KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

EŞİT KANAL AÇISAL PRESLEME (EKAP) VE YARI KATI İŞLEMLE ÜRETİLEN AA7075 ALAŞIMININ MİKROYAPI, SERTLİK VE YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

HASAN KAYA

KOCAELİ 2013

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

EŞİT KANAL AÇISAL PRESLEME (EKAP) VE YARI KATI İŞLEMLE ÜRETİLEN AA7075 ALAŞIMININ MİKROYAPI, SERTLİK VE YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

HASAN KAYA

Prof.Dr. Mehmet UÇAR
Danışman, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. Muzaffer ZEREN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Prof.Dr. Ramazan YILMAZ
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv. .....

Yrd.Doç.Dr. Ramazan SAMUR
Jüri Üyesi, Marmara Üniv. .....

Yrd.Doç.Dr. Abdulkadir CENGİZ
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv. .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 04.10.2013

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Düşük üretim maliyetleri ve hafifliklerinden dolayı alüminyum ve alaşımları endüstriyel alanda yoğun olarak kullanılan metal ve alaşım gurubuna girmektedir. Son yıllarda büyük bir gelişme gösteren otomotiv sektörü başta olmak üzere uzay, havacılık ve gıda sektöründe çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedeni ısıl işlemlerle ve plastik deformasyon işlemleri ile bu alaşımların dayanımlarının arttırılabilmesidir.

Bu doktora tez çalışmasında Eşit Kanal Açısal Presleme (EKAP) ve Yarı Katı İşlemle (YKİ) üretilen AA7075 alaşımının mikroyapı, sertlik ve yorulma davranışları incelenmiştir. Özellikle havacılık sektöründe kullanılan bu alaşım öncelikle geleneksel döküm yöntemi ile üretilmiş ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Elde edilen alaşım malzemesi metal ve alaşımlarında ultra ince tane yapısının üretilmesinde kullanılan bir plastik deformasyon metodu olan EKAP işlemlerinden geçirilmiş ve ardından küresel tanelerden oluşan mikroyapının üretilebilmesi amacıyla YKİ tekniği uygulanmıştır. Farklı işlem teknikleri uygulanarak elde edilen malzemelerin mikroyapı incelemeleri ve yorulma davranışları incelenmiştir.

Doktora sürecinde hazırlanmış olan bu çalışma planlı ve uzun bir süreç içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu süreç içerisinde çalışmalarıma çeşitli kariyerlerdeki insanların değerli katkıları bulunmuştur. Bu çalışmayı yaparken bana desteğini hiçbir zaman esirgemeyerek yardımcı olan, tez danışmanım Sayın Prof.Dr. Mehmet UÇAR hocama sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince göstermiş olduğu ilgiden ve her konuda desteğini hissettiren tez izleme komitesi üyelerinden Sayın Yrd.Doç.Dr. Ramazan SAMUR ve Sayın Yrd.Doç.Dr. Abdulkadir CENGİZ'e, Sayın Doç.Dr. Dursun ÖZYÜREK ile Öğr.Gör. Ahmet ÇALIŞKAN'a katkılarından dolayı en derin şükranlarımı sunarım. Ayrıca mikroyapı incelemesinde laboratuarlarını kullanmış olduğumuz Kocaeli Üniversitesi Metalurji Mühendisliği Bölüm Başkanlığına teşekkür ederim. Bu çalışma, Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2010/076 ve 2010/058 no' lu projeler ile desteklenmiştir. Katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarımın her safhasında bana maddi ve manevi desteklerini ve anlayışlarını hiç esirgemeyen, başarımın en büyük kaynağı olan elleri öpülesice insanlara, değerli ailem; Babam: Necati KAYA, Annem: Emine KAYA ve Kardeşim: Dz.Yzb. Hüseyin KAYA ile değerli eşim: Arş.Gör.Dr. Gülşah KAYA' ya ve Oğlum: Kuzey KAYA'ya sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ekim-2013 Hasan KAYA

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR viii
ÖZET ix
ABSTRACT x
GİRİŞ 1
1. GENEL BİLGİLER 6
1.1. Eşit Kanal Açısal Presleme (EKAP) 6
1.1.1. EKAP yöntemi 6
1.1.2. EKAP işlem parametreleri 7
1.1.2.1. Kalıp açıları 8
1.1.2.2. İşlem rotaları 9
1.1.2.3. Presleme hızı 11
1.1.2.4. Presleme sıcaklığı 11
1.1.2.5. Geri presleme 12
1.1.2.6. Preslenecek malzeme kesiti 13
1.2. Yarı Katı İşlem (YKİ) 15
1.2.1. Yarı-Katı üretim teknolojisi 15
1.2.2. YKİ parametreleri 19
1.2.2.1. Basınç 19
1.2.2.2. Sıcaklık 20
1.2.2.3. Sıkıştırma hızı 20
1.2.2.4. Bileşim 20
1.2.2.5. Kalıp malzemesi 21
1.2.2.6. Zaman 21
1.2.3. Mekanik özellikler 22
1.3. Malzemelerin Yorulma Davranışı 22
1.3.1. Yorulma testleri 23
1.3.2. Yorulma kırılmasının nedeni 25
1.3.3. Yorulma-mikro çatlak oluşumu ve ilerlemesi 26
1.3.4. Yorulma etkisi ile kırılma 27
1.3.5. Malzemelerde yorulmaya tesir eden faktörler 29
1.3.5.1. Malzemenin cinsi ve bileşimin etkisi 29
1.3.5.2. Malzemeye uygulanan kuvvet 30
1.3.5.3. Yüzey işlemlerinin etkisi 30
1.3.5.4. Boyut-hacim etkisi 31
1.3.5.5. Korozyon etkisi 31
1.3.5.6. Sıcaklığın etkisi 32
1.3.6. Yorulma tasarım kriterleri 32
1.3.7. Metallerde yorulma 35
2. MALZEME VE YÖNTEM 39

2.1. Döküm İşlemi 39
2.2. EKAP Kalıp Tasarımı ve Sisteminin Kurulması 41
2.2.1. Hekza EKAP kalıp tasarımı 41
2.2.2. EKAP kalıp imalatı 42
2.2.3. EKAP kalıp pimleri 43
2.2.4. Kalıp tutucusu 44
2.2.5. EKAP Sistemi 45
2.2.6. EKAP Numunelerinin Hazırlanması 49
2.3. EKAP İşlemleri 49
2.4. Yarı Katı İşlem 50
2.5. EKAP + YKİ 52
2.6. Yorulma Numunelerinin Hazırlanması 53
2.7. Karakterizasyon Çalışmaları 54
2.7.1. Metalografik numunelerin hazırlanması ve mikroyapı incelemeleri 54
2.7.1.1. Metalografik numunelerin hazırlanması 54
2.7.1.2. Optik mikroskop incelemeleri 55
2.7.1.3. Tane boyut ölçümleri 56
2.7.2. SEM – EDS incelemeleri 56
2.7.3. TEM incelemeleri 56
2.7.4. Kırık yüzey SEM incelemeleri 58
2.8. Mekanik Testler 58
2.8.1. Sertlik ölçümleri 58
2.8.2. Yorulma testleri 59
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 60
3.1. EKAP İşlemi ile Üretilen Numuneler 60
3.2. Geleneksel Döküm Yöntemi ile Numune Üretimi 65
3.3. Yarı Katı İşlem İle Numune Üretimi 67
3.4. Mikroyapı İncelemeleri 67
3.4.1. Optik mikroskop incelemeleri 68
3.4.2. Tane boyut ölçüm sonuçları 70
3.4.3. SEM-EDS sonuçları 72
3.4.4. Kırık yüzey inceleme sonuçları 79
3.4.5. TEM sonuçları 88
3.5. Sertlik Ölçüm Sonuçları 93
3.6. EKAP Presleme Kuvveti 96
3.7. Yorulma Testi Sonuçları 97
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 102
4.1. Sonuçlar 102
4.2. Öneriler 106
KAYNAKLAR 108
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER 117
ÖZGEÇMİŞ 118

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. EKAP çalışma sisteminin şematik gösterimi 7
Şekil 1.2. EKAP ilkeleri:(a) $\psi = 0°$, (b) $\psi = \pi - \phi$, (c) ψ açısı; $\psi = 0°$ ile $\psi = \pi - \phi$ arasında 8
Şekil 1.3. EKAP esnasında oluşan deformasyon geometrisi 9
Şekil 1.4. EKAP' ta 4 temel işlem rotası 10
Şekil 1.5. X, Y ve Z düzlemlerinde farklı paso ve rotalarda kayma şekil değişimi. 10
Şekil 1.6. Al - %1Mg alaşımı malzemenin oda sıcaklığında EKAP (1, 2, 3 ve 4 paso) yapıldıktan sonraki kaydedilen değerlere ait akma gerilmesi – presleme hızı grafiği 11
Şekil 1.7. Saf Al, Al–%3Mg alaşımı ve Al–%3Mg–%0.2Sc alaşımları için presleme sıcaklığının EKAP sonrasındaki tane boyutu etkisi 12
Şekil 1.8. EKAP esnasında temel kesme çizgileri, a) ilk pasodaki deformasyon, b) A rotası, c) C rotası 14
Şekil 1.9. AA7075 alaşımı; döküm a), BC rotasında 4 paso sonrası b), Çekme testi uygulanan BC rotasında 4 paso sonrası kırılma yüzeyi TEM görüntüleri. 14
Şekil 1.10. Bilgisayar kontrollü bir yarı-katı kalıplama ünitesi 17
Şekil 1.11. Yarı-katı malzemenin baskı anındaki davranışı 18
Şekil 1.12. Yarı katı işlemle üretilen A356 alaşımı küresel mikroyapı (a), klasik bir dentritik mikroyapı (b) 18
Şekil 1.13. Numune merkezinden yüzeye doğru elde edilen farklı sertlik değerleri 22
Şekil 1.14. Wöhler eğrisi 24
Şekil 1.15. Yorulma dayanımı eğrileri; değişken yorulma dayanımı (a), dalgalı yorulma dayanımı (b) 25
Şekil 1.16. Çatlak ilerlemesi ve yönü 29
Şekil 1.17. Yorulma tasarımı akış şeması 33
Şekil 1.18. Yorulma periyodu 35
Şekil 1.19. Yorulma çatlak oluşum safhaları ve sebeplerinin şematik diyagramı 35
Şekil 1.20. Ortam sıcaklığında çeşitli alaşımların tipik S-N diyagramları 36
Şekil 1.21. 7075-T6 Alüminyum alaşımında yorulma çatlak büyümesine R (gerilme oranı)' nin etkisi 36
Şekil 1.22. AA7075 alaşımı döküm optik mikroskop (a), yorulma kırılması TEM görüntüsü (b) 37
Şekil 2.1. Döküm işleminin yapılması için kullanılan kalıp malzemesi (a), kalıp (b) 40
Şekil 2.2. Ergitme işleminin yapılması için kullanılan elektrik direnç ocağı (a), döküm işleminin yapıldığı kalıp (b). 40
Şekil 2.3. Dökümü yapılan AA7075 alaşımı döküm bloğun görüntüsü. 41
Şekil 2.4. Tasarımı yapılmış EKAP kalıp ve kalıp tutucusu şematik resimleri. 42

Şekil 2.5. İmalatı yapılan EKAP kalıbı 43
Şekil 2.6. Tasarımı ve imalatı yapılan EKAP kalıbı pimleri 44
Şekil 2.7. Kalıp tutucusu 45
Şekil 2.8. Hidrolik pres 46
Şekil 2.9. Isıl işlem fırını ve portatif tabla düzeneği. 46
Şekil 2.10. EKAP çalışmalarında kullanılan deney düzeneği 48
Şekil 2.11. EKAP işleminde kullanılan başlangıç numunesi 49
Şekil 2.12. Yarı-katı işlem ünitesi 50
Şekil 2.13. YKİ kalıbın şematik görüntüsü (a), kullanılan kalıp (b) 51
Şekil 2.14. AA7075 DSC analizi 52
Şekil 2.15. ASTM E606/E606-12 standardına uygun olarak hazırlanmış yorulma numunesi; Ölçüleri (a), üretilmiş resmi (b) 53
Şekil 2.16. Zımpara ve polisaj cihazı. 54
Şekil 2.17. Optik mikroskop ve görüntü analizi. 55
Şekil 2.18. Karakterizasyon çalışmalarında incelemelerin yapıldığı bölgelerin şematik resmi 55
Şekil 2.19. SEM ve EDS cihazı ile görüntü analizi 56
Şekil 2.20. TEM cihazı ile görüntü analizi 57
Şekil 2.21. SEM cihazı ile kırık yüzey inceleme. 58
Şekil 2.22. Sertlik ölçüm cihazı. 59
Şekil 2.23. Dört nokta eğilmeli yorulma test cihazı 59
Şekil 3.1. Deform 3D programı kullanılarak analizi yapılmış; kalıp - a, b, c, d ve numune analizi - e, f, g, h, i, j görüntüleri 62
Şekil 3.2. EKAP işlemi sonrasında farklı pasolar sonucunda (EKAP 1 paso - a, EKAP 2 paso – b, EKAP 3 paso – c, EKAP 4 paso – d) üretilen numunelerin görüntüleri 63
Şekil 3.3. Deneysel verilerin, teorik veriler ile karşılaştırmalı resimleri; Teorik çalışma görüntüsü (a), Yapılan çalışma sonrası elde edilen numune (b) 64
Şekil 3.4. EKAP işlemi sonrası kalıbın açılmış resmi 65
Şekil 3.5. Klasik döküm yöntemi ile ergitilen AA7075 malzemenin dentrit kolları (a), tane sınırları (b) 66
Şekil 3.6. YKİ ile şekillendirilen AA7075 numunesi 67
Şekil 3.7. Hazırlanan metalografik numuneler 68
Şekil 3.8. AA7075 mikroyapı görüntüleri; Döküm (a), YKİ (b). 68
Şekil 3.9. AA7075 mikroyapı görüntüleri; EKAP 1 paso (a), EKAP 2 paso (b), EKAP 3 paso (c), EKAP 4 paso (d) 69
Şekil 3.10. AA7075 mikroyapı görüntüleri; EKAP 1 paso + YKİ (a), EKAP 2 paso + YKİ (b), EKAP 3 paso + YKİ (c), EKAP 4 paso + YKİ (d). 70
Şekil 3.11. Döküm, YKİ, EKAP 2 paso + YKİ, EKAP 3 paso + YKİ, EKAP 4 paso + YKİ yapılmış AA7075 alaşımına ait tane boyut ölçüm grafiği. 71
Şekil 3.12. AA7075 döküm mikroyapı SEM görüntüsü (a), EDS görüntüsü (b). 74
Şekil 3.13. EKAP SEM mikroyapı görüntüleri; 1 paso (a), 2 paso (b), 3 paso (c), 4 paso (d). 76
Şekil 3.14. AA7075 YKİ mikroyapı SEM görüntüsü (a), EDS görüntüsü (b) 77

Şekil 3.15. EKAP + YKİ SEM mikroyapı görüntüleri; 1 paso (a), 2 paso (b), 3 paso (c), 4 paso (d) 78
Şekil 3.16. Yorulma testi yapılmış AA7075; döküm numune kırık yüzey incelemesi 80
Şekil 3.17. Yorulma testi yapılmış AA7075; EKAP 1 paso (a1-a2), EKAP 2 paso (b1-b2), EKAP 3 paso (c1-c2), EKAP 4 paso (d1-d2) kırık yüzey incelemesi SEM görüntüleri. 83
Şekil 3.18. Yorulma testi yapılmış AA7075; YKİ numune kırık yüzey incelemesi 84
Şekil 3.19. Yorulma testi yapılmış AA7075; EKAP 1 paso + YKİ (a1-a2), EKAP 2 paso + YKİ (b1-b2), EKAP 3 paso + YKİ (c1-c2), EKAP 4 paso + YKİ, (d1-d2) kırık yüzey incelemesi SEM görüntüleri. 87
Şekil 3.20. EKAP TEM mikroyapı görüntüleri; 1 paso (a1-a2), 2 paso (b1-b2), 4 paso (c1-c2) 90
Şekil 3.21. EKAP TEM mikroyapı görüntüleri; 1 paso + YKİ (a1-a2), 2 paso + YKİ (b1-b2), 4 paso + YKİ (c1-c2). 92
Şekil 3.22. Döküm numune ve EKAP yapılan numunelerin sertlik sonuçları 94
Şekil 3.23. Yarı katı işlem ile EKAP + Yarı katı işlem yapılan numunelerin sertlik sonuçları. 95
Şekil 3.24. Yükleme – paso grafiği. 97
Şekil 3.25. Döküm AA7075 malzemesi yoruma grafiği. 98
Şekil 3.26. EKAP 1 paso, 2 paso, 3 paso ve 4 paso AA7075 malzemesi yorulma grafiği. 99
Şekil 3.27. YKİ, EKAP 1 paso + YKİ, 2 paso + YKİ, 3 paso + YKİ ve 4 paso + YKİ AA7075 malzemesi yorulma grafiği. 100

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Yorulma dayanımına etki eden dış ve iç etkenler 23
Tablo 1.2. Yorulma tasarım kriterleri 34
Tablo 2.1. AA 7075 alaşımı kimyasal bileşimi (%) 39
Tablo 2.2. AISI P20 Impax Supreme malzemenin kimyasal bileşimi (%) 43
Tablo 2.3. AISI 2344 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi (%) 44

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

Al	: Alüminyum
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
σ_{alt}	: Alt gerilme
σ_g	: Gerilme genliği
σ_{ort}	: Ortalama gerilme
σ_Y	: Yorulma dayanımı
σ-N	: Gerilme-Çevrim sayısı
HR	: Rockwell sertliği
HV	: Vickers sertliği
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
µm	: Mikrometre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MPa	: Megapaskal
Ni	: Nikel
R	: Gerilme oranı
S	: Kükürt
Sc	: Skandiyum
Si	: Silisyum
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
W	: Volfram
Zn	: Çinko
^oC	: Santigrat derece
ϕ	: İç köşe eğrilik açısı
ψ	: Dış köşe eğrilik açısı
π	: Açı
$\Delta\sigma$	: Gerilme değişimi

Kısaltmalar

APD	: Aşırı Plastik Deformasyon
EKAP	: Eşit Kanal Açısal Presleme
SAD	: Seçili Alan Difraksiyon
SEM	: Scanning Electron Microscobe (Tarama Elektron Mikroskobu)
TEM	: Transmision Electron Microscobe (Geçirim Elektron Mikroskobu)
UİT	: Ultra İnce Tane
YKİ	: Yarı Katı İşlem

EŞİT KANAL AÇISAL PRESLEME (EKAP) VE YARI KATI İŞLEMLE ÜRETİLEN AA7075 ALAŞIMININ MİKROYAPI, SERTLİK VE YORULMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada; AA7075 Alaşımının, aşırı plastik deformasyon yöntemi ile tane inceltme tekniğinin kullanıldığı Eşit Kanal Açısal Presleme (EKAP) ve mikroyapıda küresel tane yapısı oluşturularak biçimlendirme işleminin yapıldığı Yarı Katı İşlem (YKİ) teknikleri ayrı–ayrı ve kombine olarak kullanılmıştır. Özellikle havacılık sektöründe kullanılan bu alaşımın yorulma davranışları hem EKAP hem de YKİ teknikleri birlikte uygulanarak geliştirilmeye çalışılmıştır. Araştırma kapsamında ilk aşamada geleneksel döküm yöntemi ile üretilen AA7075 alüminyum alaşımının mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Yorulma testleri yapılarak alaşımın mikroyapı morfolojisi ile yorulma davranışları ilişkilendirilmiştir. Deneysel çalışmaların birinci aşamasında elde edilen veri ve bulgular, ikinci ve üçüncü aşamalarda elde edilen veri ve bulguların değerlendirilmesinde referans olarak kabul edilmiştir. İkinci aşamada, metal ve alaşımlarında ultra ince tane yapısının üretilmesinde kullanılan bir plastik deformasyon metodu olan EKAP işlemi ile farklı paso sayılarında şekillendirilecek olan alaşımın mikroyapı incelemeleri ve yorulma testleri yapılmıştır. Bir sonraki aşama olan üçüncü aşamada ise, ikinci aşamada farklı paso sayılarında EKAP işlemi ile şekillendirilen alaşımın YKİ ile şekillendirilerek numune mikroyapısında tanelerin küresel morfolojide olması sağlanmıştır. Deneysel çalışmaların son aşamasında ise YKİ' le şekillendirilen alaşımın yorulma testleri yapılmıştır. Elde edilen malzemelerin; optik mikroskop, tarama elektron mikroskobu (SEM) kırık yüzey incelemesi, geçirim elektron mikroskobu (TEM) ile mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiş ve sertlik ölçme cihazında sertlik değerleri tespit edilmiştir. Bu laboratuvar ölçekli tez çalışmasından elde edilen bilimsel veri ve bulgular, AA7075 alaşımının yorulma davranışının, yeni bir tasarım olarak hazırlanmış olan kalıp kullanılarak hem EKAP işlemi hem de YKİ ile şekillendirilmesinin, geleneksel yöntemlerle (döküm işlemi gibi) şekillendirilmesi arasındaki farklılıkları sergileyen yeni bir yaklaşımı ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: AA7075, Eşit Kanal Açısal Presleme, Yarı Katı İşlem, Yorulma Davranışı.

AN INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE, HARDNESS AND FATIGUE BEHAVIOUR OF AA7075 ALUMINUM ALLOY PRODUCED BY EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING (ECAP) AND SEMI-SOLID PROCESSING

ABSTRACT

In this study, Equal Channel Angular Pressing (ECAP) and fatique behaviours of AA7075 alloy that shaped with Semi-Solid Processing were investigated. For this reason fatique behaviours of this alloys that were used in especially at aerospace industries will be trying to develop with using technics of both ECAP and semi-solid process shaping together. First of all the microstructure evaluation of AA7075 aluminum alloy which was produce with traditional casting method would be carried out. Alloys microstructural morphology and fatique behaviours were correlated with fatique results. Data and diagnosis obtained at first step of experimental studies were accepted as references at data and diagnosis earned at second and third steps applied. At second step ECAP processing and microstructure investigations of alloy that were shaped with different passing numbers and fatique tests will be done. At third step alloy which is formed at second step with different passing numbers ECAP process would be shaped with semi-solid process. The most important properties of this technics are ability of global shaped grains that than dentritic arms in the microstructure. The last stage of the experimental study, the semi-solid processed alloy was gone through to the fatique tests. The microstructure characterization, the optic microscope, the hardness, determined by using SEM, TEM, fractography measures. The finding from this laboratory scale thesis study were indicated to the fatigue behaviours of AA7075 aluminum alloy which be shaped by ECAP, semi-solid processing and traditional methods. Hence, the differences between the fatique behaviours were determined.

Keywords: AA7075, Equal Channel Angular Pressing, Semi-Solid Processing, Fatigue Behaviour.

GİRİŞ

Yüksek mukavemet ve süneklik özelliğini bir arada bulunduran malzemelerin üretilmesi, malzeme bilimcilerin daima üzerinde uğraştıkları bir konu olmuştur. Çünkü malzemenin yüksek mukavemet değerine sahip bulunması, malzemeye daha fazla yük taşıma kapasitesi sağlamaktadır. Yüksek süneklik ise, ani ve yıkıcı hasarların meydana gelmesini engellemektedir. Bu nedenle mukavemet ve süneklik özelliklerinden dolayı metal ve alaşımları yapısal malzemeler olarak kullanılmaktadır. Teknolojinin hızlı ilerlemesi; daha dayanıklı, hafif ve buna karşılık daha sert yapısal malzemelere olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu sebeple, 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren bu tür malzemelerin elde edilmesi için yapılan çalışmalar artmış, farklı özelliklerdeki malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan yeni malzemeler ortaya çıkmıştır. Bu malzemeler, belirli uygulama alanları için (üstün mekanik ve fiziksel özellikleri elde etmek amacıyla), özel ve farklı yapılı olarak üretilmektedirler.

Düşük üretim maliyetleri ve hafifliklerinden dolayı alüminyum ve alaşımları, endüstriyel alanda yoğun olarak kullanılan metal ve alaşım gurubuna girmektedir. Al alaşımları son yıllarda büyük bir gelişme gösteren otomotiv sektörü başta olmak üzere uzay ve havacılık ile gıda sektöründe çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedeni ise ısıl işlemlerle (yaşlandırma ve çift yaşlandırma) bu alaşımların dayanımlarının arttırılabilmesidir. Yaşlandırma ısıl işlemi ile yapıda oluşturulan ikinci faz çökeltilerinin etkisiyle alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri artırılmaktadır [1]. Bu önemli mekanik özelliklerden birisi de alaşımın sergilediği yorulma dayanımıdır. Al alaşımlarının yorulma dayanımları özellikle yaşlandırma ısıl işlemi ile geliştirilmektedir. Bu durum Orowan tesiri ile açıklanabilir [1]. Isıl işlem ile yapıda oluşturulan ikinci faz çökeltiler, alaşıma gerilim uygulandığı servis şartları, dislokasyon hareketlerin, zorlaştırıcı bir davranış gösterdiği için alaşımın sertlik ve dayanım değerlerinde (özellikle Al alaşımları için) büyük artışlar meydana gelmektedir. Bu nedenle yaşlandırma parametrelerinin sürekli kontrol edilmesi gerekir. Ayrıca mikroyapıda intermetalik bileşik ya da impurite elementleri

içeren ticari alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımı, yüksek saflıktaki alaşımlardan daha yüksektir [2].

Klasik döküm yöntemi ile üretimde, işlemden kaynaklanan nedenlerden dolayı bazı problemler (döküm hataları) meydana gelmektedir. Döküm işlemi sonrası sıvı metalin katılaşması sırasında, kesit farklılıklarından kaynaklanan sıcak yırtılma, çekme boşluklarının (hacimsel daralma) oluşması ve sıvı metalin kalıbı doldurması sırasında meydana gelen türbülanslı akış nedeniyle gaz absorbesi olarak gösterilebilir [3]. Geleneksel bir üretim ve şekillendirme teknolojisi olan döküm işlemlerinde, alaşımın özelliklerine de bağlı olarak genellikle dentritik mikroyapılı malzemeler üretilmektedir. Dentritik mikroyapılı malzemeler ise, dentrit kollarının oluşumu sırasında dentrit kolları arasında kalan mikro boşluklar nedeniyle daha düşük mekanik özellikler sergilemektedir [3].

Alüminyum alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özellikleri aynı zamanda üretim yöntemleriyle (kum döküm, kokil döküm, reçineli kalıplama ve döküm gibi) de ilişkilidir. Dökümü yapılan malzemenin, kum kalıplama ile şekillendirilmesinde uzun süreli soğuma sonucunda mikroyapı tane boyutları büyüme gösterirken, kokil kalıplara yapılan döküm işlemi sonucunda katılaşma daha hızlı olmaktadır. Katılaşma hızının yüksek olması sebebiyle kum döküme göre ufak tane boyutlu döküm numuneler elde edilebilmektedir. Ufak tane boyutu gösteren numunelerin mekanik özellikleri (sertlik değerleri ve akma, kopma ve birim şekil değiştirme özellikleri gibi), tane boyutu büyük olan numunelere göre daha iyi dayanım sergilemektedir [4]. Dayanım arttırma işlemlerinde kullanılan diğer bir yöntemde termomekanik işlemlerle (haddeleme, extrüzyon, EKAP ve YKİ) tane küçültmektir. Termomekanik işlem teknikleri arasında son yıllarda tane inceltme işlemlerinde EKAP (Eşit Kanal Açısal Presleme) tekniği kullanılarak, mikron altı hatta nano boyuta sahip tane yapısı elde edilmektedir. Bu teknik çok adımlı bir yığın işlemi olmakla beraber, malzemeye basit kayma ile yoğun plastik şekil değiştirme metodudur [3, 4]. EKAP, aşırı plastik deformasyon ile tane inceltmede etkili bir metottur. EKAP tekniği, billetlerin şekillerini ve ebatlarını muhafaza ederken, malzemede büyük gerilme birikimleri nedeniyle mikronaltı tane boyutuna sahip yeni mikroyapıların oluşmasını sağlamaktadır. EKAP sırasındaki plastik deformasyonun tanımlanması, rijit plastik yaklaşımla açıklanmaktadır [5]. Aşırı plastik deformasyon

metotları, son yıllarda üzerinde yoğun olarak çalışılan bir konudur. Aşırı plastik deformasyon metodu olan EKAP tekniği ile oldukça ince tane yapılı (mikronaltı) malzeme üretimi yapılmaktadır. EKAP işleminde iki geçiş kanallarında bir iş parçasının geçişi sırasında malzeme plastik deformasyona uğramaktadır. Bu işlemde iş parçasının plastik deformasyon özelliklerinin bilinmesi, kalıp dizaynı, hız, sıcaklık, sürtünme ve ön şekillendirme tasarımı gibi optimum işlem parametreleri için çok önemlidir [6]. Nano yapılı malzeme üretiminde oldukça başarılı bir yöntem olarak görülen (iri taneli malzeme yapısından nano boyutlu tane yapısına geçişin görüldüğü) ve aşırı plastik deformasyon ile nano boyutlu malzeme üretiminde EKAP yöntemi kullanılmaktadır.

Diğer bir plastik şekillendirme metodu ise YKİ (Yarı Katı İşlem) tekniği kullanılarak elde edilebilmektedir. YKİ, diğer son şekle yakın üretim yöntemlerine göre daha fazla avantaj sağlamaktadır. Bu metotla son şekle yakın parçaların üretimi yapılabilmektedir. Bu tekniğin en önemli özelliği, yarı katı sıcaklık aralığına ısıtılan alaşımın mikroyapısındaki dentrit kollarının, uygulanan presleme kuvveti ile kırılarak küresel tanelerden oluşan mikroyapının üretilebilmesidir. Üretilen karmaşık şekilli parçalarla klasik döküm yöntemleriyle üretilen parçalar karşılaştırıldığında, daha kaliteli malzemelerin üretildikleri görülmektedir. Bu yöntem, hem sıvı metal dökümü hem de katı metal şekillendirme avantajlarını kombine eden ve özelliklede son yıllarda üzerinde yoğun olarak çalışmaların yapıldığı yeni bir üretim teknolojisi olarak kabul edilmektedir. Yarı-katı şekillendirme, homojen mikroyapının daha az porozite içermesinden dolayı mükemmel mekanik özellikler gibi birçok avantaj sağlamaktadır [7].

Test numunelerinin yorulma dayanımlarının belirlenebilmesi amacı ile çeşitli gerilme kuvvetleri uygulanabilir. Uygulanan bu yaklaşımlar kullanılacak olan malzemelerin, hangi amaç ile nerelerde kullanılacağının belirlenmesi üzerine istenilen kullanım bilgilerini verebilmektedir [8]. Malzemelerde yorulmaya neden olan tekrarlı gerilmeler eksenel, kayma, eğilme ve burulma yüklerinden birinin veya birkaçının birlikte etkimesiyle oluşabilir. Yorulma kopmasına uğrayan parçalara örnek olarak miller, bağlantı çubukları, dişliler, yataklar, cıvatalar, yaylar, türbin kanatları, motor parçaları ve raylı sistem tekerlekleri gibi hareketli parçalar gösterilebilir. Bu nedenle bu elemanların tasarımında dikkate alınması gereken önemli noktalardan biri de

yorulmadır. Dinamik tekrarlı yük altında çalışan parçaların yorulma davranışları hakkında doğru bilgi edinebilmek için, bu parçaların ya gerçek kullanım şartlarında ya da bu şartlara yakın çalışma koşulları altında test edilmesi gerekir. Ancak, bu yöntem zaman alıcı ve pahalı olduğu için belirli standartlara göre hazırlanan numuneler laboratuar şartlarında test edilerek malzemenin yorulma dayanımı hakkında bilgi elde edinilebilir [9].

Bu çalışmada, AA7075 alaşımının döküm yolu ile üretiminden sonra mekanik özelliklerinin ek prosesler ile artırılması hedef alınmıştır. Ek prosesler olarak EKAP ve YKİ ile şekillendirme teknikleri kullanılmıştır. Günümüzde kullanılan mevcut EKAP kalıpları iki ve dört yollu yapıdadır [5, 10, 11]. İki ve dört yollu EKAP kalıplarının, silindirik kesitli malzemelerin preslenmesinde manuel rotasyon problemi mevcuttur. Bu problem, silindirik kesitli parçaların ilk pasodan sonra ikinci kez preslenmeleri esnasında numunenin kalıp içerisinde tekrar yerleştirilmesi tahmini bir açı ile yapılmasından kaynaklanmaktadır. Diğer bir problem ise, numunelerin paso işlemleri sırasında zaman kaybına sebep olmaktadır.

Yapılan bu çalışmada geleneksel EKAP işlemlerinin rotasyon açısının ayarlanması ve proses işlemlerinin kısaltılması gibi iyileştirmelerin yapılması amacı ile Hekza Kalıp olarak isimlendirilen altı yollu yeni bir kalıp tasarımı yapılmıştır. Kalıbın tasarımında önceden yapılmış olan geleneksel kalıplardan faydalanılmıştır. Hekza kalıp iki parçalı olarak imal edilmiştir. Hekza kalıp fonksiyon olarak mevcut kalıplara nazaran birçok avantaja sahiptir. Bunlardan bazıları kolay imal edilebilirliği, iki parçalı olması nedeniyle kalıp iç yüzeyine kolayca ulaşılabilmesi ki bu yüzey işlemleri ve kalıbın temizlenmesi gibi birçok kolaylıkları sağlamaktadır. Diğer yandan tasarlanan Hekza kalıp (altı yüzeyde deformasyon işlem opsiyonu sağlaması) ile silindirik şekilli numunelerin istenen açısal rotada deformasyonunu gerçekleştirmeye oldukça uygun olduğu yapılan deneysel çalışmalarda görülmüştür. Böylece bu çalışmada silindirik kesitli malzemelerin EKAP işlemi için yeni bir kalıp geliştirilmiş ve çalışmanın esas konusu olan AA7075 alaşımlarının aşırı plastik deformasyonu bu kalıpta yapılmıştır.

Yapılan çalışmanın birinci adımında AA7075 alaşımının geleneksel kum dökümüyle kütlesel dökümü yapılmıştır. İkinci adımında aynı özellikte bir grup numuneye

EKAP işlemi diğer bir grup numuneye ise YKİ birbirinden bağımsız olarak yapılmıştır. Ayrıca diğer bir grup numuneye ise önce EKAP ardından YKİ yapılmıştır. Yukarıda bahsedilen işlemleri görmüş olan AA7075 numunelerinin mikrosertlik değerleri ölçülmüş ve yorulma davranışları incelenmiştir. Bu aşamada farklı proseslere tabi tutulan numunelerin mekanik özellikleri birbiri ile kıyaslanarak proseslerin AA7075 alaşımı üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca bütün numunelerin mikroyapı karekterizasyon çalışmaları yapılmıştır. Mikroyapısal karakterizasyon çalışmalarında optik mikroskobu ve görüntü analiz sistemi, tarama elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM), sertlik ölçümleri ve kırık yüzey incelemeleri yapılmıştır. Burada dört farklı grupta üretilen numunelere, şekillendirme tekniklerinin alaşımın mikroyapı ve yorulma davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır.

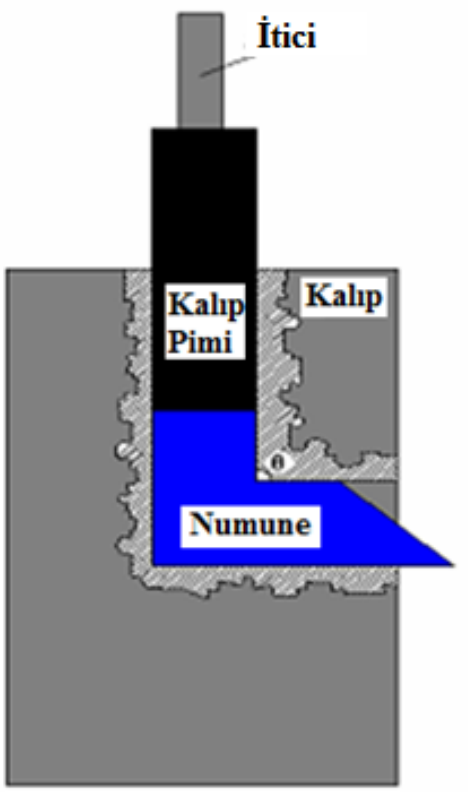
Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda özellikle EKAP + YKİ' e tabi tutulan AA7075 numunelerinin sertlik ve yorulma mukavemeti değerlerinde geleneksel döküm yöntemiyle üretilen numunelere nazaran artışlar sağlanması planlanmıştır. Ayrıca Hekza kalıp sayesinde gekeneksel iki yollu ve dört yollu EKAP kalıplarının proses zamanına nazaran daha kısa proses süresi ile EKAP işlemleri hedeflenmiştir. Yine Hekza kalıp ile silindilirik kesitli parçaların tahmini rotada presleme yerine kesin sonuçlu rotada presleme yapılacağı öngörülmüştür.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Eşit Kanal Açısal Presleme (EKAP)

1.1.1. EKAP yöntemi

Eşit kanal açısal presleme (EKAP) işlemi 1970 - 1980’ li yıllarda ilk olarak Segal ve çalışma arkadaşları tarafından Sovyetler Birliği Minsk Enstitüsü’ nde uygulanmış ve geliştirilmiştir [12]. Çalışmanın temel amacı silindirik metal malzemelere (Şekil 1.1’ de görüldüğü gibi) EKAP kalıbı içerisinde basit kayma hareketi ile yüksek gerilme uygulanarak, kesit alanlarını değiştirmeksizin aşırı plastik deforme edilmesidir. Teorik olarak yapılan çalışmalarda başarılı sonuçlar elde edilmesine rağmen, presleme kuvvetlerinin yetersiz olmasından dolayı önemli bir ilerleme olmamıştır. Ancak, yeni ve yüksek özellikli ultra ince taneli (mikronaltı) yapılı malzemelerin üretimi 1990’ lı yıllarda EKAP üzerine çalışmaların tekrar başlamasıyla sağlanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda mikronaltı boyutlu tanelerin elde edilmesi ile önemli sonuçlar elde edildiği görülmektedir [10, 13-17]. Bu nedenle EKAP işleminin endüstriyel uygulamalarda kullanılması için, yeni çalışmalar üzerine odaklanılmaya başlanmıştır. Bu sayede EKAP işlemi için farklı parametreler kullanılarak malzemelerin özellikleri geliştirilmeye çalışılmış ve bu çalışmalarla ultra ince tane yapılı malzeme üretimleri hedeflenmiştir [10].



Şekil 1.1. EKAP çalışma sisteminin şematik gösterimi [12]

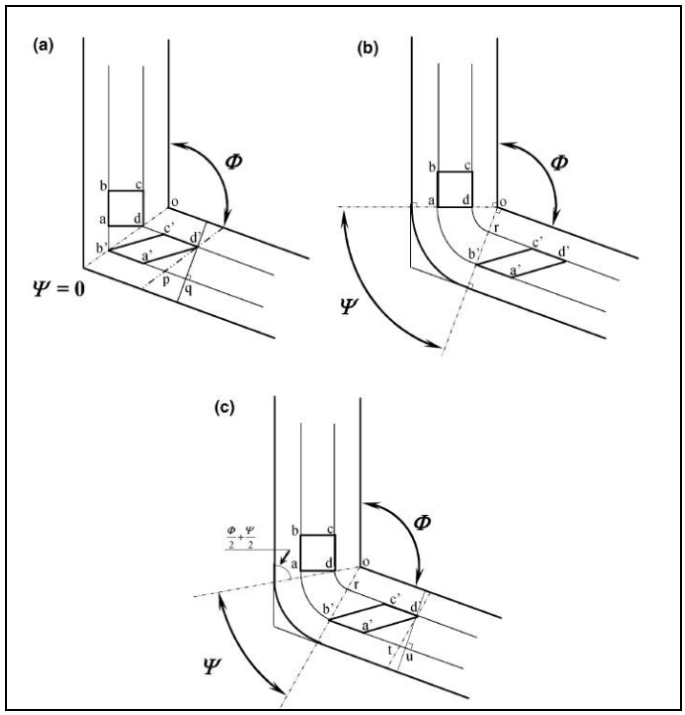
Nano boyutlu malzemelerin özellikleri geleneksel döküm yöntemlerinde elde edilen tane boyutlarından çok daha küçük olması nedeniyle, metal ve alaşımlarının mekanik özellikleri de geliştirilmektedir. İnce taneli mikroyapıya sahip bir malzeme, klasik yöntemler ile üretilmiş iri taneli malzemelere göre daha yüksek dayanım, süper plastisite özellikleri, yüksek süneklik ve tokluğa sahip olduğu yapılan bu araştırmalarda belirtilmektedir [14, 18–20]. EKAP yöntemi nano yapılı malzeme üretiminde oldukça başarılı bir yöntem olarak (iri taneli malzeme yapısından nano boyutlu tane yapısına geçişin görüldüğü) kullanılmaktadır.

1.1.2. EKAP işlem parametreleri

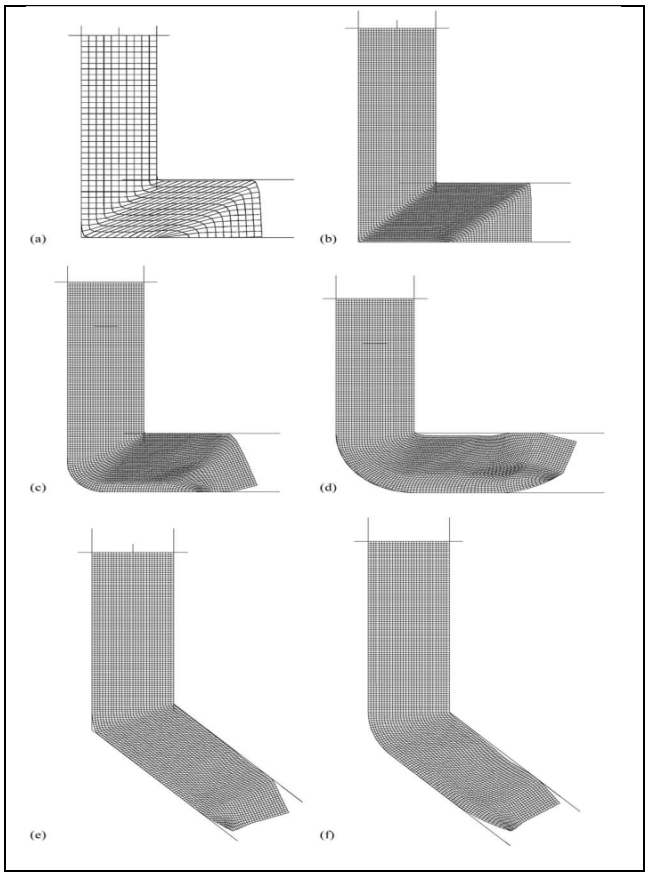
EKAP işlemi; kalıp açıları, işlem rotaları, presleme hızı, presleme sıcaklığı, geri presleme ve preslenecek malzeme kesiti olmak üzere altı temel işlem parametresini içermektedir [10, 21].

1.1.2.1. Kalıp açıları

Kalıp geometrisini belirleyen iç kavis açısı (ϕ) ve dış kavis açısı (ψ), EKAP işleminde en önemli parametrelerdir. Şiddetli kayma elde etmek için ϕ açısı, mümkün olduğunca küçük tutulmaktadır. Ancak $\phi<90^o$ olması durumunda, kanal köşesinde bozuk metal bölgesi oluşmaktadır. Bu yüzden idealde $\phi = 90^o$ olması tavsiye edilmektedir [14]. Ayrıca, kalıp kesitinin iki kanal arasındaki dış köşe eğrilik kavisi bir (ψ) açısı (Şekil 1.2) ile kullanılmaktadır [14, 22]. Yapılan presleme işlemleri sırasında (ϕ) ve (ψ) açılarının derecelerine bağlı olarak, iş parçalarında çeşitli şekillerde deformasyon geometrileri oluşmaktadır (Şekil 1.3).



Şekil 1.2. EKAP ilkeleri: (a) $\psi = 0°$, (b) $\psi = \pi - \phi$, (c) ψ açısı; $\psi = 0°$ ile $\psi = \pi - \phi$ arasında [14, 22]

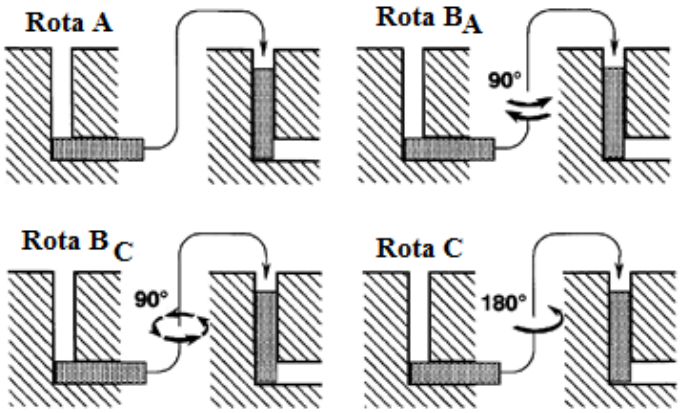


Şekil 1.3. EKAP esnasında oluşan deformasyon geometrisi [14, 23]

1.1.2.2. İşlem rotaları

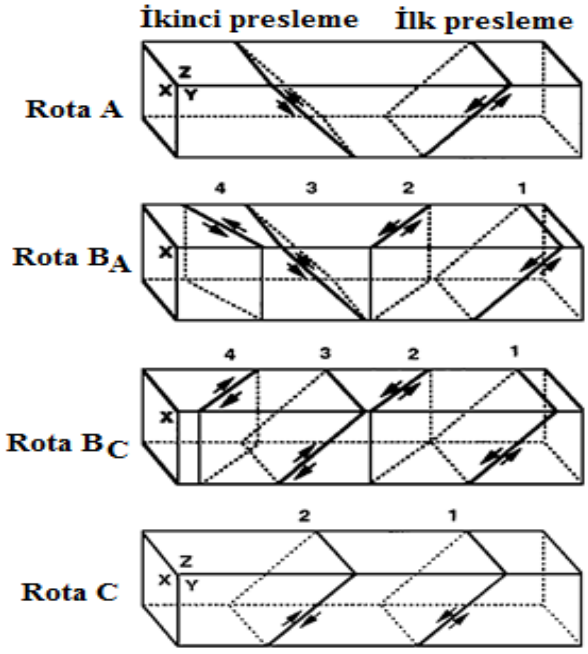
EKAP işleminde, optimum mikroyapı ve mekanik özellikleri elde etmek için, işlem rotaları ve çevrim sayıları kritik faktörlerdir. İşlem sırasında, kanaldan birkaç kez ardarda preslenerek geçirilen iş parçasının kayma karakteristikleri, iş parçasının her bir çevrim döndürülmesiyle değişebilir. Bu işlem, iş parçasının mikroyapı ve mekanik özelliklerini etkiler [22]. Çünkü, EKAP işlemi sırasında ve kanallar boyunca parça pasolarının sayısı, mikroyapının daha küçük tanecik yapısının elde edilmesi ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir. EKAP' ta 4 temel işlem rotası bulunmaktadır. Bu rotalar, presleme sırasında farklı kayma sistemleri oluştururlar ve böylece EKAP ile üretilmiş malzemelerin mikroyapılarında önemli farklılıklar oluşturmaktadır. Dört farklı rota Şekil 1.4' te verilmiştir [24]. A rotasında numune döndürülmeksizin preslenmektedir. B Rotasında ise numune ilk preslemenin ardından ikinci preslemede 90^o döndürülerek preslenmektedir. Üç ve daha fazla presleme işlemlerinde, birbirlerinin tersi yönlerinde 90^o döndürülerek

tekrarlanmaktadır. B_C rotasında numune her presleme işlemi sonrasında sürekli 90^o döndürülerek işleme devam edilmektedir. C rotasında ise numune ilk preslemenin ardından ikinci kez preslenirken işlem 180^o döndürülerek yapılmaktadır ve aynı yönde sürdürülmektedir [11, 24 - 26].



Şekil 1.4. EKAP' ta 4 temel işlem rotası [24]

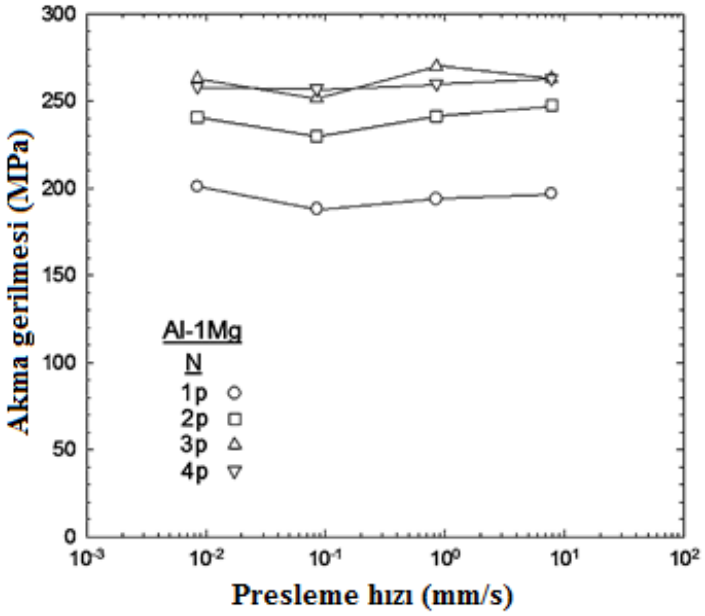
Çeşitli işlem rotalarına bağlı olarak oluşan farklı kayma sistemleri Şekil 1.5' te verilmiştir [10, 11, 27]. EKAP 1 pasodan 4 pasoya kadar olan kayma şekil değişimi X, Y ve Z düzlemlerine göre ve farklı rotalar kullanılarak gösterilmiştir.



Şekil 1.5. X, Y ve Z düzlemlerinde farklı paso ve rotalarda kayma şekil değişimi [10, 11, 27]

1.1.2.3. Presleme hızı

EKAP işleminde genellikle zımba ile birlikte yüksek kapasiteli hidrolik presler kullanılır. EKAP işleminde presleme hızı konusunda sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Genel olarak presleme hızları 1-20 $mm.s.^{-1}$ arasında değişmektedir [10]. Valiev ve Langdon' un çalışmasında saf Al ve Al - %1Mg alaşımının EKAP' ta presleme hızının etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda uygulanan presleme hızının tane boyutuna bir etkisi olmadığı belirtilmektedir [10]. Ancak malzeme mikroyapısındaki toparlanma, düşük hızlarda ve daha fazla zaman aralığında mümkün olabileceğinden mikroyapının niteliği presleme hızına bağlıdır. Şekil 1.6' da Al - %1Mg alaşımı malzemenin oda sıcaklığında EKAP (1, 2, 3 ve 4 paso) yapıldıktan sonraki kaydedilen değerlere ait akma gerilmesi – presleme hızı grafiği verilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, presleme hızının malzemenin akma gerilmesine etkisinin yok denecek kadar az olduğu belirtilmektedir [21, 28, 29].

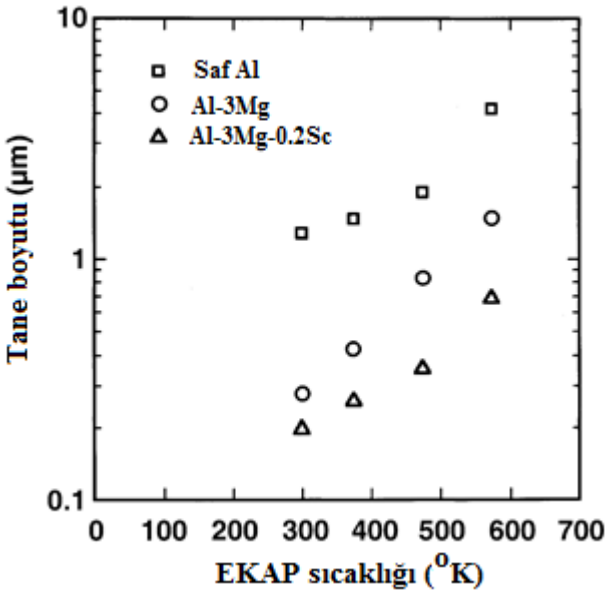


Şekil 1.6. Al - %1Mg alaşımı malzemenin oda sıcaklığında EKAP (1, 2, 3 ve 4 paso) yapıldıktan sonraki kaydedilen değerlere ait akma gerilmesi – presleme hızı grafiği [21, 28, 29]

1.1.2.4. Presleme sıcaklığı

Yüksek süneklik özelliğine sahip olan malzemeler, oda sıcaklığında EKAP ile şekillendirilebilir. EKAP uygulanan malzemelerin yapı ve mekanik özellikleri, işlem

sıcaklığının etkisi ile değişmektedir. Ancak, süneklikleri sınırlı ve deformasyonu zor olan malzemelerde presleme işlemi daha yüksek sıcaklıklarda yapılmaktadır. Buna ilaveten ince taneli mikroyapı ve mekanik özelliklerin arttırılabilmesi için, presleme işlemi sıcaklığı düşük seviyede olmalıdır. Presleme sıcaklığı, EKAP işleminin yapılmasında anahtar bir rol oynamaktadır. Yapılan çalışmalarda saf Al, Al–%3Mg alaşımı ve Al–%3Mg–%0.2Sc alaşımları için presleme sıcaklığının tane boyutu üzerine etkisi incelenmiştir. Şekil 1.7' de presleme sıcaklığının tane boyutu üzerine sonuçları verilmiştir [10, 30-37].



Şekil 1.7. Saf Al, Al–%3Mg alaşımı ve Al–%3Mg–%0.2Sc alaşımları için presleme sıcaklığının EKAP sonrasındaki tane boyutu etkisi [10, 30-37]

Presleme sıcaklığının artması ile birlikte malzemeye bağlı olarak tane boyutları da değişmektedir. EKAP işlemi ile ultra ince tane yapısına sahip (çok küçük tane boyutlarında) malzemelerin elde edilmesinde presleme sıcaklığındaki artış işlemi kolaylaştırırken, tane boyutlarını olumsuz yönde etkileyerek tane boyut artışına sebep olmaktadır.

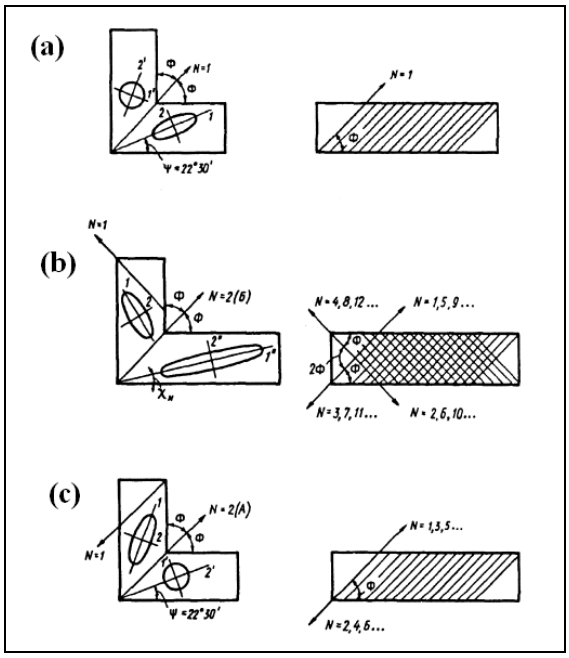
1.1.2.5. Geri presleme

EKAP çalışmalarının ilk yıllarında, işlem mekanizması açısından geri preslemenin önemi vurgulanmış, ancak konu üzerine yeterince çalışma yapılmamıştır [12]. Fakat son yıllarda, bilgisayar kontrollü EKAP deney düzeneklerinin kurulmasından dolayı

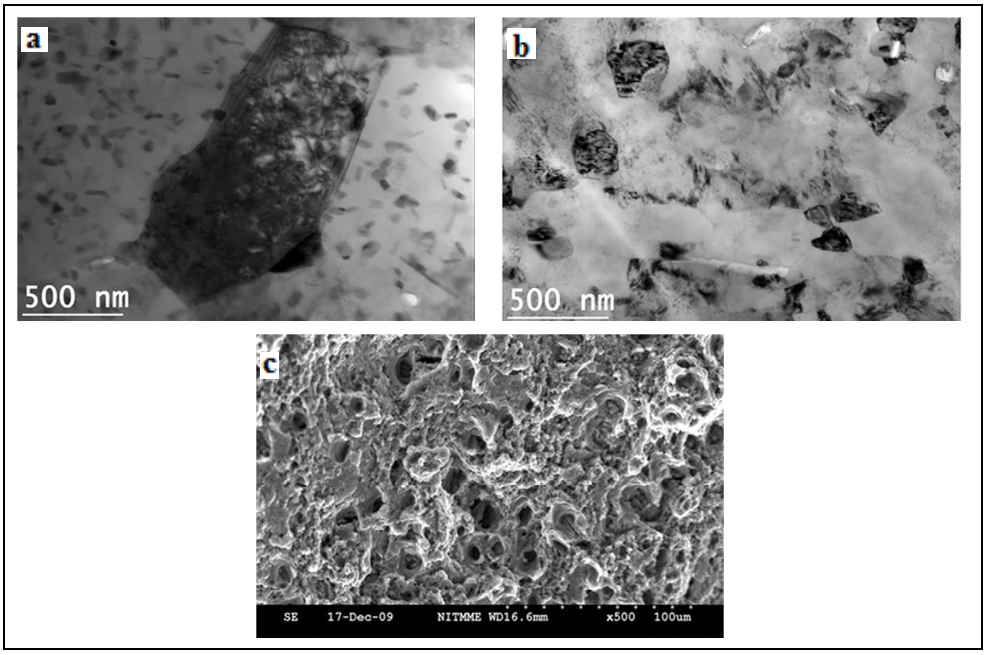
geri presleme işleminin önemi ortaya çıkmıştır [38-42]. Geri preslemenin en önemli özelliği; EKAP işlemi uygulanan numunelerin işlenebilirlik özelliklerinin geliştirilmesi aşamasıdır. Geri presleme üzerine yapılmış olan bir çalışmada; Cu ile yapılan EKAP işleminde numune 12 – 13 paso sonrasında yüzeyinde çatlaklar görülürken, 300 MPa geri presleme basıncı kullanılan numunelerde ise 16 paso ve üzeri uygulamalarda herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir [43]. EKAP sonrasında elde edilen numunelere ait tane boyutları ölçüldüğünde ise, geri presleme yapılan sistemlerde daha küçük tane yapısının oluştuğu, ancak bu ölçülerin çok büyük farklar oluşturmadığı belirlenmiştir [41]. Benzer şekilde sertleştirilmiş Al 6061 alaşımı, oda sıcaklığında 450 MPa basınç ile geri presleme olmaksızın EKAP yapıldığında, ilk geçiş sonrasında kırılmalar oluşurken, geri presleme yapıldığında kırılma olmaksızın 4 paso yapılabilmektedir [41]. Sonuç itibari ile, billetlerin özellikle üretilen numunelerin alt yüzeylerinde daha az üniform yapı oluşturması, EKAP geri presleme özelliği ile bir iyileştirme sağlanmaktadır [10, 44].

1.1.2.6. Preslenecek malzeme kesiti

EKAP işleminde, farklı kesitlerde kalıp kanalları kullanılmaktadır. Bu yöntem ilk olarak uzun dikdörtgen numuneler için geliştirilmişken daha sonra silindirik, kare, dikdörtgen ve düz (yassı-flat) olmak üzere dört farklı kesit için kalıp geometrisi uygulanmaya başlamıştır. Silindirik iş parçalarında, iş parçasının kalıptan çıkışı ve yeniden şekillendirilmesi ile preslemeler arasında iş parçasının doğru rotada döndürülmesinde bir takım problemler oluşabilmektedir. Dikdörtgen kesitli numuneler ise, en uygun şartlara sahiptir ve özellikle uzun numuneler için etkilidir. EKAP işlemi sırasında kalıp kanallarının kesiştiği noktada bir elips oluşmaktadır (Şekil 1.8). Elips oluşan numuneler ilk pasodan sonra uygun olarak kesilmektedir. Daha fazla presleme sürecinde pasolar, eksen (N) 1’ in (Şekil 1.8) uzatılmasıyla sonuçlanır ve elips uzatılmış olur [14, 22]. EKAP işlemi ile şekillendirilen malzemelerde oluşan deformasyon numunelerin içyapısında tane boyutları ve tanelerin yönlenmesindeki değişim ile açıklanabilir. Bu amaçla aşırı plastik deformasyon (APD) işlemi ile şekillendirilen malzemelerin tane boyut incelemeleri TEM ile yapılmaktadır. Şekil 1.9’ da AA7075 alaşımının TEM görüntüleri verilmiştir [45].



Şekil 1.8. EKAP esnasında temel kesme çizgileri; a) İlk pasodaki deformasyon, b) A rotası, c) C rotası [14, 22]



Şekil 1.9. AA7075 alaşımı; a) döküm, b) BC rotasında 4 paso sonrası, c) Çekme testi uygulanan BC rotasında 4 paso sonrası, kırılma yüzeyi TEM görüntüleri [45]

1.2. Yarı Katı İşlem (YKİ)

1.2.1. Yarı katı üretim teknolojisi

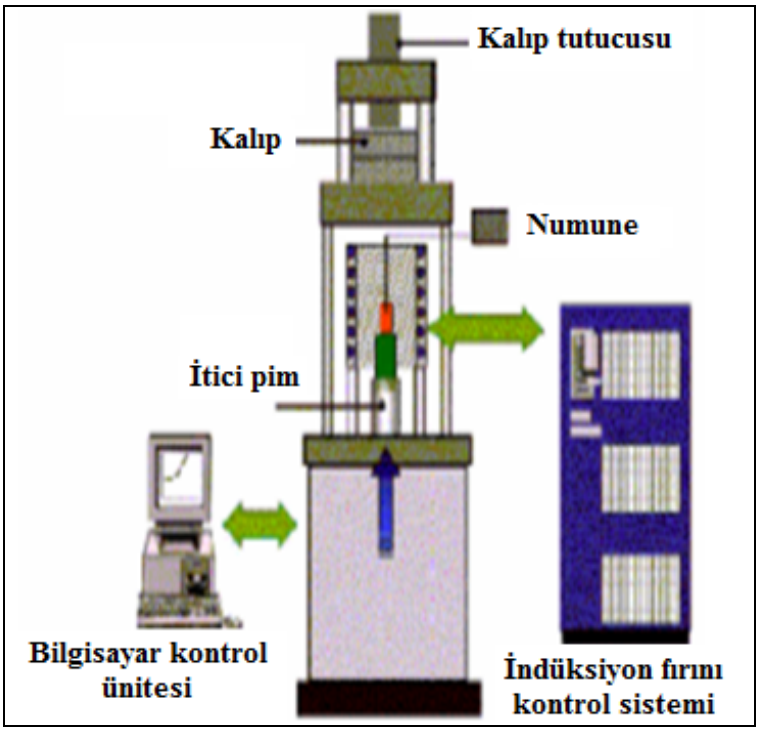
Bu yöntem; %50 sıvı ve %50 katıdan oluşan, döküm ve dövme işlemlerinin her ikisinide içeren karma bir üretim yöntemidir. Bu yöntemin amacı dentritsiz yapıda, son şekle yakın üretim ve küresel bir mikroyapı elde etmektir. YKİ uçak ve otomotiv parçalarının yapımında kullanılan yüksek kalitede malzeme üretiminde kullanılmaktadır [46]. YKİ özellikle otomobil jantları, şasi ve süspansiyon parçaları, motor parçaları, kilitlemesiz fren sistemi ve diskleri, elektrik bağlantı parçaları, yakıt tankları, uçak sanayi v.b. gibi yüksek bütünlük ve mükemmel yüzey kalitesi gerektiren parçaların üretimi için ideal bir yöntemdir. Alüminyum otomobil jantları YKİ ile üretildiğinde, diğer yöntemlerle üretilen jantlardan %30 hafif, yoğun yapılı, daha üstün mekanik özelliklere sahip ve izotropik özellikler sergilemektedir.

YKİ ile üretilen parçalar diğer geleneksel metotlarla üretilen parçalarla karşılaştırıldığında, daha iyi mekanik özelliklere sahiptir. YKİ, tikso dövme (dövme döküm veya squeeze casting), tikso döküm (thixo casting) veya tikso kalıplama (thixo kalıplama) gibi alt gruplara ayrılmaktadır [47]. Bu yöntemle karmaşık şekilli parçalar bile üretilebilmektedir. YKİ ile üretilen parçaların kullanım alanları otomotiv ve elektronik sektörlerinde uygulanması artarak devam etmektedir. Çünkü YKİ, klasik döküm alanlarındaki genel işlem aşamalarından daha avantajlıdır. Bu yöntemin bilinen avantajları ise; kalıp ömrü, üretim kusurlarının azalması ve ürün kalitesinin artırılması olarak ifade edilebilir.

YKİ' de, sıcaklığa bağlı olarak katı-sıvı miktarları değişkenlik gösterir. Bu yüzden düşük sıcaklıklarda kalıbın doldurulmasında herhangi bir problem yoktur. Fakat sıvı faz miktardaki artışa paralel olarak üretim aşamasında sıvı bölgede akma oluşabilmektedir. Kapranos ve arkadaşları [48] çalışmalarında, yarı-katı işlemle üretim yapmanın diğer yöntemlerle yapılan üretimlere göre daha kolay ve daha iyi olduğuna ve kısmi ergime bölgelerindeki dentritsiz yapıların, yarı-katı şekillendirilebilirliği geliştirdiğini belirtmektedirler. Hem basit hem de karmaşık şekilli alüminyum alaşımı parçalar, yarı katı şekillendirme ile üretilebilmekte ve üretilen parçalar (katılaşma sırasında uygulanan basınç etkisi ile) daha iyi mekanik özelliklere sahiptir [49]. Kouji, [50] YKİ ile üretilen malzemelerin mekanik

özelliklerinin, klasik döküm yöntemleriyle üretilen malzemelerin mekanik özellikleriyle karşılaştırıldığında çekme, yorulma ve darbe dayanımlarında dikkate değer bir artışın olduğunu belirtmektedir.

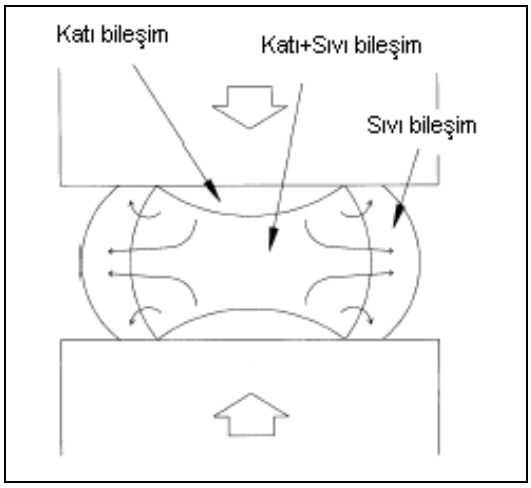
Bu yöntem (YKİ) ile alüminyum, magnezyum gibi hafif metallerin farklı takviye elemanlarıyla kompozit malzeme üretimi yapılmaktadır. Bu işlemde, bir kalıp içerisinde (genellikle grafit) yarı-katı (düşük presleme yüklerinde) parçaların şekillendirilmesi yapılmaktadır. Bu durumda alaşımın mikroyapısı, bir sıvı matris içinde katı metal veya seramik küreleri içermektedir. Metal, sıvı ötektikle çevrili katı kürelerden oluştuğundan dolayı tiksotropik davranış gösterir. Genellikle, alaşım yarı-katı halde şeklini muhafaza edebilir durumdadır ve bu şekli katı fazın (dentritlerin) kenetlenmesi sayesinde muhafaza etmektedir [51]. Şekil 1.10’ da bilgisayar kontrollü bir yarı-katı kalıplama ünitesi verilmektedir. Tikso kalıplama, belirli alaşımların (tiksotropik özellikleri), yarı-katı hale ısıtıldıktan sonra yapılan bir şekillendirme metodudur. Bu yöntemde klasik döküm teknolojisiyle birlikte, katı şekillendirme tekniğinin uygulanması daha karmaşık geometrili ve yüksek yoğunluklu parçalar üretimi yapılabilmektedir. Tikso kalıplama ile üretilen parçalar genellikle, otomotiv sektöründe kullanılmaktadır. Avrupa, Japonya ve Amerika gibi ülkelerde özellikle bu sektörde kullanılan alüminyum parçaların üretiminde bu yöntemle kullanılmaktadır. Tikso kalıplanmış parçaların dayanımlarının daha yüksek olması nedeniyle talep artmaktadır. Özellikle lüks otomobillerde (Audi, Ferrari, Porsche) hafiflik çok önemli kabul edildiğinden, bu tip otomobillerin jant, fren diskleri v.b gibi parçaları bu yöntem ile gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1.10. Bilgisayar kontrollü bir yarı-katı kalıplama ünitesi [52]

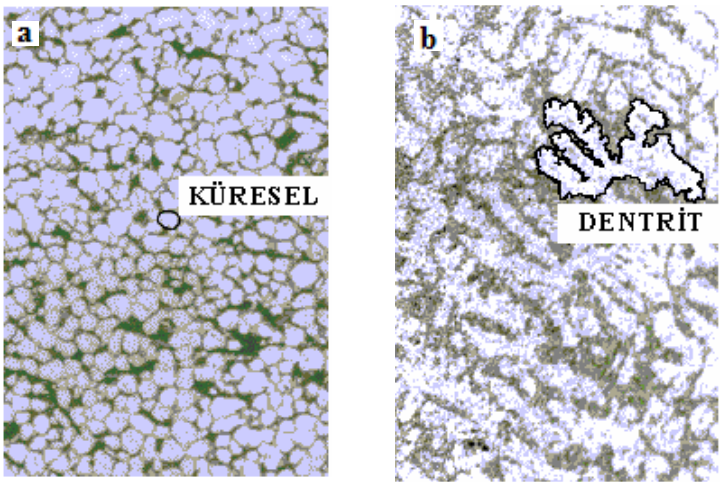
Geleneksel döküm yöntemlerinde viskozitenin düşük olmasından dolayı türbülans (çalkantılı akış) kaçınılmazdır. YKİ' de, bulamaç (slip) haldeki metalin viskozitesi oldukça yüksektir ve bundan dolayı da türbülans sözkonusu değildir. Bu da oksitlenmenin ve gaz boşluklarının minimum olmasına neden olmaktadır. Ayrıca yarı-katı malzemenin viskozitesi, kesme hızına ve zamana da bağlıdır. Düşük kesme hızlarında, bulamaç parçacık arasında bağlar oluşur ve viskozite yükselir.

Yüksek viskozite ve yarı-katı alaşımların düşük sıvı içeriği, ürünleri basınçlı kokil dökümden daha güçlü ve dövmeden daha kullanışlı hale getirmektedir. Şekil 1.11' de yarı-katı malzemenin baskı anındaki davranışı verilmektedir.



Şekil 1.11. Yarı-katı malzemenin baskı anındaki davranışı [53]

YKİ klasik kokil dökümle karşılaştırıldığında, mükemmel metalurjik özelliğin yanısıra tolerans kabiliyeti de sunmaktadır. Diğer tekniklerle zor şekillendirilen malzemelere yaklaşık olarak son şekil verilebilmesi için bu teknik güvenli, temiz ve pratik bir metot olmasının yanında daha yüksek sertliğe, düşük ısıl genleşmeye, yüksek mukavemete ve aşınma direncine sahiptir. Düşük işlem sıcaklığı, daha az çekme ve çatlamaya ve aynı zamanda kalıpta daha az aşınmaya neden olur. Genellikle döküm alaşımlarında bulunan dentritik yapıdan ziyade yarı-katı halde şekillendirildiğinde mikro yapıdaki dentritler küresel hale gelmektedir. Şekil 1.12.a ve 1.12.b' de tikso kalıplama ve klasik döküm yöntemiyle elde edilen mikroyapılar verilmektedir.



Şekil 1.12. Yarı katı işlemle üretilen A356 alaşımı küresel mikroyapı (a), klasik bir dentritik mikroyapı (b) [54]

Yarı katı işlem ile üretilen malzemenin dayanımı klasik döküm yöntemiyle üretilen malzemenin dayanımından daha fazladır. Bunun nedeni ise, yarı katı şekillendirilen malzemenin küresel mikroyapıya sahip olmasıdır. Klasik yöntemle katılaşmış dentritik mikroyapılı malzemede taneler; malzemeye uygulanacak mekanik kuvveti malzemenin içyapısında biriktirip, deformasyona yol açmaktadır. Bunun sebebi de keskin, sivri köşelerin bulunduğu yapıdan kaynaklanmaktadır. Buna karşın bu yöntemle üretilmiş küresel tanelere sahip malzeme, sözü edilen tanelerin küresel olmasından dolayı uygulanan kuvveti absorbe etme (tokluk) özelliğine sahiptir. Bu da çekme dayanımı, basma dayanımı, darbe dayanımı, sürünme dayanımı gibi mekanik özelliklerin daha iyi olmasını sağlamaktadır.

1.2.2. YKİ parametreleri

Yarı katı şekillendirme yönteminde mikroyapıya etki eden parametreler; basınç, sıcaklık, sıkıştırma hızı, bileşim, kalıp malzemesi ve sıkıştırma süresidir. Bu parametrelerin az ya da fazla olması, malzemenin mekanik özelliklerine ve mikroyapının küresel olmasına etki etmektedir.

1.2.2.1. Basınç

Basınç yarı katı işlemle şekillendirme yönteminde mikroyapıya ve mekanik özelliklere etki eden önemli bir faktördür. Bu yöntemde, basınç arttıkça mikroyapıda katı ve sıvı fazların yoğunluğu daha fazla olmakta, tanelerin küreselleşme eğilimi artmakta ve kopma dayanımı, akma dayanımı, % uzama gibi mekanik özelliklerde de artış meydana gelmektedir. Basınç arttıkça sertlik merkezde daha fazla olurken, uç kısımlarda ise azalmaktadır. Bunun nedeni parçanın uç kısımlarındaki sıvı faz oranının merkezdekinden daha fazla olmasıdır. Basınç yükselirken, yarı-katı malzeme ile kalıp arasındaki ısı alışverişinin yükselmesiyle soğuma hızı da yükselir. Idegomori ve arkadaşları [54], yaptıkları çalışmaların sonucunda, basınçta yapılan artış ile mekanik özellikler arasında bir ilişkinin olduğunu ve yüksek basınç (70-100 MPa) uygulamalarının mekanik özellikleri iyileştirdiğini vurgulamaktadırlar. Bunun haricinde aynı çalışmada mikro sertlik ölçüm karakteristikleri incelenmiş ve 100 gr. yük uygulanarak mikro vickers sertlik ölçümleri alınmıştır. Elde edilen sertlik değerlerinin sıvı faz miktarlarının daha yoğun olduğu (yüksek basınç uygulanması

nedeniyle) dış bölgelerde, merkeze nazaran daha yüksek değerlerde olduğu belirlenmiştir.

1.2.2.2. Sıcaklık

Sıcaklık, tikso kalıplama yönteminde mikroyapı özelliklere etki eden bir başka faktördür. Daha iyi mikroyapı ve mekanik özelliklerin elde edilmesi için kalıp sıcaklığının belirli sınırlar içinde olması gerekir. Çok yüksek kalıp sıcaklıkları ise parçanın son doldurulan kısmında sıvı faz bölgesini nispeten yükselttiği için porozite gibi iç kusurların oluşmasına neden olur. Bu nedenle her alaşım için belirli kalıp sıcaklıkları söz konusudur. Örneğin; A356 alaşımının sınırlı kalıp sıcaklığı 300 ^{o}C, Al2024 alaşımının ise 350 ^{o}C dir. Bu sıcaklık değerlerinin üzerine çıkıldığında kopma dayanımı, akma dayanımı, % uzama gibi mekanik özelliklerde azalma meydana gelmektedir. Kalıbın sıcaklığı düştükçe yarı-katı malzemenin katılaşma hızı yükselir. Ayrıca düşük kalıp sıcaklıklarında sıvı ve katı fazın dağılımı daha yoğun olmaktadır [54, 55]. Al alaşımlarında sıcaklık dağılımlarını farklı-sınırlı element metoduyla hesaplamışlardır. Katı kütlenin ısıtılması esnasında eğer malzemede istenilen sıcaklık yeterli olmadığında, elde edilen parçanın merkezle dış yüzeyi arasında mikroyapısal farklılıklar göstermektedir [56]. Al alaşımlarında yarı-katı yöntemle üretilen malzemelerin küresel mikro yapısını etkileyen ikincil parametreler ise ön ısıtma zamanı, ön ısıtma sıcaklığı ve malzeme boyutlarıdır [57].

1.2.2.3. Sıkıştırma hızı

Sıkıştırma hızının da mikroyapı ve mekanik özellikler üzerinde etkisi vardır. Yapılan bir çalışmada 0,7 ms^{-1} üzerindeki yüksek piston hızında 100 MPa sıkıştırma ve 200 ^{o}C' deki kalıp sıcaklığında yüksek bir katı bölgesi (%40) gerektiği ifade edilmektedir [58]. Bir diğer çalışmada ise, Al-%4.5 Cu alaşımının yarı katı işlemle şekillendirilmesinde sıvı segregasyon miktarındaki artışın, piston hızındaki düşüşten kaynaklandığı belirtilmektedir [59].

1.2.2.4. Bileşim

Yarı katı işlemle şekillendirmede bileşimin de mekanik özellikler ve mikroyapı üzerinde etkili olduğu yapılan çalışmalarda belirtilmektedir. Bu yöntemin özelliği,

katı eriyik alaşımlara uygulanabilir olmasıdır. Saf metal ve ötektik alaşımlar gibi belirli bir ergime ve katılaşma noktasına sahip alaşımlar için yarı katı şekillendirme yapılamamaktadır. Alüminyum alaşımlarında Mg'un üçlü veya dörtlü alaşımlara %2 oranında ilave edilmesi, tane boyutunda küçülmeye neden olmakta ve yarı-katı malzemenin akışkanlığını artırmaktadır. 7xxx serisi Al-Zn-Mg-Cu sistemlerinde Zn/Mg ve Zn+Mg+Cu oranı, denge fazlarını ve yarı katı şekillendirilebilirliği etkilemektedir. Yapılan çalışmalarda bu işlem için optimum şartların; Zn/Mg oranı ağırlıkça %2.5 dan düşük ve Zn+Mg+Cu oranı %7' den fazla olduğunda elde edildiğini, Zn/Mg oranı düştüğünde ve toplam Zn+Mg+Cu oranı yükseldiğinde de yarı katı şekillendirilebilirliğin arttığını belirtilmektedir. Zn+Mg+ Cu oranı ağırlıkça %7' den düşük olan alaşımlarda yarı katı şekillendirilebilirlik zorlaşmaktadır [51, 60].

1.2.2.5. Kalıp malzemesi

Suzuki ve Haga [61], yaptıkları çalışmada, kalıp malzemesinin metal olması durumunda yüksek soğuma hızı meydana geldiğini ve böylece, 7075 Al alaşımının mikroyapısının ince taneli olduğunu ve bu tanelerin alaşımın dayanımını arttırdığını tespit etmişlerdir. Kalıp malzemesinin metal dışı malzeme (örneğin grafit) olması durumunda ise, soğuma hızının yavaş olduğunu ve bunun sonucunda da tanelerin büyüdüğünü görmüşlerdir. Büyüyen taneler ise alaşımın dayanımının azalmasına neden olmaktadır.

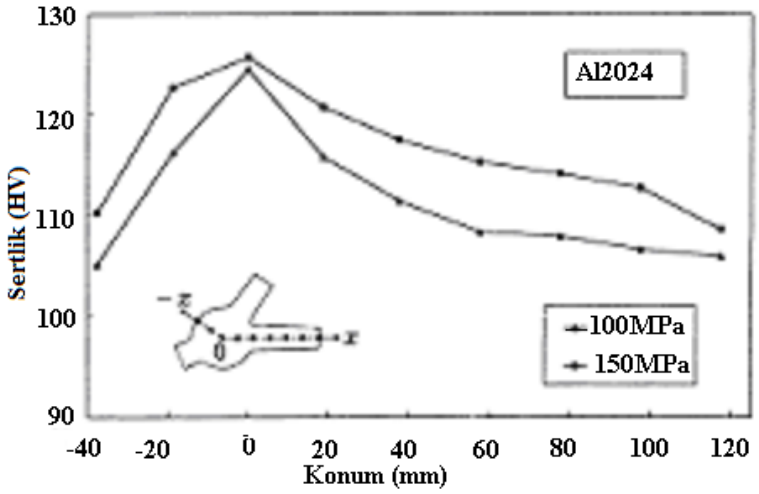
1.2.2.6. Zaman

İstenilen sıvı oranı ve tane çapını elde etmek için zaman önemli bir faktördür. AA7075 dövme alüminyum alaşımlarının yarı katı şekillendirilmesi sırasında, kütle 600 ^{o}C' ye yeniden ısıtıldığında ve 5-15 dak. zaman aralığında tutulduğunda sıvı oranı yaklaşık %30 ve ortalama tane çapı 40-55 µm olan optimum mikroyapı elde edilmektedir. Böylece mikroyapı küresel tanelerden oluşmaktadır. Jung [62], tikso kalıplamada yarı-katı Al alaşımlarının indüksiyonla ısıtılması ile mikroyapılarda meydana gelen değişimleri incelemiştir. Bu incelemeler sonucunda, üç aşamalı yeniden ısıtmada tutma zamanının 2 dak. olması halinde uygun bir küresel mikroyapı elde etmenin mümkün olduğunu belirlemiştir. Tutma zamanının 2 dak. dan daha az

olması durumunda küreselleşmenin sağlanamadığı, fazla olması durumunda ise tanelerin kabalaştığını belirlenmiştir.

1.2.3. Mekanik özellikler

YKİ aşamasında uygulanan basıncın artırılması yoğun bir mikroyapıya ve porozite gibi yapı hatalarının da minimum düzeyde olmasını sağlamaktadır. Maksimum gerilme kuvveti ve maksimum akma mukavemeti, farklı sıkıştırma kuvveti uygulamalarıyla ortaya çıkmıştır. Üretilen malzemenin merkezinde sertlik, maksimum olarak bulunmuştur. Bu durum, basıncın etkisiyle sıvı faz ve katı faz arasındaki fark ve sıvı faz dağılımından kaynaklanmaktadır [63]. Şekil 1.13' te yarı-katı işlemle üretilmiş bir numunenin merkezden yüzeye doğru ölçülmüş sertlik değerleri verilmektedir. Şekilde parçanın dış kısımlarında sertlik düşükken, merkezde (O noktasında) sertlik değerinde bir artış olduğu (kalın kesitli bölgede) ve tekrar dış kısımlara doğru düşme eğiliminde olduğu (ince kesitli bölgelere doğru) görülmektedir.



Şekil 1.13. Numune merkezinden yüzeye doğru elde edilen farklı sertlik değerleri [63]

1.3. Malzemelerin Yorulma Davranışı

Tekrarlı yüklemelere ve boşaltmalara maruz kalan malzemelerde, yüklerin belirli bir limitin üzerine çıkması ile yüzeyde mikro çatlaklar oluşmaya başlamaktadır. Oluşan çatlak ya da çatlakların kritik bir boyuta ulaşmasıyla, malzeme ani olarak kırılır. Her malzeme çalışma ortam ve koşullarına göre farklı yorulma davranışı sergiler.

Mühendislik alanlarında pek çok farklı mekanik hata modlarına rastlanmaktadır. Bu hatalar basit, kompleks, pahalı ya da ucuz parçacık ve/veya yapılar da görülebilir. Malzemelerin yorulması konusu üzerinde adım adım çalışılan karmaşık çalışmalardan biridir. Yorulma hatası, mekanik hataların sebep olduğu tekrarlı yükleme ve çoklu işlemlerin birlikte oluşturduğu bir hata türüdür. Ancak bu tür mekanik hataların en küçüğü bile çok büyük hayati kazalara sebep olmaktadır. Bu hasar türü ilk defa August Wöhler tarafından uygulanan gerilime karşı–çalışma ömrü (S-N) diyagramları kullanılarak, yüksek gerilme değerleri ile yorulma ömrünün nasıl azaldığını malzemelerde kırılmaların nasıl oluştuğunu gözlemlemiştir [8, 64-66]. Yorulma kırılmalarının büyük çoğunluğu, çentik etkisi yapan şekil ve yüzey etkilerinden, uygun olmayan servis şartlarından, aşırı yükleme ve montaj sırasında oluşan hatalardan kaynaklanmaktadır. Bu anlamda yorulma kırılması, kırılmaya sebep olan dış ve iç etkenler olarak ikiye ayrılabilir (Tablo 1.1).

Tablo 1.1. Yorulma dayanımına etki eden dış ve iç etkenler [8]

Dış Etkenler	**İç Etkenler**
Gaz boşlukları, inklüzyonlar, cüruf kalıntılarının yoğunlaştığı bölgeler, oksitler ve tane sınırlarındaki çökeltiler. Kuvvetlerin doğrultu değiştirdiği yerler: cıvata başları, krank millerinin dirsekleri, sıkı geçmeler. Kuvvet etki noktaları: toleranslı veya sıkı geçmeler, dingil başlıkları. Talaşlı işlemler sırasında oluşan yüzey zedelenmeleri: taşlama izleri, taşlama çatlakları, torna izleri. Diğer yüzey zedelenmeleri: aşınmış bölgeler, sertleştirme çatlakları, hadde veya dövme hataları.	Gaz boşlukları, inklüzyonlar, cüruf kalıntılarının yoğunlaştığı bölgeler, oksitler ve tane sınırlarındaki çökeltiler.

1.3.1. Yorulma testleri

Malzemelerin yorulma davranışlarının belirlenmesinde Wöhler yöntemi kullanılır. Şekil ve yüzey işlemleri açısından aynı özelliklere sahip olan deney numuneleri,

aralıksız ve değişken yüklemeler altında kırılmaya zorlanırlar. Yapılan testler sırasında, ortalama gerilme (σ_{ort}) veya alt gerilme (σ_{alt}) tüm numuneler için sabit tutularak, her test için farklı gerilme genlikleri seçilir (σ_g). σ_g; Denklem (1.1) ile, σ_{ort}; Denklem (1.2), maksimum gerilme (σ_{max}); Denklem (1.3) ve minimum gerilme (σ_{min}); Denklem (1.4) ile verilmiştir. İlk çalışmalarda, test numunesine uygulanan gerilme genliği, genellikle akma dayanımı sınırlarına yakın değerlerdedir [67-69].

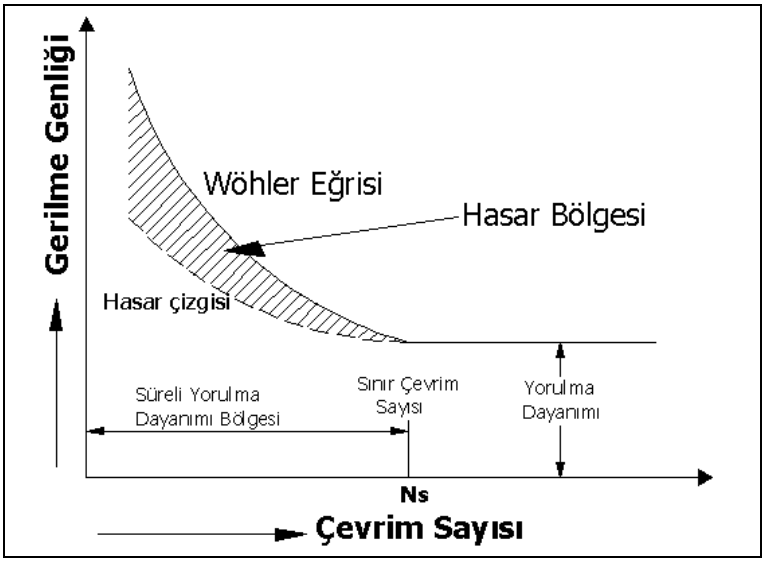
$$\sigma_g = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \tag{1.1}$$

$$\sigma_{ort} = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \tag{1.2}$$

$$\sigma_{\max} = \sigma_o + \sigma_g \tag{1.3}$$

$$\sigma_{\min} = \sigma_o - \sigma_g \tag{1.4}$$

Daha sonraki aşamalarda test numunesi üzerine gittikçe azalan yüklemeler uygulanarak gerilme-çevrim sayısı (σ-N) grafiğinde daha yüksek çevrim sayılarına ulaşılmaya çalışılmaktadır. Yapılan testler sonucunda elde edilen (σ-N) grafiğine Wöhler eğrisi adı verilmektedir [70]. Şekil 1.14' te Wöhler ve hasar çizgilerinin verildiği bir eğri görülmektedir.



Şekil 1.14. Wöhler eğrisi [70]

Belli bir çevrimden sonra Wöhler eğrisinin sonsuz çevrime yaklaştığı kabul edilmektedir. Sonsuz çevrim, kırılmanın oluşmadığı en yüksek gerilme genliğine yorulma dayanımı (σ_Y) adı verilmektedir. Sınır çevrim sayısı (N_s), düşük sıcaklıklarda ve oda sıcaklığında çelikler için 10^7, yüksek sıcaklıktaki çelik ve hafif metaller için ise, 10^8 olarak kabul edilmektedir.

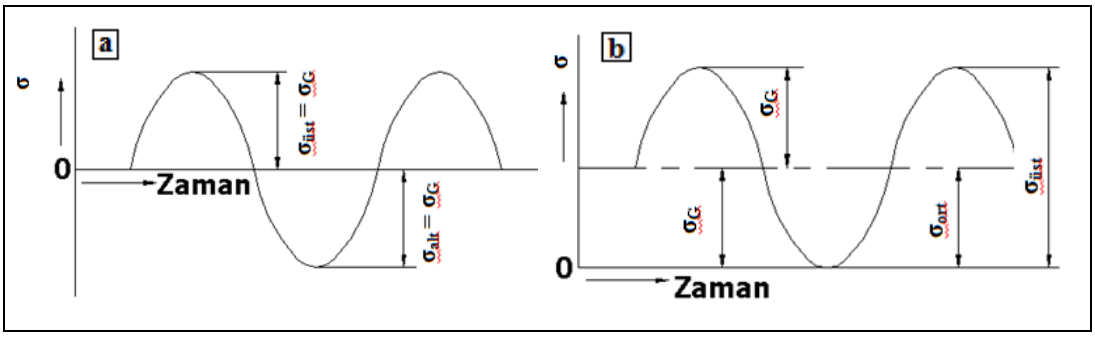
Test numunelerinin yorulma dayanımlarının belirlenebilmesi amacı ile çeşitli gerilme kuvvetleri uygulanabilir. Böylece malzemelerin, hangi amaç için ve nerelerde kullanılacağının belirlenmesi hakkında istenilen kullanım bilgileri elde edilebilmektedir. Şekil 1.15' te değişken ve dalgalı yorulma dayanımı grafikleri ve eşitlikleri verilmiştir.

Değişken yüklemelerde gerilme değişimi ($\Delta\sigma$), maksimum ve minimum gerilme değerlerinin arasındaki farkını vermektedir ve bu ilişkili Denklem (1.5)' de verilmiştir [67].

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \tag{1.5}$$

R değeri ise gerilme oranını temsil etmektedir. Bu değer maksimum ve minimum gerilme değerlerinin oranına eşit olup ilgili Denklem (1.6)' da verilmiştir [67].

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \tag{1.6}$$



Şekil 1.15. Yorulma dayanımı eğrileri; değişken yorulma dayanımı (a), dalgalı yorulma dayanımı (b) [70]

1.3.2. Yorulma kırılmasının nedeni

Malzemelerin çalışma şartlarından kaynaklanan zorlamalar sonucunda meydana gelen gerilmeler, temel mukavemet denklemleri ile her zaman uyuşmaz. Bu nedenle,

çekme veya basma gerilmeleri parça kesitinde eşit olarak dağılma, eğme ve burma gerilmeleri de yüzeyden ortaya doğru doğrusal bir azalma göstermemektedir. Uygulamada, teoriye dayanan çekme veya basma gerilmeleri kesite eşit olarak dağıldığı kabul edilse de, bu gerilmelerin dağılımlarında az veya çok sapmalar görülür. Parçanın şekli, yüzey kalitesi, korozif ortamın etkisi, kuvvet iletiminin türü, ön gerilme, malzeme hataları ve mikroyapının büyük ölçüde heterojen olması gibi nedenler ile bölgesel gerilim yığılmaları oluşur. Yorulma çatlağı, gerilim yığılmalarının bulunduğu bölgelerde başlamaktadır. Ayrıca bir makine veya yapı elemanının öz titreşim frekansına yakın bölgelerdeki zorlamalar sonucu oluşan rezonans titreşimlerine veya her zaman önlenmesi mümkün olmayan aşırı yüklere dayanacak şekilde tasarlanmış olmaması da, yorulma çatlaklarına yol açabilir. Yorulma hasarının diğer bir nedeni de montaj hatalarıdır. Örneğin balansı bozulmuş bir milde, öngörülenden daha yüksek gerilmeler oluşabilir. Ayrıca zorlanan bölgelerde kullanılan dolgu kaynağının uygun olarak yapılmaması halinde de yorulma çatlakları görülebilir. Aşırı zorlanan bir bölgede çatlağın başlaması durumunda, yorulma kırılmasının önlenmesi çoğunlukla imkansızdır. Çatlak büyümesi sonucu oluşan kırılma ise çevrim sayısı yani frekansa bağlı olarak bir zaman sorunu olarak ortaya çıkar. Yorulma çatlağının görülmesi kullanılan malzeme veya malzeme durumu için yerel bir gerilim artışının olduğunun göstergesidir. Yorulma sonucu oluşan çatlak çentik etkisine neden olduğu için, yüksek gerilme yığılmaları, çatlağın hızlı ilerlemesine ve büyümesine neden olmaktadır. Ayrıca uygulanan yükü taşıyan kesit sürekli küçüldüğünden, bu kesitte yorulma dayanımına ait gerilmenin sınır değerleri giderek daha da artmaktadır. Gözlemler sonucu yorulma çatlağı ilerleme hızının, çatlak derinliğinin karesi ile arttığı bilinmektedir. Parçanın kırılması genellikle uzun bir süreyi gerektirdiği ve zorlama sürekli değiştiği için, bu olay yorulma kırılması olarak adlandırılmaktadır. Bazı durumlarda ise yorulma çatlakları sonucu parça kırılmaz. Çatlak oluşması ile parça daha az zorlanır ve dolayısıyla gerilmenin üst sının malzemenin yorulma dayanımı değerinin altında kalır [71].

1.3.3. Yorulma-mikro çatlak oluşumu ve ilerlemesi

Yorulma işlemi sırasında meydana gelen plastik deformasyon, malzeme de birden fazla yapısal değişikliğe sebep olabilmektedir. Malzemeye uygulanan yük nedeniyle

yaygın olarak yüksek bölgesel gerilmeler ve bölgesel yapı bozuklukları olarak iki farklı yapısal değişiklik oluşması söz konusudur. Meydana gelen ani kırılma işlemi (herhangi özel bir durumdaki) en hızlı şekilde bir kritik şart oluşturma işlemidir. Büyük plastik gerilme genliklerinde en hızlı gelişen işlem, artan iç gerilmelerle, kırılmaya sebep olan gerilmeler birinci gurupta, küçük gerilme genliklerinde (hızlı genleşme etkisinin olmadığı) çalışma işlemi ise ikinci gurupta incelenir.

Yüke maruz kalan malzemelerin kafes yapısında meydana gelen bozulma, yorulma mekanizmasının temelini teşkil etmektedir. Yorulma sırasında kayma düzlemlerini engelleyen impürite/intermetalikler, tane sınırına yerleşirler. Kayma düzleminin hareketi şekli belirsiz katmanlar oluşturur. Kayma hareketleri ile oluşan bozulma, ısıl işlemler ile kontrol edilebilir [72]. Bölgesel ve kalıcı yorulma hasarını başlatan olay mikro plastik bir olaydır. Diğer bir deyişle malzemenin elastik olduğu halde mikro seviyede plastik değişim göstermesidir.

Yorulma çatlağı yüzeysel bir çentikte, ya da düzensiz dış çizgilerde meydana gelebilir. Yorulma esnasında derin bir çatlağı oluşturabilecek büyük bir kayma oluşur. İlk çatlaklar kayma düzlemleri boyunca meydana gelir. Çatlak ilerlemesi kristalografik olarak kısa mesafede, kayma düzlemi boyunca yönlenir. Bu durumda çatlak ilerlemesi ikinci duruma göre çok daha azdır. İkinci durumdaki çatlak, kayma düzlemleri boyunca ilerler ve maksimum çekme gerilmesine dik bir doğrultudadır [71].

1.3.4. Yorulma etkisi ile kırılma

Sürekli artan zorlamalarda şekil değiştirmenin tek yönlü olmasına karşın, yorulma zorlamasında kuvvet veya moment, artma-azalma gösterir. Söz konusu şekil değiştirmeler malzemenin kristal kafesi tarafından karşılanabildikleri sürece tehlikeli değillerdir. Küçük kalıcı şekil değiştirmeler de kırılma olmadan kristal kafesi tarafından tolere edilebilmektedir. Malzemelerde kalıcı şekil değiştirmeler kristal kafesin çarpılması ile değil, kafesin değişik bölümlerinin yeni bir denge durumu sağlanıncaya kadar ötelenmesiyle oluşurlar. Kayma düzlemlerinin kristal kafesindeki konumu malzemenin kristal yapısı ile ilgilidir.

Tekrarlı yüklemeler sonucu kristal yapıda meydana gelen kayma, tek yönlü zorlamalardaki gibi dislokasyonların oluşumu ve ilerlemesi ile açıklanmaktadır. Bu şekil değiştirme mekanizması, parlatılmış test numunelerinin yüzeyinde, yorulma sınırına yakın zorlamalar altında kayma çizgileri oluşmasıyla görünür duruma gelebilmektedir. Tek yönlü zorlamalarda olduğu gibi yorulma zorlamaları sırasında da yapıda bir miktar pekleşme meydana gelmektedir. Pekleşme sadece şekil değiştirme miktarı ile birlikte az da olsa yükleme frekansına da bağlıdır. Tekrarlı yük uygulanan malzemelerde yapılan metalografik incelemeler, pekleşme sonucu yapı değişikliklerinin oluştuğunu göstermektedir [71]. Bazı gözlemlerde ancak kayma ve yerel sıcaklık artışlarının varlığı ile açıklanabilecek çökelmeler görülmüştür. Tekrarlı yüklemelerin kristal kafesi tarafından sürekli olarak taşınamadığı için yorulma zorlamasının pekleşme dışında hasar etkisi vardır. Çevrim sayısına ve gerilme kuvvetine bağlı olarak belirli bir çevrim sayısından sonra ortaya çıkan hasara, malzeme yapısıyla ilgili olarak hangi olayların yol açtığı yeterince araştırılmış ve tatmin edici ve teoriye dayanan bir açıklama yapılmış değildir. Tekrarlı yüklemeler sırasında meydana gelen kalıcı şekil değiştirmelerin yeteri kadar birikimi sonucu malzemenin belirli noktalarında mikro boyutlarda oluşan çatlakların yorulma davranışını belirlediği söylenebilir [71]. Zorlama sırasında dışardan verilen enerjinin büyüklüğüne bağlı olarak oluşan mikro ve makro çatlaklar birleşir ve sonunda bu çatlaklardan herhangi biri yorulma kırılmasına neden olur.

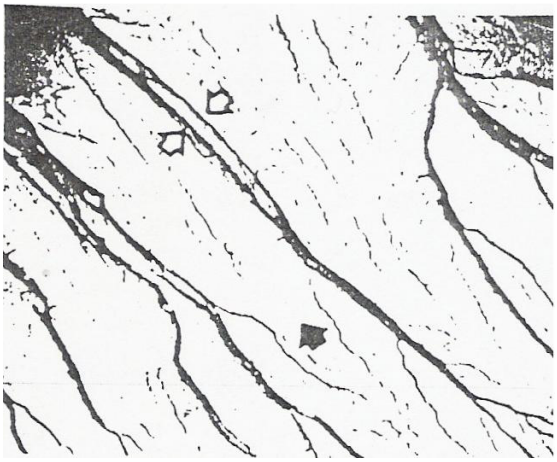
Hasar çok küçük ve sınırlı bir bölgede başlayıp çatlak olarak ilerlediğinden herhangi bir kalıcı şekil değiştirme görülmez ve bu nedenle yorulma kırılmaları şekil değiştirmesiz olarak nitelenir. Hasarın ilk oluştuğu nokta, çoğunlukta yüzeyde veya yüzeyin hemen altındadır, ancak heterojenliklerin veya malzeme hatalarının durumuna göre malzemenin iç kısmında bulunabilir. Sonuç olarak zorlamalardan dolayı yorulma kırılması üç aşamada oluşur.

1.Aşama; statik akma gerilmesi üzerindeki bir değerde meydana gelen akma pekleşme başlayıncaya kadar devam etmektedir.

2.Aşama; Pekleşme başlangıcından görülebilir çatlak oluşumuna kadardır. Yani çatlak bu safha sonucunda oluşmuş durumdadır.

3.Aşama; Yorulmanın sonucunda oluşan çatlağın parçanın kopma durumuna geldiği belirli bir büyüklüğe erişmesine kadar devam etmektedir [71].

Kırılma bir çatlakla başlar ve Şekil 1.16' da gösterildiği gibi bir çatlaktan diğerine atlayarak ve taneyi çapraz geçerek ilerler. Bu aşama kristalografik değildir. Kırılma yolu bir çatlağın takibi esnasında kristalografik olarak görülür. Çatlak ilerleme esnasında önce karşılaştığı hattı geçer. Yanda bir tane varsa tane sınırının bir kesimini içermesine rağmen düzensiz olarak ayrılır. Çatlak yeterli uzunluğu geldiği zaman geride kalan kısım, uygulanan yükü taşıyamayacağından numune kırılır [71].



Şekil 1.16. Çatlak ilerlemesi ve yönü [73]

1.3.5. Malzemelerde yorulmaya tesir eden faktörler

Yorulma kırılmasına etki eden faktörler iç ve dış etkenler olarak ikiye ayrılabilir. Yorulma hasarının oluşmasında aynı anda birçok faktör söz konusudur.

1.3.5.1. Malzemenin cinsi ve bileşimin etkisi

Genellikle malzemelerin statik çekme dayanımı arttıkça yorulma dayanım sınırında da artma gözlenir. Alaşım elementleri ve gerilim giderme ısıl işlemleri sonrasında malzemenin sertliği azalır, çeliklerde statik çekme değerini artırdığı gibi, sertliklerini ve yorulma limitini de artırır [64].

Shall [74] tarafından çalışmalarda tane büyüklüğünün ve şeklinin de yorulma dayanımı üzerine etkili olduğu belirtilmektedir. Oda sıcaklığında yorulma bakımından en iyi mukavemet ince taneli malzemelerde elde edilir. Ancak bu kural

çentikli parçalar için tam olarak geçerli değildir. Çünkü tane boyutu küçüldükçe mekanik özellikler (çekme gibi) artar. Genellikle yorulma dayanımı demir esaslı malzemelerde 1/2 $\sigma_Ç$ dir. Demir dışı malzemelerde ise yaklaşık 1/3 $\sigma_Ç$ dir. Bu nedenle yorulma dayanımının artması gerekmektedir. Tane boyutu küçük olan malzemelerin yorulma dayanımları da artmaktadır. Bu yüzden tane boyutu ve tane şekli çok önemlidir. Yüksek sıcaklıklarda ise tane büyüklüğünün etkisi; ayrıca malzemenin cinsine, sıcaklığa, çentik etkisine ve deney süresine bağlıdır [74].

1.3.5.2. Malzemeye uygulanan kuvvet

Yorulmaya etki eden kuvvetler; eksenel düzlemsel veya burulma zorlaması şeklinde olmaktadır. Yorulma dayanım sınırı zorlama türüne göre de farklılıklar gösterebilir. Aşırı zorlamalara maruz kalan malzemenin yorulma ömrü kısalmaktadır [64].

Makine parçalarının yorulmaya karşı tasarımı için öncelikle parçanın çalışma şartları bilinmelidir. Çalışma türü sürekli veya kesikli olabileceği gibi yükleme şeklinin ve dolayısıyla gerilmelerin değişiminin de düzenli veya düzensiz olmaktadır. Bunların dışında darbelerin söz konusu olduğu işletme türlerinin de dikkate alınması gerekir. Deneyimler yorulma bakımından küçük ve sık darbelerin büyük fakat seyrek darbelerden daha zararlı olduğunu göstermektedir. Çok büyük darbeler ise makine parçalarında ani kırılmaya neden olmaktadırlar [74].

1.3.5.3. Yüzey işlemlerinin etkisi

Malzemeye uygulanan gerilime bağlı olarak meydana gelen çatlaklar genellikle kaba yüzeylerde daha çabuk oluşur. Bu nedenle, çok iyi yüzey kalitesi olan malzemelerde yorulma limiti arttırılabilmektedir.

Yüzey işlemleri olarak tanımlanan pürüzlülük türlerinin çekme dayanımına etkisinin yanında, parçada olabilecek delik, çentik, kama yuvaları, kuvvetlerin doğrultu değiştirdiği yerler veya çeşitli süreksizlikler yorulma dayanımını azalmaktadır [71].

Parçaların şekillendirilmesi sırasında oluşan yüzey durumu ve yüzey kalitesi de yorulma dayanımını etkilemektedir. Gerilmelerin etkisiyle çatlaklar kaba yüzeylerde daha çabuk oluşmaktadır. Parlatılmış bir numuneden elde edilen yorulma dayanımı

ile farklı yüzey pürüzlülüklerine sahip malzemelerin yorulma dayanımı farklılıklar göstermektedir [75].

1.3.5.4. Boyut-hacim etkisi

Makine parçalarının büyüklükleri de yorulma mukavemetini büyük ölçüde etkileyen faktörlerden biridir. Parça boyutu büyüdükçe yorulma mukavemeti artmaktadır. Boyutun yorulma özelliğini olumsuz yönde etkilemesinin iki temel nedeni vardır. Birincisi yüzey alanı arttığından yüzey kusurlarının bulunma ihtimali artar. İkincisi eğilme ve burulma zorlanmalarında çap arttıkça gerilme eğimi de artar. Bu nedenle gerilim oluşan bölgelerin sayısı da artmaktadır [75].

Farklı yükler altında yorulan malzemelerin dış yüzeylerinde, merkezden daha fazla gerilme oluşmaktadır. Bundan dolayı kırılma, malzemenin yüzeyinde oluşan bir çatlaktan başlamaktadır. Dış katmandaki çatlağın ilerlemesi, malzemenin kesiti ile ilişkilidir. Büyük kesitli malzemelerde yorulma zorlamasından sonra kırılmanın daha hızlı ilerlediği görülmektedir. Sonuç olarak büyük parçaların yorulma dayanımları küçük parçalarınkinden daha düşüktür ve kullanılan çeliğin sertliği ile ilişkili olarak bu fark daha da belirginleşmektedir [74].

1.3.5.5. Korozyon etkisi

Yorulma olaylarında mekanik etkilerin yanında bir de kimyasal olarak korozyon etkisi söz konusudur. Yorulmadan önce malzemenin korozyona uğraması yorulma dayanımını azaltmaktadır. Korozyona uğramış bölgeler çentik etkisi göstererek kırılmayı hızlandırmaktadır [76].

Korozyon parçaların nemli hava, deniz suyu, endüstriyel atmosfer, su, tuz çözeltileri ve benzer ortamlarda çalışmasından kaynaklanan bir olaydır. Yapılan araştırmalara göre havadaki oksijen dahi yorulma zorlaması altındaki parçaları olumsuz yönde etki etmektedir. Farklı metal malzemeler üzerinde, vakum altında yapılan testler atmosferik ortamda yapılan testlere göre daha yüksek yorulma dayanımları vermektedir [77-79].

1.3.5.6. Sıcaklığın etkisi

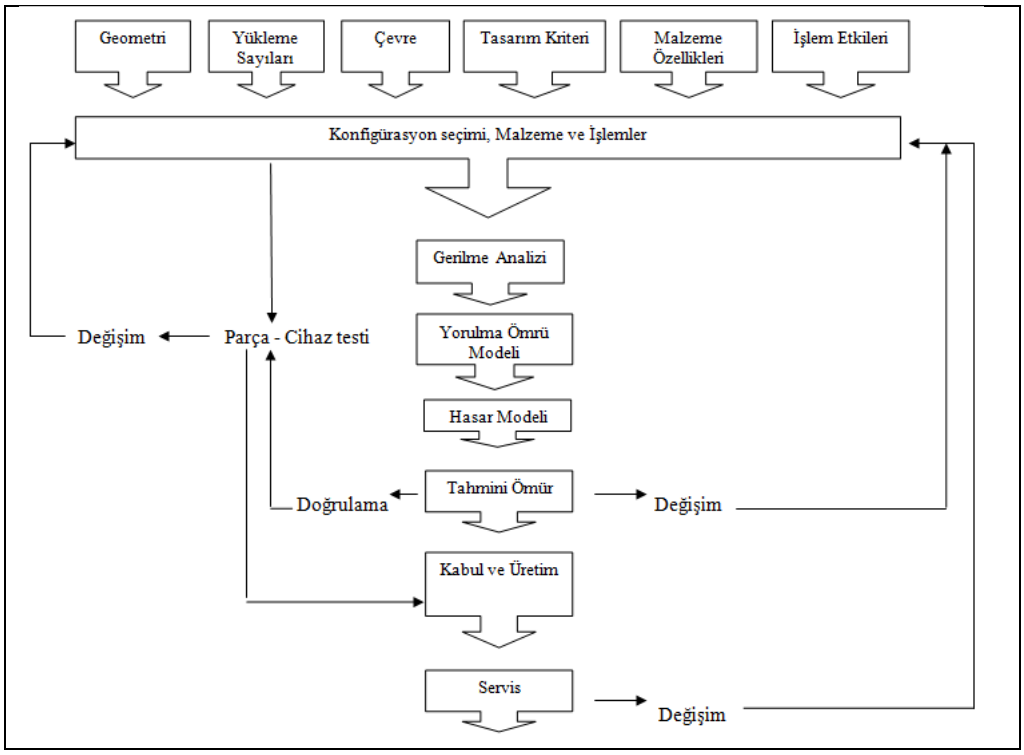
Düşük sıcaklıklarda yorulma dayanımının arttığı bilinmektedir. Çok özel durumlar dışında sıcaklığın artması yorulma dayanımını azaltmaktadır.

Oda sıcaklığının altında yapılan testlerde, sıcaklık düştükçe yorulma mukavemetinin arttığı görülmektedir [64]. Çentik hassasiyeti sıcaklıkla ters orantılı olarak değişmektedir. Geçiş sıcaklığının altında yorulma kırılmasında ani bir değişim görülmez. Oda sıcaklığının üzerinde, düşük karbonlu çeliklerde 200 - 300 ºC arasında deformasyon yaşlanması, çekme mukavemeti ve yorulma mukavemetinin yükselmesine sebep olmaktadır. Sıcaklık 400 ºC' ye ulaştığında sürünme devreye girmektedir. Oda sıcaklığında tane büyüklüğü küçüldükçe yorulma mukavemeti artar. Sürtünme olayının başladığı sıcaklıktan itibaren kaba taneli çelik, ince taneli çelikten daha yüksek mukavemet gösterir. Sıcaklık değişiminin meydana getirdiği termal gerilmeler, yorulma kırılmasına sebep olabilir [64].

Yüksek sıcaklıklarda yorulma dayanımlarının bilinmesi, ısıya dayanıklı çelik ve alaşımlar için önemlidir. Isıya dayanıklı çelikten yapılmış test numunelerinde, yüksek sıcaklıktaki dinamik zorlamaların etkisiyle yorulma dayanımında azalma olduğu görülmüştür. Isıya dayanıklı çeliklerde de yüksek sıcaklık dayanımları yüzey pekleştirme işlemleri ile artırılabilmektedir [74].

1.3.6. Yorulma tasarım kriterleri

Uygun yorulma tasarımları ile malzemelerde oluşabilecek kayıplar azaltılabilir. Uygun yorulma tasarımı; analiz, sentez ve testleri içerir. Simülasyon verileri ve test sonuçları, gerçek malzeme ve kullanım alanlarında mühendislik yaklaşımlarına göre daha güvenli sonuçlar vermektedir. Şekil 1.17' de yorulma tasarımı akış şeması verilmiştir.



Şekil 1.17. Yorulma tasarımı akış şeması [64]

Yorulma tasarımı yapılırken öncelikli olarak, yorulma hasarına maruz kalabilecek unsurlar göz önünde bulundurulmalıdır. Bu sebeple malzemelerin çalışma ortamı, malzemenin metalürjik ve geometrik özellikleri ile işlem özellikleri büyük önem taşımaktadır. Malzemenin fiziksel ve karakteristik özelliklerinin belirlenmesinin ardından çalışacağı yer, makine parçası, yapısı, aracın cinsi, güvenlik kriterinin önemi üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Çeşitli modeller oluşturularak gerilme analizlerine tabi tutulan malzeme için Şekil 1.17' de de görüldüğü gibi, çalışma ömrü konusunda ya da servis koşullarında istenmeyen bir durum ile karşılaşıldığında tekrar ilk aşamaya dönülmektedir.

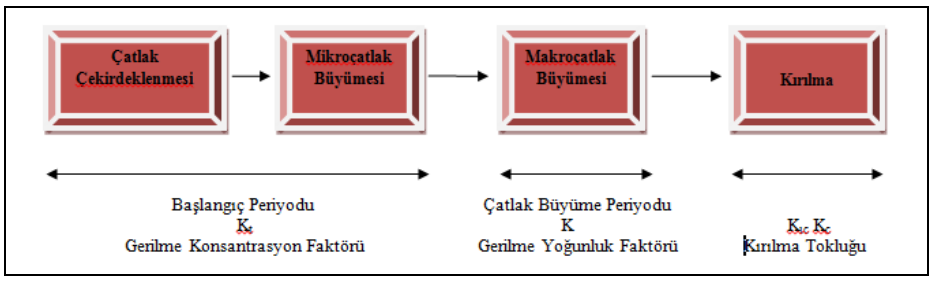
Yorulma tasarım kriterleri benzerlik gösterse de aslında çoğu alanda birbirlerinden farklılık göstermektedirler. Bu farklılıklar; herhangi bir parça, yapı ya da makinede ki hayati öneme sahip olan/olmayan, basit veya karmaşık tüm malzemeleri kapsamaktadır. İstenilen tek bir ürün için binlerce ya da milyonlarca ürün üretilmesi gerekecektir. Bu tür fazla işlemlerden kaçınabilmek amacıyla yorulma tasarım kriterleri oluşturulmuştur [64]. Tablo 1.2' de yorulma tasarım kriterleri dört grup altında sınıflandırılmıştır.

Tablo 1.2. Yorulma tasarım kriterleri [64]

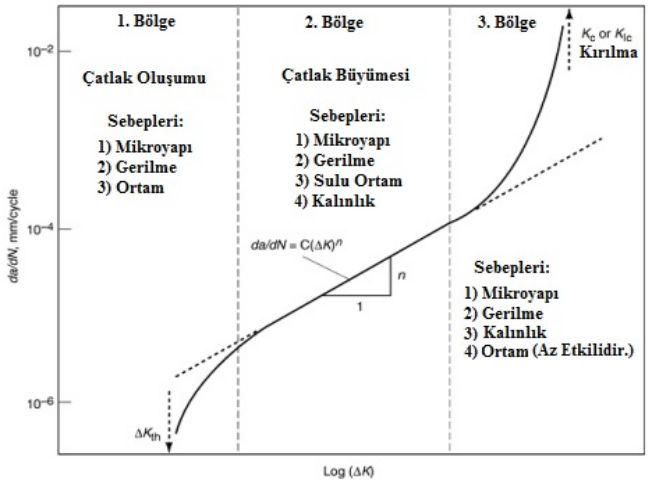
Sonsuz-Ömürlü Tasarım	**Güvenli-Ömürlü Tasarım**	**Hatalı-Güvenli Tasarım**	**Hasarlı-Toleranslı Tasarım**
Sınırsız güvenlik en eski kriterlerdir. Bu tasarım kriteri, bölgesel gerilmeleri ya da uzamaları temel alarak yorulma sınırlarını elastik ve güvenlik sınırlarının çok altında tutmaktadır. Motor supap yayları gibi milyonlarca döngüye tabi olan parçalar için bu iyi bir tasarım kriteridir. Ancak birçok yerlerde önemli bir değişken genlik yükleme uygulaması ve yerinde yorulma sınırı tanımlaması elde etmek zordur. Ayrıca, mali açıdan düşünüldüğünde özellikle havacılık alanında aşırı kütlesel malzeme gereksiniminden dolayı bu tasarım kriteri çok ekonomik ya da pratik gözükmemektedir.	Sonsuz ömür tasarımı, Wöhler tarafından incelenmiştir. Otomobil tasarımcıları yüzbinlerce maksimum gerilim ve yük altında çalışabilecek parçaları kullanmayı uygun bulmuşlardır. Süspansiyon yayları ve geri vites gibi uygulamalarda maksimum yük veya gerilim bir otomobilin ömrü boyunca ancak zaman zaman ortaya çıkabilir, bu yükler altında sonlu ömüriçin uygulanmış tasarım oldukça tatmin edici olabilmektedir. Bu kapsamda sonlu ömürlü bir tasarım ve uygulama “güvenli-ömürlü” tasarım olarak adlandırılmaktadır. Bu tür tasarımlar, basınçlı kap tasarımı ve jet motoru tasarımı gibi pek çok endüstride tercih edilmektedir. Güvenli-ömürlü tasarım, gerilme hesaplamaları, gerilme ömrü, çatlak büyümesi ile sonuçların incelenmesini kapsamaktadır.	Bir parçacık, yapı ya da araç müsaade edilen güvenli ömrün sonuna ulaştığında, servis dışı bırakılmalıdır. Bazı durumlarda ortalama hesaplar ve test ömrü sonuçlarına bakılarak parçalar ya da tüm sistem devre dışı bırakılabilir. Bu uygulama çok pahalı ve savurgan bir yöntemdir. Uçak mühendisleri, hatalı-güvenli yorulma kriterlerini geliştirerek, büyük güvenlik faktörlerinin dışındaki küçük emniyet faktörlerini alarak yaşam için tehlike arz etmeyecek, güvenli yaşam kriterlerini düşünerek daha uygun kriteri elde etmeye çalışmışlardır. Bu kriterde bir parçası hatalı olan bir sistem tümüyle hatalı değildir. Eğer tasarımda tanınır yorulma çatlakları tespit edilmiş ve tamiri yapılmışsa ancak sistem yetmezliğine yol açıyorsa bu kapsamda uygunsuzluk verilmektedir.	Bu tasarım kriterinde, yorulmadan dolayı çatlakların varolacağı varsayılır, periyodik muayene ile önceden hataların büyüklükleri ve genişlikleri tespit edilerek kırılma mekaniği ve analizler yapılır. Başarılı bir hasar-toleranslı tasarım için üç anahtar öğe bulunmaktadır: Kalıntı gerilmesi, yorulma çatlak büyümesi davranışı ve çatlak tespiti. Tabii ki bu metodoloji, çevre koşulları, yükleme-çalışma geçmişi, statik yönleri ve emniyet faktörleri dahil olmaktadır.

1.3.7. Metallerde yorulma

Malzemelerde yorulma periyodunun oluşumu, üç aşamada incelenebilir. Çatlağın çekirdeklenmesinden – kırılmaya kadar oluşan bu periyodun şematik bir resmi Şekil 1.18' de ve çatlak oluşum safhaları Şekil 1.19' da verilmiştir.



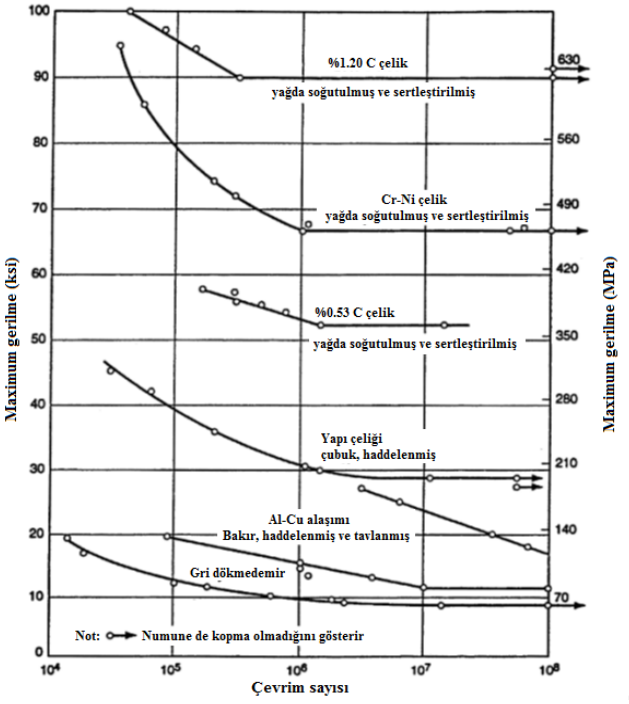
Şekil 1.18. Yorulma periyodu [80]



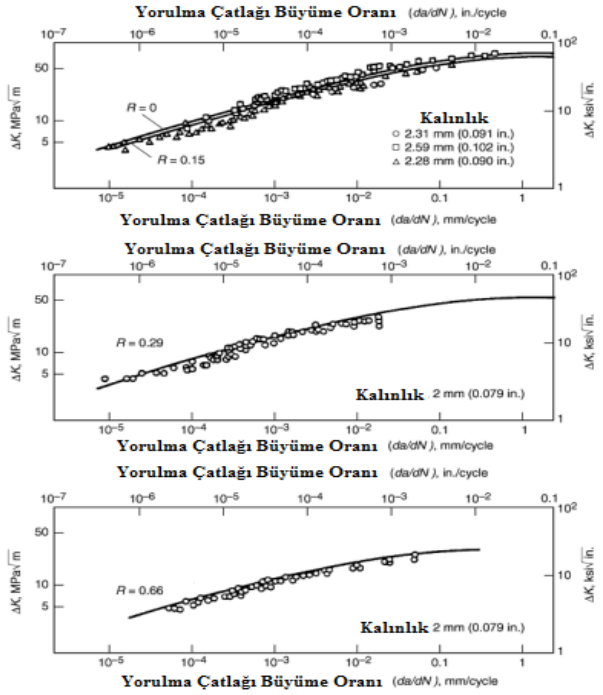
Şekil 1.19. Yorulma çatlak oluşum safhaları ve sebeplerinin şematik diyagramı [80, 81]

Şekil 1.18 ve Şekil 1.19' da verilen diyagramlar da görüldüğü gibi, yorulma olayının gerçekleşebilmesi için; öncelikle ilk olarak çatlak oluşumu safhasının belirginleşmesi gerekmektedir. Çatlak başlangıcı çoğunlukla kristal kafes yapısındaki hatalar ve kalıntı gerilmelerinin bulunduğu bölgelerde olmaktadır. Çatlak büyümesi ise; yüzeyden itibaren oluşan mikro çatlaklar birleşerek daha büyük çatlakların oluşmasına sebep olmaktadır. Son safha da ise; oluşan çatlaklar daha fazla gerilmenin etkisiyle kırılmayı meydana getirir. Kırılmanın meydana gelmesi için malzemenin plastik şekil değişimi göstermesine gerek yoktur. Gevrek bir malzeme ile sünek yapıya sahip bir malzemenin yorulma grafikleri, çevrim sayılarında ya da gerilme genliklerine bağlı olarak farklı bir grafik sergilemektedir. Şekil 1.20 ve Şekil

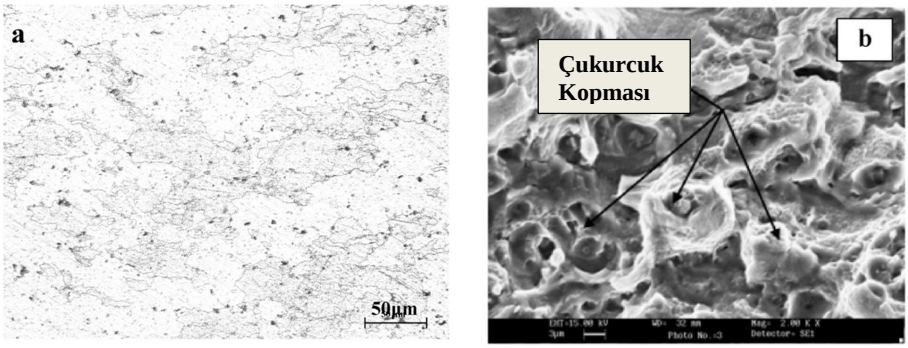
1.21’ de çeşitli metallere ait yorulma grafikleri verilmiştir. Şekil 1.22’ de ise AA7075 alaşımına ait döküm malzemenin optik mikroskop (a) ve yorulma testi yapılmış numuneye ait kırılma yüzeyi TEM görüntüsü (b) verilmiştir.



Şekil 1.20. Ortam sıcaklığında çeşitli alaşımların tipik S-N diyagramları [82-86]



Şekil 1.21. 7075-T6 Alüminyum alaşımında yorulma çatlak büyümesine R (gerilme oranı)’ nin etkisi [80, 87-89]



Şekil 1.22. AA7075 alaşımı döküm optik mikroskop (a), yorulma kırılması TEM görüntüsü (b) [90]

Malzemelerin tane yapısı APD ile şekillendirilerek, tane boyutları ufaltılmakta ve mekanik özelliklerde iyileşmeler sağlanabilmektedir [21, 28, 29, 63]. Malzemelere APD yöntemi uygulanarak mikroyapılarında ve mekanik özelliklerinde gelişme sağlamak için kullanılan yöntemlerden biri olan EKAP ile taneler arası boşluk miktarını azaltarak küresel tane yapısı elde edebilmek amacı ile kullanılan bir diğer yöntem ise YKİ yöntemidir. Bu teknikler uzun yıllardır kullanılan işlem yöntemleri olmak ile birlikte güncelliklerini korumakta ve artırmaktadırlar.

Günümüze kadar AA7075 alaşımı üzerine yapılmış olan tüm çalışmalar incelendiğinde, EKAP ve YKİ ile şekillendirme tekniklerinin birarada kullanıldığı detaylı bir araştırma ve bunun sonucunda elde edilen malzemelerin yorulma mukavemetinin kapsamlı incelenmediği görülmüştür. Literatürdeki bu boşluk göz önüne alınarak bu çalışmada, referans malzemesi olarak AA7075 alaşımı geleneksel döküm yöntemi ile üretilmiş ve EKAP ile YKİ teknikleri kullanılarak üretilen numunelere göre özelliklerinin araştırılması sağlanmıştır. Öncelikle yapılan çalışma ile silindirik kesitli parçaların EKAP işleminde rotasyon problemlerini gidermek amacı ile literatüre yeni tasarım bir Hekza kalıp kazandırılmıştır. EKAP tekniği ile şekillendirilen AA7075 alaşımı, YKİ tekniği kullanılarak ikinci bir şekillendirme prosesine tabi tutulmuştur. Yapılan şekillendirme teknikleri sonucunda elde edilen numunelerin sertlik değerleri incelenerek, yorulma testleri herbir proses için detaylı olarak yapılmıştır. Mekanik testleri ve incelemeleri yapılan numuneler için mikroyapı görüntüleri incelemeleri yapılarak uygulanan proseslerin mekanik özellikler ile ilişkilendirmesi yapılmıştır. Bu şekilde yapılan çalışma ile ardısıra yapılan şekillendirme yöntemleri sonucunda elde edilen yorulma mukavemet

değerleri ve sertlik ölçümleri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Böylece AA7075 alaşımının mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla yapılan çalışmada; tasarım, üretim, mekanik testler ve karakterizasyon çalışmalarından oluşan kapsamlı bir inceleme sonucunda elde edilen verilerin literatüre kazandırılması hedeflenmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Deneysel çalışmalarda, kullanılan AA7075 alaşımı 25 mm çapında ve 1000 mm uzunluğunda olmak üzere Seykoç Alüminyum Paz. ve San. Tic. Ltd. Şti. İkitelli/İstanbul' dan temin edilmiştir. Alınan AA7075 malzemesi geleneksel döküm yöntemi ile ergitilerek dökümü yapılmış ve 480 ^{o}C de 2 saat homojenize edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan AA7075 alaşımının kimyasal bileşimi Tablo 2.1' de verilmiştir. AA7075 alaşımı döküm işleminden sonra aşırı plastik deformasyon (APD) yöntemi olan Eşit Kanal Açısal Presleme (EKAP) ve Yarı Katı İşlemle (YKİ) şekillendirilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında EKAP işleminde, deformasyon süresinin kısaltılması amacıyla altı yollu yeni bir kalıp tasarımı (Hekza kalıp) yapılmıştır. Tasarlanan Hekza kalıp ile silindirik şekilli AA7075 alaşımının "C" açısal rotasında deformasyonu gerçekleştirilmiştir.

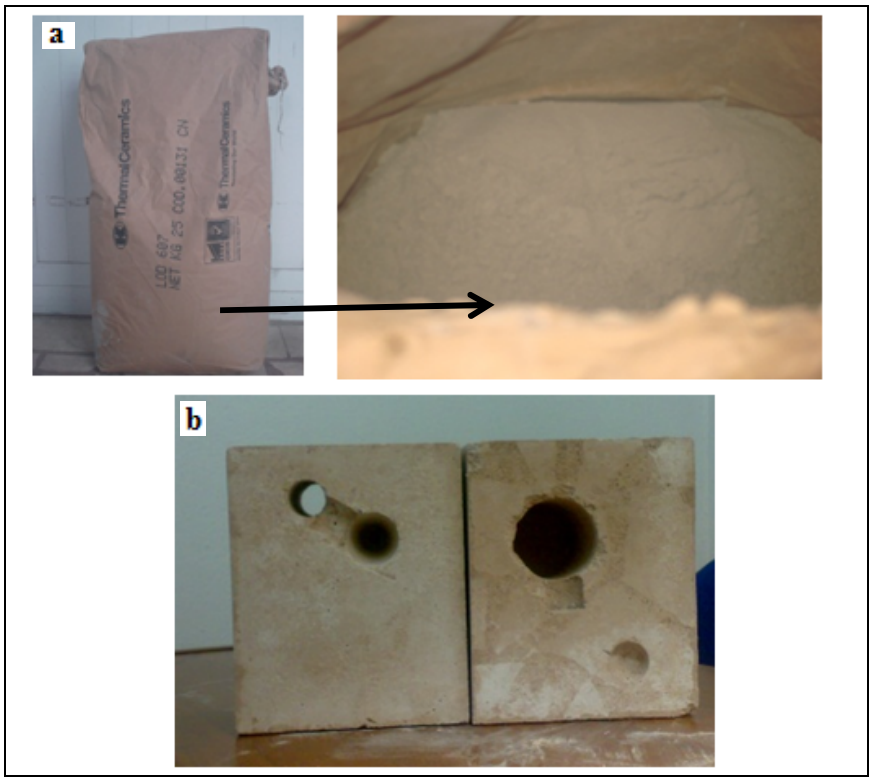
Tablo 2.1. AA 7075 alaşımı kimyasal bileşimi (%)

		Si	**Fe**	**Cu**	**Mn**	**Mg**	**Cr**	**Ni**	**Zn**	**Ti**	**Ti + Zr**
Normal Değerler	**Min.**			1,2		2,1	0,18		5,1		
	Max.	0,40	0,50	2,0	0,30	2,9	0,28	0,05	6,1	0,20	0,25
Test sonuçları		0,14	0,22	1,59	0,11	2,53	0,21	0,004	5,60	0,054	0,05

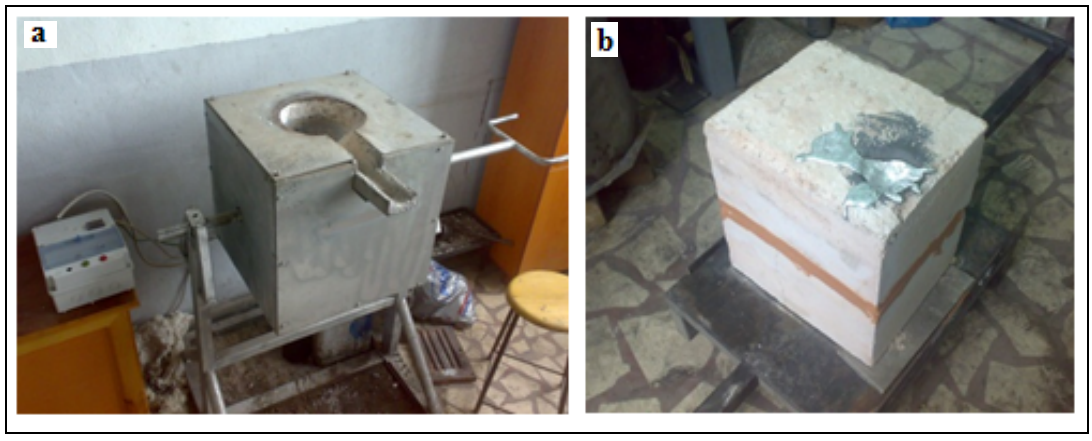
2.1. Döküm İşlemi

Deneysel çalışmalar için kullanılacak olan AA7075 alaşımı geleneksel döküm yöntemi ile hazırlanmıştır. Döküm işlemi için, kum ya da kokil kalıplara göre ısı iletim katsayısı daha düşük olan Lod 607 refrakter malzeme kullanılmıştır (Şekil 2.1.a ve 2.1.b). AA7075 alaşımının ergitilmesinde Şekil 2.2.a' da resmi verilen

elektrik direnç ocağı (Şekil 2.2.b) kullanılmıştır. Kalıplar hazırlandıktan sonra kuruması için fırında 850 ^{o}C de 5 saat bekletilmiştir. Kurutma işlemi biten kalıba daha sonra AA7075 alaşımı dökülmüştür. Döküm işlemi 750 ^{o}C de yapılmıştır. Dökümü yapılan AA7075 alaşımına ait yolluk ve besleyicili döküm blok Şekil 2.3' de verilmiştir.



Şekil 2.1. Döküm işleminin yapılması için kullanılan kalıp malzemesi (a), kalıp (b)



Şekil 2.2. Ergitme işleminin yapılması için kullanılan elektrik direnç ocağı (a), döküm işleminin yapıldığı kalıp (b)



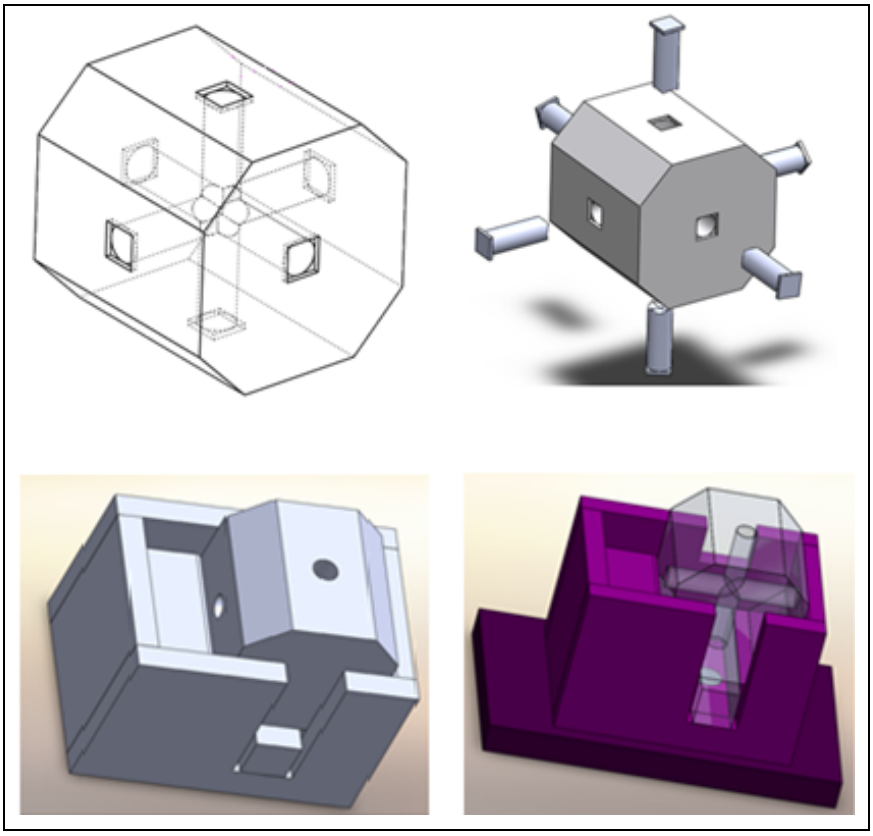
Şekil 2.3. Dökümü yapılan AA7075 alaşımı döküm bloğun görüntüsü

2.2. EKAP Kalıp Tasarımı ve Sisteminin Kurulması

2.2.1. Hekza EKAP kalıp tasarımı

EKAP işleminde kullanılacak kalıbın tasarımı ve imalatı, işlemin gerçekleştirilebilmesi açısından çok önemlidir. Bu çalışmada, EKAP sonrasındaki işlem parametreleri ve nihai ürün şekli düşünülerek silindirik şekilli malzemelerin EKAP işlemine tabi tutulabilmesi için bir kalıp tasarımı yapılmıştır. Yapılan literatür incelemelerinde silindirik şekilli numuneler için kullanılan kalıplarda, özellikle rotalar arası pasolarda numune şeklinde köşe yapısının olmaması ve kullanılmış kalıp geometrileri sebebi ile tahmini bir döndürme yapıldığı görülmüştür. Ayrıca işlem hızının; iki yollu ve dört yollu klasik kalıplar ile EKAP işlemlerinin yapılması sırasında numunelerin her pasoda kalıptan çıkarılması ve tekrar kalıbın içerisine yerleştirilmesi aşamasında çok zaman kaybı olduğu görülmektedir. Tasarımı yapılan yeni tip Hekza kalıp ile işlem süresinin kısaltılması, manuel rotasyon problemleri ve kalıbın çevrilmesi gibi ek yüklerin önlenmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda, kalıbın farklı geometrideki malzemeler içinde kullanılabilen bir tasarıma sahip olması göz önünde bulundurulmuştur. EKAP sistemi, iki parçadan oluşan kalıp, özel tasarım kalıp pimleri ve kalıp tutucusu olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Tasarımı yapılan EKAP kalıp ve sisteminin yapılacak çalışmaya uygunluğunun tespit edilebilmesinde bilgisayar destekli Deform 3D analiz yöntemi kullanılmıştır.

Kullanılan program ile tasarlanan kalıp ve işlem sırasında malzemede oluşabilecek plastik deformasyon göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 2.4' te tasarımı yapılmış EKAP kalıp ve kalıp tutucusu üç boyutlu şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.4. Tasarımı yapılmış EKAP kalıp ve kalıp tutucusu şematik resimleri

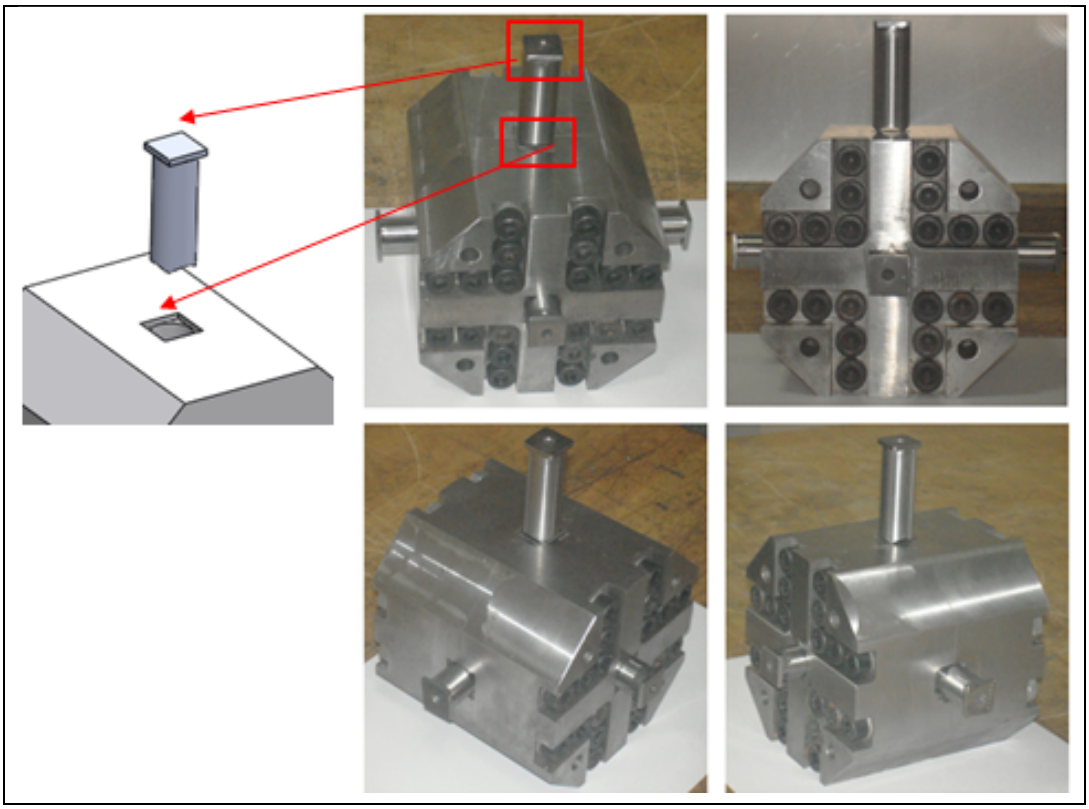
2.2.2. EKAP kalıp imalatı

EKAP çalışmasında Tablo 2.2' de kimyasal bileşimi verilen, AISI P20 Impax Supreme malzeme kullanılmıştır. Kalıp, EKAP işlemi sırasında ya da sonrasında olabilecek herhangi bir problemi engellemek, iç yüzey kontrolünü yapmak ve kalıpta oluşabilecek kirlenmeleri giderebilmek amacıyla iki parçalı olarak yapılmıştır. EKAP sırasında rotalara bağlı olarak kalıbın döndürülmesindeki kolaylıklar düşünülerek köşelerde pahlar oluşturulmuştur. Kalıbın 6 yüzeyinde numunenin bütün rotalarını sağlayacak 20 mm çapında silindirik delikler açılmıştır. Numunenin rota yönüne bağlı olarak delikler, H7/g6 toleranstaki pimler ile kapatılarak kalıp sistemi oluşturulmuştur. İki parçalı kalıp 4 adet merkezleme pimi ile 20 adet M12 ve 12.9 kalitede cıvata ve somunlar ile birleştirilmiştir. Pim deliklerinin bulunduğu kalıp

yüzeylerinde, kalıp pimlerinin EKAP sırasında dönmelerini engellemek ve istenilen açıda ayarlanmasını sağlamak amacıyla deliklerin bulundukları yüzeylerin merkezlerinde 2 mm' lik kare geometrili pim başlıklarına uygun kanallar açılmıştır. Kalıbın imalatı yapıldıktan sonra sertleştirme ısıl işlemleri uygulanarak 64 HRc sertlik elde edilmiştir. Şekil 2.5' de imalatı yapılan EKAP kalıbının çeşitli açılardan çekilmiş görüntüleri verilmiştir.

Tablo 2.2. AISI P20 Impax Supreme malzemenin kimyasal bileşimi (%)

Element	**C**	**Si**	**Mn**	**Cr**	**Ni**	**Mo**	**S**
Ağırlık (%)	0,37	0,3	1,4	2,0	1,0	0,20	0,008



Şekil 2.5. İmalatı yapılan EKAP kalıbı

2.2.3. EKAP kalıp pimleri

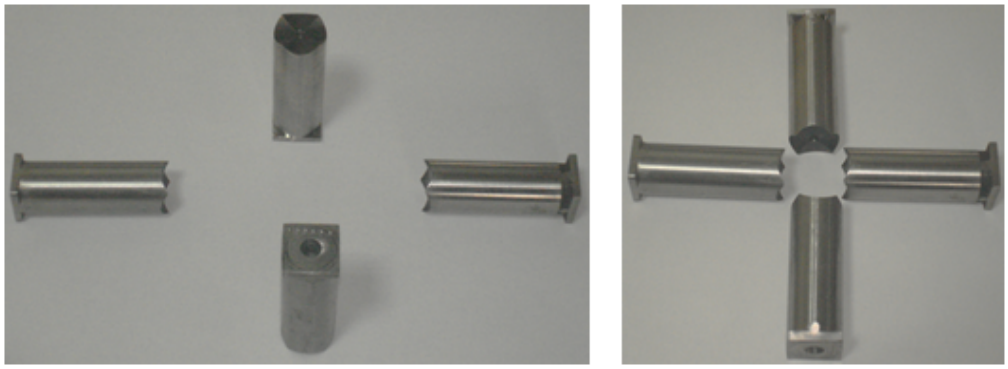
Kalıp pimleri, silindirik malzemelerin EKAP işlemi sırasında rotalara bağlı olarak kalıp içerisinde kolaylıkla hareket edebilmelerini sağlamak ve aşırı plastik deformasyon işlemini her yönde uygulayabilmek amacıyla özel olarak tasarlanmıştır.

EKAP sırasında kalıpta herhangi bir deformasyon oluşmasını önlemek amacıyla pim malzemelerinde Tablo 2.3' de kimyasal bileşimi verilen AISI 2344 sıcak iş takım çeliğinden yapılarak sertleştirilmiştir.

Tablo 2.3. AISI 2344 sıcak iş takım çeliğinin kimyasal bileşimi (%)

Element	**C**	**Si**	**Mn**	**Cr**	**Ni**	**V**	**W**
Ağırlık (%)	0,40	1,00	0,40	5,1	-	1,00	-

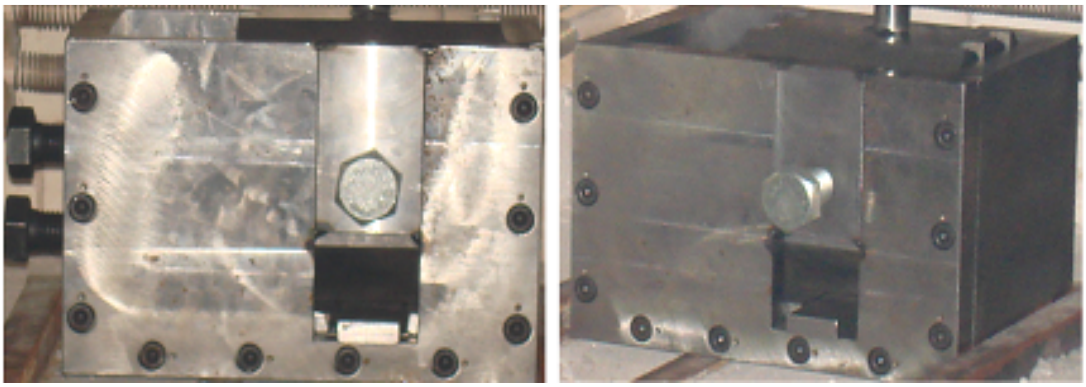
Pimlerin bir ucu iki yönlü yarım ay şeklinde işlenirken diğer ucu presleme sırasında dönmelerini engellemek için kare olarak yapılmıştır. Şekil 2.6' da tasarımı ve imalatı yapılan EKAP kalıp pimlerinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.6. Tasarımı ve imalatı yapılan EKAP kalıbı pimleri

2.2.4. Kalıp tutucusu

EKAP işlemi sırasında kalıbın pres zımbası ile aynı eksende ve sabit tutulması önemlidir. Aynı zamanda işlemlerin tekrarlı preslemeler şeklinde olması göz önüne alındığında, yapılan kalıp kadar kalıp tutucusu da önemlidir. Bu sebeple kalıp tutucusu, kalıbın EKAP işlemi sırasında hareketini engellemesi ve işlem sonrasında preslenen malzemenin ve kalıp pimlerinin kolay sökülüp takılmasına imkan verecek şekilde üretilmiştir. Şekil 2.7' de görülen kalıp tutucu ısıl genleşmelerin dengelenmesi ve presleme sırasında pimlerin oluşturacağı yanal yükler sonucu esnemeyecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir.



Şekil 2.7. Kalıp tutucusu

2.2.5. EKAP sistemi

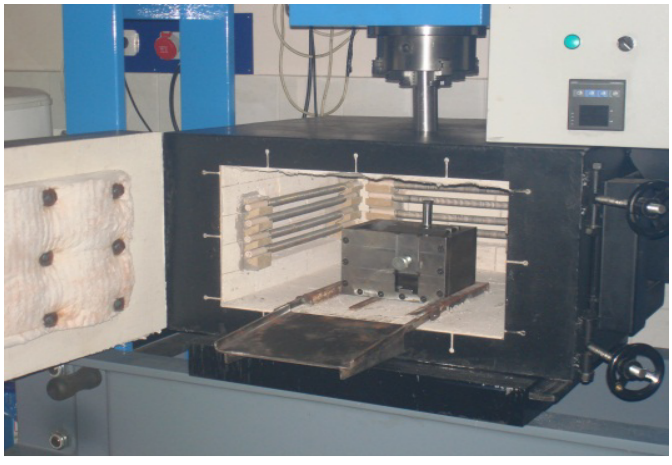
EKAP sistemi, üç temel üniteden oluşmaktadır. Bu üniteler; hidrolik pres, ısıl işlem fırını ile EKAP kalıbı ve kalıp tutucusundan oluşmaktadır.

Deneysel çalışmalarda Şekil 2.8’ de resmi verilen 120 tonluk Hidroliksan marka hidrolik pres kullanılmıştır. Hidrolik pres silindirinin hareketli ucuna (Rod) iticinin kalıp düzlemine dik hareketini ve merkezlemesini sağlamak için dört ayaklı bir ayna bağlanmıştır. İşlemler sırasında itici hızının ayarlanması amacıyla basınç ve hız kontrol valfleri sisteme ilave olarak eklenmiştir. Çalışmalar süresince ısıl işlem fırınının ve EKAP kalıbı/tutucusu’ nun düz bir zeminde muhafaza edilebilmesini sağlamak amacıyla hidrolik presin üzerine 1000 mm x 1000 mm x 70 mm ebatlarında bir plaka yerleştirilmiştir.



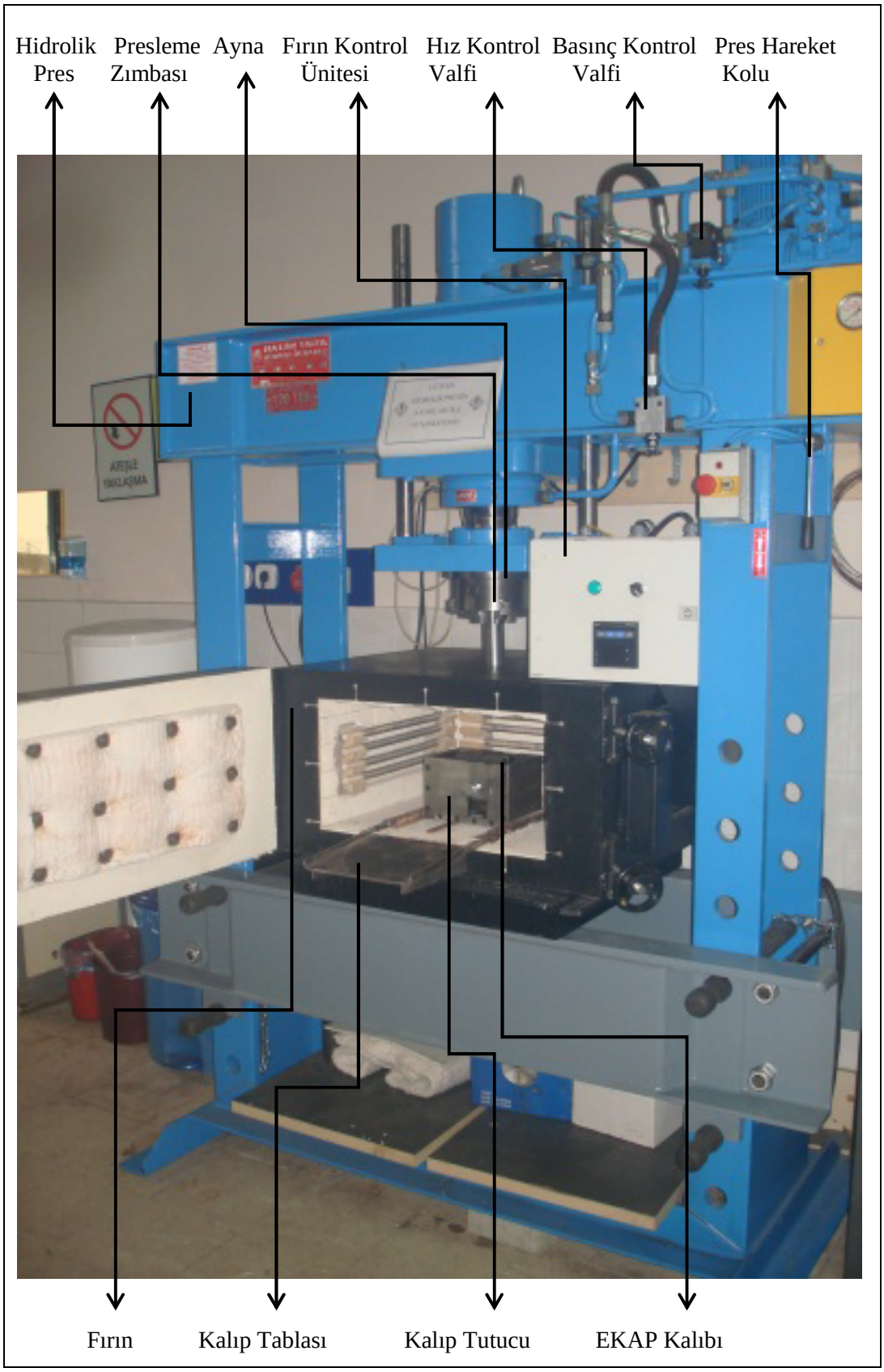
Şekil 2.8. Hidrolik pres

EKAP işleminin istenilen sıcaklıkta yapılabilmesi için hidrolik presin üzerine uygun boyutta 500 ^{o}C sıcaklık kapasitesinde ve sıcaklık kontrollü ısıl işlem fırınının tasarımı ve imalatı yapılmıştır. EKAP işlemi sırasında iticinin fırın içerisinde hareket edebilmesi için, fırın üst düzlemine zımba çapına uygun delik açılmıştır. İşlem sonrasında EKAP kalıbın fırından dışarı alınabilmesini kolaylaştırmak amacı ile fırına bağlanabilen portatif bir tabla düzeneği yapılmıştır. Şekil 2.9' da hidrolik presin üzerine montajı yapılmış ısıl işlem fırını ve portatif tabla düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.9. Isıl işlem fırını ve portatif tabla düzeneği

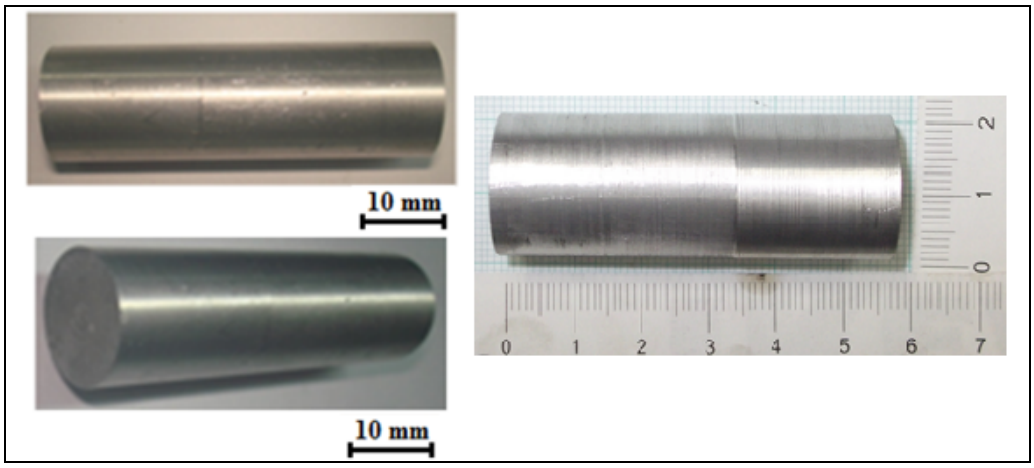
EKAP çalışmalarının yapıldığı sistemin resmi Şekil 2.10’ da verilmiştir. Çalışılan sistem üzerinde yukarıda açıklandığı gibi temel ekipmanların yanısıra yardımcı araç ve gereçlerde kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sırasında fırın içerisindeki ortam sıcaklığı haricinde, kalıp sıcaklığının ölçümleri amacıyla “K” tipi termokuple kullanılmıştır. EKAP işlemi pasolar arası geçişlerde yağlayıcı olarak MoS_2 kullanılmıştır.



Şekil 2.10. EKAP çalışmalarında kullanılan deney düzeneği

2.2.6. EKAP numunelerinin hazırlanması

Deneysel çalışmalarda 55 mm uzunluğunda ve 20 mm çapında numuneler kullanılmıştır. Döküm işlemlerinden sonra 480 ^{o}C da 2 saat homojenleştirilen AA7075 alaşımı, Kocaeli Üniversitesi Temel İmalat İşlemleri Atölyesinde, belirlenen ölçülerde talaşlı imalat yöntemiyle hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan malzemelere ait görüntüler Şekil 2.11' de verilmiştir.



Şekil 2.11. EKAP işleminde kullanılan başlangıç numunesi

2.3. EKAP İşlemleri

Şekil 2.10' da görülen sistem ile numunelere aşırı plastik deformasyon işlemi uygulanmıştır. Çalışma kapsamında tasarlanan ve imal edilen kalıbın yapısı, silindirik numunelerin kalıp dışına çıkarılmaksızın "C" rotasında işlemin gerçekleştirilmesini sağlamıştır. EKAP işlemlerinde, 210 ^{o}C kalıp sıcaklığında, sırasıyla 1 paso, 2 paso, 3 paso ve 4 paso yapılmıştır. EKAP işlemlerinde presleme hızı 1.5 mm/sn. olarak belirlenmiştir. Presleme hızının, tane boyutuna etkileri konusunda yapılmış önceki çalışmalarda, herhangi bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Bununla birlikte çalışmalar incelendiğinde presleme hızlarının 1-20 mm.s.$^{-1}$ arasında değişmekte olduğu incelenmiştir (Bölüm 1.1.2.3). Hidrolik pres üzerinde yer alan tablanın ortasında 60 mm çapında işlenmiş delik aracılığı ile çeşitli paso sayılarında EKAP ile şekillendirilen numuneler, EKAP kalıbından son pasolarında kalıp dışına alt kısımdan preslenerek alınabilmektedir. Bu sayede işlem hızı ve süresi de azaltılmış olmaktadır.

2.4. Yarı Katı İşlem

YKİ ünitesi; hidrolik pres, fırın, yarı-katı işlem kalıbı, kalıp ısıtıcısı ve tutucusu olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. YKİ çalışmalarında Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümünde bulunan YKİ ünitesi kullanılmıştır. Çalışmalarda kullanılan yarı katı işlem ünitesinin görüntüsü Şekil 2.12' de verilmiştir.

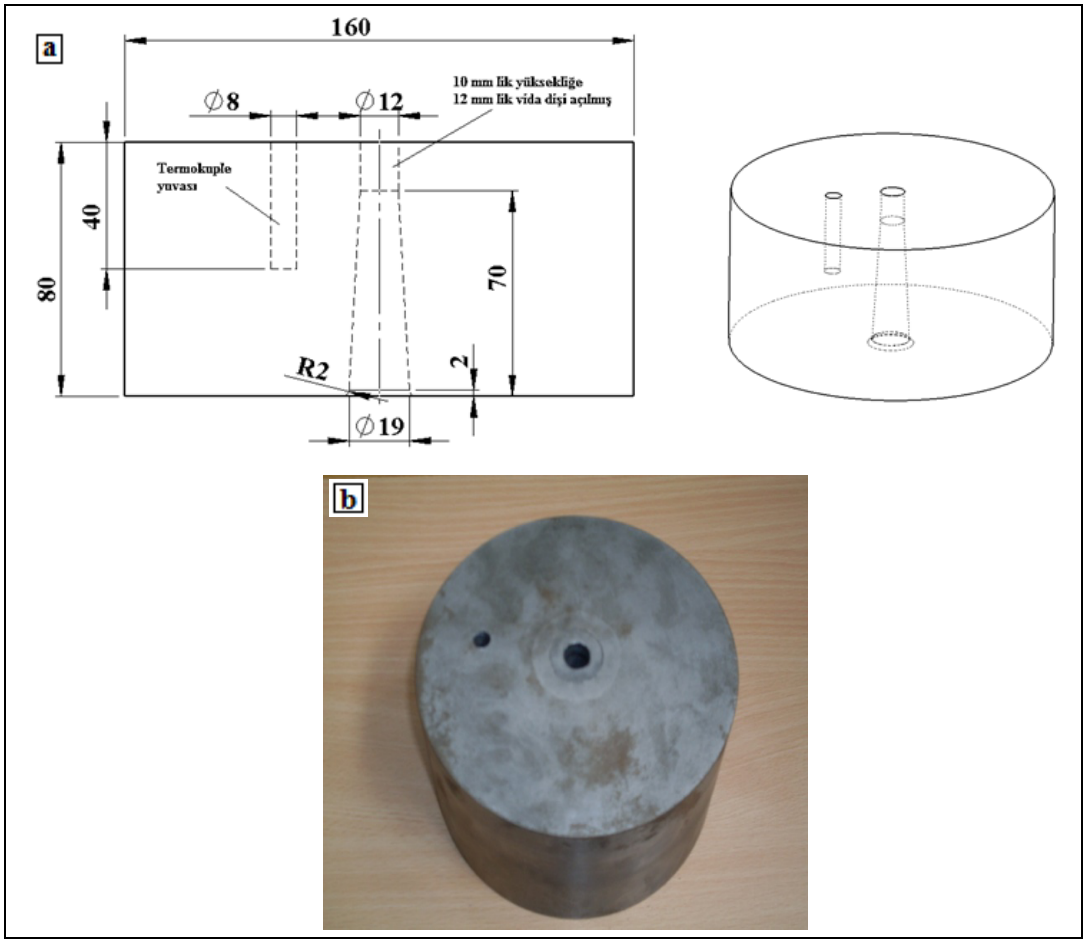


Şekil 2.12. Yarı-katı işlem ünitesi

YKİ çalışmalarında 600 mm x 500 mm x 1850 mm ölçülerinde, 40 ton kapasiteli hidrolik pres kullanılmıştır. YKİ ünitesinde deney numunesi, hız ayarlı itici ile 5 mm/sn ilerleme hızında yukarıya doğru çıkarılarak fırın içerisinde 615 ^{o}C' de 20 dak. bekletilmiş ve YKİ için uygun sıcaklığa gelmesi sağlanmıştır. Ardından numune YKİ ünitesinin üst noktasında bulunan kalıbın içerisine 2 mm/sn. ilerleme hızında çıkarılarak 400 ^{o}C' de 1 dak. presleme işlemi uygulanmıştır. Presleme işlemi biten numune kalıp tutucusuna bağlı pimin döndürülmesi ile kalıptan çıkarılmıştır.

Deney numunesi presin alt kısmında bulunan kalıba 120 kN presleme basıncında preslenmektedir. YKİ sırasında numunelerin kalıp içerisinde sıkıştırılabilmesini

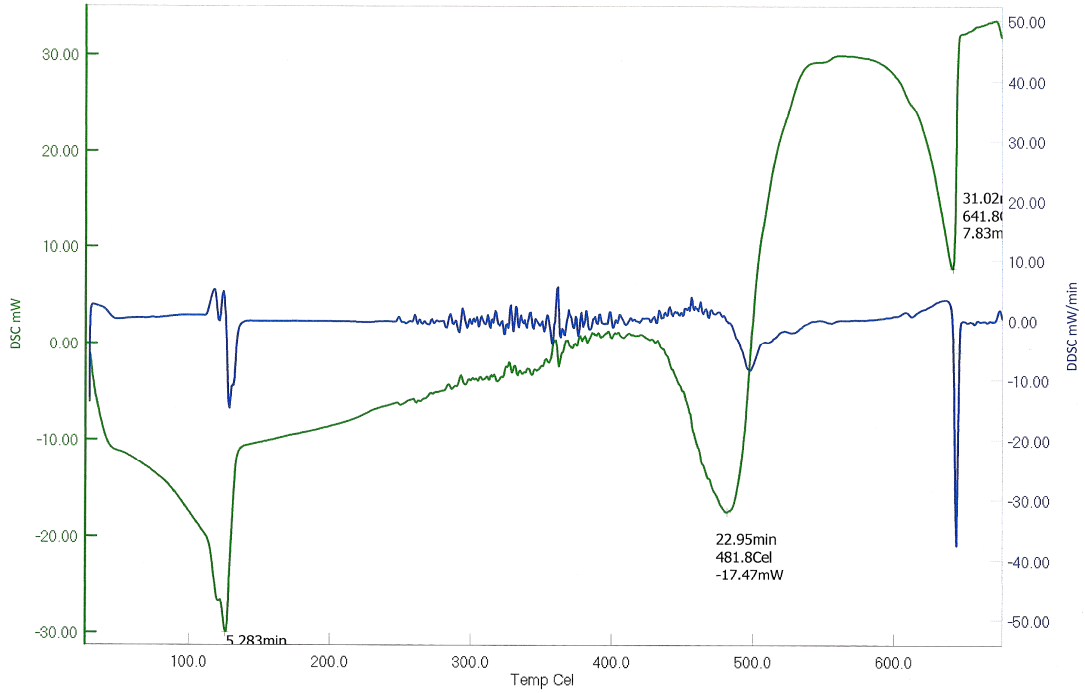
sağlamak amacı ile hareketini sağlayan 100 mm çapında ve 1000 mm uzunluğunda piston bulunmaktadır. YKİ fırını içerisinde yarı-katı sıcaklık bölgesinde ısıtılan numuneler GGG40 (Küresel grafitli dökmedemir) kalıp içerisine preslenmek sureti ile işlem uygulanmıştır. Kalıp, EKAP işleminin ardından elde edilen numunelerin işlemine uygun ölçülerde tasarlanmıştır. Kullanılan kalıp 160 mm çapında ve 80 mm yüksekliğinde olup kalıp merkezinde numunelerin sıkıştırılacağı 12 x 19 x 70 mm ölçülerinde silindirik koni şeklinde kalıp boşluğu oluşturulmuştur. İşlem sonrasında numunenin kalıp boşluğu içerisinden kolaylıkla çıkarabilmesi amacıyla kalıp üzerinden 12 mm çapında boydan boya delik açılmıştır. Numunenin üst kısmından 10 mm aşağı da duracak şekilde bu deliğe pim konulmuştur. Kalıbın YKİ sırasında sıcaklık kontrolünü sağlayabilmek amacıyla numune deliği ile kalıp arasındaki orta bir noktaya 6 mm çapında bir termokuple kanalı açılmıştır. Şekil 2.13' de küresel grafitli dökme demir kalıbın şematik görüntüsü ve resmi verilmiştir.



Şekil 2.13. YKİ kalıbın şematik görüntüsü (a), kullanılan kalıp (b)

Küresel mikroyapı özelliklerinde numunelerin üretilebilmesi için, YKİ çalışmalarında fırın sıcaklığı ile kalıp sıcaklığı arasındaki ısı kontrolleri hassas yapılması gerekmektedir. Bu nedenle YKİ sisteminin en üst kısmında bulunan kalıp tutucusu, 340 x 340 x 110 mm ebatlarında DDL20 malzemesinden yapılmıştır. Kalıp tutucu içerisinde YKİ kalıbı ile ısıtma sistemini de bulundurmaktadır. Kalıp tutucusunun iç kısmına yerleştirilmiş kalıp ısıtma sistemi ve GGG40 kalıbın sabitlenmesini ardından ısı yalıtımının sağlanması için taş yünü kullanılmıştır. Kalıp tutucu, presin üst kısmında bulunan plakaya sabitlenmiştir.

YKİ' lerin gerçekleştirilebilmesi için, AA7075 malzemesine ait sıcaklığa bağlı yarı-katı işlem aralıkları, Tübitak Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü' nde yapılan DSC analizi ile elde edilmiştir. DSC analizine ait veriler Şekil 2.14' de verilmiştir.



Şekil 2.14. AA7075 DSC analizi

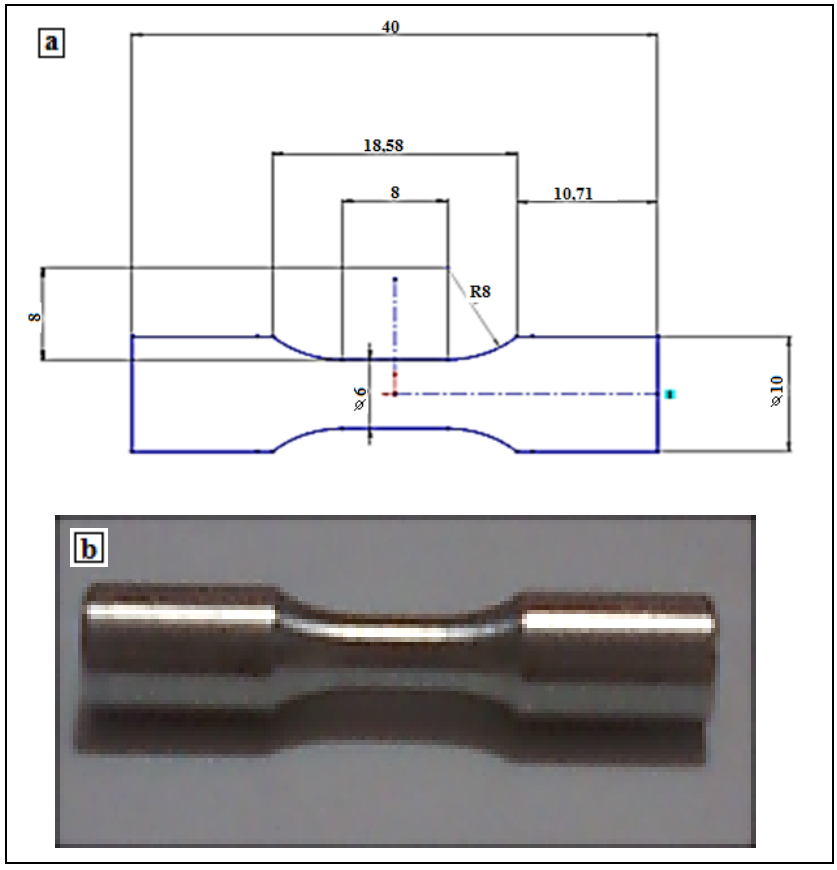
2.5. EKAP + YKİ

Döküm işlemi yapılan AA7075 alaşımının sırasıyla 1 – 2 – 3 ve 4 pasoda EKAP işlemi yapılmıştır. EKAP işleminin ardından elde edilen numuneler (Bölüm 2.2), YKİ aşamasında kullanılabilmesi amacıyla Kocaeli Üniversitesi Makine Eğitimi Bölümü Talaşlı imalat atelyesinde 15 mm çapında numuneler olucak şekilde torna

tezgahında işlenmiştir. Numunelerin boylarında kısaltma yapılmamış olup, yalnızca alın tornalama ile yüzeylerindeki çapaklar alınmıştır. YKİ uygulaması için Bölüm 2.3' te tanımlanan kalıp ölçülerine getirilen numuneler daha sonra YKİ' e tabi tutulmuşlardır. EKAP yapılmış numunelerin YKİ sırasında kalıptan kolaylıkla çıkarılabilmelerini sağlayabilmek amacıyla EKAP sisteminde olduğu gibi yağlayıcı olarak MoS_2 kullanılmıştır.

2.6. Yorulma Numunelerinin Hazırlanması

Döküm, YKİ, çeşitli paso sayılarında EKAP ve EKAP + YKİ sonucu elde edilen AA7075 alaşımı numuneler ASTM E606/E606-12 standartlarına uygun ölçülerde işlenerek yorulma numuneleri şekline getirilmiştir. ASTM standardında herbir grup için 4 adet ve toplamda ise 120 adet yorulma numunesi Şekil 2.15' te verilen boyutlarda hazırlanmıştır.



Şekil 2.15. ASTM E606/E606-12 standardına uygun olarak hazırlanmış yorulma numunesi; ölçüleri (a), üretilmiş resmi (b)

2.7. Karakterizasyon Çalışmaları

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen numunelerin mikroyapı karakterizasyon çalışmalarında, optik mikroskop incelemeleri ve görüntü analiz sistemi, tane boyutu ölçümleri, tarama elektron mikroskobu (SEM-EDS) ve geçirimli elektron mikroskobu (TEM) incelemeleri yapılmıştır.

2.7.1. Metalografik numunelerin hazırlanması ve mikroyapı incelemeleri

2.7.1.1. Metalografik numunelerin hazırlanması

Mikroyapı incelemelerinde standart metalografik işlemler (180 – 240 – 320 – 400 – 600 – 800 – 1000 – 1200 SiC zımpara ile hazırlanan numuneler 1µm elmas pasta ile parlatma) kullanılmıştır. Parlatılan numunelerin yüzeyleri su ile yıkandıktan sonra alkol ile temizlenmiş ve kurutulmuştur. Hazırlanan numuneler Keller reaktifi ile (2ml HF, 3ml HCl, 20ml HNO_3, 175 ml H_2O) 30 s. süre ile dağlanmıştır. Metalografik numunelerin hazırlanması, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümünde, PRESI marka MECAPOL P262 zımpara ve polisaj cihazı kullanılarak yapılmıştır. Metalografik numunelerin hazırlandığı polisaj cihazı Şekil 2.16’ da verilmiştir.



Şekil 2.16. Zımpara ve polisaj cihazı

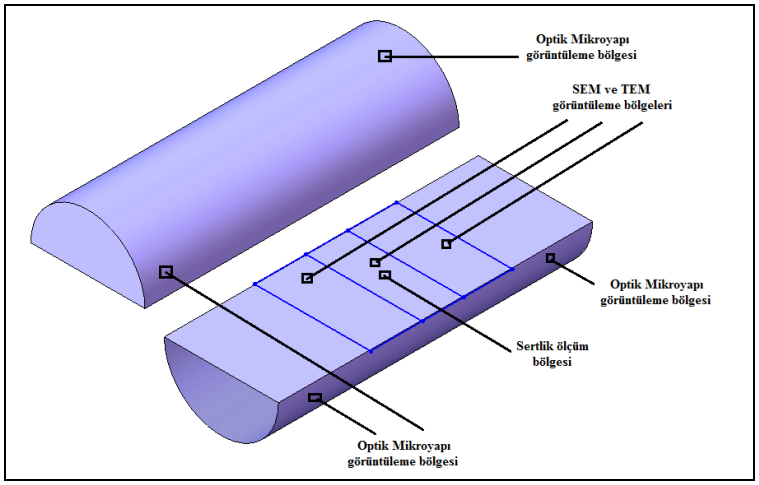
2.7.1.2. Optik mikroskop incelemeleri

Farklı yöntemlerle üretilen numuneler (Döküm, EKAP, YKİ ve EKAP + YKİ) metalografik numune hazırlama işlemlerinden sonra optik mikroskop incelemeleri yapılmıştır. Mikroyapı görüntüleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümünde bulunan ve Şekil 2.17' de resmi verilen MEIJI marka optik mikroskobu kullanılmıştır. Elde edilen mikroyapı görüntüleri MSQ PLUS 6.5 görüntü analiz programında incelenmiştir.



Şekil 2.17. Optik mikroskop ve görüntü analizi

Metalografik olarak hazırlanan numunelerin karakterizasyon çalışmalarında incelemelerin yapıldığı bölgeler Şekil 2.18' de verilmiştir.



Şekil 2.18. Karakterizasyon çalışmalarında incelemelerin yapıldığı bölgelerin şematik resmi

2.7.1.3. Tane boyut ölçümleri

Alınan farklı büyütmedeki görüntüler sonrasında tane boyut ölçümleri yapılmıştır. Tane boyut ölçümleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümünde bulunan ASTM E112 standardına uygun MSQ PLUS 6.5 görüntü analiz sistemi kullanılarak yapılmıştır.

2.7.2. SEM – EDS incelemeleri

AA 7075 alaşımı için; Döküm, EKAP, Yarı katı işlem ve EKAP + Yarı katı işlem gibi çeşitli işlemlerden sonra numuneler tarama elektron mikroskobu ve enerji dağılım spektroskopisi incelemelerine tabi tutulmuştur. SEM ve EDS incelemeleri için Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan ve Şekil 2.19' te resmi verilen JEOL JSM-6060LV marka tarama elektron mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 2.19. SEM ve EDS cihazı ile görüntü analizi

2.7.3. TEM incelemeleri

EKAP, YKİ ve EKAP + YKİ gibi çeşitli işlemlerden sonra numunelerin TEM incelemeleri yapılmıştır. Kesitten numune hazırlama tekniği kullanılarak en hassas şekilde görüntü elde edilmesi sağlanmıştır. TEM çalışmaları; alüminyum alaşım numuneler üzerinde, kristal yapısı ve morfolojisi üzerinde EKAP, YKİ ve EKAP + YKİ ve paso sayılarının etkisini ortaya çıkarmak için yapılmıştır. Numuneler, Struers Minitom marka düşük devirli elmas testere cihazı kullanılarak kesilmiştir. Kesilen numuneler, ~ 150 μm altında taşlanarak ince folyo haline getirilmiş ve 3 mm çapında

ortasına delik açılmıştır. Delik açıldıktan sonra -25 ^{o}C sıcaklıkta ve 20-25 V uygulanarak, % 20 nitrik asit + % 80 methanol elektrolit çözeltisi hazırlanmış Struers-Tenupol-5 Double jet Electropolisher cihazı ile elektroparlatma işlemine tabi tutulmuştur. Tane yapılarının daha açık olarak görülebilmesi için numunelerin bir kısmı (EKAP 2 pasoya tabi tutulmuş olanlar) Gatan 691 Precision Ion Polishing System (PIPS) kullanılarak hazırlanmıştır. PIPS için öncelikli olarak 3 mm disk haline getirilen numunelerin tüm yüzeyi 60 µm ve sonra merkezi ~10 µm' un altında Gatan 656 Dimple Grinder kullanılarak inceltilmiştir. Numuneler, ilk olarak 4 kV gerilim uygulanarak saydam alan oluşturulmuş ve ardından 2 kV gerilime tabi tutularak TEM analizine uygun hale getirilmiştir.

TEM incelemeleri için TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsünde bulunan Şekil 2.20' de resmi verilen JEOL JEM - Transmission Electron Microscope 2100LaB6 filament marka yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılmıştır. Oxford EDS sistemi kullanılarak 200 kV' da işlem yapılmıştır. Görüntüler, Gatan Model 694 Slow Scan CCD dijital kamera kullanılarak alınmıştır.

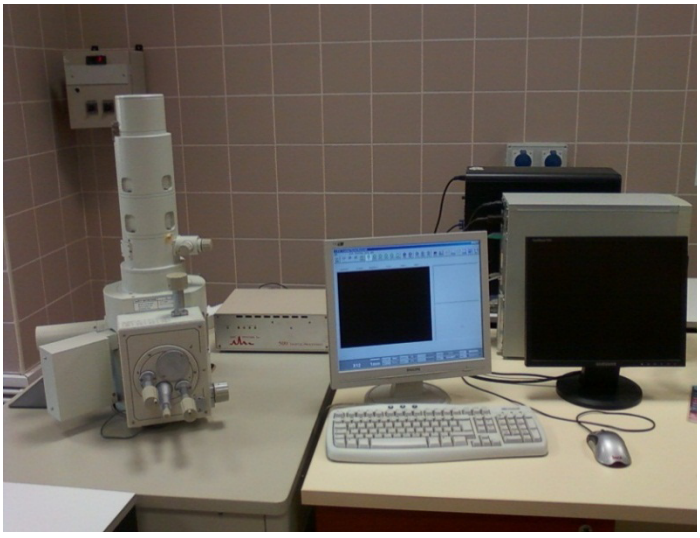
JEOL yan giriş çift tenteli bir tutucu kullanılmıştır. Aydınlık alan (BF) ve Seçili Alan Elektron Kırınımı (SAED) teknikleri, mikroyapıları incelemek için kullanılmıştır. Dijital görüntüler için Gatan Dijital Mikrografik yazılımı kullanılmıştır.



Şekil 2.20. TEM cihazı ile görüntü analizi

2.7.4. Kırık yüzey SEM incelemeleri

Dört nokta eğilmeli yorulma test cihazı kullanılarak AA 7075 alaşımı için; Döküm, EKAP, YKİ ve EKAP + YKİ gibi işlemlerden sonra yorulma testleri yapılmıştır. Testler sonucunda yorulma numunelerinde oluşan kırık yüzey SEM incelemeleri için Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan ve Şekil 2.21' de resmi verilen JEOL JSM – 6060 marka tarama elektron mikroskobu kullanılmıştır.



Şekil 2.21. SEM cihazı ile kırık yüzey inceleme

2.8. Mekanik Testler

2.8.1. Sertlik ölçümleri

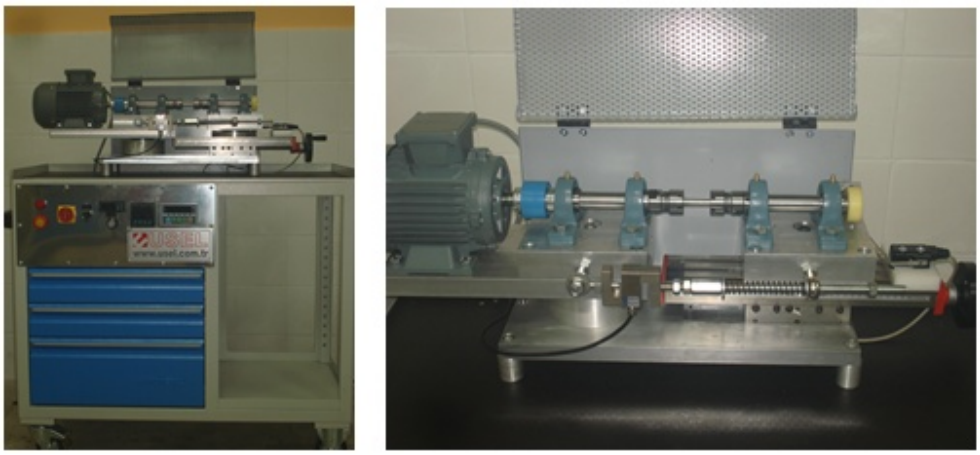
Lod 607 refrakter malzeme kullanılarak kalıplanmış ve dökümü yapılmış, EKAP işleminden geçirilmiş, Yarı katı ve EKAP + Yarı katı işlemlerinden geçirilmiş AA7075 numunelerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik Ölçümleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümünde bulunan AFFRI marka VRSD 251 üniversal sertlik cihazı kullanılarak yapılmıştır. Sertlik ölçümleri 2 kg yük kullanılarak (HV2) yapılmıştır. Her bir numune için 5 farklı noktadan sertlik ölçümü, numunelerin merkezinden kenarlarına doğru eşit aralıklarla alınmış ve ortalamaları belirlenmiştir. Çalışmalarda kullanılan sertlik cihazı Şekil 2.22' de görülmektedir.



Şekil 2.22. Sertlik ölçüm cihazı

2.8.2. Yorulma testleri

EKAP ve yarı-katı işlem çalışmaları sonucunda elde edilen numuneler Şekil 2.23' de görülen dört nokta eğilmeli yorulma cihazında test edilmiştir. Yorulma testleri için Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümünde bulunan ve doktora çalışması kapsamında temin edilen Usel marka, yüksek çevrimli yorulma test cihazı standardına (ASTM E 466) uygun dört nokta eğilmeli yorulma test cihazı kullanılmıştır. Yeni ve gelişmiş bir tasarıma sahip olan yorulma test cihazı, uygulanan yük, numune boyutu ve dönme hızı açısından geniş bir yelpazeye sahiptir. Bu yönü ile mevcut test cihazlarına göre büyük avantajlar sergilemektedir. Tüm sistem, vektör kontrollü bir inverter, yük hücresi ve denetleyici ile kontrol edilebilmektedir



Şekil 2.23. Dört nokta eğilmeli yorulma test cihazı

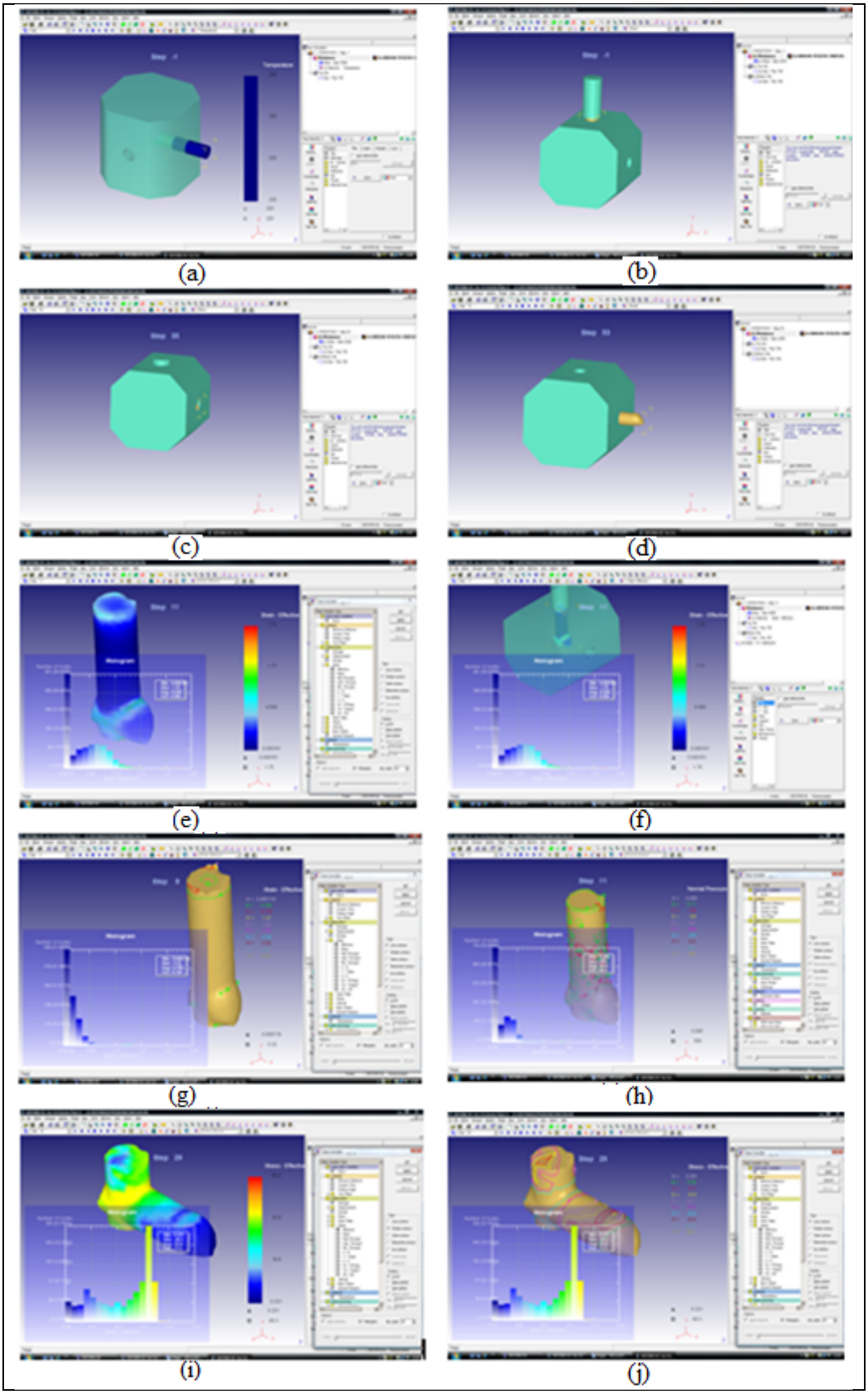
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

EKAP ve YKİ ile belirlenen parametrelerde şekillendirilen AA7075 alaşımının mikroyapı ve yorulma davranışları incelenmiştir. Mikroyapısal karakterizasyon çalışmalarında optik mikroskobu ve görüntü analiz sistemi, tarama elektron mikroskobu, geçirimli elektron mikroskobu, sertlik ölçümleri ve kırık yüzey incelemeleri yapılmıştır. Dört farklı grupta üretilen numunelerin, yorulma dayanımları dört nokta eğilmeli yorulma cihazında test edilmiştir. Uygulanan şekillendirme tekniklerinin alaşımın mikroyapı ve yorulma davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır.

3.1. EKAP İşlemi ile Üretilen Numuneler

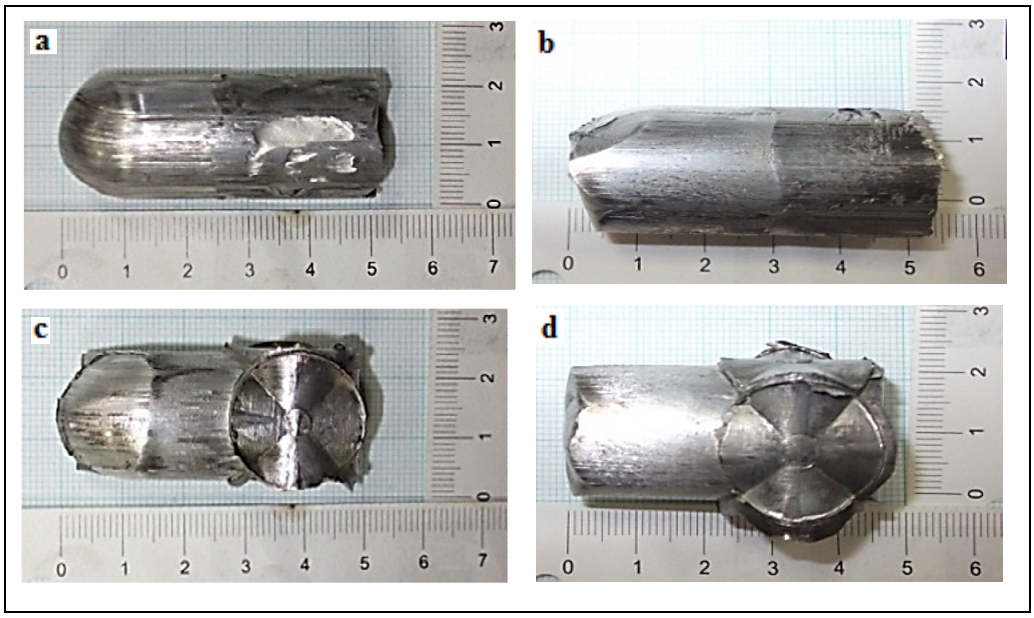
EKAP sırasında; deformasyon rotası, kalıp açıları, paso sayısı, sıcaklık ve sürtünme gibi çeşitli parametreler işlemi etkilemektedir. Ancak tüm bu parametreler, EKAP kalıbına bağlıdır. Bu nedenle EKAP işleminde kullanılacak olan kalıbın malzemesinin yanısıra tasarımının da üretilecek numune şekline uygun olarak hassas biçimde yapılması gerekmektedir. Kalıp yapımında kullanılan malzeme, kalıp imalat süresi ve harcanan enerji göz önüne alındığında tasarımın önemi ön plana çıkmaktadır. Yapılan tez çalışmasında, kalıp imalatı yapılmadan önce sonlu elemanlar yöntemlerinden Deform 3D programı kullanılarak öncelikle kalıbın tasarımı yapılmıştır. Daha sonra üretilmesi planlanan numune boyutlarına uygun olarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Çalışma sonuçları, elde edilmesi planlanan numune için gerekli olan sonuçları vermiştir. Yapılan teorik çalışmalar, deneysel çalışmada kullanılacak olan kalıbın uygunluğu hakkında bir yol gösterici olmuştur. Şekil 3.1’ de Deform 3D programı kullanılarak tasarımı yapılmış EKAP kalıbının analiz görüntüleri verilmiştir. Simülasyon görüntülerinde de görüldüğü gibi, EKAP kalıbı ve numune görüntüleri ile işlem sırasında numune de meydana gelen deformasyon ve şekil değişimi görülebilmektedir. Simülasyon çalışması sonucunda EKAP kalıp malzemesi (AISI P20 Impax Supreme) ve deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme (AA7075) özellikleri ile işlem sıcaklığı, deneysel çalışmalar ile

aynı özelliklerde seçilmiştir. Şekil 3.1.(a) ve (b)' de numunenin (sarı renkli) ve kalıp piminin (mavi renkli) kalıba (yeşil renkli) yerleştirilmiş hali görülmektedir. Şekil 3.1.(c) ve (d)' de ise kalıp pimlerine itici kuvvet oluşturularak numunenin kalıp içerisinde ilerlemesi gösterilmiştir. Şekil 3.1.(d)' de deney numunesinin, EKAP ile şekillendirme işleminin ardından elde edilen şekli verilmiştir. Şekil 3.1.(e), (f), (g), (h) ve (i)' de ise numune de oluşan deformasyon ve deformasyonun yoğun olduğu bölgeler gösterilmektedir. Deformasyon yoğunluğunun oluştuğu bölgeler için, Şekil 3.1(e), (f) ve (i)' de görüntü örneklerinin sağ taraflarında gerilmenin en yüksek olduğu (kırmızı renkten), en düşük olduğu (mavi renk) bir sütun grafik verilmiştir. Verilen bu grafik ile EKAP ile numunelerin üretilmesi ve EKAP kalıbının kullanımı sırasında, deney numunesinin hangi kısımlarında ne tür bir zorlanma oluşabileceği ve kalıpta meydana gelen zorlanma şiddeti görülmüştür. Şekil 3.1.(j)' de ise deformasyon neticesinde elde edilen numune görüntüsü verilmiştir. EKAP işlemi sırasında numunede meydana gelen deformasyon, en yoğun olarak kalıp kanallarının köşe bölgelerinde olmaktadır. Bu durum işlem sırasında kullanılan yüksek presleme kuvveti nedeniyle oluşan deformasyonun, köşe bölgelerde gerilme daha yoğun olmasından kaynaklanmaktadır. Kalıp iç köşe kavislerinin artması veya azalması ile ilişkili olarak deformasyon miktarı da artma veya azalma eğilimi göstermektedir. İç köşe kavisleri küçük taneli mikroyapı oluşturulmasında önemli bir parametredir [91]. Kalıpta oluşabilecek deformasyonları ve bu deformasyonların yerlerini görebilmek amacıyla yapılmış olan bu analiz çalışması ile deneysel çalışmalarda kullanılacak EKAP kalıp tasarımı yapılmıştır. Numunelerde gerilmelerin faha fazla kalıbın köşelerinde oluştuğunun görülmesi [Şekil 3.1.(i)] sebebiyle kalıp pimleri için bir tasarım yapılarak (Şekil 2.6) iç köşe kavis açıları değiştirilmeksizin deney numunesinin kalıp içerisinde sıkışmadan çıkarılabilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.1. Deform 3D programı kullanılarak analizi yapılmış; kalıp – a, b, c, d ve numune analizi – e, f, g, h, i, j görüntüleri

Literatürdeki benzer çalışmalarda, EKAP işleminde sonlu elemanlar yöntemine göre analizler yapılmıştır [92, 93]. Bu çalışmalar da deformasyonun, özellikle sürtünmenin çok daha yoğun olduğu kalıbın dış köşe kavis açısı (ψ)' de oluştuğu belirtilmektedir. Bu sebeple açının azalması ile malzemede oluşan deformasyon oranı daha yüksek olmaktadır. EKAP kalıbı imalatından önce, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılan teorik çalışmalardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda tasarlanmıştır. Kalıp imalatının yapılmasından sonra numunelere 1 – 2 – 3 ve 4 paso yapılmıştır. Şekil 3.2' de EKAP işlemi sonrasında çeşitli paso sayılarında elde edilen numunelere ait resimler verilmiştir.



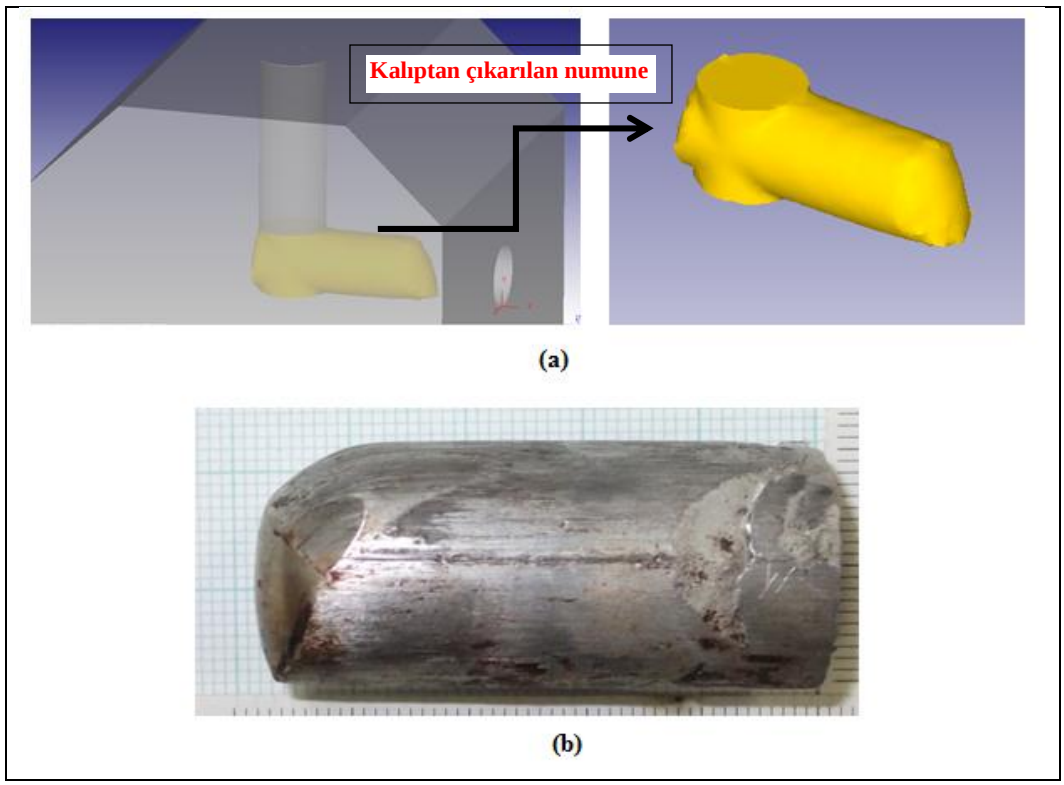
Şekil 3.2. EKAP işlemi sonrasında farklı pasolar sonucunda (EKAP 1 paso - a, EKAP 2 paso – b, EKAP 3 paso – c, EKAP 4 paso – d) üretilen numunelerin görüntüleri

EKAP sonrasında alınan numune görüntüleri incelendiğinde, 1 paso sonrasında elde edilen numunelerin tek yönlü bir deformasyona uğradığı ve boyutsal olarak değişim göstermediği, 2 paso sonrasında elde edilen numunelerin çift yönlü bir deformasyon gösterdiği görülmektedir. 3 paso ve 4 paso sonrasında elde edilen numunelerin ise paso sayısına bağlı olarak deformasyon şekillerinin de elde edilen parçaların fiziki görünüşlerinde farklılıklar oluşturduğu anlaşılmaktadır.

Yapılan çalışmada, EKAP kalıp uç kısımlarındaki eğimler nedeniyle numunelerin orta kısımlarının kalıptan daha düzgün şekilli olarak çıktığı görülmüştür. Özellikle 4.

pasodan sonra numunelerde, her yönden aynı miktarda deformasyon etkisi nedeniyle daha düzgün şekilli numuneler üretilmiştir. Ancak numuneler boyutsal açıdan incelendiğinde, artan deformasyon miktarına bağlı olarak numune boyutlarında 3-5 mm (başlangıç numunelerine göre) boyutsal bir küçülme meydana gelmiştir. Bu olayın, özellikle presleme işlemi sırasında numuneden kırılan küçük parçaların kalıp kenarlarına yapışmasından ve her paso tamamlandığında dökülen parçacıklardan kaynaklandığı bir sebep olarak söylenebilir. Bu yapışmaların bir nedeni de EKAP işlemi sırasında yetersiz MoS_2 kullanımından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar Abd El Aal tarafından yapılan bir çalışmada EKAP işlemi sonrasında elde edilen görüntülerle benzerlik göstermektedir [94].

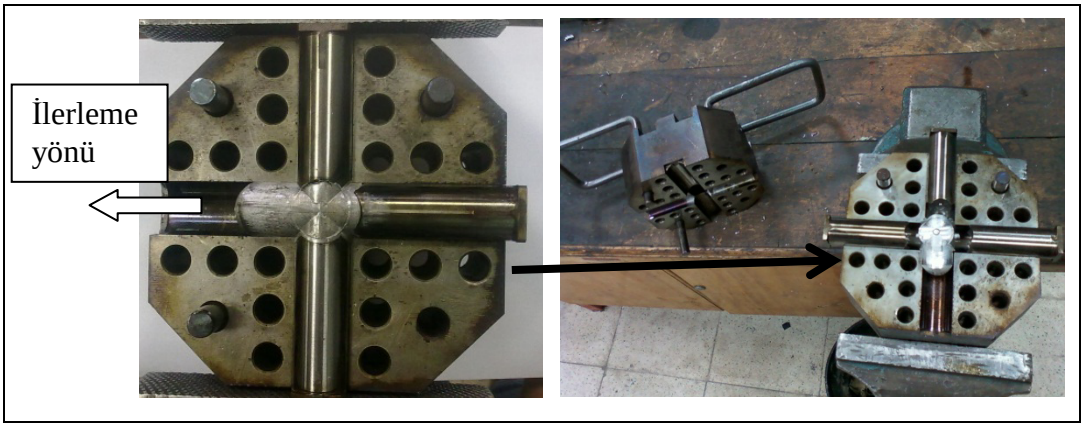
Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen numune görüntüleri ile teorik çalışmalar sonucunda elde edilen numune görüntüleri karşılaştırıldığında, sonuçların örtüştüğü görülmektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Deneysel verilerin, teorik veriler ile karşılaştırmalı resimleri; Teorik çalışma görüntüsü (a), Yapılan çalışma sonrası elde edilen numune (b)

EKAP işlemi yapılan numune, “C” rotasında ve 1 pasodan sonraki görüntüsü Şekil 3.3.b’ de verilmiştir. Numune de oluşan şekil değişimini kalıp içerisindeyken

görebilmek amacıyla iki parçalı yapılmış EKAP kalıbının açık hali Şekil 3.4’ te verilmiştir.

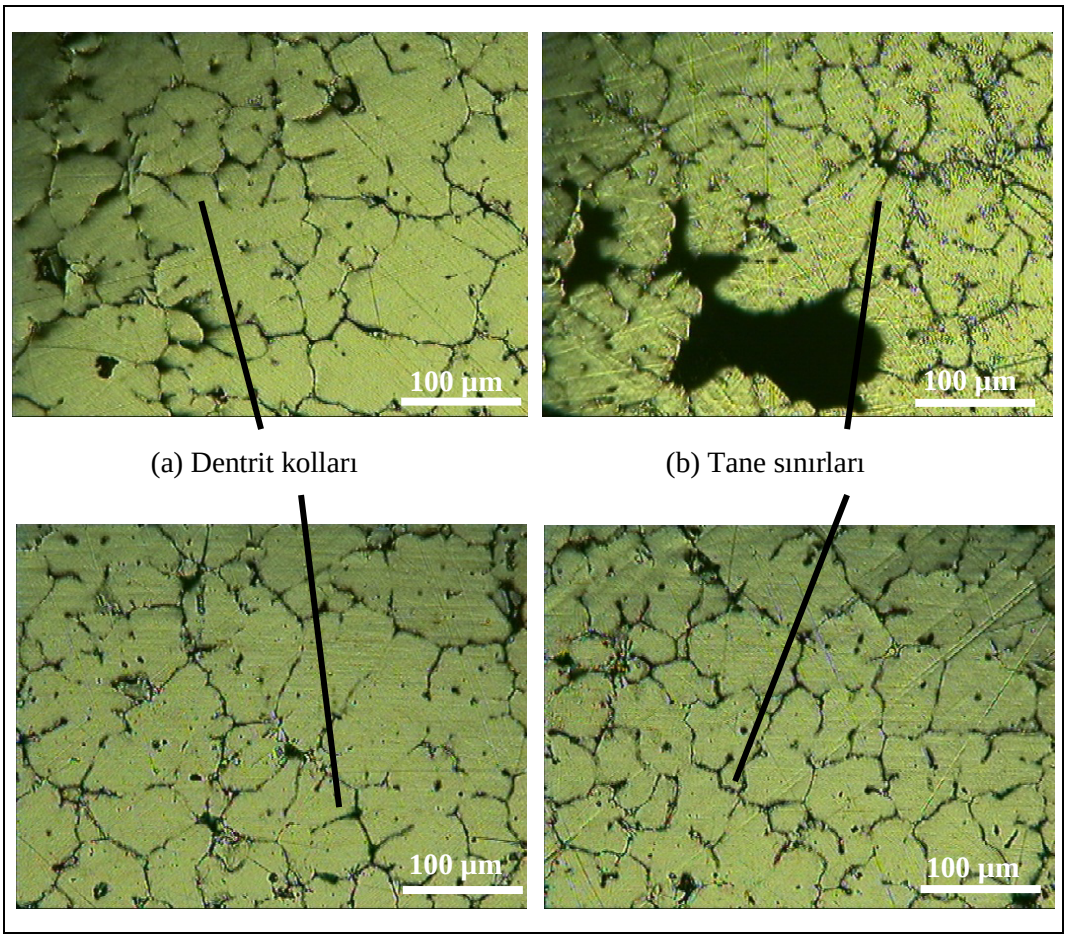


Şekil 3.4. EKAP işlemi sonrası kalıbın açılmış resmi

Şekil 3.4’ de verilen görüntülerden de anlaşılacağı gibi EKAP işleminde, amaçlanan aşırı plastik deformasyon, yeni bir tasarım olan kalıpta başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. EKAP işlemleri sırasında kalıpta ya da pimlerde herhangi bir kalıcı deformasyon oluşmadığı görülmüştür.

3.2. Geleneksel Döküm Yöntemi ile Numune Üretimi

Lod 607 seramik kalıplara dökülen AA7075 alaşımının mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Klasik döküm yöntemi ile şekillendirilen alaşımda dentritik yapının oluştuğu görülmektedir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Klasik döküm yöntemi ile ergitilen AA7075 malzemenin dentrit kolları (a), tane sınırları (b)

Mikroyapı karakterizasyonunun ilk aşamasında yapılan optik mikroskop çalışmalarında, döküm yöntemiyle üretilen numunelerin tane boyutlarının kaba tane yapısında ve dentritik tane yapılarının çok belirgin olduğu anlaşılmaktadır. Döküm metallerin katılaşmaları sırasında (katılaşma şartlarına bağlı olarak) dentritik büyüme meydana gelmektedir. Döküm alaşımlarında görülen dentritik büyüme, çekirdeklenmenin zayıf olduğu durumlarda meydana gelmektedir. Sıvı metal içerisinde ilk katı oluşmadan önce sıvı, katılaşma sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa soğur. Bu durumda, arayüzeyde oluşan küçük katı parçacıkları dentrit olarak adlandırılır. Sıvı metalin katılaşması aşamasında oluşan dentritik yapı gizli ergime ısısının dağılım (yayınım) hızına bağlı olarak birincil dentrit kolları üzerinde ikincil ve hatta üçüncül dentrit kolları da oluşabilir [95]. Optik mikroskop görüntüleri sonucunda görüntülenen mikroyapılar üzerinde MSQ PLUS 6.5 görüntü analiz programı kullanılarak tane boyutları ölçümü yapılmış ve döküm malzemelerin ortalama tane boyutu ölçülmüştür.

3.3. Yarı Katı İşlem İle Numune Üretimi

Yarı katı işlem esnasında uygun fırın ve kalıp sıcaklığının ayarlanabilmesi son derece önemlidir. Alınan DSC analizi verilerine dayanılarak (Şekil 2.14) YKİ numuneleri üretilmiştir. Şekil 2.14 den de anlaşılacağı gibi deneysel çalışmalarda kullanılan AA7075 alaşımının yarı-katı sıcaklık aralığı 481,8 – 641,8 ^{o}C aralığındadır. Bu nedenle deneysel çalışmalarda, numunelerin yarı-katı şekillendirilmesi bu sıcaklık aralığında olan 615 ^{o}C' da gerçekleştirilmiştir. YKİ' de tüm numuneler 615 ^{o}C' de 20 dakika fırın içerisinde bekletildikten sonra YKİ ünitesinin en üst noktasında bulunan kalıbın içerisine 2 mm/sn. ilerleme hızında çıkarılarak 400 ^{o}C' de 1 dak. süre ile kalıp içerisine preslenmiştir. YKİ ile şekillendirme sonrası elde edilen numune Şekil 3.6' da verilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda YKİ' de grafit kalıp ile çelik kalıplar arasındaki farklar değerlendirilmiş ve elde edilen karakterizasyon sonuçları ile en uygun küreselleşme oranının AA7075 alaşımlarında 614 ^{o}C' nin uygun olduğu belirtilmektedir [96]. YKİ çalışması kapsamında uygulanan sıcaklık değerleri literatür çalışmaları ile benzer değerleri vermektedir.



Şekil 3.6. YKİ ile şekillendirilen AA7075 numunesi

3.4. Mikroyapı İncelemeleri

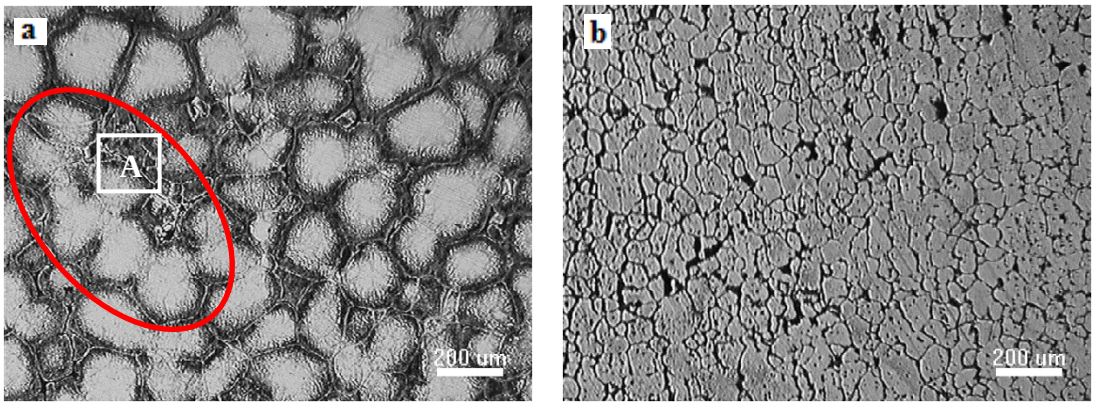
AA7075 Döküm numunelerin, farklı paso sayılarında EKAP yapılmış numunelerin, YKİ' den geçirilmiş numunelerin ve farklı paso sayılarında EKAP yapılarak YKİ' e tabi tutulmuş numunelerin mikroyapılarında oluşan değişiklikleri inceleyebilmek amacı ile hazırlanan metalografik numunelere ait resim Şekil 3.7' de verilmiştir.



Şekil 3.7. Hazırlanan metalografik numuneler

3.4.1. Optik mikroskop incelemeleri

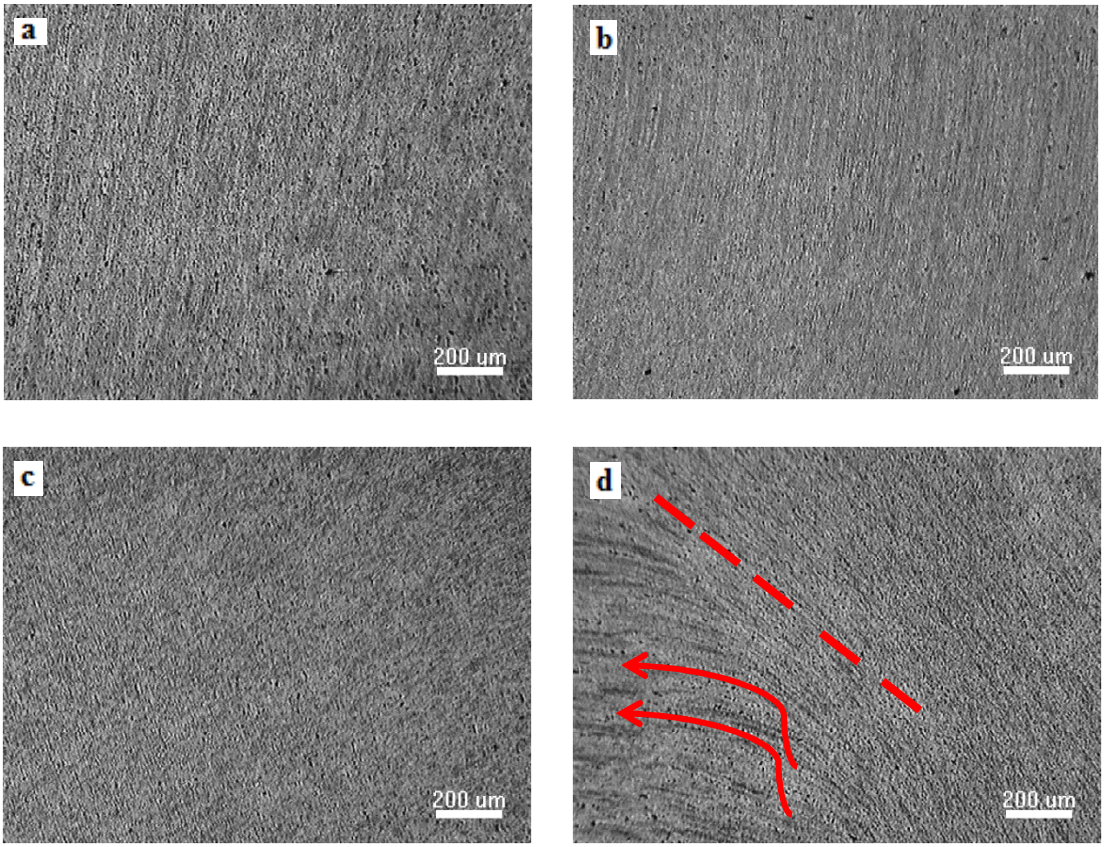
AA7075 alaşımı; Döküm, EKAP (1 paso, 2 paso, 3 paso, 4 paso), YKİ, EKAP 1 paso + YKİ, EKAP 2 paso + YKİ, EKAP 3 paso + YKİ, EKAP 4 paso + YKİ yapılmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri çekilmiştir. Döküm ve YKİ ile üretilmiş numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.8' de verilmiştir.



Şekil 3.8. AA7075 mikroyapı görüntüleri; Döküm (a), YKİ (b)

Şekil 3.8' de verilen optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, döküm mikroyapısının (a) kaba tanelerden oluştuğu ve dentritik tane yapısına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Dentritik tane yapısı mikroyapının belirli bölgelerinde (A) ikincil dentrit kolları şeklinde büyüme gösterdiği tane yapıları görülmektedir. Şekil 3.8.b' de verilen YKİ ile üretilmiş numuneye ait mikroyapı resmi incelendiğinde tane boyutlarının döküm numuneye göre çok daha ufak boyutlarda ve taneler arası mesafelerin çok kısa olduğu görülmektedir. Ayrıca YKİ tekniği ile döküm numunelerin tane yapılarının dentrit formundan, ufak taneli küresel morfolojiye dönüştüğü belirlenmiştir. AA7075 alaşımları ile ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalarda döküm işlemi ile üretilen malzemelerin mikroyapı sonuçları [97] ve

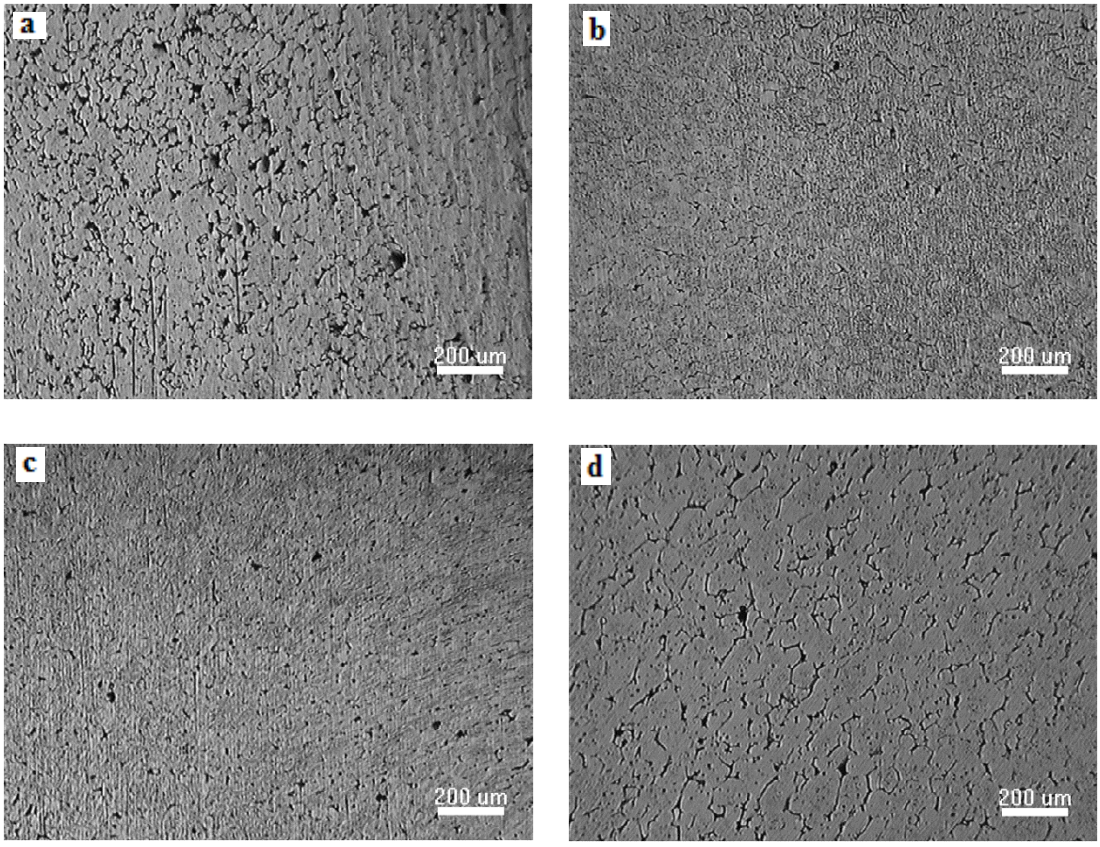
YKİ ile şekillendirilmeleri sonrasında oluşan mikroyapı görüntüleri [98] yapılan tez çalışması ile benzer sonuçları vermektedir. EKAP işlemi ile şekillendirilen AA7075 alaşımı 1-2-3 ve 4 paso sonrasında elde edilen mikroyapılara ait optik mikroskop görüntüleri ise Şekil 3.9' da verilmiştir.



Şekil 3.9. AA7075 mikroyapı görüntüleri; EKAP 1 paso (a), EKAP 2 paso (b), EKAP 3 paso (c), EKAP 4 paso (d)

EKAP 1-2-3 ve 4 paso yapılmış Şekil 3.9' da verilen numune mikroyapıları incelendiğinde tane boyutlarının Şekil 4.8' de verilen döküm ve YKİ tekniği ile üretilmiş numunelerin tane boyutlarından ufak oldukları ve yönlenmelerin olduğu görülmektedir. Özellikle EKAP 4 paso yapılmış Şekil 3.9.d' de resmi verilen deney numunesi incelendiğinde tane sınırları ayrımları ve tanelerin yönlenmesi net bir şekilde görülebilmektedir. EKAP işlemi ile ilgili A356 alaşımı üzerine yapılmış olan diğer çalışmalar incelendiğinde, şekillendirme işlemi sonunda alınan mikroyapı görüntülerinin yapılan çalışma ile benzer özellikler gösterdiği ve yönlenmelerin olduğu görülmüştür [99, 100]. AA7075 alaşımı EKAP işlemi ile şekillendirildikten sonra YKİ tekniği kullanılarak üretilmişlerdir. 1-2-3 ve 4 paso EKAP yapıldıktan

sonra + YKİ yapılan numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.10’ da verilmiştir.



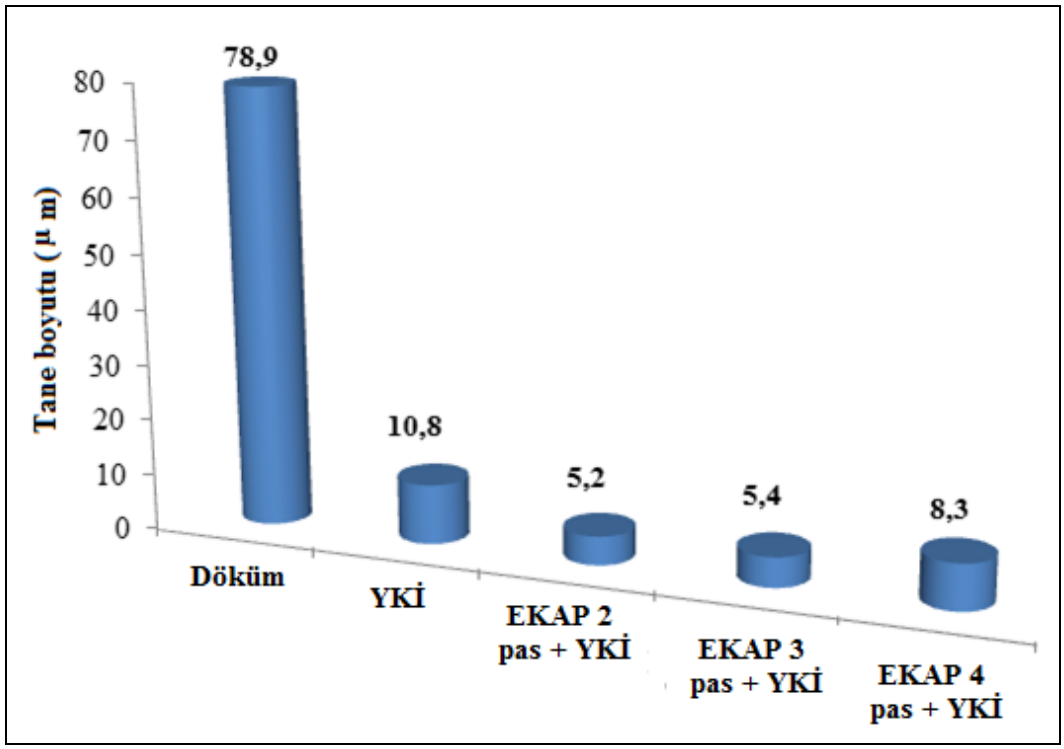
Şekil 3.10. AA7075 mikroyapı görüntüleri; EKAP 1 paso + YKİ (a), EKAP 2 paso + YKİ (b), EKAP 3 paso + YKİ (c), EKAP 4 paso + YKİ (d)

Şekil 3.10’ da verilen optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, EKAP + YKİ üretim yöntemlerinin birlikte kullanıldığı numunelerde tane yapılarının (Şekil 3.10. a, b, c, d) boyutsal olarak döküm mikroyapısına göre daha ufak, EKAP ile üretilmiş numunelere göre birmiktar daha büyük olduğu görülebilmektedir. EKAP + YKİ yapılmış numunelerdeki tane büyümesine ilaveten tane yapılarındaki küreselleşme daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır. EKAP ve YKİ ile şekillendirme yöntemlerinin birlikte kullanıldığı daha önce yapılan çalışmalarda da benzer tane boyut oranları ve tane şekilleri elde edilmiştir [98-100].

3.4.2. Tane boyut ölçüm sonuçları

Döküm, YKİ, EKAP 2 paso + YKİ, EKAP 3 paso + YKİ, EKAP 4 paso + YKİ yapılmış AA7075 alaşımların tane boyut ölçüm sonuçları Şekil 3.11’ de verilmiştir. EKAP ve YKİ gibi APD işlemlerinin uygulandığı EKAP (1-2-3 ve 4 paso) ve EKAP

1 paso + YKİ yapılmış deney numunelerinde, tane boyutlarının çok küçük olmaları sebebiyle ölçümleri yapılamamıştır. Diğer alınan tane boyut ölçüm sonuçları ile kıyaslandığında tane boyutlarının çok daha küçük olması sebebiyle optik mikroskop görüntüleri yeterli olmamış ve SEM ile taneler görülmeye çalışılmıştır. Ancak yapılan SEM çalışmaları da tanelerin yapılarının, dizilimlerinin ve boyutlarının incelenebilmesinde yetersiz kalmıştır. Bu amaçla deney çalışmalar sonucunda üretilen daha küçük tane boyutlarına sahip numuneler için, TEM incelemeleri yapılarak detaylı bilgiler alınabilmiştir.



Şekil 3.11. Döküm, YKİ, EKAP 2 paso + YKİ, EKAP 3 paso + YKİ, EKAP 4 paso + YKİ yapılmış AA7075 alaşımına ait tane boyut ölçüm grafiği

Tane boyut ölçüm sonuçları incelendiğinde, döküm mikroyapısının en büyük tane boyutuna sahip olduğu, EKAP 2 paso + YKİ ve EKAP 3 paso + YKİ mikroyapılarında en küçük tane boyutlarının elde edildiği görülmüştür. EKAP 4 paso + YKİ mikroyapısında ise; tane boyutunun EKAP 2 + YKİ ve 3 paso + YKİ yapılan alaşımlara göre arttığı görülmüştür. YKİ yapılmış alaşımların tane boyutlarının ise; EKAP + YKİ yapılmış alaşımlara göre daha büyük olduğu ancak döküm yapılmış alaşımlara göre yaklaşık %15' i oranında daha küçük olduğu sonuçlarına ulaşılmıştır.

Taneler arası boşluklar ise tane büyüklüklerine bağlı olarak yine döküm numunelerinde çok daha fazla olduğu gözlenmiştir. EKAP yapılmış numunelerde ise döküm numunelere göre çok daha küçük tane boyutlarının olduğu ve tanelerin paso sayısına göre belirli yönlere doğru dizildiği görülmüştür. Tane boyutları paso sayısının artışı ile birlikte incelme eğilimi göstermişlerdir. Özellikle 4 paso sonrasında elde edilen numunelerin tane boyutları en küçük boyutlarda olarak gözlenmiştir.

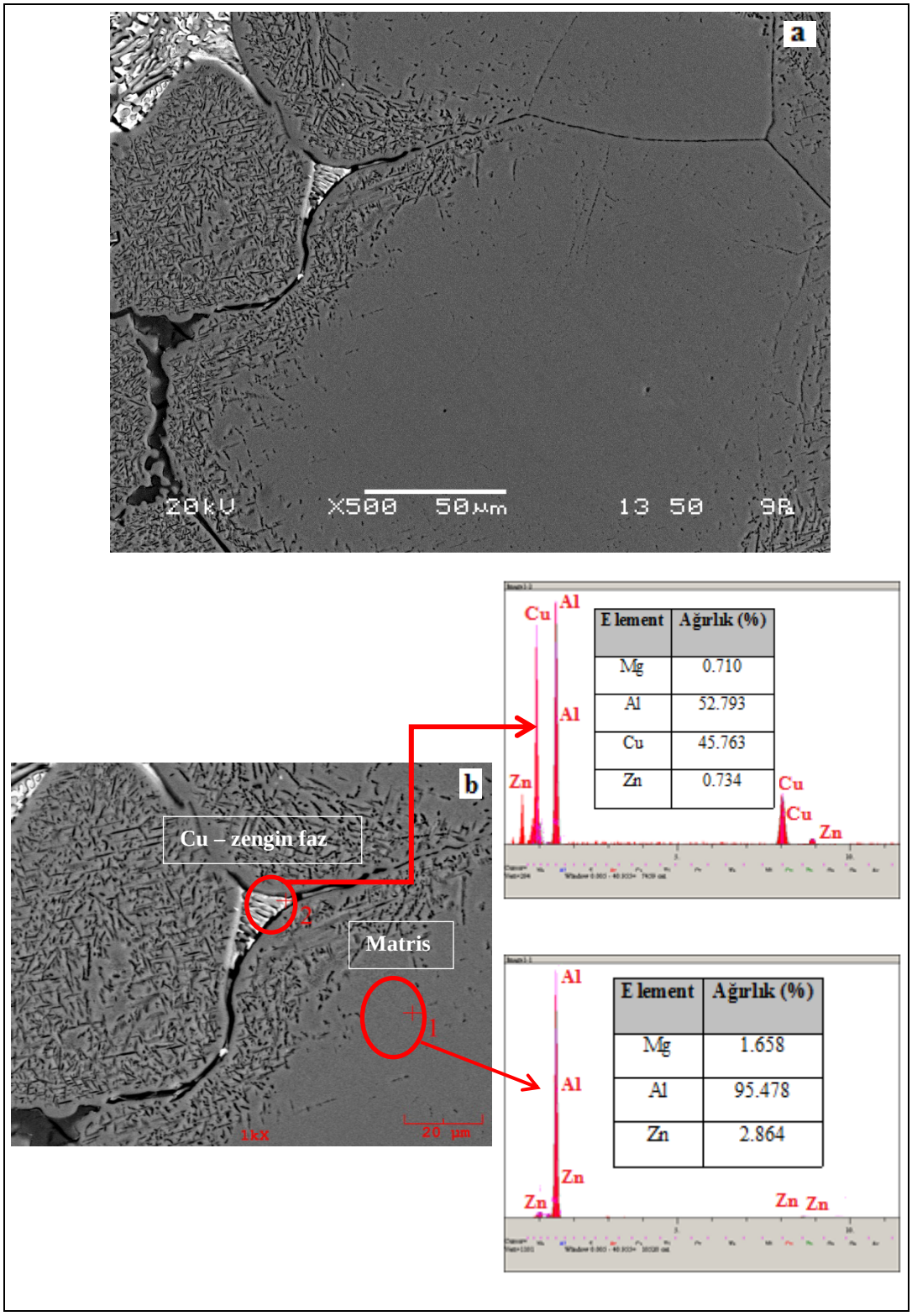
Yapılan tane boyut ölçüm sonuçlarında EKAP 1 paso + YKİ malzemesinin yalnızca EKAP yapılan malzemelerde olduğu gibi çok küçük tane yapısına sahip olması sonucunda boyut ölçümü yapılamazken, EKAP 2 paso + YKİ için; 5.2 µm, EKAP 3 paso + YKİ için; 5.4 µm, EKAP 4 paso + YKİ için; 8.3 µm, YKİ için; 10.8 µm ve döküm numune için 78.9 µm değerlerine ulaşılmıştır. Yapıda ki bu büyümenin döküm aşamasından sonra, aşırı plastik deformasyon işlemi ile küçülen tanecik yapısı; YKİ sırasında uygulanan ısıl işlem ile birlikte artış göstermiş ve tane boyutlarında artışa neden olduğu tespit edilmiştir. YKİ yapılan numunelerin ise tane boyutlarının EKAP ve EKAP + YKİ yapılan numunelere göre daha büyük oldukları, tane yapılarının ise öngörüldüğü gibi küresel biçimde oldukları görülmektedir. Horita ve arkadaşlarının [101] EKAP işlem tekniği kullanarak yapmış oldukları çalışmalarında Al alaşımlarının çeşitli paso sayılarında tane boyut ölçümlerini yapmışlardır.

Elde edilen sonuçlarda alaşımlara uygulanan EKAP paso sayılarının artışı ile birlikte tane boyutların da 1 µm – 6 µm arasında değerler elde edilmiştir [101]. EKAP + YKİ yapılan numunelerin tane boyutları için, EKAP işlemi sırasında tane boyutları küçülmekte olmasına karşın YKİ aşamasında küresel yapı morfolojisinin elde edilebilmesi için gerekli fırın ısıtması ve bekletme süresi sonucunda tane yapısı 7 µm – 11 µm arasında büyüme göstermiştir.

3.4.3. SEM-EDS sonuçları

Döküm, EKAP (1 – 2 – 3 ve 4 paso), YKİ, EKAP 1 paso + YKİ, EKAP 2 paso + YKİ, EKAP 3 paso + YKİ, EKAP 4 paso + YKİ yapılmış AA7075 alaşımına ait tarama elektron mikroskobu görüntüleri ile seçili alan mikroyapı (EDS) analizi görüntüleri alınmıştır. Şekil 3.12.a' da verilen SEM görüntüsü incelendiğinde,

döküm mikroyapısının çok belirgin büyüklükte tane yapısına sahip olduğu ve dentrit yapısı görülmektedir. Dökümlerde dentritik yapının oluşu ile ilgili açıklamalar Bölüm 3.2’ de verilmiştir. Şekil 3.12.b’ de verilen EDS analizinde AA7075 malzemesinin kimyasal analizinde karşılaşılan elementler yer almaktadır. “1” ile gösterilen bölgede (matriste) Al – Zn – Mg elementlerinin olduğu görülmektedir. “2” ile gösterilen bölgede ise (taneler arası beyaz bölge) Al – Cu – Zn – Mg elementleri görülmektedir.

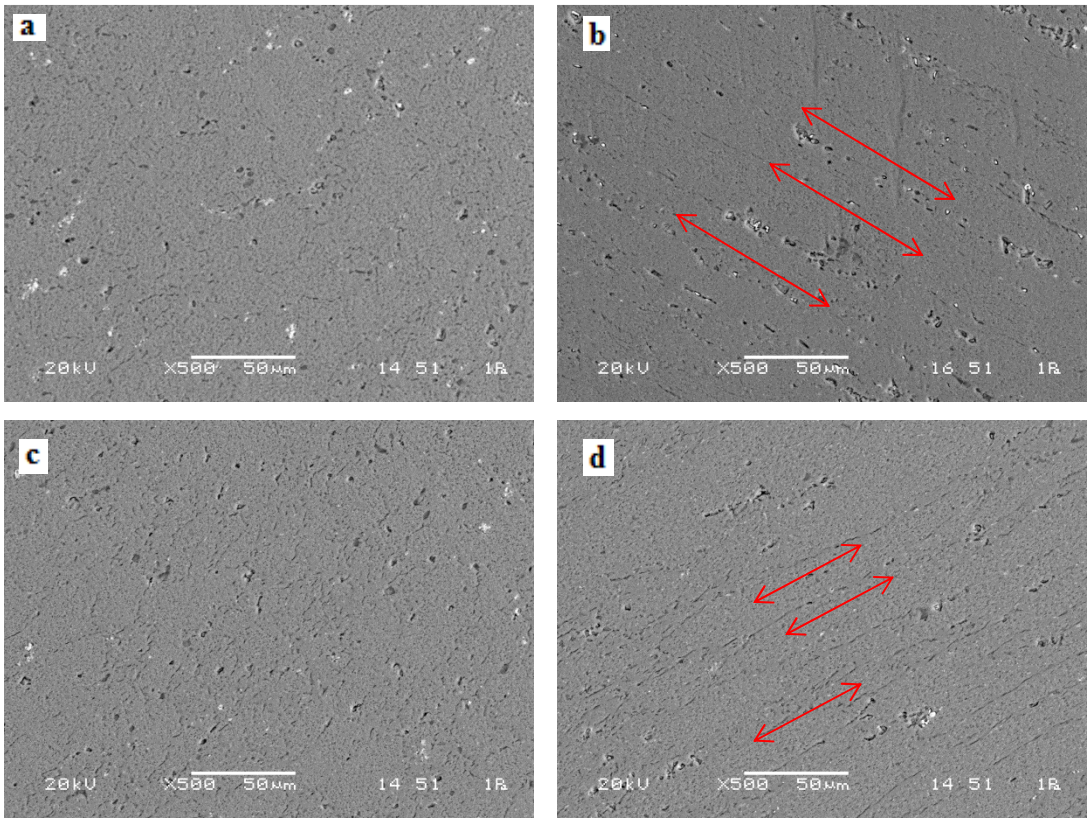


Şekil 3.12. AA7075 döküm mikroyapı SEM görüntüsü (a), EDS görüntüsü (b)

Çeşitli paso sayılarında EKAP yapılmış numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde (Şekil 3.13) paso sayılarındaki artış ile birlikte tane sınırlarının daha belirgin bir şekilde yönlenmelere sahip olduğu görülmektedir. EKAP yapılmış olan

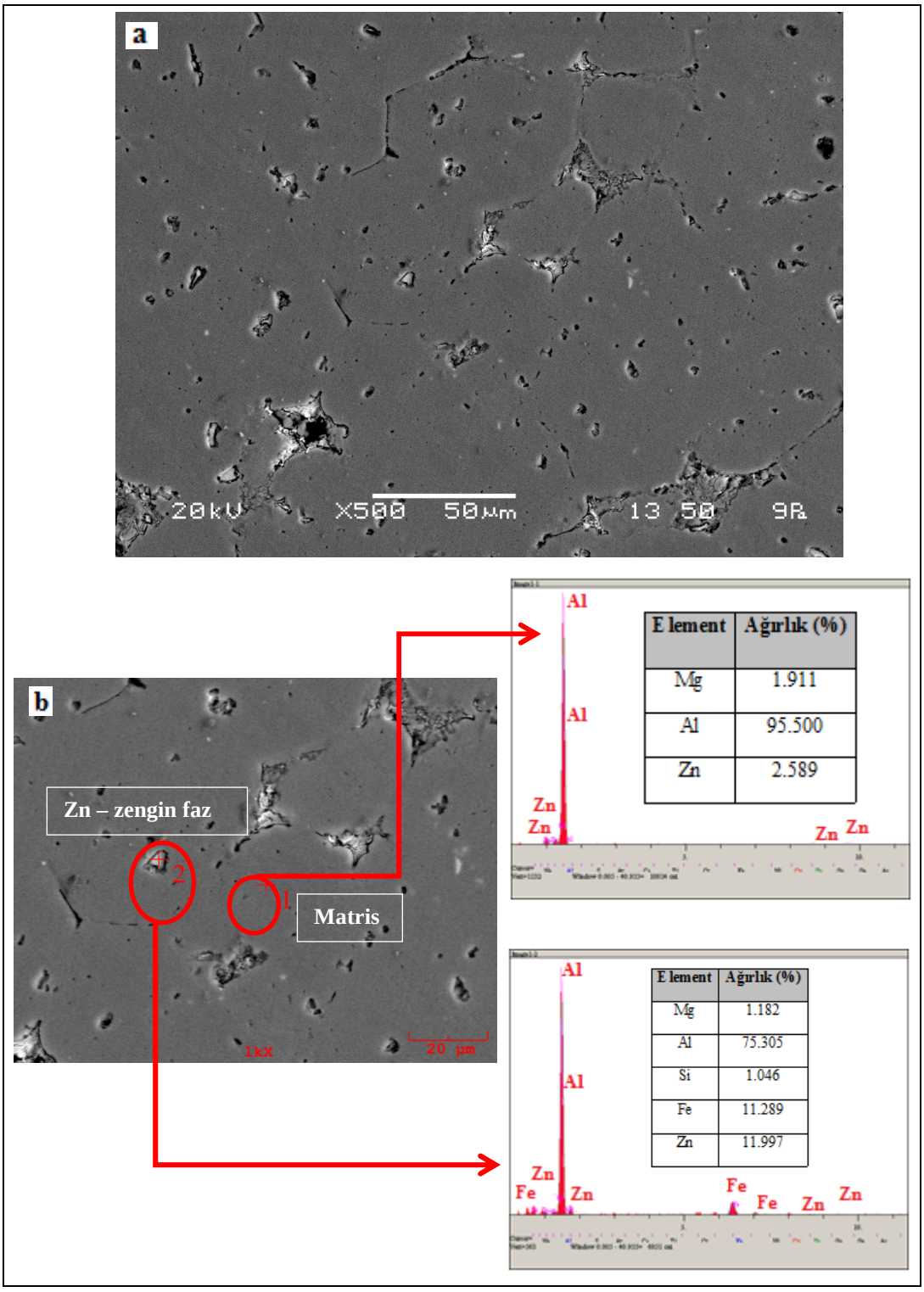
numunelerin tane boyutları, APD etkisi ile döküm mikroyapısında karşılaşılan dentritik yapının, deformasyon paso sayısı ile bant şeklinde dizilimlere sahip dentrit yapısının görülmediği daha eşeksenel tane biçimleri elde edilmiştir. Daha önce yapılmış olan EKAP rotalarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelendiği çalışmalarda EKAP ile şekillendirilen malzemelerin rotalara bağlı olarak belirli açılarda yönlenmiş taneler olduğu ve SEM incelemesi ile görüntülenmiştir [102]. Numunelerde oluşan tane yönlenmeleri paso sayısının artışı ile birlikte daha ince tane yapısına sahip bant şeklinde yönlü tane yapılarına dönüşmüştür. Meydana gelen tane şekillerinin malzemenin içyapısında EKAP işlemi esnasında oluşan dislokasyon yoğunluğu ile artış gösterdiği ve kayma mekanik özellikleri ile tanelerin kırılarak daha ufak boyutlu taneciklerin elde edildiği belirtilmiştir [102].

EKAP ile üretilmiş AA7075 alaşımının SEM görüntüleri Şekil 3.13’ de verilmiştir. Herbir paso sayısı için incelemenin yapıldığı SEM görüntülerinde tane boyutlarının döküm mikroyapısında görülen tane boyutlarından çok daha ufak olduğu görülmektedir. İncelemesi yapılan SEM görüntülerinde makroskobik olarak yönlenmelerin özellikle Şekil 3.13.(b) ve (d)’ de olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.13. EKAP SEM mikroyapı görüntüleri; 1 paso (a), 2 paso (b), 3 paso (c), 4 paso (d)

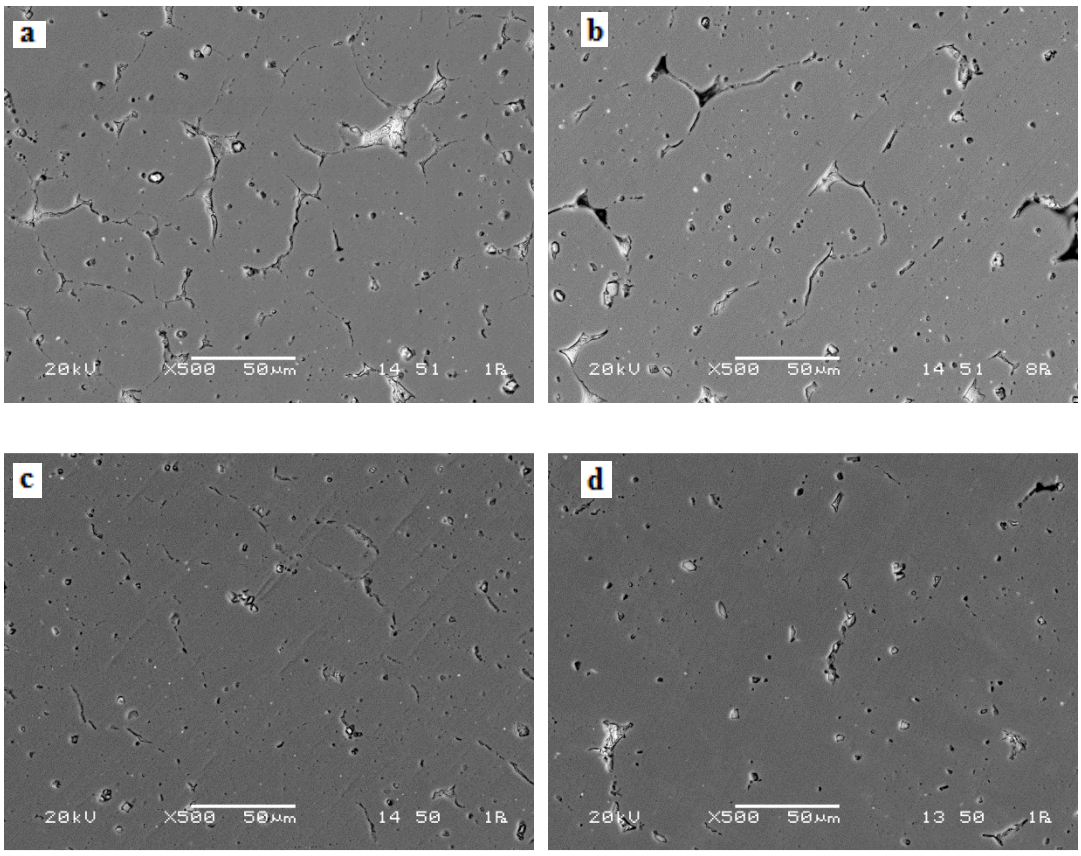
Şekil 3.14' de YKİ ile üretilmiş numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde mikroyapı görüntülerinin küresel tane yapısı daha belirgin olarak görülebilmekte iken tane boyutlarının EKAP ve EKAP + YKİ yapılmış numunelere göre daha büyük olduğu ancak döküm numunesine göre çok daha küçük olduğu görülmektedir. Mikroyapıda çok fazla küresel tanecik görünmekte olup tanelerin küresel yapısını korudukları, herhangi bir oval yapı olmadığı görülmektedir. YKİ yapılmış numunelerin mikroyapılarında döküm işlemi sonrasında görülen dentritlerin oluşmadığı anlaşılmaktadır. Bunun nedeninin YKİ sırasında dentrit kollarının kırılarak daha küçük tane yapılarına dönüşmesi ve bu tanelerin de YKİ kalıbı içerisine uygulanan presleme basıncı, ısı ve bekletme süreleri ile küresel bir morfolojiye sahip olması ile açıklanabilmektedir [96]. Alınan EDS görüntüleri de AA7075 malzemesinin kimyasal kompozisyonu ve yapıdaki elementlerin çoğunlukta mikroyapı içerisinde bulundukları yerler hakkında bilgi vermektedir. Yüksek miktarlarda bulunan Mg, Zn ve Cu elementlerine sıkça rastlamak mümkündür. Belirtilen elementler iki noktadan alınan EDS analizleri ile gösterilmiştir.



Şekil 3.14. AA7075 YKİ mikroyapı SEM görüntüsü (a), EDS görüntüsü (b)

Şekil 3.15' de EKAP + YKİ ile üretilmiş numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde mikroyapı görüntülerinin yalnızca EKAP yapılmış numunelere göre daha küresel taneciklerden oluştuğu görülmektedir. İlk paso sayılarında numunelerdeki ufak ve küresel tane yapısı, paso sayısının artışı ile birlikte daha

küçük tane boyutunda küresel taneciklere yerini bırakmaktadır. Ancak tanecik boyutları yalnızca EKAP yapılmış numunelere göre daha büyük olarak karşımıza çıkmaktadır. EKAP + YKİ' e tabi tutulmuş numuneler her ne kadar EKAP yapılan numunelere göre daha büyük ve küresel yapıya sahip olsalar da dikkatlice incelendiğinde küresel yapılı numunelerin de belirli bir yöne doğru dizilişleri ve hatlarının yönlendiği yöne doğru ovalleştiği gözlenmektedir. Ashouri ve arkadaşları [99] ile Nedjad ve arkadaşlarının [100] yapmış oldukları çalışmalarda tane yapısının EKAP sonrasında uygulanan YKİ ile küresel morfolojide olduğunu ancak tane boyutlarının EKAP sonrasında elde edilen boyutlara göre daha büyüdüğünü ölçmüşlerdir. Alınan EDS görüntüleri de AA7075 malzemesinin kimyasal kompozisyonu ve yapıdaki elementlerin çoğunlukta mikroyapı içerisinde bulundukları yerler hakkında bilgi vermektedir. Yüksek miktarlarda bulunan Mg, Zn ve Cu elementlerine sıkça rastlamak mümkündür. Belirtilen elementler bir ya da iki noktadan alınan EDS analizleri ile gösterilmiştir.

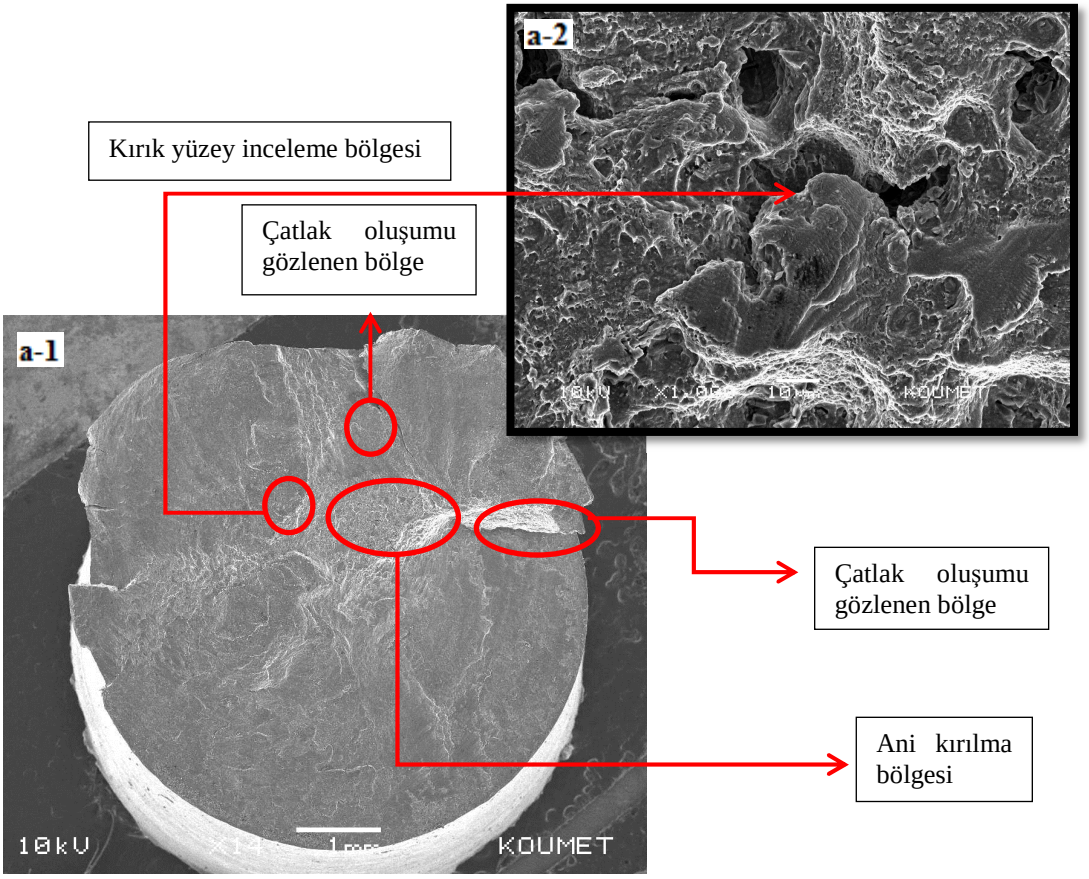


Şekil 3.15. EKAP + YKİ SEM mikroyapı görüntüleri; 1 paso (a), 2 paso (b), 3 paso (c), 4 paso (d)

3.4.4. Kırık yüzey inceleme sonuçları

Döküm, EKAP (1 – 2 – 3 ve 4 paso), YKİ, EKAP 1 paso + YKİ, EKAP 2 paso + YKİ, EKAP 3 paso + YKİ, EKAP 4 paso + YKİ yapılmış AA7075 alaşımlarının dört nokta eğilmeli yorulma testleri yapılmıştır. Yorulma testleri sonucunda alınan numuneler için kırık yüzey incelemeleri tarama elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiştir. Şekil 3.16' da döküm ve Şekil 3.17' de EKAP yapılmış numunelerin kırık yüzey inceleme görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.18' de YKİ ve Şekil 3.19' da EKAP + YKİ yapılmış numunelerin kırık yüzey inceleme görüntüleri verilmiştir. SEM ile EKAP yapılmış numunelerin deformasyon ve kırılma yüzeyi morfolojileri incelendiğinde EKAP paso sayısı arttıkça yorulma kırılmasına etki eden ortalama çukurcuk büyüklüğünün giderek küçüldüğü görülmektedir.

Şekil 3.16.a1 ve a2' de verilen döküm numune kırık yüzey bölgeleri incelendiğinde, EKAP numunelerine göre sünek-gevrek bir kırılma olduğu görülmektedir. Oluşan keskin kenarlar, döküm malzemelerin üretimleri sırasında dentritik bir yapı sergilemelerinden ve gevrek bir yapıya sahip olmalarındandır. EKAP yapılmış numunelerde ise paso sayısındaki artış ile birlikte kırılmanın gözlendiği çukurcuklar daha ufak boyutlarda oluşmuştur. Bunun sebebi ise APD ile tane boyutlarının ufaltılmış olması ve ufak tane boyutlarına sahip mikroyapılı bir malzemenin elde edilmiş olmasındandır. Das ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada da döküm AA7075 alaşımının kırılma yüzeyleri, sünek-gevrek kırılma yüzeylerinin ve kademeli bir yorulma kırılmasının görüldüğü kırılma yüzeyi ile gösterilmiştir [90]. Yorulma testi yapılan numunelerin kırık yüzeyleri incelendiğinde; döküm numunenin yapısında çatlak oluşum bölgelerinin ve numune kesitinin zorlanmayı taşıyamadığı anda yorulma çatlağının çentik etkisiyle ani kırılmaya yol açtığı bir yapı görülmektedir. Bu yapı optik ve SEM mikroyapı incelemelerinden de görüldüğü gibi (Şekil 3.8 ve 3.12) sünek gevrek ve dentritik bir yapıyı sergilemektedir.

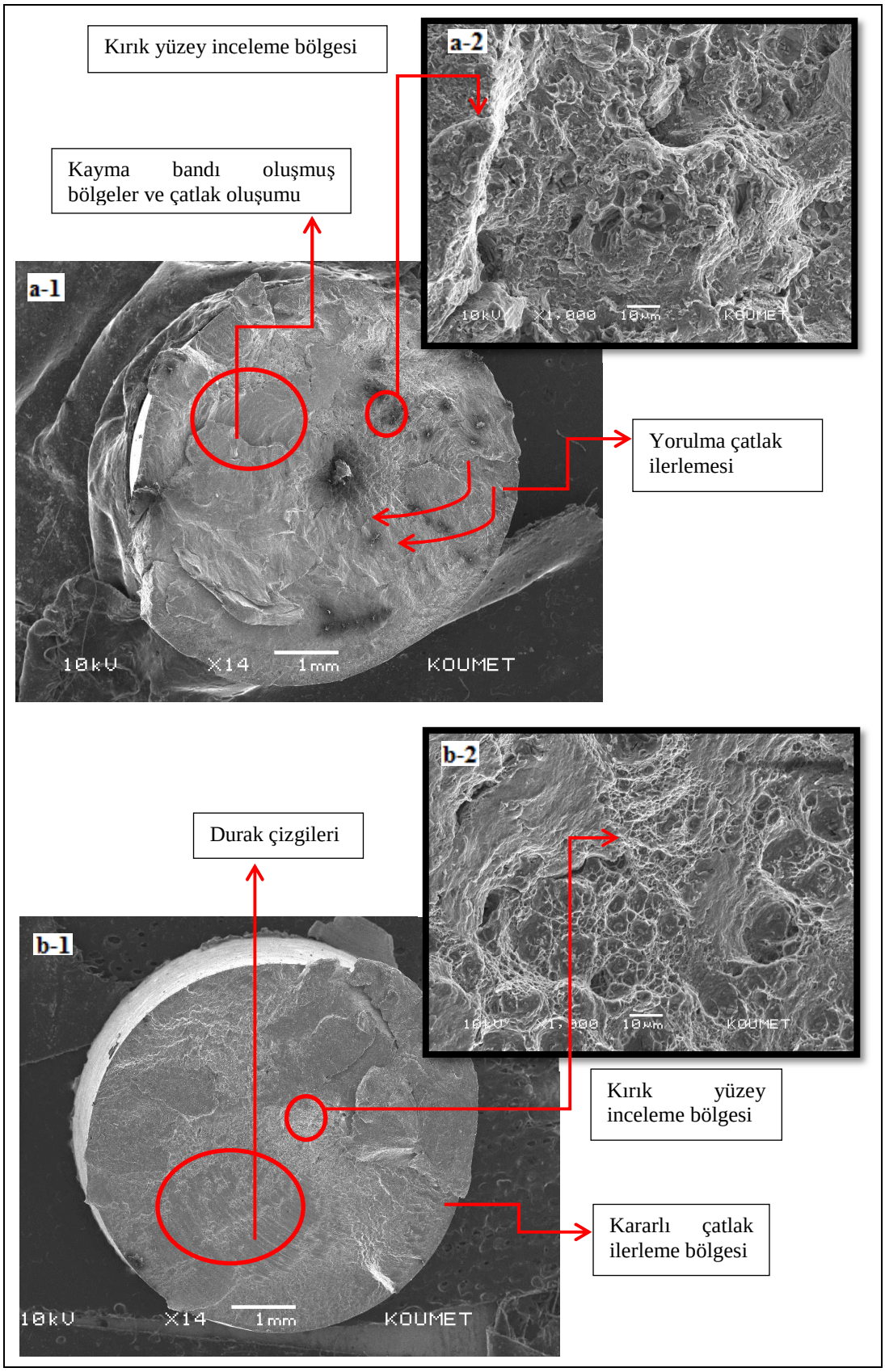


Şekil 3.16. Yorulma testi yapılmış AA7075; döküm numune kırık yüzey incelemesi SEM görüntüleri

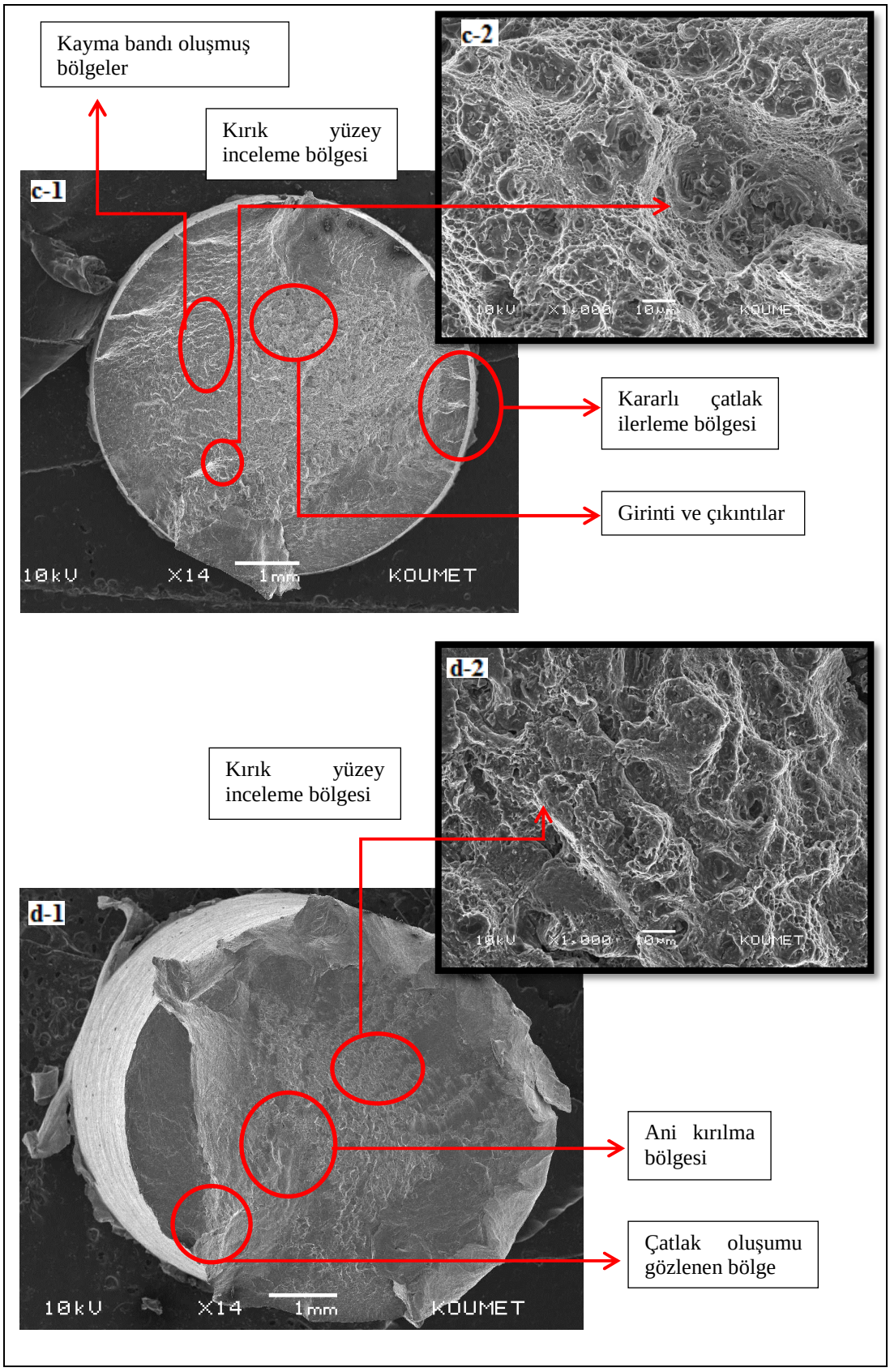
EKAP yapılmış olan numunelerde kayma bantları görülmektedir (Şekil 3.17). Görülen bu yapı EKAP sırasında "C" rotası kullanılarak numunelere uygulanan deformasyon ve paso sayılarına bağlı bant şeklinde oluşan daha ince tane yapısından kaynaklanmaktadır. Özellikle 1. pasoyla elde edilen numunede oluşan yorulma çatlak ilerleme yönleri görülürken, 2. paso için anma gerilmesi değeri değiştiğinde meydana gelen duraklama çizgileri ve kararlı çatlak ilerlemeleri görülmektedir.

EKAP 3. paso' da kararlı çatlak ilerlemeleri ile birlikte girinti ve çıkıntılı bir yüzey yapısı görülmektedir. Bunun sebebi EKAP 1 ve 2 paso ile APD oluşturulan numunelere göre daha küçük tane yapısına sahip olmasındandır. EKAP 4. paso' da ise ani kırılma ve çatlak oluşumu daha net olarak görülebilmektedir. Bu netliğin sebebi tane yapılarının EKAP 1, 2 ve 3 pasoya göre çok küçülmüş olması ve küçülen taneciklerin tek bir tane gibi yapısal davranış gösteriyor olmasındandır.

EKAP pasoları arasında kayma bantları ve yorulma çatlak ilerleme yönlerinden çatlak oluşumu ve ani kırılmaya doğru gelişen bu yapısal ilerlemenin paso sayısına bağlı olarak numune içyapısındaki tane incelmesi ve sertlik değerindeki artış (Şekil 3.11 ve Şekil 3.13) olarak değerlendirilmektedir.

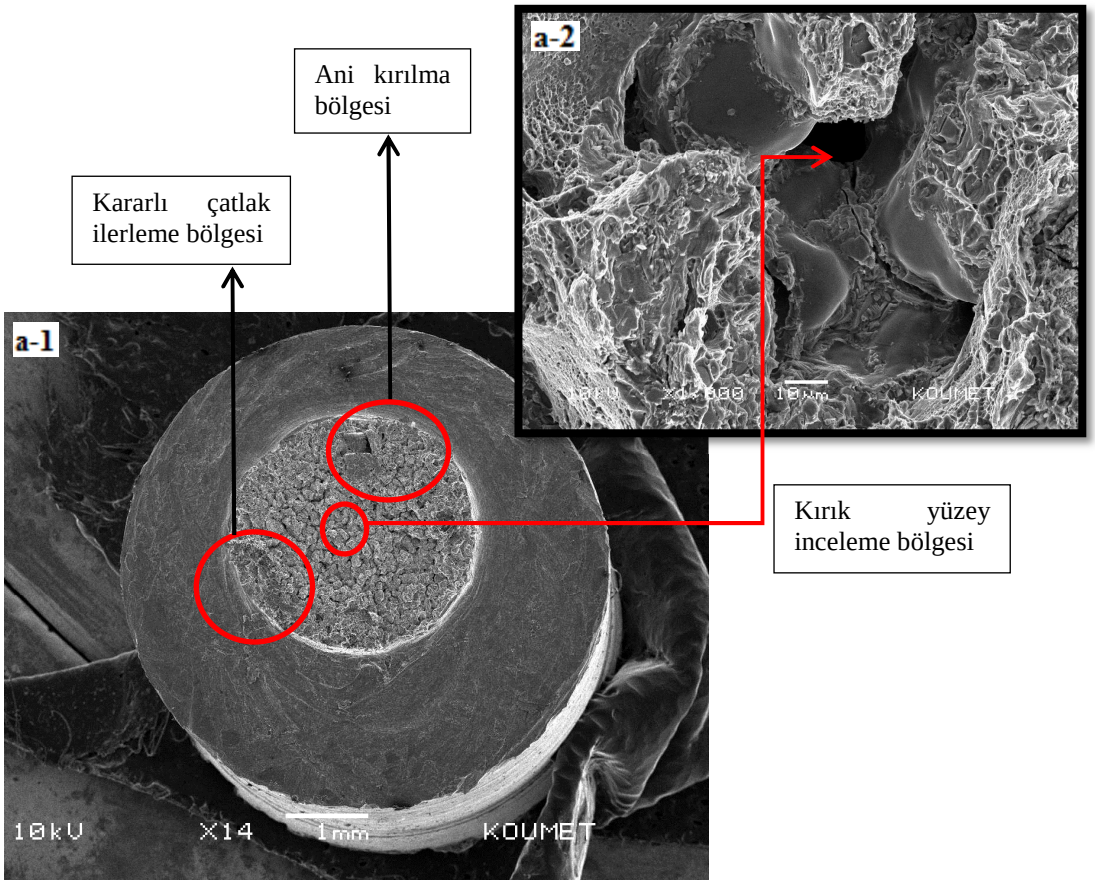


Şekil 3.17. Yorulma testi yapılmış AA7075; EKAP 1 paso (a1-a2), EKAP 2 paso (b1-b2), EKAP 3 paso (c1-c2), EKAP 4 paso (d1-d2) kırık yüzey incelemesi SEM görüntüleri



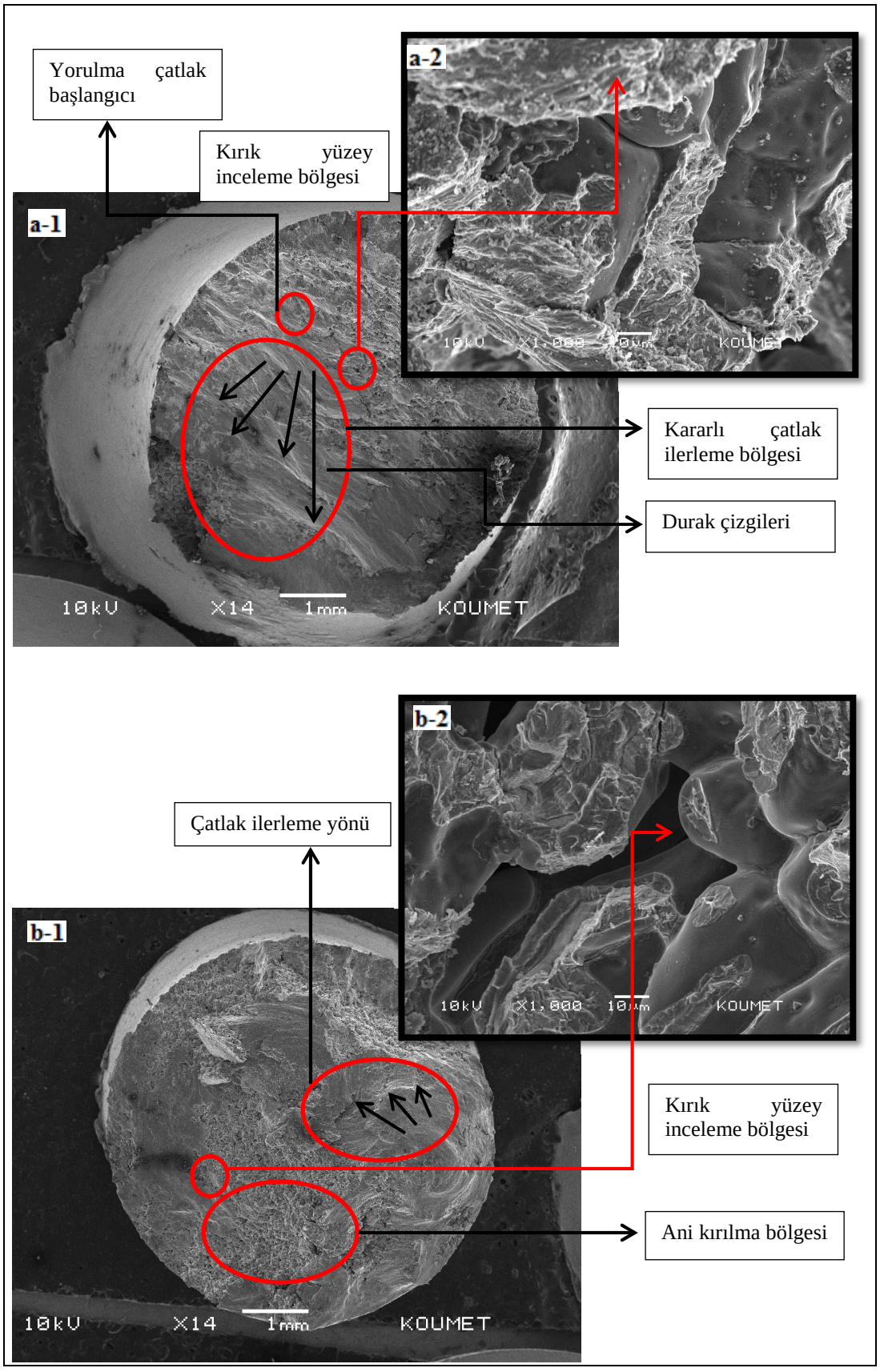
Şekil 3.17.(Devam) Yorulma testi yapılmış AA7075; EKAP 1 paso (a1-a2), EKAP 2 paso (b1-b2), EKAP 3 paso (c1-c2), EKAP 4 paso (d1-d2) kırık yüzey incelemesi SEM görüntüleri

YKİ (Şekil 3.18) ve EKAP + YKİ (Şekil 3.19) yapılan numunelerin kırık yüzey incelemelerinde ise döküm ve yalnızca EKAP yapılan numunelerden daha farklı bir kırılma yüzeyi görüntülenmiştir. Bunun sebebinin EKAP işlemi ile elde edilen ufak tane yapısının, YKİ ile küresel bir şekle dönüştürülmesinden kaynaklanmaktadır. YKİ numunelerinin kırılma yüzeylerinde tanecik yapılarının küresel yapıya dönüşmüş şekilleri görülmektedir. Yalnızca YKİ yapılan numunedeki yorulma kırılmasına sebep olan çukurcuk boyutunun EKAP + YKİ yapılan numunelere oranla daha büyük olduğu görülmektedir. Bu büyümenin sebebi ise, EKAP işlemindeki gibi öncelikli bir deformasyon işlemi uygulanarak tane boyutlarında bir ufalma sağlanamamış olmasındandır. EKAP + YKİ yapılan numunelerdeki tane boyutlarının artışının sebebi ise EKAP sonrasında uygulanan YKİ' dir (Bölüm 3.4.2). Ancak SEM kırık yüzey inceleme görüntülerinden anlaşıldığı gibi YKİ yapılan numunelerde küresel tane yapısı elde edilmiştir.

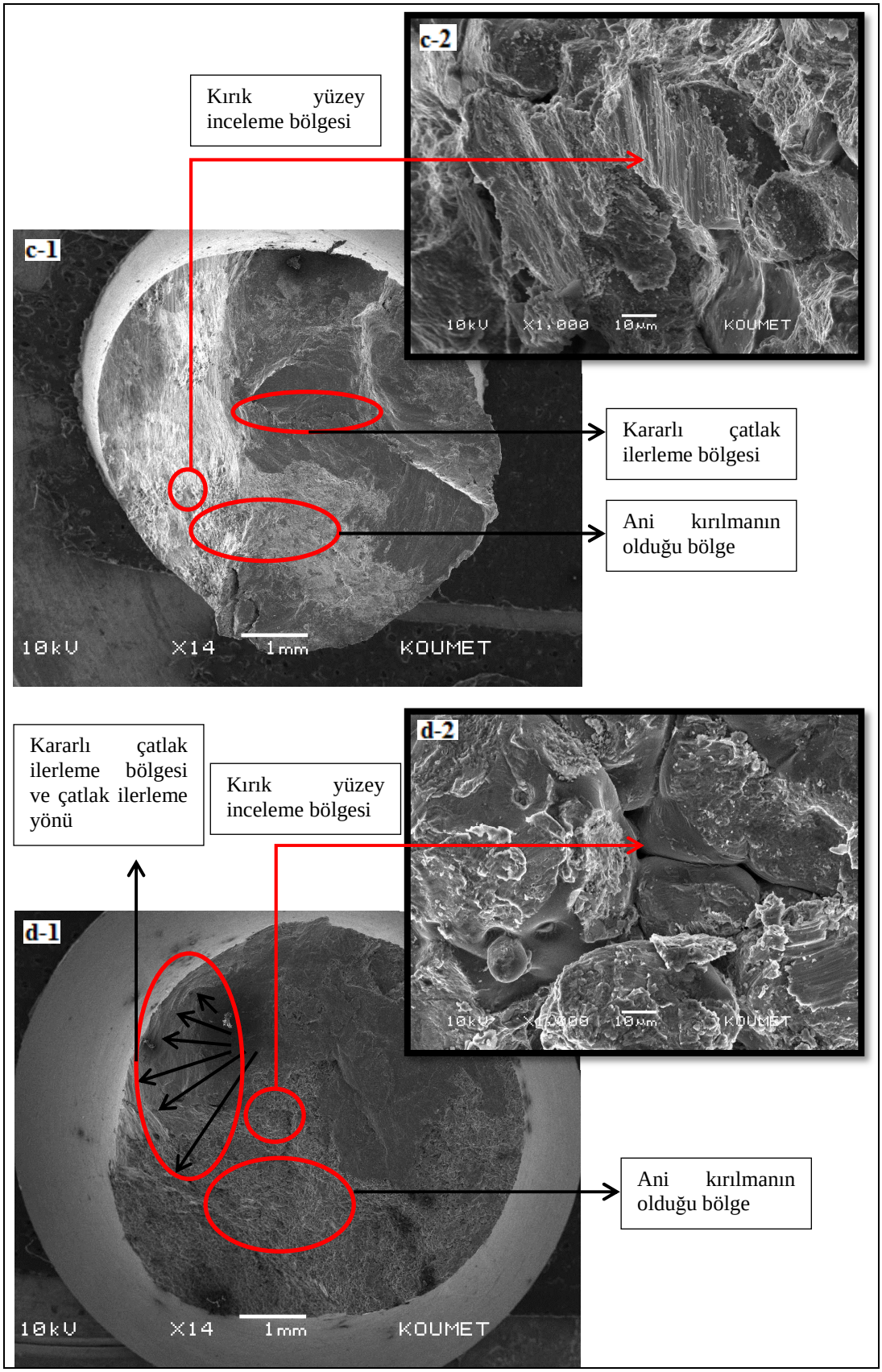


Şekil 3.18. Yorulma testi yapılmış AA7075; YKİ numune kırık yüzey incelemesi SEM görüntüleri

YKİ ve EKAP +YKİ yapılmış numunelerde kırık yüzey inceleme sonucunda özellikle tane yapılarının küresel bir morfolojide oldukları dikkati çekmektedir. Küresel tane yapısı, yorulma kırılmalarında çoğunlukla ani kırılma bölgelerinin ve kararlı çatlak bölgelerinin çokluğu ile sonuçlanmıştır. EKAP yapılmış numelerde çok net olarak görülemeyen durak çizgileri EKAP + YKİ ile üretilen numunelerde, yapının daha sünek olması nedeni ile görülebilmektedir. Kırık yüzey inceleme görüntülerinde de görüldüğü gibi yapıda ki ortalama çukurcuk boyutları büyüme göstermektedir. Oluşan bu büyüme özellikle YKİ ve EKAP 1 paso + YKİ ile üretilen numunelerde daha net görülebilmektedir. Oluşan bu büyük çukurcuklar yapının sünek bir hal aldığını göstermektedir. Bunun sebebinin yorulma zorlamalarında çatlak başlangıçlarının oluştuğu bölgelerde, küresel tane yapısının tane sınırlarından çok daha kolay çıkabilmesi sebebiyle, oluşumu olarak açıklanmaktadır. EKAP 1 paso + YKİ numunesinde (Şekil 3.19.a1-a2) yorulma çatlak başlangıçlarının görüldüğü ve yönlenmelerin olduğu, durak çizgilerinin ve çatlak ilerleme bölgeleri görülebildiği bir yapı varken EKAP 2 paso + YKİ numunesinde (Şekil 3.19.b1-b2) çatlak ilerleme yönleri ve ani kırılma bölgesi görülmektedir. EKAP 3 paso + YKİ (Şekil 3.19.c1-c2) ile EKAP 4 paso + YKİ (Şekil 3.19.d1-d2) numunesinde kararlı çatlak ilerleme bölgesi ve ani kırılmalar görülmektedir. YKİ ve EKAP 1 paso + YKİ numunesine göre ani kırılmaların paso sayısındaki artışa göre arttığı görülmektedir. Bu artışın sebebi malzemede oluşturulan aşırı plastik deformasyon oranı ile ilişkilidir. Deformasyon sayısındaki artış ile birlikte yeniden kristallenme sıcaklığında azalma olmaktadır. Bu azalma malzemenin tane yapısında büyümeye ve dolayısıyla sertlik değerlerinde düşmeye yol açarken mukavemetinin de düşmesine neden olmaktadır [103, 104].



Şekil 3.19. Yorulma testi yapılmış AA7075; EKAP 1 paso + YKİ (a1-a2), EKAP 2 paso + YKİ (b1-b2), EKAP 3 paso + YKİ (c1-c2), EKAP 4 paso + YKİ, (d1-d2) kırık yüzey incelemesi SEM görüntüleri



Şekil 3.19.(Devam) Yorulma testi yapılmış AA7075; EKAP 1 paso + YKİ (a1-a2), EKAP 2 paso + YKİ (b1-b2), EKAP 3 paso + YKİ (c1-c2), EKAP 4 paso + YKİ, (d1-d2) kırık yüzey incelemesi SEM görüntüleri

3.4.5. TEM sonuçları

EKAP işlemi uygulanan numuneler için tane boyutları nano seviyelere kadar küçültülebilmektedir. Yapılan çalışmalar da uygulanan optik mikroskop ve SEM çalışmalarından sonra mikroyapının daha net görülebilmesi ve tane boyutlarının/şekillerinin hakkında ayrıntılı bilgiler edinebilmek amacı ile TEM çalışmaları yapılmıştır.

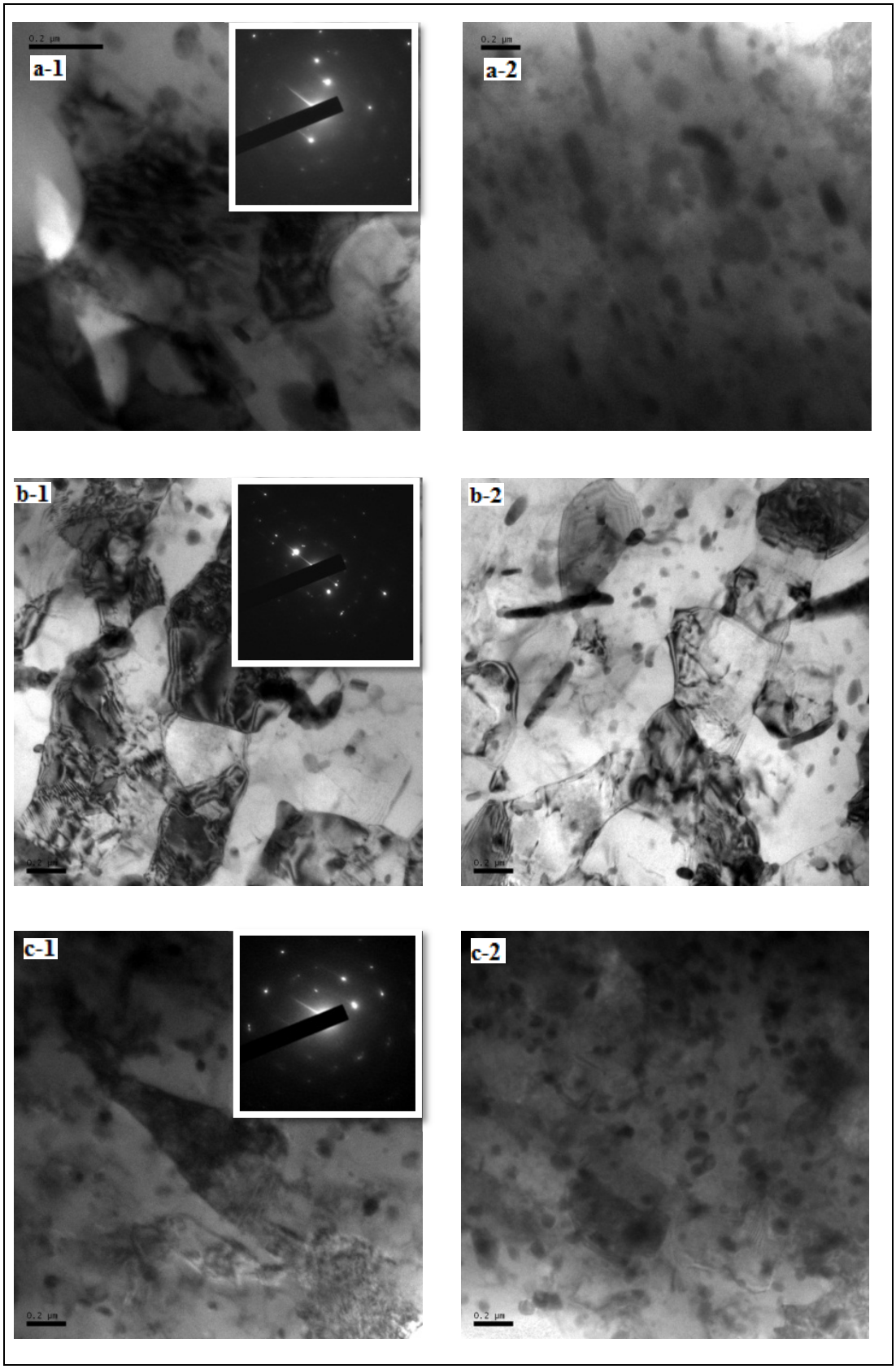
Şekil 3.20' de EKAP (1 paso, 2 paso, 4 paso), Şekil 3.21' de ise EKAP 1 paso + YKİ, EKAP 2 paso + YKİ, EKAP 4 paso + YKİ yapılmış AA7075 alaşımına ait geçirimli elektron mikroskobu görüntüleri ile seçili alan difraksiyon paterni mikroyapı analizine ait görüntüler verilmiştir.

EKAP ve YKİ ile elde edilen numuneler incelendiğinde; YKİ + EKAP yapılmış numunelerin aynı paso sayılarında yalnızca EKAP yapılmış numunelere göre tane yapıları daha iri olduğu görülmüştür. EKAP işleminde, paso sayısında ki artış, numunelerde oluşturulan deformasyon ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Bu nedenle artan paso sayısı ile tane yapısında da deformasyon oluşturulmakta ve tane boyutları küçülmesine neden olmaktadır.

Optik mikroskop görüntülerinde, döküm mikroyapısında görülen eşeksenel tane yapısı, EKAP paso sayısının artması ile birlikte bant şeklinde dizilmiş tane yapısına dönüşmüştür. EKAP işleminde aşırı plastik deformasyon işlemi ile birlikte yeni tane sınırları gelişmiş ve bununla birlikte tane küçülmeleri meydana gelmiştir. Plastik deformasyon etkisi ile numunelerde atom düzlemlerinde kaymalar gerçekleşerek dislokasyon hareketleri oluşmuştur. Oluşan dislokasyon hareketleri, EKAP paso sayısının artışı ile birlikte artış göstermiş ve oluşan deformasyon artışı tane sınırlarında yoğunlaşarak numunelerin sertliklerinde bir artış oluşturmuştur. Bu durum, Kumar ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada da görülmüştür. [45].

EKAP yapılan numunelerde ayrıca seçili alan difraksiyon (SAD) kırınım görüntüleri de alınmış ve alınan görüntülerden numuneye ait kristal kafes yapısında deformasyon durumları incelenmiştir. Alınan SAD görüntülerinde 1. ve 2. pasoda düzenli bir noktasal dizilme görülmezken 4. pasoda daha düzenli bir noktasal dizilme olduğu görülmektedir. APD etkisi ile malzemelerin kristal kafes yapılarında deformasyona

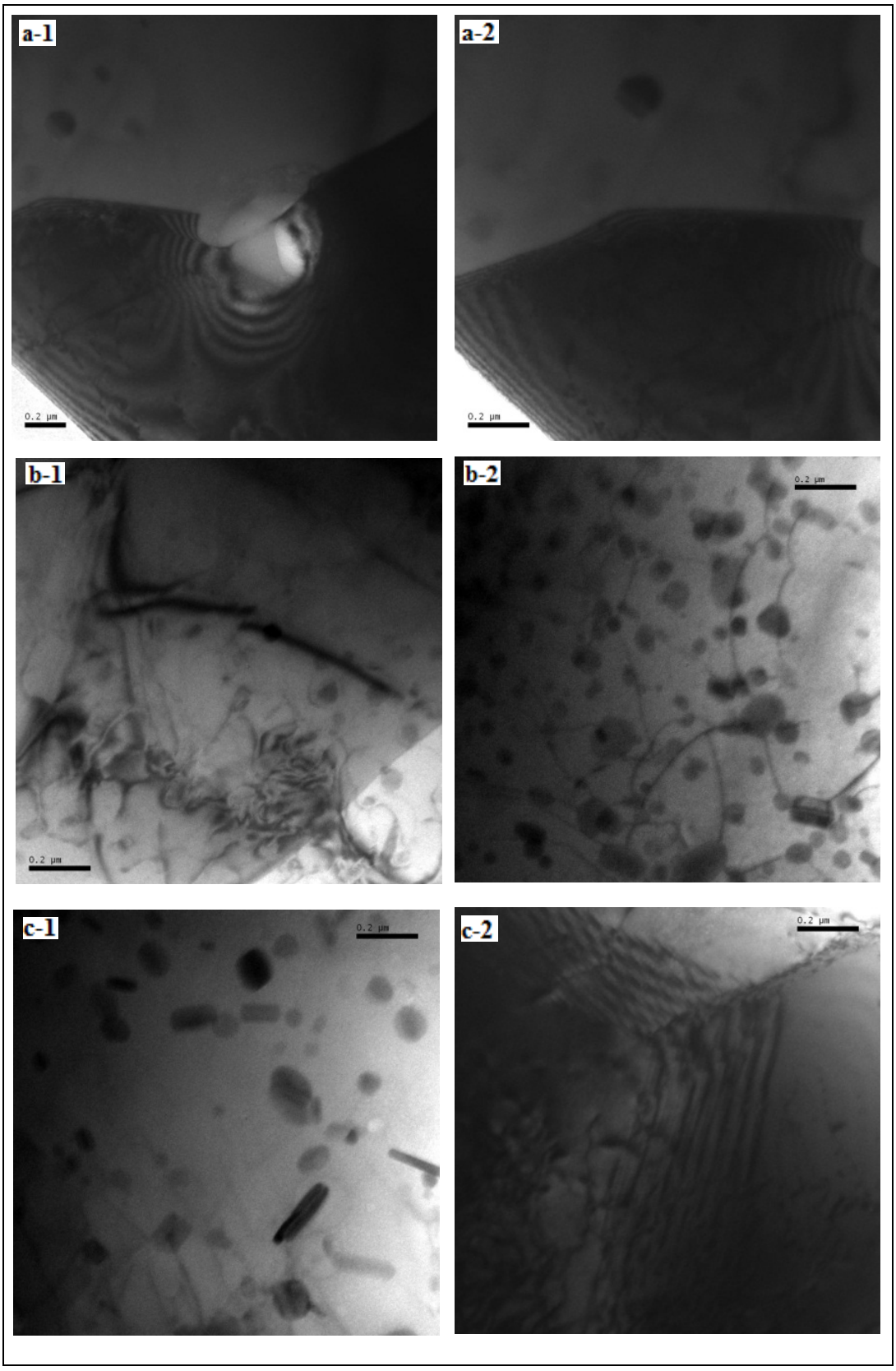
bağlı olarak açısal yönlenmeler, düzensiz noktasal dizilim ve noktalardaki kaymaların oluşan deformasyon oranı ile doğru orantılı bir yapıya dönüştüğü bilinmektedir [103]. Yapılan bu çalışmada SAD görüntülerindeki düzensiz yapının deformasyon oranının yoğunluğundan kaynaklandığı ifade edilebilir.



Şekil 3.20. EKAP TEM mikroyapı görüntüleri; 1 paso (a1-a2), 2 paso (b1-b2), 4 paso (c1-c2)

EKAP + YKİ yapılmış numunelerde (Şekil 3.21) ise tane yapıları yine bant şeklinde dizilim gösterse de daha büyük bir yapı görülmektedir. Deformasyon akış çizgileri ve tane sınırları YKİ yapılmış numunelerde işlem sıcaklığının da etkisi ile birlikte net olarak görülmektedir.

EKAP + YKİ numunelerinde, artan paso sayısı ile birlikte tane boyutlarında da azalma oluşmakta olup UİT' li bir yapı elde edilmiştir. Ancak YKİ' de EKAP yapılmış numuneler küresel tane yapısının oluşturulabilmesi amacıyla YKİ ve presleme sıcaklıkları için ayrıca bir ısıl işleme tabi tutulmuştur. Bu durumda EKAP pasolarında küçülen tane boyutları, YKİ' de büyüme göstermektedir. EKAP paso sayısındaki artış, YKİ sonucunda elde edilen numunelerdeki tane boyutların da orantılı bir azalma sağlamıştır. Yalnızca EKAP yapılan numune TEM görüntüleri ile EKAP + YKİ yapılmış numune görüntüleri incelendiğinde, EKAP yapılan numunelerin bant şeklinde görülen tane yapıları, EKAP + YKİ' de yine paso yönüne bağlı olarak bir tarafa doğru yönlenmiş ancak tanenin fiziksel görünüşü daha küresel bir yapıya dönüşmüştür. Buda malzemenin mekanik özelliklerinde artış olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.21. EKAP TEM mikroyapı görüntüleri; 1 paso + YKİ (a1-a2), 2 paso + YKİ (b1-b2), 4 paso + YKİ (c1-c2)

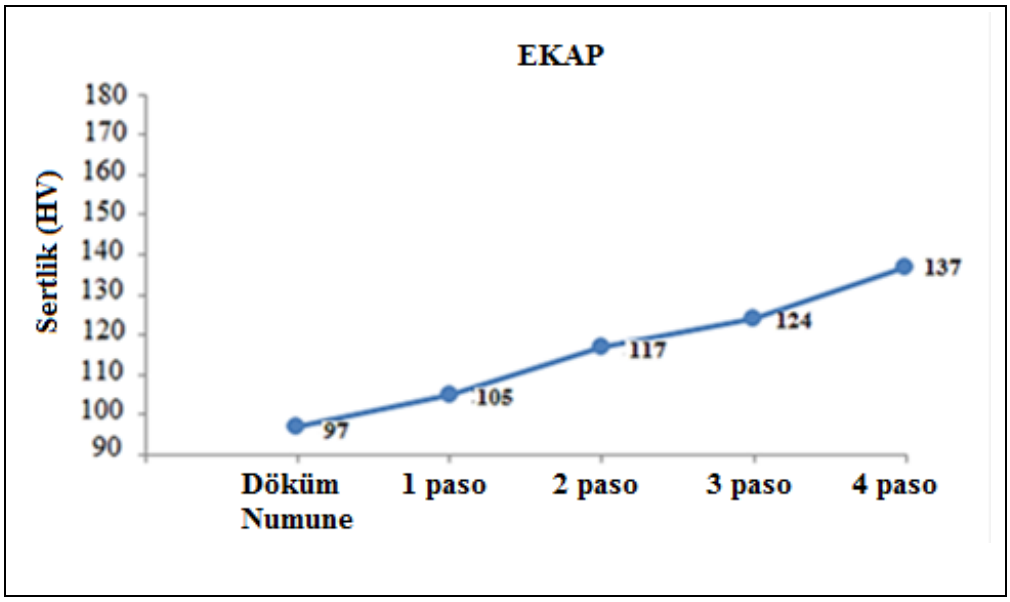
Metallere uygulanan deformasyon işlemleri, artış göstermesi ile birlikte deformasyon sertleşmesi oluşturmaktadır. APD işlemleri tane boyutlarında küçülme sağlasa da yeniden kristalleşme sıcaklığında da düşme sağlamaktadır. Ancak azalan yeniden kristalleşme sıcaklığı, daha düşük sıcaklıklarda yapılan deformasyon mekanizmalarında daha büyük tane boyutlarının oluşumuna sebep olmaktadır. Böylece, tane boyutlarında oluşan artış ise küçük tane boyutlarına göre mukavemet azalmasına neden olmaktadır [103].

TEM analizleri de göstermektedir ki AA7075 alaşımı döküm mikroyapısında çubuk benzeri bir yapıda görülen $MgZn_2$ çökeltisi EKAP işlemi ile birlikte daha küçük küresel parçacıklara ayrılarak numune boyunca dağılım göstermektedir.

Dört pasodan sonra çok yüksek yoğunluklu Al numune elde edilmiştir. $MgZn_2$ çökeltisinin yoğunluğu, EKAP sonrasında APD etkisi ile kırılarak azalmıştır. EKAP 1 pasoda oluşan çökeltiler ile 4 paso sonrasında alınan TEM görüntülerindeki çökelti fazlarının birbirlerine kıyasla düşük açılı tane sınırları göze çarpmaktadır. EKAP 4 paso sonunda alınan numune TEM analizlerinde çökeltilerin matris boyunca daha homojen dağılımı görülmüştür.

3.5. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Döküm, EKAP (1 - 2 - 3 ve 4 paso), Yarı katı işlem, EKAP 1 paso + Yarı katı işlem, EKAP 2 paso + Yarı katı işlem, EKAP 3 paso + Yarı katı işlem, EKAP 4 paso + Yarı katı işlem yapılmış numunelerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Ölçme işlemleri sonucunda elde edilen değerler grafik halinde Şekil 3.22 ve 3.23’ de verilmiştir.



Şekil 3.22. Döküm numune ve EKAP yapılan numunelerin sertlik sonuçları

Şekil 3.22’ de görüldüğü gibi, döküm numune ile 1, 2, 3 ve 4 paso EKAP yapılmış numunelerin sertlik değerleri verilmiştir. Elde edilen değerler sonucunda, döküm numune en düşük sertliğe (97 HV) sahipken, EKAP işlemi yapılmış numunelerin sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. EKAP paso sayısının artışı ile birlikte sertlik değerinde de (1 paso = 105 HV, 2 paso = 117 HV, 3 paso = 124 HV ve 4 paso = 137 HV) yükselen bir grafik görülmektedir.

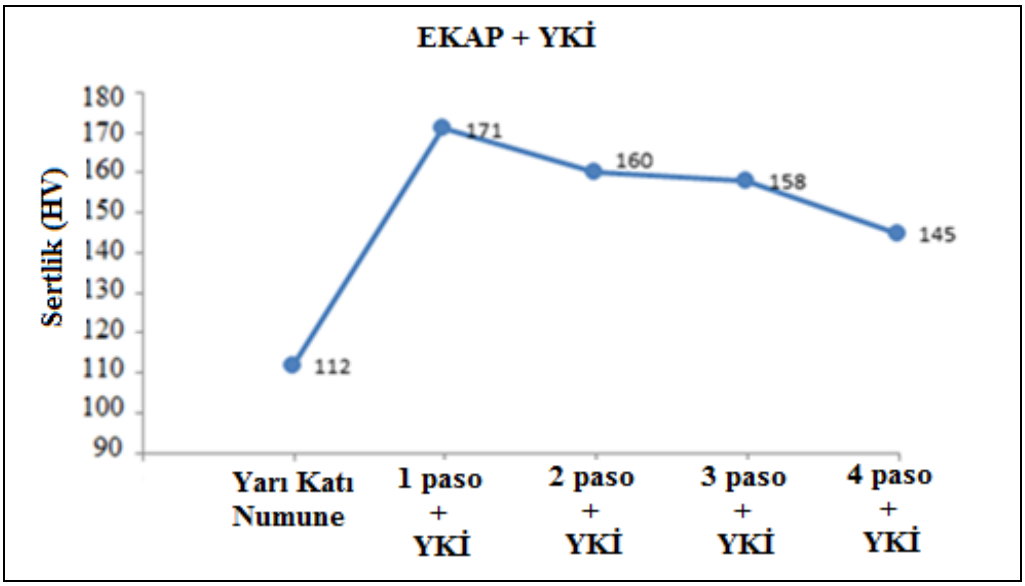
APD ile malzemelerde pekleşme meydana gelebilmektedir. Ayrıca EKAP ile malzemelere uygulanan APD, malzemelerin içyapısında gerilme birikimlerine de sebep olmaktadır. Gerilme birikimleri ise malzeme içerisinde dinamik toparlanma sürecine etki etmektedir. Malzemelere uygulanan APD, yeniden kristalleşme sıcaklığının altında, soğuk şekillendirme olarak adlandırılır ve soğuk şekillendirme sırasında dislokasyon yoğunluğundaki artış ile birlikte malzeme dayanımında artış görülmektedir. Şekillendirme sertleşmesi olarak da isimlendirilen pekleşme olayı ile metalin mukavemetlenmesinde artış görülürken bunun sebebinin dislokasyon yoğunluğunda oluşan artış sebep olmaktadır [104].

Malzemelerde, metalin özellikleri tane boyutu mukavemetlenmesi ile kontrol edilebilir. Tane boyutu küçültülerek tane sayısı ve böylece de tane sınırı miktarı arttırılabilir. Herhangi bir dislokasyon bir tane sınırı ile karşılaşmadan önce sadece kısa bir mesafe hareket eder ve böylece metalin dayanımını artırır. Hall-Petch eşitliği

Denklem (3.1) tane boyutu ile metalin akma dayanımı arasındaki ilişkiyi ifade etmektedir.

$$\sigma_y=\sigma_o+Kd^{-1/2} \quad (3.1)$$

Hall-Petch denkleminde; σ_y=akma gerilmesi, σ_o=dislokasyon hareketini başlatmak için gerekli gerilim, K=malzemeye bağlı sabit (pekleşme üssü), d=tane boyutu' nu ifade etmektedir [104] .



Şekil 3.23. Yarı katı işlem ile EKAP + Yarı katı işlem yapılan numunelerin sertlik sonuçları

Şekil 3.23' de ise YKİ ile EKAP + YKİ yapılmış numunelerin sertlik grafikleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde YKİ' e tabi tutulan malzemenin sertlik değerinin, EKAP + YKİ' den geçirilen numunelere göre çok düşük olduğu görülmektedir. Ancak 112 HV sertlik değerine sahip olan YKİ numunesi, EKAP + YKİ' e geldiğinde 1 paso için 171 HV' ye, 2 paso için 160 HV' ye, 3 paso için 158 HV' ye, 4 paso için 145 HV' değerlerine ulaştığı görülmektedir.

Alınan değerler neticesinde yalnızca döküm işlemi yapılmış numunelerin sertlik değeri, EKAP, EKAP + Yarı katı işlem ve yalnızca Yarı katı işlem yapılmış numunelere göre en düşük değerde (97 HV) elde edilmiştir. EKAP yapılan numunelerde ise paso sayısındaki artışa bağlı olarak 4 paso yapılan numunenin sertlik değeri en yüksek değer olarak (137 HV) elde edilmiştir. EKAP + Yarı katı işlem yapılan numunelerde ise ölçülen sertlik değerleri; EKAP yapılan numunelerin

tersine paso sayısındaki artış ile birlikte azalma göstermiş ve en yüksek sertlik değeri 1 paso yapılan numunede (171 HV) elde edilmiştir. Yarı katı işlem yapılan numunelerde ise ortalama sertlik değeri 112 HV olarak ölçülmüştür. Genel olarak incelendiğinde; sertlik değerleri EKAP + Yarı katı işlem uygulanmış > EKAP işlemi yapılmış > Yarı katı işleminden geçirilmiş > Döküm yapılmış şeklinde sıralanabilmektedir.

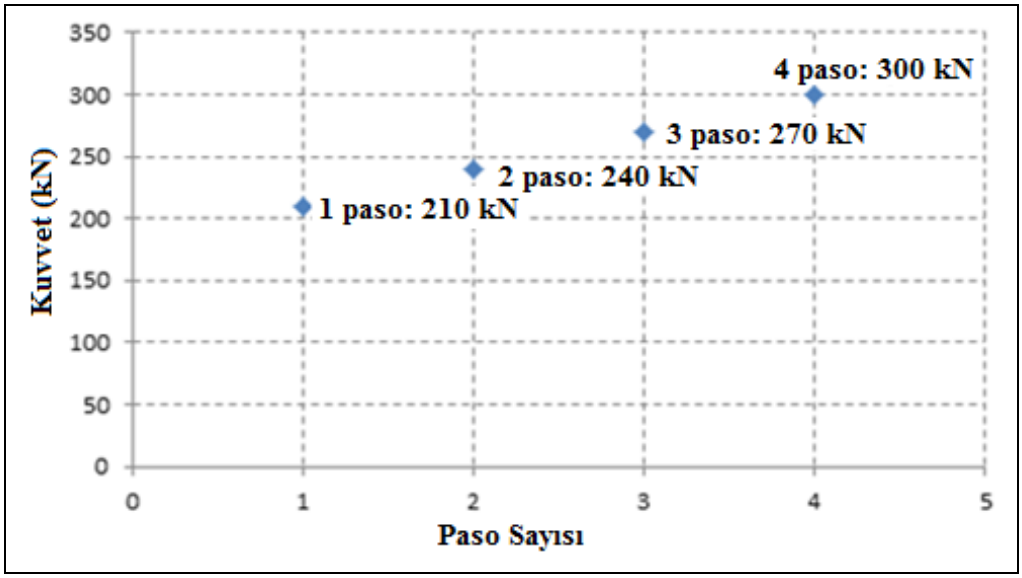
AA7075 alaşımının mikrosertlik değerleri "C" rotasında herbir paso için ölçülmüştür. Yalnızca EKAP yapılmış numuneler için, her pasoda sertlik değerinde artış gözlemlenirken en yüksek sertlik değeri dördüncü pasoda ölçülmüştür. EKAP ile ilgili çeşitli malzemeler üzerine yapılmış olan çalışmalarda paso sayısının malzemenin sertliğine etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda EKAP işlemin uygulandığı malzemelere göre değişkenlik gösterebilmekle birlikte en yüksek artışlı sertlik değerlerine 4 pasoda ulaşılırken bu pasodan sonra ulaşılan sertlik değerlerinin küçük azalmalar şeklinde oluştuğu ve ardından düşme gösterdiği görülmüştür [45,105-107]. Bunun sebebide malzemenin kristal yapısında oluşan bozulmalardan ve toparlanmalardan kaynaklanmaktadır. EKAP ve YKİ teknikleri uygulanarak malzemelerin APD ile mikroyapılarında atomsal hareketler oluşması sözkonusudur. Oluşan atom hareketleri ile dislokasyonlar ve atom düzlemlerinde kaymalar da devreye girmektedir. APD sebebiyle oluşan dislokasyonlar atomlar arasında bir kilit vazifesi görerek yapıda bir sıkışma sağlar ve bu şekilde sertlikte bir artış meydana getirirler [104]. Ölçülen sertlik değerlerindeki bu artışın nedeni, çökeltilerin parçalanması ile oluşan, dislokasyon yoğunluğu ve tane incelmesindeki artıştan kaynaklanmaktadır [10, 18, 19, 45, 108].

3.6. EKAP Presleme Kuvveti

EKAP işlemi sırasında, paso sayısına bağlı olarak pres kuvvetinde de değişimler gözlenmiştir. Paso sayısının artışı ile birlikte presleme kuvvetinde oluşan artışa ilişkin grafik, Şekil 3.24' de verilmiştir.

Elde edilen sonuçlarda EKAP paso sayısının artışı ile birlikte yükleme kuvveti için malzeme de oluşturulan aşırı plastik deformasyon sebebiyle artış gözlenmiştir. Mathieu ve arkadaşları EKAP işleminde numunelerin elde edilmesi sırasında oluşan yükleme kuvveti-numune boyu çalışmasını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda

numune boyunda oluşan artışın presleme kuvvetine etki ettiği ancak bu etkinin belirli bir uzunluktan sonra aşağıya doğru düşen bir kuvvet diyagramı şeklinde görüldüğünü belirtmişlerdir [109]. EKAP işleminde artan paso sayısı, numunelerin sertlik ölçümlerinde doğrusal bir orantı ile artış göstermiştir (Şekil 3.22, Şekil 3.23). Artan sertlik davranışları, presleme kuvvetinin artışında da bir öneme sahiptir.



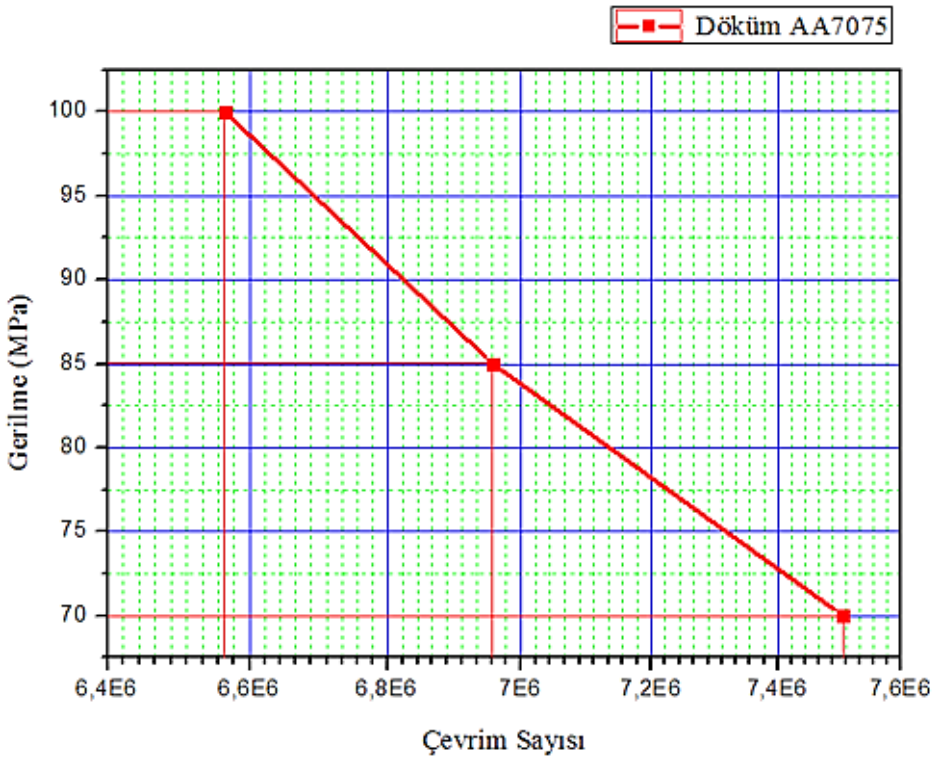
Şekil 3.24. Yükleme – paso sayısı grafiği

3.7. Yorulma Testi Sonuçları

Mikroyapı incelemeleri yapılan; döküm, EKAP (1 – 2 – 3 ve 4 paso), YKİ, EKAP 1 paso + YKİ, EKAP 2 paso + YKİ, EKAP 3 paso + YKİ, EKAP 4 paso + YKİ yapılmış numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenebilmesi amacıyla yorulma testine tabii tutulmuşlardır. Yorulma testleri için uzun ömürlü yorulma kullanılmış olup elde edilen sonuçlara ait grafikler Şekil 3.25, 3.26 ve 3.27' de verilmiştir.

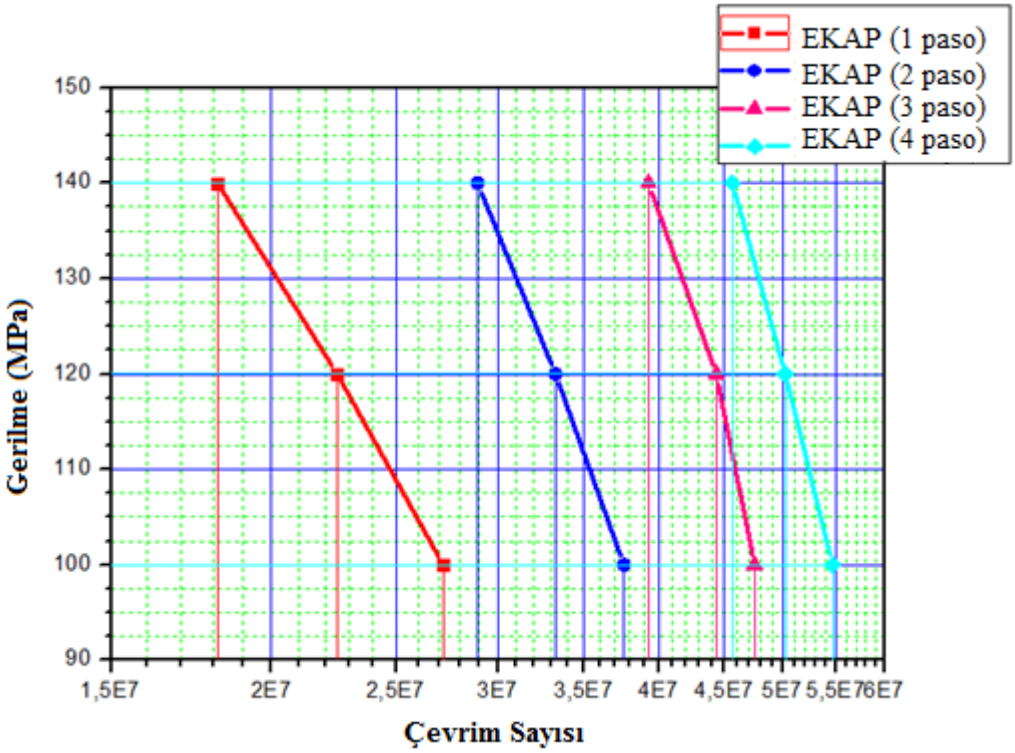
Das ve arkadaşları [90] yapmış oldukları çalışmalarında, AA7075 malzemelerin mekanik özelliklerinin gelişiminde UİT yapısına ve daha yüksek dislokasyon yoğunluğuna sahip malzeme içyapısının doğru orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Yönlenmiş tane yapısına sahip haddelenmiş malzeme ile geleneksel yöntemlerle üretilmiş döküm bir malzeme için; tane yapısının inceltilmesi ve yönlenmiş bir dizilime sahip tane yapısının görüldüğü numunelerde yorulma dayanımının döküm numunelere göre daha yüksek olduğunu göstermişlerdir. Bu sonuçların sebebinin döküm numunedeki tane yapısının dentritik morfolojide olması sebebiyle çatlak

başlangıçlarının çok hızlı gelişerek ani kırılmaların oluştuğunu belirtmişlerdir. Ancak yönlenmiş dizilimin görüldüğü ince tane yapılarında var olan tane sınırları arasında tane sayısının da artışı da oluşmuştur. İlaveten kayma dislokasyonları ile yeni tane sınırları oluştuğunu ve plastik bölgenin daha da genişlediğini belirtmişlerdir. Bu sebeple ince tane yapısına sahip malzemelerde daha uzun ömürlü bir yorulma işlemi gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca büyük tane boyutuna sahip bir malzeme ile küçük ve yönlendirilmiş bir tane boyutuna sahip aynı tür malzeme karşılaştırıldığında; UİT yapısının görüldüğü yapılarda daha uzun ömürlü yorulma dayanımları sergilenmektedir. Küresel tane yapısına sahip numunelerde ise elastik ve plastik deformasyon bölgesinin daha geniş olması, eşeksenel tane yapısına sahip numunelere göre daha yüksek yorulma dayanımının elde edilmesini sağlamaktadır [110–112].



Şekil 3.25. Döküm AA7075 malzemesi yoruma grafiği

Şekil 3.25' de görüldüğü gibi döküm numune için yapılan yorulma deneyinde 70MPa, 85MPa ve 100MPa olmak üzere 3 farklı gerilme yükü uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar da 70 MPa için: 7564813 ($7.5x10^6$) ortalama çevrim sayısı, 85 MPa için: 6957342 ($6.9x10^6$) ortalama çevrim sayısı ve 100 MPa için: 6565160 ($6.5x10^6$) ortalama çevrim sayısı elde edilmiştir.

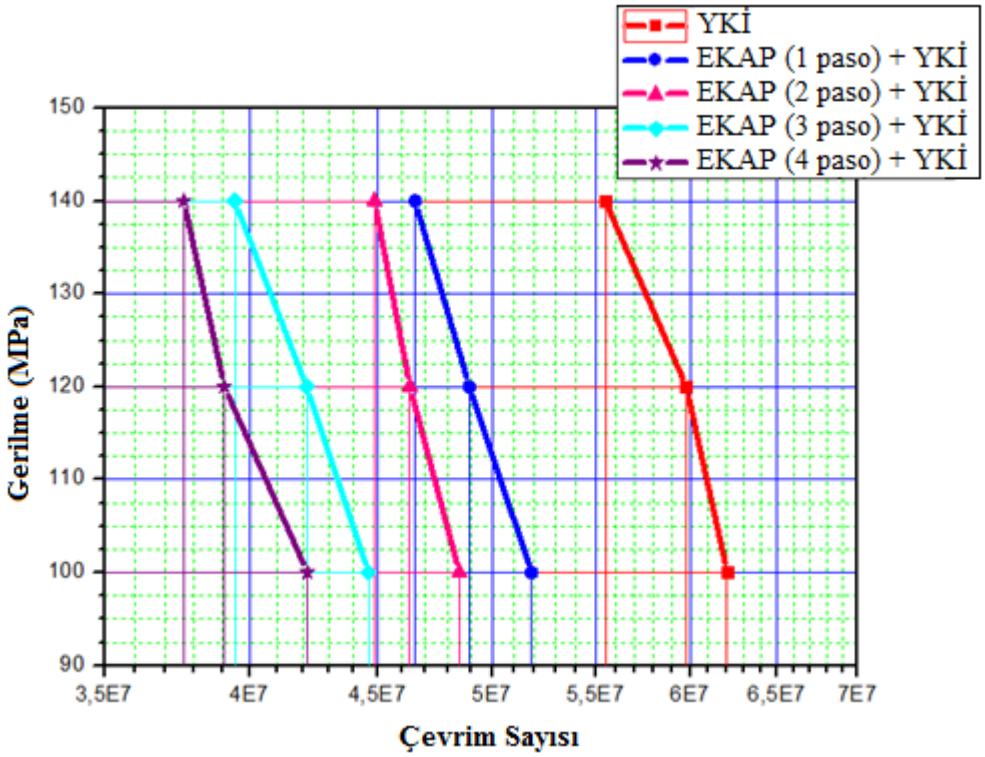


Şekil 3.26. EKAP 1 paso, 2 paso, 3 paso ve 4 paso AA7075 malzemesi yorulma grafiği

Şekil 3.26' da görüldüğü gibi farklı paso sayılarında EKAP yapılmış numunelerin yorulma deneyinde 100MPa, 120MPa ve 140MPa olmak üzere 3 farklı gerilme değeri uygulanmıştır. Uygulanan gerilme değerlerine bağlı olarak EKAP paso sayısı artışı ile birlikte çevrim sayısında da artış görülmüştür. Elde edilen değerlere göre en yüksek çevrim sayısının EKAP 4 paso yapılmış numune de elde edildiği görülmektedir.

EKAP 1 paso numunesinde: 100 MPa için: 27197866 ($2.7x10^7$) ortalama çevrim sayısı, 120 MPa için: 22488884 ($2.2x10^7$) ortalama çevrim sayısı ve 140 MPa için: 18154275 ($1.8x10^7$) ortalama çevrim sayısı elde edilirken, EKAP 2 paso numunesinde: 100 MPa için: 37592368 ($3.7x10^7$) ortalama çevrim sayısı, 120 MPa için: 33254719 ($3.3x10^7$) ortalama çevrim sayısı ve 140 MPa için: 28918147 ($2.8x10^7$) ortalama çevrim sayısı elde edilmiştir. EKAP 3 paso numunesinde ise: 100 MPa için: 47515698 ($4.7x10^7$) ortalama çevrim sayısı, 120 MPa için: 44362523 ($4.4x10^7$) ortalama çevrim sayısı ve 140 MPa için: 39289742 ($3.9x10^7$) ortalama çevrim sayısı elde edilirken, EKAP 4 paso numunesinde: 100 MPa için: 54640422

($5.4x10^7$) ortalama çevrim sayısı, 120 MPa için: 50188734 ($5.0x10^7$) ortalama çevrim sayısı ve 140 MPa için: 45674343 ($4.5x10^7$) ortalama çevrim sayısı elde edilmiştir.



Şekil 3.27. YKİ, EKAP 1 paso + YKİ, 2 paso + YKİ, 3 paso + YKİ ve 4 paso + YKİ AA7075 malzemesi yorulma grafiği

Şekil 3.27' de verilen EKAP + YKİ yapılmış numunelerin yorulma deneyinde 100MPa, 120MPa ve 140MPa olmak üzere 3 farklı gerilme değeri uygulanmıştır. Uygulanan gerilme değerlerine bağlı olarak EKAP paso sayısı artışı ile birlikte çevrim sayısında azalma görülmüştür. Alınan sonuçlar yalnızca EKAP yapılan numunelerden farklı olarak tersine bir sonuç çıkarmıştır. En az çevrim sayısı ise YKİ yapılmış numune de görülmüştür. Ancak YKİ yapılmış numuneye ait çerim sayısı incelendiğinde; yorulma değerlerinin EKAP 3 paso yapılmış numuneninkine yakın olduğu görülmektedir. Elde edilen değerlere göre en yüksek çevrim sayısının EKAP 1 paso + YKİ yapılmış numune de elde edildiği görülmektedir.

Yalnızca Yarı katı işlem yapılmış deney numunelerinin yorulma analizi sonuçlarında; 100 MPa için: 62074385 ($6.2x10^7$) ortalama çevrim sayısı, 120 MPa için: 59789953 ($5.9x10^7$) ortalama çevrim sayısı ve 140 MPa için: 55492118 ($5.5x10^7$) ortalama çevrim sayısı elde edilmiştir.

EKAP (1 paso) + Yarı katı işlem numunesinde, 100 MPa için: 51849518 ($5.1x10^7$) ortalama çevrim sayısı, 120 MPa için: 48963742 ($4.8x10^7$) ortalama çevrim sayısı ve 140 MPa için: 46574388 ($4.6x10^7$) ortalama çevrim sayısı elde edilirken, EKAP (2 paso) + Yarı katı işlem numunesinde, 100 MPa için: 48514076 ($4.8x10^7$) ortalama çevrim sayısı, 120 MPa için: 46352518 ($4.6x10^7$) ortalama çevrim sayısı ve 140 MPa için: 44869047 ($4.4x10^7$) ortalama çevrim sayısı elde edilmiştir. EKAP (3 paso) + Yarı katı işlem numunesinde ise; 100 MPa için: 44613758 ($4.4x10^7$) ortalama çevrim sayısı, 120 MPa için: 42152794 ($4.2x10^7$) ortalama çevrim sayısı ve 140 MPa için: 39454348 ($3,9x10^7$) ortalama çevrim sayısı elde edilirken, EKAP (4 paso) + Yarı katı işlem numunesinde ise; 100 MPa için: 42185366 ($4.2x10^7$) ortalama çevrim sayısı, 120 MPa için: 39076458 ($3.9x10^7$) ortalama çevrim sayısı ve 140 MPa için: 37643851 ($3.7x10^7$) ortalama çevrim sayısı elde edilmiştir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

Klasik döküm yöntemi ile dökümü yapılan AA7075 alaşımının APD yöntemi ile tane inceltme tekniğinin kullanıldığı EKAP ve mikroyapıda küresel tane yapısının oluşturularak biçimlendirildiği YKİ tekniklerinin ayrı – ayrı ve peşi sıra kullanılması ile AA7075 alaşımının mikroyapı, sertlik ve yorulma davranışı üzerine etkisinin araştırıldığı bu çalışmada aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

Çalışmalar kapsamında AA7075 malzemesi kullanılmıştır. AA7075–T6 kompozisyonundaki deney malzemeleri homojenize numune elde edilmesi amacıyla geleneksel döküm yöntemi kullanılarak dökümü yapılmıştır.

EKAP çalışmasında kullanılmak üzere; manuel rotasyon problemlerini ortadan kaldırmak ve çalışma zamanını etkili kullanabilmek adına yeni bir kalıp tasarımı yapılmıştır. Özellikle silindirik profilli malzemeler için yapılan tahmini rota çalışmaları, tasarımı yapılan kalıp ile kesin sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. İki parça halinde düşünülen kalıp, çalışma anında olabilecek herhangi bir problemi (kalıp içerisinde malzemenin sıkışması ya da kalıp kenarlarında oluşabilecek aşınma) kolaylıkla çözümleyebilmek amacıyla yapılmıştır. Bu anlamda tasarımı ve imalatı yapılan yeni kalıp “Hekza kalıp” olarak isimlendirilmiştir.

Tasarımı yapılan kalıbın, deneysel çalışmalara uygulandığında oluşabilecek problemleri ya da uygun çalışırlığını görebilmek amacıyla sonlu elemanlar analizinde Deform 3D programı kullanılmış ve simülasyonu yapılmıştır. Elde edilen değerler ile deneysel çalışma sonucunda alınan numuneler aynı özellikleri sergilemiştir.

EKAP çalışması için; kalıp, kalıp pimleri, kalıp tutucusu, fırın ve hidrolik presten oluşan bir EKAP sistemi kurulmuştur. Kurulan sistem ile amaçlanan EKAP çalışmaları, istenilen rotalarda ve paso sayılarında yapılmıştır. Kullanılan kalıp sisteminin çok yönlü uygulanabilir bir yapıya sahip olduğu ve rotasyon kapsamı, yapılan deneysel çalışmalarla test edilmiştir.

EKAP işleminde 1 – 2 – 3 ve 4 paso sayısı kullanılarak numuneler elde edilmiştir. Alınan numuneler boyutsal açıdan benzer özellikler gösterse de fiziksel açıdan 3 ve 4 paso EKAP yapılan numunelerin deformasyon görüntüleri makro düzeyde seçilebilmektedir.

EKAP işlemi sırasında, paso sayısına bağlı olarak pres kuvvetinde de değişimler gözlenmiştir. Artan sertlik davranışları, presleme kuvvetinin artışında da bir öneme sahiptir. 1 paso için 210 kN, 2 paso için 240 kN, 3 paso için 270 kN, 4 paso için 300 kN presleme kuvveti kullanılmıştır.

YKİ için EKAP çalışmalarında elde edilecek numune boyutları da düşünülerek yeni bir YKİ kalıbı tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Yapılan DSC analizi ile deneysel çalışmalarda kullanılacak numune için yarı katı sıcaklık aralıkları tespit edilmiştir. YKİ tekniği uygulanarak numuneler elde edilmiştir. İşlemin ardından EKAP yapılan numuneler de YKİ' den geçirilerek EKAP + YKİ numuneleri haline getirilmişlerdir.

Çalışmalar sonucunda elde edilen numunelerin metalografik işlemleri yapılmıştır. Metalografik işlemleri yapılan numuneler karakterizasyon işlemlerine hazır hale getirilmişlerdir. Karakterizasyon aşamalarında; optik mikroskop, SEM, EDS, fraktografi ve TEM çalışmaları yapılmıştır.

Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde, döküm mikroyapısının, kaba tanelerden oluştuğu ve dentritik tane yapısına sahip olduğu görülmüştür. EKAP işleminden geçirilen numunelerde ise tane yapısının çok küçüldüğü görülmekle birlikte tanelerde yönlenmelerin olduğu görülmüştür. Özellikle EKAP 4 paso yapılmış numunedeki tane sınırları ayrımları ve tanelerin yönlenmesi net bir şekilde görülebilmiştir. EKAP + YKİ sistemlerinin birlikte kullanıldığı numunelerde ise tane yapılarının döküm mikroyapısına göre daha ufak, EKAP yapılmış numunelere göre ise birmiktar daha büyük olduğu gözlenebilmektedir. EKAP + YKİ yapılmış numunelerdeki tane büyümesine ilaveten tane yapılarındaki küreselleşme dikkati çekmektedir. YKİ' den geçirilmiş numunede ise tane yapısı döküm yöntemi ile yapılmış numuneye göre boyutsal olarak daha ufak ancak EKAP ve YKİ birlikte uygulandığı numunelere göre ise bir miktar daha büyük olmakla birlikte tane şekillerinin daha küresel morfolojide oldukları gözlenmiştir.

Yapılan tane boyut ölçüm sonuçlarında EKAP 1 paso + YKİ malzemesinin yalnızca EKAP yapılan malzemelerde olduğu gibi çok küçük tane yapısına sahip olması sonucunda boyut ölçümü yapılamazken, EKAP 2 paso + YKİ için; 5.2 µm, EKAP 3 paso + YKİ için; 5.4 µm, EKAP 4 paso + YKİ için; 8.3 µm, YKİ için; 10.8 µm ve döküm numunesi için; 78.9 µm değerlerine ulaşılmıştır.

Alınan SEM ve EDS analizleri, yapılan işlemler sonucunda elde edilen numunelerdeki değişiklikler hakkında daha hassas sonuçlar göstermiştir. Analiz sonuçları; tane sınırları, tane boyutları, taneler arasındaki yönelme ve yapıdaki kimyasal analizler ile ayrı ayrı ve birleştirilmiş halde yapılan işlem adımları arasındaki farkları ortaya çıkarmıştır. Döküm mikroyapısının SEM görüntüleri incelendiğinde, çok belirgin büyüklükte tane yapısına sahip olduğu ve dentrit yapısı görülmüştür. Çeşitli paso sayılarında EKAP yapılmış numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde paso sayılarındaki artış ile birlikte tane sınırlarının daha belirgin bir şekilde yönlenmelere sahip olduğu görülmüştür. YKİ yapılmış numunelerin SEM görüntüleri incelendiğinde mikroyapı görüntülerinin küresel tane yapısı daha belirgin olarak görülmüştür. EKAP + YKİ yapılmış numunelerin SEM görüntüleri mikroyapı görüntülerinin yalnızca EKAP yapılmış numunelere göre daha küresel taneciklerden oluştuğu görülmüştür. İlk paso sayılarında numunelerdeki ufak ve küresel tane yapısı, paso sayısının artışı ile birlikte daha küçük tane boyutunda küresel taneciklere yerini bırakmıştır. EKAP yapılmış numunelerin, 1 paso sayısında belirli bir yöne doğru olan dizilimleri, paso sayısının artışı ile birlikte tanelerin yönelimlerinin karmaşıklaştığını ve birbirleri içerisine doğru girişimde bulunduklarını göstermektedir. Yarı katı işlem uygulanan malzemelerde ise tanecik yapısının, tane sınırlarından itibaren ayrılarak, EKAP paso sayısının etkisi ile küresel tane yapısı yerine daha oval bir yapı oluşturduğu gözlenmiştir.

Elde edilen malzemelerin sertlik değerleri Vickers cinsinden ölçülerek alınmıştır. Döküm numune en düşük sertliğe (97 HV) sahipken, EKAP işlemi yapılmış numunelerin sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. EKAP paso sayısının artışı ile birlikte sertlik değerinde de (1 paso = 105 HV, 2 paso = 117 HV, 3 paso = 124 HV ve 4 paso = 137 HV) yükselen bir grafik görülmüştür. Ancak 112 HV sertlik değerine sahip olan YKİ numunesi, EKAP + YKİ' e geldiğinde 1 paso için

171 HV' ye, 2 paso için 160 HV' ye, 3 paso için 158 HV' ye, 4 paso için 145 HV' değerlerine ulaştığı görülmüştür.

Döküm yoluyla ergitilerek homojenize AA7075 malzemesi, EKAP ve Yarı katı işlemlerinin ardından yorulma davranışının incelenmesi amacıyla 4 nokta eğilmeli yorulma test cihazı kullanılarak yorulma deneyine tabi tutulmuşlardır. Yorulma deneyleri için akma noktasının hemen altında alınan gerilme miktarları ile uzun ömürlü yorulma çalışması yapılmıştır. EKAP yapılmış deney numunelerinde ise her bir paso için ayrı ayrı yorulma deneyleri yapılarak sonuçlar elde edilmiştir. Döküm numune için yapılan yorulma deneyinde 70MPa, 85MPa ve 100MPa olmak üzere 3 farklı gerilme yükü uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar da 70 MPa için: $7.5x10^6$ ortalama çevrim sayısı, 85 MPa için: $6.9x10^6$ ortalama çevrim sayısı ve 100 MPa için: $6.5x10^6$ ortalama çevrim sayısı elde edilmiştir. EKAP yapılan numunelerde ise en yüksek yorulma değerleri 4 paso numunesinde görülmüştür. EKAP 4 paso numunesinde: 100 MPa için: $5.4x10^7$ ortalama çevrim sayısı, 120 MPa için: $5.0x10^7$ ortalama çevrim sayısı ve 140 MPa için: $4.5x10^7$ ortalama çevrim sayısı elde edilmiştir. Yalnızca Yarı katı işlem yapılmış deney numunelerinin yorulma analizi sonuçlarında; 100 MPa için: $6.2x10^7$ ortalama çevrim sayısı, 120 MPa için: $5.9x10^7$ ortalama çevrim sayısı ve 140 MPa için: $5.5x10^7$ ortalama çevrim sayısı elde edilmiştir. EKAP + YKİ numunelerinde ise en yüksek yorulma değerine EKAP 1 paso + YKİ yapılan numunede ulaşılmıştır. EKAP (1 paso) + Yarı katı işlem numunesinde, 100 MPa için: $5.1x10^7$ ortalama çevrim sayısı, 120 MPa için: $4.8x10^7$ ortalama çevrim sayısı ve 140 MPa için: $4.6x10^7$ ortalama çevrim sayısı elde edilimiştir. EKAP yapılmış numuneler ile EKAP + Yarı katı işlem yapılmış numunelerin yorulma değerleri arasındaki zıtlık dikkati çekmektedir. EKAP yapılmış malzemelerde paso sayısındaki artış ile birlikte yorulma değerlerinde de artış görülürken, EKAP + Yarı katı işlem yapılan numunelerde yorulma değerlerinin paso sayısındaki artış ile azalmaya başladığı ve en yüksek değerin EKAP 1 paso + Yarı katı işlem sonucunda elde edildiği belirlenmiştir.

Döküm, EKAP (1 – 2 – 3 ve 4 paso), YKİ, EKAP 1 paso + YKİ, EKAP 2 paso + YKİ, EKAP 3 paso + YKİ, EKAP 4 paso + YKİ yapılmış AA7075 alaşımlarının dört nokta eğilmeli yorulma testleri yapılmıştır. Kırık yüzey bölgeleri incelendiğinde, döküm yapısının EKAP numunelerine göre sünek-gevrek yapı sergilediği bir kırılma

görülmektedir. EKAP yapılmış numunelerde ise paso sayısındaki artış ile birlikte kırılmanın gözlendiği çukurcuklar daha ufak boyutlarda oluşmuştur. YKİ numunelerinin kırılma yüzeylerinde küresel yapılı tanecikler görülmektedir. Yalnızca YKİ yapılan numunedeki yorulma kırılmasına sebep olan çukurcuk boyutunun EKAP + YKİ yapılan numunelere oranla daha büyük olduğu görülmüştür.

EKAP (1 paso, 2 paso, 4 paso), EKAP 1 paso + YKİ, EKAP 2 paso + YKİ, EKAP 4 paso + YKİ yapılmış AA7075 alaşımına ait geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüleri ile difraksiyon paterni mikroyapı analizleri yapılmıştır. YKİ + EKAP yapılmış numunelerin aynı paso sayılarında yalnızca EKAP yapılmış numunelere göre tane yapıları daha iri olduğu bu nedenle artan paso sayısı ile tane yapısında da deformasyon oluşturulmakta ve tane boyutlarının küçüldüğü görülmüştür. Deformasyon akış çizgileri ve tane sınırları YKİ yapılmış numunelerde işlem sıcaklığının da etkisi ile birlikte net olarak görülmektedir. EKAP işleminde aşırı plastik deformasyon işlemi ile birlikte yeni tane sınırları gelişmiş ve bununla birlikte tane küçülmeleri meydana gelmiştir. Alınan SAD görüntülerinde 1 ve 2 pasoda düzenli bir noktasal dizilme görülmezken 4 pasoda daha düzenli bir noktasal dizilme olduğu görülmektedir. AA7075 alaşımı döküm mikroyapısında çubuk benzeri bir yapıda görülen $MgZn_2$ çökeltisi EKAP işlemi ile birlikte daha küçük küresel parçacıklara ayrılarak numune boyunca dağılım göstermiştir.

4.2. Öneriler

Silindirik numuneler için yapılan deneyler, kalıp profili değiştirilerek dört köşe ya da çeşitli profillerde numuneler içinde yapılabilir.

Yorulma testleri haricinde numunelerin mekanik özelliklerinin tespitinde çekme, çentik darbe ve aşınma testleri de uygulanarak diğer özellikleri elde edilebilir.

Farklı rotalar denenerek, rotalar arasındaki değişimin mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisi; yeni tasarım olarak yapılan kalıpta doğru açılar kullanılabildiği için denenebilir.

Nihai bir ürün için tasarlanan ve imal edilen bir kalıp ile benzer çalışmalar yapılarak, kullanım özellikleri karşılaştırılabilir.

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen malzemelerin, EKAP ve YKİ teknikleri kullanılarak yapılan tez çalışmasındaki sonuçlar ile karşılaştırılabilir.

Yapılan doktora tez çalışması sonucunda; elde edilen ürünler, AA7075 malzemesinin savunma sanayii'nde sıklıkla kullanılması sebebiyle, özellikle uçak gövde ve kanatlarının birleştirilmesi aşamalarında perçin malzemesi olarak kullanılabilir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, EKAP ve YKİ ile şekillendirme işlemine tabi tutulan numunelerde, sertlik ve yorulma dayanımı testlerine göre, oluşturulması hedeflenen nihai ürünler için EKAP 1 paso + YKİ ile elde edilmiş numuneler önerilmektedir.

KAYNAKLAR

[1] Güleç Ş., Aran A., *Malzeme bilgisi cilt 1: Metal malzemelere genel bakış*, 2. baskı, Tügam Matbaası, İstanbul, 1985.

[2] Roven H., Jens W., Conventional light alloys towards the bottom-a phisical metallurgical approach, *Nanomat conference*, Oslo, Norway, 3-4 June 2004.

[3] Doherty R. D., Lee H., Feest E. A., Microstructure of stir-cast metals, *Mater. Sci. Eng.*, 1984, **65**, 181–189.

[4] Macheret J., Korth E. G., Lillo T. M., Watkins A. D., Flinn J. E., Herling D. R., Smith M. T., Scwarz R. B., Equal channel angular extrusion, *Idaho National Engineering and Environmental Laboratory*, INEEL/EXT-99-00459, 76-92, 1999.

[5] Stoica G. M., Liaw P. K., Progress in equal channel angular processing, *J. O. M.*, 2001, **53**, 36-40.

[6] Kim H. S., Seo M. H., Hong S. I., Plastic deformation analysis of metals during equal channel angular pressing, *J. Mater. Process. Tech.*, 2001, **113**, 622-626.

[7] Bergsma S. C., Tolle M. C., Kassner M. E., Li X., Evangelista E., Semi solid thermal transformations of Al-Si alloys and the resulting mechanical properties, *Mat. Sci. Eng. A-Struct.*, 1997, **237**, 24-34.

[8] Wöhler A., Wöhler' s experiments on the strength of metals, *Engineering*, 1967, **2**, 160-169.

[9] Savaşkan T., *Malzeme bilgisi ve muayenesi*, 2. baskı, Derya Kitabevi, Trabzon, 1999.

[10] Valiev R. Z., Langdon T. G., Principles of equal channel angular pressing as a processing tool for grain rafinement, *Prog. Mater. Sci.*, 2006, **51**, 881-981.

[11] Lee S., Langdon T. G., Influence of Equal-Channel Angular Pressing on the Superplastic Properties of Commercial Aluminum Alloys, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 2000, **601**, 359-364.

[12] Segal V. M., Reznikov V. I., Drobyshevskiy A. E., Kopylov V. I., Plastic working of metals by simple shear, *Russian Metall.*, 1981, **1**, 99-105.

[13] Valiev R. Z., Krasilnikov N. A., Tsenev N. K., Plastic deformation of alloys with submicro-grained structure, *Mater. Sci. Eng. A*, 1991, **137**, 35-40.

[14] Kaya H., Uçar M., Özyürek D., Cengiz A., Eş kanallı açısal presleme yönteminin malzeme özelliklerine etkisi, *Metal Dünyası*, 2008, **183**, 109-111.

[15] Valiev R. Z., Tsenev N. K., Hot deformation of aluminum alloys, Editors: Langdon T. G., Merchant H. D., Morris J. G., Zaidi M. A., *The minerals, metals and materials society,* 1st ed., PA Press, Warrendale, 319-356, 1991.

[16] Valiev R. Z., Korznikov A. V., Mulyukov R. R., Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation, *Mater. Sci. Eng. A*, 1993, **168**, 141-148.

[17] Valiev R. Z., Ultrafine-grained materials processed by severe plastic deformation, *Annales de Chimie*, 1996, **21**, 369-554.

[18] Segal V. M., Materials processing by simple shear, *Mater. Sci. Eng. A*, 1995, **197**, 157-164.

[19] Kim H. S., Seo M. H., Hong S. I., On the die corner gap formation in equal channel angular pressing, *Mater. Sci. Eng. A*, 2000, **291**, 86-90.

[20] Chang C. P., Sun P. L., Kao P. W., Deformation induced grain boundaries in commercially pure aluminium, *Acta Mater.*, 2000, **48**, 3377-3385.

[21] Berbon P. B., Furukawa M., Horita Z., Nemeto M., Langdon T. G., Influence of pressin speed on microstructural development in equal channel angular pressing, *Metall. Mater. Trans. A*, 1999, **30**, 1989 – 1997.

[22] Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V., Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Prog. Mat. Sci.*, 2000, **45**, 103-189.

[23] Kim H. S., Seo M. H., Hong S. I., Finite element analysis of equal channel angular pressing of strain rate sensitive metals, *J. Mater. Process. Tech.*, 2002, **130**, 497-503.

[24] Nemoto M., Horita Z., Furukawa M., Langdon T. G., Equal-channel angular pressing: a novel tool for microstructural control, *Metals. Mater.*, 1998, **4**, 1181.

[25] Horita Z., Furukawa M., Nemoto M., Langdon T. G., Development of fine grained structures using severe plastic deformation, *Mater. Sci. Tech.*, 2000, **16**, 1239-1245.

[26] Furukawa M., Horita Z., Langdon T. G., Factors Influencing Microstructural Development in Equal-Channel Angular Pressing, *Metals. Mater.*, 2003, **9**, 141-149.

[27] Furukawa M., Horita Z., Langdon T. G., Factors Influencing the Shearing Patterns in Equal-Channel Angular Pressing, *Mater. Sci. Eng. A*, 2002, **332**, 97-109.

[28] Yamaguchi D., Horita Z., Nemoto M., Langdon T. G., Significance of Adiabatic Heating in Equal-Channel Angular Pressing, *Scripta Mater.*, 1999, **41**, 791-796.

[29] Park K., Hwang D., Lee Y., Kim Y., Shin D., High strain rate superplasticity of submicrometer grained 5083 Al alloy containing scandium fabricated by severe plastic deformation, *Mater. Sci. Eng. A*, 2003, **341**, 273-281.

[30] Yamashita A., Yamaguchi D., Horita Z., Langdon T. G., Influence of pressing temperature on microstructural development in Equal-Channel Angular Pressing, *Mater. Sci. Eng. A*, 2000, **287**, 100-106.

[31] Shin D. H., Pak J. J., Kim Y. K., Park K. T., Kim Y. S., Effect of pressing temperature on microstructure and tensile behavior of low carbon steels processed by Equal Channel Angular pressing, *Mater. Sci. Eng. A*, 2002, **325**, 31- 37.

[32] Chen Y. C., Huang Y. Y., Chang C. P., Kao P. W., The effect of extrusion temperature on the development of deformation microstructures in 5052 aluminum alloy processed by equal channel angular extrusion, *Acta Mater.*, 2003, **51**, 2005-2015.

[33] Huang W. H., Yu C. Y., Kao P. W., Chang C. P., The effect of strain path and temperature on the microstructure developed in copper processed by ECAE, *Mater. Sci. Eng. A*, 2004, **366**, 221-228.

[34] Malek P., Cieslar M., Islamgaliev R. K., The influence of ECAP temperature on the stability of AL-Zn-Mg-Cu alloy, *J. Alloys Compounds*, 2004, **378**, 237-241.

[35] Goloborodko A., Sitdikov O., Kaibyshev R., Miura H., Sakai T., Effect of pressing temperature on fine-grained structure formation in 7475 aluminum alloy during ECAP, *Mater. Sci. Eng. A*, 2004, **381**, 121-128.

[36] Wang Y. Y., Sun P. L., Kao P. W., Chang C. P., Effect of deformation temperature on the microstructure developed in commercial purity aluminum processed by equal channel angular extrusion, *Scripta. Mater.*, 2004, **50**, 613-617.

[37] Kim I., Kim J., Shin D. H., Lee C. S., Hwang S. K., Effect of equal channel angular pressing temperature on deformation structures of pure Ti, *Mater. Sci. Eng. A*, 2003, **342**, 302-310.

[38] Raab G. I., Krasilnikov N. A., Alexandrov I. V., Valiev R. Z., Structure and properties of copper after ECA-pressing in conditions of elevated pressures, The Physics and Engineering of High Pressures, *Russ. Metall.*, 2000, **10**, 73-77.

[39] Stolyarov V. V., Lapovok R., Brodova I. G., Thomson P. F., Ultrafine-grained Al-5wt.%Fe alloy processed by ECAP with backpressure, *Mater. Sci. Eng. A*, 2003, **357**,159-167.

[40] Stolyarov V. V., Lapovok R., Effect of backpressure on structure and propertiesof AA5083 alloy processed by ECAP, *J. Alloys Compounds*, 2004, **378**, 233- 236.

[41] Ivanisenko Y., Krasilnikov N. A., Banhart F., Kolesnikov D., Valiev R., Lojkowski W., Fecht H. J., Nanocrystalline Fe – 1 wt. %C compacts obtained by high pressure torsion of mechanically alloyed powder, *Chim. Sci. Mat*., 2002, **27**, 45-53.

[42] Lapovok R., Thomson P. F., Cottam R., Estrin Y., Processing routes leading to superplastic behaviour of magnesium alloy ZK60, *Mater. Sci. Eng. A*, 2005, **410**, 390-393.

[43] Valiev R. Z., Alexandrov I. V., Lowe T. C., Zhu Y. T., Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation, *J. Mater. Res.*, 2002, **17**, 5-8.

[44] Torre F. D., Lapovok R., Sandlin J., Thomson P. F., Davies C. H. J., Pereloma E.V., Microstructures and properties of copper processed by equal channel angular extrusion for 1-16 passes, *Acta Mater.*, 2004, **52**, 4819-4832.

[45] Kumar S. R., Gudimetla K., Venkatachalam P., Ravisankar B., Jayasankar K., Microstructural and mechanical properties of Al 7075 alloy processed by Equal Channel Angular Pressing, *Mater. Sci. Eng. A*, 2012, **533**, 50 - 54.

[46] Eisen P., Young K., Diecasting system for semi-liquid and semisolid metal casting and applications, *Proceedings of the Sixth International Conference on Semisolid Processing of Alloys and Composites*, Turin, Italy, 27-29 September 2000.

[47] Kapranos P., Kirkwood D. H., Sellars C. M., Thixoforming high melting point alloys in non-metallic dies, *Proceedings of the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Sheffield, England, 18-21 June 1996.

[48] Kapranos P., Kirkwood D. H., Sellars C. M., Semi-solid forging of high temperature alloys, *The Second International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Massachusetts, USA, 10-12 June 1992.

[49] Tietmann A., Bremer T., Hirt G., Kopp R., Preliminary results in thixoforming aluminum wrought alloys, *Proceedings of the Second International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Massachusetts, USA, 10-12 June 1992.

[50] Kouji S., The characteristics of thixoforming products, *Proceedings of the 17th JSTP symposium for Semi-Soild Metals Forming*, Tokyo, Japan, 1-3 November 1997.

[51] Flemings M. C., Solidification processing, *Metall. Mater. Trans. B*, 1974, **5**, 2121-2134.

[52] Atkinson H. V., Kapranos P., Chayong S., Semi solid processing of aluminum 7075, *Proceedings of 6th International Conference on Semi solid of Alloys and Composites*, Turin, Italy, 27-29 September 2000.

[53] Kang C. G., Choi J. S., Kim K. H., The effect of strain rate on macroscopic behavior in the compression forming of semi-solid aluminum alloy, *J. Mater. Process. Tech.*, 1999, **88**, 159-168.

[54] Idegomori T., Hirono H., Ito O., Kimishima S., Mizoue K., The manufacturing of automobile parts using semi-solid metal processing, *Proceedings of the Fifth International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Colorado, USA, 23-25 June 1998.

[55] Hirt G., Cremer R., Winkelmann A., Witulski T., Zillgen M., Semi solid forming of aluminum alloys by direct forging and lateral extrusion, *J. Mater. Process. Tech.*, 1994, **45**, 359-364.

[56] Choi J. C., Park H. J., Kim B. M., The influence of induction heating on the microstructure of A356 for semi-solid forging, *J. Mater. Process. Tech.*, 1999, **87**, 46-52.

[57] Kang C. G., Kang S. S., Jung H. K., Influence of process parameters on the defects in thixoforming of cast and wrought aluminum alloys, *Proceedings of the 6th International Conference on Technology of Plasticity*, Nuremberg, Germany, 19-24 September 1999.

[58] Kitamura K., Ando T., Hironaka K., Yahata S., Yoshida C., Semi-solid alloys and composites, *Proceedings of the 3rd International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Tokyo, Japan, 13-15 June 1994.

[59] Yoshida C., Moritaka M., Shinya S., Takebayashi K., Nanba A., Semi-solid forging of aluminum alloy, *Proceedings of the Second International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites*, Cambridge, U. K., 10-12 June 1992.

[60] Camacho A. M., Atkinson H. V., Kapranos P., Argent B. B, Thermodynamic predictions of wrought alloy compositions amenable to semi-solid processing, *Acta Mater.*, 2003, **51**, 2319-2330.

[61] Suzuki S., Haga T., Casting of aluminum alloy ingots for thixoforming using a cooling slope, *J. Mater. Process. Tech.*, 2001, **118**, 169-172.

[62] Jung H. K., The induction heating process of semi-solid aluminum alloys for thixoforming and their microstructure evaluation, *J. Mater. Process. Tech.*, 2000, **105**, 176-190.

[63] Cho W. G., Kang C. G., Mechanical properties and their microstructure evaluation in the thixoforming process of semi-solid aluminum alloys, *J. Mater. Process. Tech.*, 2000, **105**, 269-277.

[64] Stephens R. I., Fatemi A., Stephens R. R., Fatigue design criteria, Editor: Fuchs H. O., *Metal fatigue in engineering*, 2nd ed., John Wiley&Sons Press, New York, 19-31, 2001.

[65] Peterson R. E., Discussion of a Century Ago Concerning the Nature of Fatigue, and Review of Some of the Subsequent Researches Concerning the Mechanism of Fatigue, *ASTM Bull.*, 1950, **164**, 50.

[66] Bauschinger J., *On the change of the position of the elastic limit of iron and steel under cyclic variations of stress*, 13th ed., Mitt. Mech-Tech. Lab. Press, Munich, Germany, 1886.

[67] Dowling N. E., *Mechanical behaviour of materials: methods for deformation, fracture and fatigue*, 2nd ed., Prentice Hall, USA, 1999.

[68] Meyers M. A., Chawla K. K., *Mechanical behaviour of materials*, 2nd ed., Prentice Hall, ABD, 1999.

[69] Saatçı G. E., Tahralı N., Birikimli Hasar Teorileri Ve Yorulma Çatlağına Göre Ömür Değerlendirmeleri, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 2003, **1**, 33-39.

[70] Barsom J. M., Rolfe S. T., *Fracture and fatigue control in structures: applications of fracture mechanics*, 3rd ed., ASTM, New York, 1999.

[71] Kaya H., Uçar M., Cengiz A., Ergün R. E., Malzemelerde yorulma tasarım kriterleri ve yorulma test cihazları, *Metal Dünyası*, 2011, **223**, 82-89.

[72] Nakashima K., Horito Z., Nemoto M., Langdon T., Influence of channel angle on the development of ultrafine grains in Equal-Channel Angular Pressing, *Acta Mater.*, 1998, **46**, 1589-1599.

[73] Doherty R. D., Lee H., Feest E., Microstructure of stir-cast metals, *Mater. Sci. Eng.*, 1984, **65**, 181–189.

[74] Field D. P., Metallurgy and microstructure, Editor: Voort G. F., *Metallography and microstructures*, 9th ed., ASM Press, Ohio, 51-557, 2004.

[75] Ekşi A., Veltl G., Petzoldt F., Lipp G. K., Sonsino C. M., Tensile and fatigue properties of cold and warm compacted alumix 431 alloy, *Powder Metall.*, 2004, **47**, 60-64.

[76] Genel K., The effect of pitting on the bending fatigue performance of high-strength aluminum alloy, *Scripta Mater.*, 2007, **57**, 297-300.

[77] Puchi-Cabrera E. S., Villobobos-Gatierrez C., Irausquin I., Barbera-Sosa J. L, Masmacque G., Fatigue behavior of a 7075-T6 aluminum alloy coated with an electroless Ni-P deposit, *Int. J. Fatigue*, 2006, **28**, 1854-1866.

[78] Puchi-Cabrera E. S., Staia M. H., Lesage J., Gil L., Villobobos-Gatierrez C., Barbera-Sosa J. L, Ochoa-Perez E. A., Bourhis E. L., Fatigue behavior of

AA7075-T6 aluminum alloy coated with ZrN by PVD, *Int. J. Fatigue*, 2008, **30**, 1220-1230.

[79] Verma B. B., Atkinson J. D., Kumar M., Study of fatigue behavior of 7475 aluminium alloy, *Bull. Mater. Science*, 2001, **24**, 231-236.

[80] Fine M. E., Chung Y., Fatigue mechanisms, crack growth and testing, Editor: Lampman S., *Fatigue and fracture*, 19th ed., ASM Press, Ohio, 148-552, 1996.

[81] Mcevily A. J., The microstructure and design of alloys, *Proceedings of the 3rd International Conference Strength of Metals and Alloys*, Cambridge, U. K., 20-24 August 1973.

[82] Morrow J., *Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals*, 8th ed., ASTM, Philadelphia, 1965.

[83] Becker W. T., Lampman S., Fracture, Editors: Shipley R. J., Becker W. T., *Failure analysis and prevention*, 11th ed., ASM Press, Ohio, 1162-2908, 2002.

[84] Coffin Jr. L. F., Strain cycling and thermal stress fatigue, *4th Sagamore Research Conference on High Temperature Materials, Their Strength Potentials and Limitations,* New York, U. S. A., 21-23 August1957.

[85] Langer B. F., Design of pressure vessels for low-cycle fatigue, *J. Basic Eng.*, 1962, **3**, 389-396.

[86] Manson S. S., Tavernelli J. F., Coffin Jr. L. F., Experimental support for generalized equation predicting low cycle fatigue, *J. Basic Eng.,* 1962, **85**, 537–541.

[87] Forman R. G., Kearney R. E., Engle R. M., Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures, *J. Basic Eng.*, Trans. ASME, 1967, **89**, 459-464.

[88] Murakami Y., Fatigue testing, Editors: Kuhn H., Medlin D., *Mechanical testing and evaluation*, 8th ed., ASM Press, Ohio, 1571-2234, 1973.

[89] Putnam W. J., Harsch J. W., An investigation of the fatigue of metals, Editors: Moore H. F., Kommers J. B., *Rise of temperature method of determining endurance limit*, 2nd ed., Station bulletin Press, Illinois, 119-127, 1921.

[90] Das P., Jayaganthan R., Chowdhury T., Singh I. V., Fatigue behaviour and crack growth rate of cryorolled Al 7075 alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, 2011, **528**, 7124-7132.

[91] Djavanroodi F., Ebrahimi M., Effect of die parameters and material properties in ECAP with parallel channels, *Mater. Sci. Eng. A*, 2012, **527**, 7593-7599.

[92] Cerri E., De Marco P. P., Leo P., FEM and metallurgical analysis of modified 6082 aluminium alloys processed by multipass ECAP: Influence of material

properties and different process settings on induced plastic strain, *J. Mater. Process. Tech.,* 2009, **209**, 1550-1564.

[93] Mani B., Jahedi M., Paydar M. H., A modification on ECAP process by incorporating torsional deformation, *Mater. Sci. Eng. A*, 2011, **528**, 4159–4165.

[94] Abd El Aal M. I., Influence of the pre-homogenization treatment on the microstructure evolution and the mechanical properties of Al–Cu alloys processed by ECAP, *Mater. Sci. Eng. A*, 2011, **528**, 6946-6957.

[95] Fredriksson H., Akerlind U., *Materials procesing during casting*, 3rd ed., John Wiley & Sons, West Sussex, 2006.

[96] Chayong S., Atkinson H. V., Kapranos P., Thixoforming 7075 aluminium alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, 2005, **390**, 3-12.

[97] Dong J., Cui J. Z., Le Q. C., Lu G. M., Liquidus semi-continuous casting, reheating and thixoforming of a wrought aluminum alloy 7075, *Mater. Sci. Eng. A*, 2003, **345**, 234-242.

[98] Atkinson H. V., Burke K., Vaneetveld G., Recrystallisation in the semi-solid state in 7075 aluminium alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **490**, 266-276.

[99] Ashouri S., Nili-Ahmadabadi M., Moradi M., Iranpour M., Semi-solid microstructure evolution during reheating of aluminum A356 alloy deformed severely by ECAP, *J. Alloy. Compd.*, 2008, **466**, 67-72.

[100] Nedjad S. H., Meidani H., Ahmadabadi M. N., Effect of equal channel angular pressing on the microstructure of a semisolid aluminum alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **475**, 224-228.

[101] Horita Z., Fujinami T., Nemoto M., Langdon T. G., Improvement of mechanical properties for Al alloys using equal-channel angular pressing, *J. Mater. Process. Tech.*, 2001,**117**, 288-292.

[102] Tong L. B., Zheng M. Y., Hu X. S., Wu K., Xu S. W., Kamado S., Kojima Y., Influence of ECAP routes on microstructure and mechanical properties of Mg–Zn–Ca alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, 2010, **527**, 4250–4256.

[103] Lee R., *Structure-property relations in nonferrous metals*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2005.

[104] Erdoğan M., *Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri*, 2. baskı, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2002.

[105] Zhao Y. H., Liao X. Z., Jin Z., Valiev R. Z., Zhu Y. T., Microstructures and mechanical properties of ultrafine grained 7075 Al alloy processed by ECAP and their evolutions during annealing, *Acta Mater.*, 2004, **52**, 4589-4599.

[106] Cardosoa K. R., Travessaa D. N., Bottac W. J., Jorge Jr. A. M., High strength AA7050 Al alloy processed by ECAP: Microstructure and mechanical properties, *Mater. Sci. Eng. A*, 2011, **528**, 5804-5811.

[107] El-Danaf E. A., Mechanical properties and microstructure evolution of 1050 aluminum severely deformed by ECAP to 16 passes, *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, **487**, 189-200.

[108] Furukawa M., Horita Z., Langdon T. G., Processing by Equal-Channel Angular Pressing: Applications to Grain Boundary Engineering, *J. Mater. Sci.*, 2005, **40**, 909–917.

[109] Mathieu J. P., Suwas S., Eberhardt A., T´oth L. S., Moll P., A new design for equal channel angular extrusion, *J. Mater. Process. Tech.*, 2006, **173**, 29–33.

[110] Vasudevan A. K., Sadananda K., Rajan K., Role of microstructures on the growth og long fatigue cracks, *Int. J. Fatigue*, 1997, **93,** 151–159.

[111] Zhao T., Jiang Y., Fatigue of 7075-T651 aluminum alloy, *Int. J. Fatigue*, 2008, **30**, 834-849.

[112] Clark Jr. R., Coughran B., Traina I., Hernandez A., Scheck T., Etuk C., Peters J., Lee E. W., Ogren J., Es-Said O. S., On the correlation of mechanical and physical properties of 7075-T6 Al alloy, *Eng. Fail. Anal.*, 2005, **12**, 520-526.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

[1] **Kaya H.**, Uçar M., Cengiz A., Özyürek D., Çalışkan A., Ergün R.E., The effect of aging on the machinability of AA7075 aluminium alloy, *Sci. Res. Essays*, 2012, **7** (27), 2424-2430.

[2] **Kaya H**., Uçar M., Cengiz A., Ergün R.E., Malzemelerde Yorulma Tasarım Kriterleri ve Yorulma Test Cihazları, *Metal Dünyası*, 2011, **223**, 82-89.

[3] **Kaya H.**, Uçar M., Korozyonlu Yorulma ve Hasar Analizi Tespiti, *Metal Dünyası*, 2009, **193**, 92-95.

[4] **Kaya H**., Uçar M., Katodik Korumanın Endüstrideki Kullanım Alanı, *Metal Dünyası*, 2009, **199**, 80-84.

[5] **Kaya H**., Uçar M., Özyürek D., Cengiz A., Eş Kanallı Açısal Presleme Yönteminin Malzeme Özelliklerine Etkisi, *Metal Dünyası*, 2008, **183**, 109-111.

[6] **Kaya H**., Özyürek D., Spex Tipi Mekanik Alaşımlama/Mekanik Öğütme Cihazı ile Üretilen TiB2 Parçacık Takviyeli Alüminyum Bazlı Kompozit Tozların Karakterizasyonu, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2006, **10 (3)**, 460-464.

[7] **Kaya H**., Cengiz A., Uçar M., Talaş formuna bağlı olarak 7075 Al alaşımının işlenebilirlik parametrelerinin uygunluğunun tespit edilmesi, *II. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, Konya, Türkiye, 1-2 Ekim 2010.

[8] **Kaya H.**, Design and Production of Spex Type Mechanical Alloying Machine and Research of Milling Ability - Spex Tipi Mekanik Alaşımlama Cihazının Tasarımı, İmalatı ve Öğütme Kabiliyetinin İncelenmesi, *5th Internetional Advanced Technologys Symposium*, *Metallurgical - Materials*, Karabük, Türkiye, 15-17 Mayıs 2009.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Gölcük/KOCAELİ' nde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Gölcük' te, lise öğrenimini ise İzmit' te tamamladı. 1996 yılında girdiği Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Döküm Öğretmenliği Bölümünden 2000 yılında Bölüm, Fakülte ve Üniversite birincisi olarak mezun oldu. 2000-2003 yılları arasında, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı' nda Yüksek Lisans öğrenimini Tübitak Bilim Adamı Yetiştirme Grubu (BAYG) tarafından desteklenerek tamamladı. 2004 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Asım Kocabıyık Meslek Yüksekokulu' nda Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.