddet faktör aralığı
σ_a	Gerilme genliği
σ_m	Ortalama gerilme
K_{op}	Çatlak açılma
σ_x	x yönündeki normal gerilme
ASTM	American Society for Testing Materials
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
E	Elastik modül
f	Frekans
F	Yük

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Otomotiv sanayisinde MMK'lerin potansiyel uygulamaları	10
Tablo 2.1. AA2124'ün kimyasal içeriği (ağırlıkça %)	41
Tablo 2.2. CT Numunesinde çatlak boyu hesaplamaları için kullanılan sabitler	51
Tablo 3.1. 2124 Al alaşımlı takviyesiz numunelerde maksimum gerilmeye karşılık gelen maksimum yüzde uzama ve ortalamaları	56
Tablo 3.2. 2124 Al alaşımlı %5 takviyeli numunelerde maksimum gerilmeye karşılık gelen maksimum yüzde uzama ve ortalamaları	56
Tablo 3.3. 2124 Al alaşımlı %10 takviyeli numunelerde maksimum gerilmeye karşılık gelen maksimum yüzde uzama ve ortalamaları	57
Tablo 3.4. 2124 Al alaşımlı %15 takviyeli numunelerde maksimum gerilmeye karşılık gelen maksimum yüzde uzama ve ortalamaları	58
Tablo 3.5. Çekme deneyi sonucu takviyeli ve takviyesiz numunelerde maksimum gerilme, maksimum yüzde uzama	59
Tablo 3.6. 2124 Al Alaşımlı %5, %10 ve %15 takviyeli ve takviyesiz yorulma numunelerinde çatlak başlangıcı ve ilerlemesi için geçen toplam çevrim sayısı.....	68

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Değişik tipte fiber kompozitler.....	5
Şekil 1.2. Açılı tabakalara sahip bir kompozitin şematik gösterimi.....	6
Şekil 1.3. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler a) partikül takviyeli, b) kısa fiber takviyeli, c) sürekli fiber takviyeli	8
Şekil 1.4. Yorulma parametreleri ve gerilme tipleri	16
Şekil 1.5. Kayma bantlarından dolayı oluşan girinti ve çıkıntılar	18
Şekil 1.6. Çatlak başlangıcı için çeşitli bölgeler	19
Şekil 1.7. $da/dN - \Delta K$ şematik gösterimi	20
Şekil 1.8. Farklı gerilme oranlarında, takviyeli ve takviyesiz AA6061 alaşımında gerilme şiddet faktör aralığı, yorulma çatlak ilerleme hızı grafiği	21
Şekil 1.9. Takviyesiz Al6061 alaşımında ve parçacık takviyeli kompozitlerde yorulma çatlak ilerleme hızı, da/dN	22
Şekil 1.10: A356 alaşımı ve SiC/A2024 kompozitin çatlak kapanma davranışı	24
Şekil 1.11. Çatlak engellemesini gösteren çatlak profili; a) Al alaşımı, b) 2080/SiC/20 _p kompozit	25
Şekil 1.12. 2014/Al ₂ O ₃ -T6 metal matris kompozitte çatlak oluşum aşamaları.....	26
Şekil 1.13. Farklı ortalama gerilme seviyeleri için gerilme genliği-ömür grafiği.....	29
Şekil 1.14. Yükleme tipleri	30
Şekil 1.15. Çatlak ucu yakınındaki gerilmelerin durumu	31
Şekil 1.16. Çatlak ucundaki σ_y elastik gerilmesi	31
Şekil 1.17. Çatlak ucu plastik bölgesi	33
Şekil 1.18. Irwin analizinin şematik gösterimi	34
Şekil 1.19. Von Mises akma kriterine göre düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme plastik bölge şekilleri.....	37
Şekil 1.20. Orta kalınlıkta bir levhada kalınlık boyunca plastik bölge değişimi	37
Şekil 1.21. Çatlak kapanması	38

Şekil 1.22. Yorulma çatlak ilerlemesi süresince çatlak kapanması	40
Şekil 2.1. AA2124 metal tozlarının SEM görüntüsü	41
Şekil 2.2. SiC seramik parçacık tozlarının SEM görüntüsü	42
Şekil 2.3. Karıştırıcı (Atritör)	43
Şekil 2.4. Presleme ve sinterleme	43
Şekil 2.5. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen AA2124 bilet	44
Şekil 2.6. Kalıpların (H13) ısıtılma prosedürü.....	44
Şekil 2.7. Solidwork programında tasarlanıp üretilen kalıp, kalıp taşıyıcı ve kalıp desteği.....	45
Şekil 2.8. 2124 Al bilet numunesinin fırında ısıtılması	46
Şekil 2.9. Hidrolik pres makinesine ısıtıcı kovan, kalıp, kalıp taşıyıcının yerleştirilmesi	46
Şekil 2.10. ASTM E 8M standartlarında üretilen çekme numunesi	47
Şekil 2.11. ASTM E 8M Standartlarında üretilen çekme numunesi	47
Şekil 2.12. AA2124 takviyesiz çekme numunesi a) tel erozyon makinesinde kesilmiş görüntüsü b) Numunenin zımparalanmış görüntüsü	47
Şekil 2.13. ASTM 647 standartlarına uygun olarak hazırlanan CT yorulma numunesinin solidwork çizimleri.....	48
Şekil 2.14. Tel erozyon makinesinde ASTM E 647 standartlarına göre kesilerek elde edilen CT yorulma numuneleri.....	49
Şekil 2.15. Ekstansometre	49
Şekil 2.16. Çekme cihazı, çekme numunesi ve ekstansometre	50
Şekil 2.17. Yük zaman grafiği	52
Şekil 2.18. Yorulma deney cihazı ve düzeneği	52
Şekil 2.19. CT yorulma numunesinin cihaz çenelerine bağlanması.....	52
Şekil 2.20. Extansometrenin yorulma numunesine bağlanması.....	53
Şekil 2.21. SEM cihazı.....	54
Şekil 3.1. 2124 Al alaşımlı takviyesiz numunelerde gerilme yüzde uzama eğrileri	55

Şekil 3.2. 2124 Al alaşımlı %5 takviyeli numunelerde gerilme yüzde uzama eğrileri ...	56
Şekil 3.3. 2124 Al alaşımlı %10 takviyeli numunelerde gerilme yüzde uzama eğrileri	57
Şekil 3.4. 2124 Al alaşımlı %15 takviyeli numunelerde gerilme yüzde uzama	57
Şekil 3.5. a) Takviyesiz, b)%5 takviyeli, c)%10 takviyeli, d)%15 takviyeli çekme numunelerinde gerilme yüzde uzama eğrileri	58
Şekil 3.6. 2124 Al alaşımlı takviyesiz numunelerde manuel çatlak boyu çevrim sayısı grafiği	60
Şekil 3.7. 2124 Al alaşımlı %5 takviyeli numunelerde manuel çatlak boyu çevrim sayısı grafiği	60
Şekil 3.8. 2124 Al alaşımlı %10 takviyeli numunelerde manuel çatlak boyu çevrim sayısı grafiği	61
Şekil 3.9. 2124 Al alaşımlı %15 takviyeli numunelerde manuel çatlak boyu çevrim sayısı grafiği	61
Şekil 3.10. 2124 Al alaşımlı %5, %10 ve %15 takviyeli ve takviyesiz numunelerde manuel çatlak boyu çevrim sayısı grafiği.....	62
Şekil 3.11. 2124 Al alaşımlı takviyesiz yorulma numunelerinde CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiği	63
Şekil 3.12. 2124 Al alaşımlı %5 takviyeli yorulma numunelerinde cmod çatlak boyu çevrim sayısı grafiği	64
Şekil 3.13. 2124 Al alaşımlı %10 takviyeli yorulma numunelerinde hesaplanan cmod çatlak boyu çevrim sayısı grafiği.....	64
Şekil 3.14. 2124 Al alaşımlı %15 takviyeli yorulma numunelerinde cmod çatlak boyu çevrim sayısı grafiği	65
Şekil 3.15. 2124 Al alaşımlı %5, %10 ve %15 takviyeli ve takviyesiz numunelerde cmod çatlak boyu çevrim sayısı grafiği.....	65
Şekil 3.16. 2124 Al alaşımlı takviyesiz yorulma numunelerinde manuel ve CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiklerinin karşılaştırılması.....	66
Şekil 3.17. 2124 Al alaşımlı %5 SiC takviyeli yorulma numunelerinde manuel ve CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiklerinin karşılaştırılması.....	67
Şekil 3.18: 2124 Al alaşımlı takviyesiz 20x büyütmedeki dağlanmış bilet görüntüsü ...	69

Şekil 3.19: 2124 Al alaşımlı a) SiC takviyesiz, b) %5, c)%10, d)%15 SiC takviyeli bilet numunelerinin 50x büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri.....	69
Şekil 3.20: Ekstrüzyon işlemi uygulanmış 2124 Al alaşımlı a)%5, b)%10, c)%15 SiC takviyeli 50x büyütmede numune görüntüsü	70
Şekil 3.21. Bilet ve ekstrüzyon sonucu %15 takviyeli numunelerin 50x büyütmedeki görüntülerinin karşılaştırılması.....	70
Şekil 3.22 Çekme numunesinde çekme deneyi sonucunda elde edilen görüntüsü	71
Şekil 3.23. 2124 Al alaşımlı %5 SiC takviyeli ve takviyesiz çekme numunelerinin SEM görüntüsü	71
Şekil 3.24. 2124 Al alaşımlı %10 SiC takviyeli çekme numunesinin 200 X büyütmedeki SEM görüntüsü.....	72
Şekil 3.25. 2124 Al alaşımlı takviyesiz yorulma numunesi kırık yüzey görüntüleri	72
Şekil 3.26. 2124 Al alaşımlı %5 SiC takviyeli yorulma numunesi kırık yüzey görüntüleri	73
Şekil 3.27. 2124 Al alaşımlı %10 SiC takviyeli yorulma numunesi kırık yüzey görüntüleri	73
Şekil 3.28. 2124 Al alaşımlı %15 SiC takviyeli yorulma numunesi kırık yüzey görüntüleri	73

GİRİŞ

Fatigue kelimesi Latince yorulma anlamına gelen fatigare kelimesinden gelmektedir. Toplum arasında yaygın olarak fiziksel ve psikolojik yorgunluk anlamına gelse bile mühendislik terminolojisinde yorulma kelimesi çevrimsel yükler altında malzemenin hasar ve zarar görmesi anlamına gelmektedir. 1964 yılında Cenevrede metallerin yorulma test prensipleri uluslararası organizasyon tarafından yayınlanmıştır.

Yorulma birçok bilimsel dalı kapsayan, temel ve endüstriyel araştırmalar için zengin bir çeşitlilik sunan bir çalışma dalıdır. Yapılan araştırmalarda malzemelerin yorulma araştırmalarının on dokuzuncu yüzyılın ilk yarısına kadar uzanmaktadır. Yorulma çalışmalarına olan ilgi demir yapıların ve özellikle raylı sistemlerde köprülerin kullanımının artması ile birlikte genişlemeye başladı. 1842 yılında Fransa'daki Versailles yakınlarında bir çok kişinin hayatını kaybettiği demiryolu kazası sonrası metal malzemelerde yorulma üzerine ilk detaylı araştırma yapılmıştır. Bu kazanın nedeninin lokomotif ön akslarındaki yorulma hasarından kaynaklandığı görülmüştür. A. Wohler 1852-1869 yılları arasında Berlin de bir deney istasyonu kurdu ve yorulma hasarı üzerine sistematik araştırmalar yaptı. A. Wohler çevrimsel yüklere maruz kalan demiryolu çelik akslarının mukavemetinin statik yüklerden daha düşük olduğu görmüştür. Wohler'in çalışmalarında gerilme genliği ömür (S-N) eğrileri ve yorulma dayanımı sınır kavramlarının yorulma davranışı karakteristikleri yapmıştır. Sabit genlikli ters gerilmelere maruz kalan yorulma çatlak ilerleme hızı çevrim başına çatlak boyu ilerlemesi (da/dN) olarak ifade edilir.

Diğer bir çalışma ise W. Fairbairn tarafından yapılmıştır. Perçinli dövme demir kırılganlık 3100000 çevrim yük uygulamıştır. Fairbairn maksimum gerilmenin yalnızca üçte biri

uygulandığında ve percinlerin koptuğunu görmüştür. 1877 de Alman Mühendis Gerber yorulma dizayn metotları geliştirdi ve farklı çevrimsel gerilme seviyeleri için yorulma ömür hesaplamaları yapmıştır. 1899 yılında Goodman tarafından benzer çalışmalar yapılmıştır.

Yorulma çevrimsel gerilme veya deformasyon uygulamalarıyla malzemelerde oluşan çatlak ve hasara neden olan değişikliklerin belirtilmesinde kullanılan bir terimdir [1].

Metalik parçalar statik donanımından daha düşük yani elastik sınır altındaki tekrarlanan gerilmeler altında çalışmış olsalar bile belirli bir çevrim sayısı sonunda genellikle yüzeylerinde çatlaklar oluşmaktadır. Oluşan çatlaklar tekrarlı yüklerin etkisiyle ilerlemekte ve meydana gelen kırılma olayı ile yapı kullanılmaz hale gelmektedir. Makina ve yapısal parçalardan oluşan hasarların çoğunluğu çalışmalar sırasında maruz kaldıkları çevrimsel yük nedeniyle yorulma hasarı şeklinde görülmektedir. Sabit genlikli yorulma çalışmaları yorulma hasarının oluşumu hakkında önemli bilgiler vermektedir [2].

Bu çalışmanın ilk bölümünde malzemelerin yorulma olayı ve özellikleri ile ilgili temel bilgiler verilmiş ve yorulma çatlak ilerlemesi, çatlak ucunda oluşan gerilmeler ve çatlak ucu plastik bölgesinin özellikleri açıklanmıştır. Deneysel çalışma bölümünde, toz meteoroloji yöntemi ile bilet üretimi, bilet numunelerinin ekstrüzyon işlemine tabi tutularak levha elde edilmesi, elde edilen levhalardan çekme ve yorulma numuneler üretilmesi ve bu numuneler ile yapılan çekme ve yorulma deneyleri açıklanmıştır. Bu bölümde ASTM-E647 standartlarında üretilen 2124 alüminyum alaşımlı %5, %10, %15 SiCp takviyeli ve takviyesiz yorulma numunelerinde sabit genlikli yükleme altında yorulma çatlak başlangıcı, yorulma çatlak ilerlemesi ve etkin çatlak ilerleme mekanizmaları açısından incelenmiştir.

1. BÖLÜM

GENEL BİLGİLER ve LİTERATÜR ÇALIŞMASI

1.1. Giriş

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla sayıdaki, şekil ve/veya kimyasal bileşenleri farklı, aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemeler olarak tanımlanmaktadır [2,3]. Kompozit malzemeler 20. yüzyılın sonlarına doğru yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Dayanım ve performansı arttırmakla beraber ağırlığı azaltmak gibi önemli özellikler taşımalarından dolayı son yıllarda bu malzemelere verilen önem giderek artmaktadır [4]. Doğadaki malzemelerin çoğu "kompozit" olarak adlandırılan bileşik yapıli maddelerden oluşur. Bu karışımın özelliğı, kendini oluşturan maddelerin özelliklerinden çok daha üstündür [5].

İdeal bir kompozit malzeme bileşenlerinin istenmeyen özelliklerini azaltıp, kullanım yerine göre uygun özelliklerini kullanarak ve iyileştirerek oluşturulur. Böylece mukavemet ve dayanım olarak her bir bileşenin özelliklerinden daha üstün özellikler sergiler [6]. Kompozit malzemeleri oluşturan bileşenlerin en iyi özelliklerinin bir malzemede toplanması, iyi korozyon direnci, iyi ısıli iletim, mükemmel aşınma direnci, düşük ağırlık, ile dayanım, rijitlik, yorulma dayanımı ve sıcaklık kapasitesinin yüksek olması gibi önemli avantajlar sağlamaktadır. Fakat yukarıda belirtilen bu özellikler için gerekli şartlar, uygun matris ve takviye elaman çifti, üretim tekniğı, bileşenlerin mukavemet özelliğı ve diğler faktörler göz önüne alınarak üretim yapılırsa istenen özelliğı elde etmek mümkündür. Uygun matris/takviye elemanı seçiminin, sistemin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde etkisi büyüktür. Çünkü kompozit içerisinde matrisler tarafından yükün takviye elamanına iletilmesinde matris ile takviye elemanı arasındaki ara yüzey bağının da kuvvetli olması gerekmektedir. Bunun yanında takviye

elamanlarının matris içerisinde homojen dağılımı da matris alaşımı ve takviye elemanı çiftlerinin uygun seçimine bağlıdır [3]. Takviye elemanının dağılımı ne kadar heterojen olursa, kompozit malzemenin en zayıf bölgesinden hasar ihtimali o kadar artacaktır [8].

1903 yılında Wright kardeşlerin yaptığı ilk başarılı uçuştan sonra kompozit malzemeler havacılık sektörünün vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Kompozit malzemeler mukavemet, iyi korozyon dayanımı, kolay şekillendirme gibi pek çok avantajlı özellikleri ile tasarım, iyileştirme, düşük bakım/onarım ve işletme vb. bir çok aşamada minimum parça kullanımını mümkün kılmaktadır. Kullanılan parça sayısının minimuma indirilmesi sistem mühendisliği açısından ele alındığında bakım/ onarım, işletme ve devamlılık noktasında gerekli yedek parça miktarını minimuma indirmekle ürünün ömür devri hesaplamalarında maliyet açısından önemli derecede düşüş sağlamaktadır [9]. Günümüzde uçak imalatçıları ile bakım/onarım yapan firmalar parça sayısını azaltmak ile beraber maliyeti de düşürmek amacıyla kompozit malzeme kullanımını tercih etmektedirler. Örneğin titanyum ve bazı metal alaşımlar mükemmel korozyon direncine ve yüksek özgül mukavemet oranına sahip olmalarına rağmen, kompozit malzemelerden daha pahalı oldukları için kompozit malzemelere nispeten daha az tercih edilirler [10].

1.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Yapısal bileşenlerin şekline göre fiberli kompozitler, partiküllü kompozitler, doldurulmuş kompozitler ve tabakalı kompozitler olarak genel dört grupta toplanabilir [11]. Kompozit malzeme üretiminde, matris yapı malzemesi ve takviye elemanı olarak kullanılan birçok malzeme bulunmaktadır. Kompozit malzemeler; ana yapıda kullanılan malzeme türüne göre ise polimer matrisli kompozitler, seramik matrisli kompozitler ve metal matrisli kompozitler olmak üç ana grupta sınıflandırılırlar [12,13].

1.2.1. Yapısal bileşenlerinin şekline göre kompozit malzemeler partikül esaslı kompozitler

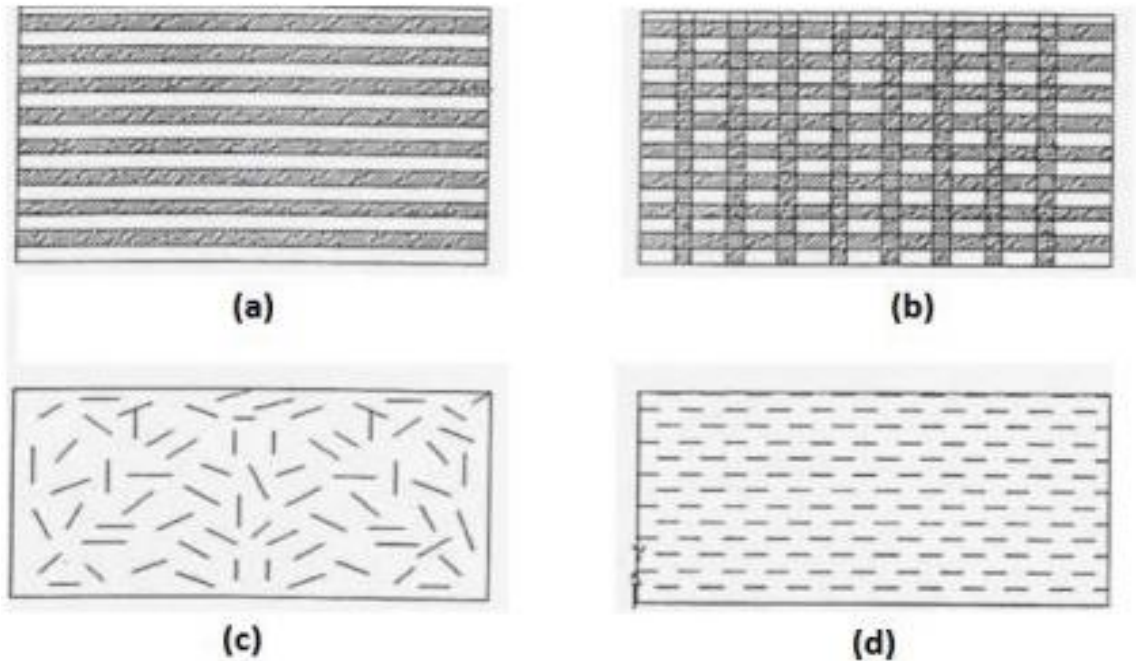
1.2.1.1. Partikül esaslı kompozitler

Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. En çok kullanılan parçacıklar ise Al_2O_3 ve SiC'den oluşan seramiklerdir.

Burada yük, elyaf ve matris tarafından birlikte taşınır. Bu kompozitler; metal, seramik ve polimerlerin birleşiminden oluşabilirler. Sert metal uçlar ve beton da örnek olarak verilebilir. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısı ve elektriği iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik matris içeren yapıların, sertlikleri ve sıcaklık dayanımları yüksektir. Bunlar kollar, kulplar, elektrik parçaları vb. gibi küçük parçacıkların yapımında kullanılırlar.

1.2.1.2. Fiber esaslı kompozitler

Bu tür kompozitler, birçok özelliklerde artış sağlayan, yüksek etkinliği olan liflerin ilavesiyle elde edilirler. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinden mukavemet ve rijitlikleri kütle halindeki diğerlerinden çok üstün olabilmektedir. Fiberlerin bu özelliğinin fark edilmesiyle fiber kompozitlerin üretilmesi süreci başlamıştır. Günümüzde düşük performanslı ev eşyalarından roket motorlarına kadar kullanım alanı bulan malzemeler olmuşlardır [14].

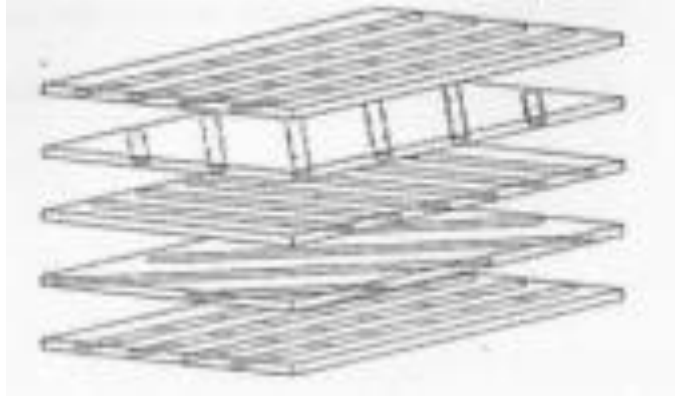


- a) Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli fiber kompozit
- b) Örgü formunda fiberlerle pekiştirilmiş kompozitler
- c) Rastgele yönlenmiş süreksiz fiber kompozit
- d) Yönlendirilmiş süreksiz fiber kompozit

Şekil 1.1. Değişik tipte fiber kompozitler [14]

1.2.1.3. Tabaka yapılı kompozitler (Lamine kompozitler)

Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Bu tür kompozitler farklı özelliklere sahip en az iki tabakanın kombinasyonundan oluşur. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir.



Şekil 1.2. Açılı tabakalara sahip bir kompozitin şematik gösterimi [14]

1.2.1.4. Dolgu yapılı kompozitler

Bu tür kompozitler, 3 boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine 3 boyutlu bir dolgu malzemesiyle doldurulması ile oluşan malzemelerdir. Matris çeşitli geometrik şekillere sahip bir iskelet veya şebeke yapısındadır. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip kompozitlerin üretimi için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi gerekir [14].

1.2.2. Ana yapıda kullanılan malzeme türüne göre

1.2.2.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler kolaylıkla özel işleme tabi tutulabilir fakat yapısal olarak metallerden ve seramiklerden çok daha fazla karmaşık bir yapıya ve daha düşük mukavemet, düşük elastik modül değerlerine ve daha az sıcaklık direncine sahiptirler.

Kovalent bağa sahip oldukları için zayıf ısı ve elektrik iletkenliğine ve genel olarak kimyasal metallere göre daha fazla direnç gösterirler [12].

Genellikle sürekli fiberlerle kullanılan polimer matrisler davranışlarına göre termoset ve termoplastik olarak iki gruba ayrılır. Polimer matrislerin en önemli olanları sürekli fiberlerle takviye edilen polyester, polyamidler ve epoksi reçine matrislerdir. Takviye malzemesi olarak cam, karbon ve organik fiberler havacılık alanında geniş bir kullanıma alanına sahiptirler [15,16,17]. Polimer matrisli kompozitlerin üretilmesinde elle sıvama, tel sarma, profil çekme, basma ve transfer kalıplama, tabakalı birleştirme, enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon gibi metotlar yaygın olarak kullanılmaktadır [3,18].

1.2.2.2. Seramik matrisli kompozitler

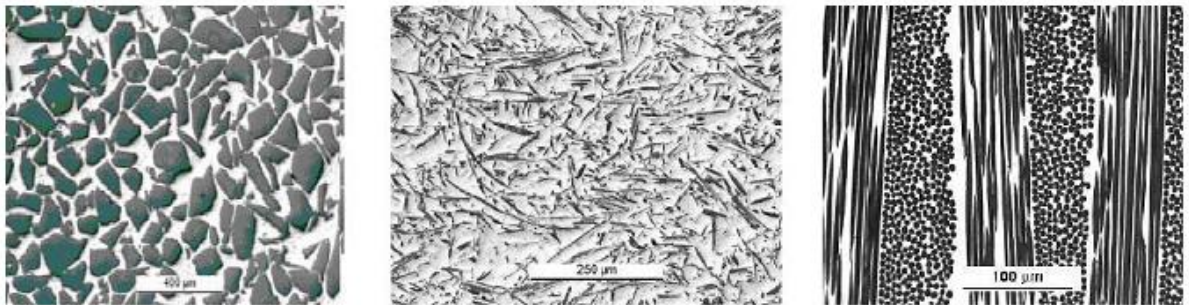
Seramikler, metal ve metal olmayan elemanlardan meydana gelen inorganik bileşikler olup doğada kayaların dış etkilere karşı parçalanması sonucu oluşan kaolen, kil vb. maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilen malzemelerdir. Seramikler, farklı şekilde silikatlar, aluminatlar ile birlikte metal oksitlerinden oluşurlar. Seramik malzemeler endüstriyel fırınlar tuğla, betondan elektronik ve optik araçlarda kullanılan yeni malzemelere kadar geniş bir alanı kapsarlar [7]. Genellikle oksijen, karbon ve nitrojen gibi metal olmayan elementlerin seramik malzemelerle birleşimiyle bir veya daha fazla metalden oluşur. Güçlü iyonik ve kovalent bağ yapısına sahip olan seramikler çok sert ve kırılgandır. Ayrıca düşük termal ve mekanik şok direnci, düşük çekme dayanımı, çok yüksek elastik modül, düşük yoğunluk ve çok yüksek sıcaklığa dayanma özelliklerine sahiptirler [7,11].

Seramik malzemeler farklı bileşimlerde kristal ve cam yapılı fazları içermekle beraber gözenekler ihtiva etmektedirler. Seramik malzemelerin özelliklerini yapı bileşenlerinin miktarı ve dağılımları önemli ölçüde etkilemektedir. Kütesel seramik malzemeler, yüksek sıcaklık ve aşırı korozyif ortamlarda çok uygun olmalarına rağmen, yük altında gevrek davranış göstermeleri bu malzemelerin kullanım alanlarını kısıtlamaktadır [19]. Son yıllarda seramik kompozit malzemeler kullanım alanı çok artmıştır. Örneğin ilk zamanlarda alümina ve zirkon esaslı seramik kompozit malzemeler roket başlığı, uzay araçları gibi uygulamalarda kullanılırken şu an insan vücudunda da kullanılmaya başlanmıştır [15].

1.2.2.3. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozit (MMK) malzemelerin geliştirilmesi, son 30 yıl içerisinde malzeme bilimindeki büyük gelişmelerden birisi olmuştur [10,18]. Metaller MMK için matris malzemesi olarak çok cazip olmaktadır. Bunlar plastiklerden daha yüksek elastik modül, dayanım ve tokluğa sahip olup yüksek sıcaklıklarda özellikleri daha iyidir. Ancak üretimleri daha zordur. Bunlar her elyafı iyi ara yüzey bağı oluşturmazlar. Metallerle en kolay bağ oluşturan silisyum karbür ile kaplanmış boron elyaftır. Fakat bunlar pahalıdır. MMK'lerde çok yaygın olarak kullanılan matris malzemesi, düşük yoğunluklu, iyi tokluk ve mekanik özelliklere sahip olan hafif metaller ve alaşımlarıdır [7]. MMK malzeme tasarımında yüksek sünekliğe ve şekillendirilebilirliğe sahip ana yapı ile yüksek elastik modüle ve rijitliğe sahip takviye elemanını tek bir yapıda birleştirilmesi amaçlanmaktadır [5].

MMK üretiminde genellikle Al, Mg, Zn, Cu ve Ni gibi malzemeler ve bu metallerin alaşımları kullanılmaktadır. Matris malzemeler, takviye elemanlarını çevreleyerek onlara destek olmakla beraber yapısal gerilmeleri takviye elemanlarına aktarabilecek mukavemet özelliklerine sahip olmalıdır. Matris malzemelerin süneklik ve tokluk değerlerinin iyi olmasının yanında ıslatabilirliği ve takviye elemanı ile kimyasal bağ oluşturma özelliklerinin iyi olması istenir [7,20]. Takviye elemanları olarak kullanılan malzemeler, arzu edilen rijitlik kombinasyonunu, dayanımı ve düşük yoğunluğu sağlayan seramiklerdir. Takviye elemanları olarak ise silisyum karbür (SiC), bor (B), grafit, alüminyum oksit (Al_2O_3), wolfram (W) ve molibden (Mo) gibi değişik sürekli, kılcal kristalli veya parçacıklı elyaflardaha çok tercih edilmektedir [13]. Takviye malzemesinin morfolojisi, metal matrisli kompozitlerde diğer bir önemli noktadır. Takviye morfolojisinde üç ana sınıf, sürekli fiber, kısa fiber veya whisker ve partikül olarak belirtilmektedir [7,13].



Şekil 1.3. Takviye malzemesinin geometrisine göre metal matrisli kompozitler a) partikül takviyeli, b) kısa fiber takviyeli, c) sürekli fiber takviyeli [7]

Partikül takviyeli MMK malzemeler yüksek elastik modül ve mukavemet, yüksek aşınma direnci, üretim kolaylığı ve düşük maliyetli üretim gibi avantajlarından dolayı bu konu üzerinde yapılan çalışmalarda önem kazanmıştır [12].

Takviye morfolojisinin seçimini, arzu edilen özellikler/maliyet kombinasyonu belirler. Genel olarak sürekli fiber takviyeli MMK'ler üstün özellikler sağlarlar ancak en pahalı kompozit grubunu oluştururlar. Partiküller, kısa fiber ve whisker takviyeli malzemeler, mekanik özelliklerde önemli gelişimler sağlayabilirler ve oldukça düşük maliyetlidirler. Metalik matris, takviye malzemesi, takviye morfolojisi, takviye hacim oranı, yönlendirilmesi, matris alaşımı bileşimi ve ısıl işlem gibi parametreler üzerinde oynanarak çok geniş bir malzeme kombinasyonu ve buna bağlı olarak mekanik özellikler elde edilebilmektedir [7].

1.2.3. Metal matrisli kompozitlerin kullanım yerleri ve uygulama alanları

Teknolojik uygulamalardaki tamir ve yakıt masrafını düşürmek için otomotiv ve havacılık sektöründe malzeme ağırlığının düşürülmesi istenilen bir özelliktir. Bu da mukavemet/yoğunluk oranının artması anlamına gelmektedir. Bu nedenle uzay araçlarında bazı MMK'ler çok hafif olduklarından dolayı makinanın harcadığı enerjiyi azalttığı için tercih edilmektedir. MMK malzemelerin uygulamaya aktarılmasındaki en önemli dezavantaj; düşük kırılma toklukları ve matris ile takviye arasındaki ısıl genleşme farklılıklarıdır. MMK'ler çok sayıda yapısal uygulamalarda geniş kullanıma sahiptirler. Ancak MMK'lerin yüksek kullanım maliyetlerinden dolayı uygulamaları sınırlıdır. MMK üretiminin ana amacı matris alaşımının mukavemet ve elastiklik modülünü arttırmaktır. En önemli özellikleri de aşınma dirençlerinin ve sürtünme özelliklerinin çok iyi oluşudur. Bu nedenle seramik-fiber ve partikül takviyeli MMK'ler aşınma dirençlerinin çok iyi olmasından dolayı otomotivde ve dizel piston motorlarında kullanılmaktadır. Ayrıca MMK'lerde takviye olarak kullanılan malzemenin partikül hacminin küçük bir miktar artması da aşınma direncini arttırmaktadır. Çünkü, partikül ilavesiyle matrisin mukavemeti artmakta ve aşındırıcı elementin malzeme içine girişi azalmaktadır. MMK malzemeler matris alaşımının kendisinden çok daha pahalı olduklarından yalnızca malzeme özelliklerinin birinci derecede önemli olduğu sektörlerde kullanılırlar. MMK'lerin bu özelliklerinden dolayı otomotiv endüstrisinde uzay-uçak sanayisinde yapısal bileşenlerde ve bazı spor araçlarında kullanılır [9].

Tablo 1.1. Otomotiv sanayisinde MMK'lerin potansiyel uygulamaları [9]

Bileşen	Malzeme	Avantaj
Fren pedalı	Al-SiCp	Hafiflik ve uzun ömür
Piston kolu	Al – Al ₂ O ₃	yüksek mukavemet ve modül
Segman	Al-SiCp	Yüksek aşınma dayanımı
Pistonlar	Al – Al ₂ O ₃	Yüksek sıcaklık mukavemeti
Kasnaklar	Al-SiCp	Yüksek aşınma dayanım ve hafiflik
Türbin kanatları	Al – Ni ₃ Al	Yüksek sıcaklık mukavemeti

1.3. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Üretim yöntemleri; katı faz üretim yöntemleri, sıvı faz üretim yöntemleri ve diğer yöntemler olarak sınıflandırılabiliriz. Üretim yönteminin seçiminde, üretilecek mamul veya yarı mamulün önceden belirlenen fiziksel ve mekanik özellikleri değerlendirilip, şu parametreler dikkate alınarak yöntem belirlenmesi yapılır:

- Çalışma sıcaklığı aralığı
- Takviye malzemesi şekli
- Matris malzemesi ile takviye malzemesinin uyumu
- Matris ve takviye malzemelerinin ek işlem gereksinimi
- Matris malzemesi ile takviye malzemesi arasında oluşabilecek reaksiyonlar
- Elde edilecek üründen istenen boyut tamlığı
- Takviyenin matris malzemesi içerisinde dağılımının homojen olması
- Matris-takviye arayüzey bağının tam olarak sağlanabilmesi [7,14]

1.3.1.Katı faz üretim yöntemleri

Metal esaslı kompozitlerin yaygın kullanılan döküm, toz metalürjisi ve infiltrasyon gibi üretim yöntemleri vardır. En yaygın ve ucuz olan döküm tekniğidir. Belirli bir büyüklüğün altındaki seramik parçacıklar homojen olarak matris içinde karıştırılmaktadır [7].

Toz metalurjisi tekniği:

Toz metalurjisi yöntemiyle metal matrisli kompozit malzeme üretiminde, matris ve takviye elemanlarının tozları öncelikle karıştırılır ve istenen şekli verebilecek bir kalıbın içine boşaltılır. Daha sonra bu toz karışımını sıkıştırabilmek amacıyla basınç uygulanır. Ardından toz parçacıkları arasındaki birleşmeyi kolaylaştırmak amacıyla sıkıştırılmış toz karışımı yeterli miktarda katı hal difüzyonu oluşturacak şekilde ergime noktasının altında bir sıcaklıkta sinterlenir. Toz presleme ve sinterlemenin ayrı ayrı yapıldığı bu yöntemde elde edilen malzeme yoğunluğu çok iyi değildir. Bu nedenle artık günümüzde yaygın olarak sıcak presler kullanılmaktadır. Bu işlemde tozlar karıştırıldıktan sonra, toz sıkıştırma (presleme) ve sinterleme işlemi aynı anda yapılır. Bir başka deyişle, toz karışımı sıcak preslenir. Bu şekilde yoğunluk artarken, takviye - matris ara yüzey bağıda önemli ölçüde kuvvetlenir. Sıcak presleme sonucunda üretilen parça ekstrüzyon, haddeleme ve dövme gibi ikincil işlemlerin ardından kullanıma hazır hale gelir [7].

Difüzyon bağı yöntemi:

Takviye elemanları metal folyolar üzerine istenilen açıda ve miktarda yerleştirilebilmekte ve bu işlemler tamamlandıktan sonra ergime sıcaklığına yakın bir sıcaklık altında basılarak veya haddelenerek matris ile takviye arasında bir bağ oluşturulmak suretiyle kompozit malzeme üretilmektedir [7,14].

1.3.2. Sıvı faz üretim yöntemleri

Sıvı faz üretim yöntemleri; sıvı metal infiltrasyon, sıkıştırma döküm, sıvı metal karıştırma ve plazma püskürtme üretim yöntemleri olarak dörde ayrılır.

Sıvı metal infiltrasyon yöntemi

Bu işlemde esas prensip, bir kap veya tüp içerisine yerleştirilmiş fiberler arasına sıvı halindeki metal matrisin emdirilmesi şeklindedir.

Sıkıştırma döküm yöntemi

Metal bir kalıp içerisine yerleştirilen, ön ısıtma yapılmış, seramik fiber veya başka bir takviye malzemesinden oluşmuş ön şekle, kuvvet yardımıyla eriyik metalin emdirilmesi

ve böylece sıkıştırılan eriyik metale yüksek basınç uygulanarak katılaştırılması işlemidir.

Sıvı metal karıştırma tekniği

Bu yöntemde, ön ısıtma yapılmış veya ön işlemlerden geçerek hazırlanmış takviye malzemeleri, sürekli karıştırılan ergimiş metal içerisine değişik yöntemlerle katılmakta ve daha sonra döküm işlemi yapılmaktadır.

Plazma püskürtme yöntemi

Atomize edilmiş ergimiş metal parçacıklarının takviye elemanları üzerine istenilen kalınlıkta püskürtülmesi işlemidir. Püskürtülen eriyik metal parçacıkları, takviye elemanlarına yapışmakta ve hızla katılaşmaya başlamaktadır [7].

Diğer üretim yöntemleri

Rheocasting ve compocasting döküm teknikleri, vidalı ekstrüzyon, in-situ tekniği ve XD üretim tekniklerinden oluşur.

Rheocasting ve compocasting döküm tekniği:

Matris malzemesi, karıştırma üniteli bir ergitme fırınının içine yerleştirilip ergime sıcaklığının 40-50 °C üzerinde ısıtılmakta, sıcaklık homojenize edilmekte ve sıvı metal sıcaklığı kontrollü olarak düşürülmektedir. Alaşım %40-50 katı hale geldiğinde matris malzemesinin içine takviye malzemesi eklenmeye başlamaktadır. Takviyenin ilavesi esnasında sıcaklık yükseltilmeye başlamakta ve takviyenin tamamı iyi şekilde ıslatılınca kadar sıcaklık arttırılarak karıştırma işlemi devam etmektedir [6,14].

Vidalı ekstrüzyon

Polimer ürünlerin işlemleri için geliştirilen ve kullanılan vidalı ekstrüzyon yöntemi Mg esaslı kompozit malzeme üretimi için kullanılmıştır.

In-situ tekniği

In-Situ tekniğinde, bir ötektiğin yönlenmiş olarak katılaştırılması ile iki fazlı bir yapı ortaya çıkmaktadır. Fazlardan biri matris diğeri ise matris içine dağıtılmış lamel, plaka

veya fiber şeklinde fazdır. Uygulamaların çoğu alüminyum, nikel ve kobalt esaslı alaşımlar kullanılarak yapılmaktadır. Tek işleme elde edilirler ve içyapıları oldukça kararlıdır.

XD sentezi tekniği

Takviye fazın sıvı metal içerisinde bir bileşik ilavesi ile oluşturulması prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem ile sıvı metal fazı içerisinde pek çok seramik bileşik oluşturulabilmektedir.

Kimyasal buhar kaplama ve sızdırma

Bu yöntem 800°C gibi düşük sıcaklıklarda uygulanabilir ve malzeme üzerine herhangi bir basınç uygulanması gerekmez. Karmaşık şekilli parçalar bu metotla üretilebilir [7].

1.4. Metal Matrisli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Metal matrisli kompozitlerde malzeme özellikleri katkı hacim oranı ile uyumlu değişim göstermektedir. Metal matrisin cinsi, takviyenin cinsi, şekli, boyutu, dağılımı, miktarı, üniform dağılması, kompozitin üretim yöntemi ve işlem parametreleri, mikro yapı içinde oluşan fazlar, matris ile katkının kimyasal uyumluluğu, ek olarak termo mekanik ve ısı işleme tabi tutulması gibi birçok etken MMK malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinde rol oynamaktadır [6,14].

MMK malzemelerin en önemli mekanik özelliklerinden birisi yoğunluktur. Katkı olarak kullanılan malzemelerin yoğunlukları genelde matris alaşımına yakındır ve dolayısıyla metal matrisli kompozitin yoğunluğunu pek değiştirmemektedir. Bir diğer mekanik özellik ise elastik modüldür. Metal Matrisli Kompozit malzemelerde, elastiklik modül takviye hacim oranının artışı ile belirgin bir şekilde yükselir. Takviye elemanı olan partikül veya fiberin elastiklik modülünün, metal matris malzemesinin elastiklik modülünden fazla olması bu artışın en temel nedenidir. Bu artışta takviye şeklinde bir faktör olmakla birlikte, elastiklik modülünün belirlenmesinde etkin olan faktör, takviye malzemesinin hacim oranıdır [7].

Metal matrisli kompozit malzemelerde mukavemet ise, takviye elemanının hacim oranının artışı ile artar. Takviye hacim oranı ve takviye boyut oranına bağlı olarak

kompozit mukavemeti matematiksel olarak ifade edilebilmektedir. Ancak bu ifadelerde mikro yapı modifikasyonları, dislokasyon yoğunluğu, ısıtma işlemi sertleşmesi gibi faktörler göz önüne alınmadığı için elde edilen sonuçların geçerliliği azalmaktadır. Mukavemet artışının büyüklüğü aynı zamanda, matris alaşımının mikro yapısına da bağlıdır. Bir kompozitte, dayanım artışı elde edilebilmesi, kompozit malzemede meydana gelen gerilmeyi matristen daha mukavemetli olan takviye partikülüne transfer edebilme yeteneğine bağlıdır. Bu da partikül ile matris arasında kuvvetli bir ara yüzey bağı ile olur. Ara yüzey bağı zayıf olduğu zaman, malzemeye herhangi bir gerilme uygulanması durumunda, gerilme takviye partikül transfer olamadan hasar meydana gelecektir. Yüzde uzama değeri bir diğer önemli mekanik özelliklerdendir. Yüzde uzama değeri takviye elemanı oranının artmasıyla hızlı bir şekilde azalmaktadır. Yapılan çalışmalar, kompozit malzemedeki hasarın, partikül kırılması ve matris içerisindeki partikül yığılmaları arasında oluşan boşlukların birlikte etkisi sonucu oluştuğunu göstermektedir. Bunun nedeni, iri parçacıkların daha fazla gerilmeye maruz kalması ve daha fazla çatlak başlangıç hatası içermesidir. Metal matrisli kompozit malzemelerin ticari açıdan önemli bir özelliği de yüksek sıcaklık dayanımıdır. Bu özelliği sağlayan en önemli faktör seramik esaslı takviye malzemesinin yüksek sıcaklıkta göstermiş olduğu dayanımdır.

Bir diğer mekanik özellik olan kırılma tokluğu değeri ise, çatlak oluşumuna ve ilerlemesine karşı direncin bir göstergesi olarak ifade edilmektedir. Yüzde uzama değeri fazla olan, yani plastik deformasyon kabiliyeti fazla olan malzemelerin kırılma tokluğu değeri yüksektir. Genelde takviye oranının artması ile tokluk düşmektedir. Partikül boyutunun büyük olması da kırılma tokluğunu artırır. Metal matrisli kompozit malzemelerde tokluğun optimizasyonu ve değerlendirilmesinin zor olmasının nedeni pek çok parametreye bağlı olmasından dolayıdır.

Metal matrisli kompozitlerin toklukları aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Takviye fazı özellikleri ve tipi
- Takviye elemanı miktarı ve doğrultusu
- Matris alaşımları ve özellikleri
- Matris-takviye elemanı ara yüzeyi bağı

- Uygulanan üretim metodu ve takviye elemanının dağılımı
- Porozite seviyesi ve matris içindeki yığılma etkisi gibi mikro yapısal değişiklikler

En önemli mekanik özelliklerden biriside yorulmadır. Yorulma, malzemelerin statik zorlanmada dayanabileceği maksimum gerilmeden daha düşük, tekrarlanan gerilmelerin etkisiyle hasara uğraması olarak tanımlanmaktadır. Yorulmadan kaynaklanan kırılmalar çevrimsel gerilmeler sonucu oluşarak, çatlak başlangıcı, çatlağın kritik boyuta ilerlemesi ve kırılmanın meydana gelmesi şeklinde gerçekleşir. Çatlak başlangıcında olduğu gibi çatlak ilerlemesinde de çok sayıda ilave faktörün (çevre, frekans, sıcaklık ve mikro yapısal faktörler) etkisi vardır [7,14].

1.5. Yorulma

1.5.1. Giriş

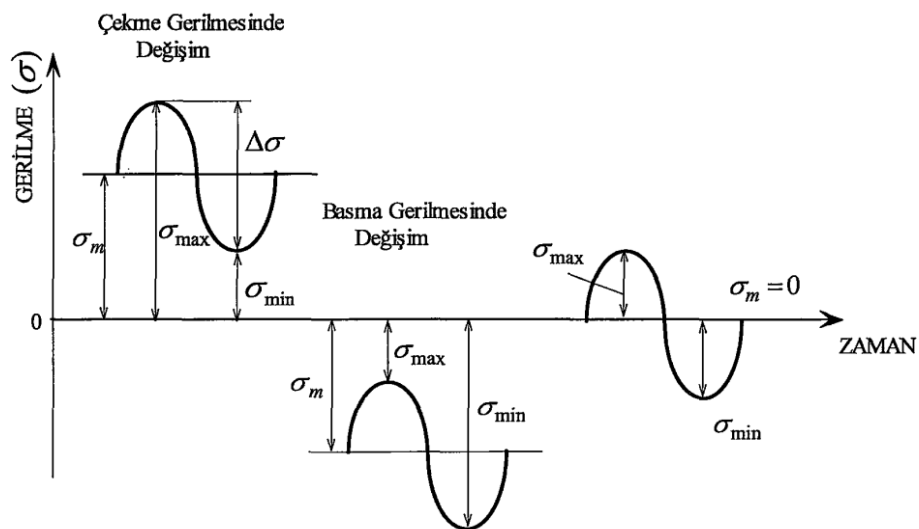
Yorulma çevrimsel gerilme veya deformasyon uygulamalarıyla malzemelerde oluşan çatlak ve hasara neden olan değişikliklerin belirtilmesinde kullanılan bir terimdir [2].

Yorulma birçok bilimsel dalı kapsayan ve temel ve endüstriyel araştırmalar için zengin bir çeşitlilik sunan bir çalışma dalıdır. Yapılan araştırmalarda malzemelerin yorulma araştırmalarının on dokuzuncu yüzyılın ilk yarısına kadar uzanmaktadır. Yorulma çalışmalarına olan ilgi demir yapıların ve özellikle raylı sistemlerde köprülerin kullanımının artması ile birlikte genişlemeye başladı. 1842 yılında Fransa'daki Versailles yakınlarında bir çok kişinin hayatını kaybettiği demiryolu kazası sonrası metal malzemelerde yorulma üzerine ilk detaylı araştırma yapılmıştır. Bu kazanın nedeninin lokomotif ön akslarındaki yorulma hasarına kaynaklandığı görülmüştür. A. Wohler 1852-1869 yılları arasında Berlin de bir deney istasyonu kurdu ve yorulma hasarı üzerine sistematik araştırmalar yaptı. A. Wohler çevrimsel yüklere maruz kalan demiryolu çelik akslarının mukavemetinin statik yüklerden önemli ölçüde daha düşük olduğunu görmüştür. Wohler'in çalışmalarında gerilme genliği ömür(S-N) eğrileri ve yorulma dayanım sınırı kavramlarının yorulma davranışı karakteristigini yapmıştır. Sabit genlikli ters gerilmelere maruz kalan yorulma çatlak ilerleme hızı çevrim başına çatlak boyu ilerlemesi (da/dN) olarak ifade edilir [1].

Metalik parçalar statik donanımından daha düşük yani elastik sınır altındaki tekrarlanan gerilmeler altında çalışmış olsalar bile belirli bir çevrim sayısı sonunda genellikle yüzeylerinde çatlaklar oluşmaktadır. Oluşan çatlaklar tekrarlı yüklerin etkisiyle ilerlemekte ve meydana gelen kırılma olayı ile yapı kullanılmaz hale gelmektedir. Makina ve yapısal parçalardan oluşan hasarların çoğunluğu çalışmalar sırasında maruz kaldıkları çevrimsel yük nedeniyle yorulma hasarı şeklinde görülmektedir. Sabit gelinlikli yorulma çalışmaları yorulma hasarının oluşumu hakkında önemli bilgiler vermektedir [2].

1.5.2. Çevrimsel yük tipleri ve yorulma teknik terimleri

Sabit gelinlikli yorulma araştırmaları Şekil 1.4 de gösterildiği gibi bu yükler çekme-çekme, çekme-basma ve basma-basma şeklinde olmaktadır. Uygulanan yüklere göre yorulma deneyleri aksel gerilmeli yorulma deneyi ve eğme girilmeli yorulma deneyi, burma gerilmeli yorulma deneyi ve birleşik gerilmeli yorulma deneyi şeklinde gruplandırılmaktadır. Aksel gerilmeli yorulma deneyinde numuneye uzunluk eksenı boyunca değışen değerler de çekme ve basma gerilmeleri uygulanarak, eğme girilmeli yorulma deneyleri ise numune bir düzleme göre tekrarlanan eğilme gerilmeleri uygulanarak yapılmaktadır. Burma gerilmeli yorulma deneyinde deney numunesine sabit bir eksene göre tekrarlanan burma gerilmeleri uygulanarak yapılmaktadır. Birleşik gerilmeli yorulma deneyleri ise belirtilen gerilmelerden en az ikisinin bir arada uygulandığı yorulma deneyleridir [21,22].



Şekil 1.4. Yorulma parametreleri ve gerilme tipleri [22]

Yorulma ile ilgili kullanılan bazı teknik terimler vardır. Bunlar;

Çevrim(N): Şekil 1.4 'de görülen gerilme zaman eğrisinin periyodik olarak tekrarlanan en küçük parçasına denilmektedir.

Maksimum gerilme($\sigma_{\max}$): Uygulanan gerilmeler arasında cebirsel olarak en büyük değere sahip olan gerilmedir. Değeri negatif pozitif veya sıfır olabilir.

Minumum gerilme ($\sigma_{\min}$): Uygulanan gerilmeler arasında cebirsel olarak en küçük değere sahip olan gerilmedir. Değeri negatif pozitif veya sıfır olabilir.

Ortalama gerilme (σ_m) : Uygulanan maksimum ve minimum gerilme değerlerinin aritmetik ortalamasına eşittir.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1.1)$$

Gerilme aralığı ($\Delta\sigma$) : Maksimum ve minimum gerilme değerleri arasındaki farka eşittir.

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (1.2)$$

Gerilme genliği (σ_a) : Gerilme aralığı değerinin yarısına eşittir.

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (1.3)$$

Gerilme Oranı (R): Minimum gerilmenin maksimum gerilme oranı şeklinde ifade edilmektedir.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1.4)$$

Yorulma dayanımı (N çevrim için) : Malzemenin belli bir en çevrim sayısı sonunda çatlama veya kopma gösterdiği gerilme değeri olarak tanımlanır.

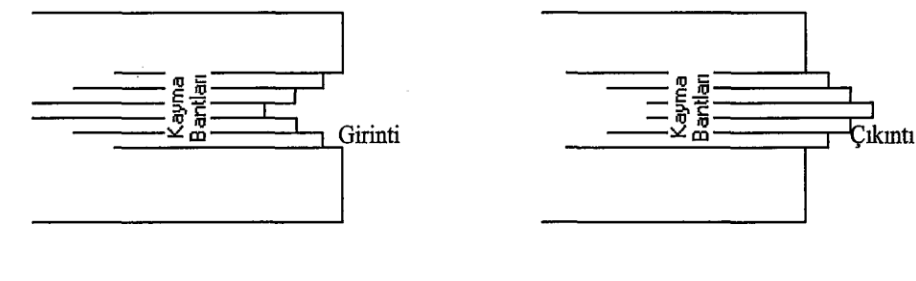
Yorulma ömrü: Benzer numunelerin sabit koşullarda belirli bir gerilme değeri altında çatlama veya kopma olayı gösterdikleri çevrim sayısının ortalaması yorulma ömrü şeklinde tanımlanabilir.

1.5.3. Yorulma olayı aşamaları

Yorulma olayı genel olarak çatlak oluşumu ve başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve kalan malzeme kesitinin kırılması şeklinde üç aşamada gerçekleşmektedir.

Yorulma çatlak başlangıcı

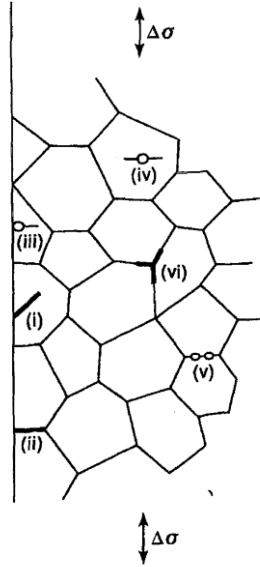
Yorulma çatlakları içyapıda bulunan kusurlar veya malzeme yüzeyindeki çentik civarında oluşan bölgesel deformasyonların çok şiddetli olduğu bölgelerden başlamakta ve ilerlemektedir. Malzemede bulunan çatlak, çentik, boşluk, sert parçacıkların, ani kesit değişimlerinin çevresindeki gerilmeler parçanın maruz kaldığı dış gerilmelere göre daha büyük değerlerdedir. Bu gerilmeler etkisinde yapı içerisinde plastik şekil değişimi meydana gelir. Bir metal parçada maruz kalınan elastik sınır altındaki yükler nedeniyle mikro yapı içerisindeki mevcut hatalar (dislokasyonlar) bölgesel olarak hareket ederler ve Şekil 1.5 'da görülen kayma bantlarını oluştururlar. Kayma bantlarının oluşumu sonucu yüzeyde girinti ve çıkıntılar gerilim yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Gerilme yığınlarının etkisiyle yüzeyde mikro çatlaklar oluşur. Mikro çatlaklar zamanla büyüyerek ilerler ve yapı içerisinde yayılırlar.



Şekil 1.5. Kayma bantlarından dolayı oluşan girinti ve çıkıntılar [23]

Şekil 1.6 de değişik çatlak başlangıç merkezleri; (i) taneleri kesen (ii)taneler arası (iii) yüzeyde bulunan kalıntı veya boşluk, bunların ilk ikisi kayma bantlarının oluşturduğu yüzey çatlaklarıdır, üçüncüsü ise bazı ticari alaşımlarda gözlemlenir. Bunların yanında

(iv) malzeme içerisindeki kalıntılar (v) tane sınırlarındaki boşluklarda çatlak başlangıç merkezleri olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Çatlak başlangıcı için çeşitli bölgeler [24]

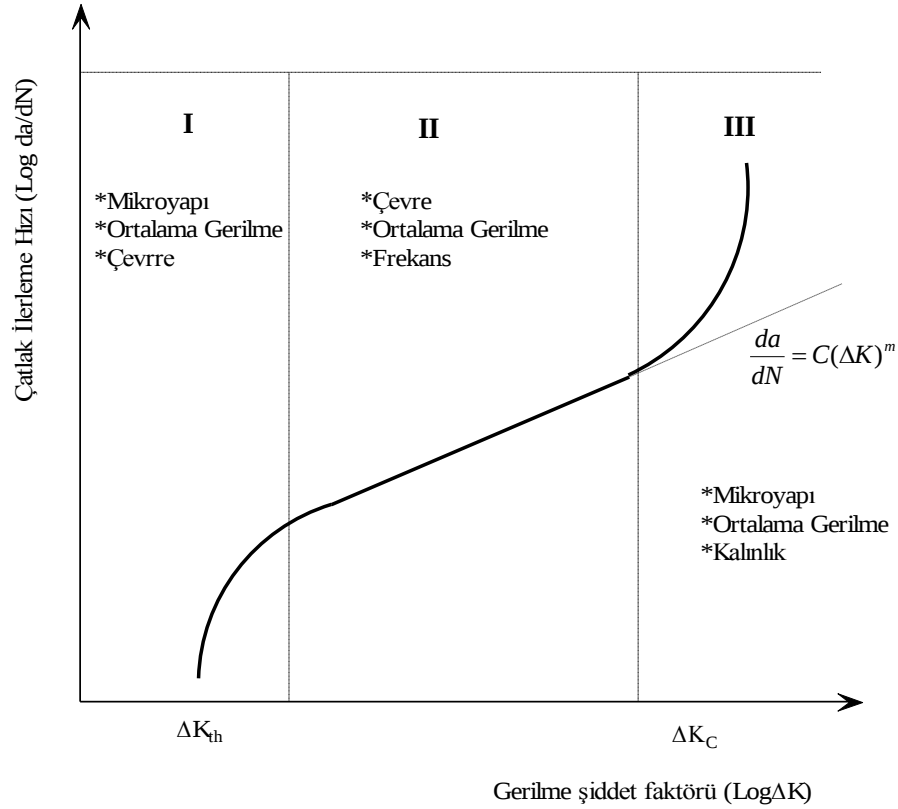
Metalik parçaların imalatında alaşım ve yapısal elementlerin üretimi çok önemlidir. Çatlak başlangıcı için potansiyel merkezler, parça servise sokulduktan kısa bir süre sonra çatlak oluşturan boşluk ve kırılmalı kalıntılardır. Bu hatalar özellikle yüzey tabakasına yerleşmiş ise kayma başlangıç merkezleri gibi gerilim yoğunlaşmasına sebep olmaktadır [2].

Yorulma çatlak ilerlemesi

Metal ve metal matrisli kompozitler için yorulma çatlak ilerleme verileri, $\log(da/dN)$ - $\log(\Delta K)$ grafikte gösterildiğinde genellikle Şekil 1.7’de görüldüğü gibi sigmodial bir eğri şeklinde oluşmaktadır. Bu eğrinin ilk kısmında gerilme şiddet faktörü aralığı ΔK ’nın azalması ile çatlak ilerleme hızı, hızlı bir şekilde azalır ve bir eşik değerin (ΔK_{th}) altında ölçülmesi zorlaşmaktadır. ΔK ’nın artmasıyla oluşan ikinci kısımda, çatlak ilerleme hızı artar ve lineer bir değişim göstermektedir. Bu ikinci kısımda yorulma çatlak ilerleme hızı, ΔK ’nın bir fonksiyonu olan, çevrim başına çatlak ilerlemesi (da/dN), Paris-Erdoğan eşitliği ile iyi karakterize edilmektedir (Eşitlik 1.5). Maksimum gerilme şiddet faktörünün kırılma tokluğuna yaklaştığı III. kısımda çatlak ilerleme hızı, hızlı bir şekilde artmakta ve parça kırılmaktadır.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1.5)$$

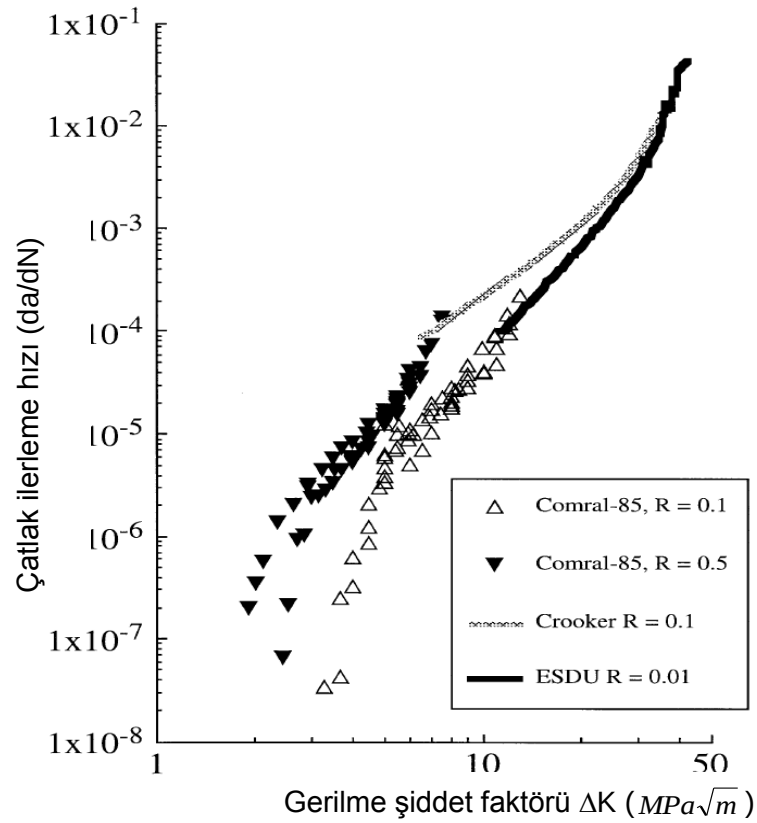
Burada C ve m test ve malzemeye bağılı parametrelerdir.



Şekil 1.7. $\frac{da}{dN} - \Delta K$ şematik gösterimi

Gerilme oranının (R), yorulma çatlak ilerleme hızına etkilerine bakıldığında, R'nin artışı ile Al alaşımlarında ve kompozitlerde çatlak ilerleme hızı artmaktadır. Ancak, R'nin artışı eşik gerilme şiddet faktör aralığını daha fazla etkilediği görülmektedir. SiC parçacık hacim oranının artışı, yüksek çatlak ilerleme hızlarında çatlak ilerleme direncini azaltmaktadır. Takviyesiz alaşımlara göre, Al matrisli parçacık takviyeli kompozitler için Eşitlik 1'deki m değeri ve ΔK_{th} 'ın yüksek olmasının nedeni küçük çatlak açılmasına neden olan yüksek modüle sahip olmasındandır. Ancak Al alaşımına göre kompozitlerde m değerinin büyük olması kırılma tokluğunun düşük olduğunun bir göstergesidir [25]. Kısa fiber-parçacık hibrid takviyeli kompozitlerde ve bazı tek tip kompozitlerde yapılan testlerde benzer bir çatlak ilerleme davranışı gözlemekle birlikte, eşik gerilme şiddet faktörü aralığını, takviyesiz Al alaşımından daha yüksek bulmuşlardır [26,27,28].

Parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerde lineer çatlak ilerleme hızının olduğu II. kısımda yorulma çatlak ilerleme hızı açısından 2 farklı durum gözlenmektedir. I. durumda (Şekil 1.8) metal malzemeye seramik parçacıklar eklendiğinde daha küçük çatlak ilerleme hızı ölçülmekte, ancak II. bölgede çatlak ilerleme hızının artışı daha yüksektir [28,29,30]. II. Durumda ise Şekil 1.9’da görüldüğü gibi takviyeli alaşımda çatlak ilerleme hızı, takviyesiz alaşıma göre daha hızlı gerçekleşmektedir [26]. Chen ve ark. A356 Al alaşımında yaptıkları yorulma çatlak ilerleme hızı testlerinde $R=0.05$ gerilme oranında takviyeli alaşımda çatlak ilerleme hızını takviyesiz alaşıma göre daha hızlı bulmuşlardır. Aynı malzemede $R=0.7$ oranında yapılan testlerde ise takviyeli ve takviyesiz alaşımda çatlak ilerleme hızları birbirine çok yakın değerdedir [31].

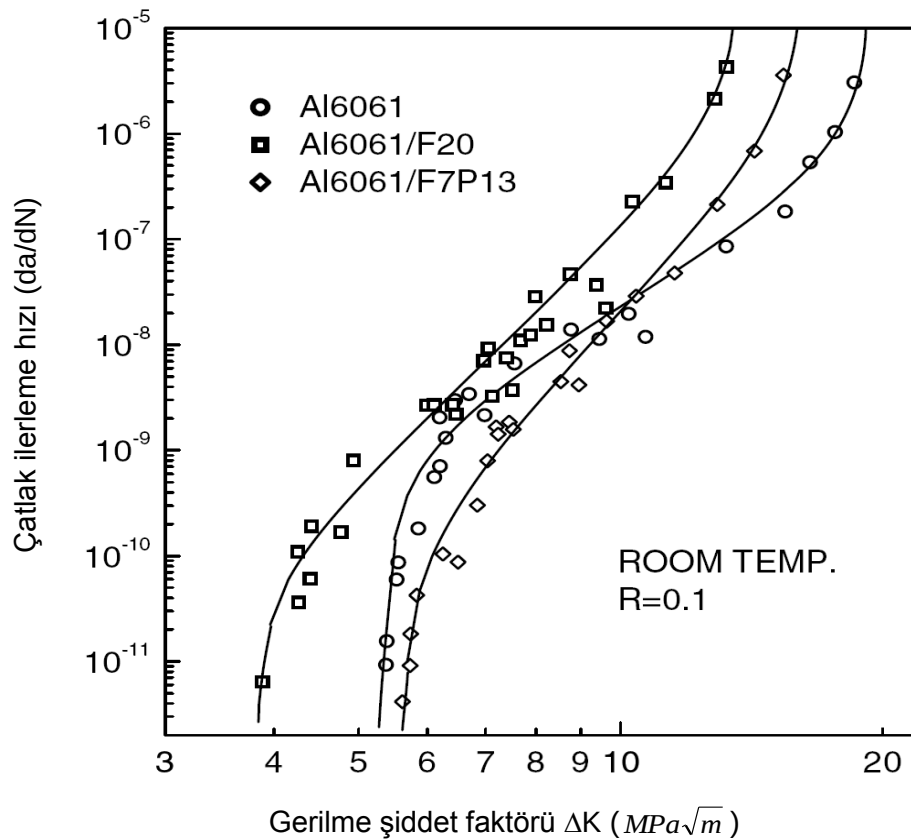


Şekil 1.8. Farklı gerilme oranlarında, takviyeli ve takviyesiz AA6061 alaşımında gerilme şiddet faktör aralığı, yorulma çatlak ilerleme hızı grafiği [29]

Yorulma ömür ve çatlak başlangıç testleri çoğunlukla düzgün çekme numuneleri şeklinde basit ve alışılmış geometrilere üretilirken, yorulma çatlak ilerleme hızı test numuneleri şekilsel olarak daha karmaşık ve büyük boyutlu olması gerekmektedir.

Ayrıca bu testlerde, test süresince çatlak boyunun ölçümü dikkat edilmesi gereken önemli bir konudur.

MMK 'lerin yorulma davranışı ile ilgili hali hazırda yapılan araştırmalarda farklı gerilme oranı R , gerilme genliği σ_a ve ortalama gerilme σ_m değerlerinde sabit genlikli yorulma çalışmaları yapılmıştır. Bu araştırmalarda farklı kompozit üretim yöntemleri kullanıldığından ve üretim yöntemleri sürekli iyileştiğinden sonuçların kıyaslanması zorlaşmaktadır. Bununla birlikte uçak yapısal komponentleri gibi yerlerde kullanılan parçalar, sabit genlikli çevrimsel yüklemekten çok değişken genlikli çevrimsel yüklemeye maruz kalmaktadır. Bu yüzden sabit genlikli yorulma araştırmalarının yanında tek, blok veya rassal olarak gelebilecek aşırı pozitif ve aşırı negatif çevrimsel yüklerin etkilerini inceleyen sistematik araştırmalara ihtiyaç vardır.



Şekil 1.9. Takviyesiz Al6061 alaşımında ve parçacık takviyeli kompozitlerde yorulma çatlak ilerleme hızı, da/dN [26]

Yorulma ömür ve çatlak başlangıç testleri çoğunlukla düzgün çekme numuneleri şeklinde basit ve alışılmış geometrilere üretilirken, yorulma çatlak ilerleme hızı test numuneleri şekilsel olarak daha karmaşık ve büyük boyutlu olması gerekmektedir. Ayrıca bu testlerde, test süresince çatlak boyunun ölçümü dikkat edilmesi gereken önemli bir konudur.

MMK 'lerin yorulma davranışı ile ilgili hali hazırda yapılan araştırmalarda farklı gerilme oranı R , gerilme genliği σ_a ve ortalama gerilme σ_m değerlerinde sabit genlikli yorulma çalışmaları yapılmıştır. Bu araştırmalarda farklı kompozit üretim yöntemleri kullanıldığından ve üretim yöntemleri sürekli iyileştiğinden sonuçların kıyaslanması zorlaşmaktadır. Bununla birlikte uçak yapısal komponentleri gibi yerlerde kullanılan parçalar, sabit genlikli çevrimsel yüklemekten çok değişken genlikli çevrimsel yüklemeye maruz kalmaktadır. Bu yüzden sabit genlikli yorulma araştırmalarının yanında tek, blok veya rassal olarak gelebilecek aşırı pozitif ve aşırı negatif çevrimsel yüklerin etkilerini inceleyen sistematik araştırmalara ihtiyaç vardır.

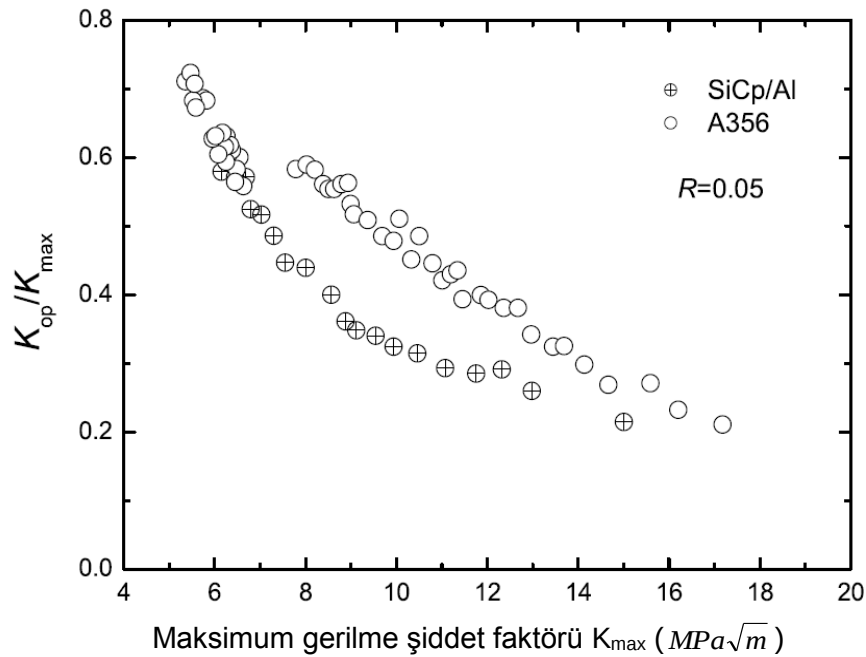
1.5.4. Yorulma çatlak ilerleme mekanizmaları

Al alaşımlarında çevrimsel yükleme altında çatlak ilerlemesi, çatlak ucu bölgesiyle ilişkili olarak, çatlak sapması, körelmesi, kalıntı gerilmeler, deformasyon sertleşmesi ve çatlak kapanması gibi mekanizmalarla açıklanmaya çalışılmaktadır. Al esaslı parçacık takviyeli kompozitlerde ise bu mekanizmalara ek olarak, parçacık kırılması, ara yüzey ayrılması, kırık yüzey pürüzlülüğü gibi mekanizmaların çatlak hızlanması veya yavaşlamasında etkin olduğu görülmektedir [2,32].

Çatlak kapanması, parçaya çekme yükleri uygulanmasına rağmen, çatlak uç kısmında belirli bir çatlak kapanma gerilme şiddet faktörü K_{cl} değerinin altında çatlak yüzeylerinin birbirine temas etmesi şeklinde tanımlanmakta ve yorulma çatlak ilerlemesini önemli derecede yavaşlatan bir mekanizmadır. Çatlak kapanmasının nedenleri, çatlak ucunda malzemenin plastik şekil değiştirmesi, oksit oluşumu ve çatlak yüzey pürüzlülüğüdür. Takviyeli metal matrisli kompozitlerde özellikle yüzey pürüzlülük kaynaklı kapanma, çatlak hızını önemli derecede etkilemektedir.

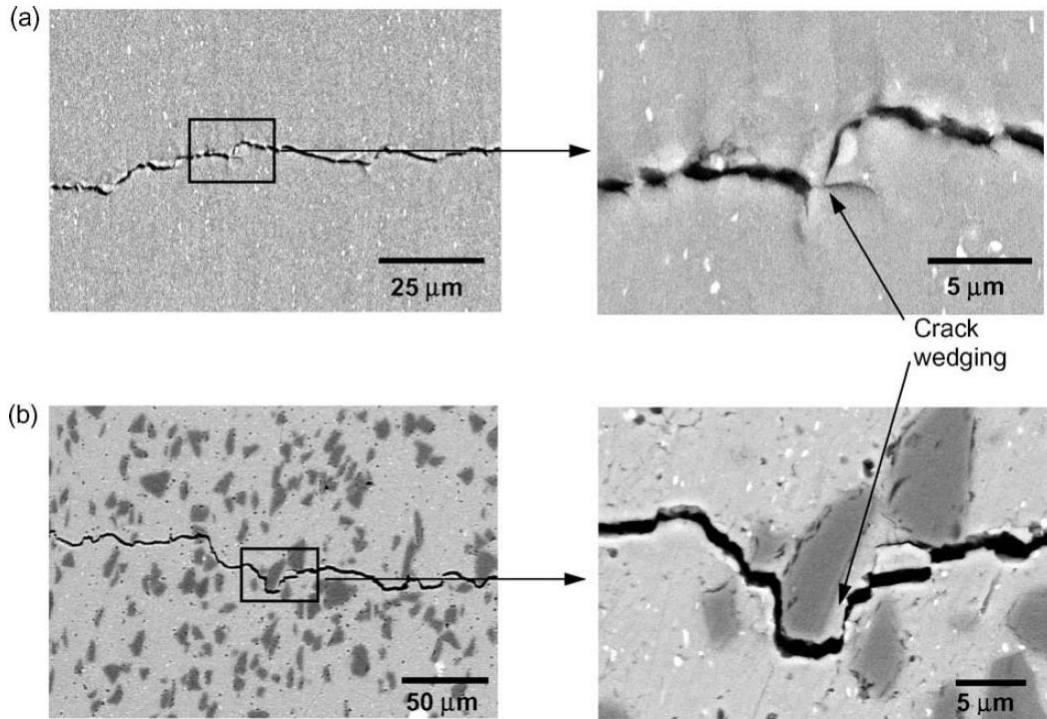
Çatlak kapanma davranışı, çatlak açılma K_{op} ve maksimum gerilme şiddet faktörü K_{max} ; K_{op}/K_{max} , K_{max} 'ın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Çatlak kapanması ile

ilgili yapılan çalışmalarda değişik sonuçlar gözlenmekle birlikte, Al alaşımlarında, Al esaslı kompozitlere göre orta seviye $K_{\max}$ bölgesinde yüksek kapanma seviyesi görülürken düşük ve yüksek $K_{\max}$ bölgelerinde yaklaşık aynı kapanma değeri belirtilmektedir (Şekil 1.10) [25,31]. Çatlak ilerlemesi sırasında pürüzlü bir kırık yüzey oluşumu çatlak kapanma etkisini artırmaktadır.



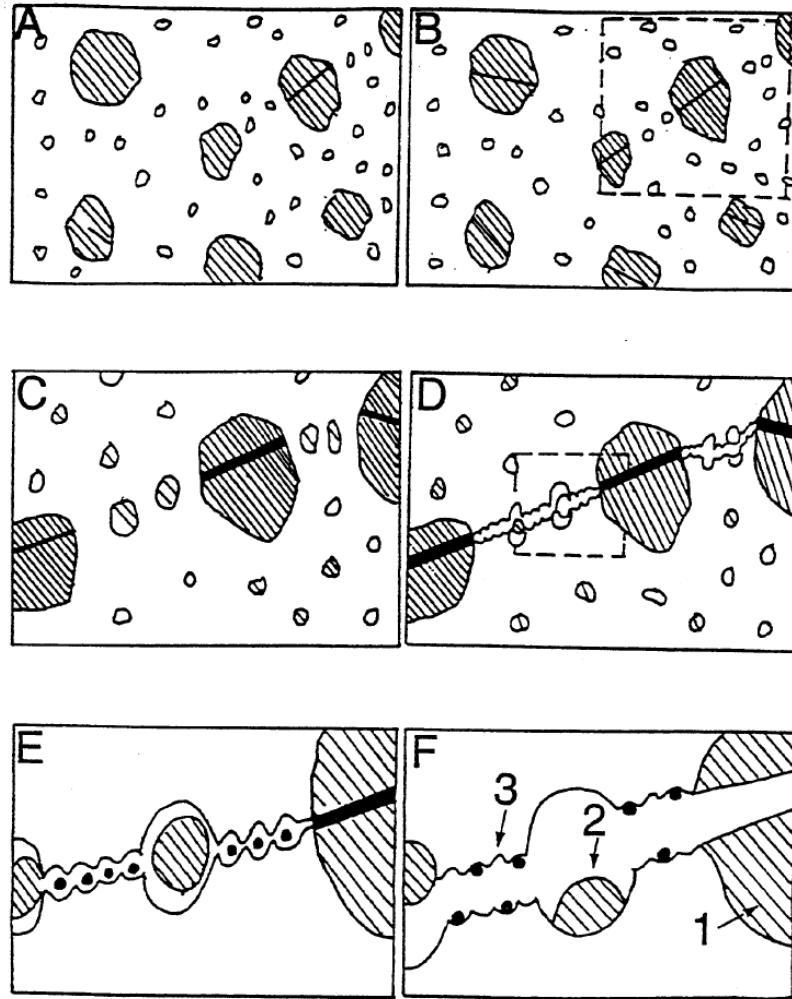
Şekil 1.10: A356 alaşımı ve SiC/A2024 kompozitin çatlak kapanma davranışı [31]

Çatlak ilerlemesi sırasında kompozitlerde Al alaşımlarına göre daha fazla engelle karşılaştığından mikro seviyede daha pürüzlü bir kırık yüzey oluşmaktadır (Şekil 1.11). Çatlak yüzeylerinde oluşan pürüzlülük, çatlak kapanma K_{cl} değerini artırarak ilerleme hızını düşürmektedir. Bazı araştırmalarda ara yüzey ayrılması görülmezken, çoğunluğunda az miktarda da olsa ara yüzey ayrılması görülmektedir. Kırık yüzeyler mikroskopik olarak incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü açısından takviyesiz alaşım ile kompozit arasında önemli farklılıklar gözlenirken, %20 ve %30 takviyeli kompozitler arasında belirgin bir fark oluşmamaktadır [25,33].



Şekil 1.11. Çatlak engellemesini gösteren çatlak profili; a) Al alaşımı, b) 2080/SiC/20_p kompozit [25].

Srivatsan ve Annigeri Al_2O_3 takviyeli 2014 Al alaşım kompozit malzemenin çekme gerilmesi ve çevrimsel yorulma kırılma davranışını araştırdıkları çalışmada, iki farklı partikül hacim oranında malzemede deformasyon kontrollü yorulma testleri yapmışlar ve bu yükleme şartları için ayrıntılı kırılma yüzey özelliklerini belirlemişlerdir. Farklı sıcaklık ve şartlarda yapılan testlerde temel olarak benzer davranış ortaya çıkmıştır. Makroskobik olarak gevrek kırılma davranışı gözlemlenirken, yüksek büyütme değerlerinde lokal olarak sünek ve gevrek mikroskobik kırılma özellikleri gözlenmiştir. Mikroskobik kırılma yüzeylerinde partikül kırılması ve partikül-matris ara yüzey ayrılması baskındır. Yumuşak, sünek ve plastik olarak deforme olan matris malzemenin lokal olarak partikül-matris ara yüzeyinde gerilme yığılmalarının etkisi ile partikül kırılmaları ve ara yüzey ayrılmaları oluşmaktadır. Şekil 1.12’de takviyeli alaşımdaki kırılma tipleri şematik olarak gösterilmektedir. Çevrimsel yükleme altında öncelikle büyük boyutlu partiküller ve partikül kümeleri kırılma eğilimi göstermektedir. Uygulanan çevrimsel yük sayısının artışı ile partikül-matris ara yüzey hasarı oluşmaya başlamaktadır. Sonra oluşan hasarlar birleşerek çatlak ilerlemesi gerçekleşmektedir.



Şekil 1.12. 2014/ Al_2O_3 -T6 metal matris kompozitte çatlak oluşum aşamaları

- a) Başlangıç durumundaki kompozit
- b) Küçük gerilme değerinde büyük partiküllerde çatlak oluşumu
- c) Yüksek gerilme nedeniyle küçük parçacıkların ayrılması ve boşluk oluşturması
- d) 2014 metal matris içerisinde küçük partiküllerin ayrılması ve boşluklar oluşturması
- e) Boşlukların birleşmesi,
- f) Temel kırık yüzey özelliklerinin oluşumu:
 1. Büyük partiküllerin kırılması
 2. Küçük partiküller etrafında gamze oluşumu
 3. Metal matriste gamze oluşumu [34].

1.5.5. Yorulma ömrünü etkileyen faktörler

Yorulma ömrünü etkileyen faktörler genel olarak aşağıdaki şekilde gruplandırılabilir.

- Malzemenin mikro yapısı (tane boyutu ve malzemenin yapısı)
- Üretim süreci (imalat, yüzey işlemleri)
- Yük dağılımı (çevrim şekli, değeri, frekansı ve yük geçmişi)
- Çevre (sıcaklık, korozif ortam)
- Parça geometrisi (yüzey düzgünlüğü, çentikler, kaynaklama, birleştirmeler ve parça kalınlığı) [2,24]

Tane yapısı, mikro yapı hataları ve ortalama tane boyutu yorulma ömrünü önemli derecede etkileyen faktörlerdir. Üretim şekli ve uygulanan ısı işlemler farklı malzeme mikro yapıları oluşturmaktadır. Tane büyüklüğünün yorulma ömrüne etkisini değerlendirmek zordur. Çünkü tane büyüklüğünü değiştirmek için uygulanacak olan işlemler, malzemenin yorulma özelliklerinde olumsuz bir etkiye neden olabilir. Genellikle malzeme içerisindeki kalıntılar ve boşluklar gerilme yığılmalarına sebep olarak yapının mukavemetini dolayısıyla da yorulma dayanımını ve yorulma ömrünü azaltmaktadır.

Dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi üretim teknikleri tane yönlenmesinden dolayı malzemelerde yöne bağlı mekanik özellikler oluşturmaktadır. Metal plakaların haddeleme yönünde tane, kalıntı ve boşlukların şekillerinde değişim olmakta, yani yöne bağlı olarak malzemenin mikro yapısı değişmektedir. Gerilmenin, mikro yapı elemanların uzama yönüne dik olduğu durumlarda yorulma dayanımı düşmektedir. Isıl işlem, sertleştirme işlemleri, soğuk ve sıcak işleme, yüzey kaplaması yorulma ömrünü etkilemektedir. Bazı yüzey işlemleri parçada kalıntı iç gerilmeler oluşturmaktadır. Kalıntı gerilmeler dışarıdan malzemeye herhangi bir yük uygulanmaksızın malzemede oluşan denge gerilmeleridir. Çekiçleme, soğuk haddeleme ve statik ön yük gibi işlemler malzemede basma kalıntı gerilmeleri oluşturmaktadır. Malzeme yüzeyinde kalıntı basma gerilmeleri yorulma ömrünü artırırken kalıntı çekme gerilmeleri azaltmaktadır. Malzeme çatlak uçunda oluşan kalıntı gerilme, dışarıdan uygulanan eşit büyüklükteki basma gerilmesi ile aynı etkiyi göstermektedir. Bu veriler belirli bir alternatif gerilme seviyesinde yorulma ömrünü artıracaktır.

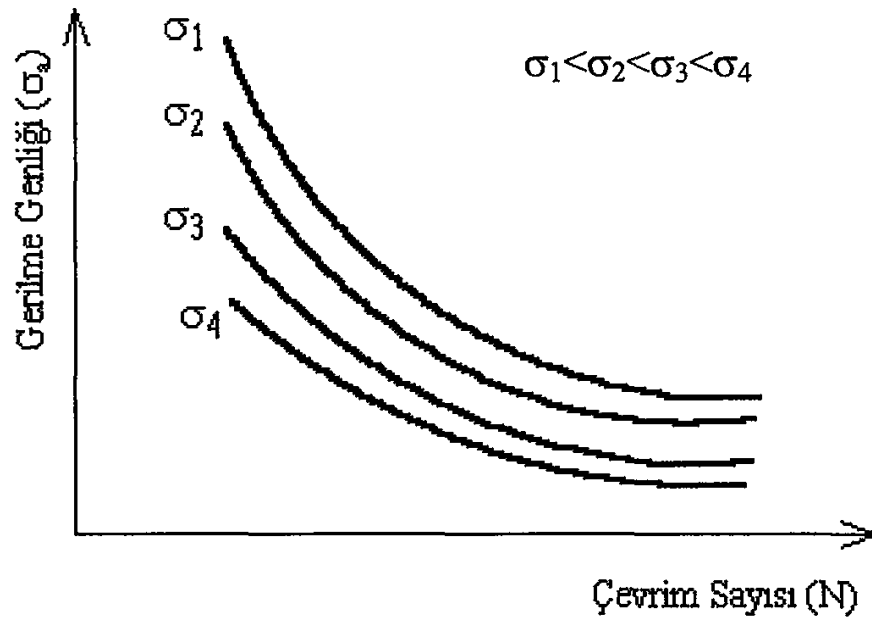
Yorulma yükleri korozi çevre şartlarında uygulandığında, zararlı etkiler yorulma ve korozyonun ayrı ayrı uygulanmasından daha fazladır. Yorulma çatlağı başlangıç aşaması süresince, korozyon yorulmasının temel mekanizması metal yüzeyini korozi çevrenin bozması ve parça yüzeyinde oksit film tabakasının oluşturulmasıdır. Genellikle bu oksit tabakası bir koruyucu tabaka gibi davranarak metalin daha fazla koroze olmasını önlemektedir. Fakat çevrimsel yükler bu tabakada bölgesel çatlaklar oluşturmakta ve metalin tekrar çevre ile temasını sağlamaktadır. Aynı zamanda korozyon yüzey düzgünlüğünü bozduğundan gerilme konsantrasyonlarına sebep olmaktadır.

Korozi ortamda yorulma dayanımı yük frekansına önemli derece bağlıdır. Yorulma dayanımı çevrim frekansının azalması ile düşmektedir. Bu etki özellikle 10 Hz 'den daha düşük çevrimlerde önem kazanmaktadır.

Yorulma olayında ortam sıcaklığının da etkisi vardır. Oda sıcaklığının altında yapılan deneylerde, sıcaklık düştükçe yorulma dayanımı artmaktadır. Fakat sıcaklığın oda sıcaklığının altına inmesi malzemenin çentik etkisi hassasiyetini arttırmaktadır. Oda sıcaklığının üstünde yapılan deneylerde sıcaklık yükseldikçe yorulma dayanımı düşmektedir. Deney sıcaklığının belirli değere yükselmesi halinde meydana gelen sürünme olayı daha etkili hale gelmektedir.

Yorulma ömrü, yüklemenin şekli, büyüklüğü, ve hızından etkilenmektedir. Gerçek çalışma koşullarında parçanın maruz kaldığı gerilmeler sabit genlikli değildir. Malzemeye zaman zaman diğer gerilmelere göre daha büyük gerilmeler uygulanabilir. Parçaya etkiyen aşırı gerilmeler yorulma ömrünü farklı şekillerde etkilemektedir. Ortalama gerilme, gerilme genliği ve gerilme oranı değerleri bir malzemenin yorulma dayanımı özelliklerini etkilemektedir. Eksenel yorulma testlerinde gerilme genliği (σ_a), hasar oluşturan çevrim sayısının bir fonksiyonu olarak gösterildiğinde, σ -N eğrileri uygulanan ortalama gerilme seviyeleri ile değişmektedir. Şekil 1.13'de metalik malzemeler için dört farklı ortalama gerilme seviyesinin bir fonksiyonu olarak tipik σ -N grafikleri gösterilmektedir. Ortalama gerilme seviyesinin artması ile yorulma ömrü azalmaktadır.

Frekansın yorulma deney sonuçlarına etkisi kesin olarak saptanamamakla birlikte 3-170 Hertz 'lik frekansın yorulma ömrünü pek etkilemediği kabul edilmektedir. Fakat çok düşük deney hızlarında çevrenin etkisinin daha fazla olması ve çok yüksek deney hızlarında malzemede oluşan ısıların kısa zamanda yayılamaması yorulma deneyi sonuçlarını olumsuz yönde etkileyeceği kabul edilmektedir [2].

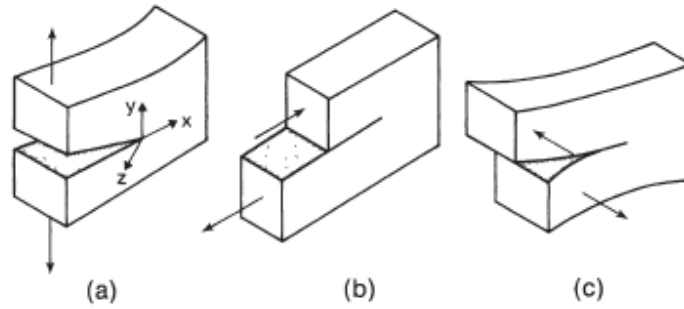


Şekil 1.13. Farklı ortalama gerilme seviyeleri için gerilme genliği-ömür grafiği [1]

Delik, çentik ve birleştirme yerleri gibi parçalardaki geometrik süreksizlikler gerilme yığılmalarına sebep olarak çatlak başlangıç merkezleri oluşturmaktadır. Sürekliliğin bozulduğu bu bölgelerde gerilme ve deformasyon uygulanan gerilme ve deformasyondan daha büyüktür. Parçanın yüzey pürüzlülüğü, yüzey parlatma işlemleri ile giderilebilmekte, fakat fonksiyonel özelliklerinden veya birleştirme gerekliliklerinden dolayı endüstriyel parçalarda çentikler kaçınılmazdır. Yüzey düzgünlüğü çatlak başlangıcında önemli bir etkiye sahiptir. Parça yüzeyinde bulunan çizik, mikro-çentikler ve işleme işaretleri bölgesel gerilmelere sebep olarak çatlak başlangıç ömrünü azaltmaktadır [2].

1.5.6. Çatlak ucunda oluşan gerilmeler

Çatlak ucu yakınındaki gerilme sistemleri, Şekil 1.14'te gösterilen yükleme tiplerine ayrılarak çıkarılmaktadır.



Şekil 1.14. Yükleme tipleri [24]

- a.) Mod I: Bu tip yüklemde çatlak yüzeylerinin yer değiştirmesi çatlak düzlemine diktir. Bu tip, açılma (çekme) olarak adlandırılmaktadır.
- b.) Mod II: Bu tip yüklemde (kesme) çatlak yüzeylerinin yer değiştirmesi çatlak düzlemindedir.
- c.) Mod III: Bu tip yüklemde (yırılma) çatlak yüzeylerinin yer değiştirmesi yine çatlak düzleminde, fakat yer değiştirme yönü kesme yüklemesinin sebep olduğu yönden farklıdır. Uygulamalarda çatlakların büyük çoğunluğu I. Tip yüklemekten kaynaklanmaktadır [24].

Çatlak ucundaki gerilmeleri tarif etmek için I. tip (çekme) yükleme altında çatlak içeren sonsuz büyüklükte bir plaka düşünüldüğünde çatlak ucundan mesafede ve Θ açısı ile belirtilen pozisyonda (Şekil 1.15) elastik gerilme alanı denklemleri;

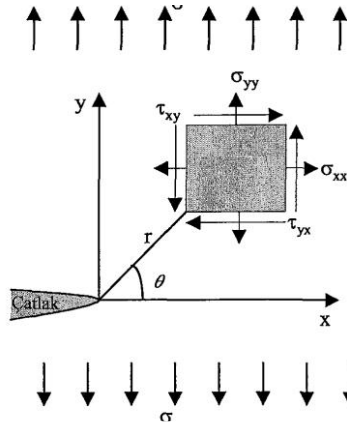
$$\sigma_x = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3\Theta}{2} \right) \quad (1.10)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3\Theta}{2} \right) \quad (1.11)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (1.12)$$

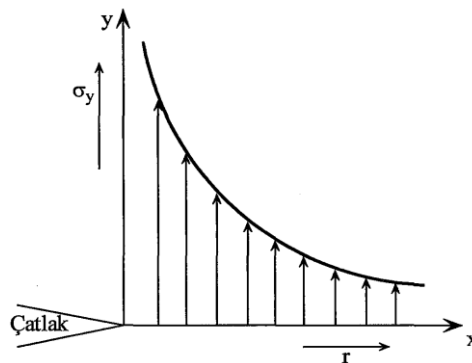
$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \text{ (düzlem şekil değişimi)} \quad (1.13)$$

şeklindedir. Bu denklemlerdeki a : çatlak boyunun yarısı, ν : poisson oranı, σ_x , x yönündeki σ_y , y yönündeki ve τ_{xy} , kayma gerilmesini belirtmektedir [35].



Şekil 1.15. Çatlak ucu yakınındaki gerilmelerin durumu [35]

Bu eşitliklerden anlaşılacağı üzere elastik durum gerilmeleri dışarıdan uygulanan gerilmenin (σ) belirli bir oranıdır. Gerilmeler çatlak boyunun kara kökü ($\sqrt{a}$) ile değişmektedir. Şekil 1.16'de görüldüğü gibi r değerlerinde gerilmeler sonsuza gitmektedir. Fakat gerçekte çatlak ucunda meydana gelen plastik deformasyon gerilmenin sonsuza gitmesini engeller [36].



Şekil 1.16. Çatlak ucundaki σ_y elastik gerilmesi [35]

Gerilme şiddet faktörü: Çatlak ucu civarındaki gerilmelerin hesaplanmasında kullanılan gerilme şiddet faktörü (K); uygulanan gerilmenin, çatlağın boyut ve şeklinin bir fonksiyonudur.

$$K = f(g)\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1.14)$$

Kırılma Tokluğu: Kırılmanın gerçekleştiği gerilme şiddet faktörünün kritik değerine (K_{IC}) kırılma tokluğu denir. Şekil 1.14’de gösterilen I. tip yükleme için sınırlı boyutta bir plaka düşünüldüğünde;

$$K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi a f \left(\frac{a}{w} \right)} \quad (1.15)$$

σ : Gerilme

a: Çatlak boyutu

σ_c : kırılma gerilmesi

w: plaka genişliği

K_{IC} : malzemenin çatlak direncinin ölçüsü

$f(g)$: Test parçasına ve çatlak geometrisine bağlı düzeltme faktörü [36]

1.5.7. Çatlak ucu plastik bölgesi

Çatlak ucunda gerilmelerin r ’ye bağlı olarak sonsuz bir değerde olacağı elastik gerilme eşitliklerinden (Eşitlik 1.10,1.11,1.12) görülmektedir. Ancak malzemeler (özellikle metaller) bir akma gerilmesine sahiptir. Çatlak ucu civarındaki gerilmeler teorik olarak çok yüksek olduklarından akma gerilmesinden daha büyüktür ve malzemedeki bölgesel olarak plastik şekil değişimine neden olurlar. Bu yüzden çatlak ucunu çevreleyen bir plastik bölge meydana gelmektedir.

Oluşan plastik bölgenin boyutunu hesaplamak için değişik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Bu konu ile ilgili yapılan ilk çalışmalarda Şekil 1.17’de gösterilen σ_y yerine σ_a

$$2r_y = r_y + \Delta a = r_p \quad (1.23)$$

Eşitlik 1.23'ten görüldüğü gibi Irwin'nin analizinden elde edilen plastik bölge boyutu, ilk yaklaşımdan elde edilen değerden iki kat büyüktür. Δa değeri Irwin plastik bölge düzeltmesi olarak adlandırılmaktadır [2].

Plastik bölgenin şekli

Buraya kadar yapılan açıklamalarda, plastik bölge ile ilgili analizler X eksen boyunca ($\Theta = 0$) yapılmış ve plastik bölge şekli dairesel kabul edilmiştir. Plastik bölgenin daha doğru bir ifadesi sıfırdan farklı Θ açıları için akma durumları incelenerek elde edilmektedir. Genellikle bu işlemde Terasca veya Von Mises akma kriterlerinden biri kullanılmaktadır [2]. Von Mises akma kriteri asal gerilme terimleri kullanılarak;

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = \sigma_{ys}^2 \quad (1.24)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Plastik bölge sınırları, asal gerilme denklemleri;

$$\sigma_1 = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\Theta}{2} \right) \quad (1.25)$$

$$\sigma_2 = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\Theta}{2} \right) \quad (1.26)$$

$$\sigma_3 = 0 \quad (1.27)$$

$$\sigma_3 = \nu(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (1.28)$$

Eşitlik 1.25'de kullanılarak Θ açısının bir fonksiyonu şeklinde;

$$\frac{K^2}{2\pi r} \left[\frac{3}{2} \sin^2 \Theta + (1 - 2\nu)^2 (1 + \cos \Theta) \right] = 2\sigma_A^2 \quad (1.29)$$

düzlem gerilme:

$$\frac{K^2}{2\pi r} \left[1 + \frac{3}{2} \sin^2 \Theta + \cos \Theta \right] = 2\sigma_A^2 \quad (1.30)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Plastik bölgenin boyutu Θ 'nın bir fonksiyonu olarak; düzlem şekil değişimi:

$$r_p(\Theta) = \frac{K^2}{4\pi\sigma_A^2} \left[\frac{3}{2} \sin^2 \Theta + (1 - 2\nu)^2 (1 + \cos \Theta) \right] \quad (1.31)$$

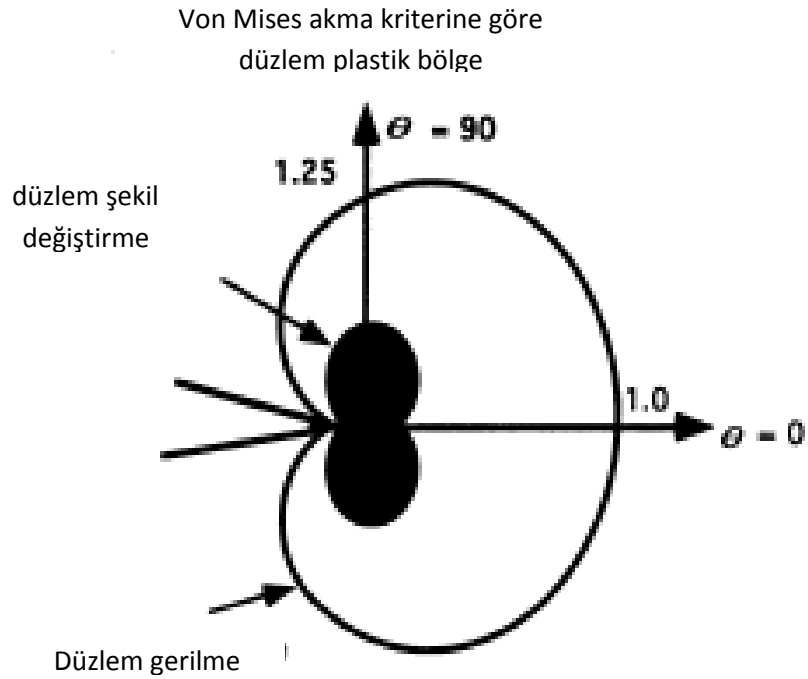
düzlem gerilme:

$$r_p(\Theta) = \frac{K^2}{4\pi\sigma_A^2} \left(1 + \frac{3}{2} \sin^2 \Theta + \cos \Theta \right) \quad (1.32)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

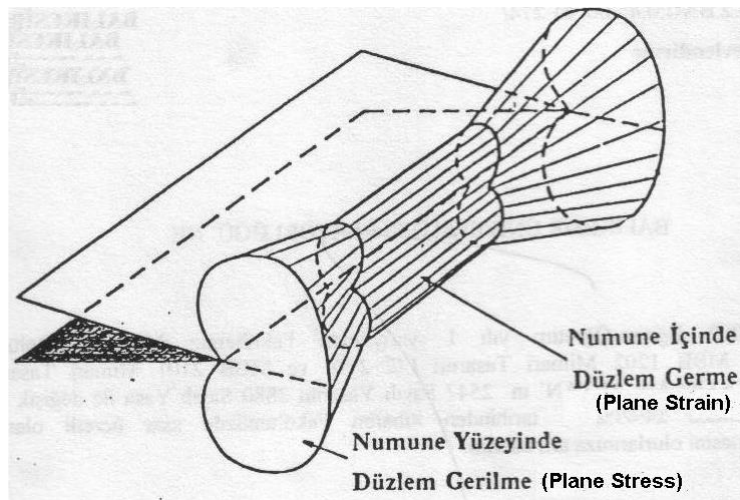
Düzlem gerilme için $\Theta = 0$ alındığında Eşitlik 1.18'in elde edildiği görülmektedir. Düzlem şekil değişimi durumunda plastik bölge boyutu Şekil 1.19'da görüldüğü gibi düzlem gerilme durumundaki plastik bölgesinden küçüktür. Malzeme kalınlığı yönünde gerilme ve şekil değişimleri farklılık göstermektedir. Malzeme bir levha olarak düşünüldüğünde çatlak ucu yan yüzeylerinde kalınlık yönünde gerilme yoktur ve düzlem gerilme durumu söz konusudur. Levhanın içine doğru ilerledikçe (kalınlık yönünde) artan oranda üç eksenli gerilme ve sonuç olarak düzlem şekil değiştirme durumuna varılabilir.

Böylece plastik bölge ve boyutunun kalınlık boyunca Şekil 1.20'deki gibi değiştiği kabul edilmektedir.



Şekil 1.19. Von Mises akma kriterine göre düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme plastik bölge şekilleri [37]

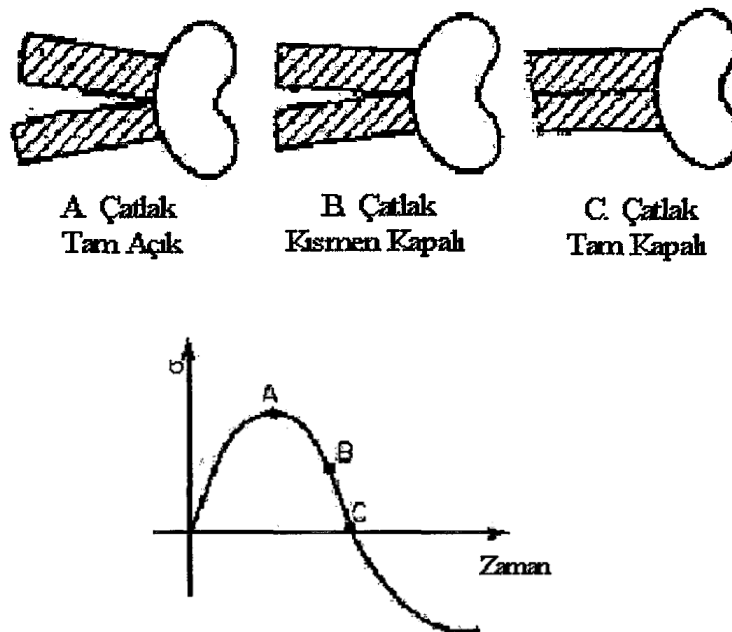
Gerilme durumları ve plastik bölge boyutu birbirini etkilemektedir. Plastik bölge boyutu numune kalınlığından büyük ise akma kalınlık yönünde yüzeydeki gibi olmaktadır. Plastik bölge boyutu küçük ise akma kalınlık boyunca aynı boyutta gerçekleşmez. Fakat kalınlık yönündeki şekil değişimi ϵ_z malzemenin elastik kısmı tarafından zorlanarak $\epsilon_z=0$ olması sağlanır. Sonuç olarak küçük plastik bölge düzlem şekil değişimi altında, büyük plastik bölge düzlem gerilme durumu altında oluşmaktadır [2].



Şekil 1.20. Orta kalınlıkta bir levhada kalınlık boyunca plastik bölge değişimi [38]

1.5.8. Çatlak Kapanması

Gerilme oranının, çatlak ilerleme hızına etkilerinin araştırılmasında çatlak kapanması kavramı kullanılmaktadır [40]. Çatlak ucunda kalıcı bir şekilde oluşan deformasyon bölgesi yük kaldırıldıktan sonra elastik deformasyona uğrayan bölge ile uyum içerisinde olmalıdır. Elastik bölgedeki malzeme orjinal boyutunu korurken plastik bölgedeki malzeme boyutu değişmiş olur ve elastik alan bu boyut değişimine uyum sağlamak zorundadır. Bunun sonucu olarak çatlak ucunu çevreleyen elastik alan bu bölgedeki plastik alana basma yönünde kuvvet uygular. Şekil 1.7 'de gösterilen çatlak ilerleme hızı-gerilme şiddet faktörü ($da/dN - \Delta K$) grafiğinin doğrusal olarak değiştiği II. bölgesinde Paris kanunu olarak bilinen 1.5 eşitliği doğru sonuç vermektedir. Ancak söz konusu eğrinin her iki ucundaki bölgede eğri R oranına bağlı olarak değişmektedir [2]. 1970 yılında Elber çatlaklı malzemeye dışarıdan çekme yükü uygulanmasına rağmen çatlak yüzeylerinin birbirine temas ettiğini (kapandığını) ve bir sonraki yükleme çevriminde etkin bir gerilme değerine kadar açılmadığını gözlemleyerek çatlak kapanma teorisini geliştirmiştir. Şekil 1.21'de görüldüğü gibi yükleme eğrisinin B noktasında gerilme değeri sıfırdan büyük olduğu halde çatlak ucunda kapanma olmaktadır. Çatlak kapanması malzemenin akma gerilmesinin aşılması ile oluşan çatlak ucu plastisitesinin bir sonucudur.



Şekil 1.21. Çatlak kapanması [39]

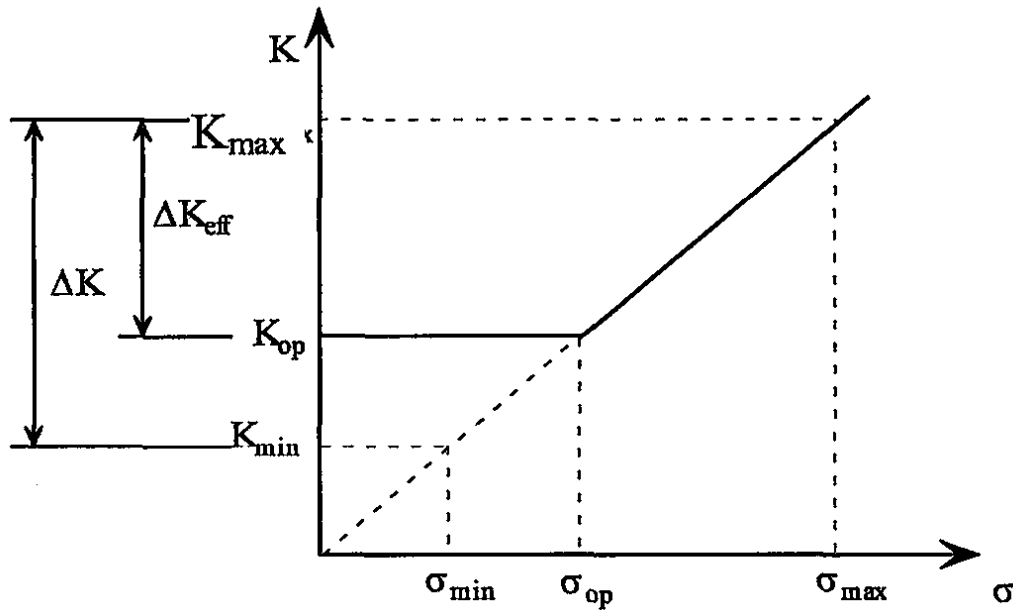
Yorulma çatlak ilerlemesinin meydana gelmesi için çatlakın tam açık olması gerekmektedir. Elber çatlakın tamamen veya kısmen açık olduğu bir çatlak açılma gerilme değeri σ_{op} tanımlanmakta ve Şekil 1.22’de görüldüğü gibi çatlak σ_{op} ’dan küçük gerilme değerinde tamamen veya kısmen kapalıdır [39].

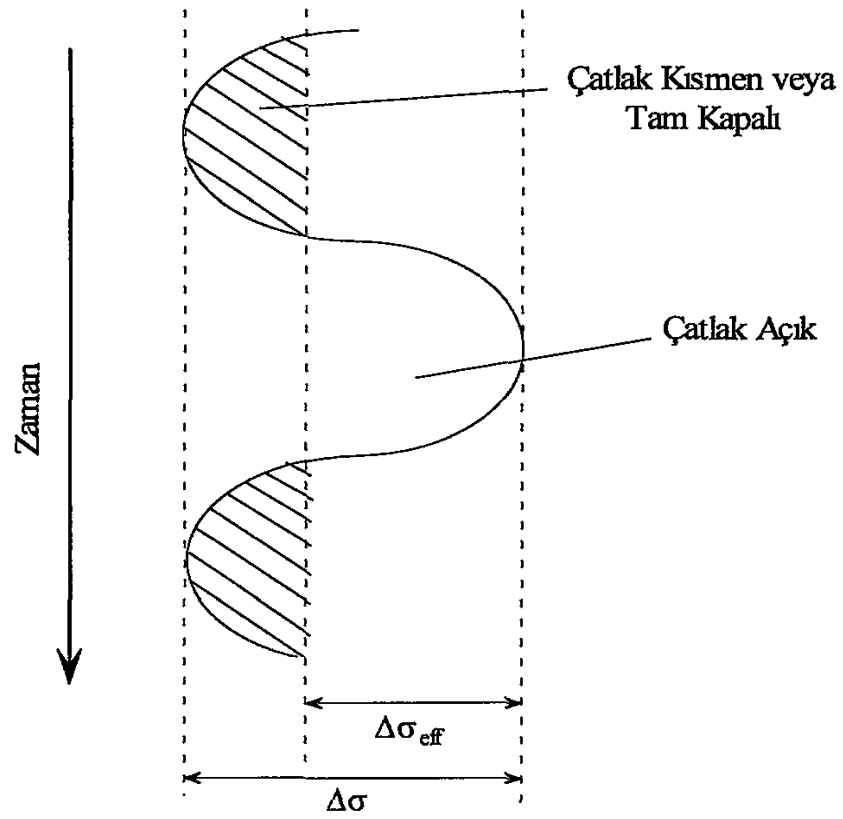
σ_{op} kullanılarak tanımlanan etkin gerilme şiddet aralığının (ΔK_{eff}), azalması ile yorulma çatlak ilerleme hızında azalma olacaktır. Numune maksimum gerilme şiddet değeri K_{max} ve minimum gerilme şiddet değerinde K_{min} çevrimsel olarak yüklendiğinde, çatlak açılma gerilme şiddet değerinin K_{op} altında çatlak yüzeyleri birbirine temas edecektir. Elber, çevrimin K_{op} altındaki kısmının çatlak ilerlemesine bir katkısının olmadığını kabul etmiş ve Eşitlik 1.34’deki gibi etkin gerilme şiddet aralığını tanımlamıştır.

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (1.33)$$

Ayrıca etkin gerilme şiddet oranı U tanımlamaktadır [35].

$$U = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} \quad (1.34)$$





Şekil 1.22. Yorulma çatlak ilerlemesi süresince çatlak kapanması [39]

Elber, Paris-Erdoğan eşitliğini değişik R oranlarında yorulma çatlak ilerleme değerleri ile başarılı sonuçlar veren eşitlik 1.35 şeklinde değiştirilerek deneysel olarak 2024-T3 Al alaşımı için 1.36 eşitliğini bulmuştur [1].

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K_{eff}^m \quad (1.35)$$

$$\frac{K_{op}}{K_{max}} = 0.5 + 0.1R + 0.4R^2 \quad (1.36)$$

2. BÖLÜM

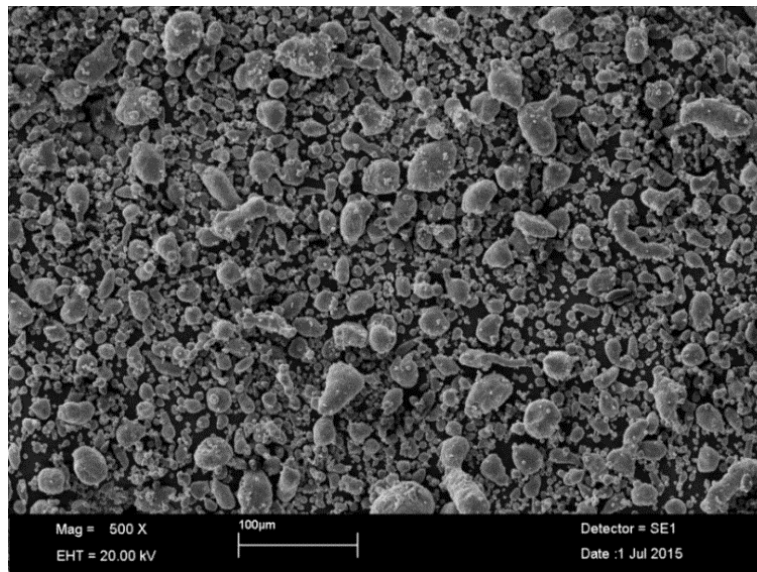
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1. Malzeme

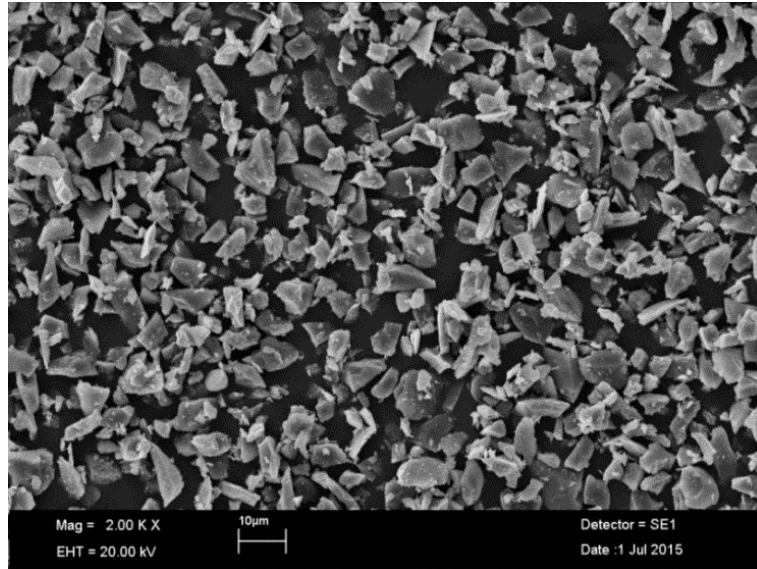
Bu araştırmada toz meteorolojisi yöntemi ile bilet üretimi için matris malzemesi olarak ortalama tane boyutu 20 μm olan AA2124 alüminyum alaşımlı metal tozlar ve takviye malzemesi olarak ortalama tane boyutu 7 μm olan SiC seramik parçacık tozları kullanılmıştır (Şekil 2.1-2). Kullanılan AA2124 alüminyum alaşımının kimyasal içeriği Tablo 2.1’de verilmiştir [46].

Tablo 2.1. AA2124’ün kimyasal içeriği (ağırlıkça %) [46]

Al	Cu	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Ti	Zn	Diğerleri
91,5-93,55	3,8-4,9	0,2	1,2-1,8	0,3-0,9	0,3	0,1	0,15	0,25	0,15



Şekil 2.1. AA2124 metal tozlarının SEM görüntüsü

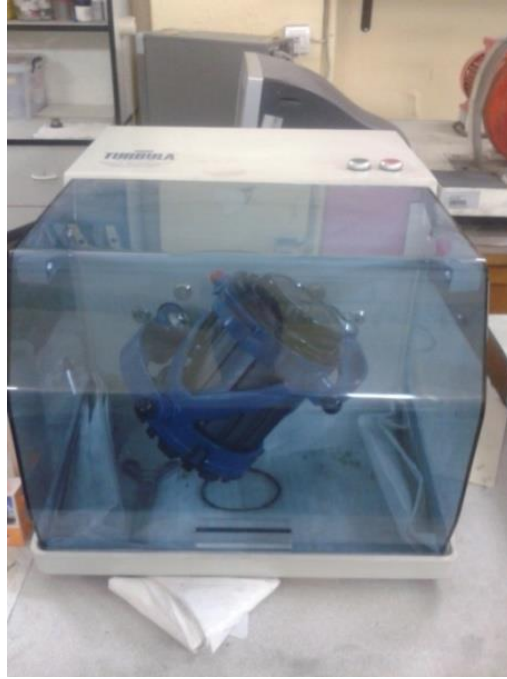


Şekil 2.2. SiC seramik parçacık tozlarının SEM görüntüsü

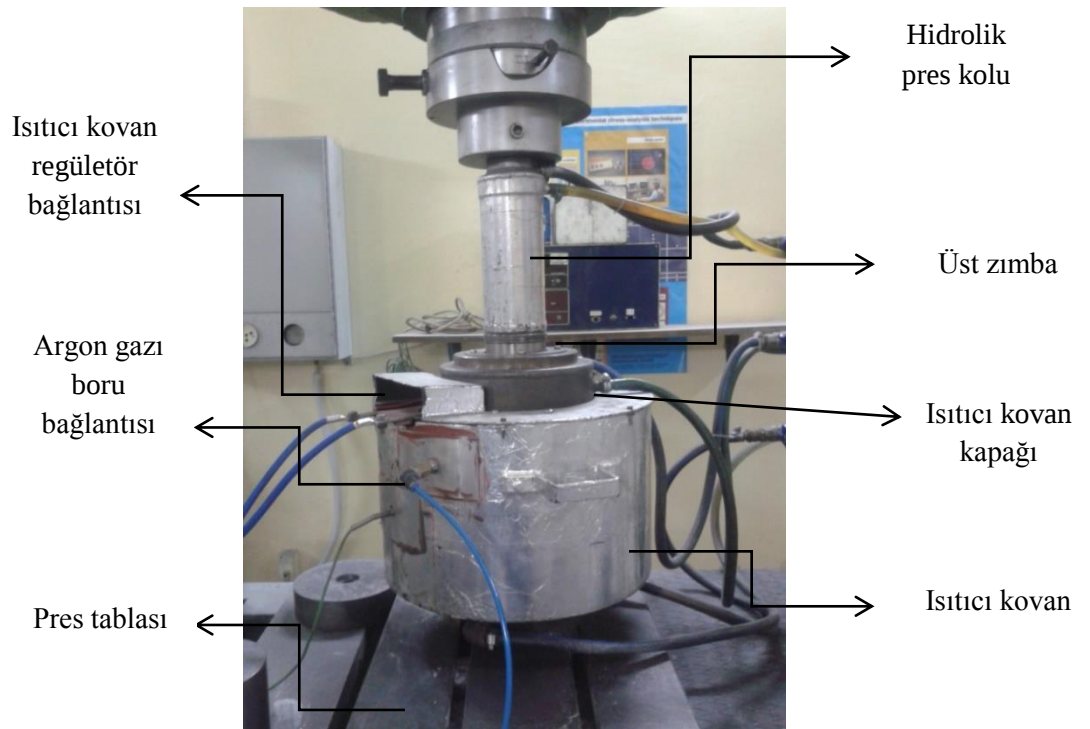
2.2. Toz Metalurjisi Yöntemi ile Bilet Üretimi

MMK biletlerinin üretimi için AA2124 alüminyum alaşımlı metal tozlarına SiCp seramik parçacık tozları ilave edilerek 4 saat süreyle cam hazneli toz karıştırıcı ünite(atritör) de karıştırılmıştır (Şekil 2.3). Bu karışım 50 mm çapında 60 mm yüksekliğinde H13 çeliğinden imal edilmiş kalıba dökülerek soğuk olarak 10 bar basınçta preslenerek sinterlemeye hazır hale getirilmiştir. Daha sonra 3-4 bar argon gazı atmosferinde, 620 °C sıcaklıkta, 45 dakika süreyle 40 bar basınç altında sinterlenmiştir (Şekil 2.9). Sinterlenen numuneler havada soğutulmaya bırakılmıştır. Bu şekilde TM yöntemiyle 50 mm çapında ve 60 mm yüksekliğinde %5, %10, %15 SiC takviyeli ve takviyesiz silindirik biletler üretilmiştir.

Biletleri kalıptan çıkartmak içinde bilet çıkartma silindiri hazırlanmıştır. Kalıplar presin altında çıkartma silindirlerinin üstüne yerleştirilip zımba vasıtasıyla kuvvet uygulanmakta ve biletler çıkarılmaktadır (Şekil 2.4-5).



Şekil 2.3. Karıştırıcı (Atritör)



Şekil 2.4. Presleme ve sinterleme

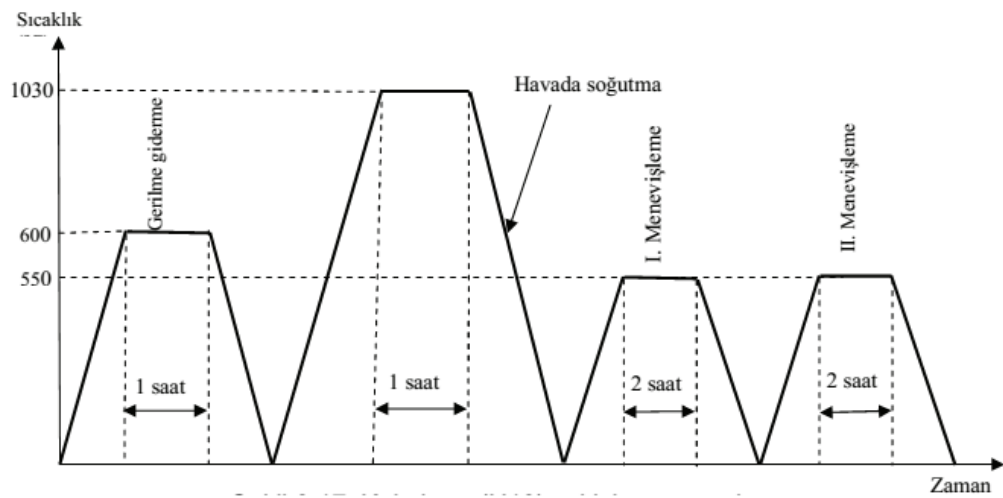


Şekil 2.5. Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen lan AA2124 bilet

2.3. Biletlerin Ekstrüzyonu

Kalıpların hazırlanması

Ekstrüzyon işlemi için kalıpların tasarlanması, malzeme seçimi, şekil ve boyut özellikleri belirlenerek kalıp imalatı gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.7). Kalıplar Solidworks programında tasarlanarak ekstrüzyon oranı 10:1 olacak şekilde H13 çeliğinden imal edilmiştir. Şekil 12.6 de H13 çeliği ısıtma işlemi grafığı verilmiştir.



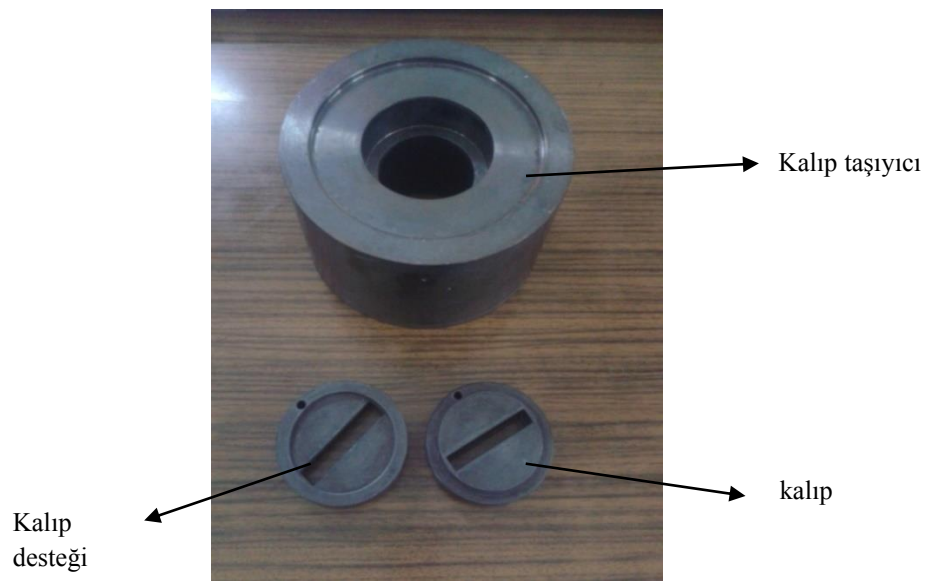
Şekil 2.6. Kalıpların (H13) ısıtma işlem prosedürü

R: ekstrüzyon oranı

$$A_b: \text{bilet kesit alanı} = \pi r^2 = 3,14 \times 25^2 = 1963,5$$

$$A_n: \text{numune kesit alanı} = 5 \times 39 = 195$$

$$R = A_b / A_n = 1963,5 / 195 = 10,07$$



Şekil 2.7. Solidwork programında tasarlanıp üretilen kalıp, kalıp taşıyıcı ve kalıp desteği

Ekstrüzyon işlemi

Ekstrüzyon işlemi Erciyes Üniversitesi MMK atölyesinde karşıt ekstrüzyon hidrolik presinde yapılmıştır (Şekil 2.9). Isıtıcı fırın ergime sıcaklığının 2/3 üne yaklaşık 500°C'ye getirilir. Üretimde kullanılacak biletler fırınada 45 dk ısınması için bekletilir. Ekstrüzyon işleminin kolay ve rahat bir şekilde gerçekleşmesi için kullanılacak bilet, pullar, kalıp, kalıp desteği, ısıtıcı kovanın bilet konulacak iç kısmı grafitlenir. Isıtıcı kovan aynı 475 °C ye ayarlanır. Sıcaklığı 475 °C ye ulaştığında fırında bulunan bilet kovan içine yerleştirilir (Şekil 2.8). Şekil 2.2 de görüldüğü gibi en alt kısımda zımba üst kısımda kalıp, kalıp ve zımba arasında bilet ve bu üçünün etrafında ısıtıcı kovan, kalıp üstünde de kalıp desteği bunun üstünde kalıp taşıyıcı olacak şekilde bu elemanların merkezlenmesi yapılır. Uygulanan sıcaklık ve basınç ile birlikte numunemiz yavaşça üst

tabladan kalıbın şeklini alarak hamur gibi çıkmaktadır. Dışarı doğru şekil değiştirerek ilerleyen bilet, aralıklardan geçerken kalıbın şeklini alarak dışarı çıkar ve akış sürdüğü sürece bir çubuk levha oluşturmaya devam eder.



Şekil 2.8. 2124 Al bilet numunesinin fırında ısıtılması

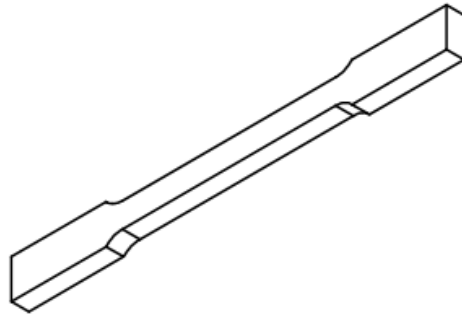


Şekil 2.9. Hidrolik pres makinesine ısıtıcı kovan, kalıp, kalıp taşıyıcının yerleştirilmesi

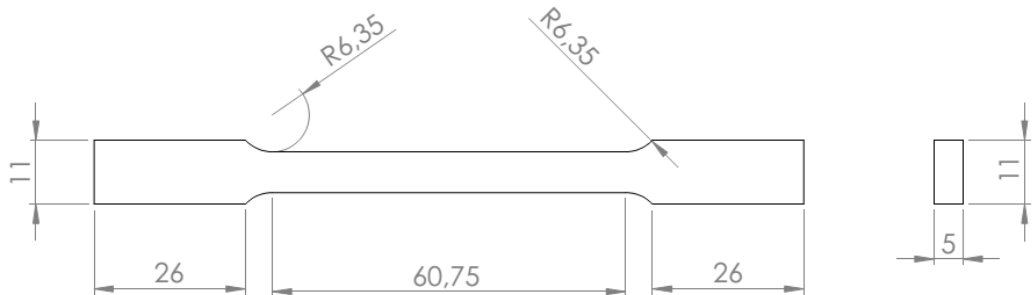
2.4. Numune Hazırlama

2.4.1. Çekme numunesi hazırlama

ASTM E 8M metal malzemelerin çekme standartlarına uygun şekilde Solidworks de çizimler yapılmıştır(şekil 2.10-11). Ekstrüzyon ile ürettiğimiz levhalar tel erozyon makinesinde bu çizimlere uygun şekilde kesilerek zımparalanmıştır. (şekil 2.12.a-b).



Şekil 2.10. ASTM E 8M standartlarında üretilen çekme numunesi



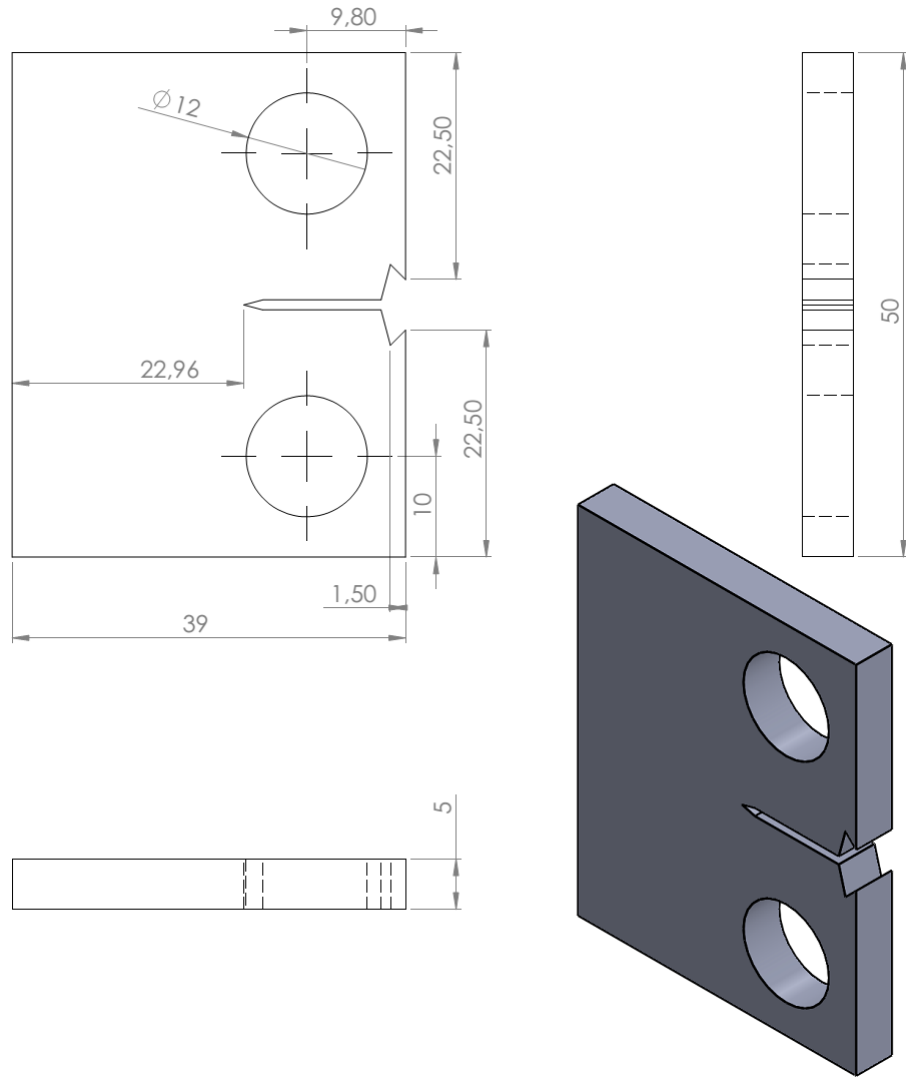
Şekil 2.11. ASTM E 8M Standartlarında üretilen çekme numunesi



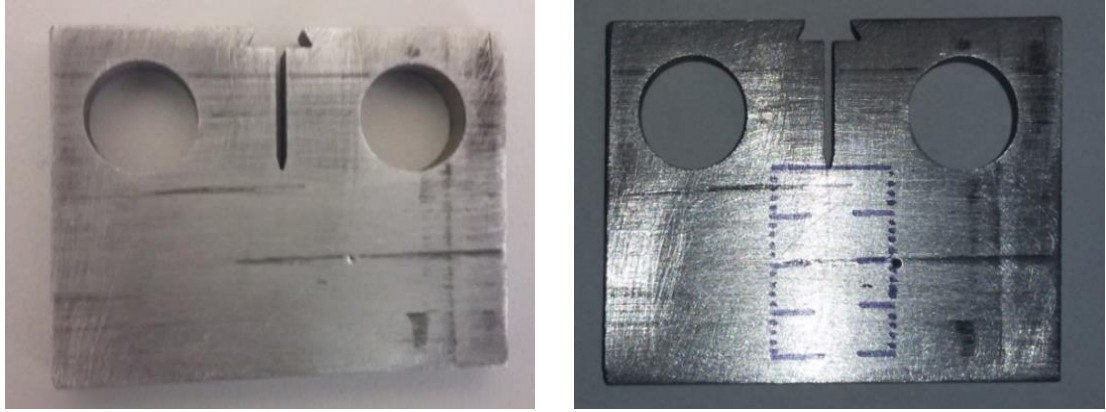
Şekil 2.12. AA2124 takviyesiz çekme numunesi a) tel erozyon makinesinde kesilmiş görüntüsü b) Numunenin zımparalanmış görüntüsü

2.4.2. CT yorulma numunesinin hazırlanması

CT yorulma numunelerinin üretimi için takviyeli ve takviyesiz ekstrüze edilmiş plaka levhalar ASTM E 647 standartlarında şekil 2.13 de görüldüğü gibi çizimleri yapılarak tel erozyon makinesinde kesilmiştir. Bu numunelerin yüzeyleri zımpara ile hafifce zımparalanmıştır. CT yorulma numuneleri üzerinde çatlak ilerlemesini kolayca takip edebilmek için cetvet ve kalem yardım ile milimetrik aralıklar ile ölçülendirmeler yapılır (şekil 2.14).



Şekil 2.13. ASTM 647 standartlarına uygun olarak hazırlanan CT yorulma numunesinin solidwork çizimleri



Şekil 2.14. Tel erozyon makinesinde ASTM E 647 standartlarına göre kesilerek elde edilen CT yorulma numuneleri

2.5. Yapılan Deneyler

2.5.1. Çekme deneyleri

Çekme deneyleri Erciyes Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde Shimadzu marka çekme cihazında Trapezium programı kullanılarak yapılmıştır (şekil 2.15-16). Deney 3 mm/sn hızda AA2124 %5, %10, %15 SiC takviyeli ve takviyesiz numunelere uygulanmıştır.



Şekil 2.15. Ekstansometre



Şekil 2.16. Çekme cihazı, çekme numunesi ve ekstensometre

Çekme deneyi yapılan numunelerin numarandırılması: Her bir gruptan üç tane olmak üzere toplam 12 tane çekme numunesi üretilerek aşağıdaki şekilde kodlanmıştır.

0-1=2124 Al alaşımlı takviyesiz birinci numune

5-1=2124 Al alaşımlı %5 SiC takviyeli birinci numune

10-1=2124 Al alaşımlı %10 SiC takviyeli birinci numune

15-1=2124 Al alaşımlı %15 SiC takviyeli birinci numune

2.5.2. Yorulma deneyleri

Yorulma deneyler Bolu Abant Baysal Üniversitesi Bilimsel Endüstriyel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (BETUM) Instron 8800 yorulma cihazında Wavematrix programı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2.18-20). Yorulma deneyleri için ASTM 647-08 standartlarına uygun şekilde yük hesaplamaları yapılmış ve şekil 2.17 de görüldüğü gibi maksimum yük 1000N, minimum yük 100N bulunmuştur. Literatürler dikkate alınarak frekans 20 Hz olarak belirlenmiştir. Bu datalar Wavematrix programında seçilerek yorulma deneyleri yapılmıştır. Cihaz ara ara durdurularak çatlak boyu, alt çene pozisyonu ve çatlak ağzı açıklık mesafesi (CMOD) manuel olarak kaydedilmiştir. Çatlak boyu ölçümleri iki şekilde elde edilmiştir. Biri direkt olarak çatlak boyu manuel olarak ölçülmüştür. Diğerisi ise CMOD ölçümleri olarak ifade edilen çatlak ağzı açıklık miktarı değerleri kullanılarak yapılan hesaplamalar ile elde edilen değerleridir.

ASTM E647-E08 Standartlarına göre çatlak boyu hesaplamaları

Tablo 2.2. CT numunelerinde çatlak boyu hesaplamaları için kullanılan sabitler

Ölçüm yapılan yer	X/W	C ₀	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
Compact Test Numunesi							
V ₀	-0.250	1.0010	-4.6695	18.460	-236.82	1214.9	-2143.6

$$\alpha = \frac{a}{W} = C_0 + C_1 U_X + C_2 U_X^2 + C_3 U_X^3 + C_4 U_X^4 + C_5 U_X^5$$

$$U_X = \left\{ \left[\frac{EvB}{P} \right]^{\frac{1}{2}} + 1 \right\}^{-1}$$

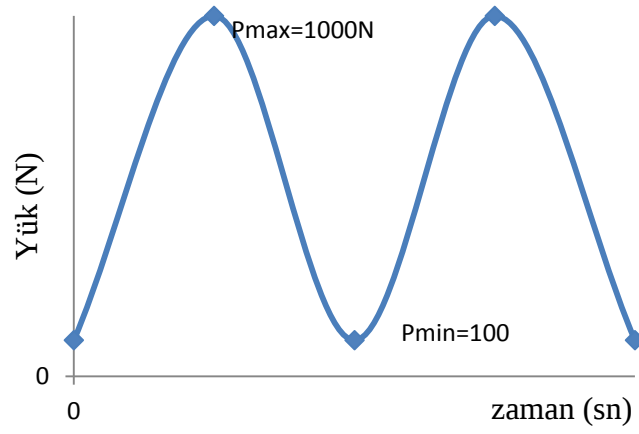
B = kalınlık

a = çatlak boyu

W = genişlik

E = Elastik modül

v = çatlak ağzı açıklık miktarı



Şekil 2.17. Yük zaman grafiği



Şekil 2.18. Yorulma deney cihazı ve düzeneği



Şekil 2.19. CT yorulma numunesinin cihaz çenelerine bağlanması



Şekil 2.20. Extansometrenin yorulma numunesine bağlanması

2.6. Mikroyapı ve Kırıküzey Analizleri

2.6.1. Mikroyapı çalışmaları

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen bilet ve çubuk levhalar Erciyes Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde Metacut M-250 cihazında kesilerek numunelerin mikro yapısının mikroskopta kolay bir şekilde incelenmesi için Struers Labopor-5 bakalite alma cihazında bakalite alınmıştır. Bu şekilde biletlerin her biri için en az bir tane bakalite alınmış numune hazırlanmıştır. Çubuk levhalarda ise ekstrüzyonun yöne bağlı etkisini incelemek için her bir numuneden en az bir tane olmak üzere üstten, yandan ve önden olmak üzere üç yönden parça kesitleri alınarak tek bakalit içersinde üretilmiştir. Bakalite alınan numuneler sırası ile 80 lik, 120 lik 240 lık 600 lük 1000 ve en son 1200 ve 1400 lük zımparalar kullanılarak numune yüzeyi zımparalanarak keçe ve 3 µm luk süspansiyon ile parlatılmıştır.

Dağlama: Dağlayıcı olarak Keller ayracı (95 ml su, 1 ml HF, 1.5 ml HCL, 2,5 ml HNO₃ kullanılmıştır. Dağlama işleminden sonra kullanılan dağlayıcıya bağlı olarak numune yüzeyi ya su ya da etil alkol dökülüp kurutulur.

2.6.2. Optik mikroskop inceleme

Bu incelemeler Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (ERÜ TAUM) yapılmıştır. Optik mikroskop incelemeleri bakalite alınmış 2124 Al alaşımlı %5, %10, %15 takviyeli ve takviyesiz bilet ve ekstrüze edilmiş numuneler kullanılmıştır.

2.6.3. SEM incelemeleri

SEM incelemeleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (ERÜ TAUM) yapılmıştır. Bu cihazda bilet ve ekstrüze edilmiş numunelerin yüzeyleri ile çekme ve yorulma numunelerinin kırık yüzeyleri incelenmiştir (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. SEM cihazı

Çekme numunelerinin kırık yüzeylerinin mikroyapı incelemesi

Deney ASTM E 8M standartlarına uygun hazırlanmış 2124 Al alaşımlı %5, %10, %15 takviyeli ve takviyesiz çekme numunelerinin çekme deneyi sonrasında oluşan kırık yüzeylerinin incelenmesi işlemidir.

Yorulma numunelerinin kırık yüzeyleri incelenmesi

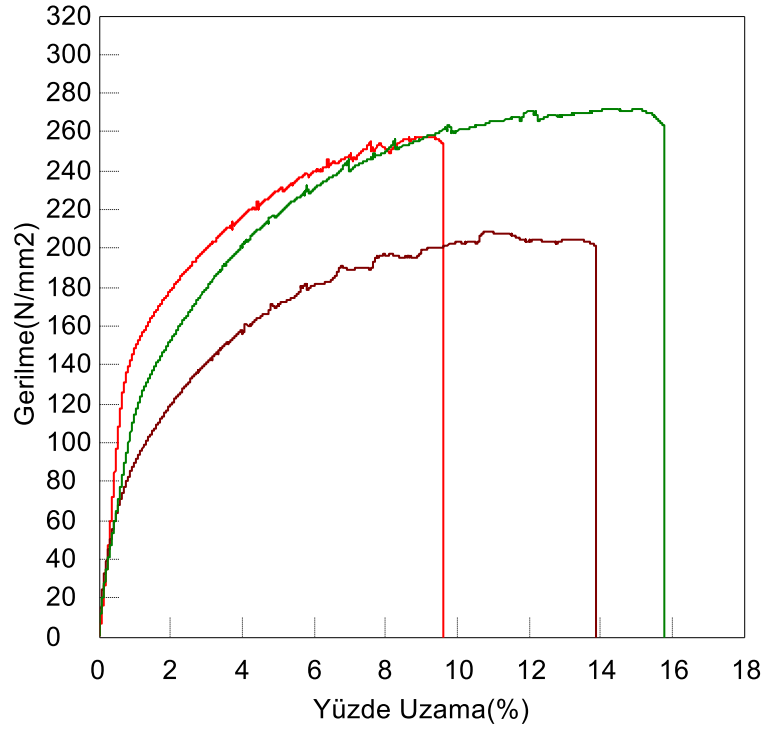
ASTM E647 standartlarında üretilen 2124 Al alaşımlı %5, %10, %15 takviyeli ve takviyesiz numunelerin yorulma deneyleri Bolu Abant Baysal Üniversitesi Bilimsel Endüstriyel ve Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde (BETUM) Instron 8800 cihazında yapılarak oluşan kırık yüzeyler Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde (ERÜ TAUM) incelenmiştir.

3. BÖLÜM

DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1. Çekme Deneyi Sonuçları

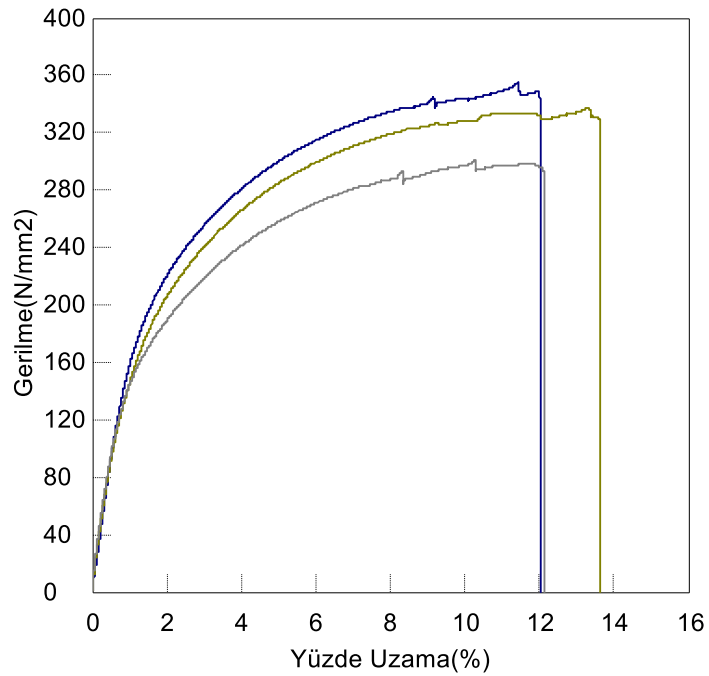
Al 2124 %5, %10, ve %15 SiC takviyeli ve takviyesiz numuneler için çekme testi deney sonuçlarında gerilmeye karşı gelen yüzde uzama ($\% \epsilon$) grafikleri Şekil 3.1-5’de ve Tablo 3.1-5 ‘de bunların ortalama değerleri verilmiştir.



Şekil 3.1. 2124 Al alaşımlı takviyesiz numunelerde gerilme yüzde uzama eğrileri

Tablo 3.1. 2124 Al alaşımlı takviyesiz numunelerde maksimum gerilmeye karşılık gelen maksimum yüzde uzama ve ortalamaları

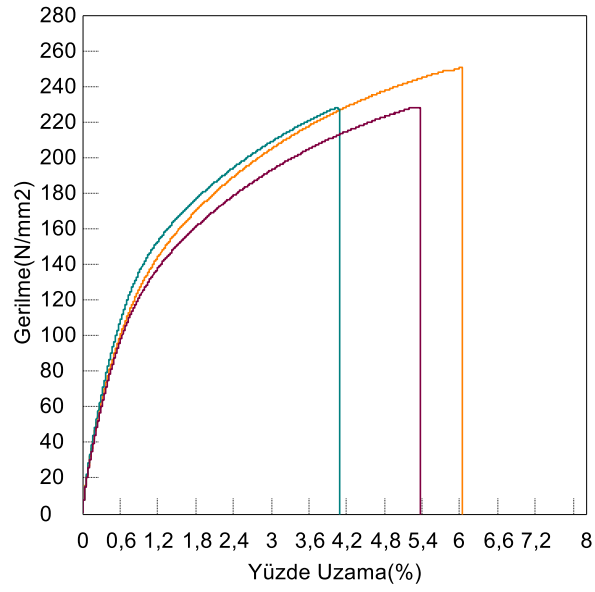
Numuneler	Maksimum gerilme (N/mm ²)	Maksimum yüzde uzama %
0-1	257,784	9,00779
0-2	209,05	10,9385
0-3	271,974	14,2825
Ortalama	246,269	11,4095



Şekil 3.2. 2124 Al alaşımlı %5 takviyeli numunelerde gerilme yüzde uzama eğrileri

Tablo 3.2. 2124 Al alaşımlı %5 takviyeli numunelerde maksimum gerilmeye karşılık gelen maksimum yüzde uzama ve ortalamaları

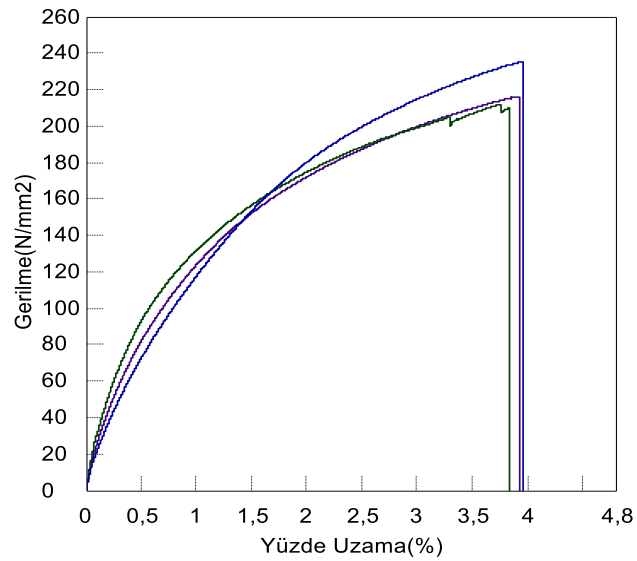
Numuneler	Maksimum Gerilme (N/mm ²)	Maksimum Yüzde Uzama (%)
5-1-1	354,79	11,4271
5-1- 2	337,493	12,9167
5-1- 4	300,708	10,2838
Ortalama	330,997	11,5425



Şekil 3.3. 2124 Al alaşımlı %10 takviyeli numunelerde gerilme yüzde uzama eğrileri

Tablo 3.3. 2124 Al alaşımlı %10 takviyeli numunelerde maksimum gerilmeye karşılık gelen maksimum yüzde uzama ve ortalamaları

Numuneler	Maksimum Gerilme N/mm ²	Maksimum Yüzde Uzama %
10-2-1	250,457	6,01728
10-2-3	228,04	4,05656
10-2-4	228,182	5,31061
Ortalama	235,559	5,12815

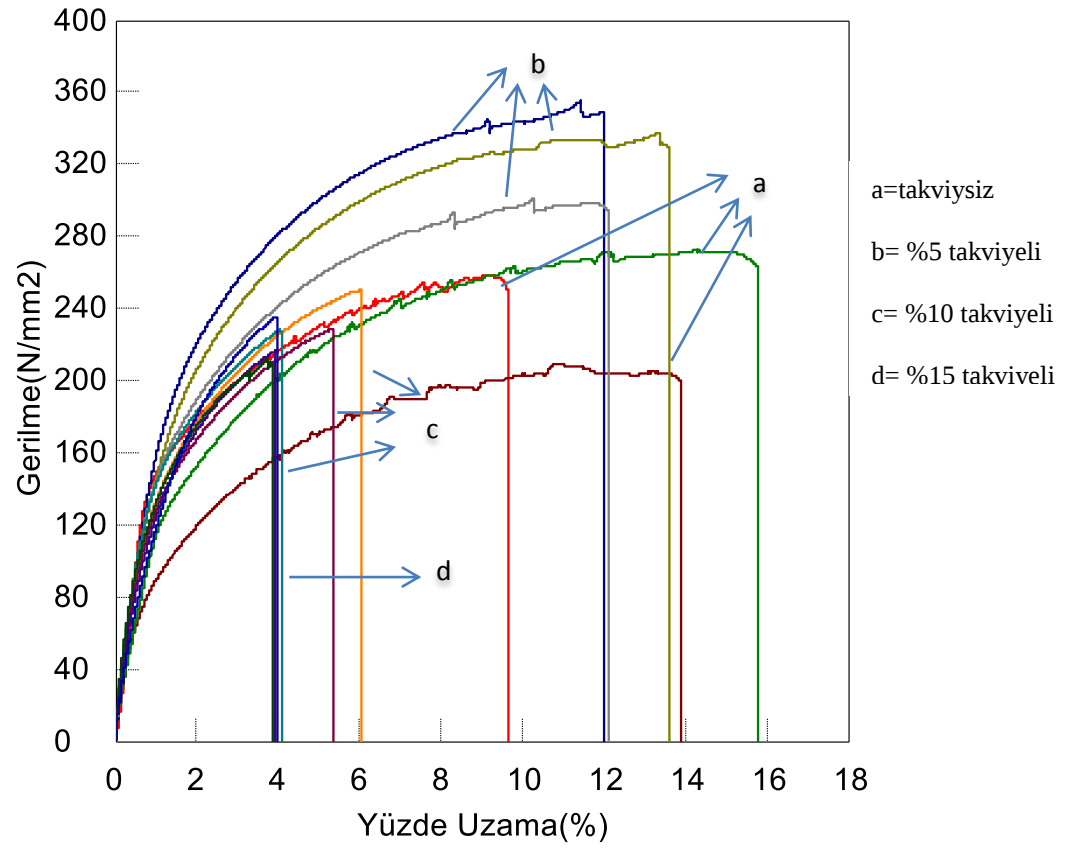


Şekil 3.4. 2124 Al alaşımlı %15 takviyeli numunelerde gerilme yüzde uzama eğrileri

Tablo 3.4. 2124 Al alaşımlı %15 takviyeli numunelerde maksimum gerilmeye karşılık gelen maksimum yüzde uzama ve ortalamaları

Numuneler	Maksimum Gerilme N/mm2	Maksimum Yüzde Uzama %
15-1-1	216,194	3,91298
15-1-2	211,552	3,73862
15-1-3	235,209	3,94727
Ortalama	220,985	3,86629

Grafik 3.5 ve tablo 3.5 de 2124 Al alaşımlı %5, %10 ve %15 SiC takviyeli ve takviyesiz çekme numunelerinde elde edilen gerilme ve yüzde uzama (ϵ) değerleri verilmiştir.



Şekil 3.5. a) Takviyesiz, b) %5 takviyeli, c) %10 takviyeli, d) %15 takviyeli çekme numunelerinde gerilme yüzde uzama eğrileri

Tablo 3.5. Çekme deneyi sonucu takviyeli ve takviyesiz numunelerde maksimum gerilme, maksimum yüzde uzama

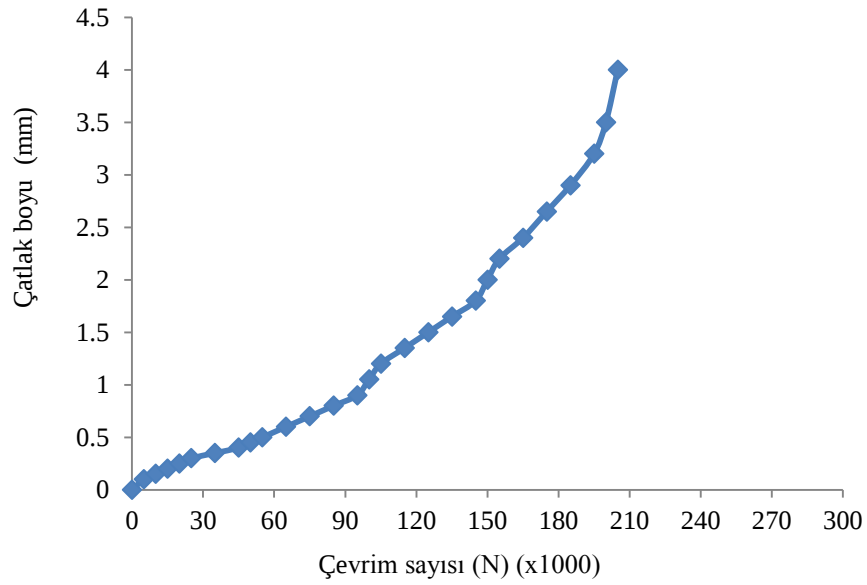
Yüzde oranlarına göre numuneler	Numuneleri n Kodlanması	Maksimum Gerilme (N/mm ²)	Maksimum ortalama Gerilmeler	Maksimum Yüzde Uzama %	Maksimum ortalama Yüzde Uzunamalar
2124 Al alaşımlı takviyesiz numuneler	0-1 0-2 0-3	257,784 209,05 271,974	246,26	9,00779 10,9385 14,2825	11,40
%5 SiC Takviyeli numuneler	5-1 5-2 5-3	354,79 337,493 300,708	330,99	11,4271 12,9167 10,2838	11,54
%10 SiC takviyeli numuneler	10-1 10-2 10-3	250,457 228,04 228,182	235,55	6,01728 4,05656 5,31061	5,12
%15 SiC takviyeli numuneler	15-1 15-2 15-3	216,194 211,552 235,209	220,98	3,91298 3,73862 3,94727	3,38

Gerilme, yüzde uzama (%ε) grafiklerini incelendiğinde SiC takviyesinin %5 ve %10 takviyeli malzemelerde yüzde uzamayı ve gerilmeyi azalttığı, %5 takviyeli çekme numunelerinde ise arttırdığı görülmektedir. %5 SiC takviyeli numuneler diğer takviyeli ve takviyesiz çekme numuneleri ile karşılaştırıldığında en iyi mukavemet ve yüzde uzama değerlerinin %5 SiC takviyeli numunelerde olduğu görülmektedir (Şekil 3.5 ve Tablo 3.5). Yüzde uzama (%ε) %5 SiC takviyeli numunelerde ortalama %11,54 iken takviyesiz numunelerde %11,40, %10 takviyelide %5,12 ve %15 takviyelide %3,38 olarak bulunmuştur. Ayrıca %5 SiC takviyeli numunelerde mukavemet değerleri hem takviyeli hem takviyesiz numunelerle karşılaştırıldığında ciddi bir artışın olduğu görülmektedir (Şekil 3.5 ve Tablo 3.5). Takviye oranının %10'a çıkarılması gerilmeyi ve yüzde uzamayı belirgin bir şekilde azalttığı görülmektedir. Buda takviye miktarının belirli bir oranı geçmesi ile mukavemet ve sünekliğin azaldığını göstermektedir. Grafik 3.5 ve Tablo 3.5 de görüldüğü gibi maksimum gerilmenin ve maksimum yüzde uzamanın en az olduğu değerler 2124 Al alaşımlı %15 SiC takviyeli numunelerde elde edilmiştir. %15 takviyeli numunelerde takviye oranının etkisi daha bariz bir şekilde görülmektedir. Çünkü takviye oranının artması hem gerilmeyi hem yüzde uzamayı aşırı derecede düşürmüştür.

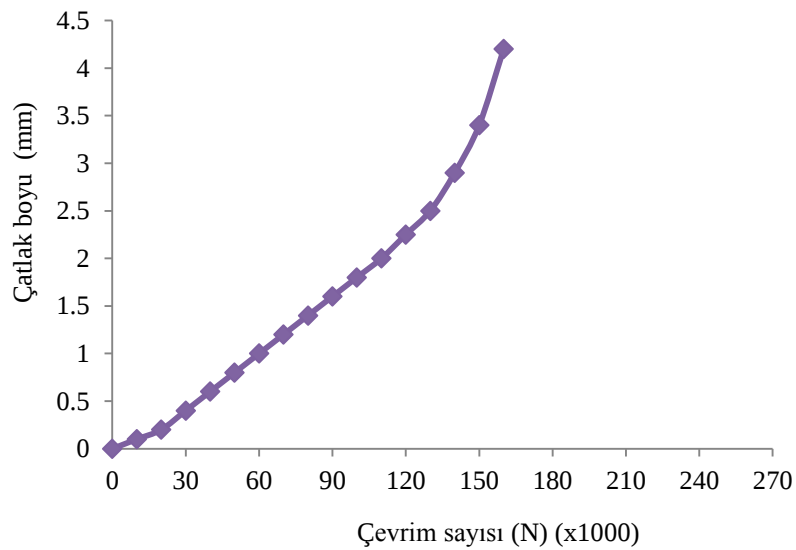
3.2. Yorulma Deney Sonuçları

3.2.1. Manuel çatlak boyu çevrim sayısı grafikleri

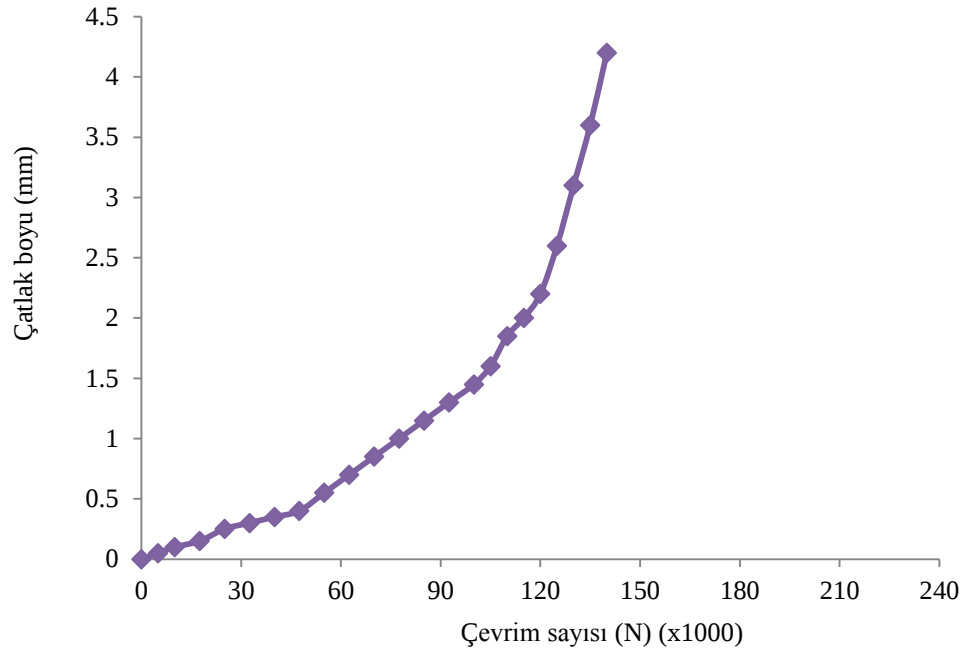
Şekil 3.6-10 'da Al 2124 %5, %10 ve %15 SiC takviyeli ve takviyesiz numuneler için yoruma deney sonuçlarında elde edilen çevrim sayısı-manuel çatlak boyu grafikleri verilmiştir.



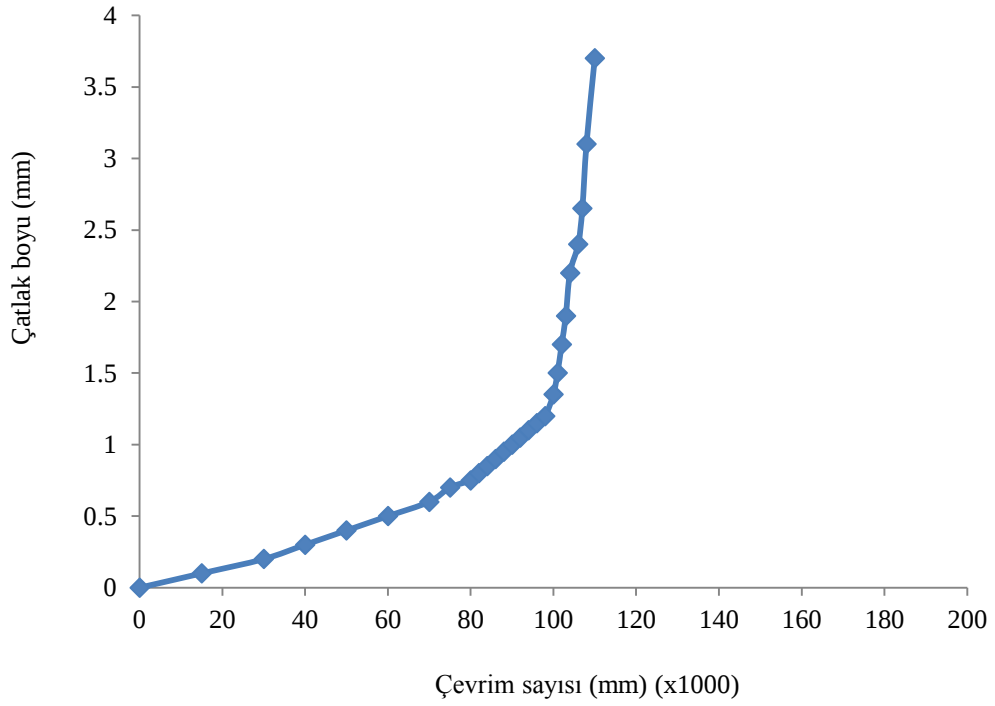
Şekil 3.6. 2124 Al alaşımlı takviyesiz numunelerde manuel çatlak boyu çevrim sayısı grafiği



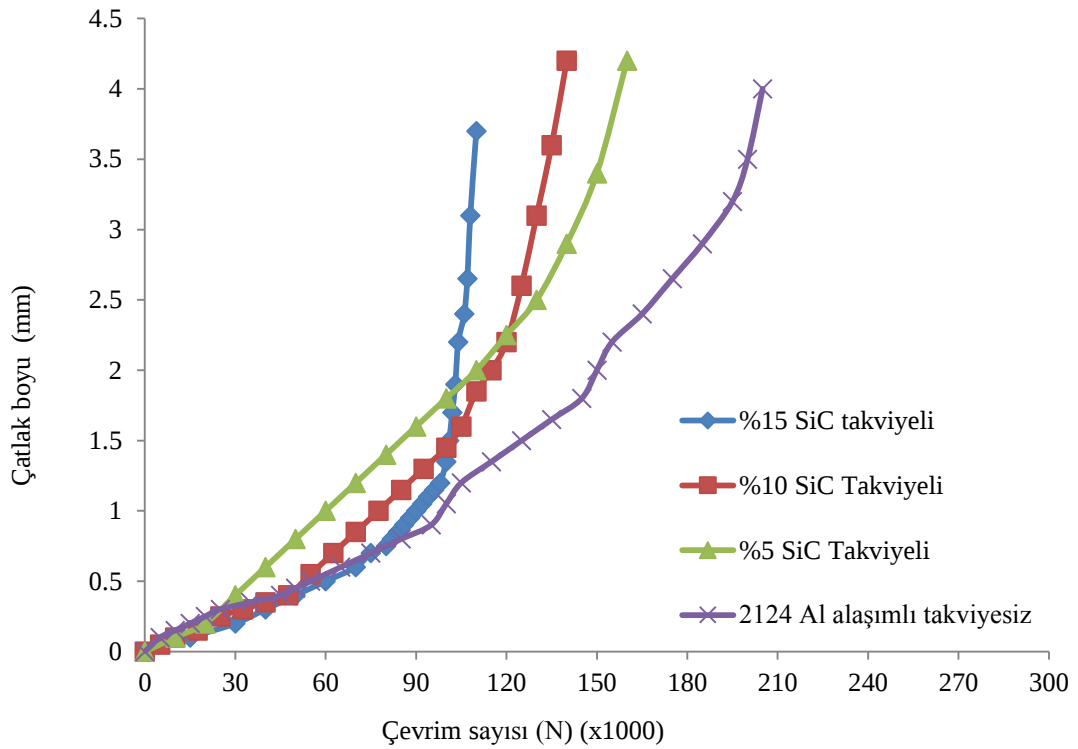
Şekil 3.7. 2124 Al alaşımlı %5 takviyeli numunelerde manuel çatlak boyu çevrim sayısı grafiği



Şekil 3.8. 2124 Al alaşımlı %10 takviyeli numunelerde manuel çatlak boyu çevrim sayısı grafiği



Şekil 3.9. 2124 Al alaşımlı %15 takviyeli numunelerde manuel çatlak boyu çevrim sayısı grafiği



Şekil 3.10. 2124 Al alaşımlı %5, %10 ve %15 takviyeli ve takviyesiz numunelerde manuel çatlak boyu çevrim sayısı grafiği

Çatlak boyu çevrim sayısı grafiklerinde (Şekil 3.10) görüldüğü gibi çevrim sayısının artmasıyla çatlak boyu artmaktadır. Ancak küçük çatlak boylarında çatlak yavaş ilerlerken, çatlak boyunun artışı ile hızlandığı görülmektedir. Ayrıca 2124 Al alaşımlı takviyesiz ve %5 SiC takviyeli yorulma numunelerde çevrim sayısının %10 ve %15 SiC takviyeli yorulma numunelerine göre daha yüksek olması bu yorulma numunelerinin sünek bir kırılma gösterdiğini de ifade eder. Sünek malzemelerde çatlak kapanmasına sebep olan çatlak uçunda oluşan plastik bölgenin boyutu daha büyüktür. [45]

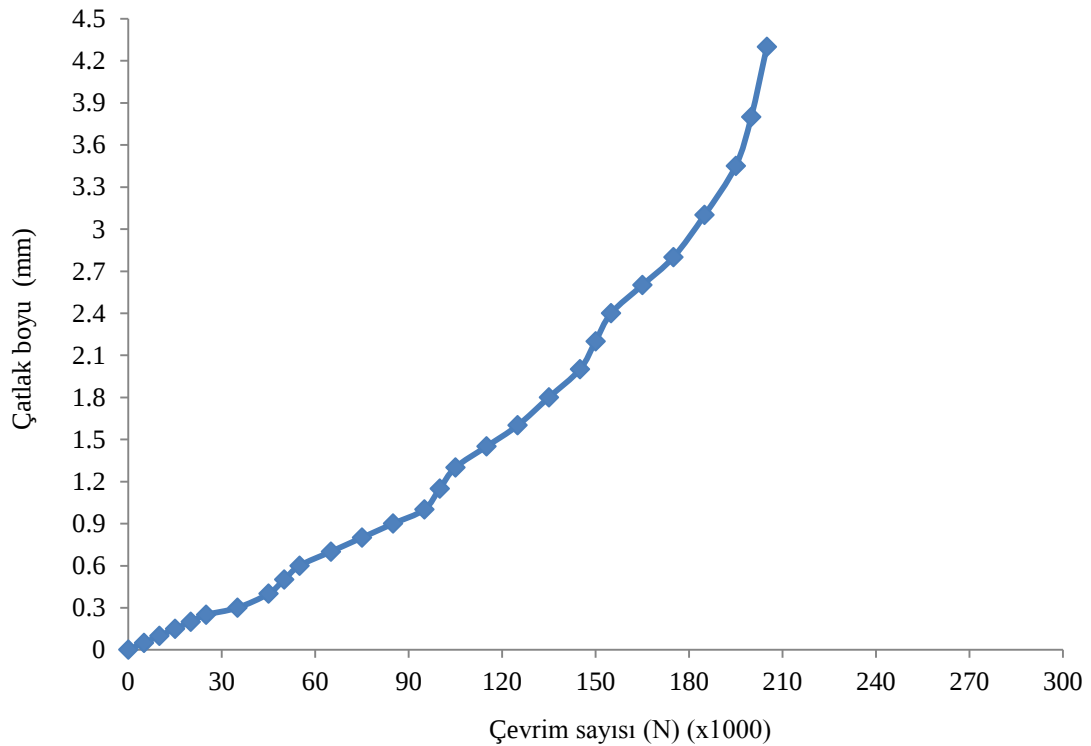
Takviyeli yorulma numunelerinde çevrim sayısının en yüksek olduğu değer %5 SiC takviyeli numunelerde elde edilmiştir. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi genel olarak takviye hacim oranının artışı ile çatlak hızlanmaktadır. En büyük çatlak ilerleme hızı %15 SiC takviyeli numunelerde görülmektedir.

Şekil 3.10 grafiğinden de anlaşılabileceği üzere en yüksek çevrim sayısı 2124 Al alaşımlı takviyesiz yorulma numunelerinde görülürken en düşük çevrim sayısı %15 SiC takviyeli numunelerinde görülmektedir. Burada SiC takviyesinin çevrim sayısını etkilediği bariz bir şekilde görülmektedir. Takviyesiz yorulma numunelerinde çatlak

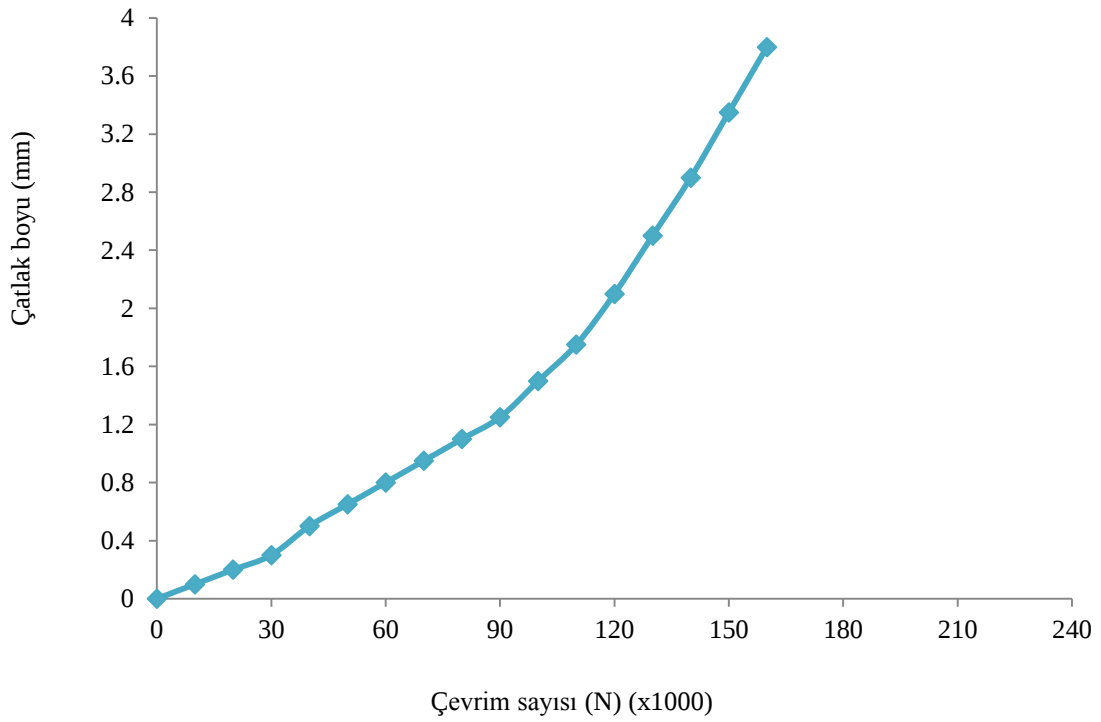
boyu 210000 çevrim kadar ilerlerken takviye oranının artmasıyla çevrim sayısı %5 takviyelide 160000, %10 takviyelide 140000 ve %15 takviyelide yaklaşık olarak 100.000 çevirme kadar düştüğü görülmüştür. Bu da takviye oranının artırılmasının malzemede çatlak başlamasından kırılmasına kadar geçen süreyi azalttığını açık bir şekilde göstermektedir.

3.2.2. CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiği

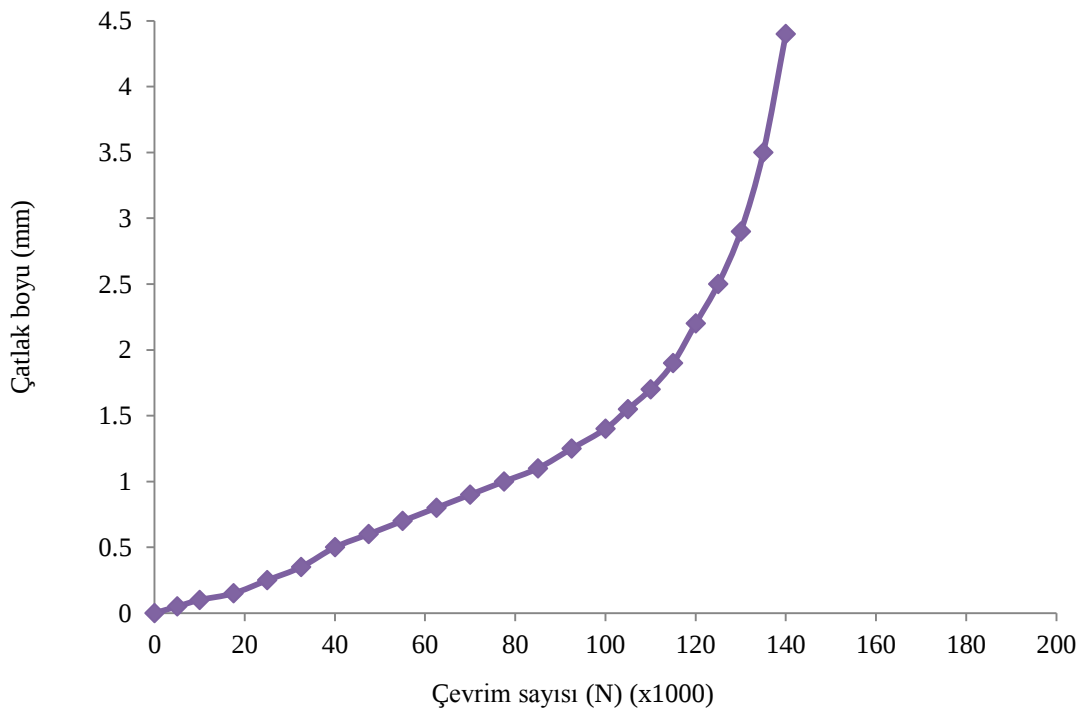
Şekil 3.10-14 'da Al 2124 %5, %10 ve %15 SiC takviyeli ve takviyesiz numuneler için yoruma testi deney sonuçlarında çevrim sayısı-CMOD çatlak boyu grafikleri verilmiştir.



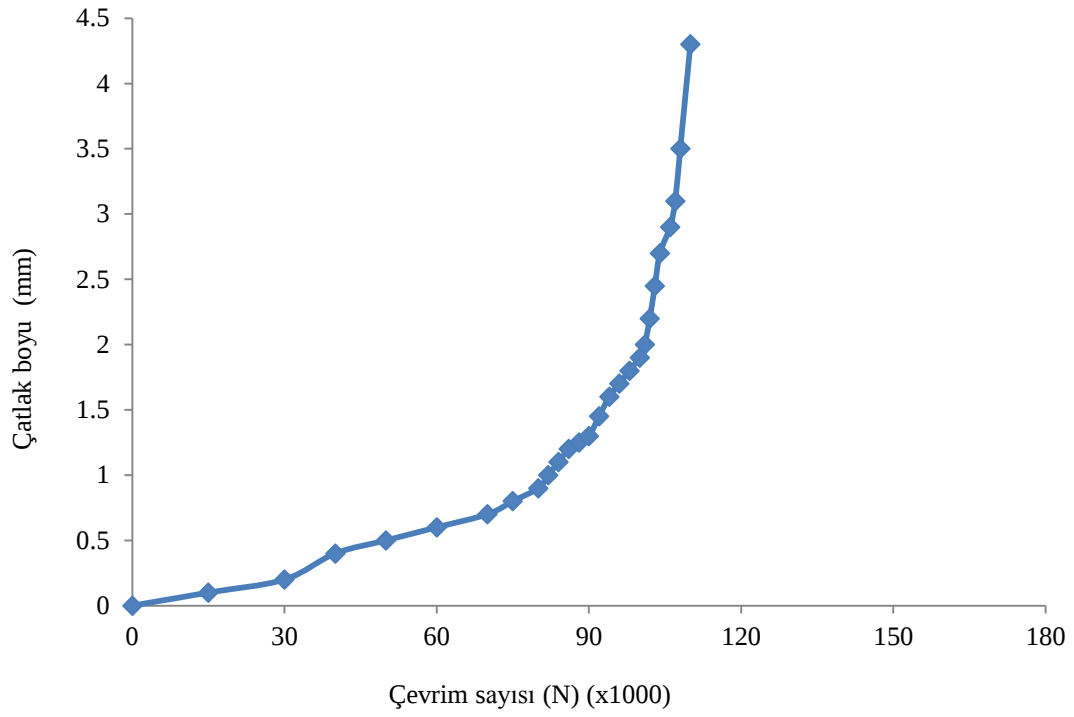
Şekil 3.11. 2124 Al alaşımlı takviyesiz yorulma numunelerinde CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiği



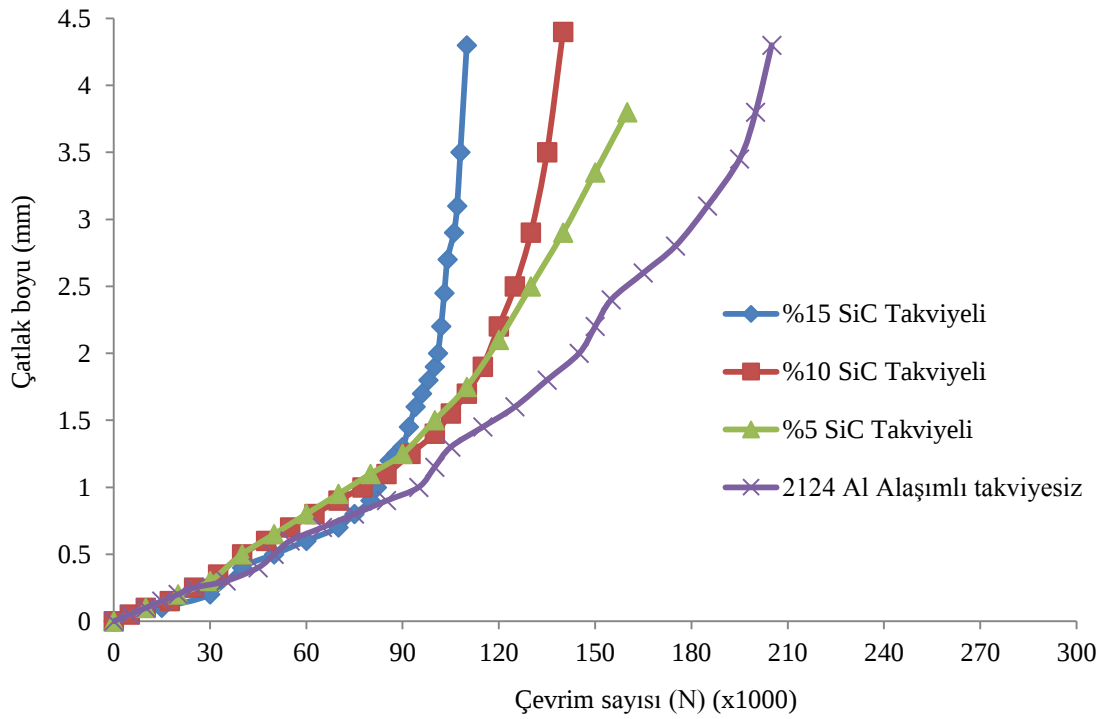
Şekil 3.12. 2124 Al alaşımlı %5 takviyeli yorulma numunelerinde CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiği



Şekil 3.13. 2124 Al alaşımlı %10 takviyeli yorulma numunelerinde hesaplanan CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiği



Şekil 3.14. 2124 Al alaşımlı %15 takviyeli yorulma numunelerinde CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiği

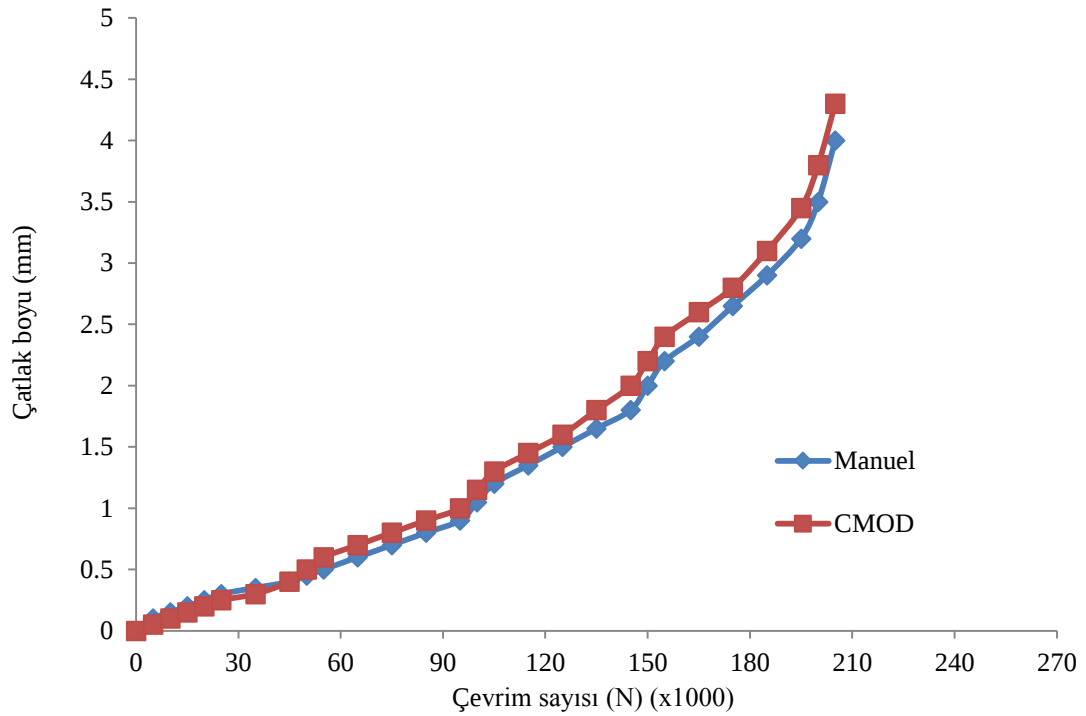


Şekil 3.15. 2124 Al alaşımlı %5, %10 ve %15 takviyeli ve takviyesiz numunelerde CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiği

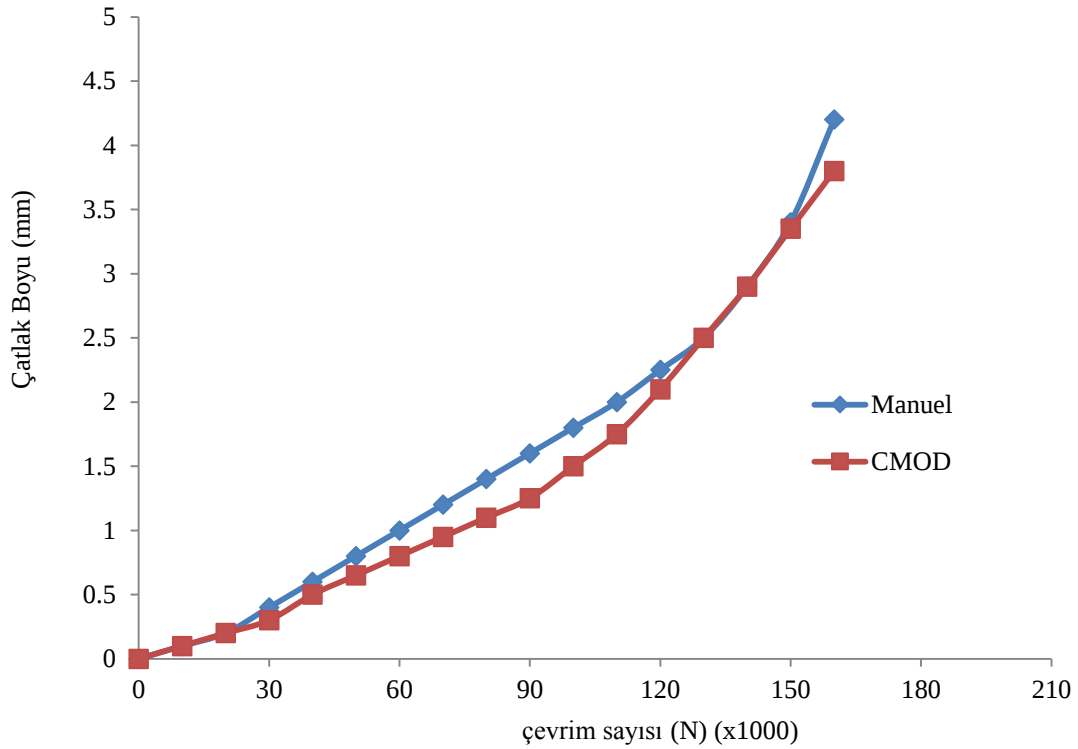
2124 Al alaşımlı %5, %10, %15 SiC takviyeli ve takviyesiz yorulma numunelerinde CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiklerinin manuel çatlak boyu çevrim sayısı grafikleri ile yakın değerler gösterdiği açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.14).

3.2.3. Manuel ve CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiklerinin karşılaştırılması

Şekil 3.15. 2124 Al alaşımlı takviyesiz yorulma numunelerinde ve Şekil 3.16 'da %5 SiC takviyeli yorulma numunelerinde manuel ve CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafikleri karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 3.16. 2124 Al alaşımlı takviyesiz yorulma numunelerinde manuel ve CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 3.17. 2124 Al alaşımlı %5 SiC takviyeli yorulma numunelerinde manuel ve CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafiklerinin karşılaştırılması

2124 Al alaşımlı takviyesiz ve %5 SiC takviyeli yorulma numunelerinde manuel ve CMOD çatlak boyu çevrim sayısı grafikleri karşılaştırıldığında manuel ve CMOD değerlerinin birbiri ile yakın değerler gösterdiği açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.15-16).

3.2.4. Çatlak başlangıcı ve ilerlemesi için geçen toplam çevrim sayısı

Tablo 3.6 2124 Al alaşımlı %5, %10 ve %15 SiC takviyeli ve takviyesiz yorulma numunelerinde çatlak başlangıcı, çatlak ilerlemesi ve toplam çevrim sayısı değerleri verilmiştir.

Tablonun birinci bölümüne çatlak görününceye kadar geçen toplam çevrim sayısına baktığımız zaman en yüksek çevrim sayısının %5 SiC takviyeli numunelerde ve daha sonra ise takviyesiz Al alaşımlı numunelerde olduğu görülmektedir. En düşük değerlerin ise sırasıyla %15 ve %10 takviyeli yorulma numunelerinde olduğu görülmektedir. Çatlak ilerlemesi için geçen çevrim sayısı ise en yüksek değerler sırasıyla Al alaşımlı 2124 takviyesiz yorulma numunelerinde ve ikinci sırada ise 2124

Al alaşımlı % 5 SiC takviyeli numunelerde olduğu görülmektedir. Yine çatlak ilerlemesi için geçen sürenin en düşük olduğu değerler ise %10 ve %15 SiC takviyeli numunelerde görülmüştür. Toplam çevrim sayısını incelediğimiz de ise %5 SiC takviyeli numunelerde en yüksek çevrim sayısının elde edildiği görülmektedir. Daha sonra sırasıyla 2124 Al alaşımlı takviyesiz yorulma numunelerinde ve %10 ve %15 takviyeli yorulma numunelerinde en düşük çevrim sayıları elde edilmiştir. Burada %5 SiC takviyeli numunelerde en iyi değerlerin alındığı görülmektedir. Bu da malzeme mikro yapısındaki SiC malzeme ömrünü pozitif yönde etkilediğini göstermektedir.

Tablo 3.6. 2124 Al alaşımlı %5, %10 ve %15 takviyeli ve takviyesiz yorulma numunelerinde çatlak başlangıcı ve ilerlemesi için geçen toplam çevrim sayısı

Numuneler	Çatlak görününceye kadar geçen çevrim sayısı	Çatlak ilerlemesi boyunca geçen çevrim sayısı	Toplam çevrim sayısı
2124 Al alaşımlı takviyesiz numuneler	1100000	205000	1305000
%5 SiC Takviyeli numuneler	1300000	170000	1470000
%10 SiC Takviyeli numuneler	500000	140000	640000
%15 SiC Takviyeli numuneler	300000	110000	410000

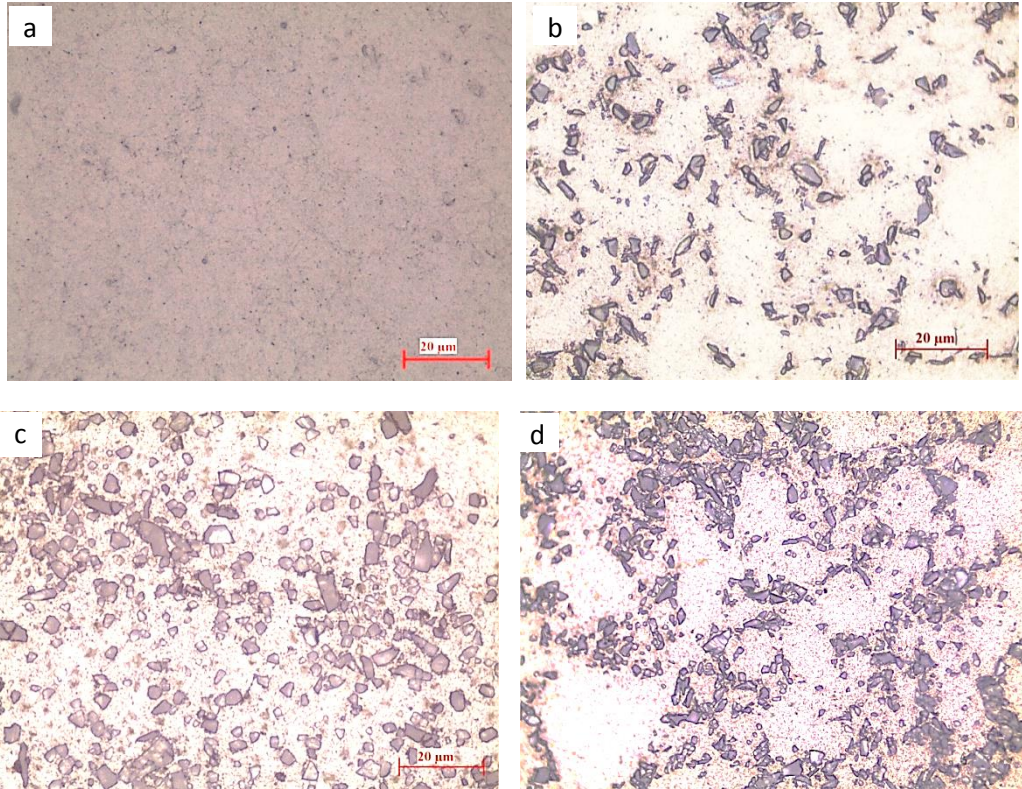
3.3. Mikroyapı İncelemeleri

3.3.1. Optik mikroskop incelemeleri

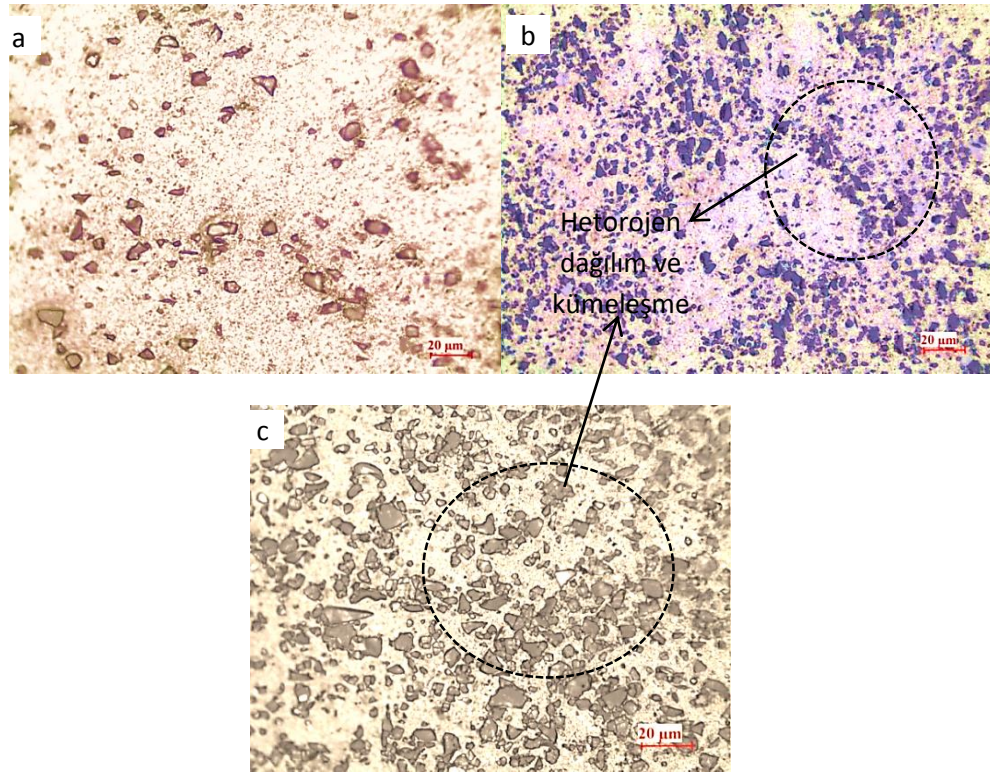
Şekil 3.18’da dağlanmış 2124 Al alaşımlı takviyesiz bilet, Şekil 3.19’de 2124 Al alaşımlı %5, %10 ve %15 SiC takviyeli ve takviyesiz bilet numunelerinin ve Şekil 3.19’da ise ekstrüzyon işlemi uygulanmış 2124 Al alaşımlı %5, %10, %15 SiC takviyeli numunelerin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.21’de bilet ve ekstrüzyon sonucu %15 Takviyeli numunelerin 50x büyütmedeki görüntülerinin karşılaştırılması verilmiştir.



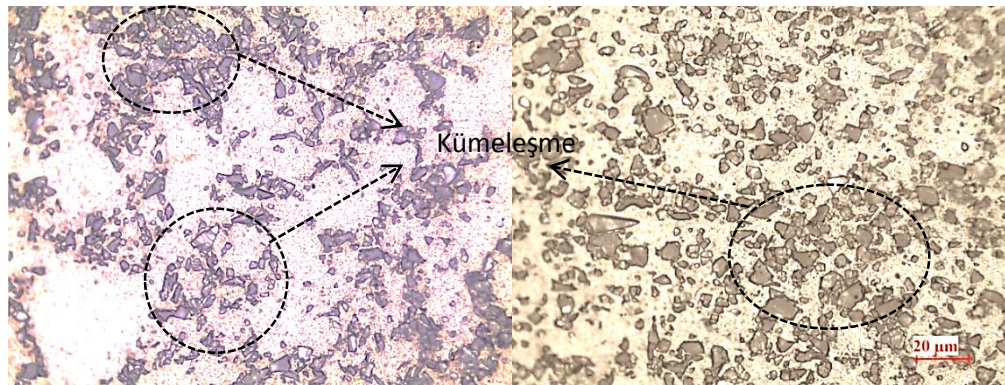
Şekil 3.18: 2124 Al alaşımlı takviyesiz 20x büyütmedeki dağlanmış bilek görüntüsü



Şekil 3.19: 2124 Al alaşımlı a) SiC takviyesiz, b) %5, c) %10, d) %15 SiC takviyeli bilek numunelerinin 50x büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri



Şekil 3.20: Ekstrüzyon işlemi uygulanmış 2124 Al alaşımlı a) %5, b) %10, c) %15 SiC takviyeli 50x büyütmede numune görüntüsü



Şekil 3.21. a) Bilet b) Ekstrüzyon sonucu %15 takviyeli numunelerin 50x büyütmedeki görüntülerinin karşılaştırılması

Şekil 3.18'da 2124 Al alaşımlı takviyesiz 20x büyütmedeki dağlanmış bilet görüntüsü incelendiğinde Al alaşımlarının tane sınırları görülmektedir. Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde SiC takviye oranının matris içindeki yoğunluğu belirgin bir şekilde görülmektedir. Bilet numunelerinde SiC takviye oranının artışıyla matris malzemesi içinde takviye elemanlarının daha fazla kümeleştiği görülmektedir. Bu

kümeleşme en fazla %15 SiC takviye oranında görülmektedir. En homojen dağılım ve en az kümeleşme %5 SiC takviyeli numunelerde elde edilmiştir (Şekil 3.19)

Ekstrüzyon işlemine tabi tutulan malzemelerinin mikro yapısı incelendiğinde bilet numuneleri de benzer görüntüler elde edilmiştir. Ekstrüzyon işlemi ile kümeleşmenin kısmen azaldığı görülmüştür. Yine görüntüler incelendiğinde en homojen dağılım ve en az kümeleşmenin olduğu değerler %5 SiC takviyeli numune görüntülerinde elde edilmiştir (Şekil 3.20-21).

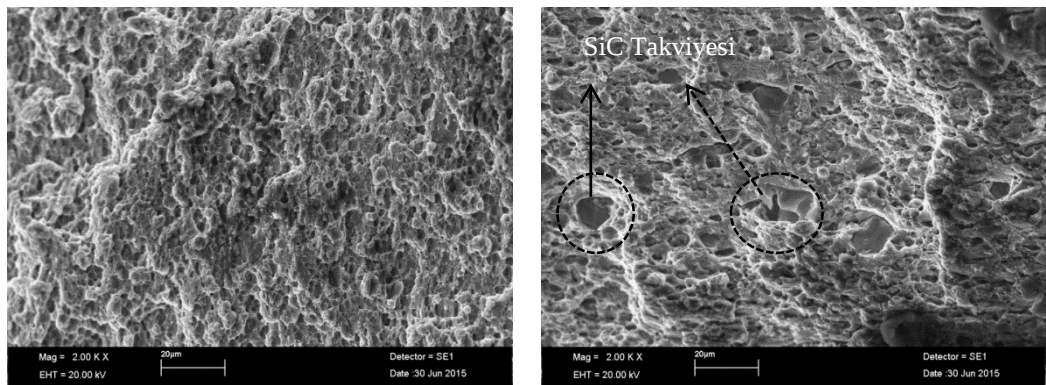
3.3.2. SEM İncelemeleri

3.3.2.1. Çekme Numunelerinde Kırık Yüzeylerinin İncelenmesi

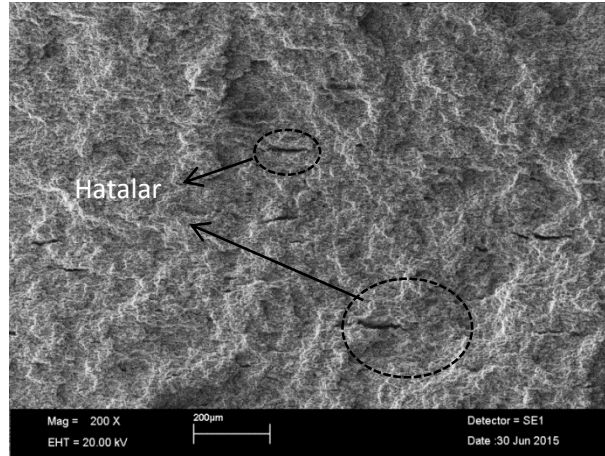
Şekil 3.22-23 çekme deneyi sonucunda elde edilen kırık numunelerin görüntüsü ve Şekil 3.24-25 'te 2124 Al alaşımlı %5 SiC takviyeli ve takviyesiz çekme numunelerinin 2.00 K X büyütmedeki genel kırık yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.22 Çekme numunesinde çekme deneyi sonucunda elde edilen görüntüsü



Şekil 3.23. 2124 Al alaşımlı a)%5 SiC takviyeli b)takviyesiz çekme numunelerinin SEM görüntüsü

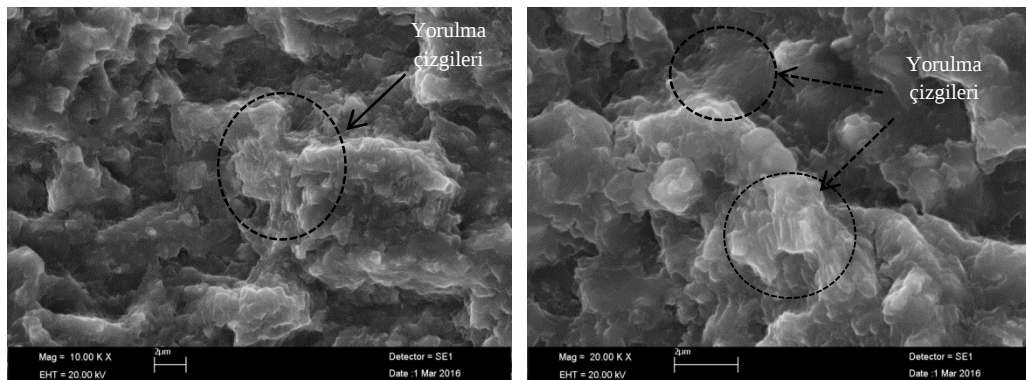


Şekil 3.24. 2124 Al alaşımlı %10 SiC takviyeli çekme numunesinin 200X büyütmedeki SEM görüntüsü

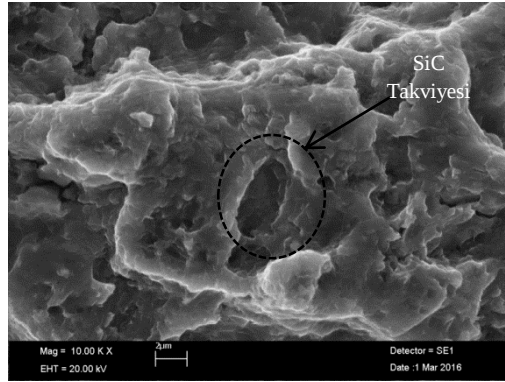
Görüntüler incelendiğinde takviyeli numunelerde takviye elemanlarının matris için dağılımı belirgin bir şekilde görülmektedir. Daire içine alınan takviye elemanlarına dikkat edilirse bunların etrafında matris malzemesinin girinti ve çıkıntılarının olduğu görülmektedir (Şekil 3.23.a). Çekme testi uygulanan numunelerin kırılma yüzeylerinde bir miktar hataların olduğu SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) açık bir şekilde görülmektedir (Şekil 3.24). Bu hatalar yüksek bir ihtimalle üretim safhasında oluşmuştur. Tahminen presleme sırasında çok azda olsa grafit Al tozlarına karışmış olabilir. Veya sinterleme ve ekstrüzyon işleminde uygulanan pres gücü ve sıcaklık bu hatalara neden olmuş olabilir.

3.3.2.2. Yorulma numunelerinin kırık yüzeylerinin incelenmesi

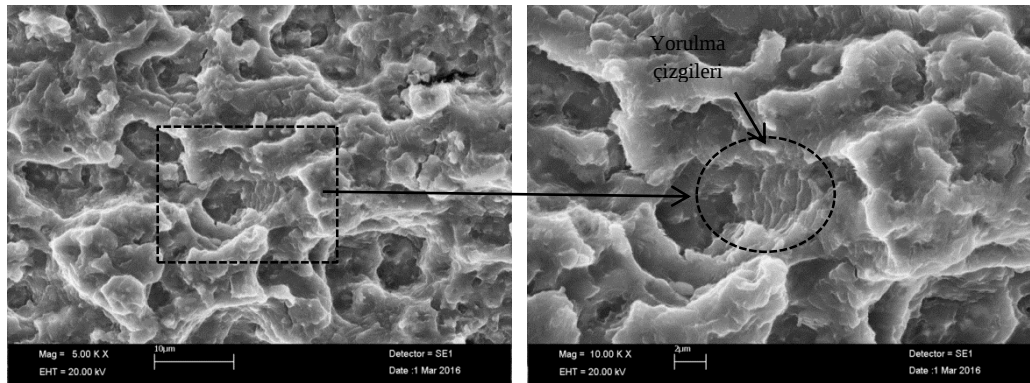
Şekil 3.25-28’da 2124 Al alaşımlı %5, %10, %15 SiC takviyeli ve takviyesiz yorulma numunelerinde farklı büyütmelerde alınan yorulma kırık yüzey görüntüleri verilmiştir.



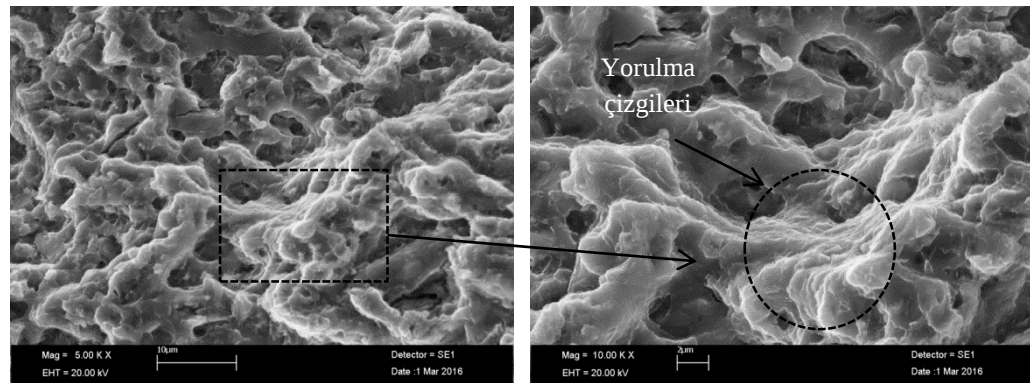
Şekil 3.25. 2124 Al alaşımlı takviyesiz yorulma numunesi kırık yüzey görüntüleri



Şekil 3.26. 2124 Al alaşımlı %5 SiC takviyeli yorulma numunesi kırık yüzey görüntüleri



Şekil 3.27. 2124 Al alaşımlı %10 SiC takviyeli yorulma numunesi kırık yüzey görüntüleri



Şekil 3.28. 2124 Al alaşımlı %15 SiC takviyeli yorulma numunesi kırık yüzey görüntüleri

Al alaşımlı 2124 SiC takviyeli %5, %10, %15 SiC takviyeli ve takviyesiz yorulma numunelerinin kırık yüzeyleri incelendiğinde genel olarak şu sonuca varılmıştır. Bütün numunelerinde az da olsa yorulma çizgileri mevcuttur. Takviyeli numunelerde SiC partikülleri net bir şekilde görülmektedir. Şekil 3.26-29'da yorulma numunelerinin kırık

yüzeylerinde meydana gelen yorulma çizgileri daire içine alınarak gösterilmiştir. Bununla beraber şekil 3.27 'de bu numunelerde meydana gelen hatalar daire içine alınmıştır. Bu hataların üretim aşamasında ısıtıl işleminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu hataların çatlak ilerlemesinde etkili olduğu açıktır.

4. BÖLÜM

SONUÇ VE ÖNERİLER

1. Gerilme, yüzde uzama (%ε) grafiklerini incelendiğinde SiC takviyesinin %15 ve %10 takviyeli malzemelerde yüzde uzamayı ve gerilmeyi azalttığı, %5 takviyeli çekme numunelerinde ise arttırdığı görülmektedir. En düşük mukavemet ve yüzde uzama sırası ile %15 ve %10 takviyeli numunelerde, en iyi mukavemet ve yüzde uzama değerlerinin %5 SiC takviyeli numunelerde elde edilmiştir. Takviye oranının %10 ve %15'e çıkarılması gerilmeyi ve yüzde uzamayı belirgin bir şekilde azalttığı görülmektedir. Buda takviye miktarının belirli bir oranı geçmesi ile mukavemet ve sünekliğin azaldığını göstermektedir.
2. Bütün çatlak boyu çevrim sayısı grafiklerinde küçük çatlak boylarında çatlak yavaş ilerlerken, çatlak boyunun artışı ile çatlağın hızlandığı görülmektedir. Sırası ile en yüksek çevrim sayıları 2124 Al alaşımlı takviyesiz ve %5 SiC takviyeli yorulma numunelerinde görülürken en düşük çevrim sayıları sırası ile %10 ve %15 SiC takviyeli numunelerde görülmektedir.
3. Bilet ve ekstrüzyon numunelerinde SiC takviye miktarının artışıyla orantılı olarak takviye elemanlarının daha fazla kümeleştiği görülmektedir. Hem bilet hem ekstrüzyon numunelerinde en homojen dağılım ve en az kümeleşme %5 SiC takviyeli numunelerde elde edilmiştir. Ekstrüzyon işlemi ile kümeleşmenin kısmen azaldığı görülmüştür.
4. Çekme ve yorulma testi mikro yapı kırık yüzey görüntüleri incelendiğinde üretim aşamasında meydana gelen hatalar görülmüştür. Bu hataların presleme sırasında kullanılan grafitten veya üretim aşamasında ısıtıl işleminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

5. Hem takviyeli hem takviyesiz yorulma numunelerinin kırık yüzeylerinde az da olsa belirgin olmayan yorulma çizgileri görülmektedir.

KAYNAKÇA

1. Suresh, S., 1991. Fatigue of Materials, Cambridge University Press, New York, USA, 701 s.
2. Karıcı, A., 2002. 2024-T3 Al Alaşımının Tek Aşırı Yük Altında Yorulma Davranışı, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir, 91 s.
3. Şahin, Y., 2000. Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Üniversitesi, Ankara, 327 s.
4. Russell, A.M., Lee, K.L., 2005. Structure Property Relations in Nonferrous Metal, John Wiley and Sons, New York, 499.
5. Daniel, I. M., Ishai, O., 1994. Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford University Press, New York.
6. Eker, A.A., 2008. Metal matrisli kompozit malzemeler ve üretim yöntemleri, (http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/imalattakompozit/MMK_son, Haziran 2016)
7. C.E. Da Costa, F. Velasco, J.M. Torralba, 2002. Mechanical intergranular corrosion and wear behavior of aluminum-matrix composite materials reinforced with nickel aluminides, pp 3541–3553, **Metallurgical and Materials Transactions, ASM International**.
8. Tenney, R. D., Dexter, H. B., 1985. Advances in composites technology, pp. 143 Advanced By Design Materials, Diane publishing, Washington.
9. Yılmaz, U., 2015. Havacılık ve Savunma Sektöründe Kompozit Malzemelerin Geleceği, **Savunma Bilimleri Dergisi**, 14(2):77-109.
10. Schwartz, M. M., 1984. Composite Materials Handbook, McGraw-Hill Book Company, New York.
11. Chawla, K.K., 1998. Composite Materials Science and Engineering, Springer-Verlag, USA.
12. Matthews, F., Rawlings, R., 1999. “Composite Materials: Engineering and Science”, CRC Press, Florida.

13. Altınsoy, İ., 2009. Alümina Takviyeli Bakır Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 100 s.
14. Onat, A., 2015, Kompozit Malzemeler Ders Notları,
(<http://docplayer.biz.tr/12475078-Sakarya-meslek-yuksekokulu-makina-ve-metal-teknolojileri-bolumu-metalurji-programi-kompozit-malzemeler-ders-notu.html>)
15. Özben, T., 2001. Sıkıştırma Döküm Yöntemiyle Üretilen Seramik Partikül Takviyeli Al-Si Esaslı Metal Matriksli Kompozit Malzemelerin Mekanik Özellikleri, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 94 s.
16. Mutlu, D., 1996. Alüminyum Matriksli Metal Kompozit Malzemelerin Üretilmesi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kütahya, 84 s.
17. Ögel, B., 1997. Kompozit Malzemelerde Son Gelişmeler Ve İleriye Dönük Beklentiler, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, 1: 639-644.
18. Aycan, M.F., 2010. Yaşlandırma Isıl İşleminin SiC ve Al₂O₃ Parçacık Takviyeli Alüminyum Alaşımı Esaslı Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerine Etkisi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 120 s
19. Mortensen, A., 2007. Concise Encyclopedia of Composite Materials, Elsevier, Lausanne.
20. Atas, E., Gür, H., Determination of Properties of SiC Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites by Ultrasonic Techniques, 15-21 October, 2000, Roma, Italy, **15th World Conference on Nondestructive Testing**.
21. Kayalı, E.S. , Ensari, C. ve Dilek, F., 1984. Metalik malzemelerin mekanik deneyleri, Teknik Üniversite Matbası, İstanbul.
22. Tetik, D., 1999. 2024-T3 Alüminyum Alaşımının Simüle Edilmiş Uçuş Yükleri Altında Yorulma Davranışı, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Eskişehir.

23. PASCOE, K., 1978. An introduction to the properties of engineering materials, ELBS, UK.
24. Ellyin, F., Fatigue Damage, Crack Growth And Life Prediction, NOVA CORP and NSERC Senior Industrial Research Chair University Of Alberta Edmonton, Alberta, Canada
25. Chawla N., Ganesh V.V., 2010. Fatigue crack growth of SiC particle reinforced metal matrix composites, **International Journal of Fatigue**, **32**:856–863
26. Oh K.H., Han K.S., 2007. Short-fiber/particle hybrid reinforcement: Effects on fracture toughness and fatigue crack growth of metal matrix composites, **Composites Science and Technology**, **67**:1719-1726
27. Mason J.J., Ritchie R.O., 1997. Fatigue crack growth resistance in SiC particulate and whisker reinforced P:M 2124 aluminum matrix composites, **Materials Science and Engineering A**(231):170–182
28. Gasem Z.M., 2012. Fatigue crack growth behavior in powder-metallurgy 6061 aluminum alloy reinforced with submicron Al_2O_3 particulates, **Composites: Part B**, **43**, 3020–3025
29. Crawford B. R., Griffiths J. R., 1999. The role of reinforcement particles during fatigue cracking of a micral-20TM-reinforced 6061 alloy, **Fatigue Fract Engng Mater Structure**, **22**:811–819
30. Chawla N., Andres C., Jones J.W., ve J.E. Allison, 1998. Effect of SiC Volume Fraction and Particle Size on the Fatigue Resistance of a 2080 Al/SiCp Composite, **Metallurgical and Materials Transactions A**, **29A**:2843-2854.
31. Chen Z., He P., Chen L., 2007. The Role of Particles in Fatigue Crack Propagation of Aluminum Matrix Composites and Casting Aluminum Alloys, **Journal of Materials Science Technology**, **23**:213-216.
32. John E., Allison J. Wayne J., 1993. Fatigue Behavior of Discontinuously Reinforced Metal-Matrix Composites, *Fundamentals of Metal Matrix Composites*, Ed: Suresh S., Mortensen A., Needleman A., Butterworth-Heinemann, 269-294.

33. Jogi B.F. Brahmanekar P.K., Nanda V.S., Prasad R.C., 2008. Some studies on fatigue crack growth rate of aluminum alloy 6061, **Journal of Materials Processing Technology**, 201:380–384.
34. Srivatsan T.S., Annigeri R., 2000. The Quasi-Static and Cyclic Fatigue Fracture Behavior of 2014 Aluminum Alloy Metal-Matrix Composites, **Metallurgical and Materials Transactions A**(31A):959-974.
35. T.L. Anderson, Fracture Mechanics, 1995. Department of Mechanical Engineering Texas University.
36. Broek, D., 1984. Elementary engineering fracture mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, Netherlands.
37. Bahram, F., 1997. Fatigue and fracture mechanics of high risk parts, Springer Science.
38. Ay İ., 1992. Kırılma Mekaniği Ders Notları,
(<http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/km/lecture5.pdf>) (haziran 2016)
39. Banantine, J. A. ve Comer, J. J., 1990, Fundamentals of metal fatigue analysis, Prentice-Hall Inc., USA.

ÖZGEÇMİŞ

Adı-Soyadı : Eşref ÇAKIR
Doğum Tarihi : 01.08.1986
Doğum Yeri : Dicle/Diyarbakır
Uyruk : Türkiye Cumhuriyeti
Medeni Durum : Evli
Cep Telefonu : 0506 428 81 32
E-Posta : esref212326@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Kurum
Yüksek Lisans	Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisans	Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Gövde Motor Bakım Bölümü

İŞ DENEYİMLERİ

Kurum	Görev
Dicle Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulunda	Araştırma Görevlisi

YABANCI DİL

İngilizce