

**EŞİT KANAL-AÇISAL PRESLEME YÖNTEMİ İLE 7075
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA NANO BOYUTLU TANE ÜRETİMİ
VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONUN BELİRLENMESİ**

Alper AYTAÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2010
ANKARA**

Alper AYTAÇ tarafından hazırlanan EŞİT KANAL-AÇISAL PRESLEME YÖNTEMİ İLE 7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA NANO BOYUTLU TANE ÜRETİMİ VE MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONUN BELİRLENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylıyorum.

Prof. Dr. Süleyman TEKELİ
Tez Yöneticisi, Metal Eğitimi

.....

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Süleyman TEKELİ
(Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi)

.....

Prof. Dr. Metin GÜRÜ
(Kimya Mühendisliği, Gazi Üniversitesi)

.....

Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜRAL
(Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi)

.....

Tarih: 28/06/2010

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Alper AYTAÇ

**EŞİT KANAL-AÇISAL PRESLEME YÖNTEMİ İLE 7075
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA NANO BOYUTLU TANE ÜRETİMİ VE
MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONUN BELİRLENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Alper AYTAÇ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
HAZİRAN 2010**

ÖZET

Bu çalışmada ilk olarak Eşit Kanal Açisal Presleme (EKAP) ünitesi kurularak kalıp sisteminin, yağlayıcıların ve presin testleri yapılmıştır. Daha sonra en etkili aşırı plastik deformasyon yöntemi olan EKAP işlemi ile 7075 Alüminyum alaşımlarında nano boyutlu taneler üretilmeye çalışılmıştır. EKAP işlemi rota C, 200°C sabit kalıp sıcaklığı, 90°'lik kalıp kanal açısı ve 2 mms⁻¹'lik pres zımbası ilerleme hızında gerçekleştirilmiştir.

EKAP işlemi ile üretilen 7075 Alüminyum alaşımları; TEM (Geçirmli Elektron Mikroskobu), SAD (Seçili Alan Kırınım), makro görüntüler ve sertlik sonuçları değerlendirilerek karakterize edilmiştir.

Bu çalışmada EKAP işlemi ile 7075 Alüminyum alaşımlarında nano boyutlu taneler üretilmiş, mikro yapı bakımından optimum pas sayısının 14 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca 10 pastan itibaren uyumsuz ve geniş açılı tane sınırları oluşmaya başlamıştır. En yüksek sertlik değerine ise 6 pas uygulanan malzemede ulaşılmıştır.

Bilim Kodu : 710.1.092
Anahtar Kelimeler : Eşit Kanal-Açısal Presleme, Ultra İnce Taneli Yapı,
Mikroyapısal karakterizasyon
Sayfa Sayısı : 67
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Süleyman TEKELİ

**PRODUCTION OF NANO SIZED GRAINS IN 7075 ALUMINIUM ALLOYS
BY EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING METHOD AND
DETERMINATION OF MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION
(M. Sc. Thesis)**

Alper AYTAÇ

**GAZI ÜNİVERSİTESİ
İNSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
JUNE 2010**

ABSTRACT

In this study; first of all, equal channel angular pressing (ECAP) unit was constructed and die system, lubricant and pres tests were carried out. After that, by using the most effective severe plastic deformation method of ECAP, nanosized grains in 7075 aluminum alloys were tried to be produced. ECAP processing was carried out using Route C, at constant temperature of 200°C , die channel of 90° and press punch speed of 2mms⁻¹.

ECAPed 7075 aluminum alloys were then characterized by TEM, SAD, hardness and macrostructural investigations.

In this study, nanosized grains in 7075 aluminum alloys were produced by ECAP method, the optimum number of pass was microstructurally determined to be 14. Also, occurrence of misorientated and wide angle grain boundaries started after 10 passes. The highest hardness values reached in 6 times ECAP passed materials.

Science Code : 710.1.092
Key Words : Equal Channel Angular Pressing, Ultra Fine Grain Structure,
Microstructural characterization
Page Number : 67
Adviser : Prof. Dr. Süleyman TEKELİ

TEŞEKKÜR

Araştırma ve deneysel çalışmalarında desteklerinden ve engin bilgi birikimlerinden beni mahrum etmeyen ve devamlı olarak destekleyen tez danışmanım ve hocam Prof. Dr. Süleyman TEKELİ'ye teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Çalışmalarında maddi ve manevi desteklerinden dolayı, Yrd. Doç. Dr. Ahmet Güral'a ve Doç. Dr Dursun ÖZYÜREK'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında yardımlarından dolayı Doç.Dr. Bülent BOSTAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Beni yalnız bırakmayan ve yardımlarını esirgemeyen biricik dostlarım Öğr. Gör. Sinan AKSÖZ'e, Mustafa TÜRKAN'a, Hakan GÖKMEŞE'ye, Tansel TUNÇAY'a ve Erkan KİBAR'a teşekkürlerimi iletirim. Tezimde yardımda bulunan ve bulunmayan tüm dostlarıma saygılarımı ve minnettarlığımı iletirim.

Yüksek lisans çalışmalarında maddi ve manevi olarak benden desteğini esirgemeyen anneme, babama, biricik teyzeme, yengeme ve aile bireylerimin hepsine teşekkürü bir görev bilirim. Ayrıca hayat arkadaşım Merve BAYRAKTAR'a sonsuz desteğinden dolayı şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
2. ULTRA İNCE TANELİ MALZEMELER.....	3
2.1. Ultra İnce Taneli Malzemelerin Üretim Yöntemleri	4
3. EŞİT KANAL AÇISAL PRESLEME (EKAP).....	6
3.1. EKAP İşlemini Etkileyen Parametreler	8
3.1.1. EKAP deformasyon yön ve açıları	8
3.1.2 Kanal açıları	10
3.1.3. Pas sayısı	12
3.1.4. Sıcaklık.....	14
3.1.5. Presleme hızı	15
3.1.6. Uygulama basıncı	15
3.1.7. Karşı basınç.....	16
3.1.8. EKAP ile tane boyutunun inceltilmesi	17
4. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ÜRETİMİNE GÖRE SINIFLANDIRILMASI	19
4.1. Döküm Alüminyum Alaşımları	20

	Sayfa
4.2. Dövmeye Alüminyum ve Alaşımları.....	22
4.2.1. Ticari saf Alüminyum (lxxx Gurubu).....	24
4.2.2. Alüminyum Bakır alaşımları (2xxx gurubu)	25
4.2.3. Alüminyum Mangan alaşımları (3xxx gurubu).....	26
4.2.4. Alüminyum Silisyum alaşımları (4xxx gurubu).....	27
4.2.5. Alüminyum Magnezyum alaşımları (5xxx gurubu).....	28
4.2.6. Alüminyum - Silisyum - Magnezyum alaşımları (6xxx gurubu)	29
4.2.7. Alüminyum - Çinko alaşımları (7xxx Gurubu).....	30
4.2.8. Alüminyum Lityum alaşımları.....	32
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	33
5.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler	33
5.2. EKAP Sistemi	33
5.2.1. PLC kontrollü pres	34
5.2.2. EKAP işleminde kullanılan fırın.....	34
5.2.3. EKAP kalıbı	34
5.3. EKAP Numunelerinin Hazırlanması	35
5.4. EKAP İşlemleri.....	36
5.5. Sertlik Ölçümleri.....	36
5.6. Makroyapı incelemeleri	37
5.7. TEM Çalışmaları.....	37
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	38
6.1 EKAP Sisteminin Kurulumu ve Çalıştırılması.....	38
6.2 EKAP Deneyleri	41
6.2.1. EKAP presleme basıncı.....	41

	Sayfa
6.2.2. EKAP işlemi ile üretilen numuneler	43
6.3. Makroyapı İncelemeleri	46
6.4. TEM Çalışmaları.....	48
6.5. Sertlik Sonuçları	56
7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER	59
7.1. Sonuçların Değerlendirilmesi	59
7.2. Öneriler	60
KAYNAKLAR.....	61
ÖZGEÇMİŞ	67

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Saf alüminyumun özellikleri.....	19
Çizelge 4.2. Alüminyum döküm alaşımlarının gösterimi.	20
Çizelge 4.3. Dövme alüminyum ve alaşımların ANSI 35.1 standardına göre ana gurupları.....	23
Çizelge 4.4. ANSI standartlarında belirtilen bazı Alüminyum Alaşımlarının ISO Karşıtları.	23
Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan alüminyum 7075 alaşımının kimyasal bileşimi.....	33
Çizelge 6.1. Pas sayılarına göre pres basınç değerleri ve ortalamaları (Ton).	41

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. a) EKAP ve b) YBB nin şematik görüntüsü.....	5
Şekil 3.1. EKAP yönteminin şematik olarak gösterilmesi.	6
Şekil 3.2. EKAP işleminde malzemede meydana gelen kaymanın şematik gösterimi. .	7
Şekil 3.3. EKAP İşlemi sırasında kullanılan rotalar ve pas sayılarına göre dönme açıları	9
Şekil 3.4. EKAP işleminde kübik malzemenin rotalara göre şekil değişimi	10
Şekil 3.5. EKAP işleminde kanal açılarını gösteren bir kalıbın şematik görünümü . .	11
Şekil 3.6. Φ ve ψ açılarına bağlı olarak eş değer şekil değişimi.	12
Şekil 3.7. Yüksek sıcaklıklarda yapılan EKAP işleminin şematik gösterimi.	14
Şekil 3.8. EKAP'ta kaymanın oluşumu	17
Şekil 4.1. Temel Alüminyum Alaşımları.	24
Şekil 4.2. Al-Cu denge diyagramının alüminyum bölgesi.	25
Şekil 4.3. Al-Mn denge diyagramının alüminyum köşesi.	27
Şekil 4.4. Al-Si denge diyagramının alüminyum köşesi.	27
Şekil 4.5. Al-Mg denge diyagramının alüminyum köşesi.	28
Şekil 4.6. Al-Mg ₂ Si denge diyagramı	29
Şekil 4.7. Al-Zn denge diyagramının Alüminyum bölgesi.	30
Şekil 4.8. Al-Zn ikili faz diyagramı.	31
Şekil 5.1. EKAP numunesinin şematik gösterimi.....	35
Şekil 5.2. EKAP kalıbının şematik gösterimi.	36
Şekil 6.1. Pas sayısı ile presleme basıncının değişimi.	42
Şekil 6.2. 90°'lik kanal kesişim bölgesinde deformasyonun şematik görünümü.	45

Şekil	Sayfa
Şekil 6.3. Pas sayısı ile sertlik değişimi.	57

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. 7050 Alüminyum alaşımının a) orijinal mikroyapısı b) 4 geçiş yapılmış mikroyapısı.	13
Resim 3.2. Karşı basınçlı EKAP uygulamaları.	16
Resim 3.3. 1 Pas yapılmış Al 1050 alaşımında dislokasyon duvarları.	18
Resim 5.1. EKAP işlemlerinde kullanılan test ünitesi.	33
Resim 5.2. EKAP kalıbı ((1): Zimba, (2):EKAP kalıp çekirdeği, (3):Kalıp yatağı, (4): Altlık blok).	35
Resim 6.1. Yağlayıcı olarak grafit kullanılarak yapılan EKAP işlem sonrası hasarlı pim oluşumu.	39
Resim 6.2. Hasarlı kalıp çekirdeği.	40
Resim 6.3. Değişik pas sayılarında EKAP yapılmış numunelerin sırası ile görüntüleri.	44
Resim 6.4. Değişik pas sayılarında EKAP yapılmış numunelerinin makroyapı görüntüleri.	47
Resim 6.5. EKAP yapılmamış 7075 Al alaşımının TEM görüntüsü	48
Resim 6.6. 2 pas yapılmış 7075 Al alaşımının TEM görüntüleri.	50
Resim 6.7. 4 pas yapılmış 7075 Al alaşımının TEM görüntüsü.	51
Resim 6.8. 6 pas yapılmış 7075 Al alaşımının TEM görüntüsü.	51
Resim 6.9. 8 pas yapılmış 7075 Al alaşımının TEM görüntüsü.	52
Resim 6.10. 10 pas yapılmış 7075 Al alaşımının TEM görüntüsü.	53
Resim 6.11. 12 pas yapılmış 7075 Al alaşımının TEM görüntüsü.	53
Resim 6.12. 14 pas yapılmış 7075 Al alaşımının TEM görüntüsü.	54
Resim 6.13. Bazı numunelerin SAD desenleri ((a) EKAP yapılmamış, (b) 8 pas EKAP yapılmış, (c) 10 pas EKAP yapılmış).	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan bazı simgeler ve kısaltmalar açıklamalarıyla birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklama

Al

Alüminyum

Cu

Bakır

Li

Lityum

Mg

Magnezyum

Na

Sodyum

Si

Silisyum

Zn

Çinko

Kısaltmalar

Açıklama

APD

Aşırı Plastik Deformasyon

EKAP

Eşit Kanal Açısı Presleme

TEM

Geçirimli Elektron Mikroskobu

TMİ

Termo Mekanik İşlem

UİT

Ultra İnce Tane

YBB

Yüksek Basıncılı Burma

1. GİRİŞ

Düşük yoğunlukları ve üretim maliyetlerinden dolayı, alüminyum ve alaşımları endüstriyel alanda yoğun olarak kullanılan metal ve alaşımları arasında ön sıralarda yer almaktadır. Son yıllarda büyük bir gelişme gösteren otomotiv sektörü başta olmak üzere gıda, uzay ve havacılık sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum ve alaşımlarının bu olumlu özelliklerinin yanında mekanik özelliklerinin demir alaşımlarına göre düşük olması en büyük dezavantajlarının başında gelmektedir. Alüminyum ve alaşımlarının bu dezavantajları çökelme sertleşmesi ve termomekanik işlemlerle giderilebilmektedir. Bu mekanizmalardan ısıtılma işlemleri (yaşlandırma ve/veya çift yaşlandırma) yapı içerisinde ikincil faz homojen olarak dağıtılarak mukavemetlendirilir.

Termomekanik işlemler (plastik deformasyon + yeniden kristalleşme) malzemenin tane boyutunun inceltirilerek, dayanım arttırmada kullanılan önemli bir yöntemdir. Bu işlem malzeme içerisindeki tanelerde yüksek miktarda gerinim enerjisi oluşturulmakta ve belli bir sıcaklık aralığında yeniden kristalleşme esasına dayanır. Yapılan literatür incelemelerinde termomekanik işlemlerle Al ve alaşımlarının tane boyutunun 10 μm 'nin altına indirilmesinin zor olduğu bildirilmektedir [1]. Son yıllarda ultra ince taneli yapılar Eşit Kanal Açısız Presleme (EKAP) yöntemi ile gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Bu teknik kullanılarak mikro yapıda, mikron altı 10-1000 nano boyutlu tane yapısı elde edilebilmektedir. EKAP işlemi metal ve alaşımın, kayma sistemleri ve kesme düzlemlerinden etkilenir. Ayrıca kalıp geometrisi ve presleme rejimi işlem için önemli iki parametredir. EKAP işlemi çok adımlı tekrarlanan bir işlem olup, malzemede basit kayma ile aşırı plastik şekil değiştirme oluşturur [1,2].

Nano teknoloji ile ilgili 2000 li yılların başından bu yana çok sayıda çalışma yapılmakta ve bu gelişmeler paralelinde daha az malzeme tüketimi ve daha az sayıda işlem basamaklarından (özellikle alüminyum alaşımları) oluşan yöntemler denenmektedir [3,4].

Ultra ince taneli (UİT) malzemelerin üretilmesi için aşırı plastik deformasyon (APD)

gerekmektedir [5]. EKAP yöntemi ile APD gerçekleştirmek de ve UİT' li malzemeler kolaylıkla üretilmektedir.

Bu çalışmada, EKAP işlemiyle 7075 (Al-Zn-Mg) alaşımında nano boyutlu tanelere sahip malzeme üretilip, karakterize edilmiştir. EKAP işlemi 200° C , 90 derecelik kalıp açısında ve farklı pas sayılarında uygulanmıştır. EKAP işlemi sonrası 7075 alüminyum alaşımı sertlik, makro inceleme ve TEM yöntemleri ile karakterize edilmiştir.

2.ULTRA İNCE TANELİ MALZEMELER

Ultra ince taneli (UİT) yapılar kaba taneli yapılarla karşılaştırıldığında ortalama tane boyutları yaklaşık 1µm veya mikron altı (10-100 nm) olan malzemelerdir. Günümüzde UİT malzemelerin üretimi ve karakterizasyonu üzerine araştırmalar yoğun ve kapsamlı bir şekilde devam etmekte ve ilgi giderek artmaktadır[6]. Bunun nedeni; UİT malzemeler düşük sıcaklıkta yüksek sertlik ve dayanım sergilerken yüksek sıcaklıkta süperplastik şekil değiştirme davranışı sergileyebilme özelliğine sahip olmasıdır. Oda sıcaklığında metal ve alaşımlarında Hall-Petch eşitliğine (Eş. 2.1) göre azalan tane boyutu ile malzemenin akma mukavemeti artar [6,7].

$$\sigma_e = \sigma_i + kd^{-1/2} \quad (2.1)$$

Burada; σ_e : malzemenin akma mukavemeti, σ_i tanelerin dislokasyon hareketlerine karşı gösterdiği direnç (iç sürtünme direnci), k tane sınırlarına doğru kayma mekanizmasına bağlı bir malzeme sabiti ve d tane boyutudur [8]. Hall-Petch eşitliğine göre UİT malzemeler kaba taneli yapılara göre daha yüksek dayanıma sahiptirler. Ancak UİT malzemelerde Hall-Petch eşitliğinin geçerli olmadığı görülmüş ve bunun yerine başka eşitlikler geliştirilmiştir.

Yüksek sıcaklıklarda ise metal veya alaşımlarının ergime derecesine bağlı olarak kayma mekanizmasının yanında tane sınırların kayma mekanizması da plastik şekil değiştirmeye katkı sağlar. Bu plastik şekil değiştirme mekanizmasının etkili olabilmesi için, yüksek sıcaklıklarda UİT malzemelerde tane boyutu 0.01-10 µm arasında olması gerekmektedir. Malzemenin ergime derecesinin yüksek ($>0.5 T_m$) olduğu sıcaklıklarda difüzyon kontrolü sağlanabildiğinden, tane sınırları kayma mekanizması deformasyon yönünde gerçekleşir [9,10]. Bu yüzden süperplastik sünekliğin elde edildiği gerilim değerleri tercih edilir. Buna ilaveten malzemenin süperplastik davranışında tane boyutunun karesi ile akma gerilimi arasında bir ters orantı söz konusudur [11,12]. Buna göre UİT malzemeler yüksek oranda süperplastik potansiyele sahiptir.

2.1. Ultra İnce Taneli Malzemelerin Üretim Yöntemleri

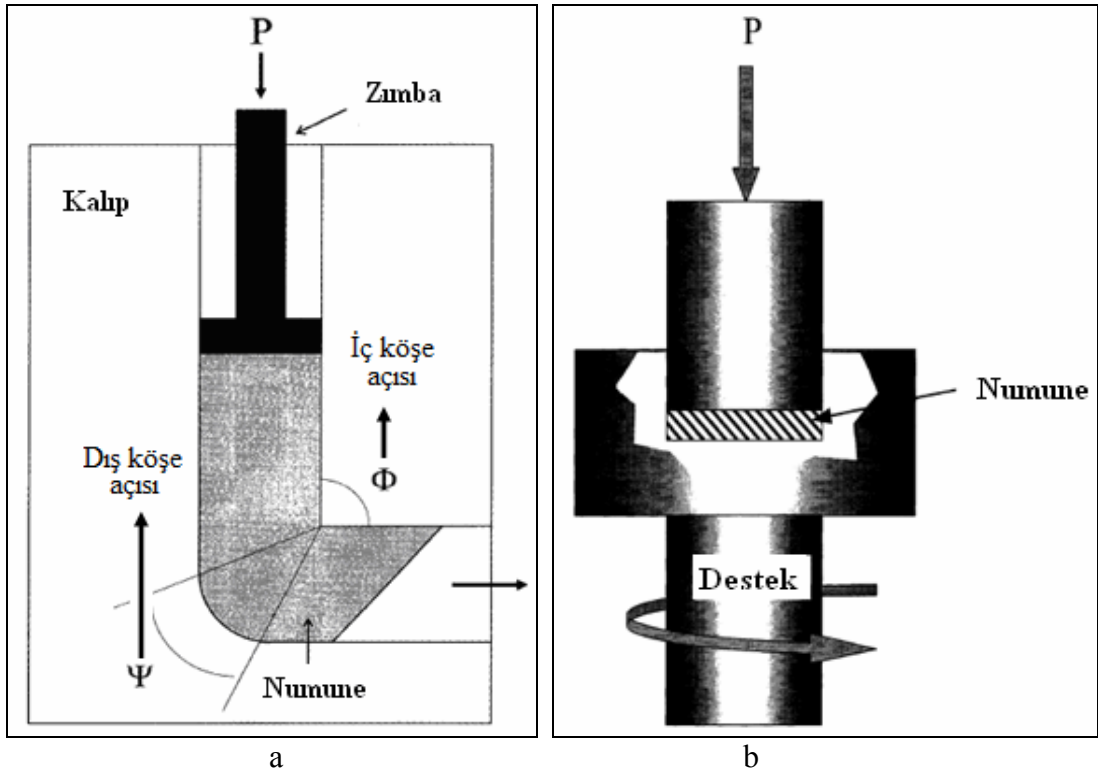
UİT malzemeler ve nanokristal malzemelerin üretiminde birkaç farklı metot kullanılmaktadır. Geleneksel olarak küçük tane boyutlu malzemeler uygun termomekanik işlemler (TMİ) kullanılarak üretilebilmektedir. Termomekanik metot, dinamik yeniden kristalleşme olarak da bilinen bir sürekli yeniden kristalleşme sürecidir [13-15]. Bununla birlikte TMİ ile sadece 1-10µm arasında küçük tane boyutları üretilebilir. TMİ ile tane boyutlarının inceltmesinde ayrıca ısı işlem uygulanması maliyetide arttıracaktır. Bu yüzden TMİ yöntemi UİT malzemelerinin üretimi için uygun değildir.

Ayrıca asal gaz yoğunlaştırma, yüksek enerjili bilyalı öğütme ve aşınma ile UİT malzemelerin üretimi yapılabilmektedir[16-21]. Bu metotlar nanometre seviyesine kadar tane inceltme yapılabilen etkili yöntemlerdir. Bu yöntemlerle üretilen malzemelerde tane inceltme için ayrıca kapsamlı bir ısı işlemine gerek kalmaz. Bununla birlikte bu metotlarda nano boyutlu tozlar sıkıştırılarak şekillendirilir. Fakat üretilen parçalar istenilen yoğunluğa sahip olmaz. Bu yüzden bu metotlar UİT malzemelerin endüstriyel uygulamalarında yeterince etkili değildir.

Son zamanlarda UİT malzeme üretiminde aşırı plastik deformasyon (APD) metotları kullanılmaya başlamıştır [22-25]. Geleneksel olarak, soğuk haddeleme veya çekme gibi plastik deformasyon yöntemlerinden farklı olarak APD yöntemlerinde düşük sıcaklıklarda yüksek basınç ile mikro yapıyı kolaylıkla inceltilebilmektedir. Mikron altı boyutlu ve büyük açılı tane sınırları oluşturularak malzeme özellikleri önemli ölçüde geliştirilebilir. Ayrıca APD metotları ile tam yoğunlukta malzemeler üretilebilir ve bu yöntemler endüstriyel uygulamalar için oldukça kullanışlıdır.

Genel olarak iki farklı APD metodu vardır. Bunlardan birincisi Eşit Kanal Açısız Presleme (EKAP), ikincisi ise Yüksek Basıncılı Burulmadır (YBB) [26-32]. EKAP yöntemi ilk olarak Segal ve ekibi tarafından tanıtılmıştır [33]. Bu yöntemde malzeme özel tasarlanmış kalıp içerisindeki kanalda preslenerek üretilmiştir. İkinci yöntem olan YBB ise Smirnova tarafından geliştirilmiştir [34]. Bu yöntem malzemeye

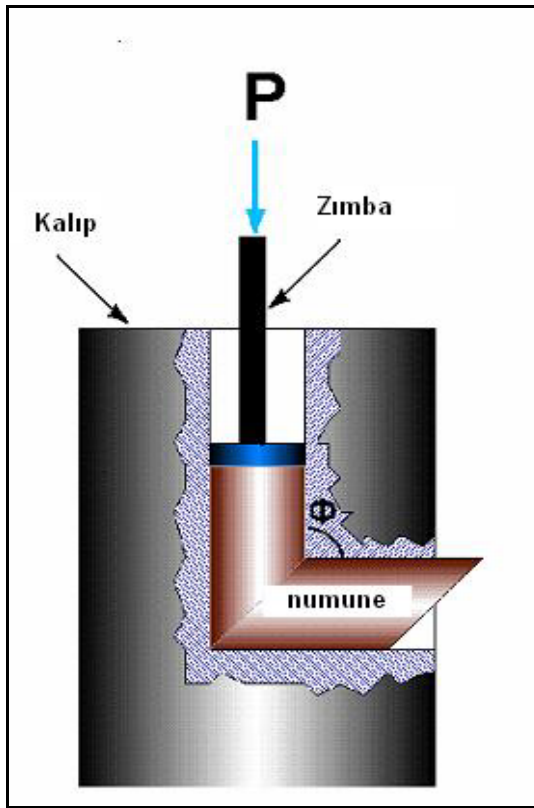
yüksek basınç altında büyük bir burulma gerilimi uygulanarak yapılmaktadır. Her iki yöntem şematik olarak Şekil 2.1’de gösterilmektedir. Her iki yöntemde de malzemeye şekli değişmeksizin yüksek basınçta büyük kesme gerilimi uygulanmaktadır. Yeniden burulma metodu özellikle ultra ince intermetalik malzemelerin üretilmesinde etkiliyken, EKAP yöntemi metal ve alaşımlarına daha kolay uygulanabilmektedir. EKAP ve YBB yöntemleri daha önceden bilinen ve kullanılan haddeleme ve tekrarlı ekstrüzyon gibi APD tekniklerinden geliştirilmiş hibrid yöntemlerdir [35-37].



Şekil 2.1. a) EKAP ve b) YBB nin şematik görüntüsü [35,36].

3. EŞİT KANAL AÇISAL PRESLEME (EKAP)

UİT malzeme üretiminde çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Ticari uygulamalarda bu teknikler kullanılarak yapılan UİT malzeme üretimlerinde, malzeme miktarının ve boyutunun sınırlı olması en büyük dezavantajdır. Son yıllarda kullanılan EKAP işlemi bu dezavantajları en aza indirmektedir. Şekil 3.1’de UİT malzeme üretiminde kullanılan EKAP işlemi şematik olarak verilmiştir [1]. EKAP, malzemede basit kayma mekanizması ile aşırı deformasyon işlemidir. [38].

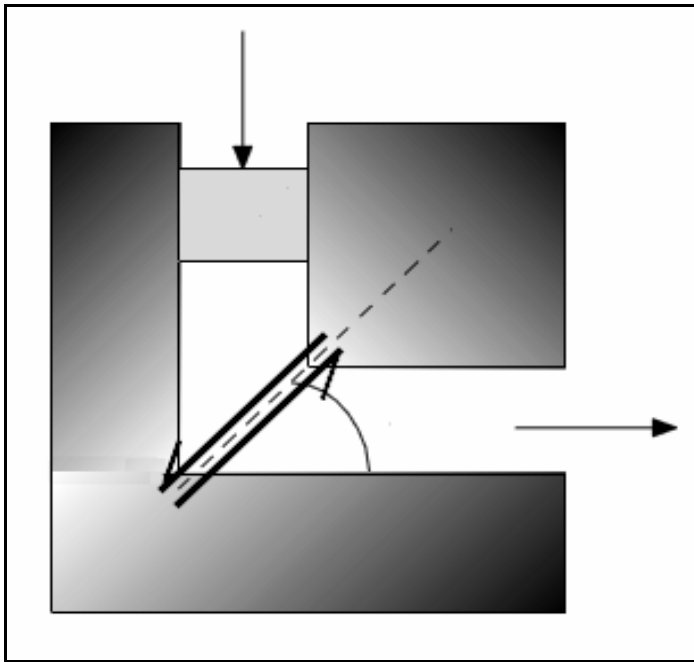


Şekil 3.1. EKAP yönteminin şematik olarak gösterilmesi [1].

EKAP ile malzemede kırılma olmaksızın aşırı büyük kesme kuvvetlerine ulaşılabilir. EKAP’ ın diğer bir özelliği ise ağır malzemelerde ince tane yapısından dolayı işleme kolaylığı sağlamasıdır [39]. UİT boyutlarının üretilmesi ile süperplastik özelliği olmayan malzemelerde bile oldukça iyi süperplastik şekillendirme sağlanabilir. EKAP işleminin, daha düşük sıcaklıklarda bile, süperplastik süneklik sağladığı literatürde belirtilmektedir [40].

İşlem olarak Şekil 3.1’de görüldüğü gibi bir Φ açısında kesişen, kesitleri aynı ve iki kanallı bir kalıp boyunca preslenmesi sonucu malzeme basit kayma mekanizması ile şiddetli plastik deformasyon elde edilir. Bu işlemin yapılmasında kalıp–zımba sistemi kullanılarak numune kalıba basılmaktadır [41].

Malzemenin kesit ve boyutlarında herhangi bir değişme olmadığı için büyük miktarda birim şekil değişiminin elde edilmesinde defalarca presleme yapılabilir. Böylece malzemenin tane boyutu, mikron-altı seviyesine düşürülebilir [42]. EKAP işleminde malzemede meydana gelen kayma şematik olarak Şekil 3.2’de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. EKAP işleminde malzemede meydana gelen kaymanın şematik gösterimi [43].

EKAP işlemi ile malzeme, Şekil 3.2 de gösterildiği gibi L-şeklinde bir kanalda kalıp boyunca preslenmektedir. Kayma mekanizması ile malzemede, alt taneler oluşur ve çok sayıda presleme ile daha büyük açılar ve sınırlarla ayrılmış yeni taneler oluşmaktadır. EKAP işlemi ile malzemenin mikroyapısında meydana gelen tane incelmelerinden dolayı malzemenin sertliği, akma ve çekme dayanımı etkili bir şekilde artar [43].

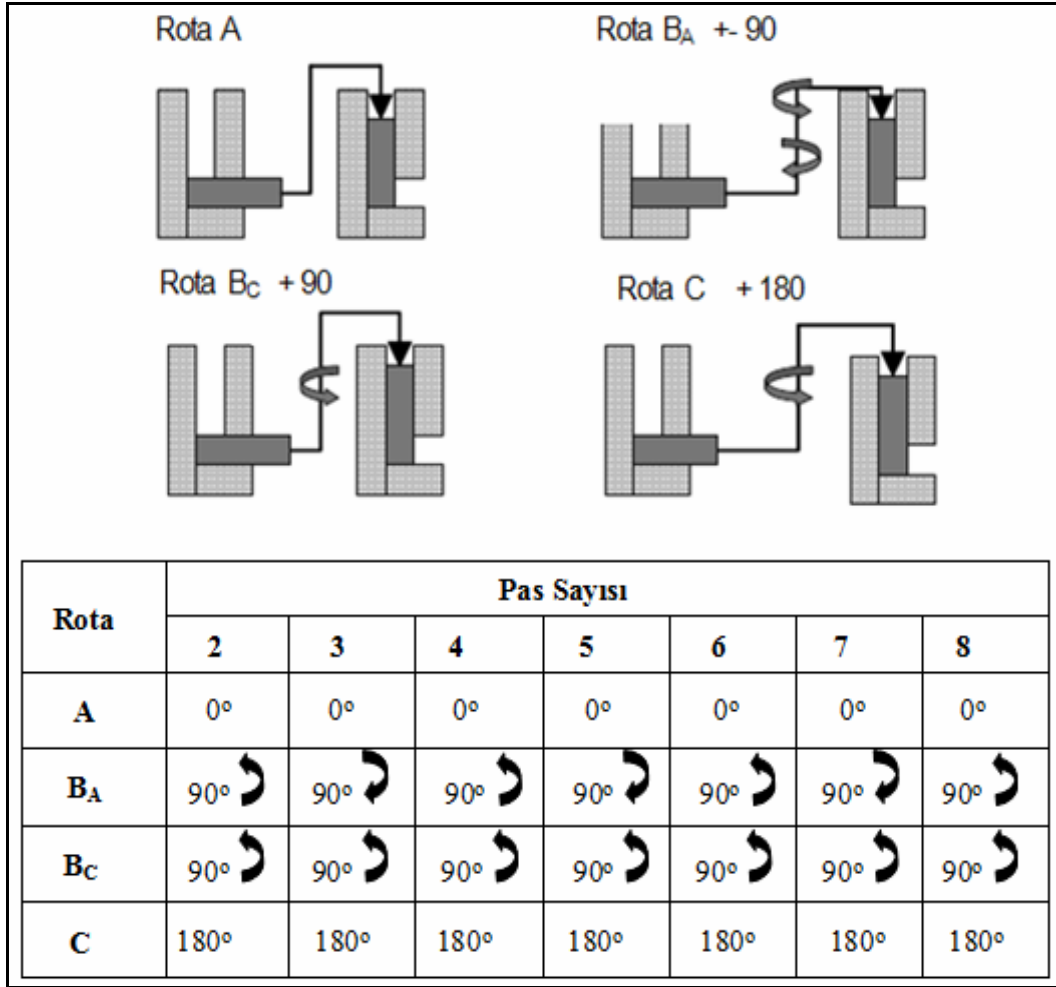
EKAP ile üretilen metallerde bu olağandışı mekanik davranışa neden olarak, EKAP'ın malzemenin plastik deformasyon mekanizmasında meydana getirdiği önemli değişiklikler gösterilmektedir. Kaba gerilimsiz taneli metallerde, dislokasyon hareketi ile gerçekleşen kayma ve kaymanın zor olduğu durumda ise ikizleme esas plastik deformasyon mekanizmalarıdır. Ultra-ince ve büyük açılı sınırlara sahip eşeksenel taneler, dislokasyon hareketlerini engelleyerek dayanımı arttıırırlar. Bunun yanında daha yüksek sıcaklıklarda, tane sınırı kayması sürünme yayınması gibi diğer deformasyon mekanizmaları da devreye girmektedir. Bu da malzemenin sünekliliğini arttırır. İnce taneli malzemelerin olağandışı davranışları, APD ile üretilmiş çok sayıda büyük açılı tane sınırlarından, dislokasyonlardan ve noktasal kusurlara sahip nanoyapılardan kaynaklanmaktadır [44].

3.1. EKAP İşlemini Etkileyen Parametreler

EKAP tekniği ile oluşturulan çok ince taneli mikroyapı; elde edilen toplam birim şekil değiştirmeye etki eden parametreler, mikroyapısal ve mekanik özellikler, numunelerin tekrar kalıba verilmeden önce 90o veya 180o döndürülmesi, numunenin kalıptan geçme sayısı, kalıp açıları, numunenin EKAP sırasındaki sıcaklık v.b. değişkenlerden etkilenir.

3.1.1. EKAP deformasyon yön ve açıları

Bir malzeme EKAP işleminde arka arkaya yapılan paslarda malzemenin döndürülmesi sebebi ile malzemenin kayma düzlemleri de değişir [2]. Malzeme tekrar EKAP işlemi için kalıba konmadan önce, Şekil 3.3'de görüldüğü gibi hiç döndürmeden veya 90° ve 180° döndürülebilir. Bu döndürme açılarına göre döndürme metodları Rota A, Rota B_A, Rota B_C, Rota C olarak isimlendirilmiştir (Şekil 3.3). EKAP işleminde malzemenin dönme yönlerine bağlı olarak malzeme karakteristiğinde değişimler kaydedilmektedir. Şekil 3.3'de EKAP işleminde kullanılan rotalar ve döndürme yönleri şematik olarak gösterilmiştir [45,46].



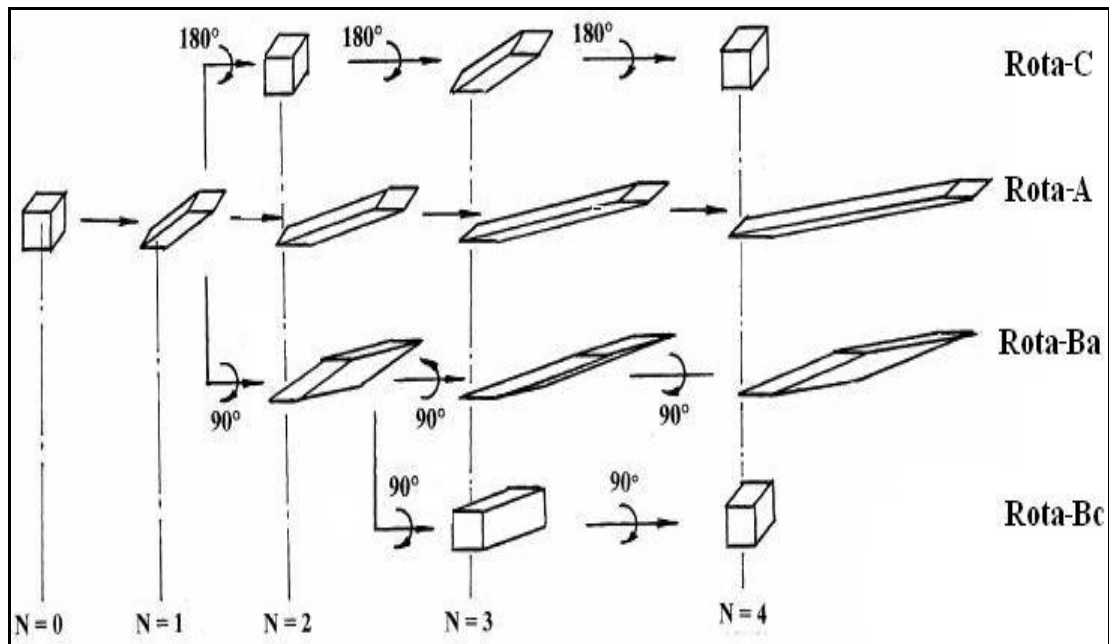
Şekil 3.3. EKAP İşlemi sırasında kullanılan rotalar ve pas sayılarına göre dönme açıları [45,46].

EKAP işleminde malzemeler farklı geçişlerde tekrarlı olarak kanal boyuna preslenir. Bu işlem rota olarak adlandırılır. Malzemede bu yöne bağlı olarak genellikle 12'den 15'e değişen pasdan sonra akma gerilmesinde, dayanımda ve süneklikte önemli artışlar olmaktadır [47].

EKAP uygulamalarında 4 farklı işlem rotası belirlenmiştir.

- Rota A'da, malzemede herhangi bir döndürme olmadan defalarca EKAP işlemi uygulanabilir
- Rota B_A'da, numune her geçişte birbirine zıt yönlerde 90° döndürülür,
- Rota B_C'de, her geçiş arasında aynı şekilde 90° döndürülür,
- Rota C'de numune her geçişte 180° döndürülür.

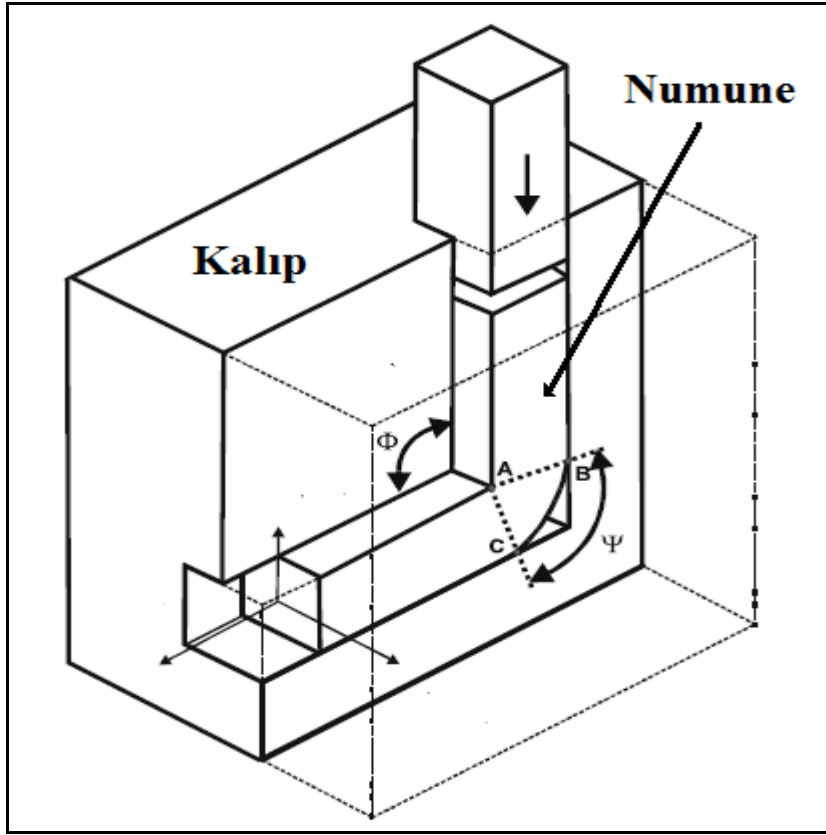
Şekil 3.4’de görüldüğü gibi, Rota A ve Rota B_A’da yapılan EKAP işleminde kübik elemanın çarpılması geçiş sayısı arttıkça artmakta ve kayma düzlemi yönünde yönlenme oluşmaktadır. Rota B_C ve Rota C de ise sırasıyla, 2. ve 4. geçişte deformasyon yönü tersine dönmektedir. Bu nedenle kübik eleman belirtilen geçiş sayılarında deformasyon öncesi sahip olduğu geometriye dönmektedir. Segal yaptığı bir çalışmada, EKAP sonrasında geniş açılı tane sınırlarıyla ayrılmış eş eksenli ince tanelerin en hızlı Rota B_C’de elde edildiğini ortaya koymuştur [48].



Şekil 3.4. EKAP işleminde kübik malzemenin rotalara göre şekil değişimi [48].

3.1.2 Kanal açıları

EKAP işleminde önemli olan diğer bir parametre de kanal açısıdır. Şekil 3.5’de L-şekilli kanalın şematik görünümü verilmektedir. Şekilden de anlaşılabileceği gibi kalıptan basit bir geçiş sonrasında malzemede oluşan birim şekil değiştirme, Φ ve ψ açılarına bağlıdır. Burada Φ , iki kanalın kesiştiği noktanın açısı veya kanal açısı, ψ ise iki kanalın kesiştiği bölgenin kavis açısı veya dış köşe açısıdır.



Şekil 3.5. EKAP işleminde kanal açılarını gösteren bir kalıbın şematik görünümü [49].

EKAP işleminde malzemede tekrarlı preslemeler ile meydana gelen toplam birim şekil değişimi (ϵ_N) Eş. 3.1’de verilen bağıntı ile açıklanabilir [50].

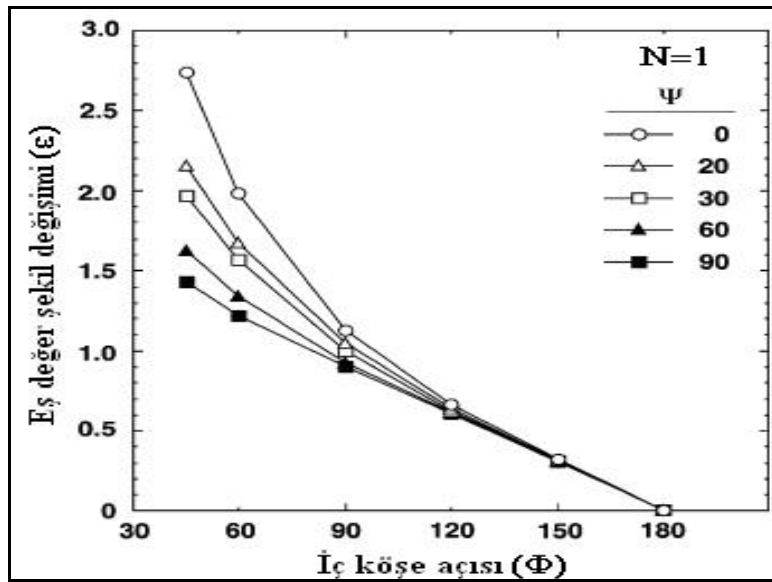
$$\epsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left(2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \cos ec\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \right) \quad (3.1)$$

Burada N, kalıp boyunca geçişlerin toplam sayısıdır. Bağıntıya göre bir geçişte $\Phi = 90^\circ$ ve herhangi bir Ψ açısında $\epsilon \sim 1$ ’e yakındır. Genellikle EKAP için kalıp tasarımı yapılırken bir geçişte birim şekil değiştirme ~ 1 olarak alınır. EKAP’da malzeme kalıp kanalında defalarca preslenir. Her seferinde birim şekil değişimi katlanarak artar.

EKAP kalıplarında Φ değerinin artmasıyla kalıp boyunca malzeme kolay bir şekilde preslenir, saf alüminyumla yapılan çalışmalarda büyük açılı tane sınırları, kullanılan kalıbın Φ açısının 90° ’ye yakın olduğunda, malzemede yoğun plastik birim şekil

değişimleri olduğu belirlenmiştir. Yapılan uygulamalarda alüminyum gibi sünek malzemelerde 90° 'lik bir iç kanal (Φ) açısının kullanılmasının uygun olduğu ifade edilmektedir. Buna karşılık gevrek kırılmaya sahip malzemelerde, erken meydana gelen hasardan dolayı EKAP işlemi zor hatta imkansızdır. Böyle bir durumda, presleme işleminde kalıbın Φ açısı arttırılmalıdır [39].

Şekil 3.6'da görüldüğü gibi EKAP işleminde en fazla şekil değişimi değerlerine ulaşabilmek için Φ ve Ψ değerlerinin olabildiğince küçük seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca, kalıp açısının 90° den daha büyük olduğu durumda Ψ açısının birim değişimine çok az etkisi olduğu da görülmektedir [48].

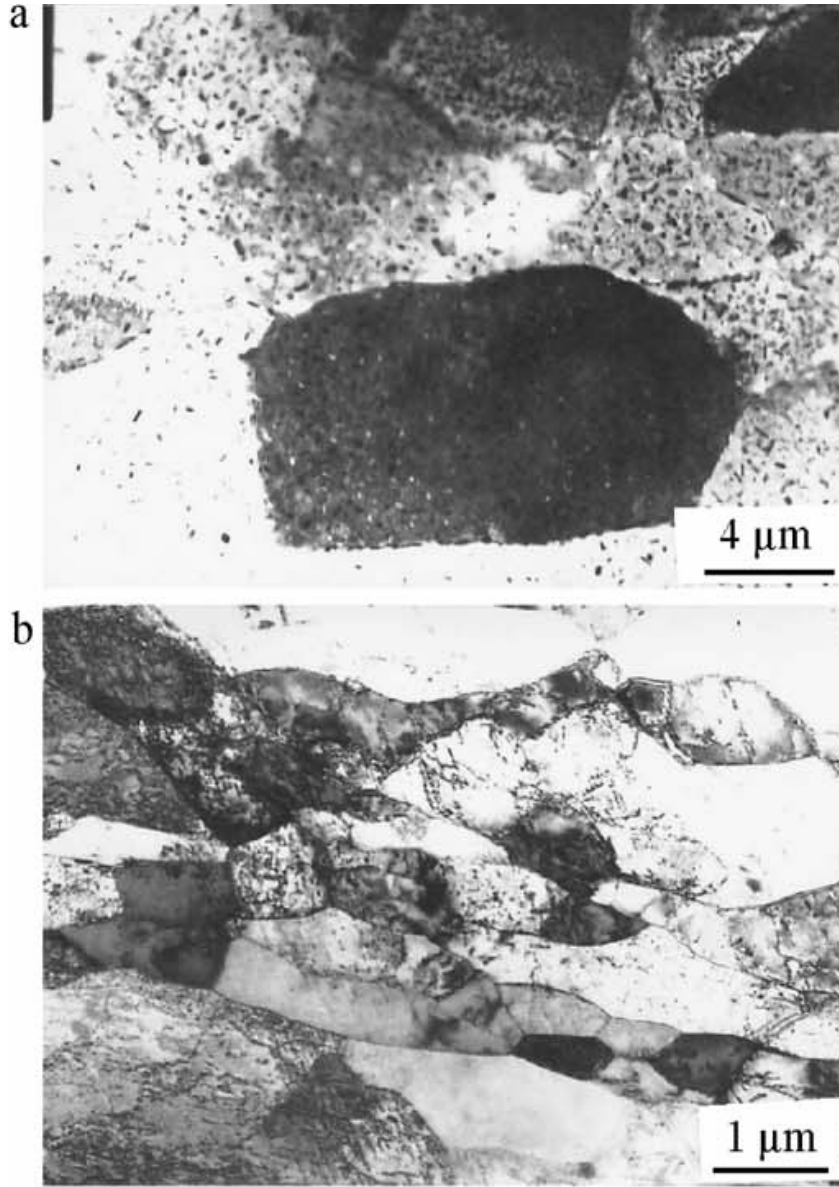


Şekil 3.6. Φ ve ψ açılarına bağlı olarak eş değer şekil değişimi [48].

3.1.3. Pas sayısı

EKAP işleminde önemli olan diğer bir parametre de geçiş sayısıdır. Geçiş sayısı ile malzemenin mikroyapısında önemli oranda tane incilmesi sağlanmaktadır. Geçiş sayısı ile ilgili genel bir kural vardır. EKAP işleminde malzemeye tek bir rotaya bağlı olarak genellikle 15'e kadar geçiş sayıları kullanılmaktadır [47].

Resim 3.1’de anlaşılabileceği gibi başlangıç malzemesi kaba tanelere sahipken EKAP işlemi yapılan malzemede uzamış tanelerde yoğun dislokasyon hücreleri oluşmaktadır. Bunun nedeni EKAP işlemi sırasında oluşan kayma mekanizması ile gerçekleşen plastik deformasyondur [51].



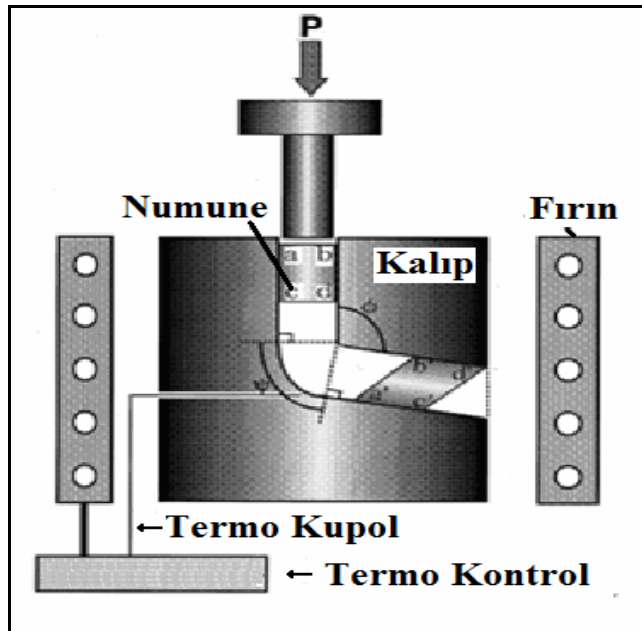
Resim 3.1. 7050 Alüminyum alaşımının a) orijinal mikroyapısı b) 4 geçiş yapılmış mikroyapısı [51].

EKAP işleminde geçişlerden sonra yapının homojen olmadığı, anizotropik olduğu ve çoğunlukla deformasyona bağlı nedenlerden dolayı özelliklerinin değiştiği

belirtilmektedir. Tekrarlı EKAP işlemlerinden sonra alüminyum malzemeler homojen tane boyutu dağılımı gösterir. Fakat mikroyapı hala anizotropiktir. İleri sayılardaki geçişlerden sonra mikroyapı başlıca büyük-açılı sınırlarla çevrelenmiş ince tanelerden oluşmaktadır. Fakat yapılan çalışmalarda küçük açılı sınırların olduğu da ortaya çıkmıştır. Bu şekildeki mikroyapıya sahip malzemeler deformasyonun ve yeniden kristalleşmenin sebep olduğu özelliklere sahiptir [52].

3.1.4. Sıcaklık

EKAP işleminde önemli parametrelerden bir diğeri ise işlem sıcaklığıdır. EKAP işlemi genellikle pres üzerine monte edilen bir fırın içerisinde gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.7’de bir fırın içerisine yerleştirilen EKAP kalıbı ve presleme sıcaklığı termo eleman çifti ile kontrol edilen deney düzeneği şematik olarak gösterilmektedir. Kalıbın fırın içerisinde gereken sıcaklığa ulaşma süresi yaklaşık 1 saati bulmaktadır [53].



Şekil 3.7. Yüksek sıcaklıklarda yapılan EKAP işleminin şematik gösterimi [2].

Yüksek sıcaklık EKAP işlemleri genellikle sünekliği düşük olan gevrek malzemeler içindir. Çünkü her geçişten sonra malzemede oluşan yoğun birim şekil değişimi

sebebi ile bu malzemelerde çatlaklar oluşabilmektedir. Ayrıca düşük dayanıma sahip malzemelerde yüksek sıcaklık, EKAP işlemini kolaylaştırmaktadır. Yüksek sıcaklık deformasyon işlemine yardım ederken, dislokasyon yoğunluğunu da düşürmektedir [54].

3.1.5. Presleme hızı

Presleme hızının EKAP işlemi sonrası elde edilen özellikler üzerinde çok önemli bir etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Al-%1Mg alaşımı ile yapılan deneylerde, presleme hızının EKAP işlemi sonrasında elde edilen tane büyüklüğüne önemli bir etkisinin olmadığı ancak düşük presleme hızlarında işlem süresi arttığından tanelerin toparlanması için daha fazla zaman kaldığı ve bu nedenle eş eksenli tanelerin oranının arttığı gözlenmiştir [48].

3.1.6. Uygulama basıncı

EKAP işleminde dikkat edilmesi gereken parametrelerden bir diğeri basınç-yük ilişkileridir. Bu işlem geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, daha düşük basınç altında gerçekleştirilmektedir [55]. Uygulanan yük ve çalışma basıncı teorik analizden de hesaplanabilmektedir. Segal'e göre ECAP için çalışma basıncı Eş. 3.2'deki gibidir.

$$P/Y = \Delta \varepsilon_i \quad (3.2)$$

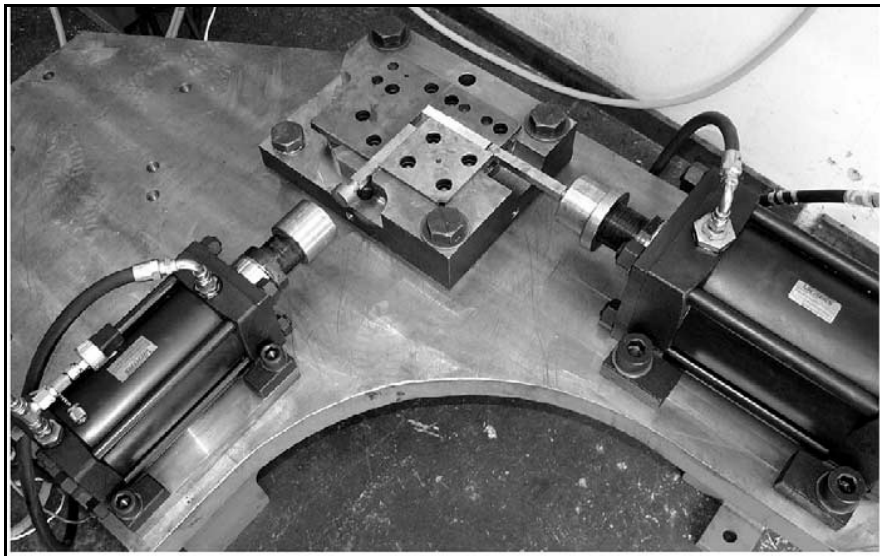
Burada P; çalışma basıncı, Y; malzemenin akma gerilimi ve $\Delta \varepsilon_i$; EKAP işlemi sırasında bir geçiş boyunca verilen birim şekil değişimidir. Uygulamada Y'nin presleme sırasında doğrudan ölçümü oldukça zordur. Fakat Y için akma dayanımı ve çekme dayanımı arası bir değere sahip olduğu ifade edilmektedir. Kanal açıları Φ ve ψ' ye göre bir geçişteki birim şekil değişimi ($\Delta \varepsilon_i$) yaklaşık olarak bilinmektedir (yaklaşık 1). Böylece, malzemenin akma gerilimin belirlenmesi ile birlikte, çalışma

basıncı hesaplanabilmektedir. Çalışılan malzemenin kesit alanının ölçülmesi ile birlikte kuvvet hesaplanabilir [56].

Teorik olarak hesaplanmış EKAP basıncı hem malzemenin akma dayanımına hem de numunenin boyuna bağlı olarak değişir. Geçiş sayısının artması ile birlikte malzemenin dayanımı da arttıracak için, hesaplanan basıncın da artması gerekir. Ancak, EKAP'ta bir geçiş sonrası oluşan deformasyon akış bantları, ileri sayıdaki geçişlerde deformasyon için yeni yerleşmelere neden olacaktır. Böylece bir geçişten diğerine malzemelerin dayanımı artsa bile işlemde kullanılan basınç artmayacaktır. Basıncın artması ancak yağlayıcı maddenin bozulması ve sürtünme nedeni ile olabilir [57].

3.1.7. Karşı basınç

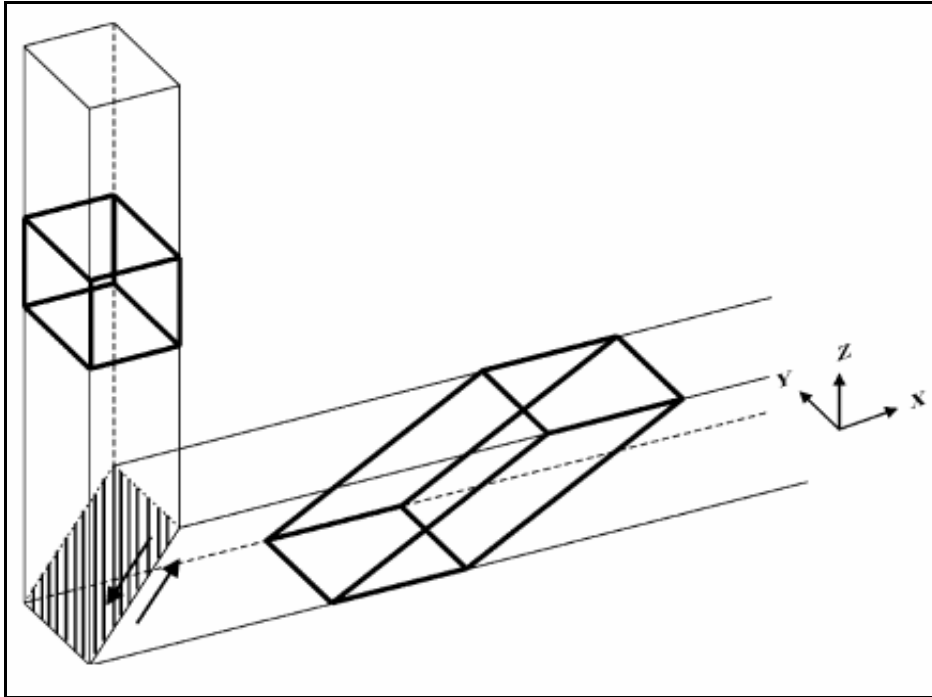
EKAP işleminde göz önünde bulundurulması gereken diğer bir parametrede karşı basınçtır. İşlem sırasında yüksek karşı-basınç uygulandığında, malzemeler de kırılma olmaksızın büyük birim şekil değişimleri oluşur. Yüksek basıncın poroziteyi, çatlakları ve diğer makroskopik kusurları azalttığı düşünülmektedir. [58]. Resim 3.2'de karşı basınçlı EKAP uygulaması gösterilmektedir.



Resim 3.2. Karşı basınçlı EKAP uygulamaları [58].

3.1.8. EKAP ile tane boyutunun inceltilmesi

Daha öncede belirtildiği gibi EKAP işlemi ile tane küçültmesi yapılmaktadır. Şekil 3.8'de EKAP işleminde meydana gelen kayma mekanizması gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı gibi 90° 'lik olan bir kalıpta yapılan EKAP işlemi sırasında kayma, iki kanalın 45° 'lik kesişme düzlemi boyunca olmaktadır. Kalıp kanalının alt kesim noktası kavisleştirildiğinde deformasyon etkisi azalmaktadır. Eğer kanala kavis verilmemişse, kayma sadece kalıbın 45° 'lik düzleminde olur. Bu örnek diğer basit kayma modellerinden farklılık göstermektedir [59].

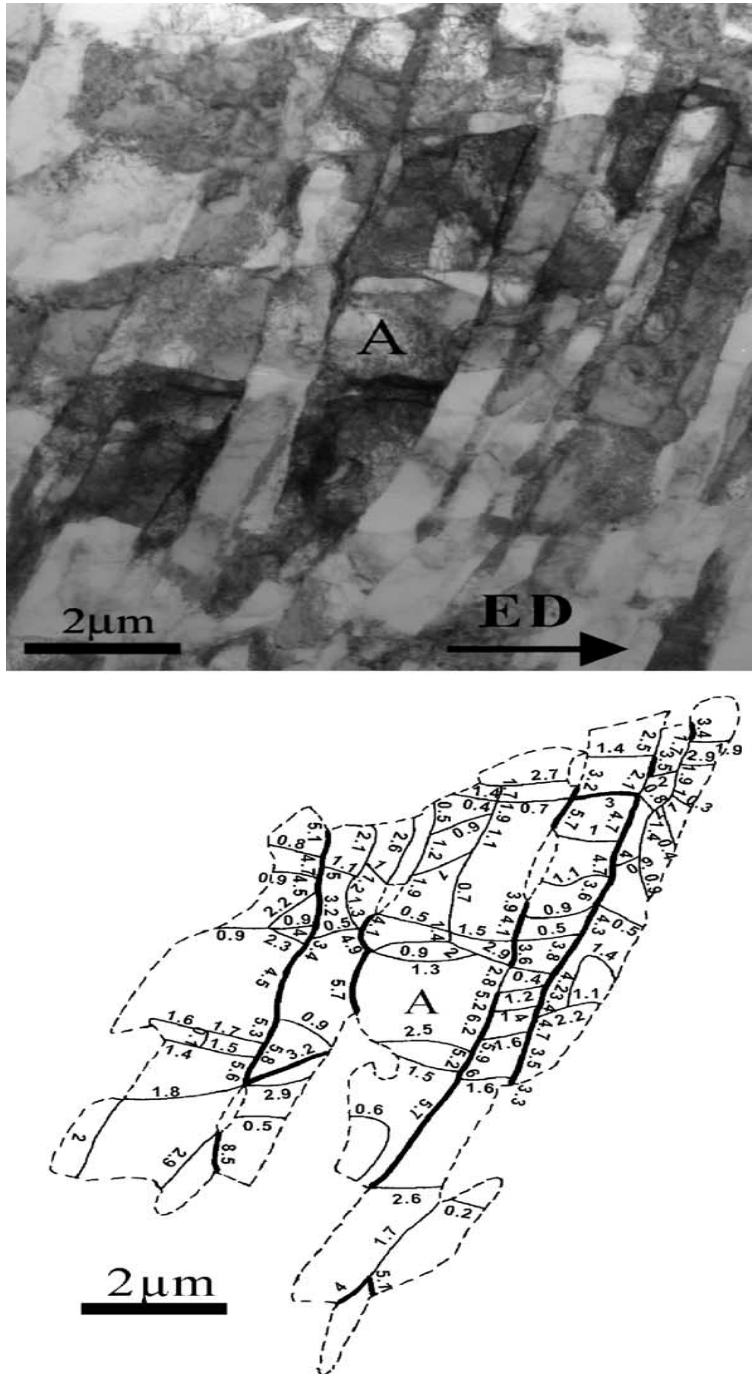


Şekil 3.8. EKAP'ta kaymanın oluşumu [59].

EKAP işlemi ile tane yapısı oluşumunda, önce dislokasyon çizgileri oluşturulur. Ardından dislokasyonlar düşük hatalı durumdan yüksek hatalı duruma geçerler. Son olarak da dislokasyonlar tane sınırlarına doğru itilir.

EKAP ile dislokasyon çizgilerinin oluşturulması, haddeleme gibi geleneksel plastik deformasyon işlemlerinden farklı değildir. Çünkü bu durum tamamen plastik şekil değiştirme olayıdır.

İlk geçiş aşamasında oluşan dislokasyonlar kararlıdır. Daha sonraki geçişlerde birim şekil değişimi ve kullanılan işlem yönüne bağlı olarak bu çizgiler farklı konumlar oluşturacak şekilde hareket ederler. Resim 3.3 de Gerilimli elektron mikroskobu (TEM) kullanılarak ticari saf 1050 alüminyum alaşımı üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda görüntülenen dislokasyon duvarları gösterilmektedir [59].



Resim 3.3. 1 Pas yapılmış Al 1050 alaşımında dislokasyon duvarları [59].

4. ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ÜRETİMİNE GÖRE SINIFLANDIRILMASI

Çizelge 4.1’de özellikleri verilmiş olan Alüminyum, uygulama alanı oldukça geniş bir mühendislik malzemesidir. Saf alüminyumun yoğunluğu, yaklaşık olarak çeliğin üçte biri kadardır. Magnezyumdan sonra, en hafif metaldir. Ayrıca, mukavemeti 700 MPa’a kadar ulaşabilen alüminyum alaşımları, düşük karbonlu çeliklerle rekabet edebilecek düzeydedir. Alüminyum, yüksek dayanım özelliğinin yanında, iyi elektrik ve ısı iletkenliğine sahiptir. Alüminyumun dayanım/yoğunluk oranının yüksek olması, ayrıca, alüminyum alaşımlarının yapı çeliklerinden daha iyi ısıl işlem kabiliyetine sahip olması, alüminyumu önemli bir endüstriyel malzeme haline getirmiştir. Günümüzde, alüminyum alaşımları deniz, uzay ve havacılık, otomotiv ve savunma sanayi alanlarında yoğun olarak kullanılmaktadır [60].

Çizelge 4.1. Saf alüminyumun özellikleri [61].

Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26,97 gr/mol
Kristal yapısı	Yüzey Merkezli Kübik (YMK)
Yoğunluğu	2,7gr/cm ³
Ergime noktası	660°C
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	150-300 °C
Buharlaşma noktası	2450 °C
Özgül ısısı	0,224 cal/gr (100 °C)
Elastisite modülü	72x10 ³ MPa
Poisson oranı	0.33
Kayma modülü	27x10 ³ MPa
Çekme mukavemeti	40-90 MPa
Akma mukavemeti	10-30 MPa
Kopma uzaması	% 30-40

Alüminyum alaşımları, üretim metotları esas alınarak dövme (plastik şekil verme işlemi) ve döküm olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alüminyum alaşımları, döküm alaşımlardan oldukça farklı mikro yapı ve kompozisyona sahiptir. Her ana grup içindeki alaşımlar, ısıl işlem yapılabilen ve yapılamayan alaşımlar olmak üzere iki alt gruba daha ayrılabilir. Isıl

işlem yapılabilen alaşımlarda yaşlandırma ile dayanım artışı sağlanabilirken, ısıtıl işlem yapılamayan alaşımlarda deformasyon sertleşmesi ve alaşım mukavemetlenmesi ile dayanım artışı sağlanır. Başlıca alaşım elementleri olarak; magnezyum, silisyum, bakır, çinko kurşun, nikel ve titanyum kullanılmaktadır [62].

4.1. Döküm Alüminyum Alaşımları

Alüminyum döküm alaşımlarında da dövme alüminyum alaşımlarında olduğu gibi dört rakamlı simgeleme kullanılır. Ancak döküm alaşımlarında üçüncü rakamdan sonra bir nokta konulur. Tüm alaşımlar için kullanılan bu simgeler Çizelge 4.2’de verilmiştir [63].

Çizelge 4.2. Alüminyum döküm alaşımlarının gösterimi [63].

SİMGE	TEMEL ALAŞIM ELEMENTİ
1xx.x	Alüminyum (en az %99,00)
2xx.x	Bakır
3xx.x	Silisyum-Bakır ve/veya Magnezyum
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
6xx.x	Kullanılmayan Dizi
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay
9xx.x	Diğer Elementler

Burada 1xx.x serisi için, ikinci ve üçüncü rakamlar alüminyumun noktadan sonraki saflık değerini belirtir. Noktadan sonraki rakam ise döküm şeklini gösterir. Aşağıda ürün şekilleri ve rakamsal karşılıkları verilmiştir.

0 – Döküm

1 – İngot (Külçe)

2 – Modifiye edilmiş ingot

3xx.x ile 9xx.x arasındaki alaşımlarda ise ikinci ve üçüncü rakamlar yalnızca bir sıralama sayısını oluşturur [62].

Alüminyum döküm alaşımları akıcılık ve besleme yeteneği; dayanım, süneklik ve korozyon direnci gibi döküm sınıfları için geliştirilmişlerdir. Bu nedenle bunların kimyasal kompozisyonları dövme alüminyum alaşımlarından farklıdır ve alüminyum birliği sistemine göre sınıflandırılmışlardır. Dört basamaklı sayısal bir tasarım sistemi, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının dökülmüş ve dökümhane ingotu şeklinde sınıflandırmada kullanılır. İlk basamak alaşım grubunu gösterir. Bir kesir işaretiyle diğerlerinden ayrılan son basamak, ürünün biçimini örneğin; dökümler veya ingotu göstermektedir. Orijinal alaşım veya modifikasyonu sayısal tasarımdan önce bir seri harfle gösterilir. Harf "x" deneysel alaşımlar için kullanılmaktadır. Alüminyum döküm alaşımları daha yaygın olarak üç basamakla da tanımlanmaktadır.

Ana alaşım elementi olarak silisyum içeren döküm alaşımları, üstün döküm özelliklerinden dolayı en önemli ticari döküm alaşımıdır. Al-Si döküm alaşımları sıvı halde yüksek akıcılık, katılaşma sırasında düşük sıcak yırtılma eğilimi gösterir. İkili alüminyum silisyum alaşımlarına ısıtılma işlem uygulanılmamaktadır. Çünkü sadece küçük bir miktar silisyum (maksimum % 1,65 silisyum) alüminyumda çözünebilir ve silisyum katı eriyikten çökelmez. Ancak çok az sertleşmeye neden olmaktadır [64, 65].

Döküm Al-Si ikili alaşımlarının dayanım özellikleri, küçük miktarda (yaklaşık % 0.35) magnezyum ilavesi ile iyileştirilebilir. Bu tipin en önemli alaşımı A356'dır. Bu alaşım dökülebilirlik için % 7 Si ve alaşımı ısıtılma işlem uygulanabilir hale getirmek için % 0,35 Mg içermektedir. Alaşımın magnezyum silikat (Mg_2Si) içeriği % 0,5–0,6 arasındadır. Bu tip alaşım çökelti mukavemetlenmesi Mg_2Si 'nin kararlılığına atfedilmektedir. Dökülmüş şartlardaki bu alaşımın yapay yaşlandırılması optik mikroyapısını değiştirmez. Ancak ince dağılımlı kararsız çökeltilerden dolayı mukavemet artar. A356 alaşımı, ergiyiğe % 0,025 Na ilavesi ile modifiye edilirse kum döküm ötektik yapısı incelir. Ötektikteki silisyum parçacıklar küçülür. Bu

inceltme, yavaş soğutulmuş kum dökümün mekanik özelliklerinde bir miktar iyileşme sağlamaktadır. Küçük silisyum parçacıklarının katılaşma sırasında sıvı metalin akmasına daha az zarar verdiği görülmektedir. Sonuç olarak sodyumla modifiye edilmiş alaşımlar modifiye edilmemiş metallerden üstün bir yüzey kalitesi ve dentritler arasında daha az çekme oluşturmaktadır [64, 65].

Al-Cu döküm alaşımları Al-Si-Mg alaşımları ile hemen hemen yer değiştirmiştir. Al-Cu alaşımlarıyla yer değiştirmesinin ana nedeni, bunların zayıf dökülme özelliklerine sahip olmalarıdır [64].

Al-Li alaşımları 1980'li yıllarda özellikle uzay ve havacılık sektöründe ağırlığı azaltmak amacıyla kullanılmıştır. Bunlar aynı zamanda soğuk uygulamalar için (örneğin sıvı oksijen ve uzay araçları için hidrojen yakıt tankları için de) araştırılmıştır. Bununla beraber Al-Li alaşımlarının bedeli, lityumun yüksek maliyeti ve işlem için özel donanımlar gerektirmesinden dolayı geleneksel alüminyum alaşımlarından üç-beş kat fazladır. Bu nedenle bu alaşımları ağırlığın öncelikli olduğu yerlerde kullanılmaktadır. İkili Al-Li alaşımları düşük süneklik ve kırılma tokluğuna sahip oldukları için bu alaşımların, mukavemetlendirme için daha ince ve daha homojen çökeltiiler sağlamak amacıyla Cu ve Cu-Mg alaşımları ilave edilir.

4.2. Dövme Alüminyum ve alaşımları

Dövme alüminyum ve alaşımları dört basamaklı bir sayı ile tanımlanırlar. Binler hanesindeki rakam ana grubu gösterir (Çizelge 4.3). 2xxx serisinden 7xxx ana grubuna kadar her grup en büyük alaşım elementine göre adlandırılır.

Mesela 3xxx gurubunda en önemli alaşım elementi mangandır. Bu adlandırmaya uymayan grup serisi 6xxx serisidir. Bu guruba giren alaşımlarda hem magnezyum hem de silisyum bulunur. Bu iki element birleşerek magnezyum silis (Mg_2Si) oluşturur.

Çizelge 4.3'de bazı dövme alaşımlarının tipik kimyasal bileşimleri verilmiştir. Bu alaşımlardan bazılarının ISO karşılıkları Çizelge 4.4'de görülmektedir.

Çizelge 4.3. Dövme alüminyum ve alaşımların ANSI 35.1 standardına göre ana gurupları [66].

Alüminyum>% 99,00	1XXX
Bakır	2XXX
Mangan	3XXX
Silis	4XXX
Magnezyum	5XXX
Magnezyum-Silis	6XXX
Çinko	7XXX
Diğer elementler	8XXX
Kullanılmayan dizi	9XXX

Çizelge 4.4. ANSI standartlarında belirtilen bazı alüminyum alaşımlarının ISO karşılıkları [66].

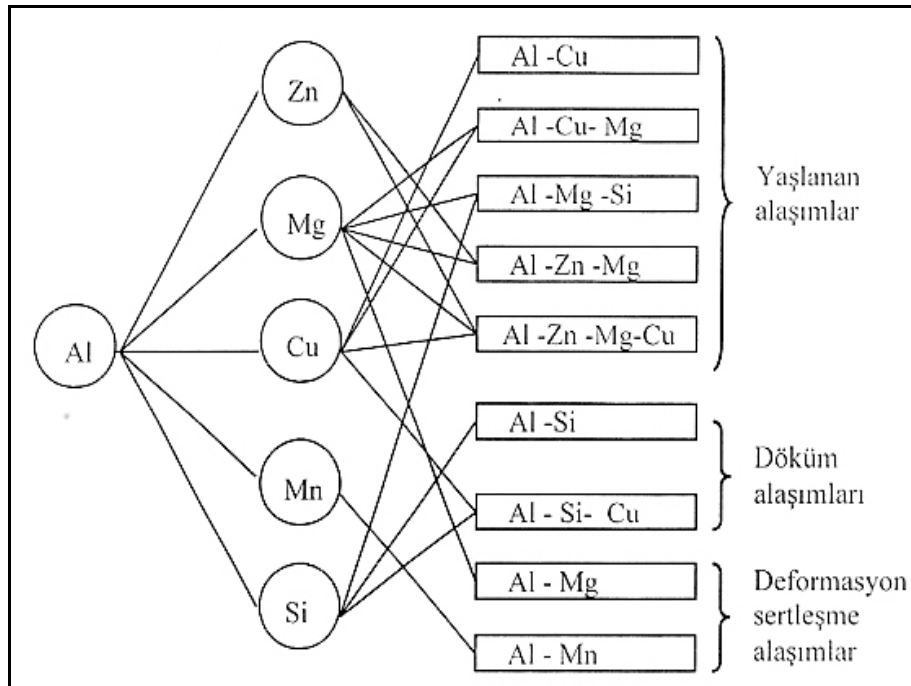
ANSI	ISO	ANSI	ISO
1060	A199,6	5056	Al Mg 4,5 Cr
1350	E-Al 99,5	5083	Al Mg 4,5 Mn 0,7
1100	Al 99,0 Cu	5086	Al Mg 4
		5154	Al Mg 3,5
2014	Al Cu 4 Si Mg	5454	Al Mg 3 Mn
2017	Al Cu 4 Si Mg		
2117	Al Cu v 2, 5 Si Mg	6061	Al Mg 1 Si Cu
2219	Al Cu 6 Mg	6063	Al Mg 0,7 Si
2024	Al Cu 4 Mg 1	6101	E-Al Mg Si
		6262	Al Mg 1 Si Pb
3003	Al Mg 1 Cu	6351	Al Si 1 Mg 0,5 Mn
3105	Al Mn 0,5 Mg 0,5		
		7005	Al Zn 4,5 Mg 1,5 Mn
4043	Al Si 5	7049	Al Zn 8 Mg Cu
4047	Al Si 12	7050	Al Zn 6 Cu Mg Zr
		7075	Al Zn 5,5 Mg Cu
5005	Al Mg 1	7475	Al Zn 5,5 Mg Cu
5050	Al Mg 1,5	7178	Al Zn 7 Mg Cu

Alaşımların elementlerinin alüminyuma ilave edilmesi genellikle mukavemeti artırma amacı taşır. Diğer bazı özelliklerle de sağlanan iyileştirmelerde çok önemlidir. Alüminyuma ilave edilen alaşımların elementleri mukavemeti iki şekilde artırır [66].

- 1- Katı eriyik olarak çözünüp deformasyon ile sertlik artırılır (deformasyon ile sertleşen alaşımlar).

2- Yüksek sıcaklıkta katı eriyik çözünüp ve düşük sıcaklıkta ince parçacık halinde çökelti oluşturlar (yaşlanma ile sertleşen alaşımlar).

Şekil 4.1'de ticari olarak üretilen temel alüminyum alaşımları, bunlarda bulunan alaşım elementleri ve bunları sertleştirme yöntemleri görülmektedir. Bu alaşım grupları ile ilgili bilgiler aşağıda açıklanmıştır [66].



Şekil 4.1. Temel Alüminyum alaşımları [77].

Şeki 4.1’de görüldüğü gibi bazı Al alaşımları ısıt işlem yapılabilen ve yapılamayan olarak ayrılmıştır.

4.2.1. Ticari saf Alüminyum (1xxx Gurubu)

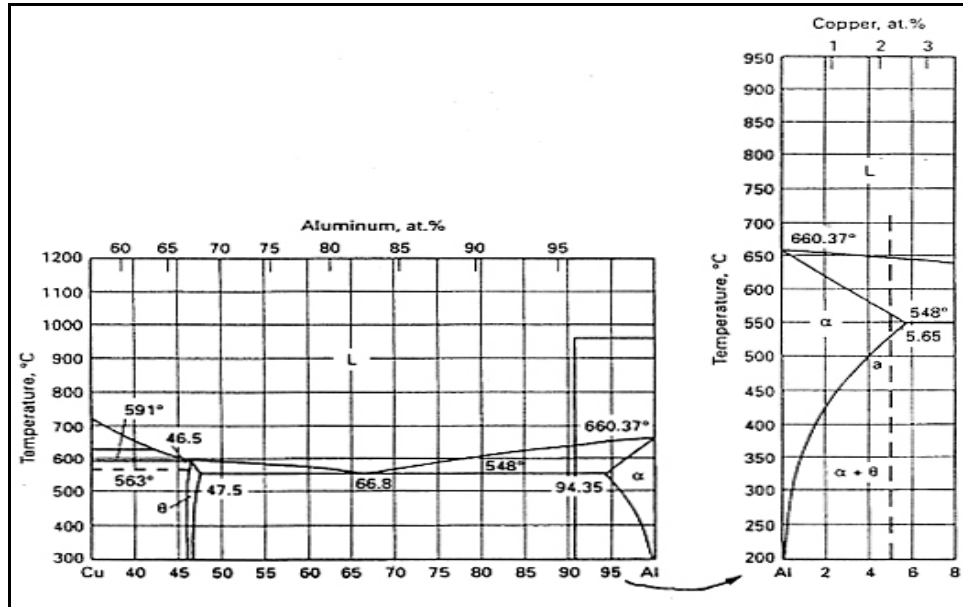
Bu grup minimum %99 alüminyum içerir. 1xxx gurubu içersinde 10xx serisi alaşımsız grubu ifade eder. Son iki rakam %99’dan sonraki virgülden itibaren minimum oranı gösterir. Mesela 1060 da alüminyum oranı en az %99,6 olmalıdır. 1xxx gurubunda 1 rakamını takip eden ikinci sayı impürite atomların oranını gösterir. Demir ve silisyum bu alaşımlarda bulunan temel impürite atomlarıdır. 1xxx grubu

alaşımlar yaşlanma sertleşmesi göstermez ve sadece soğuk şekil verme ile sertleştirilir. Bu alaşımların yüksek ısı ve elektrik dirençleri ile yüksek korozyon özellikleri vardır.

Şekillendirme kabiliyeti yüksek ama mukavemetleri düşüktür. Bu alaşımlar kimyasal teçhizat, mimari uygulama refrakter, ısı eşanjörü, elektrik ileticisi, ambalajlama gibi yerlerde kullanılır [66].

4.2.2. Alüminyum Bakır alaşımları (2xxx gurubu)

Bu alaşımlar genellikle yaşlanma ile sertleştirilirler. Şekil 4.2'de Al-Cu ikili denge diyagramı görülmektedir. Alüminyum içerisinde maksimum bakır çözünürlüğü 548°C'de %5,65 değerindedir. Bilhassa %2,5-5 Cu içeren alaşımlar yaşlandırılarak sertleştirilir. Sertleştirilen alaşımlarda bir miktar silisyum, demir, magnezyum, mangan, krom ve çinko bulunabilir. Yaşlanma ısıl işlemi sonunda bu alaşımlarda alaşımsız çelik mukavemetinin üzerinde mukavemet elde edilir [66].



Şekil 4.2. Al-Cu denge diyagramının alüminyum bölgesi [66].

Yaşlanma sonunda mukavemet artarken süneklik azalır. Bu alaşımların sertleştirilmiş haldeki sünekliği saf alüminyumun %50'sinden bile daha az olur. Yaşlanan

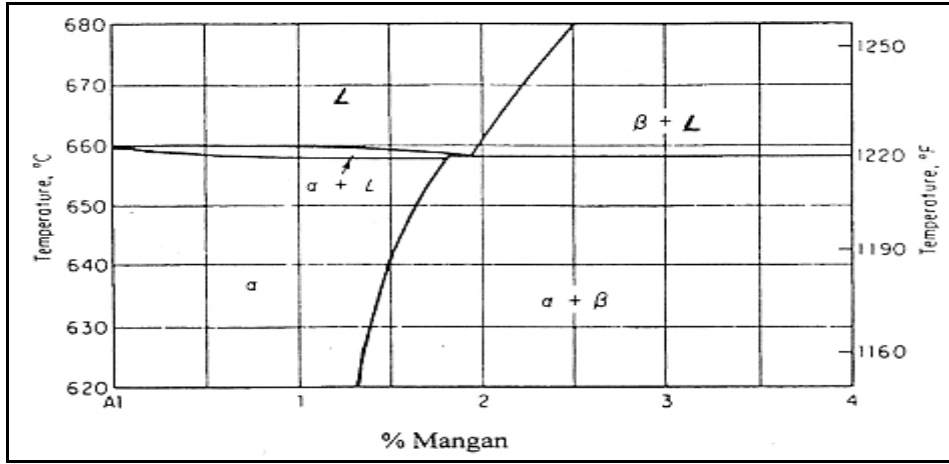
alaşımlarda elektrik iletkenliği azalır. Bu alaşımlarda korozyon direnci saf alüminyumdan oldukça düşük olur. Bu alaşımlar yüksek mukavemet ve hafif konstrüksiyon aranan yerlerde kullanılır [66].

Alüminyum-bakır-magnezyum alaşımları keşfedilen ilk çökelme yöntemiyle sertleştirilebilen alaşımlardır. Çökelti sertleştirilmiş ilk alaşım 2017 alaşımıdır. Bu alaşım % 4 Cu, % 0,6 Mg ve % 0,7 Mn kompozisyonuna sahiptir. % 4,4 Cu, % 0,5 Mg, % 0,8 Mn ve % 0,8 Si'lu 2014 alaşımı yapay yaşlandırmaya 2017 alaşımından daha fazla tepki vermesi için daha sonra geliştirilmiş ve günümüzde en yaygın Al-Cu Mg alaşımlarından biridir. Yüksek dayanım, magnezyum içeriğini % 0,5'den % 1,5'e çıkarmakla elde edilmektedir. Magnezyumun alüminyum-bakır alaşımlarına ilavesi, alüminyum bakır alaşımlarında çökelti sertleşmesini önemli ölçüde hızlandırmakta ve yoğunlaşmaktadır [64].

4.2.3. Alüminyum Mangan alaşımları (3xxx gurubu)

3xxx serisinde ana alaşım elementi mangandır. Şekil 4.3'te Al-Mn ikili denge diyagramı görülmektedir. Alüminyum içerisinde maksimum mangan çözünürlüğü 658°C de % 1,82 kadardır. Sıcaklık düştükçe mangan çözünürlüğü düşük oranda azalır. Bu alaşımlar yaşlanma ile sertleştirilmezler. Mangan çözünürlüğü düşük olduğu için üretilen alaşım sayısı çok azdır. Bu alaşımların mukavemeti 1xxx serisi alaşımlardan %20 daha fazla olur. En yaygın olarak kullanılan olan 3003 alaşımıdır. Bu alaşımın şekillenme kabiliyeti, korozyon direnci ve kaynak kabiliyeti yüksek olduğu ve mukavemeti normalin üzerinde olduğundan boru gaz ve yağ tankı, gıda kutusu gibi amaçlar için kullanılmaktadır [66].

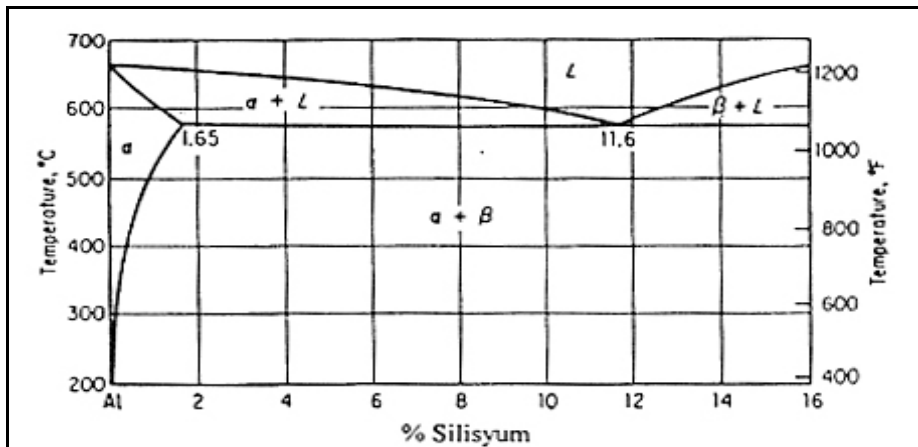
Ticari saflıktaki alüminyuma yaklaşık % 1,2 Mn ilavesi (% 6 Fe ve % 0,2 Si) orta düzeyde dayanımlı, ısıtıl işlem uygulanamayan bir alüminyum alaşımı üretilmektedir. Mangan ilavesi alüminyumu katı eriyik mukavemetlenmesi ve ince bir dağılım çökmesi ile mukavemetlendirme sağlamaktadır. Dayanım değerlerindeki artış %1'e kadar magnezyum ilavesi ile elde edilmektedir [64].



Şekil 4.3. Al-Mn denge diyagramının alüminyum köşesi [66].

4.2.4. Alüminyum Silisyum alaşımları (4xxx gurubu)

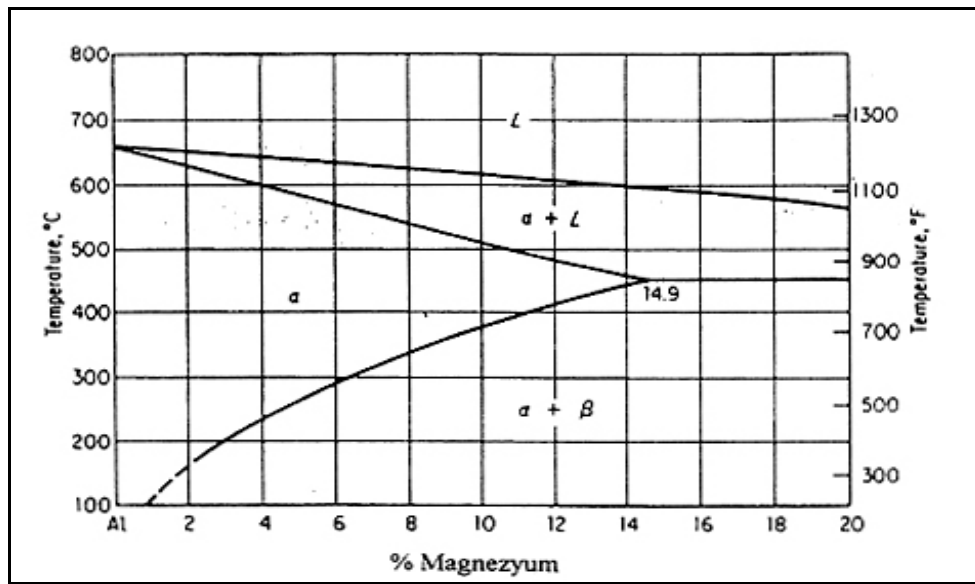
Şekil 4.4'te Al-Si ikili denge diyagramı görülmektedir. Alüminyumda silisyumun maksimum çözünme sınırı % 1.65' dir. Ancak 4xxx serisi alaşımlarda %2,5'e kadar silisyumlu alaşım yapılır. Artan silisyum oranı ergime sıcaklık aralığını azaltır ve dökülebilme kabiliyetini artırır. Bu yüksek silisyumlu alaşımların düşük termal genleşme katsayısı, yüksek korozyon direnci ve yüksek aşınma direnci olur. Bu sebeple dövme motor pistonları 4032 alaşımlarından yapılır. Bu alaşım yaşlandırılırken diğer ticari 4xxx serisi alaşımlar yaşlandırma ile sertleştirilemez [66].



Şekil 4.4. Al-Si denge diyagramının alüminyum köşesi [66].

4.2.5. Alüminyum Magnezyum alaşımları (5xxx gurubu)

Şekil 4.5'te Al-Mg ikili denge diyagramı görülmektedir. Katıda magnezyum çözünürlüğü azalan sıcaklık ile hızla düşer. Ancak %5'den az magnezyum ve yeteri kadar silisyumu olmayan alaşımlar yaşlandırma ile sertleştirilemez. Genellikle soğuk şekil verme ile sertleştirilebilir alaşımlar elde edilir. 5xxx serisi alaşımlarda magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artarken süneklik azalır [66].



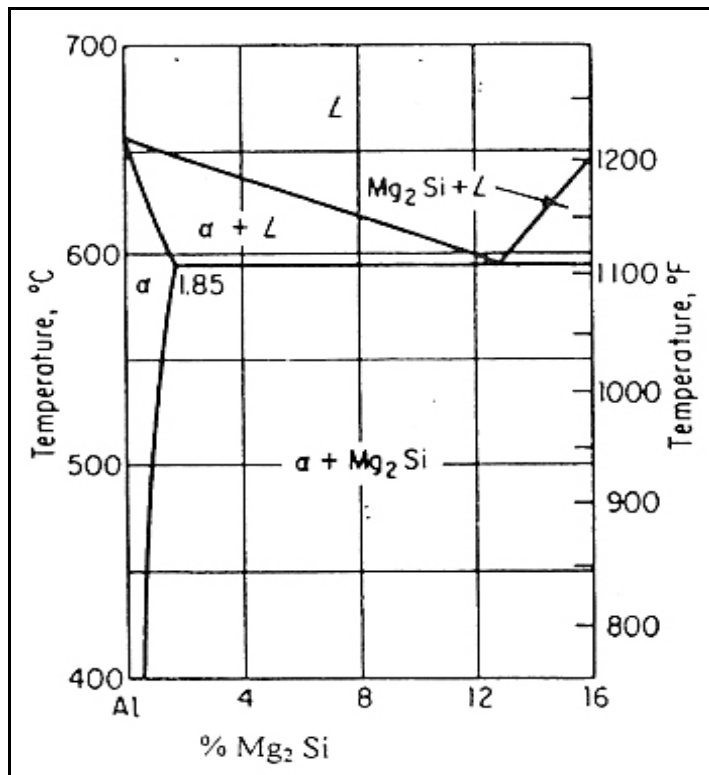
Şekil 4.5. Al-Mg denge diyagramının alüminyum köşesi [66].

İkili Al-Mg alaşımları ısıtıl işlem uygulanamayan 5xxx serileri için esas oluşturmaktadır. Magnezyum, alüminyumda önemli bir eriyebilirliğe sahip olmakla beraber (451°C'de % 14,9) katı eriyebilirlik sıcaklık düştükçe düşer. Alüminyum magnezyum alaşımlarında %7 Mg'dan daha az konsantrasyonlarda kayda değer çökeltme sertleşmesi görülmemektedir. Buna karşın magnezyum katı eriyik mukavemetlenme mekanizması ile alüminyumun mukavemetini önemli ölçüde artırır ve bu şekilde pekleşme özelliği sağlanmaktadır. Al-Mg alaşımları ısıtıl işlem uygulanamaz ancak beraber yaklaşık olarak % 4'den fazla Mg' lu (5083, 5086 ve 5456 gibi) Al-Mg alaşımları için tavlama sıcaklıklarında çözünen magnezyum miktarı oda sıcaklığında katı eriyik olarak kalandan daha fazladır. Böylece bu tip alaşımlar şiddetli bir şekilde pekleştirilir ve daha sonra uzun bir süre için oda

sıcaklığında depolandığında Mg_2Al_3 çökeltileri kayma bantları boyunca oluşmaktadır. Bu alaşımlar tavllanmış şartlarda yüksek sıcaklıklara maruz bırakılırsa çökeltiler tane sınırları boyunca oluşacaktır. Bu oluşan çökeltiler alüminyum alaşımları, korozif ortamda tane içerisinde gerilim korozyonuna karşı hassas hale getirmektedir [64].

4.2.6. Alüminyum - Silisyum - Magnezyum alaşımları (6xxx gurubu)

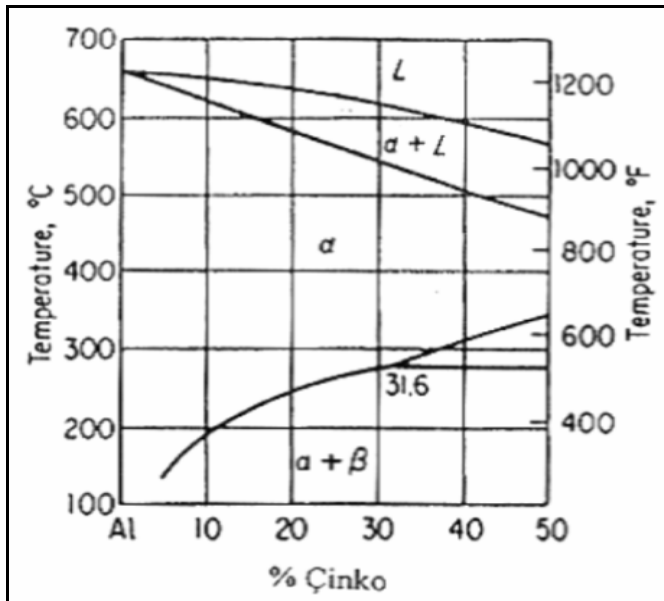
Magnezyum ve silisyum birleşerek Mg_2Si bileşiğini oluşturur. Bu bileşik alüminyum ile basit bir ötektik sistemi oluşturur (Şekil 4.6). 6xxx serisi alaşımlar çözeltiye alınır ve suni olarak yaşlandırılırsa alüminyum matrisi içinde Mg_2Si partikülleri çöker. Böylece orta seviyede mukavemet ve sertlik elde edilir. Ancak elde edilen mukavemet 2xxx ve 7xxx serisinde elde edilen değerlerden daha az olur. Bu alaşımların şekillendirme kabiliyeti, kaynak kabiliyeti, talaş kaldırma kabiliyeti ve korozyon direnci diğer yaşlandırılan alaşımlardan çok yüksek olur [66].



Şekil 4.6. Al-Mg₂Si denge diyagramı [66].

4.2.7. Alüminyum - Çinko alaşımları (7xxx Gurubu)

Şekil 4.7'de Al-Zn denge diyagramı görülmektedir. Şekilden anlaşılacağı gibi 7xxx serisi alaşımları yaşlandırma ile sertleştirilir. Bu alaşıma biraz magnezyum ilavesi mukavemeti artırır. Ayrıca bakır ve krom ilaveli alaşımlar geliştirilmiştir. 7178 alaşımı en yüksek mukavemet elde edilen alüminyum alaşımıdır. Bu alaşımların gerilme korozyon direnci düşüktür. Bu tehlikenin olduğu yerlerde çalışacak parçalarda çatlama olmaması için parça biraz aşırı yaşlandırılır. Böylece geliştirilmiş mukavemet-kırılma tokluğu- korozyon direnci kombinasyonu elde edilir [66].

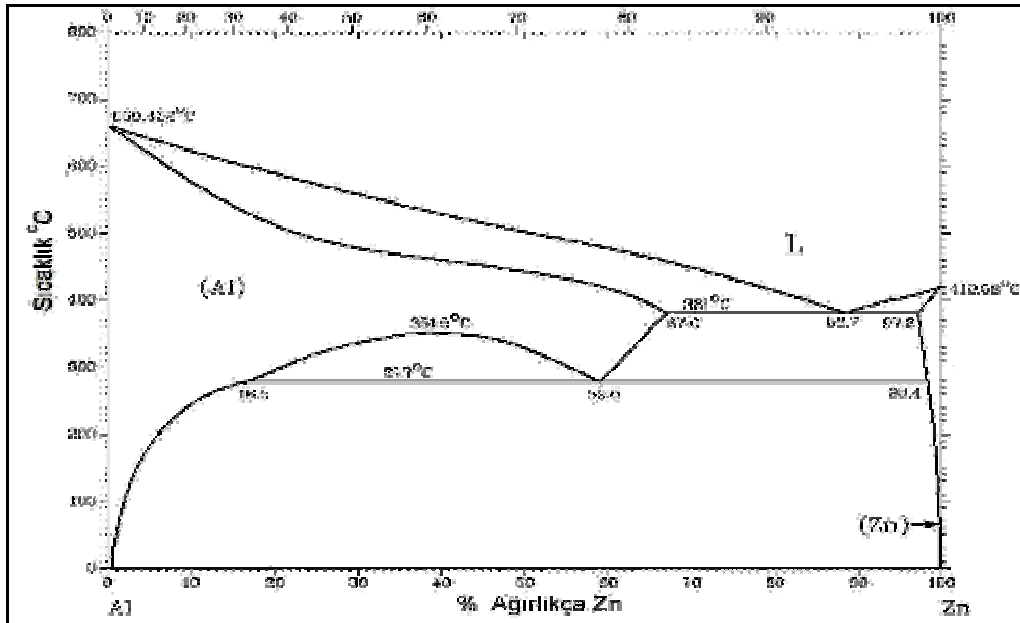


Şekil 4.7. Al-Zn denge diyagramının alüminyum bölgesi [66].

Alüminyum alaşımlarında % 4-8 Zn ve % 1-3 Mg kombinasyonları, dövülmüş ısıtıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarının 7xxx serilerini üretmek için kullanılmaktadır. Bu tip alaşımların bazıları, herhangi alüminyum esaslı ticari alaşımların en yüksek dayanım özelliklerini arttırmaktadır. Çinko ve magnezyumun her ikisi de alüminyumda yüksek katı eriyebilirliğe sahiptir. Genellikle yüksek çökelti sertleşmesi özelliklerini geliştirmektedir. % 1-2 bakır ilavesi ile uçak malzemelerinde kullanılabilecek alüminyum alaşımları üretilmektedir.

Yoğun araştırmaların sonucu olarak 1943'de 7075 alaşım tanıtılmıştır. 7xxx serisinin bu üstün üyesinin başarılı gelişimi, bu alaşımdan yapılan levhanın gerilim, korozyon, çatlama direncini büyük ölçüde iyileştiren kromun faydalı etkisi ile mümkün hale getirilmiştir. Alaşım 7075 % 5,6 Zn, % 2,5 Mg, % 1,6 Cu ve % 0,3 Cr içermektedir. 7075 alüminyum alaşımının yüksek bir dayanım modifikasyonu 1951 'de geliştirilmiştir. Bu tip yüksek miktarda Zn, Mg ve Cu içermektedir. Ticari üretimde yüksek dayanım alaşımı 7001, 1960'da tanıtılmıştır ve %1,4 Zn, %3 Mg ve %2,1 Cu içermektedir. Bakırsız (% 0,1'den az) alüminyum-çinko-magnezyum alaşımları da geliştirilmiştir. Bunlar orta dayanım değerlerine ve kaynaklanabilirliğe sahiptirler. 7004 ve 7005 gibi alaşımlar kamyon gövdeleri, treyler parçaları, taşınabilir köprüler ve tren yolu arabaları için kullanılmaktadır [64].

Yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarından, 7xxx serisine ait, ticari 7075 alüminyum alaşımı uçaklarda yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bu alaşım % 5-6Zn, % 2-3Mg, yaklaşık olarak % 1,5Cu ve az miktarda Cr, Mn, Ti, Zr ve Ag içermektedir. Alaşımda Cr, Mn, Ti, Zr ve Ag kristalleşme davranışını kontrol etmek ve çökeltileri modifiye etmek için kullanılan elementlerdir [64, 66]. Şekil 4.8'de Al-Zn diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.8. Al-Zn ikili faz diyagramı [66].

4.2.8. Alüminyum Lityum alaşımları

Özellikle uzay – uçak sanayinde düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli malzemeye duyulan talep Al-Li alaşımlarını son yıllarda ön plana çıkarmıştır. Al-Li alaşımları düşük yoğunluk yanında, yüksek elastisite modülü, yüksek yorulma direnci, düşük ve yüksek sıcaklıklarda tokluk özellikleri ile dikkatleri üzerine çekmektedir [66].

Lityumun alüminyum alaşımlarına ilavesinin başlıca sebebi yoğunlukta azalma buna karşın elastisite modülünde artış sağlamaktır. Alüminyum içersine her %1 Li ilavesi alaşımların yoğunluğunu %3 azaltırken elastisite modülünü de %6 oranında arttırır. Lityum içeren alüminyum alaşımlarının klasik alüminyum alaşımlarına göre üç dört kat daha yüksek olan üretim maliyeti nedeniyle; alaşımlar geliştirilirken hem ekonomik hem de teknolojik açıdan daha aktif alaşımların tasarımı amaçlanmaktadır [67].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler

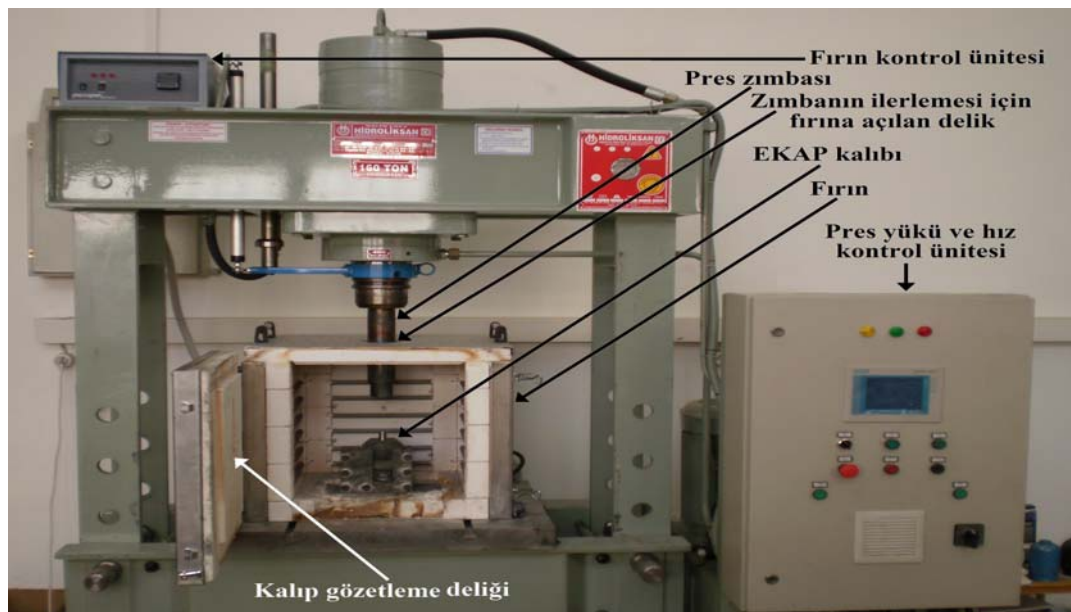
EKAP işlemi ile ultra ince tane üretimi için 7075 Al alaşımı seçilmiştir. Bu alaşım ACA METAL firmasından temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan 7075 alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan alüminyum 7075 alaşımının kimyasal bileşimi.

Element	Al	Si	Fe	Mn	Cu	Mg	Zn	Cr	Zr
Ort%	89,6	0,403	0,549	0,014	1,568	2,596	5,480	0,0125	0,0305

5.2. EKAP Sistemi

EKAP işlemlerinin gerçekleştirildiği ünite Resim 5.1’de gösterilmiştir. Bu ünite PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) kontrollü bir hidrolik pres, pres üzerine monte edilmiş özel tasarımı fırın ve EKAP kalıbı olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



Resim 5.1. EKAP işlemlerinde kullanılan test ünitesi.

5.2.1. PLC kontrollü pres

Deneysel çalışmalarda kullanılan hidrolik pres PLC (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) kontrollüdür. Presin PLC kontrollü olması, uygulanan yük ve pres zımbası ilerleme hızının istenilen şekilde ayarlanabilmesine imkan sağlamaktadır. Ayrıca bu parametreler Resim 5.1’de görülen kontrol ünitesine dijital ortamda girilerek presi hem manuel hem de otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Presin toplam yük kapasitesi 150 ton olup pres zımbası ilerleme hızı $0,01-10 \text{ mms}^{-1}$ aralığında ayarlanılabilir özelliktedir. EKAP işlemlerinde bu parametreler manuel olarak kullanılmıştır.

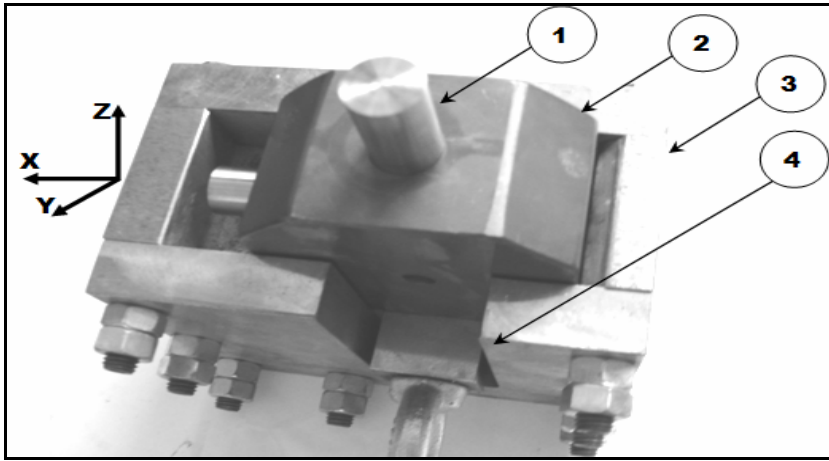
5.2.2. EKAP işleminde kullanılan fırın

Deneysel çalışmalarda kullanılan fırın pres sütunların arasına monte edilmiştir. Fırının maksimum sıcaklık kapasitesi 1000°C olup Resim 5.1 de gösterilen kontrol panelinden ayarlanabilmektedir. EKAP kalıp sıcaklığı kalıp çekirdeğine değen ve fırının ön kapağındaki delikten geçirilen bir harici ısı çifti (termocouple) yardımıyla kontrol edildi. Bu sayede hem doğru sıcaklık hem de kalıbın homojen sıcaklığa ulaşması için gereken zaman belirlendi. Kalıbın EKAP sıcaklığı olarak seçilen 200°C ’ye 1,5 saatte ulaştığı gözlemlendi. Her bir pas aralığında sıcaklık değişimi çok az olduğu için EKAP işlemleri seri bir şekilde çok kısa bir sürede gerçekleştirilmiştir. Kalıp pimlerine uygulanan yük Resim 5.1’de gösterilen pres zımbasıyla sağlanmıştır. Bu zımbanın kapalı fırın ortamında çalışması için fırının tavanına zımba çapına uygun bir delik açılmıştır

5.2.3. EKAP kalıbı

Bu çalışmada Resim 5.2’de gösterilen 20mm kanal çapına ve 90° kanal açısına sahip EKAP kalıbı kullanılmıştır. EKAP kalıbı uzun süren titiz bir çalışma ile imal edilmiştir. Çünkü EKAP işlemlerinde kalıbın çalışma performansını kullanan kalıp malzemesi, kanal yüzey kalitesi, pim malzemesi ve yüzey kalitesi, kanal ve pimin çap ve boyu, kanal ve pim arası boşluk toleransı, çekirdek kalıp, kalıp yatağı ve

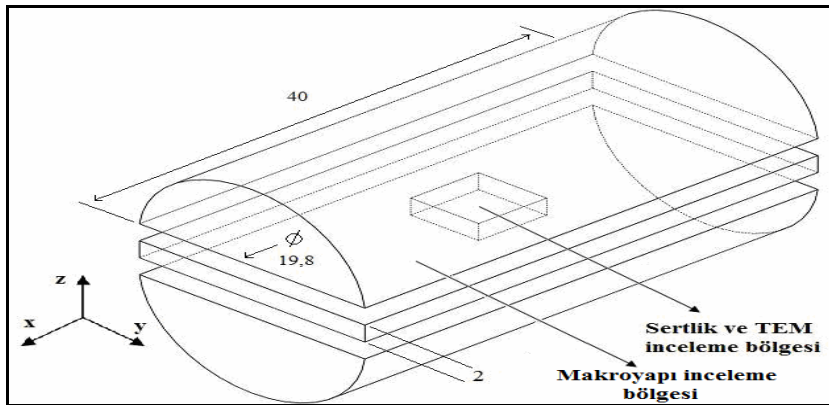
pimlerin sertlikleri gibi pek çok faktörün etkilediği görülmüştür. EKAP kalıbı çekirdek, pimler, pim tutucu ve kalıp yatağı olmak üzere dört kısımdan oluşmaktadır. Kalıp malzemesi yapımında 50 HRC sertliğinde sıcak iş takım çeliği kullanılmıştır.



Resim 5.2. EKAP kalıbı ((1): Zimba, (2):EKAP kalıp çekirdeği, (3):Kalıp yatağı, (4): Altlık blok).

5.3. EKAP Numunelerinin Hazırlanması

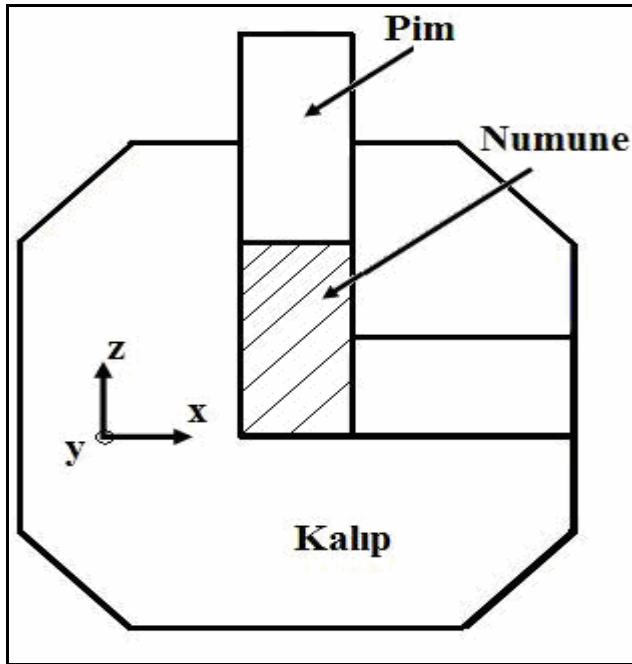
EKAP deneylerinde kullanılan 7075 Al alaşımı numuneleri 19,8 mm çapında ve 40 mm uzunluğunda talaşlı imalat yöntemiyle hazırlanmıştır. Şekil 5.1’de EKAP işlemleri için hazırlanan 7075 Al alaşımı numunelerin boyutları şematik olarak verilmiştir. Kalıp içine yerleştirilen numune üzerine z eksenine boyunca yük uygulanmış x eksenine (90° ’lik diğer kanala) akışı sağlanmıştır.



Şekil 5.1. EKAP numunesinin şematik gösterimi.

5.4. EKAP İşlemleri

Bu çalışmada, daha önce belirtildiği gibi 90° kanal açısına sahip EKAP kalıplarında Rota C tipi kullanılarak toplam 14 pas sayısına kadar EKAP işlemleri yapıldı. EKAP işlemlerinde ilk önce numune Şekil 5.2’de gösterildiği gibi kalıba yerleştirildi. Numune üzerine pim konularak kalıbın 200°C ’ye kadar ısıtılması sağlandı. Ardından pim üzerine itici pistonla Z eksenı boyunca yük uygulandı ve numunenin 90° ’lık diğerkanalda X düzlemi boyunca aşırı plastik deformasyonu ile akışı sağlandı. Takip eden diğerpaslar aynı şekilde Rota C tipine uygun bir biçimde yapıldı.



Şekil 5.2. EKAP kalıbının şematik gösterimi.

5.5. Sertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümleri G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Anabilim Dalındaki Instron Wolpert Diatestör 7551 model cihazda 5 kg yük kullanılarak Vickers cinsinden (HV5) yapılmıştır. 14 pasa kadar her bir numunenin sertlik değerkleri Şekil 5.1 de gösterilen aşırı plastik deformasyonun en yoğun olduğu bölgedeki 5 farklı noktadan alınan sertlik değerklerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

5.6. Makroyapı incelemeleri

Makroyapı incelemeleri EKAP işlemi yapılmış ve yapılmamış numunelerin Şekil 5.1 de gösterilen aşırı plastik deformasyon bölgesinden alınan 40x19,8x2 mm kısımları üzerinde yapılmıştır. Numuneler Sodick AQ325L marka tel erezyon cihazında plaka halinde üretilmiştir. Tel erezyonla kesme işleminde kullanılan tel kalınlığı 0.125 mm'dir. Daha sonra bu numuneler standart metalografik işlemlerden sonra 3 µm ve 1 µm elmas pasta ile parlatılmıştır. Parlatılan numunelerin yüzeyleri su ile yıkandıktan sonra alkol ile temizlenmiştir. Makroyapı incelemelerinde dağlayıcı olarak 5ml HF, 20ml HCl, 20ml HNO₃, 60 ml H₂O dan hazırlanan dağlayıcı solüsyon kullanılmıştır.

5.7. TEM Çalışmaları

EKAP işlemleri ile üretilen ultra ince tanelerin ve taneler arasındaki tane sınırı uyumunun belirlenebilmesi için TEM çalışmaları yapıldı. Bunun için uygun numuneler Şekil 5.1 de gösterilen bölgeden alınmıştır. Numuneler hassas elmas kesme cihazında 6x6x0.7 mm ölçülerine getirildikten sonra 800 ve 1200 grit zımparalar ile 150-200 µm kalınlığa inceltildi. İstenilen kalınlıkta hazırlanan numunelerin yüzeyleri 0.1 µm elmas pasta ile parlatıldı. Ardından 3mm çapında panç ile kesilerek standart ölçüye getirildi. Daha sonra bu numuneler Bilkent Üniversitesi UNAM laboratuvarında bulunan Struers marka Tenu Pol-5 cihazında (%65-85 etanol, %10-15 butoxyethanol, % 5-15 su) ikizjet inceltme (twinjet polishing) işlemine tabi tutuldu. Bu şekilde hazırlanan numuneler yine UNAM laboratuvarında bulunan FEI marka TECNAI G² model (300 kV) TEM cihazında incelendi. Ayrıca TEM cihazında EKAP yapılmamış, 8 pas yapılmış ve 10 pas EKAP işlemi yapılmış numunelerde seçilmiş alan difraksiyonu (SAD) çalışması yapılarak tane sınırı uyumları araştırılmıştır.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Al ve alaşımlarının tane boyutunu $\sim 10 \mu\text{m}$ 'in altına düşürmek oldukça zordur. Bu güçlük, Al alaşımlarının doğal yapısından kaynaklanan, istif hatası (stacking fault) enerjisinin nispeten yüksek olması ve dislokasyonların daha kolay toparlanmasından kaynaklanmaktadır. Al içinde dislokasyonlardan kaynaklanan gerinim enerjisi az miktarda depolanır. Deformasyon sonucu malzemede hata yoğunluğu yüksek olan bölge ile deforme olmamış bölge arasındaki enerji farkı, yeniden kristalleşme için itici güç olmaktadır. Bilindiği gibi yeniden kristalleşme ile tane boyutunun inceltmesinde malzeme içerisinde gerinim enerjisinin yüksek miktarda depolanması gerekir. Bu nedenle Al alaşımlarının tane boyutunun küçültülmesi zor bir işlemdir. Ancak, son yıllarda EKAP tekniği ile metalik alaşımlarda tane boyutu mikron altı hatta nano boyuta düşürülebilmektedir.

Yapılan bu çalışmada 7075 alüminyum alaşımına 14 pasa kadar EKAP işlemi uygulanarak nano boyutta tane üretilmeye çalışılmıştır. Ayrıca farklı pas sayısının mikroyapı ve sertlik üzerine etkileri incelenmiştir. Tüm EKAP işlemleri daha öncede belirtildiği gibi 200°C de 2 mms^{-1} pres zımbası ilerleme hızında ve maksimum 40 ton yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kalıp ve pimlerde 40 tonluk yükün üzerinde hasar oluşmasından dolayı pres maksimum 40 tona ayarlanmıştır. Uygulanan bu yükün üzerinde EKAP işlemi gerektiren durumlarda EKAP işlemleri yapılmamıştır. Özellikle EKAP çalışma sıcaklığı düşürüldüğünde uygulanan presleme basıncı daha da artmaktadır. Bu nedenle EKAP işlem sıcaklığı 200°C olarak sabit tutulmuştur.

6.1 EKAP Sisteminin Kurulumu ve Çalıştırılması

Bu çalışmada, öncelikle EKAP işleminin başarıyla gerçekleştirilebilmesi ve en uygun işlem parametrelerinin belirlenmesi için uzun süreli ön çalışmalar yapılmıştır. EKAP işlemi sıcaklık ve yüksek basınç altında yapılan bir işlemdir. Bu nedenle bu şartlarda kullanılan kalıp ve kalıp ekipmanlarının mukavemetleri ve yüzey kaliteleri çok önemlidir. EKAP işleminde kalıp-numune ve pimler arasındaki sürtünmeyi

azaltmak ve aşınmayı minimize etmek amacıyla çeşitli yağlayıcılar denenmiştir. Deneysel çalışmalarda başlangıçta yağlayıcı olarak grafit tozu kullanılmıştır. Fakat bu malzemenin yağlayıcı özelliği EKAP işlemi için yetersiz kalmış olup kalıp yüzeyinde ve kalıp pimlerinde ağır hasarlara sebep olmuştur. Resim 6.1 de grafit tozu kullanılarak yapılan çalışmada kalıp ve pimlerde meydana gelen hasar görülmektedir. Grafitteki bu başarısızlık EKAP işlem sıcaklığında grafitin kalıp yüzeyi ve pimlerde kuruması ve dökülmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Resim 6.1. Yağlayıcı olarak grafit kullanılarak yapılan EKAP işlem sonrası hasarlı pim oluşumu.

İkinci aşamada sürtünme kuvvetini ve aşınmayı azaltmak için MoS_2 yağlayıcı denenmiştir. Bu malzemenin yağlayıcılık kalitesinin yüksek olması nedeniyle çalışma süresince MoS_2 yağlayıcı kullanılmıştır. Böylece kalıp sisteminde meydana gelen hasarlar önlenmiştir.

Deneylerde, EKAP uygulanacak numuneler pimler yardımıyla sıcaklık ve yüksek basınç altında deformasyonun gerçekleştiği kalıp merkezine doğru itilmiştir. Başlangıç çalışmalarında kalıp sisteminde kullanılan pimler, sıcaklık ve basınç etkisi ile kalıp

kanalında genişterek sıkışmalara neden olmuştur. Bu da EKAP kalıplarında yarılmalara yol açmıştır. Kalıpta meydana gelen bu hasarın bir diğer nedeni ise imalatçıdan kaynaklanan yetersiz ısıtılma işlemin olmasıdır. Resim 6.2 de bu gibi problemlerden kaynaklanarak hasar gören EKAP kalıp çekirdeği görülmektedir. Bu nedenle kalıp kanallarının yüzey pürüzlülüğü özel işleme teknikleri kullanılarak giderilmiş ve sürtünme en aza indirilerek bu problem çözülmüştür.



Resim 6.2. Hasarlı kalıp çekirdeği.

Deneyisel çalışmalarda sertleştirilmiş sıcak iş takım çeliğinden üretilen kalıp ve pimler kullanılmıştır. Kalıp kanalları ilk olarak matkap ile delinip honlama işlemine tabi tutulmuştur. Fakat honlama ile kalıp kanallarında istenen yüzey kalitesine ulaşılamamıştır. Bu yüzden kalıp kanalı yüzeyi ve pimler arasına, numuneden kopan küçük parçacıklar sıkışmıştır. Bunun sonucu olarak kalıp kanalı yüzeyleri ve pimlerde deformasyon oluşmuştur. Bu nedenle kalıp imalatlarında kalıp kanalları açılmasında farklı bir talaşlı üretim yöntemi olan tel erezyon işlemi uygulanmış ve istenilen yüzey kalitesi sağlanmıştır.

6.2 EKAP Deneyleri

Bu çalışmada, EKAP rotası olarak Rota C kullanılmıştır. Kalıp kanalları arasındaki açı ise 90° dir. Kalıp kanal açısı 90° olduğunda malzemede en şiddetli deformasyon sağlanmıştır. Tüm deneyler 200°C sabit sıcaklıkta yapıp toplam da 14 paslık pas sayısına ulaşılmıştır. Bu çalışmada yukarıda belirtilen parametreler sabit tutulmuş ve sadece pas sayısına bağlı olarak 7075 Al alaşımında mikro yapısal, sertlik ve EKAP basınç değerlerindeki değişimler incelenmiştir. Deneylerden elde edilen bulgular aşağıda sırasıyla verilmiştir.

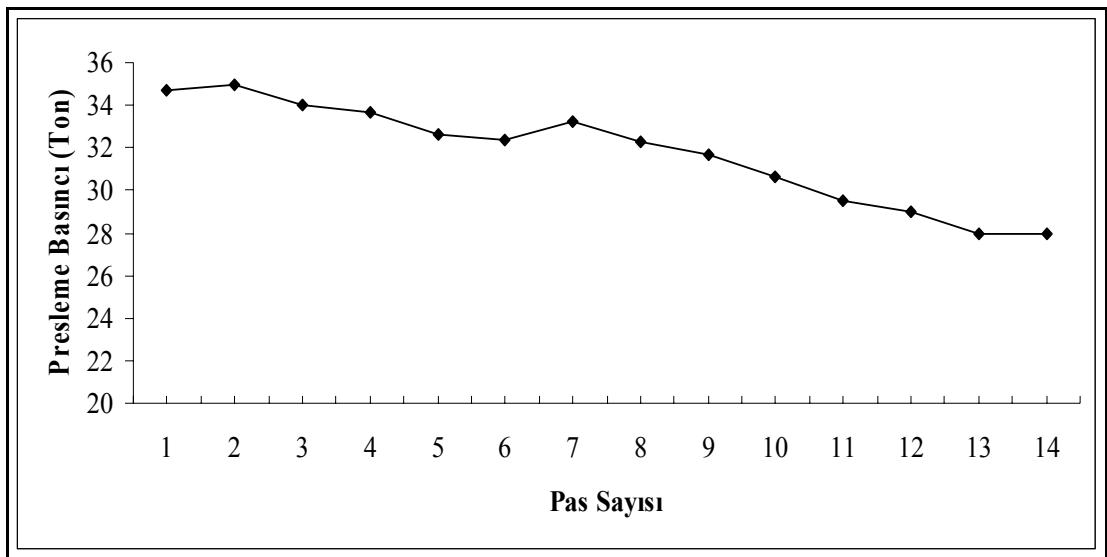
6.2.1. EKAP presleme basıncı

EKAP deneyleri sırasında her bir pasta elde edilen maksimum basınç değerleri kaydedilmiş ve bu değerler Çizelge 6.1 de verilmiştir. Ayrıca bu basınç değerlerinin ortalamaları alınarak, pas sayısına göre presleme basınç grafiği Şekil 6.1 de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Pas sayılarına göre pres basınç değerleri ve ortalamaları (Ton).

	Pas Sayısı													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Uygulanan Basınç (Ton)	34	35												
	36	36	35	35										
	32	32	31	29	29	29								
	35	36	35	35	35	35	34	33						
	35	36	35	36	35	34	35	34	33	32				
	35	35	34	34	32	32	32	31	31	30	30	29		
	36	35	34	33	32	32	32	31	31	30	29	29	28	28
Ort.	34,71	35	34	33,66	32,6	32,4	33,25	32,25	31,66	30,66	29,5	29	28	28

Çizelge 6.1 ve Şekil 6.1’de görüldüğü gibi pas sayısı arttıkça uygulanan presleme basıncında belirgin bir azalma gerçekleşmiştir. Genellikle 2. pastaki ortalama presleme basıncı 1. pastaki basınca göre yüksektir. Bunun muhtemel nedeni henüz etkili bir tane incelmesinin olmaması ve aşırı plastik deformasyon sonucu malzemede meydana gelen kısmi pekleşme olabilir. 2. pastan sonra presleme basıncı azalmış ancak 7. pasta presleme basıncı ilk paslardaki kadar olmasa da tekrar bir artış göstermiştir. 7. pastan 14. pasa kadar presleme basıncı devamlı olarak azalmıştır. Bu sonuçlar, pas sayısındaki artışla EKAP numunelerine tanelerin incelmış olabildiğini göstermektedir. Çünkü tane incelmesiyle deformasyon için geçerli olan tane sınırı kayması bu çalışmada kullanılan 200°C’de bile devreye girmiş olabilir. Özellikle uyumsuz ve geniş açılı tane sınırına sahip malzemeler yüksek sıcaklıkta daha kolay deforme edilebilmektedir. Ancak her pasta malzemeye uygulanan aşırı plastik deformasyon tanelerde enerji depolanmasına neden olmaktadır. Bu biriken enerji tanelerde dinamik toparlanma veya yeniden kristalleşmeye yol açabilir. Tane içlerinde oluşan dislokasyonların etkileşimi ya da tanelerin kayması sonucu bölünmesiyle bu gerilmeler azalabilir ve bu da artan pas sayısı ile presleme basıncının düşmesine neden olabilir. Diğer taraftan aşırı plastik deformasyonla oluşan enerji alt tane sınırlarının oluşumuna harcanmazsa 2. ve 7. paslarda olduğu gibi malzemenin plastik deformasyon basıncının artmasına neden olabilir.

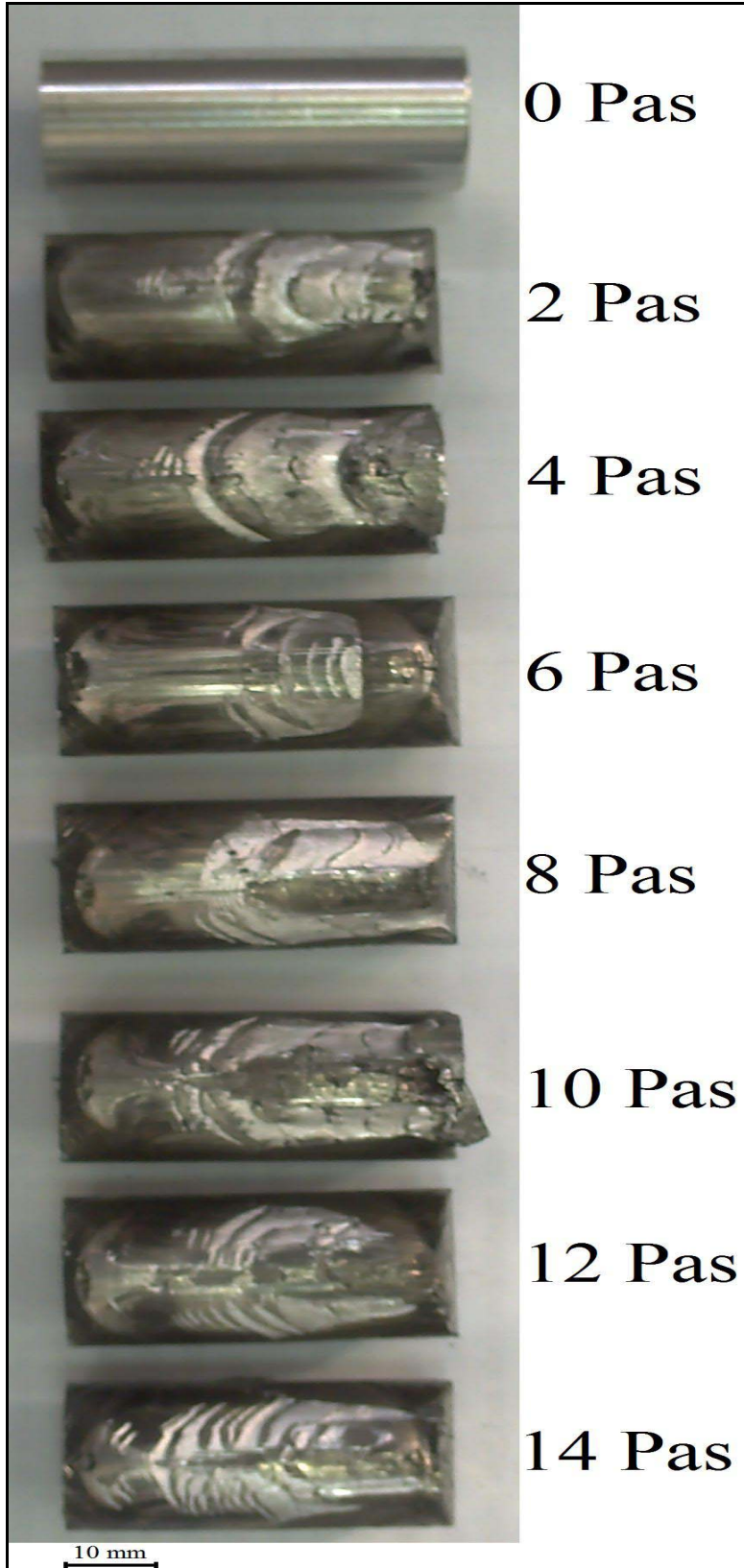


Şekil 6.1. Pas sayısı ile presleme basıncının değişimi.

Bir malzemede kritik kayma gerilmesi değeri kristalde tek bir dislokasyonun kayması için gerekli olan gerilmeden fazla, fakat yapı hatası bulunmayan bir kristalde kayma için gerekli olan gerilmeden daha azdır. Kritik kayma gerilmesine etki eden faktörlerden biriside malzemenin sıcaklığıdır. Sıcaklık arttıkça kritik kayma gerilmesi azalmaktadır. Yapılan çalışmada EKAP pas sayısı arttıkça malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı azalmaktadır. EKAP işlemleri 200°C sıcaklıkta yapıldığı için deformasyon miktarı arttıkça malzemenin toparlanma ve yeniden kristalleşme sıcaklığı da azalmaktadır. 200°C de yapılan EKAP işleminde aşırı plastik deformasyon ve dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşme etkisiyle kritik kayma gerilmesi azalmaktadır. Bu nedenle 200°C de yapılan EKAP işlemlerinde ilerleyen pas sayılarında deformasyon miktarı arttığı için toparlanma ve yeniden kristalleşme sıcaklığı azalmakta bunun sonucunda da kritik kayma gerilmesinin de azalmaktadır. Bu nedenle ilerleyen pas sayılarında kritik kayma gerilmesinin düşmesi nedeniyle uygulanan yük miktarının da azaldığı söylenebilir.

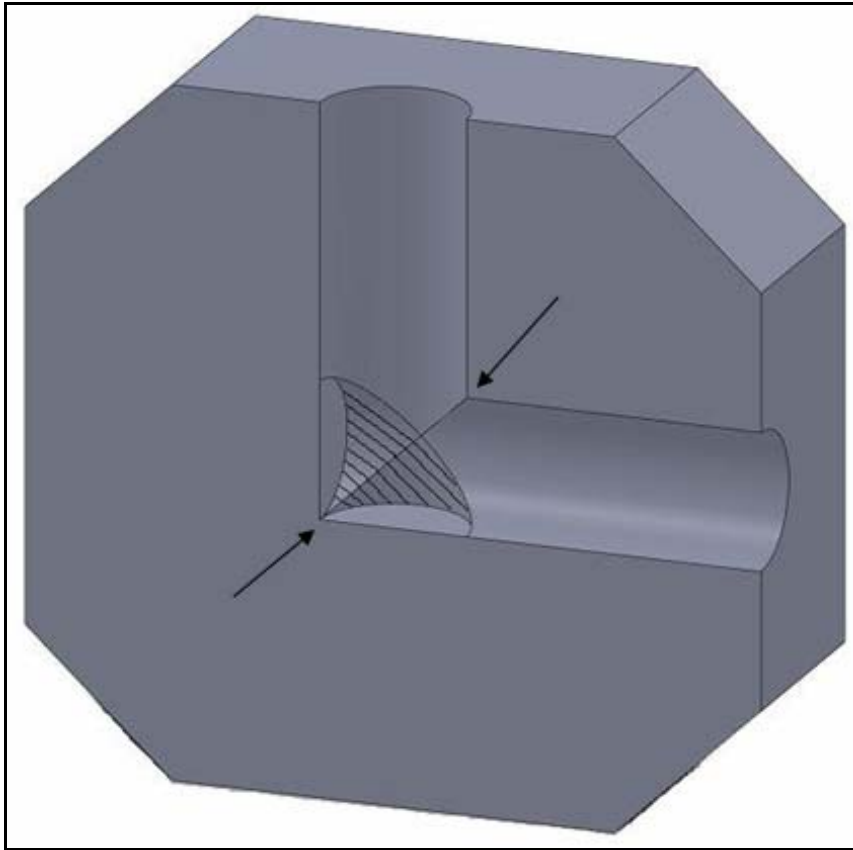
6.2.2. EKAP işlemi ile üretilen numuneler

Resim 6.3’de görüldüğü EKAP sonrası numunelerin pas sayısındaki artışla boylarında bir miktar azalma olduğu görülmüştür. Numune boyundaki azalmanın EKAP işlemleri sırasında malzemede meydana gelen kırılmalardan ve numune-kanal çapı arasındaki tolerans boşluğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Resim 6.3’de görüldüğü gibi numunelerin dış yüzeylerinde bölgesel kırılmalar olmuştur.



Resim 6.3. Değişik pas sayılarında EKAP yapılmış numunelerin sırası ile görüntüleri.

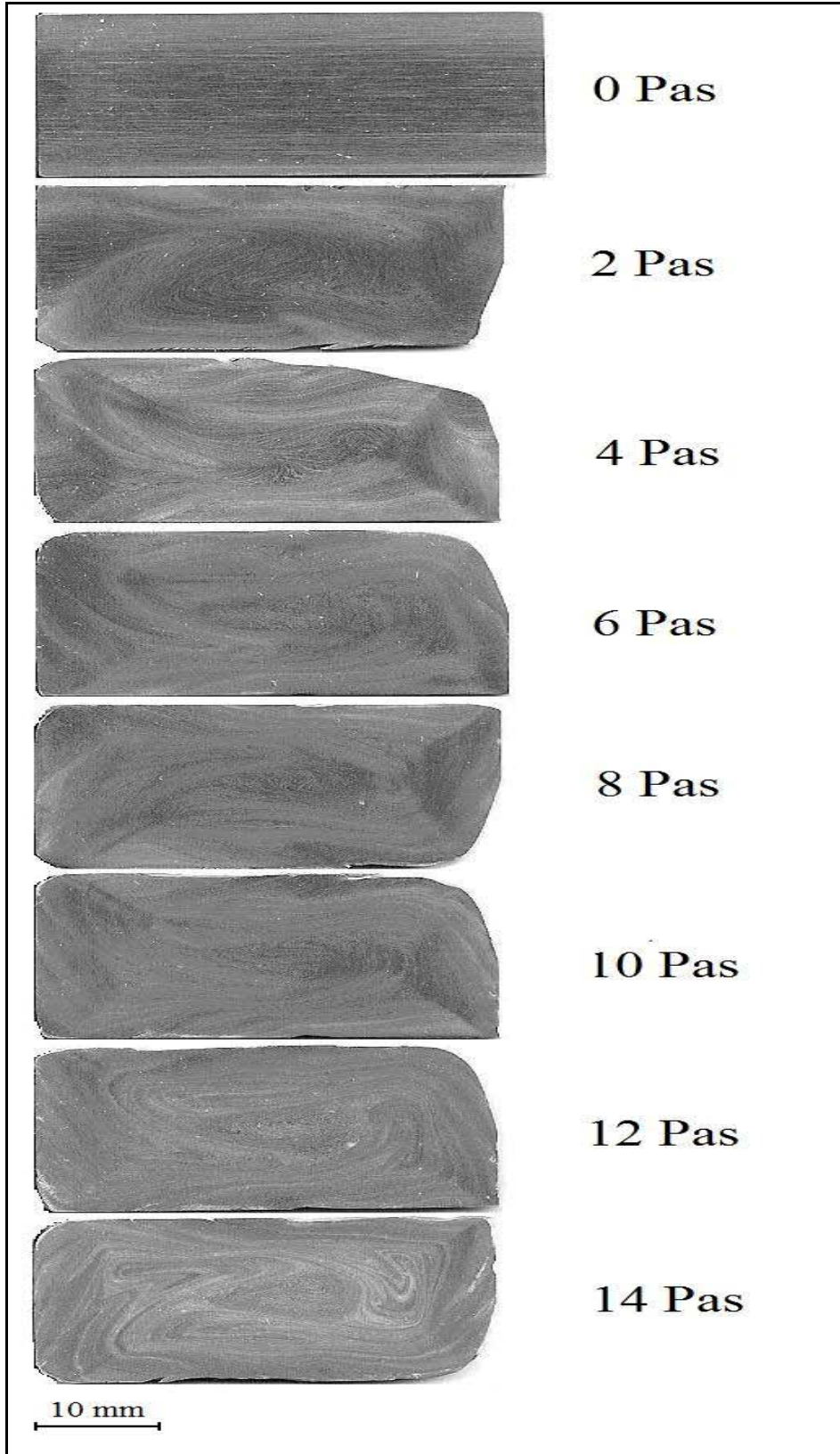
Bu kırılmalar Şekil 6.2’de şematik olarak gösterilen kalıp kanalının 90°’lik kesişen bölgesindeki keskin çıkıntıdan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü belli bir kuvvet uygulanarak itilen numune 90° lik açı ile diğer kanala döndüğünde, malzemenin iç kısımlarında aşırı plastik deformasyon sonucu kırılmalar (dökülmeler) meydana gelir. EKAP işleminde numunenin kalıptan geçiş sayısı arttıkça, numuneden kopan parça sayısı artmaktadır. Bunun sonucunda da malzeme boyunda bir miktar kısalma meydana gelmektedir. Resim 6.3 incelendiğinde boydaki en fazla kısalmanın 14 pas uygulanan numunede olduğu anlaşılmaktadır. Diğer taraftan EKAP yapılan numunelerin boyunda meydana gelen kısalmanın numune ve kanal arasında verilen boşluktan da kaynaklanmış olabilir. Çünkü ilk pastan itibaren numune 90°’lik diğer kanala akışı olmadan plastik şekil değiştirerek kanal boşluklarına dolmaktadır. Başka bir deyişle Şekil 6.2’de gösterildiği gibi kanal kesişim bölgesinde taralı bölgeye bir akış olup boyda bir azalma meydana gelmiş olabilir.



Şekil 6.2. 90°’lik kanal kesişim bölgesinde deformasyonun şematik görünümü.

6.3. Makroyapı İncelemeleri

Makroyapı incelemeleri için EKAP numuneleri boydan boya kesilerek X düzlemi boyunca oluşan plastik deformasyon incelendi. Resim 6.4’de farklı pas sayılarında EKAP işlemi uygulanmış numunelerin makroyapı görüntüleri verilmektedir. Şekilden de anlaşılabacağı gibi EKAP işlemi uygulanmayan numunede deformasyon çizgileri numunenin hadde yönüne paralel ve düzgündür. Fakat 14 pasa kadar EKAP uygulanan tüm numunelerde deformasyon akış çizgileri numunenin merkezine doğru yoğunlaşmıştır. Bu EKAP işlemlerinde aşırı plastik deformasyonun numunenin ağırlık merkezine yakın bölgelerde daha etkin olduğunu göstermektedir. Deformasyon akış çizgileri özellikle 8 pastan daha girift ve daha belirgindir.

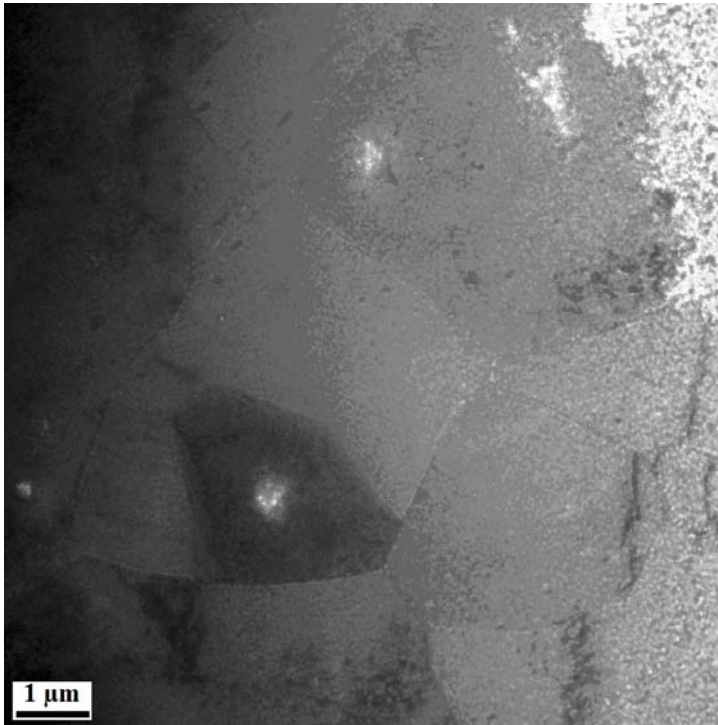


Resim 6.4. Değişik pas sayılarında EKAP yapılmış numunelerinin makroyapı görüntüleri.

6.4. TEM Çalışmaları

EKAP işlemiyle üretilen malzemelerde tane boyutları mikron altına düşmektedir. Bu çalışmada EKAP sonrası 7075 Al alaşımının tane boyutunu belirlemek için ilk önce kolaylığı açısından SEM çalışmaları yapılmıştır. Fakat yapılan çalışmalarda tane boyutunun çok küçük olduğunun ve SEM'in yetersiz kaldığı anlaşılmıştır. Bu sebeple EKAP yapılmış ve yapılmamış numunelerdeki tane boyutları TEM çalışmaları ile belirlenmiştir.

Resim 6.5'de EKAP öncesi 7075 Al alaşımından alınan geçirimli elektron mikroskobu (TEM) görüntüsü verilmiştir. Resim 6.5'den anlaşılabacağı gibi malzeme eşeksenel tane yapısına sahiptir. Tane boyutları ise yaklaşık olarak 3-10 μm arasında bir dağılım göstermektedir.



Resim 6.5. EKAP yapılmamış 7075 Al alaşımının TEM görüntüsü.

Resim 6.6'da ise 2 pas uygulanmış 7075 alaşımının Mikroyapı görüntüleri görülmektedir. Şekil 6.6a'dan anlaşılabacağı gibi 2 pas uygulanan numunenin tane

yapısında deformasyon etkisi ile değişmeler meydana gelmeye başlamış olup taneler eş eksenelliğini kaybetmiştir. Ayrıca Resim 6.6b’de verilen mikroyapı görüntüsünde ise tane üzerinde dislokasyon çizgileri görölmektedir.

Malzemeye uygulanan plastik deformasyonun etkisi ile dislokasyonların hareket etmesi, malzemede atom düzlemlerinin kaymasına neden olur. Tane içinde hareket eden dislokasyonlar deformasyon miktarındaki artışla beraber tane sınırlarında yoğunlaşarak malzemenin dayanım ve sertliğinde de artışa neden olur. Ancak EKAP işleminde 2 pas sayısı tane yapısında bir takım değişiklere neden olmakla beraber mikroyapıda çok fazla bir değişim oluşturmamıştır.

Resim 6.7’de ise 4 pas sayısı uygulanmış numuneden elde edilen TEM görüntüleri verilmektedir. Tane yapısında deformasyon yönüne bağlı olarak bir miktar uzamanın meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bu aşamada malzemede henüz belirgin tane küçülmesi meydana gelmemiştir.

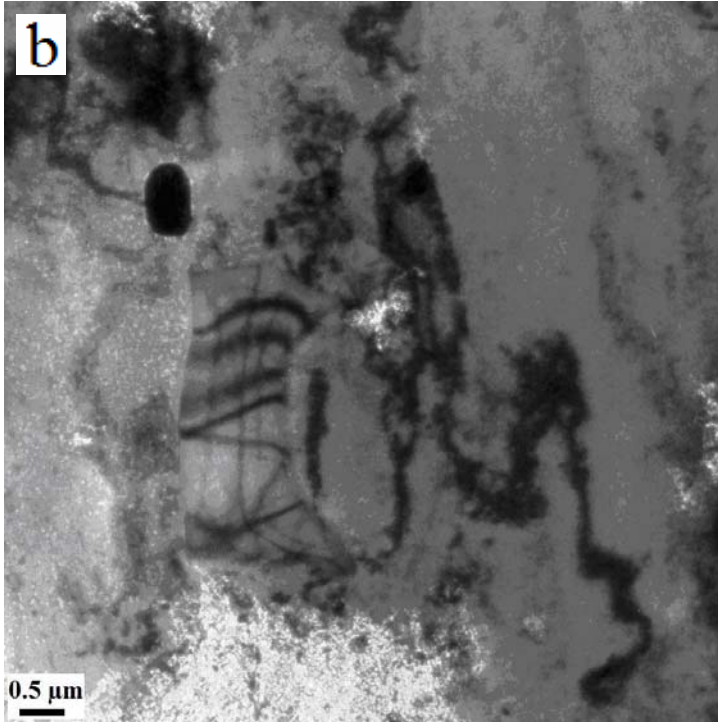
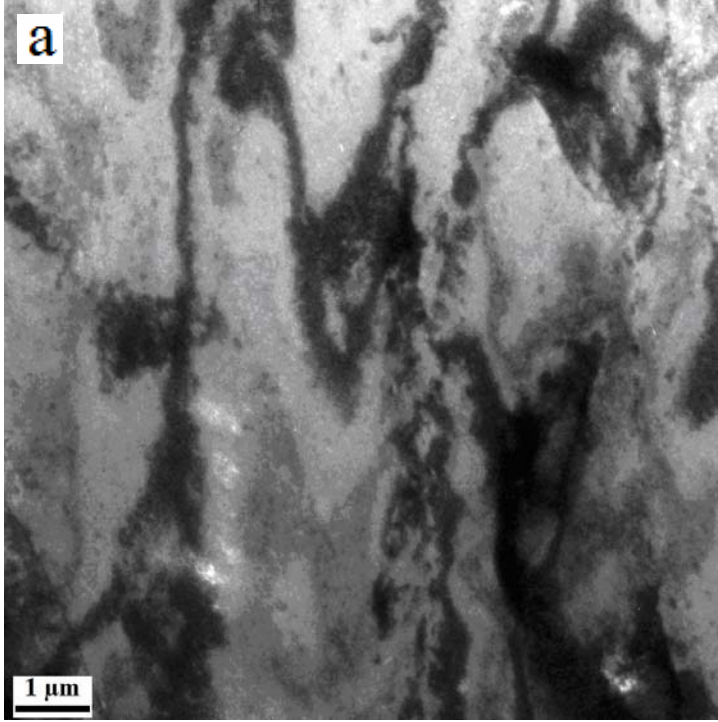
Resim 6.8’de 6 pas sayısı uygulanmış numunenin TEM görüntülerinden ise malzemede aşırı plastik deformasyon sonucu X düzlemi boyunca uzamış bantlı taneler içinde meydana gelen tane kırılmaları ve buna bağlı olarak elde edilen UİT’li yapı görölebilmektedir.

EKAP işlemi yapılan malzemelerin taneleri arasında küçük oryantasyon bozuklukları oluşur. Uzamış alt taneler oryantasyonu bozulmuş düşük açılı tanelerden bölünerek oluşur.

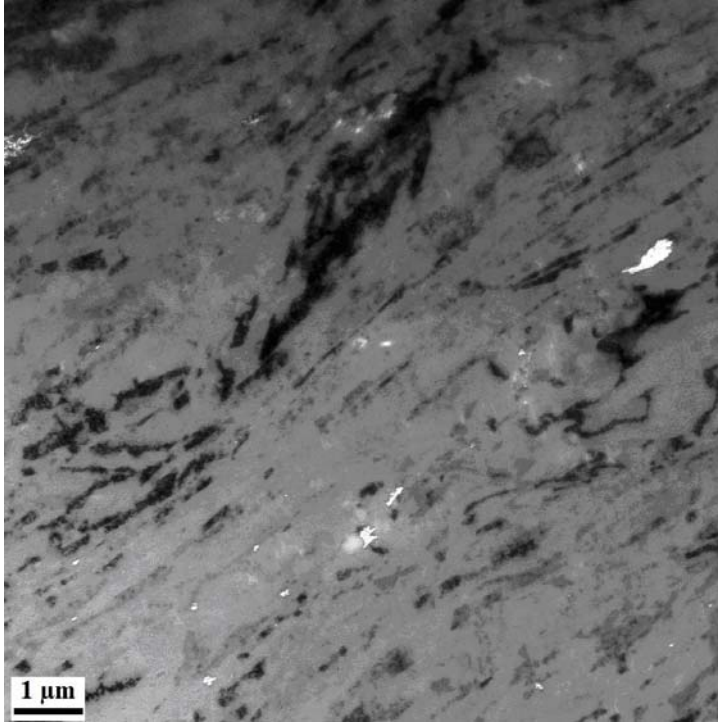
Resim 6.9’ da 8 pas uygulanmış numunenin TEM görüntüsü verilmiştir. Yine burada 6 pas yapılmış numunede olduğu gibi X düzlemi boyunca uzamış bantlı taneler görölmektedir. Ancak hem bantlı tanelerin kalınlığı hem de bantlar içerisinde oluşan yeni tanelerin 6 pas yapılmış numuneye göre daha da küçük olduğu belirgindir.

10 pas yapılmış numunenin TEM görüntüsü Resim 6.10’da verilmiştir. Burada özellikle 6 ve 8 paslardaki tane yapısından çok farklı bir tane yapısı ortaya çıkmıştır.

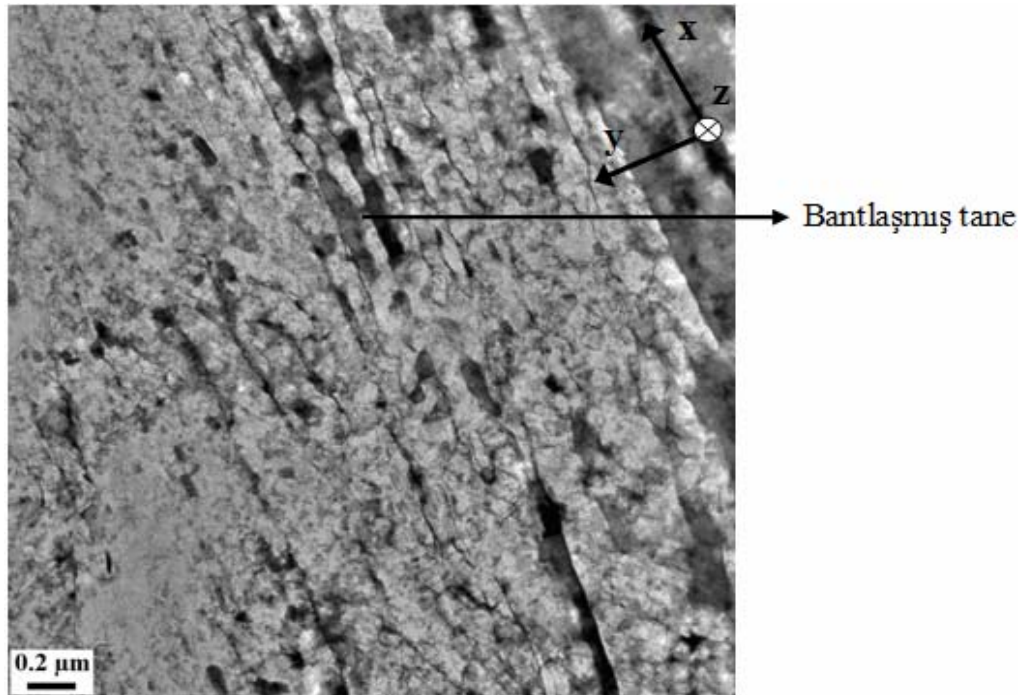
Bu pas sayısında nispeten tane büyümesi gerçekleştiği söylenebilir. Buna etken dinamik toparlanma ve yeniden kristalleşmedir.



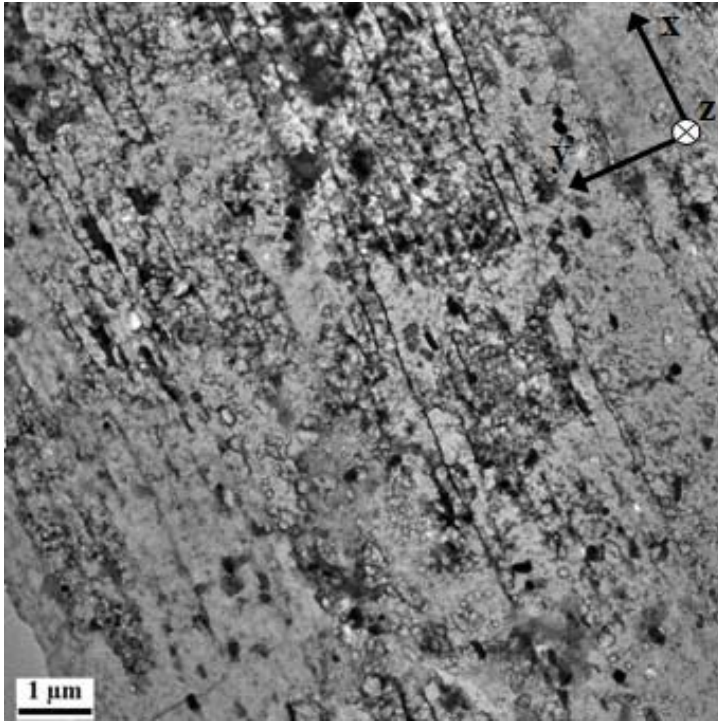
Resim 6.6. 2 pas yapılmış 7075 Al alaşımının TEM görüntüleri.



Resim 6.7. 4 pas yapılmış 7075 Al alaşımlının TEM görüntüsü.



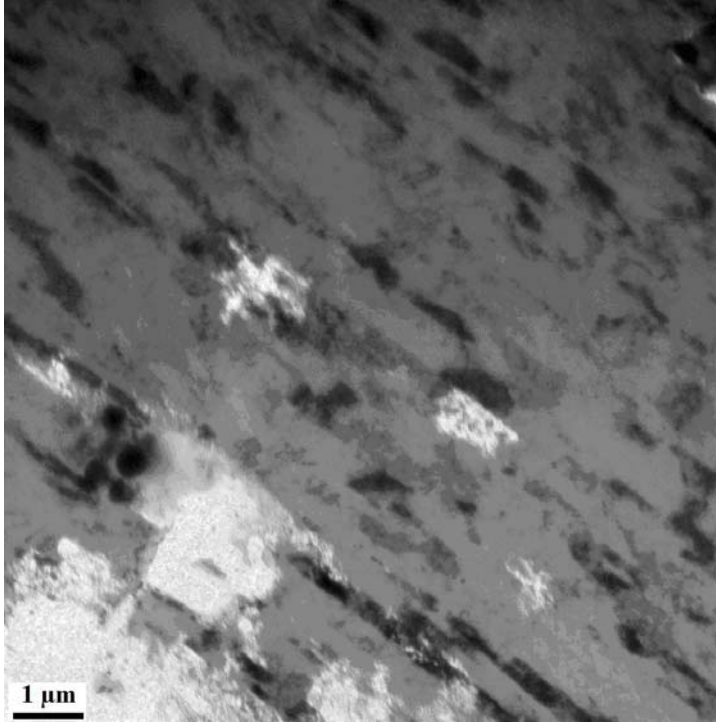
Resim 6.8. 6 pas yapılmış 7075 Al alaşımlının TEM görüntüsü.



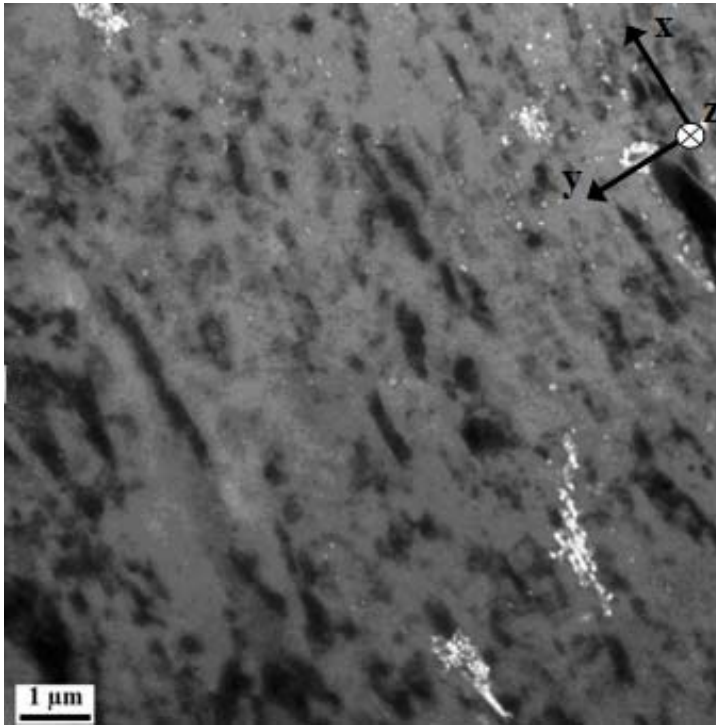
Resim 6.9. 8 pas yapılmış 7075 Al alaşımının TEM görüntüsü.

Resim 6.11’de 12 pas yapılmış numunede belirgin olmamakla beraber uzamış taneler ve X düzlemi boyunca yönelmeleri hala görülmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi yeniden kristalleşme sıcaklığının düşmesi ile tane yapısı bozulmuştur. Ancak yönelmiş tanelerin tekrar incelme eğiliminde olduğu da söylenebilir. EKAP işlemlerinde tekrarlı aşırı plastik deformasyonla meydana gelen tane içlerindeki birikmiş enerji yeni alt tane sınırlarının oluşumuna harcanırken böylece tane küçülmesini sağlar ancak sıcaklıkta bekleme süresi arttığında tane büyümesi gerçekleşebilir. 10. pas EKAP işleminde büyüme eğilimi gösteren taneler 12 pastan itibaren yeniden küçülme eğilimi göstermiştir. Bu durum, pas sayısı artışıyla tekrar tane büyümesi ve yeniden tane küçülmesi şeklinde devam edebilir.

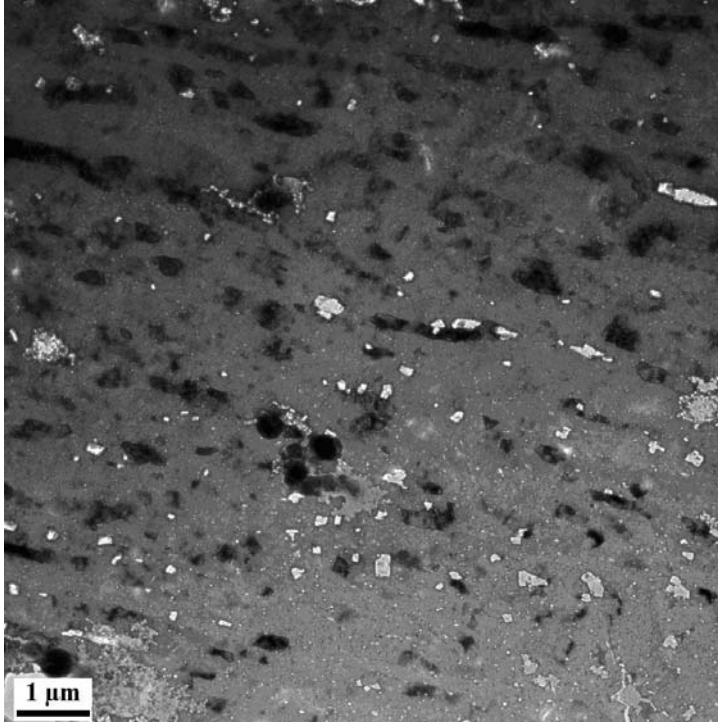
Resim 6.12’de 14 pas uygulanmış numunenin TEM görüntüsü verilmektedir. Buradan resimde tanelerin X düzlemi boyunca bantlaşma eğilimi azalmış ve yeni oluşan taneler daha ince, eş kesimli ve daha homojen dağılım olduğu görülmektedir. Bu nedenle optimum mikro yapı bakımından 14. pas en ideal pas sayısı sayılabilir.



Resim 6.10. 10 pas yapılmış 7075 Al alaşımlının TEM görüntüsü.



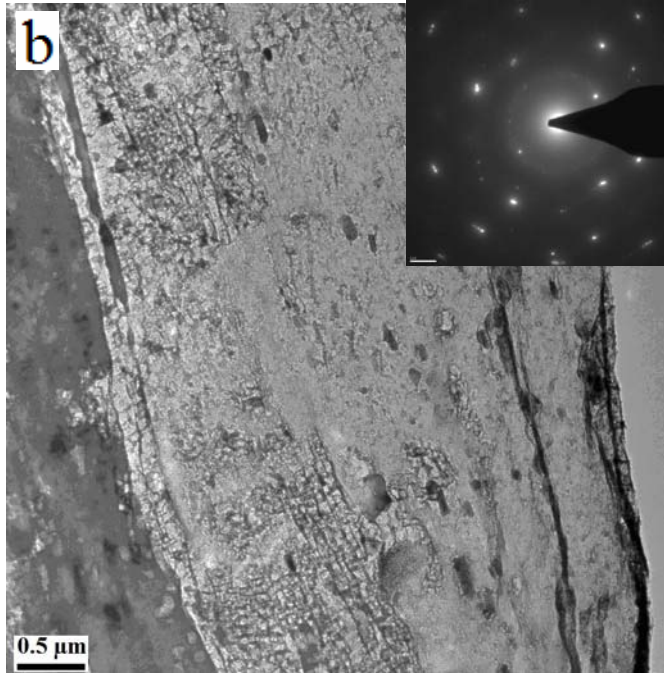
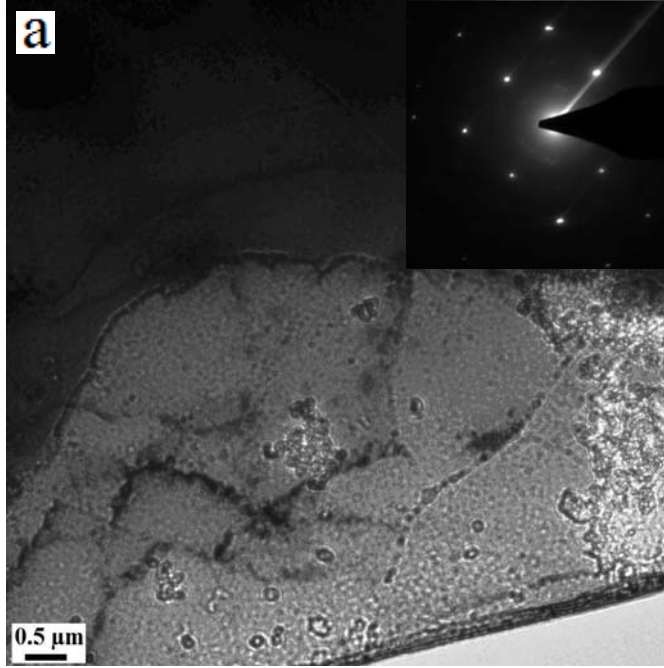
Resim 6.11. 12 pas yapılmış 7075 Al alaşımlının TEM görüntüsü.



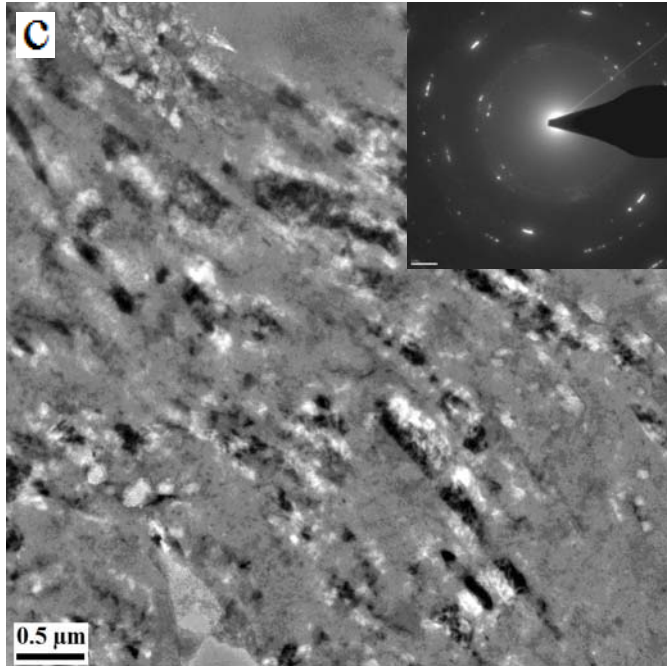
Resim 6.12. 14 pas yapılmış 7075 Al alaşımlının TEM görüntüsü.

Bu çalışmada 14 pastan daha yüksek paslarda çalışılmıştır. Ancak 14. pastan sonraki EKAP işlemlerinde numunelerde ciddi çatlaklıklar, kırılmalar, hatta parçalanmalar olmuştur. Bunun muhtemel nedeni EKAP işlemi sırasında numuneye uygulanan aşırı plastik deformasyonla depo edilen enerjinin (özellikle ince taneli yapılarda) daha fazla olması ve buna bağlı olarak alttane sınırlarının oluşmaması ve böylece mikro çatlakların meydana gelmesi olabilir. Daha fazla sayıda pas yapabilmek için EKAP işlem sıcaklığı artırılabilir ya da EKAP işlem rotası değiştirilebilir. Ancak daha fazla sayıda pas sayısı uygulamak için sıcaklığın daha fazla artırılması tane boyutunu etkili bir şekilde daha da küçültmez aksine tane boyutlarını daha da arttırabilir. EKAP işleminde temel amaç taneleri nano boyutlara kadar düşürmek, ancak aynı zamanda küçülen tanelerin aralarındaki açının arttırılıp ve uyumsuzlaştırmasıdır. Tane sınırı açısı ve uyumsuzluğu EKAP işleminin bir diğer amacı olan süperplastik deformasyon özelliğinin gelişiminde önemli rol oynar. Bu nedenle bu çalışmada bazı numunelerde ayrıca seçili alan difraksiyon (SAD) kırınım desenleri alınarak tane sınırı durumları incelenmiştir.

Resim 6.13’de EKAP yapılmamış, 8 ve 10 pas EKAP işlemi yapılmış numunelerin SAD desenleri verilmiştir



Resim 6.13. Bazı numunelerin SAD desenleri ((a) EKAP yapılmamış, (b) 8 pas EKAP yapılmış, (c) 10 pas EKAP yapılmış).



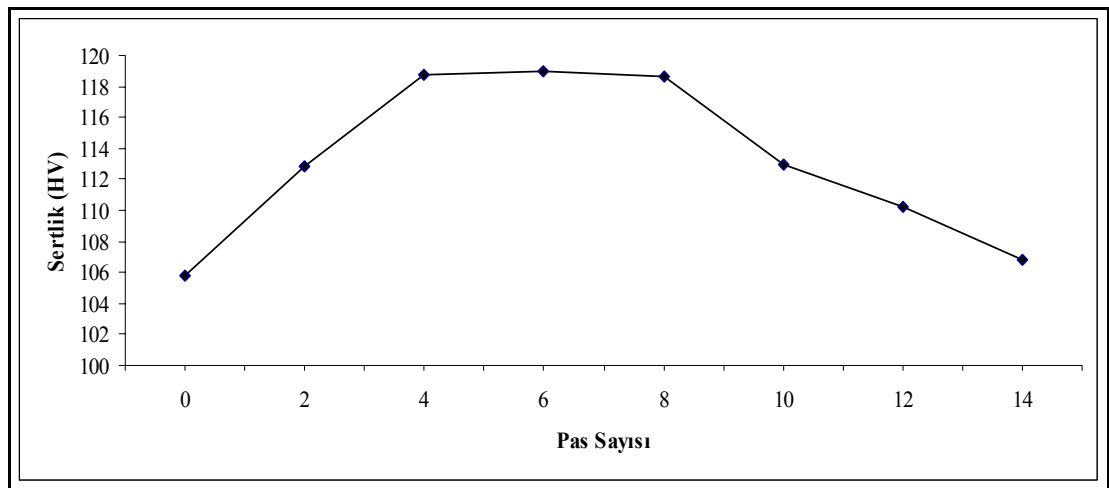
Resim 6.13. (Devam) Bazı numunelerin SAD desenleri ((a) EKAP yapılmamış, (b) 8 pas EKAP yapılmış, (c) 10 pas EKAP yapılmış).

SAD desenlerinden anlaşıldığı gibi EKAP yapılmamış ve 8 pas EKAP yapılmış numunedeki tanelerin tane sınırları daha uyumlu ve dar açılıdır. 10. pas EKAP yapılmış numunedeki tane sınırları uyumsuzlaşmış, dengeli olmayan ve daha geniş açılı olmuştur. Çünkü SAD desenlerinde daha fazla sayıda noktaların görülüp bir halka oluşturması da uyumsuz ve geniş açılı tane sınırının varlığını göstermektedir [68].

6.5. Sertlik Sonuçları

Şekil 6.3’de EKAP öncesi ve sonrası elde edilen sertlik değerleri verilmektedir. Görüldüğü gibi sertlik değerleri 4. pasa kadar artmış daha sonra 8. pasa kadar hemen hemen sabit kalmış ve 8. pastan sonra 14. pasa kadar azalmıştır. Sertlik değerlerinin belli bir pas sayısından sonra azalması beklenmeyen bir durumdur. Bu sonuç tane inceliğiyle birlikte tane içlerindeki birikmiş (depolanmış) enerji ve yeni tane sınırlarının oluşumuyla enerjinin gevşetilmesi, tane sınırı uyumsuzluğu ve tane sınırlarının çoğalması gibi pek çok karmaşık mikro yapısal sistemlerden kaynaklanabilir. Bilindiği gibi sertlik, malzemenin akma dayanımıyla orantılı olarak

değişmektedir. Akma dayanımı da Hall-petch eşitliğine göre ortalama tane boyutunun azalmasıyla artmaktadır. EKAP işlemindeki temel amaç ultra ince tane boyutu üretmektir. Buradan beklenen sonuç tane boyutunun düşürülmesiyle oda sıcaklığındaki sertlik ve dayanımın artırılmasıdır. 4. pasa kadar yapılan EKAP işlemiyle sertliğin artışı hem tane incelmesinin hemde aşırı deformasyonla meydana gelen malzemedeki birikmiş enerjiden kaynaklandığı düşünülebilir. Diğer taraftan özellikle 8. pastan sonra tane incemesi daha etkili olduğu halde sertliğin düşmesi iki nedene bağlanabilir. İlk EKAP sırasında artan pas sayısı ile malzemede biriken enerji alt tane sınırlarının oluşumuna harcadığından daha gerilimsiz tanelerin üretimi sağlanmaktadır. Bu da sertliğin azalmasına neden olmuş olabilir. İkinci neden olarak gerilimsiz bu tanelerin boyutları da oldukça azalmaktadır. Tane boyutu azalırken tane sınırı hacim oranı artmaktadır. Özellikle nano boyutlu tane sınırlarının bu denli çoğalması bir nevi boşluk gibi davranış gösterir. Bu nedenle sertlik değerleride azalabilir. Ultra ince taneli malzemelerin dayanımları Hall-petch eşitliğine uymadığı literatür de belirtilmektedir. [69]



Şekil 6.3. Pas sayısı ile sertlik değişimi.

Diğer taraftan aşırı plastik deformasyon sonucu artan dislokasyon yoğunluğu deformasyon sertleşmesi miktarını da arttırmaktadır. Dislokasyon yoğunluğu malzeme yapısındaki dislokasyonların birbirleri ile kalıntı element atomları, arayer atomları ve atom boşlukları ile etkileşimi sonucu kritik kayma gerilmesini etkiler.

Aşırı plastik deformasyon sonucu malzeme yapısında hata yoğunluğunun artması malzemenin kritik kayma gerilmesini de arttırmaktadır. Bu nedenle 8. pasa kadar malzemenin sertliği de artmaktadır. 8 pasa sayısından itibaren ise sertlikte belirgin bir azalma meydana gelmektedir. Bilindiği gibi bir malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı deformasyon miktarına bağlı olarak değişmektedir. Yani malzemeye uygulanan plastik deformasyon miktarı arttıkça yeniden kristalleşme sıcaklığı da düşmektedir. EKAP işleminin 200°C’de yapılması, aşırı plastik deformasyona uğrayan malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığını da düşürmektedir. Yeniden kristalleşme sıcaklığının düşmesi bu sıcaklıkta malzemenin dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşmeye uğradığını ve bu nedenle de çok az dislokasyon içeren veya dislokasyonsuz yeni bir yapının oluşmasıyla da sertliğin düşmesi olarak yorumlanabilir.

7. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçların Değerlendirilmesi

1. EKAP işleminde kalıp, numune ve pimler arasındaki sürtünmeyi azaltmak ve aşınmayı minimize etmek amacıyla grafit ve MoS_2 yağlayıcılar kullanılmıştır. Grafit yağlayıcıdan iyi sonuç alınamamış ve bunun sonucunda EKAP kalıbı ve pimlerde hasar meydana gelmiştir. MoS_2 yağlayıcı kullanıldığında kalıpta herhangi bir kalıcı deformasyon gözlenmemiştir.
2. EKAP işleminde 2. pastan sonra uygulanan yükte azalma meydana gelmiştir.
3. EKAP işleminde numunenin kalıptan pas sayısı arttıkça numune boyunda kısalma olduğu görülmüştür. Boydaki bu kısalma kalıp içindeki kanalların kesişim bölgesinden ve kalıp kanal boşluklarına yayılmasından kaynaklanmaktadır.
4. EKAP işlemi yapılan numunelerde 6 pasa kadar sertlik değerinde artış meydana gelmiştir. Bundan sonraki paslarda sertlikte dinamik yeniden kristalleşme nedeniyle azalmalar olduğu belirlenmiştir.
5. Makroyapı incelemelerinde EKAP işlemi sırasında deformasyon çizgilerinin oluştuğu, pas sayısı arttıkça numune yüzeyinde oluşan deformasyon çizgilerinin kalınlaşarak deformasyon bantlarının meydana geldiği görülmüştür.
6. Mikroyapı bakımından en optimum pas sayısının 14 pas olduğu anlaşılmıştır.
7. EKAP yapılmamış ve 8 pas EKAP uygulanmış 7075 alüminyum alaşımının TEM seçili alan kırınım paterninde belirgin dağıtılmış noktalar görülmüş, ancak 10. pasta SAD desenleri extra noktalar şeklinde dağılarak bir halka oluşturmuştur. Bu nedenle 8. pasa kadar EKAP işlemi yapılan numunelerin tane sınırlarının daha uyumlu ve dengeli olduğu, 10. pastan itibaren uyumsuz ve geniş açılı tane sınırlarına sahip olmuştur. Bu nedenle bu çalışmada tane sınırı bakımından en ideal kritik pas sayısı 10. pas ve üzeri EKAP işlemidir.

7.2. Öneriler

1. EKAP işlemlerinde en etkili parametreler olan EKAP sıcaklığı, kalıp kanal açısı, deformasyon hızı ve EKAP rotası değiştirilerek bunların tane yapısı üzerindeki etkileri incelenebilir.
- 2.XRD incelemesi yapılarak malzeme içinde oluşan fazlar incelenebilir.
- 3.Alüminyum alaşımlarında en etkili dayanım artırma yöntemi olan yaşlandırma yapılmış numuneleri de EKAP işlemi uygulanıp etkileri incelenebilir.
4. EKAP yapılmış bu malzemelere çeşitli mekanik testler uygulanıp EKAP işleminin etkisi araştırılabilir.
5. Süperplastik deformasyon yeteneği tane boyutundaki azalma ile arttığına göre, EKAP uygulanmış numunelerin süperplastik deformasyon yeteneği değişik sıcaklık ve deformasyon hızlarında çalışılabilir.

KAYNAKLAR

1. Roven, H.J., Werenskiold, J.C., “Conventional light alloys towards the bottom-a physical metallurgical approach”, *Nanomat Conference*, Oslo, 32-40, (2004).
2. Valiev, R.Z., Langdon, T.G., “Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement”, *Progress in Materials Science* 51 (7):881–981, (2006).
3. Firstov, S., Brodnikowski, M., Danylenko, M., Podrezov, Y., “Nanocriyystalline Structure formation under severe plastic deformation and its influences on mechanical properities”, *Reviews On Advanced Materials Science*, 4:55-162, (2002).
4. Srinivasan, R., “Continous severe plastic deformation processing of aluminium alloys”, *NTIS Final Report Ohio*, 3-36 (2006).
5. Lowe, T., Zhu, Y., “Commercializm of nanostructured metals produced by severe plastic deformation processing”, *Advanced Enginnering Materials*, (5): 373-378, (2003).
6. Hall, E.O., “The Deformation and Ageing of Mild Steel”, *Proceedings of the Physical Society*, B64: 747-753, (1951).
7. Petch, N.J., “The cleavage strength of polycrystals”, *Journal of the Iron and Steel Institute*, 174 (8):25-28 (1953).
8. Yutaka, S., Mitsunori U., Hiroyuki K., Keisuke I., “Hall-Petch relationship in friction stir welds of equal channel angular-pressed aluminium alloys”, *Materials Science and Engineering*, A354: 298-305 (2003).
9. Ashby, M.F., Verrall, R.A., “Diffusion-accommodated flow and superplasticity”, *Acta Metallurgica*, 21 (2):149-163 (1973)
10. Langdon, T.G., Watanabe, T., Wadsworth, J., Mayo, M.J., Nutt, S.R., Kassner, M.E., “Future research directions for interface engineering in high temperature plasticity”, *Materials Science and Engineering*, 166 (1-2):237-241 (1993).
11. Ball, A., Hutchison, M.M., “Superplasticity in the Aluminium-Zinc Eutectoid”, *Metal Science*, 3 (1): 1-7 (1969).
12. Langdon, T.G., “A unified approach to grain boundary sliding in creep and superplasticity”, *Acta Metallurgica Et Materialia*, 42 (7): 2437-2443 (1994).

13. Wert, J.A., Paton, N.E., Himilton C.H., and Mahoney, M.W., "Grain refinement in 7075 aluminium by thermo mechanical processing" *Metallurgical Transactions*, 12 (7):1267-1276 (1981).
14. McQueen, H.J., Knutstad, O., Ryum N., and Solberg, J.K., "Microstructural Evolution in Al Deformed to Strains of 60 at 400°C", *Scripta Metallurgica*, 19: 73-78 (1985).
15. Gholinia, A., Humphreys, F.J., and Prangnell, P.B., "Processing to ultrafine grain structures by conventional routes", *Materials Science and Technology*, 16 (11-12): 1251-1255 (2000).
16. Gleiter, H., "Nanocrystalline materials" *Progress in Materials Science*, 33 (4): 223-315 (1989).
17. Sanders, P.G., Fougere, G.E., Thompson, L.J., Eastman J.A., and Weertman, J.R., "Improvements in the synthesis and compaction of nanocrystalline materials" *Nanostructured Materials*, 8 (3): 243-252 (1997).
18. Koch, C.C., and Cho, Y.S., "Nanocrystals by high energy ball milling", *Nanostructured Materials*, 1 (3): 207-212 (1992).
19. Eckert, J., Holzer, J.C., Krill, C.E., and Johnson, W.L., "Structural and thermodynamic properties of nanocrystalline fcc metals prepared by mechanical attrition", *Journal of Materials Research*, 7 (7): 1751-1761 (1992).
20. Koch, C.C., "Synthesis of nanostructured materials by mechanical milling: problems and opportunities" *Nanostructured Materials*, 9 (1-8): 13-22 (1997).
21. Rigney, D.A., "Sliding Wear of Metals", *Annual Review of Materials Science*, 18 (1): 141-163 (1988).
22. Valiev, R.Z., Korznikov, A.V., and Mulyukov, R.R., "Structure and Properties of Ultrafine-Grained Materials Produced by Severe Plastic Deformation", *Materials Science and Engineering*, 168 (2): 141-148 (1993).
23. Valiev, R.Z., "Ultrafine-Grained Materials Produced by Severe Plastic Deformation", *Annales de Chimie Science des Materiaux*, 21 (6-7): 369-554 (1996).
24. Markushev, M.V., Bampton, C.C., Murashkin, M.Yu., and Hardwick, D.A., "Structure and properties of ultra-fine grained aluminium alloys produced by severe plastic deformation", *Materials Science and Engineering* 234-236: 927-931 (1997).

25. Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K., and Alexandrov, I.V., "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation" *Progress in Materials Science*, 45 (2): 103-189 (2000).
26. Valiev, R.Z., Krasilnikov, N.A., Tsenev, N.K., "Plastic deformation of alloys with submicron-grained structure", *Materials Science and Engineering*, 137: 35-40 (1991).
27. Valiev, R.Z., Kozlov, E.V., Ivanov, Y.F., Lian, J., Nazarov, A.A., Baudelet, B., "Deformation behaviour of ultra-fine-grained copper", *Acta Metallurgica et Materialia*, 42 (7): 2467-2475 (1994).
28. Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., Langdon, T.G., "An investigation of microstructural evolution during equal-channel angular pressing", *Acta Materialia*, 46 (11): 4733-4741 (1997).
29. Nemoto, M., Horita, Z., Furukawa M., Langdon, T.G., "Equal-channel angular pressing: A novel tool for microstructural control", *Metals and Materials International*, 4 (6): 1181-1190 (1998).
30. Valiev, R.Z., "Approach to nanostructured solids through the studies of submicron grained polycrystals", *Nanostructured Materials*, 6 (1-4): 73-82 (1995).
31. Valiev, R.Z., Ivanisenko, Yu.V., Rauch E.F., Baudelet, B., "Structure and deformation behaviour of Armco iron subjected to severe plastic deformation", *Acta Materialia*, 44 (12): 4705-4712 (1996).
32. Alexandrov, I.V., Zhu, Y., Lowe, T.C., Islamgaliev, R.K., Valiev, R.Z., "Microstructures and Properties of Nanocomposites Obtained through SPTS Consolidation of Powders", *Metallurgical and Materials Transactions*, 29 (9): 2253-2260 (1998).
33. Segal, V.M., Reznikov, V.I., Drobyshevskiy A.E., Kopylov, V.I., "Plastic Metal Working by Simple Shear", *Russian Metallurgy*, 1: 99-105 (1981).
34. Smirnova, N.A., Levit, V.I., Pilyugin, V.I., Kuznetsov, R.I., Davydova L.S., Sazonova, V.A., "Transformation of the structure of fcc single crystals at high plastic deformation" *Fizika Metallovi Metalloved*, 61 (6): 1170-1177 (1986).
35. Saito, Y., Tsuji, N., Utsunomiya, H., Sakai, T., and Hong, R.G., "Ultra-fine grained bulk aluminum produced by accumulative roll-bonding process", *Scripta Materialia*, 39 (9): 1221-1227 (1998).
36. Saito, Y., Utsunomiya, H., Tsuji, N., Sakai, T., "Novel ultra-high straining process for bulk materials-development of the accumulative roll-bonding process" *Acta Materialia*, 47 (2): 579-583 (1999).

37. Richert, M., Liu, Q., Hansen, N., “Microstructural evolution over a large strain range in aluminium deformed by cyclic-extrusion-compression”, *Materials Science and Engineering*, 260 (1-2): 275-283 (1999).
38. Shan, A., Moon, I., Ko, H., Park, J., “Direct observations of shear deformation during ECAP in pure aluminium”, *Scripta Materials*, 41 (4): 353-357 (1999).
39. Furukawa, M., Horito, Z., Langdon, T., “Developing ultrafine grain sizes using severe plastic deformation”, *Advanced Engineering Materials*, 3 (3): 121-125 (2001).
40. Xu, C., Furukawa, M., Horito, Z., Langdon, T., “Influence of ECAP on precipitate distribution in a spray-cast aluminium alloy”, *Acta Materialia*, 53 (3): 749-758 (2005).
41. Nakashima, K., Horita, Z., Nemoto, M., Langdon, T. G., “Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains”, *Materials Science and Engineering*, 281 (1-2): 82-87 (2000).
42. Wu, P., Chang, C., Kao, P., “The distribution of dislocation walls in the early stage of ECAP”, *Material Science and Engineering*, 374 (1-2): 196-203 (2004).
43. Beyerlein, I.J., Lebensohn, R.A., Tome, C.N., “Modeling texture and microstructural evolution in the equal channel angular extrusion process” *Materials Science and Engineering*, 345 (1-2): 122-138 (2003).
44. Valiev, R., “Paradoxes of severe plastic deformation”, *Advanced Engineering Materials*, 5 (5): 296-300 (2003).
45. Furukawa, M., Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., Langdon, T.G., “The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing”, *Materials Science and Engineering*, 257 (2): 328-332 (1998).
46. Malek, P., Cieslar, M., Islamgaliev, R., “The influence of ECAP temperature on stability of Al-Zn-Mg-Cu alloy”, *Journal of alloys and compounds*, 378 (1): 237-241 (2004).
47. Cabibbo, M., Evangelista, E., Latini, V., “Thermal stability study on two aluminum alloys processed by ECAP”, *Journal of Material Science*, 39 (18): 5659-5667 (2004).
48. Saray, O., “Eş Kanallı Açısal Ekstrüzyon İşleminin Zn-60Al-2Cu Alaşımlarının Yapısal, Mekanik ve Aşınma Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 20-27 (2007).

49. Kim, H.S., “Finite element analysis of deformation behaviour of metals during equal channel multi-angular pressing”, *Materials Science and Engineering*, 328 (1-2): 317-323 (2002).
50. Aida, T., Matsuki, Z., Horito, Z., Langdon, T.G., “Estimating the equivalent strain in ECAP”, *Scripta Materialia*, 44 (4): 575-579 (2001).
51. Zhenga, L.J., Chen, C.Q., Zhou, T.T., Liu, P.Y., Zeng, M.G., “Structure and properties of ultrafine-grained Al-Zn-Mg-Cu and Al-Cu-Mg-Mn alloys fabricated by ECA pressing combined with thermal treatment”, *Materials Characterization*, 49 (5): 455-461 (2002).
52. Liu, T., Zhang, W., Wu, S., Jiang, C, Li, X., Xu, Y., “Mechanical properties of a two-phase alloy Mg-8%Li-1%Al processed by ECAP”, *Material Science and Engineering*, 360 (1-2): 345-349 (2003).
53. Yamashita, A., Yamaguchi, D., Horito, D., Langdon, T.G., “Influence of pressing temperature on microstructural development in ECAP”, *Materials Science and Engineering*, 287 (1): 100-106 (2000).
54. Chen, Y., Huang, Y., Chang, C., Kao, P.W., “The effect of extrusion temperature on the development of deformation mikrostructures in Al 5052 aluminium alloy processed by ECAP”, *Acta Materialia*, 51 (7): 2005-2015 (2003).
55. Sako, Y.S., Urata, M., Kokawa, H., Ikeda, K., “Hall-Petch relationship in friction stir welds of ECAP aluminium alloys”, *Material Science and Engineering*, 354 (1-2): 298-305 (2003).
56. Shan, A., Moon, I., Park, J.W., “Estimating of friction during ECAP of aluminium alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 122 (2-3): 255-259 (2002).
57. Vinogradov, A., Hashimoto S., “Fatigue of severely deformed metals”, *Advanced Engineering Materials*, 5 (5): 351-358 (2003).
58. Stolyarov, V.V., Lapovok, R., Brodova, I.G., Thomson, P.F., “Ultrafine-grained Al-5 wt.% Fe alloy processed by ECAP with backpressure” *Materials Science and Engineering*, 357 (1-2): 159-167 (2003).
59. Wu, P.C., Chang, C.P., Kao, P.W., “The distribution of dislocation walls in the early processing stage of equal channel angular extrusion”, *Materials Science and Engineering*, 374 (1-2): 196–203 (2004).
60. Wessel, J. K., “Handbook of advanced materials Enabling New Designs”, Wiley-Interscience Publication, *Wessel, J. K.*, USA, 321-328 (2004).

61. Sun, Y., “Yaşlanabilir Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 85-88 (1998).
62. Turhan, S., “Alüminyumun Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışlarına Magnezyumun ve Silisyumun Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 63-66 (2002).
63. Yılmaz B., “Alüminyum Alaşımlarında Faz Yapılarının Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta 68-70 (2002)
64. Smith W.E., “Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, 2” Çeviri, *M. Erdoğan*, Ankara, 200-210 (2001).
65. Deuis, R.L., Subramanian, C., Yellup, J.M., “Dry Sliding Wear of Aluminium Composites- A Review”, *Composites Science and Technology*, 57 (4): 415-435 (1997).
66. Baker, H., “ASM Handbook, Alloy Phase Diagrams, Vol. 3”, *ASM International*, Park, USA, 279-337 (1990).
67. Şaldır, R., “Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti”, Yüksek Lisans Tezi., *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 98-123 (2002).
68. Xu, C., Furukawa, M., Horita, Z., Longdon T.G., “Severe plastic deformation as a processing tool for developing superplastic metals”, *Journal of Alloys and Compounds*, 378 (1-2): 27-34 (2004).
69. Meyers, M.A., Mishra, A., Benson, D.J., “Mechanical properties of nanocrystalline materials”, *Progress in Materials Science*, 51 (4): 427-556 (2006).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : AYTAÇ, Alper
Doğum tarihi ve yeri : 30.11.1984 / İSTANBUL
Medeni hali : Bekar
Nüfusa kayıtlı olduğu yer : SİNOP
Uyruğu : T.C.
Telefon : 0505 346 26 66
e-mail : alperktef@hotmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Z.K.Ü. (Döküm Öğretmenliği)	2007
Lise	Barbaros Hayrettin Lisesi	2003

Yabancı Dil

İngilizce