

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SÜPER ELASTİK ÖZELLİK GÖSTEREN MALZEME
ÜRETİMİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

Met. ve Malz. Müh. Yahya BAYRAK

**FBE Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı Üretim Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet EKERİM (YTÜ)

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTIMA LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. PLASTİK DEFORMASYON.....	2
2.1 Malzemelerin Teorik Dayanımı	3
3. NANO YAPILAR	6
4. SÜPER PLASTİK DEFORMASYON.....	9
5. ECAP PROSESİ.....	13
6. ECAP PROSES ÇEŞİTLERİ.....	18
6.1 Geleneksel ECAP yöntemi	18
6.2 ECAP yönteminin düz yüzeyle malzemelere uygulanması.....	20
6.3 ECAP yönteminin sürekli prosesi	21
6.4 ECAP–Conform prosesi	23
6.5 ECAP yönteminde alternatif prosedürler: döner kalıp, kenar-ekstürizyon ve çok-geçişli kalıp	24
6.6 ECAP’la Birleştirme.....	27
6.7 Paralel Kanallarla ECAP İşleminin Geliştirilmesi	28
7. ECAP PROSESİNE ETKİ EDEN PARAMETRELER	30
7.1 Başlangıç Malzeme Boyutunun Etkisi	30
7.2 Kanal açısı Φ ’nin etkisi	31
7.3 Eğim açısı Ψ ’nin etkisi	34
7.4 Presleme hızının etkisi.....	35
7.5 Presleme sıcaklığının etkisi.....	36
8. TAVLAMA VE SÜPERPLASTİSİTE	38
8.1 Statik tavlama.....	39
8.1.1 Toparlanma	39
8.1.2 Yeniden kristalleşme	39
8.2 Dinamik tavlama	40

8.3	Süperplastisite	42
9.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR	46
9.1	Kullanılan Malzemeler	46
9.1.1	Alüminyum Teller	46
9.1.2	Kalıp Yağlayıcısı.....	47
9.2	Kullanılan cihazlar	48
9.2.1	Tavlama fırını.....	49
9.2.2	Numune hazırlama cihazları	49
9.2.3	Işık metal mikroskobu	50
9.2.4	Elektrolitik dağlama cihazı	51
9.2.5	Tarama elektron mikroskobu(SEM).....	51
9.2.6	Geçirimli elektron mikroskobu(TEM).....	52
9.2.7	Sertlik ölçüm cihazı	53
9.2.8	Çekme cihazı.....	53
9.3	Kalıp tasarımı	54
9.4	Deneyin yapılışı.....	55
9.5	Optimizasyon çalışmaları	58
10.	DENEYSEL SONUÇLAR	66
10.1	Işık metal mikroskopta elde edilen mikroyapılar.....	66
10.2	Elektrolitik parlatma ile elde edilen mikroyapılar.....	70
10.3	Tarama elektron mikroskobu görüntüsü ve faz tayini.....	73
10.4	Geçirimli elektron mikroskobuyla elde edilen mikroyapılar	77
10.5	Mekanik testler.....	81
10.6	Alüminyum 6063 alaşımıyla yapılan çalışmalar.....	83
11.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	86
	KAYNAKLAR.....	87
	ÖZGEÇMİŞ.....	92

SİMGE LİSTESİ

Ψ	Dış köşe açısı
N	Geçiş sayısı
P	Çalışma basıncı
Φ	Kalıp kanal açısı
τ	Kayma gerilmesi
G	Kayma modülü
γ	Kayma gerinim
δ	Kalıcı uzama

KISALTMA LİSTESİ

SPD	Süper (Aşırı) Plastik Deformasyon
HPT	Yüksek Basınç Burulması
CEC	Tekrarlı Ekstrüzyon Sıkıştırması
ARB	Biriktirmeli Hadde Yapıştırması
STS	Şiddetli Burulma Gerilimi
CCDF	Silindirik Kapalı Kalıp Dövme
DCAP	Farklı Kanal Açılı Preslerne
ECAP	Eş Kanallı Açılmal Preslerne
ECAD	Eş Kanal Açılı Haddeleme
SEM	Tarama Elektron Mikroskobu
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
SAED	Seçili Alan Elektron Difraksiyonu
CRRS	Kritik kayma gerilmesi
C2S2	Sürekli Sınırlı Şerit Kesme

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	a) Gerilim-gerinim diyagramı b) kayma gerilmesi τ 'nun etkisiyle atomların yerlerinin bozulması (John, 1975).	2
Şekil 2.2	Kayma gerilmesi ile şekil değiştirme (John, 1975).....	3
Şekil 2.3	Bir kristaldeki atomların yer değiştirmesiyle ilgili kuvvetin sürekliliği (John, 1975).....	4
Şekil 3.1	Altın partiküllerinin boyutu ile ergime sıcaklığı arasındaki ilişki (Tjong ve Chen, 2004).....	8
Şekil 4.1	SPD proseslerinde dayanım ve uzamanın değişimi (Azushima vd., 2008).....	10
Şekil 4.2	Karbon bazlı çeliklerde paso sayısı ile çekme dayanımı arasındaki ilişki (Azushima vd., 2008).	11
Şekil 4.3	Karbon bazlı çeliklerde toplam uzama ve paso sayısı arasındaki ilişki (Azushima vd., 2008).	11
Şekil 4.4	Değişik sıcaklıklarda(350, 480, 540 ve 600°C) ECAP işlemi gören düşük karbonlu çeliğin Gerilim-Gerinim eğrisi (Azushima vd., 2008).	12
Şekil 6.1	ECAP yönteminin şekilsel sistematik gösterimi: X, Y ve Z düzlemleri sırasıyla enine düzlemi, ilerleme düzlemini ve uzunlamasına düzlemi belirtmektedir (Minoru vd., 2001).	18
Şekil 6.2	ECAP işlemi esnasında kalıp içindeki numunede oluşan kesme düzlemleri: 1 ve 2 diye numaralandırılmış öğeler küçük şekilde de görüldüğü gibi kesme etkisinden dolayı yer değiştirmişlerdir (Minoru vd., 2001).	19
Şekil 6.3	ECAP işlemini düz yüzeyli malzemeler uygulanması : a) dik konfigürasyon ve b) yatay konfigürasyon (Kamachi vd., 2003).	20
Şekil 6.4	BCZ proses rotası kullanılarak dik konfigürasyonda bulunan plakaya presleme prosedürünün uygulanması (Kamachi vd., 2003).	21
Şekil 6.5	DCAP prosesinin sürekli üretim prensibi (Ruslan ve Terence, 2006a).	22
Şekil 6.6	Sürekli kesme prosesinin prensibi (Utsunomiya vd., 2003).	22
Şekil 6.7	ECAP-Conform prosesinin sistematik gösterimi(Georgy vd., 2004).	24
Şekil 6.8	Döner- kalıp ECAP prosesi: a) başlangıç durumu, b) ilk geçişten sonra ve c) kalıp 90° döndükten sonra (Aibin vd., 2005).....	25
Şekil 6.9	ECAP kenar-ekstirüzyon prosesinin şematik gösterimi (Ruslan ve Terence, 2006a).....	26
Şekil 6.10	Çok yönlü-geçiş özellikli ECAP yönteminin şematik gösterimi: numaralar, sırasıyla birbirine eş 1, 2, 3, 4 ve 5 geçişlerden sonra numunenin inceleme	

	durumunu göstermektedir (Ruslan ve Terence, 2006a).	26
Şekil 6.11	Al alaşım tozlarının birleştirilmesinde kullanılan ECAP yönteminin prensipleri: tozlar abcd diye belirtilen sıkı bir ceket içine alınmıştır (Kamachia vd., 2000).	27
Şekil 6.12	Paralel kanallarda ECAP metodunun prensipleri: a) N kesme yönü, K iki kanal arasındaki mesafe, Φ kanalların kesişim bölgesindeki açı ve gölgeli alanlar kesme bölgesinde meydana gelen kesmeyi tarifleyen dönüşüm şekilleri, b) paralel kanallarda ECAP 2D-FEM simülasyonu ile elde edilmiş deformasyon bölgeleri ve c) $\Phi = 100^\circ$ ve K kanallar arası mesafenin kanal çapıyla eşit 18 mm olduğu deneysel ECAP kalıp düzeneğinin genel görünüşü (Ruslan ve Terence, 2006a).	29
Şekil 7.1	Yük-Presleme sayısı grafiği (Horita vd., 2001).	30
Şekil 7.2	Farklı boyutlardaki ECAP numunelerinin akma dayanımları (Horita vd., 2001).	30
Şekil 7.3	45 ile 180 derece arasındaki kanal açılarıyla (Φ) eşdeğer gerinim ε 'in karşılaştırması: köşe açısı Ψ ; 0 ile 90 derece arasında ve N = 1 tek seferlik preslemeyi göstermektedir (Nakashima vd., 1997).	32
Şekil 7.4	Φ kanal açısının etkisini ölçmek amacıyla kullanılan kalıpların sistematik gösterimi: Φ değerleri a) 90° , b) 112.5° , c) 135° and d) 157.5° (Nakashima vd., 1997).	32
Şekil 7.5	Şekil 7.4'de görülen kalıplarda her numuneye ~ 4 gerinim değerindeki preslemede SAED patterni ile elde edilen mikroyapılar (Nakashima vd., 1997).	33
Şekil 7.6	$\Phi = 60^\circ$ kanal açısına sahip bir ECAP kalıbının sistematik gösterimi (Nakashima vd., 1997).	33
Şekil 7.7	$\Phi = 90^\circ$ derecelik ECAP kalıbı ile Bc yönü kullanılarak preslenmiş saf Al numuneden X düzlemi doğrultusunda alınan sertlik haritası: a) $\Psi = 20^\circ$, b) $\Psi = 0^\circ$ (Cheng ve Terence, 2007).	35
Şekil 7.8	ECAP işleminde 1, 2, 3 ve 4 paso uygulanan Al-%1Mg alaşımının presleme hızlarıyla akma mukavemeti arasındaki ilişki: oda sıcaklığında $1.0 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ gerinim oranları kullanılmıştır (Ruslan ve Terence, 2006b).	36
Şekil 7.9	Saf Al ve Al-%3Mg ve Al-%3mg-%0.2Sc alaşımları için çeşitli presleme sıcaklığında uygulanan ECAP işleminden sonra tane boyutu (Ruslan ve Terence, 2006a).	37
Şekil 8.1	Toparlanma-yeniden kristalleşme-tane kabalaşması olaylarının sistematik	

	görünüŖü (John, 1975).....	38
Ŗekil 8.2	TEM mikroyapı görüntüleri: a) baŖlangıç numune (ECAP iŖleminden sonra), b) 1 saat 300 °C' de tavlannıŖ, c) 1 saat 450 °C' de tavlannıŖ ve d) 1 saat 525 °C' de tavlannıŖ (Turba vd., 2007).....	43
Ŗekil 8.3	Malzemelerin farklı sıcaklıklardaki çekme testi sonrası görüntüleri (Turba vd., 2007).....	44
Ŗekil 8.4	6 Paso sonrası magnezyumun 350 °C' de tavlannıŖ mikroyapı görüntüsü (Lapovak vd., 2008).	45
Ŗekil 8.5	350 °C' de yapılan çekme iŖlemi sonrası numune görüntüsü (Lapovak vd., 2008).....	45
Ŗekil 9.1	Alüminyum Etial F1 ve 6063 alaŖımlarına ait tel görüntüsü.....	47
Ŗekil 9.2	Kimyasal analiz cihaz görüntüsü.	47
Ŗekil 9.3	Toz grafit görüntüsü.	48
Ŗekil 9.4	Özel alüminyum hadde yağı resmi.....	48
Ŗekil 9.5	Tav fırını görüntüsü.....	49
Ŗekil 9.6	Zımparalama ve parlatma cihazı görüntüsü.....	50
Ŗekil 9.7	LEICA DFC 280 IŖık metal mikroskobu cihazı görüntüsü.	50
Ŗekil 9.8	Elektrolitik dağlama cihazı görüntüsü.....	51
Ŗekil 9.9	Tarama elektron mikroskobu cihazı görüntüsü.	52
Ŗekil 9.10	Yüksek Çözünürlüklü Geçirim Elektron Mikroskobu(TEM) cihazı görüntüsü.52	
Ŗekil 9.11	Sertlik ölçüm cihazı görüntüsü.	53
Ŗekil 9.12	Çekme cihazı görüntüsü	54
Ŗekil 9.13	ECAP-Conform kalıbı.....	55
Ŗekil 9.14	Deney düzeneği.....	56
Ŗekil 9.15	Malzemenin baŖlangıç mikroyapı görüntüsü, a) ve b).	59
Ŗekil 9.16	Malzemenin 6 paso sonrası mikroyapı görüntüsü, a) ve b).....	60
Ŗekil 9.17	450 °C'de 8 saat tavlanan malzemenin mikroyapı görüntüsü, a) ve b).....	62
Ŗekil 9.18	343 °C' de tavlanan malzemenin mikroyapı görüntüsü, a) 4 saat ve b) 1 saat.63	
Ŗekil 9.19	320 °C'de tavlanan malzemenin mikroyapı görüntüsü, a) 2.5 saat ve b) 4 saat.64	
Ŗekil 9.20	323 °C' de 4 saat tavlanan malzemenin mikroyapı görüntüsü.	65
Ŗekil 10.1	İlk yedi pasolardaki mikroyapı görüntüleri; a), b), c), d), e), f), g).	70
Ŗekil 10.2	Elektrolitik dağlanan malzemenin mikroyapı görüntüleri; a), b), c).....	72
Ŗekil 10.3	Tarama elektron mikroskop görüntüleri; a) ve b).	74
Ŗekil 10.4	Demir fazının TEM görüntüsü; a), b) ve EDS analizi; c), d).	75

Şekil 10.5	Silisyum fazının TEM görüntüsü; a), b) ve EDS analizi; c), d).....	76
Şekil 10.6	11. pasoya ait TEM mikroyapı görüntüsü; a), b), c) ve d).	79
Şekil 10.7	16. pasoya ait TEM mikroyapı görüntüsü; a), b), c) ve d).	81
Şekil 10.8	Paso sayısı ile sertlik arasındaki ilişki.....	82
Şekil 10.9	Çekme test sonuçları; a) Çekme dayanımı ile %uzama arasındaki ilişki, b) Paso sayısı ile çekme dayanımı arasındaki ilişki.	83
Şekil 10.10	6063 alaşımına ait mikroyapı görüntüleri; a), b), c).....	85
Şekil 10.11	6063 alaşımına ait sertlik ile paso sayısı arasındaki ilişki.....	85

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1	Teorik kayma gerilmesinin CRSS değeri ile karşılaştırılması (John, 1975).	5
Çizelge 3.1	Dolu kabuk sayısı- toplam atom sayısı-yüzeydeki atomların yüzdelerini karşılaştırması (Tjong ve Chen, 2004).	7
Çizelge 5.1	Proseslerde kullanılabilir muhtemel 6 yön ve açıları (Minoru vd., 1998)..	15
Çizelge 5.2	Presleme yönlerinin kayma karakteristiği (Minoru vd., 1998).	16
Çizelge 9.1	Deneylerde kullanılan ticari saflıkta Alüminyum Etial F1 alaşımının kimyasal bileşimi.	46
Çizelge 9.2	Deneylerde kullanılan Alüminyum 6063 alaşımının kimyasal bileşimi.	46

ÖNSÖZ

Bu çalışmamda gerek literatür, gerek hazırlık ve gerekse de deneysel aşamalarda benden ilgi, bilgi ve birikimini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Ahmet EKERİM'e, Arş. Gör. Nilüfer Evcimen'e ve üniversite hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarıma ve teşekkürlerin en büyüğünü hak eden değerli aileme teşekkürlerimi sunuyorum.

ÖZET

Süper plastik deformasyon yöntemi ile malzeme geometrik olarak şekillendirilerek çok ince tane boyutlarına ulaşılmaktadır. ECAP (Eş Kanallı Açısal Presleme) prosesi bu yöntemlerden biri olup kesit alanı ve şekli değişmeksizin tekrarlı olarak malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılmaktadır. Conform prosesi ise genel olarak tel üretiminde kullanılan sürekli bir ekstrüzyon yöntemidir.

Bu çalışmada ticari saflıktaki alüminyum tellerin tane boyutunu mikron altı seviyelere indirerek mekanik dayanımları arttırmak amacıyla ECAP-Conform prosesi uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar prosesin optimumum koşullarının belirlenmesiyle başlanmıştır. Belirlenen koşullardan sonra paso sayısı artırılarak çalışmalara devam edilmiştir. Paso sayısı 11 olduğunda mikron altı tane boyutuna ulaşılmış, numunelerin ışık mikroskobu, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve geçirim elektron mikroskobu (TEM) incelemeleri yapılmıştır. Paso sayısı daha da artırılmış ve 16 pasoda; sertlik değeri 30 HV'den 50 HV' ye, çekme dayanımı 74 MPa'dan 147 MPa'ya artırılmıştır.

Ticari saflıktaki alüminyum numunelere EKAP-Conform sistemi kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda taneler mikron altı boyuta getirilmiş ve mekanik özelliklerde artış sağlanmıştır. Tane boyutu, yöntem, açığa, yağlamaya, hıza ve paso sayısına göre optimize edilerek yaklaşık 1µm'ye kadar küçültülmüştür.

Anahtar Kelimeler: ECAP-Conform, plastik deformasyon, ticari saflıkta alüminyum, mikron altı tane boyutu.

ABSTRACT

Ultra-fine grain sizes of materials could be achieved by geometrical forming with severe plastic deformation method. Equal Channel Angular Pressing (ECAP) process which was improved as one of the alternative methods is used to obtain continuously forming the materials without any change in shape and size. Generally Conform process, is used for the production of wire as a continuous extrusion method.

Include in the scope of this study, ECAP –Conform process was applied on commercial purity aluminum wires to obtain ultra fine grain size for achieving higher mechanical strength. Experimental studies started with determination of the optimum conditions of the process and continued with increasing the number of the passes. After 11 pass, submicron grain sizes were obtained and optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM) investigations were done. Moreover, number of the passes were increased and at 16 passes both hardness and tensile strength values were increased from 30 HV to 50 HV and 74 MPa to 147 MPa.

At the end of experimental studies which accomplished on commercial purity aluminum by using ECAP – Conform system, grains were brought to sub micron size and mechanical properties were increased. Grain size was reduced nearly 1 μ m by optimizing the method, angle, lubricant, rate and the number of the pass.

Key Words: ECAP-Conform, plastic deformation, commercial purity aluminum, ultra- fine grain size.

1. GİRİŞ

Eş kanallı açısız presleme (ECAP) prosesi, bir malzemenin kesitinin değiştirilmeden yüksek oranda plastik şekil değişimine uğratılması işlemidir (Fukuda vd., 2002). ECAP ilk olarak 1970 ve 1980'lerde Segal ve çalışma arkadaşları tarafından Eski Sovyetler Birliği'nde Minsk'te bir enstitüde tanıtılmıştır. O zamanlarda temel konu metal çubuklara yüksek gerinim uygulanabilen bir metot geliştirmek olmuştur (Ruslan ve Terence, 2006b). Temelde bu teknik, malzemelerin bir kalıp içerisinde eşit kesit alanına sahip Φ açısıyla kesişen kanallara preslenmesi mantığına dayanmaktadır. Bu presleme işleminde şiddetli kayma deformasyonu meydana gelirken, malzemenin kesit alanı geometrik olarak değişmez (Zhu ve Terry, 2000). Bu durum tane incelmesi için malzemenin tekrar preslenebilme olanağı sağlayarak, prosese büyük bir avantaj katmaktadır (Kim vd., 2001b). ECAP işlemi, geleneksel soğuk haddeleme ve tel çekme metotlara kıyaslandığında kesit alanını değiştirmeden malzemede çok yüksek plastik gerinim oluşturulmasına olanak sağlamaktadır (Medeiros vd., 2007). Geleneksel yeniden kristalleştirme işlemleri ve termomekanik uygulamalarla alüminyum alaşımlarında 10 μm 'den küçük çok ince tane yapısı elde etmek zordur. Alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri bu duruma uygun değildir (Fujda ve Kvackaj, 2007). Al alaşımlarında yeniden kristalleştirme yöntemleri kullanılarak tanelerin küçültme prosesinde yaşanan zorluklara rağmen eş kanallı açısız presleme (ECAP) tekniğiyle boyutları 1 μm altında taneler elde etmek mümkündür (Evcimen vd., 2009a). Elde edilen çok incetaneli malzemelerde, yüksek akma ve çekme dayanım değeri, gerinim sertleşmesinde azalma ve dayanıklılık ve şekillenebilirlikte artma sağlanmaktadır (Hwang vd., 2007). Son zamanlarda ECAP prosesi birçok araştırmacının üzerinde çalıştığı önemli bir konu olup, çeşitli malzemelerde uygulama alanı bulmak amacıyla yoğun araştırmaların yapıldığı ve malzeme özelliklerinin geliştirildiği yeni bir teknolojidir. ECAP prosesinin teknolojisi mevcut süper plastik deformasyon teknikleri içinde en son geliştirilen önemli bir yöntemdir. Diğer bir ifade şekli ile süper plastik şekil değiştirmenin temel prensibi şekillendirmede metal akışının mekanik davranışı ile mikro yapının kontrol edilmesidir (Bayrak vd., 2009, Evcimen vd., 2009b) .

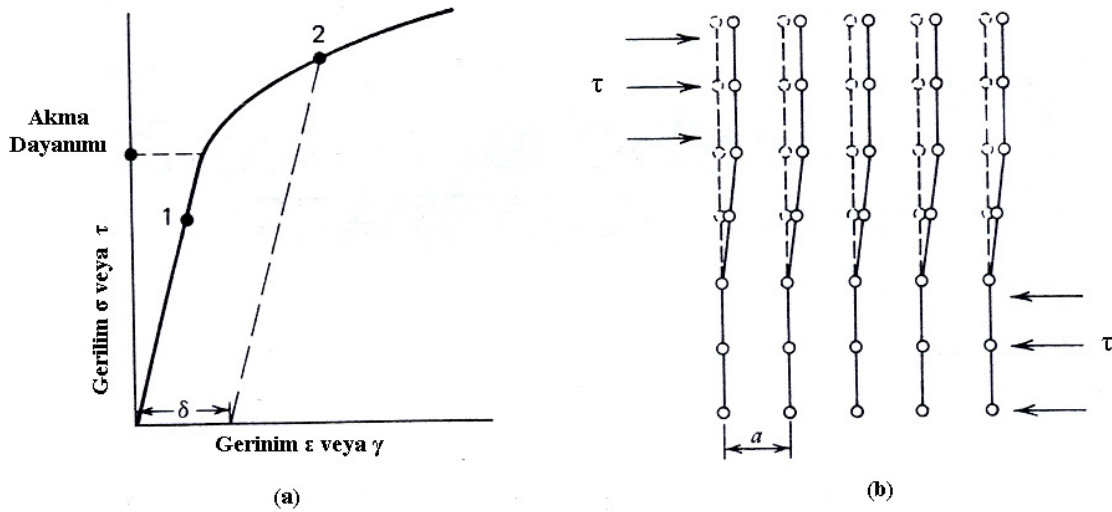
Bu çalışmada ECAP – CONFORM prosesi kullanılarak ticari saflıktaki alüminyumun dokusal özellikleri ile mekanik özellikleri deneysel olarak belirlenmiştir. Deney için kalıp tasarımı yapıp, prosesin gerçekleşmesi sağlanmıştır. Mekanik özellikleride iyileşme ve dokusal özelliklerden tane boyutunun değiştirilmesi gerçekleştirilmiştir.

2. PLASTİK DEFORMASYON

Çok kristalli malzemeler için benzer özellik gösteren gerilim-gerinim diyagramında mekanik özellikler Şekil 2.1.a da görüldüğü gibi belirli bir uzamaya kadar Hooke yasasına uymaktadır. Uygulanan gerilim elastik sınırlardan daha az ise (akma gerilmesi ile ölçülmekte) oluşan deformasyona elastik deformasyon denir. Uygulanan gerilim akma gerilmesine eşit ve daha büyük ise bu durumda oluşan deformasyona ise plastik deformasyon denir ve akma gerilmesinin üstündeki değerlerde akma(uzama) görmektedir (John, 1975).

Elastik ve plastik deformasyon arasındaki bölgelerde şu deformasyonlar oluşmaktadır: 1) Elastik deformasyon (gerinim): uygulanan gerilim kaldırıldığında kalıcı deformasyon oluşmamakta, 2) Plastik deformasyon: uygulanan gerilim kaldırıldığında kalıcı deformasyon oluşmaktadır (John, 1975).

Elastik sınırlardaki gerilim değerlerinin ölçülmesi zorluğundan dolayı daha kolay ölçülebilen (zayıf gerilimde denen) akma gerilmesi tanımlanmıştır. Elastik sınır ile akma gerilmesi arasında ufak farklıklar vardır ve bu farklılıklar ihmal edilmektedir (John, 1975).



Şekil 2.1 a) Gerilim-gerinim diyagramı b) kayma gerilmesi τ 'nin etkisiyle atomların yerlerinin bozulması (John, 1975).

Düşük gerilme değerlerinde gerilim-gerinim eğrisi lineerdir ve bu durum Hooke kanunu ile açıklanmaktadır.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1' de E elastiklik modülü olarak adlandırılır ve sabit bir değere sahiptir. Bu şartlar

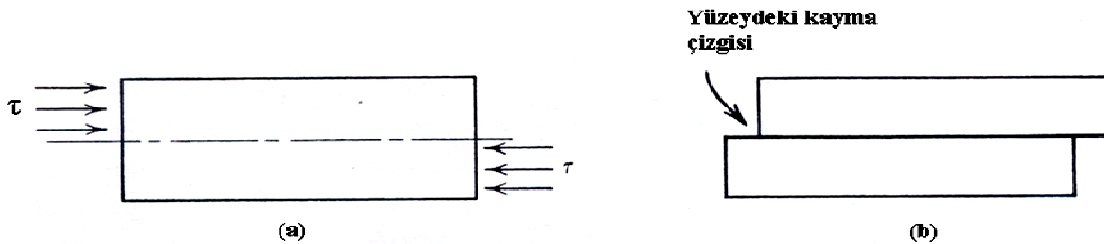
altında kayma gerilmesi(τ) (Eşitlik 2.2.), kayma modülü (G) ve kayma gerinimin (γ) çarpımına eşittir.

$$\tau=G.\gamma \quad (2.2)$$

Eğer bir metale bir gerilim Şekil 2.1a' daki 1 noktasına kadar uygulanırsa, gerilim kaldırıldığında metal orijinal şekline geri dönecektir. Buna karşın eğer kaldırılan gerilim şekilde görüldüğü gibi metalde δ kadar kalıcı uzama olacaktır. Burada bu iki deformasyon şekli arasındaki en önemli farklılık atomik skalada anlaşılabilir. Eğer bir kristale bir kayma gerilmesi uygulanırsa, atomlar denge durumlarından (normal kafes yerlerinden) Şekil 2.1b' de görüldüğü gibi uzaklaşmaktadırlar. Eğer kayma gerilmesi küçük ise atomlar denge durumlarından çok fazla uzağa gitmezler ve gerilim kaldırıldığında atomlar arasındaki bağlar sebebiyle orijinal kafes yerlerine geri dönmemektedirler. Böylece elastik deformasyon oluşmakta ve atomların buldukları yerler değişmemektedir. Eğer kayma gerilmesi çok fazla ise atomlar buldukları kafes yerlerinden a mesafesi kadar uzağa yerleşirler ve yeni bir denge durumu oluşturmaktadırlar. Bunun sonucunda deformasyon kaldırıldığında atomlarda kalıcı bir yerleşim olmaktadır (John, 1975).

2.1 Malzemelerin Teorik Dayanımı

Malzemelerin teorik dayanımını basit bir modelle bilinen kayma modülünden hesaplamak mümkündür. Şekil 2.2' de bir kayma gerilmesinin nasıl bir kayma oluşturacağı sistematik olarak görülmektedir. Uygulanan kayma gerilmesi, τ , Şekil 2.2a konumundan dengelenerek Şekil 2.2(b) konumunu almaktadır. Daha öncede belirtildiği gibi, çok fazla kayma gerilmesi uygulanırsa kayma düzlemlerinde kalıcı bir bozulma olarak yeni bir konum oluşturmaktadırlar. Bu durumda, atomlarda kalıcı bir deformasyon oluşması için teorik olarak ne kadar kayma gerilmesi değerine ulaşması gerektiği bilinmelidir (John, 1975).

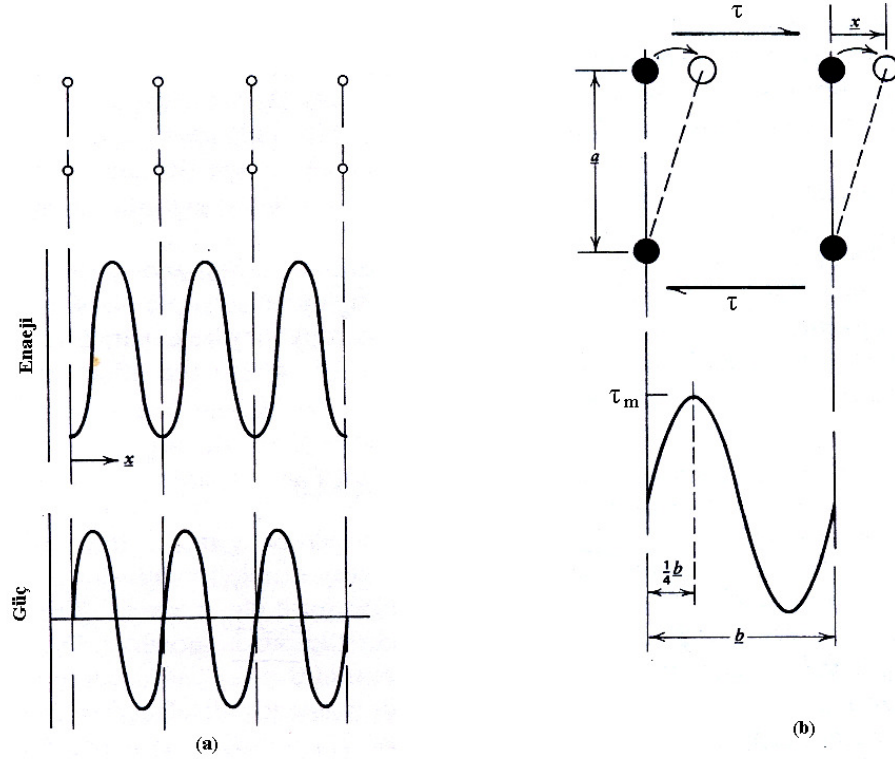


Şekil 2.2 Kayma gerilmesi ile şekil değiştirme (John, 1975).

Bir atom kendi kafes yerine yerleştğinde o atom minimum enerji pozisyonundadır. Eğer bu atomu kendi kafesinden hareket ettirmek istenirse enerjisi artmaktadır. Bir kafesteki bir atomun potansiyel enerjisindeki değişimi aşağıda Şekil 2.3a'de görülmektedir. Bir atomu taşımak için gerekli kuvvet, enerji eğrisinin türeviyle verilmektedir (Eşitlik 2.3)

$$F=dE/dx \quad (2.3)$$

Böylece elde edilen bu kuvvet eğrisi aşağıda Şekil 2.3(a)' de gösterilmiştir. Şimdi kayma gerilmesinin Şekil 2.3b'da görüldüğü gibi 4 atoma uygulandığını düşünülürse, üst atomlardaki yer değişimi için gerekli kayma gerilmesindeki değişime bağlı olarak alttaki atomlar Şekil 2.3a'da ki kuvvet eğrisinde benzer bir eğri takip etmek zorundadır (John, 1975).



Şekil 2.3 Bir kristaldeki atomların yer değiştirmesiyle ilgili kuvvetin sürekliliği (John, 1975).

Yukarıda Şekil 2.3' de görülen gibi, kayma gerilmesinin, atomları kendi kafes yerlerinden yeni bir kafes yerlerine taşıyabilecek kuvvet olan τ_m değerine eşit veya ondan daha büyük olduğunu farz edersek, Şekil 2.3'deki gerilim, kayma gerilmesi sonucu atomların yer değişikliği miktarı olan x ' in, kayma gerilmesi b ' nin maksimum $1/4$ ' ü kadar olacaktır (John, 1975).

$$\tau = \tau_m \sin \left(2\pi \frac{x}{b} \right) \quad (2.4)$$

Küçük miktarlardaki yer değişimleri için yazıldığında Eşitlik 2.4, Eşitlik 2.5 halini almaktadır.

$$\tau = \tau_m \cdot 2\pi \frac{x}{b} \quad (2.5)$$

Şekil 2.2'deki modele göre kayma gerilmesi Eşitlik 2.6' da yer alan denkleme eşittir.

$$\gamma = x/a \quad (2.6)$$

Küçük miktarlardaki yer değişimleri için Hooke's yasasına göre yazıldığında Eşitlik 2.7 elde edilmektedir.

$$\tau = G \gamma = G \frac{x}{a} \quad (2.7)$$

Eşitlik 2.6 ve 2.7 denklemlerini eşitlendiğinde, Eşitlik 2.8'de yer alan denklem bulunmaktadır.

$$\tau_m = \frac{G}{2\pi} \frac{b}{a} \quad (2.8)$$

Çizelge 2.1'de bazı metallerin, Eşitlik 2.8'de yer alan denkleme göre $b=a$ kabul edilerek kayma modülleri, τ_m ve kritik kayma gerilmesi olan CRRS (critical resolved shear stress) değerleri verilmiştir (John, 1975).

Çizelge 2.1 Teorik kayma gerilmesinin CRSS değeri ile karşılaştırılması (John, 1975).

Metal	Kayma Modülü (x10 ⁶ MPa)	τ_m (MPa)	CRRS (MPa)
Al	24.407	3833.485	786.0023
Ag	25.027	3840.380	372.3169
Cu	40.748	6481.072	489.5278
α -Fe	~68.947	~10962.66	27579.03
Mg	16.478	2626.903	393.0012

3. NANO YAPILAR

Nanomalzeme üretimi geçmiş yıllarda hızlı bir şekilde gelişmiş ve elektronik, seramik, manyetik bilgi saklama ve yapısal uygulamalar gibi çok geniş teknolojik sahada uygulama alanı bulmuştur. Bu alanlarda, malzemelerin nanoboyutta olması gibi taleplerle karşılaşmıştır. Boyut nanometre mertebesine indiğinde malzemeler, geleneksel kaba taneli malzemelerle karşılaştırıldığında, mekanik dayanımlarda artma, gelişmiş difüzyon, yüksek spesifik sıcaklık ve elektriksel dayanıklılık gibi özellikleri artmaktadır. Nanomalzemeler, nanokristalin malzemeler ve nanopartiküller şeklinde sınıflandırılabilir. Şekillendirilmiş polikristalin malzemelerin tane boyutu 100 nm'den daha az olmakla birlikte, dağılmış çok ince partiküllerin çapları ise 100nm'nin altındadır. Nanomalzemelerle ilgili yapılan çalışmalarda, fizik, seramik, malzeme bilimi ve hatta biyoloji ve tıp alanında da uygulama alanı bulmuştur (Tjong ve Chen, 2004).







Nanokristalin malzemeler değişik şekil ve formlarda bulunurlar ve eşsiz kimyasal, fiziksel veya mekaniksel özellikler sergilemektedirler. Tane boyutu kritik değerin (~10-20nm) altında olduğunda atomların %50'sinden daha fazlası tane sınırlarında veya ara yüzeylerde bulunmaktadır. Böylece dislokasyonlar yığılma şeklinde olmaz. Bu yüzden tane sınırları nanokristalin malzemelerin şekillendirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Nanokristalin malzemeler düşük sıcaklıklarda geleneksel mikro taneli malzemelere göre daha iyi sürünme ve süperplastiklik özelliği göstermektedirler.

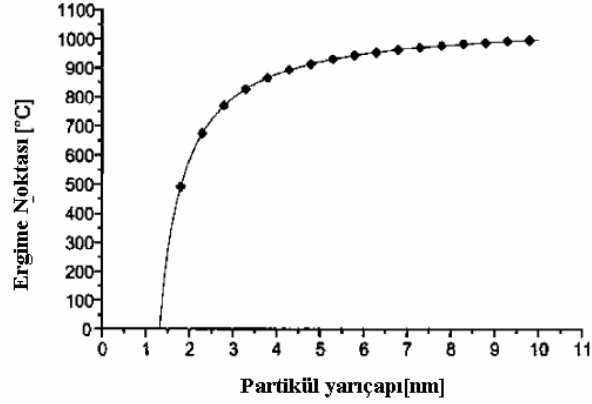
Nanomalzemelerin en önemli özelliğinden bir tanesi yüzey/hacim oranının çok fazla olması ve yüksek oranda yüzey atomu içermesidir. Böylece yüksek orandaki yüzey atomuyla birlikte çok ince tane ve şekil etkisi büyük malzemelere oranla çok farklı özellik sergilemektedirler. Nanopartiküller genellikle kübik veya hegzogonal sıkı paket yapısına sahip dolu-kabuk atom gruplarından oluşmaktadır. Yapı oluşurken merkezdeki bir atomun çevresini 12 atomun sarmasıyla ilk kabuk, ikinci kabukta 42, üçüncü kabukta 92 atom çevresini sarmaktadır. Atom sayılarıyla kabuklar Eşitlik 3.1' de yer alan formül kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlik 3.1' de n kabuk sayısıdır.

$$10n^2+2 \quad (3.1)$$

Aşağıda kabuk sayıları, atom sayıları ve yüzeydeki atomların % oranlarıyla ilgili bilgiler Çizelge 3.1' de verilmiştir (Tjong ve Chen, 2004).

Çizelge 3.1 Dolu kabuk sayısı- toplam atom sayısı-yüzeydeki atomların yüzdelerini karşılaştırması (Tjong ve Chen, 2004).

Dolu kabuk sayısı	Toplam atom sayıları	Yüzey atomlarının %
Bir kabuk 	13	92
İki kabuk 	55	76
Üç kabuk 	147	63
Dört kabuk 	309	52
Beş kabuk 	561	45
Altı kabuk 	1415	35



Şekil 3.1 Altın partiküllerinin boyutu ile ergime sıcaklığı arasındaki ilişki (Tjong ve Chen, 2004).

Nanopartiküllerin boyutu azaldıkça yüzeydeki atomların yüzdesi artmaktadır. Kritik nanopartikül hacmi ergime sıcaklığında deneysel olarak incelenmiştir. Şekil 3.1’de altın partiküllerinin ergime noktası ile partikül hacmi arasındaki ilişki verilmiştir. Ergime sıcaklığı 300°C’den 1063°C’ye kadar artmakta ve altın partiküllerinin boyutu da 5nm’nin altına inmektedir. Genel olarak geometrik şekil, bileşim ve birleşen malzemenin özelliğinden veya nanopartiküllerin şekillendirilme mekanizmalarından belirlenmektedir. Çoğu metallerin nanopartiküle geçişinde ana malzeme olan hacimli malzemenin karakteristik kristal yapısı nanopartikülün oluşmasında sınırlayıcı rol oynamaz (Tjong ve Chen, 2004).

4. SÜPER PLASTİK DEFORMASYON

Süper plastik deformasyon (SPD) prosesleri yüksek oranda plastik gerinim uygulanarak çok ince taneli malzeme elde edilmesini sağlayan metal şekillendirme prosesidir. SPD proseslerinde asıl amaç yüksek dayanıklılığa sahip ve çevreyle uyumlu malzemeler üretmektir. Haddelme, dövme ve ekstrüzyon gibi geleneksel metal şekillendirme proseslerinde 2.0'den az plastik gerinim uygulanmakta ve bu prosesleri tekrarlı yapıldığında plastik gerinin 2.0 değerini geçmekte, yapısal parçalar kullanıldığında çap ve kalınlık çok ince ve kararsız olmaktadır. SPD proseslerinde metaller geleneksel termo mekaniksel proseslerle elde edilemeyen çok ince taneli yapıya sahip olmaktadır (Azushima vd., 2008). Çok ince taneli yapıya sahip metaller geleneksel kaba taneli malzemelerle karşılaştırıldığında yüksek dayanım gibi eşsiz ve mükemmel mekanik özellik göstermektedirler (Dong vd., 2000).

Plastik deformasyon, farklı malzemelerde özellikleri geliştirmek ve yapısal değişiklik elde etmede en etkili bir yöntemdir. Bu zamana kadar ekstrüzyon, dövme ve haddelme gibi geleneksel metal şekillendirme yöntemleri bu amaç için kullanılmıştır. Yüksek basınç değerlerinin gereksinimi ve işlem esnasında uniform olmayan çok fazla gerilim-gerinin uygulanması sonucunda bu prosesle ilgili olarak başlangıç malzemenin kesit alanı azalmaktadır. Bunun sonucunda genellikle güçlü makineler ve pahalı takımlar gerekmektedir. Yüksek miktarlarda ve yüksek kaliteli üretim esnasında bu durum üstesinden gelinmesi gereken en önemli sorun olmaktadır. Bu durum geleneksel proseslerde optimum olmamış bir olaydır ve malzeme bilimi ve endüstriyel problemlerin çözümü için özel deformasyon metotları geliştirilmiştir (Segal, 1994).

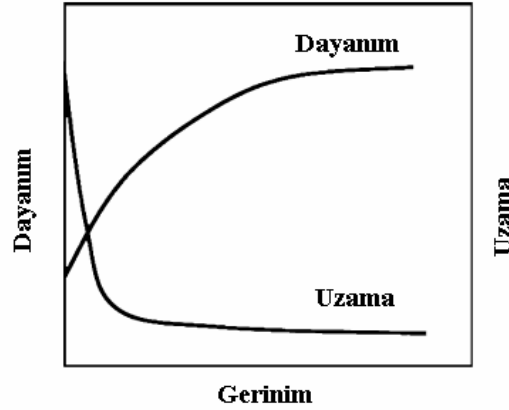
Metallere şekli değişmeksizin yüksek miktarda plastik gerinim uygulamak amacıyla birçok SPD prosesleri geliştirilmiştir. Bu SPD proseslerinden bazıları: eş kanallı açılmalı presleme (ECAP), biriktirmeli hadde yapıştırması (ARB), yüksek basınç burulması (HPT) (Zhao vd., 2004, Azushima vd., 2008), tekrarlı dalgalandırma (repetitive corrugation) (Jianyu vd., 2004, Azushima vd., 2008), tekrarlı ekstrüzyon basması (CEC), burulma ekstrüzyonu, şiddetli burulma gerilimi (STS), silindirik kapalı kalıp dövme (CCDF) şeklindedir (Azushima vd., 2008).

SPD prosesi metalik malzemelerde tanelerin önemli ölçüde incelmesini sağlamaktadır. Bu proses malzemelere uygulandığında mikrometreden daha düşük yada nanometre mertebesinde tanelere ulaşılmaktadır (Cheng vd., 2004). SPD yöntemlerinin temel amacı tane boyutunu küçülterek mekanik özellikleri arttırılmaktadır (Perez ve Luri, 2008). Bu yöntem, iyi

işlenebilirlik, dövülebilirlik ve düşük proses maliyeti gibi özellikleri geliştirmektedir. Nano yapı malzemeler medikal implantlar ve medikal aletler gibi özel yapısal uygulamalarda özellikle dikkatleri çekmiştir (Zhu vd., 2004). SPD tekniğiyle nanoyapılar farklı malzemelerde uygulanabilmektedir. Fakat elde edilen tane boyutu ve nanoyapıların karakteristiği, SPD tekniğinin uygulanmasına, proses yöntemine, faz bileşenine ve kullanılan malzemenin başlangıçtaki mikroyapısına bağlıdır (Ruslan vd., 2000).

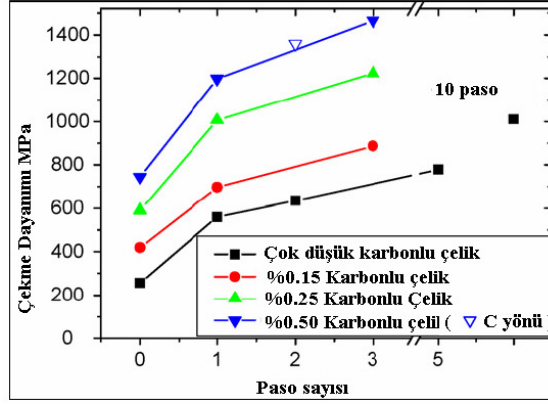
Süper plastik deformasyonla üretilen çok ince taneli yapıyı, sıcaklık, gerinim oranları, uygulanan basınç, gerinim miktarı, yağlama ve diğer faktörler gibi birçok faktör değiştirmektedir. Çok ince taneli malzemelerde akma mukavemeti, düşük gerinim sertleşmesi, spesifik gerinim sertliği gibi genel mekanik özellikler istenmektedir (Ruslan, 1997).

Çok ince taneli malzemelerin çekme dayanımı ve sertliğinin çok yüksek olması beklenmektedir. SPD prosesleri metallerin dayanımlarını arttırmaktadır. Aşağıda Şekil 4,1'de SPD proseslerinde dayanım ve uzamanın değişimiyle ilgili grafik verilmiştir.



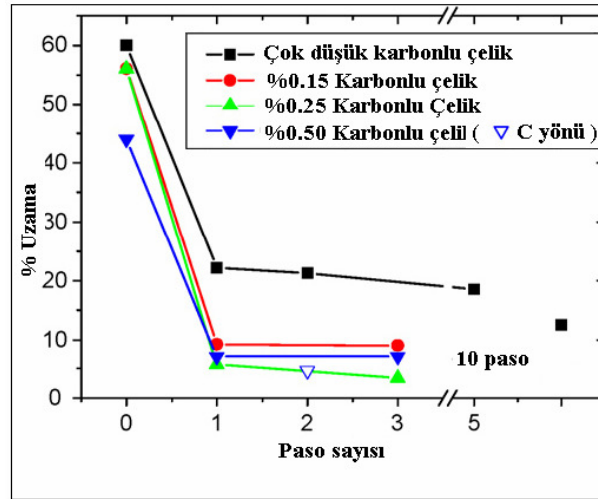
Şekil 4.1 SPD proseslerinde dayanım ve uzamanın değişimi (Azushima vd., 2008).

Malzemenin dayanımı uygulanan gerinimin artmasıyla birlikte artmakta ve sonra gitgide dengelenmektedir. Uzama, küçük gerinim değerlerinde birden büyük bir düşüş göstermekte ve daha sonra dengelenerek gerinimin artmasıyla çok az miktarda azalma olmaktadır.



Şekil 4.2 Karbon bazlı çeliklerde paso sayısı ile çekme dayanımı arasındaki ilişki (Azushima vd., 2008).

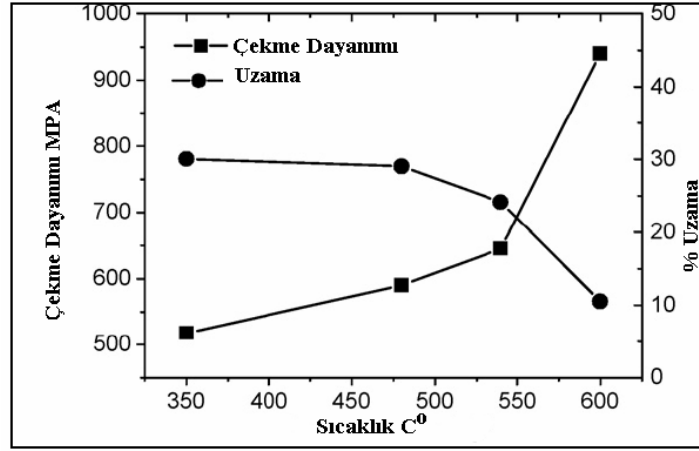
Şekil 4.2' de SPD prosesi uygulanan bazı çelikler için presleme sayısı ile çekme dayanımı arasındaki ilişki verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi ECAP prosesinde presleme sayısı arttıkça çekme dayanımı artmaktadır. Çok düşük karbonlu çeliğin işlem görmemiş hali ile üç ayrı pasolardaki çekme değerleri karşılaştırılmıştır ve bu malzeme için 10 pasodan sonraki çekme dayanımı 1000 MPa'dan daha büyük olmuştur (Azushima vd., 2008).



Şekil 4.3 Karbon bazlı çeliklerde toplam uzama ve paso sayısı arasındaki ilişki (Azushima vd., 2008).

Şekil 4.3'te bazı çelikler için paso sayıları ile toplam uzama arasındaki ilişki verilmiştir. Düşük karbonlu çelik uzama değeri 3 pasodan sonra %20'ye düşerken diğer çeliklerde bu değer 3 paso sonunda %10'a düşmektedir. Ayrıca Şekil 4.4' te de ECAP prosesi uygulanan düşük karbonlu çeliğin artan sıcaklıklardaki gerilim-gerinim ergisi verilmiştir. ECAP proses sıcaklığının artmasıyla birlikte çekme dayanımı azalmakta ve toplam uzama değeri de

düşmektedir (Azushima vd., 2008).



Şekil 4.4 Değişik sıcaklıklarda (350, 480, 540 ve 600°C) ECAP işlemi gören düşük karbonlu çeliğin Gerilim-Gerinim eğrisi (Azushima vd., 2008).

SPD prosesi, yapı gelişimine etki eden birçok faktörden dolayı karmaşık bir prostestir. Bu faktörler şu şekilde sınıflandırılmaktadır;

- Deformasyon şartları
- Malzeme parametreleri (mikroyapı değişimleri)
- Başlangıç malzeme yapısı

ECAP(ECAE) proseslerinde,

Deformasyon şartları;

- Kalıp açısı Φ ve köşe açısı Ψ , presleme sayısı, presleme yönü, presleme oranı ,preslemenin tekrarlanması, yağlama ve sıcaklık

Malzeme özellik parametreleri;

- Eşit, kristal yapı, mikroyapı, defrmasyon mekanizması, kimyasal bileşim, fazlar.
- Son olarak başlangıç yapısı

Bu parametreler şekillenmiş nihai yapıda önemli ve eşit rol oynamaktadırlar. Bazen proses öncesindeki başlangıç yapının değişikliği ve mikroyapı gibi küçük farklılıklar son yapıda aynı şartlar altında uygulanırsa bile büyük farklılıklar oluşmasına sebep olmaktadır (Beyerlein ve Tóth, 2009).

5. ECAP PROSESİ

Eş kanallı açısız presleme (ECAP) denilince 80'li yılların başlangıcında Segal ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen, malzemelerin kesme kuvvetleri ile şekillendirildiği bir metot anlaşılmaktadır. Bu yöntemin amacı, malzemelere kesit alanını değişmeksizin yoğun plastik şekillendirme uygulamaktır. Bu sayede malzemelerin tekrarlı olarak şekillendirilmesi mümkün olabilmektedir. 90'lı yılların başlangıcında yöntem artan bir şekilde geliştirilmiş ve malzemelerde mikron ve nano boyutta tane elde edilmesi amacıyla kullanılan bir süper plastik şekillendirme yöntemi olarak uygulanmıştır. Bu deneylerde kullanılan, yuvarlak veya kare kesitli çubuklar uzunluğu 70 ila 100 mm arasında değişecek şekilde metal tellerden kesilmiştir. Bu numunelerin kesit alanları ya da köşegenler arası mesafelerinin 20 milimetreyi geçmemesi kural olarak uygulanmıştır (Ruslan vd., 2000).

ECAP yöntemi, tek kristalli, çok kristalli ve tek fazlı, çok fazlı, metal matrisli kompozit malzemelerde mikro yapının gelişimini önemli ölçüde etkilemektedir. 1990'ların ortalarında ECAP prosesi çok farklı laboratuvarlar tarafından dikkatleri çekmiş ve prosedür birçok sahada aktif olarak denenmiştir. Şu an ECAP, mevcut Süper plastik deformasyon (severe plastic deformation (SPD)) tekniklerinden en iyi geliştirilen yöntemdir (Ruslan ve Terence, 2006b)

ECAP yöntemi çok ince taneli malzeme üretimi yapılmasının yanında ayrıca toz malzemelerin birleştirilmesinde de kullanılmaktadır. Şekillenmiş malzemenin mekanik özellikleri ve mikro yapısı uygulanan gerinin oranına ve gerinin homojenliğine bağlıdır (Nagasekhar vd., 2007). Kalıp içersindeki iki kanalın birbiriyle yaptığı kesişim açısı olan Φ ve kanalların dış kavis açısı olan Ψ açısı mikro yapının incelmelerini etkilemektedir. ECAP prosesiyle ilgili yapılan ilk deneylerde $\Phi=90^\circ$, $\Psi=0^\circ$ olarak kullanılmıştır. Kalıpların şekliyle ilgili önemli sorunlarla karşılaşılabilir. Özellikle malzemenin kalıba yüksek presleme hızlarında preslenmesi kalıbın ya da presin kırılmasına sebep olmaktadır (Nakashima vd., 1998). Kalıp geometrisi; malzeme özellikleri ve proses şartlarını etkilemektedir. Bu proses şartları da presleme işleminde preslenmiş malzemenin mikro yapı ve mekanik özelliklerini değiştirmektedir (Nagasekhar ve Tick-Hon, 2004).

Al bazlı alaşımlara uygulanan eş kanallı açısız presleme (ECAP) prosesinde tane boyutu önemli ölçüde azalmakta, özellikle tane incelmeleri nanometre seviyeye ulaşmaktadır. Bu elde edilen özellik artan sıcaklıklarda malzemenin süper plastik özellik kazanmasını sağlamaktadır. Fakat kazanılan süper plastik özellik yüksek sıcaklıklarda oluşan çökelti ya

da diğer kusurlar sebebiyle tanelerin hareketi sınırlanmakta ve buda tane kabalaşmasına sebep olmaktadır. Al alaşımlarının içerdiği çökeltiler uzamanın %100'ü aştığında malzeme hatalarına yol açabilmektedir (Cheng vd., 2004).

ECAP yönteminin, malzemenin kesit alanı değişmeksizin yüksek oranda gerinim uygulanması, diğer yöntemlere göre düşük basınç altında daha düzgün deformasyon ve fiziksel ve mekanik özelliklerin birleşimiyle çok ince taneli yapının geliştirilmesi gibi önemli avantajları olmasına karşın (Kim vd., 2001a), tasarımında bazı kısıtlamalar bulunmaktadır. Özellikle iş parçasının boyu iki faktörden dolayı kısıtlanmaktadır: (1) uzunluk ve çap oranları kritik değerden daha küçük olduğunda iş parçasında presleme esnasında bükülme olayı olmaktadır ve ayrıca (2) presleme sınırlı bir uzunlukta olmaktadır. İş parçasının boyundaki kısıtlamalar ECAP tekniğini yüksek maliyet ve düşük üretim verimliliği ile süresiz bir proses yapmaktadır. Ek olarak toplam uzunluğu göz önünde tutulduğunda elde edilen iş parçası üniform olmayan yapı veya makro çatlaklar içermekte ve iş parçasının büyük bir bölümü atılmaktadır. Dahası bu da ECAP yöntemiyle çok ince taneli malzeme üretim proses maliyetini arttırmaktadır. Prosesin süresizliği ve çok ince taneli malzeme üretilirken malzemenin büyük bir kısmının atığa gitmesi maliyetleri çok arttırmışından dolayı medikal implant ve aletler gibi maliyeti yüksek malzemelerin büyük miktarlarda ticari uygulamalarını kısıtlamaktadır. Çok ince taneli malzemelerin geniş ticaret alanı kazanabilmesi için üretim maliyetleri düşürülmeli ve atıklar sürekli olarak işleme kazandırılmalıdır (Georgy vd., 2004).

Farklı presleme yönleri, presleme sayıları ve kalıp kanal açıları deformasyon mekanizmasını farklı etkilemektedir. Tek sefer yapılan preslemelerde uygulanan gerilimler iş parçasına eşit olarak dağılmamaktadır. Preslemeler Çok sayıda yapıldığında uygulanan gerilimler ancak eşit olarak dağılmaktadır. Farklı presleme yönleri, presleme sayıları tane incelmelerini farklı etkilemektedir. Farklı kanal açılarında aynı gerinim değerleri uygulanmasına rağmen gerinimin etkisi farklı olmaktadır (Shubo vd., 2006, Shunqi vd., 2008). Malzemedeki oluşan deformasyon, merkezle köşelerde farklılık göstermektedir. Bundan dolayı merkezde kenarlara nazaran daha düzgün tane incelmesi olmaktadır. Başlangıç malzemesinin tavlanması, büyük açılı tanelerin oluşmasını sağlamıştır. Preslemenin artmasıyla mikro yapının incelmeleri artmaktadır (Guoqun vd., 2006).

Çizelge 5.1 Proseslerde kullanılabilir muhtemel 6 yön ve açıları (Minoru vd., 1998).

Yön	Presleme sayısı						
	2	3	4	5	6	7	8
A	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
B _A	90° ↙	90° ↘	90° ↙	90° ↘	90° ↙	90° ↘	90° ↙
B _C	90° ↙	90° ↙	90° ↙	90° ↙	90° ↙	90° ↙	90° ↙
C	180°	180°	180°	180°	180°	180°	180°
B _A -A	90° ↙	0°	90° ↘	0°	90° ↙	0°	90° ↘
B _C -A	90° ↙	0°	90° ↙	0°	90° ↙	0°	90° ↙

Çizelge 5.1’de dört temel prosesle ilgili 90° için peş peşe yapılan preslemelerde numunenin döndürme açıları verilmiştir. Bunlardan B_A yönünde sırasıyla +90° ve -90° döndürülmekte, B_C yönünde devamlı +90° ve C yönünde ise 180° döndürülmektedir. Ek olarak B_A, B_C ve A yönlerinin birleşimi olan B_A-A ve B_C-A gibi iki alternatif yön dahil edilmiştir. Tekrarlı presleme, malzemelerde yüksek gerinim değerleri elde etmek için uygulanır. Yapılan deneysel çalışmalar, mikroyapının gelişimi, presleme işleminde numunenin tekrarlı yapılan preslemelerde kalıp içinde döndürülüp döndürülmemesine bağlı olduğunu göstermiştir (Minoru vd., 1998).

Çizelge 5.1’de verilen bu altı presleme yönleri ile malzemeler preslendiğinde, kübik malzeme üzerinde oluşan kayma düzlemleri Çizelge 5.2’de verilmektedir. Bütün küplerin yüzeyleri preslenmeden önce kare şeklindedir, fakat malzeme kalıpta preslendiğinde bozulmalar olmaktadır. Oluşan şekiller Çizelge 5.2’de X, Y ve Z düzlemleri ile birlikte verilmiştir. Örneğin A yönü kullanıldığında X düzlemi tek preslemeden sonra kare şekil, akış yönü doğrultusunda dikdörtgene dönüşmektedir. Bütün yönler bütün düzlemleriyle birlikte oluşan değişimler ayrıntılı olarak Çizelge 5.2’de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde birkaç önemli nokta dikkatleri çekmektedir. Bunlardan ilki, B_A (0°-90°-0°-90°) yönü A yönüyle, B_C (0°-90°-180°-270°) yönü C yönüyle benzer karakteristiğe sahiptir. İkinci olarak, A yönünün X ve Y düzlemlerinde sürekli bir değişim olurken Z düzleminde herhangi bir değişim olmamakta ve B_A yönünde ise bütün düzlemlerinde sürekli bir değişim olmaktadır. Buna karşılık malzemelerde oluşan kaymalar, B_C yönü kullanıldığında 4n’de, C yönü kullanıldığında 2n’de sıfırlanmaktadır (n paso sayısı). Ek olarak C yönünde Z düzlemi doğrultusunda deformasyon olmamaktadır. Üçüncü olarak, bu elde edilen tabloyla optimum koşullara ulaşılabilmektedir. Yapılan bu çalışmalara göre, B_C ve C yönleri B_A ve A yönlerine göre kayma düzlemlerinin

sıfırlanmasından dolayı daha iyi görünmekte ve B_C yönü de, Z düzleminde oluşan deformasyon hatalarından dolayı C yönünden daha verimli olduğu görülmektedir. Buna karşılık B_A-A proses yönü, üç düzlemde de ilerleyen preslemelerde kayma düzlemlerinin bozulmasından dolayı kullanışlı bir yön olmadığı açıktır. Ancak B_C-A yönü B_C ve A yönünün birleşimi olduğu için, her iki yönün bütün düzlemlerinde yüksek kayma gerilmesi olduğu ve kayma düzlemlerinin etkisinin ancak 8n'de sıfırlanmasından dolayı optimum proses şartlarını gösterebilmektedir (Minoru vd., 1998).

Çizelge 5.2 Presleme yönlerinin kayma karakteristiği (Minoru vd., 1998).

Yön	Düzlem	Presleme sayısı								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
A	X	□	□	□	□	□	□	□	□	□
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	□	□	□	□	□	□	□
B_A	X	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
B_C	X	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
C	X	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
B_A-A	X	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
B_C-A	X	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Y	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱
	Z	□	□	▱	▱	▱	▱	▱	▱	▱

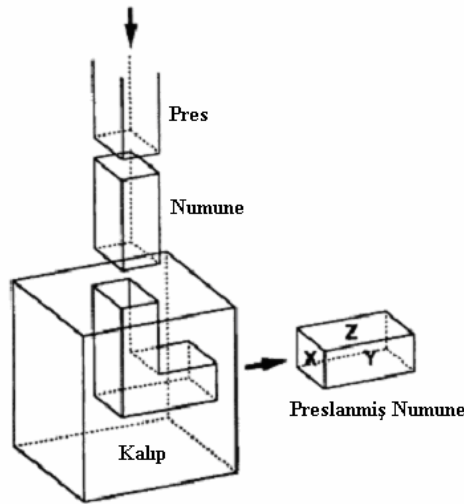
Malzemelere ECAP yöntemi uygulanırken, işlenebilirliğe ve mikroyapsal karakteristiğe birkaç değişik faktör etki etmektedir. Bu faktörler üç farklı kategoride toplandığında; birinci faktör ECAP yönteminde yapılan, kalıptaki iki kanalın birbirleriyle yaptığı açı Φ ve kanalların bükülme açısı Ψ gibi deneylerle doğrudan ilgilidir. İkincisi, deneylerin yapılışıyla ilgili presleme hızı, işlem esnasındaki presleme sıcaklığı ve malzemeyi tekrardan presleme gibi prosesle ilgili deneysel faktörlerdir. Üçüncüsünde ise, ince tanelerin uzamasına ve preslenmiş

mikroyapının homojenliğine ve preslenmemiş malzemedeki düzensiz dağılmış tanelerin dağıtılmasında rol oynayan proses faktörleri etki etmektedir. Presleme işlemine başlamadan önce bu faktörler gözden geçirilmelidir. Bu mikroyapısal karakterizasyon ve presleme yönü (A, BA, BC veya C) ve presleme sayısı gibi diğer proses faktörleri deneyi yapan kişi tarafından belirlenmektedir (Ruslan ve Terence, 2006b).

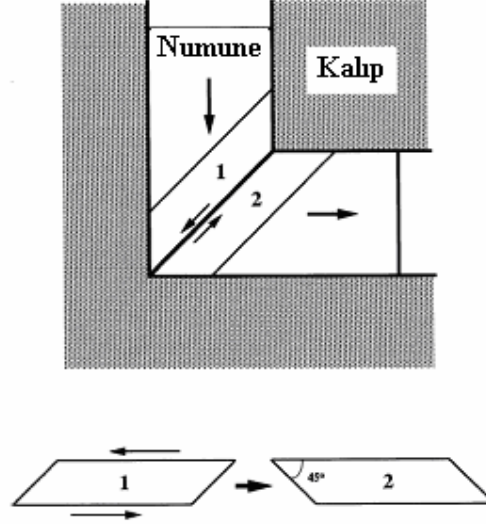
6. ECAP PROSES ÇEŞİTLERİ

6.1 Geleneksel ECAP yöntemi

ECAP işlemi esnasında metalin ilerleyişiyle ilgili temel prosesin açıklanması ve ECAP yönteminin pratikteki prensipleri Şekil 6.1’ de sistematik olarak gösterilmiştir. Görülen kalıp örneğinde, kalıp içindeki kanalın büküldüğü dik açı olan Φ açısı 90 dereceye ve diğer bir açı olan iki kanalın kesiştiği açının dış yayında, Ψ açısı, 0 dereceye eşittir (Şekil 6.1). Kare ve yuvarlak kesitli çubuk şeklindeki numune, kanallara uyacak şekilde işlenmiş ve kalıp, numunenin içine basma cihazı ile preslenebileceği şekilde yerleştirilmiştir. Deformasyon işleminin temeli, Şekil 6.2’de sistematik olarak görüldüğü gibi, numunenin kalıp içine basılması esnasında basit bir kesme işlemi oluşmaktadır. Kalıp açısı (Şekil 6.2) 90 derecedir ve teorik kesme düzlemi, 1 ve 2 olarak numaralandırılmış ve numune yüzeyinde gösterilmiş iki bitişik yüzey arasında bulunmaktadır. Bu düzlemler işlem esnasında yönleri değişerek ters çevrilmektedir. Numune, kalıba preslenirken çok yüksek gerinim değerleri uygulanmasına rağmen son olarak kalıptan çıktığında kesit boyutlarında hiçbir değişiklik olmamaktadır. Bu durumla ilgili preslenmiş numune örneği Şekil 6.1’ de görülmektedir. Numunenin sahip olduğu 3 ortogonal düzlem Şekil 6.1’de gösterilmiş olup bu düzlemlerden X veya ilerleme yönüne dik olan enine düzlem, Y veya kalıbın yan yüzeyine paralel olan düzlem ve Z ise kalıbın üst yüzeyine paralel uzunlamasına olan düzlemdir (Minoru vd., 2001).



Şekil 6.1 ECAP yönteminin şekilsel sistematik gösterimi: X, Y ve Z düzlemleri sırasıyla enine düzlemi, ilerleme düzlemini ve uzunlamasına düzlemi belirtmektedir (Minoru vd., 2001).

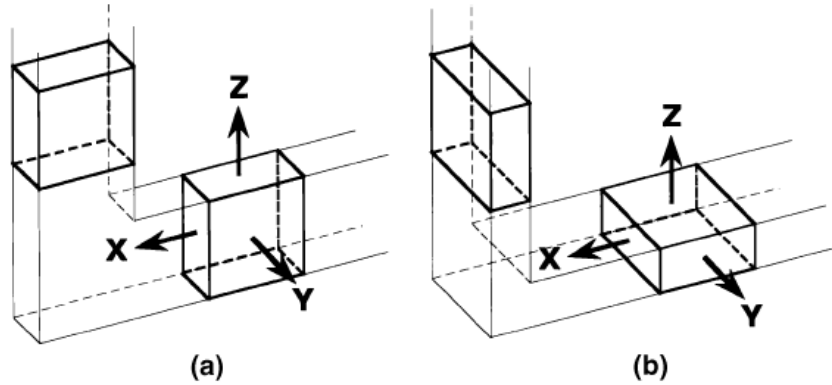


Şekil 6.2 ECAP işlemi esnasında kalıp içindeki numunede oluşan kesme düzlemleri: 1 ve 2 diye numaralandırılmış öğeler küçük şekilde de görüldüğü gibi kesme etkisinden dolayı yer değiştirmişlerdir (Minoru vd., 2001).

ECAP ile proses edildiği zaman çok büyük gerinimler oluşturulmasına rağmen aynı kesit alanının korunması SPD prosesinin önemli karakteristiğidir ve bu karakteristیک çekme ekztrüzyon ve hadde gibi geleneksel metal şekillendirme karakteristیکlerinden ayırt eden bir karakteristiktir. Kesit alanı değişmeden kaldığı için aynı numune tekrar preslenerek isdisnai yüksek gerinim kazanabilmektedir. Örneğin, tekrarklı presleme işlemi, numunenin her defasında farklı yönde döndürülmesinden dolayı farklı kayma düzlemlerinin oluşmasına fırsat vermiştir. Pratikte, ECAP'la yapılan bir çok çalışma kare kesitli çubuklarla ve kare kanallara sahip kalıplarla gerçekleştirilmiştir. Bu örnekte, uygun proses elde etmek için biletler her defasında 90 derece döndürülmüştür. Aynı döndürme prosesi yuvarlak kesit alanına sahip malzemelere daha kolay uygulanır. ECAP yönteminde önemli dört döndürme prosesi belirtilmiştir: A prosesi(yönü) numune tekrarklı presleme işlemlerinde döndürülmez, BA prosesi(yönü) numune ardı ardına presleme işlemlerinde 90 derece döndürülür, BC prosesi(yönü) numune her defasında aynı yönde 90 derece döndürülür, C prosesi (yönü) numune her defasında 180 derece döndürülür (Minoru vd., 2001).

6.2 ECAP yönteminin düz yüzeyli malzemelere uygulanması

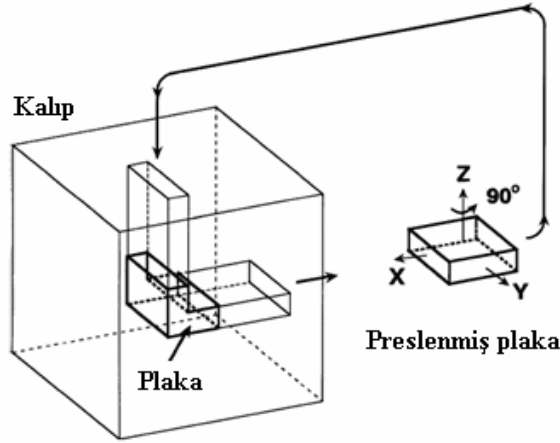
Süper plastik şekillendirme işlemi olan ECAP yönteminle üretilmiş çok ince taneli malzemelerin kullanılması gibi bazı endüstriyel uygulamalar için, ince metalik şerit formundaki preslenmiş malzemelere de ihtiyaç vardır. Bu gereksinim, ECAP yönteminin düz yüzeyli malzemelere geleneksel metal şekillendirme tesislerinde kolaylıkla uygulanabilirliğiyle ilgili olarak artmaktadır. Sınırlı sayıda kaynaklar ECAP yönteminin düz yüzeyli malzemelere uygulanabilirliğini belirtmektedir. Düz yüzeyli malzemelerin preslenmesi esnasında ilk olarak ayrı iki presleme konfigürasyonunun farkına varılması gerekmektedir. Bu konfigürasyonlar şekil 6.3’de a) dikey konfigürasyon b) yatay konfigürasyonu gösterilmiş olup: Şekil 6.3’de görülen X,Y ve Z düzlemleri Şekil 6.4’de tanımlanmıştır. Bu iki konfigürasyonda numunelerin sahip olduğu eksenler sırasıyla ya X ve Z eksenleri ya da X ve Y eksenleridir. Şekil 6.3’ de görüldüğü gibi daha öncede belirtilen kare ve yuvarlak kesitli numunelerden farklı olarak döndürme prosesleri sınırlıdır. Dik konfigürasyonda numune değişik yollarda döndürülebilir. İlk olarak X eksenini etrafında yapılan döndürmeler C yönüne eşittir ve CX yönü olarak tanımlanır ve 180 derece döndürülür ve buradaki gösterilen X, döndürme yönü olan X ekseninin bir alt simgesidir. İkinci olarak Z eksenini etrafında yapılan 180 derecelik döndürmeler CZ yönü olarak tanımlanmaktadır (Kamachi vd., 2003).



Şekil 6.3 ECAP işlemini düz yüzeyli malzemelere uygulanması : a) dik konfigürasyon ve b) yatay konfigürasyon (Kamachi vd., 2003).

Pratikte kayma paternlerinin incelenmesiyle ilgili bu iki yön, geleneksel C yönünün kare ve yuvarlak şeklindeki numunelere uygulanmasının daha uygun olduğunu göstermektedir. Buna karşılık iki durumda da kare ve yuvarlak şeklindeki numunelere uygulanması uygun değildir

ve her preslemeden sonra Y eksenini etrafında döndürülen numunenin BAY ve BCY yönü ya alternatif farklı bir yöndür ya da aynı algılanmalıdır. BAY ve BCY yönleri pratikte kolay uygulanmaz. Çünkü plakalarda oluşan kaymalar ilk seferle bütün art arda gelen geçişler paralel kenardır. Bundan dolayı işlem, kare kesitli numunelerde her seferden sonra yeniden başlayarak üzerine alınmaktadır. Şekil 6.3(b) görülen yatay konum çok daha pratik bir uygulamadır ve elde edilen bilgiler, yapılan bütün deneylerde bunun kullanıldığını göstermiştir. Bu konum kare ve yuvarlak kesitli numunelerde C yönüne denk gelen, X eksenini etrafında 180 derece döndürülmüş CX yönü ve A yönüne denk gelen Y eksenini etrafında 180 derece döndürülmüş CY yönü gibi birkaç proses sağlanmaktadır. Burada, kare numunelere veya şekil 6.3 (a)'da görüldüğü gibi plakaların dik konumunda kullanıldığında uygun olmayan iki ek proses yönü daha vardır. Bu yönler dik plakanın X eksenini etrafında 90 derece döndürülen sırasıyla ya BAZ yönünü ya da her seferden sonra 90 derece döndürülen BCZ yönünü içermektedir. Deneylerde saf alüminyum plakaya BCZ yönü uygulandığında, yalnızca 4 defa yapılan preslemede mükemmel ve küçük ve homojen yapı elde edilmiştir. Bu proses yönünün prensipleri detaylarıyla Şekil 6.4'te gösterilmiştir (Kamachi vd., 2003).

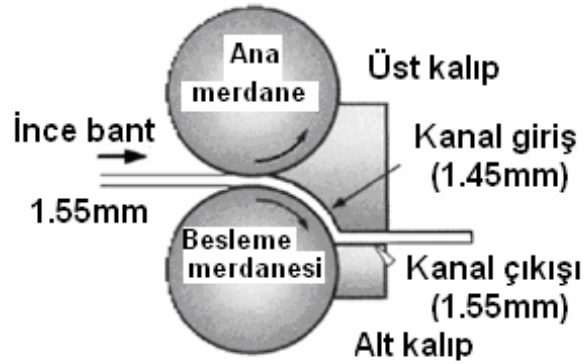


Şekil 6.4 BCZ proses rotası kullanılarak dik konfigürasyonda bulunan plakaya presleme prosedürünün uygulanması (Kamachi vd., 2003).

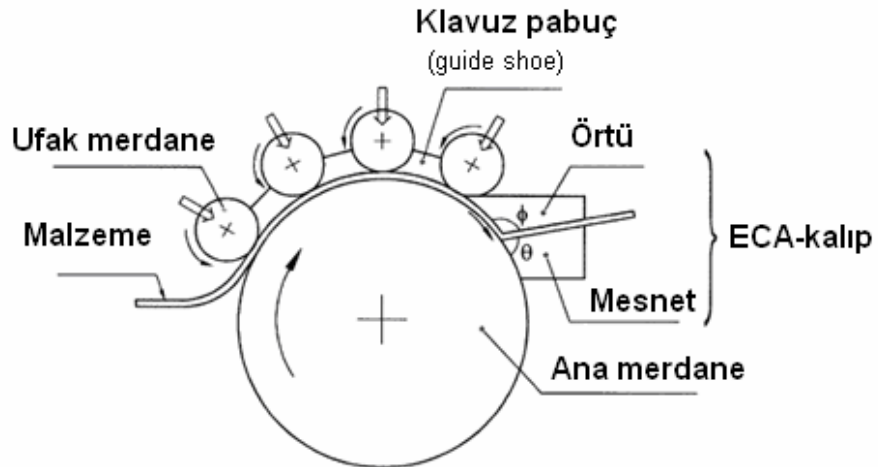
6.3 ECAP yönteminin sürekli prosesi

ECAP işlemi dikkat edilmesi gereken bir prosesdir, çünkü üretilen malzemelerin hepsi aynı fiziksel ve mekaniksel özelliklerde olmalıdır ve üretilen malzemeler endüstride önemli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Başlangıçta sürekli ECAP prosesi uzun şerit malzemelerin üretimi için geliştirilmiştir (Utsunomiya vd., 2003).

İlk olarak ECAP yöntemiyle haddeleme birleştirilerek bir proses geliştirilmiştir. Bu proses sürekli sınırlı şerit kesme (continuous confined strip shearing) (C2S2), farklı kanal açılı presleme (DCAP), eş kanal açılı haddeleme(ECAD) gibi değişik şekillerde dizayn edilmiş olup prosesin işleyişiyle ilgili prensipler Şekil 6.5’de şematik olarak gösterilmiştir. Böylece malzeme ince şerit bir şekilde elde edilir ve iki hadde arasında kolaylıkla beslenir, haddeden kolaylıkla geçirilir ve kalınlık 1.55 mm’den 1.45mm’ye azalır ve sonra çıkış kanalından çıkarken orijinal kalınlık olan 1.55mm olarak çıkmaktadır (Utsunomiya vd., 2003).



Şekil 6.5 DCAP prosesinin sürekli üretim prensibi (Ruslan ve Terence, 2006a).



Şekil 6.6 Sürekli kesme prosesinin prensibi (Utsunomiya vd., 2003).

DSPA terminolojisi, kanal girişi ile kanal çıkışı arasındaki küçük kalınlık farklılıklarından dolay ortaya ıkmiştır. İkinci olarak, eş kanal açılı ekme (ECAD) yuvarlak kesitli numunelerin üretim prosesinin muhtemel prensiplerini amaçlamıştır fakat yapılan deneyler sonradan incelendiğinde görülmüştür ki, ECAD yönteminde numunelerin kesit alanında %15'den fazla azalma olduğu ve bu yüzdede bu prosesin verimli olarak defalarca uygulanamadığı ortaya ıkmiştır. nc olarak, sürekli kesme metodunda şerit malzemelerin kullanımı amaçlamış ve sürekli haddeleme işlemi kullanılan (continuous rolling mill) bu proses sistematik olarak Şekil 6.6'de gösterilmiştir. Bu prosedürde malzeme büyük ana merdane (large central roller) ile kk merdanelerin (satellite rollers) arasına beslenmekte ve aynı yönde dönen merdanelerin hızları aynı olmakta ve ekstirzyon kuvvetini büyük merdane oluşturmaktadır. Şerit malzeme merdanelerden geçer ve merdanelerden sonra bulunan ve açıya sahip bölgeden geçmek için dayanım elde edilmektedir. Deneylerde kullanılan ticari saflıktaki Alüminyum şerit malzemenin ECAP işleminde $\Phi = 65^\circ$ 'lik optimum şartlara dayandığı görülmüştür. Bu çeşitli prosedürler başarılmış gibi görülmesine rağmen çok sınırlı oranlarda malzemeleri kapsayan sonuçlar ve bu sonuçlarda bütün alaşımların çok kk guruplarında elde edilmiştir (Utsunomiya vd., 2003).

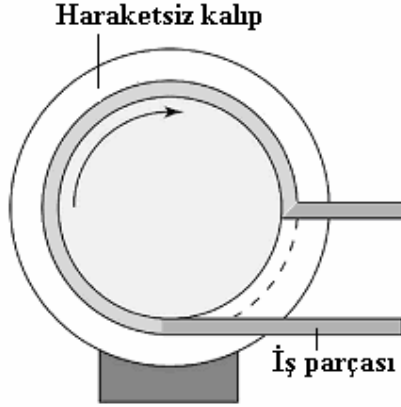
6.4 ECAP–Conform prosesi

Conform ekstrüzyon prosesi sürekli ekstrüzyonla tel üretmek amacıyla 30 yıldan daha uzun süre önce geliştirilmiştir. Fakat çok kısa bir zaman önce bu geleneksel yöntem ECAP ile birleştirilerek ECAP-Conform prosesi oluşturulmuştur (Georgy vd., 2004).

Bu proses prensip olarak elde edilen sürtünme kuvvetiyle Conform prosesindeki benzer bir Şekilde iş parçası ECAP kalıbının içine itilmektedir. İş parçasına proses tekrarlı olarak uygulanarak çok ince taneli yapı elde edebilecek Şekilde ECAP kalıbı modifiye edilmiştir (Georgy vd., 2004).

Dizayn edilen ve yapılan ECAP-Conform prosesi sistematik olarak Şekil 6.7' de görülmektedir. Şekilde grldğu gibi merdane gövdesine, merkezi merdanenin merkezi olacak Şekilde dikdörtgen kesitli oluk açılmış ve iş parçası bu açılan oluğun içinden beslenmiştir. İş parçası oluk ile üç ara yüzeyden temas etmesi sonucu gövde ve iş parçasının dönmesi ile oluşan sürtünme kuvvetiyle ileri doğru itilmektedir. Fakat iş parçası, hareketsiz kalıp tarafından oluğa alınır ve bu kalıp iş parçasını durdurarak ECAP prosesinde olduğu gibi kesme etkisiyle normal bir açıyla dönmesini sağlamaktadır. Mevcut sistemdeki aı, ECAP prosesinde çok yaygın olarak kullanılan kanalların birbirleriyle yaptığı açı gibi hemen hemen

90 derecedir. Yapılan bu düzenlemeler ECAP prosesinin sürekliliğini etkin bir şekilde sağlar (Georgy vd., 2004).



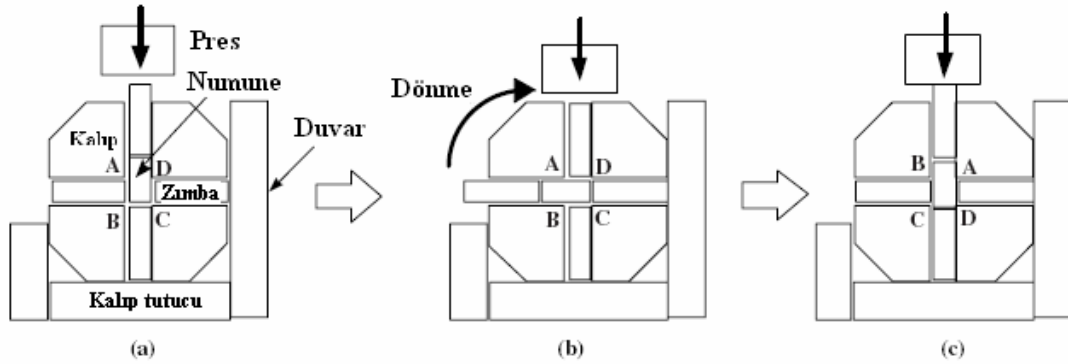
Şekil 6.7 ECAP-Conform prosesinin sistematik gösterimi(Georgy vd., 2004).

6.5 ECAP yönteminde alternatif prosedürler: döner kalıp, kenar-ekstürizyon ve çok-geçişli kalıp

Geleneksel ECAP yöntemiyle ilgili, numunenin kalıptan alınması ve döndürülerek veya döndürülmeksizin, yüksek sayılarda pasolar ve yüksek gerinim uygulanarak kalıba yeniden dahil edilmesi gibi önemli kısıtlamalarla karşılaşmaktadır. Bu işlemler yüksek işçilik yoğunluklu ve zaman gerektiren işlemlerdir ve bundan dolayı birkaç prosedür bu sınırlamalardan kurtulmak için geliştirilmiştir. Numune her geçişte kalıptan etkin bir şekilde çıkarılması gereken bu prosedür ECAP döner-kalıp kullanılarak yapılmıştır: bu dizayn Şekil 6.8'de sistematik olarak gösterilmiştir. Bir kalıpta bulunan aynı özelliklerde ki iki kanal aynı kesit alanına sahip ve kalıbın merkezinde 90 derecelik açıyla kesişmektedir. Aynı uzunluktaki üç zımba dik kanalların alt kesitine ve yatay kanalların içine Şekil 6.8a'da görüldüğü gibi geçirilir. Numune, alt zımbanın üstünde kalan boşluğa yerleştirilir ve üst zımba presin içine yerleştirilir ve numune presle basılır. İlk preslemeden sonraki konfigürasyon Şekil 6.8b'de gösterilmiştir. Kalıp numunenin tekrardan preslenebilmesi için Şekil 6.8c'de görüldüğü gibi 90 derece döndürülür. Prosedür dikkatli bir şekilde incelendiğinde, bu proses tipinin numunenin hiçbir şekilde döndürülmediği A rotasına uyduğu görülmektedir. Buna rağmen, bu proses tipinde işlemin basit olması önemli avantajdır. Örneğin döner-kalıp ECAP sistemi art arda maksimum 32 preslemeye kadar verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat Şekil 6.8'de görülen bu prosesin dezavantajı ise, malzemenin en boy oranlarının küçük olması sebebiyle sonuçta belirgin bir homojensizleşme meydana gelebilmektedir (Ruslan ve Terence, 2006a).

Bir alternatif fakat fiziksel olarak yaklaşık aynı olan kenar-ekstürüzyon (side-extrusion) prosesi Şekil 6.9’da sistematik olarak gösterilmiştir. Bu proseste, işlem esnasında yüksek güç oluşturabilmek için dört adet zımba-itme mili kullanılmıştır. Bununla ilgili bir örnek Şekil 6.9’da yer almaktadır ve numune üstten gelen A zımbası ve yandan gelen B zımbası ile preslenmektedir. Tekrarlı preslemeler belki kullanılabilir ve döner-kalıp ECAP yönteminde olduğu gibi bu proseste de A rotası kullanılmıştır. Bu prosedür 10’a kadarki pasalarda verimli olarak preslenmiştir (Ruslan ve Terence, 2006a).

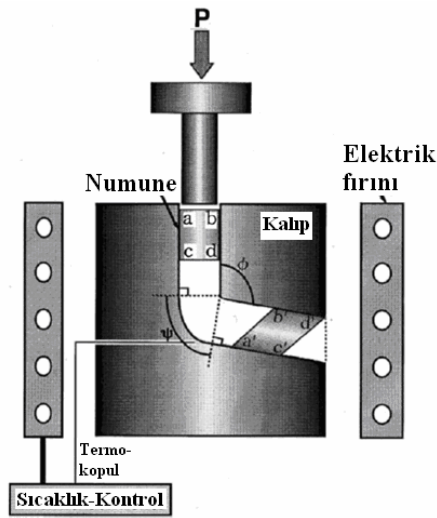
Karmaşık presleme özelliği gerektirmeyen bu alternatif prosedür, çok yönlü kalıpla yapılmaktadır. 90 derecelik açılarla bükülen 5 farklı kanal içermekte olan çok yönlü-geçişli kalıba bir örnek Şekil 6.10’da gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, ikinci ve daha sonraki art arda gelen geçişlerde numunenin 180 derece etkili bir şekilde dönmesinden C rotasına eşit olduğu görülmektedir. Bu tip kalıp, aynı numune üzerinde farklı geçiş sayılarından sonra oluşan mikro karektristikleri karşılaştırmada etkili olmaktadır. Örnek olarak, Şekil 6.10’da 1, 2, 3, 4 ve 5 konumları ECAP yönteminde sırasıyla 1, 2, 3, 4 ve 5 geçişli preslemelere uymaktadır (Ruslan ve Terence, 2006a).



Şekil 6.8 Döner- kalıp ECAP prosesi: a) başlangıç durumu, b) ilk geçişten sonra ve c) kalıp 90° döndükten sonra (Aibin vd., 2005).

6.6 ECAP'la Birleştirme

ECAP yöntemi genellikle katı metallerle ilgili bir proses olmasına rağmen, ayrıca metalik tozların birleştirilmesinde de kullanılabilir. Şekil 6.11'de görülen ECAP, Al-2024 alaşım tozlarının preslenmesinde kullanılmıştır. Başlangıç tane boyutu $<45\mu\text{m}$ olan tozlar alınmış ve soğuk izostatik olarak preslendikten sonra elde edilen biletlerin ölçüleri 20 mm çapında ve 70 mm boyunda olmuştur. Şekil 6.11'de görüldüğü gibi, kalıp içindeki kanallar 105° lik açı yapmakta ve bu kanalların birbirleriyle olan eğim açıları ise 75° olmuştur. Tekrarlı preslenen biletlere 573 K sıcaklığına kadar maksimum 3 geçiş yapılmıştır (Matsuki, 2000).



Şekil 6.11 Al alaşım tozlarının birleştirilmesinde kullanılan ECAP yönteminin prensipleri: tozlar abcd diye belirtilen sıkı bir ceket içine alınmıştır (Kamachia vd., 2000).

Tozların preslenmesinde karşılaşılan en önemli farklılık, preslenmiş numunenin yüzeyinde çatlakların olmasıdır. ECAP birleştirme işleminde oluşan çatlamalardan sakınmak için, Al-2024 tozları işlenmiş ve dış kısmına sıkı bir ceket geçirilmiş ve presleme 573 K sıcaklığında yapılmıştır: numune ceketi Şekil 6.11'de abcd şeklinde işaretlenmiştir. Bu araştırmanın sonuçları, sıkı bir koruma yapıldığında yüzeyde hiçbir çatlakın olmadığını ispat etmiştir. Ayrıca geri preslemeyle çatlak oluşumu azaltılmış hatta engellenmiştir. Böylece saf Al tozlarının preslenmesinde $\sim 1\mu\text{m}$ tane boyutu elde edilmiştir. Bu ve diğer benzer sonuçlar, kullanılacak muhtemel bir ECAP yöntemiyle, toz birleştirmede çok ince taneli yapıya sahip malzemenin üretilebileceğini ispatlamaktadır (Kamachia vd., 2000).

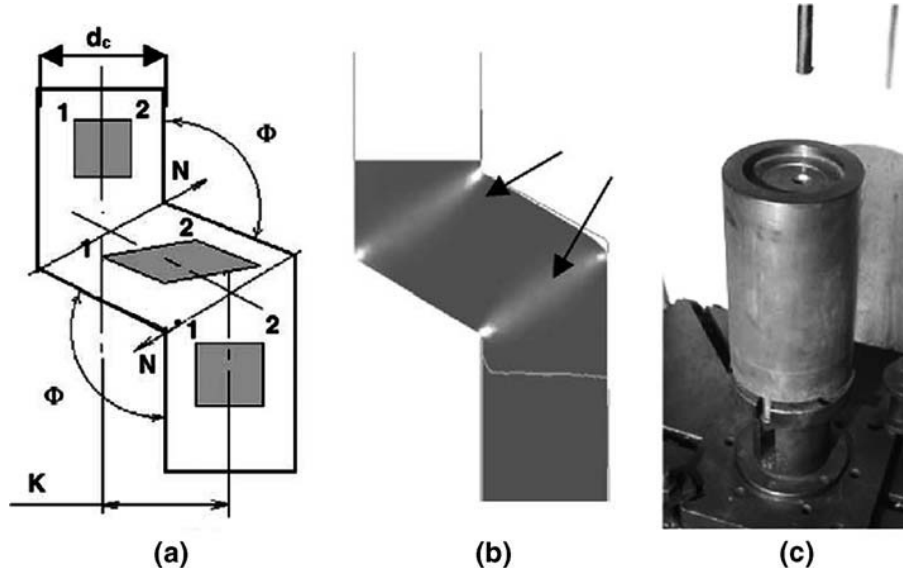
6.7 Paralel Kanallarla ECAP İşleminin Geliştirilmesi

Paralel kanallara sahip bir düzeneğin kullanılması ECAP'ın yürütülmesi açısından potansiyele sahip olan yeni bir geliştirmedir. Bu yöntemin kullanılması için bazı erken sonuçlar ele alınmıştır ve bu sonuçlardan en etkili sonucu ise iki boyutlu element analizi simülasyonu vermiştir. Bu sayede paralel kanallarda gerçeğe oldukça yakın analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu yöntemin prensipleri Şekil 6.12'de gösterilmiştir ve şekle göre Φ paralel kanalların birleştiği yerdeki açı, K ise kanallar arası uzaklığı göstermektedir (Ruslan ve Terence, 2006a).

Paralel kanallarla ECAP işleminin ayırt edici özelliği, işlem sırasında iki ayrı kesme olayının meydana gelmesidir. Bunun anlamı pratik uygulamalarda çok ince taneli yapı oluşumu için gerekli paso sayısının azalması demektir. İki kanal arasındaki uzaklık olan K değerleri ve kesişim açısı olan Φ değerleri kalıp geometrisinin temel parametreleridir, bu değerlere bağlı olarak akış modeli ve gerilim-gerinim durumları değişmektedir (Ruslan ve Terence, 2006a).

K ve Φ parametrelerinin akış modeli ve gerinim homojenliği üzerine etkileri paralel kanallı ECAP için bakır numune üzerinde 2-D FEM simülasyonu kullanılarak araştırılmıştır. Bu uygulamayla optimal değerler hesaplanmış preslenen çubuktaki en büyük gerinim homojenliği için $\Phi = 100^\circ$ ve $K \approx d_C$ olarak bulunmuştur; d_C kanal çapı değeridir. Bunun anlamı kanal boyutlarına yaklaşık olarak eşit olan bir kanal uzaklığı kullanıldığında uygulama için optimum koşulların sağlanmasıdır. Bu koşullar altında bir paso sonrası elde edilen gerinim yaklaşık olarak 2'ye eşittir. Şunu da belirtmek gerekir ki simülasyon sonuçları grid metodu kullanılarak deneysel sonuçlarla onaylanmıştır (Ruslan ve Terence, 2006a).

Paralel kanallarda ECAP işleminde metal akışının doğasıyla ilgili önemli bir özellik ortaya çıkmıştır. Bir tam pasodan sonra numunenin çarpılmaya uğramamış bir şekilde çıkışı gözlenir, dolayısıyla gerinimin numunenin en uç noktalarına eşit olarak dağıldığı anlaşılmıştır. Böylece geleneksel ECAP metotlarının aksine numunelerin girişteki şekliyle eşit olarak çıkışı sağlanmıştır (Ruslan ve Terence, 2006a).



Şekil 6.12 Paralel kanallarda ECAP metodunun prensipleri: a) N kesme yönü, K iki kanal arasındaki mesafe, Φ kanalların kesişim bölgesindeki açı ve gölgeli alanlar kesme bölgesinde meydana gelen kesmeyi tarifleyen dönüşüm şekilleri, b) paralel kanallarda ECAP 2D-FEM simülasyonu ile elde edilmiş deformasyon bölgeleri ve c) $\Phi = 100^\circ$ ve K kanallar arası mesafenin kanal çapıyla eşit 18 mm olduğu deneysel ECAP kalıp düzeneğinin genel görünüşü (Ruslan ve Terence, 2006a).

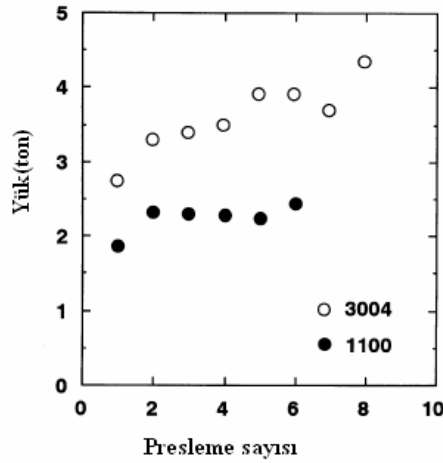
Şekil 6.12c'de görülen 500°C ' a kadar işlem yapılabilecek olan üretilmiş paralel kanallı ECAP kalıbında hesaplamalar yapılmıştır. Cu ve Ti numuneler 4 pasoya tabi tutulmuştur ve TEM görüntülerinde yapılan incelemede; elde edilen çok ince taneli yapının geleneksel ECAP metotlarında 8 pasoluk çok ince tane yapısına denk geldiği gözlemlenmiştir. Üstelik çok ince taneli yapı numunenin başından sonuna daha homojen bir şekildedir. ECAP sonrası malzeme potansiyelinden yararlanılmasındaki artış nedeniyle daha yüksek mikroyapısal homojenlik pratikte daha çok önem kazanmaktadır (Ruslan ve Terence, 2006a).

7. ECAP PROSESİNE ETKİ EDEN PARAMETRELER

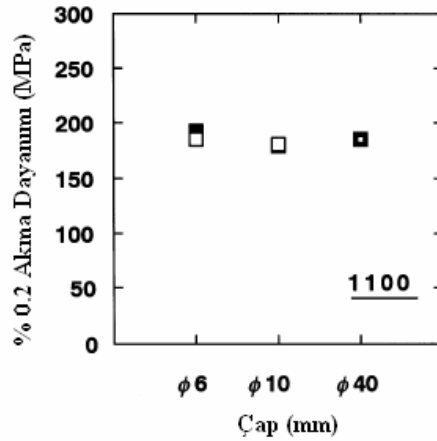
ECAP prosesine etki eden parametreler; başlangıç malzeme boyutu, kanal açısı, eğim açısı, presleme hızı, presleme sıcaklığı şeklinde sıralanmaktadır.

7.1 Başlangıç Malzeme Boyutunun Etkisi

ECAP prosesinin uygulandığı numunelerde malzeme boyutunun gerek mikro yapı gerekse sertlik değerlerinde çok büyük farklılıklarının olmadığı görülmüştür. Bu amaçla 1100 alaşımından alınmış 6, 10 ve 40 mm çaplarındaki numuneler oda sıcaklığında 6 paso verilerek ECAP işlemine tabi tutulmuştur. Testler $3.3 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ başlangıç gerinim değerlerinde her bir numune için iki defa yapılmıştır (Horita vd., 2001).



Şekil 7.1 Yük-Presleme sayısı grafiği (Horita vd., 2001).



Şekil 7.2 Farklı boyutlardaki ECAP numunelerinin akma dayanımları (Horita vd., 2001).

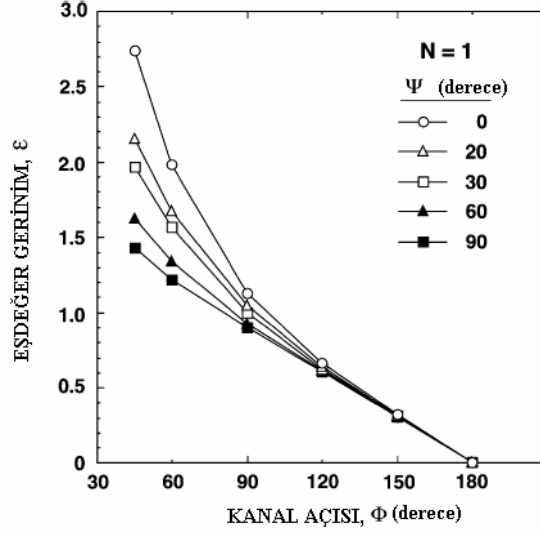
Elde edilen % 0.2 akma dayanım değerleri Şekil 7.2’de gösterilmiştir. Yapılan TEM inceleme sonucunda mikro yapıda da tane boyutlarında farklılığın olmadığı görülmüştür. Numunelerden boylamasına kesitten vickers sertlik değerleri alınmış ve bu ölçümler 40mm çaplı numunelerde y ve z yönlerinden ayrı ayrı yapılmıştır. Şekil 7.1’ de presleme sayısı-yük değişimi iki ayrı alüminyum alaşımı için verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi presleme sayısının artmasıyla uygulanması gereken kuvvetin toplamda arttığı görülmektedir. Sonuç olarak farklı kesit alanlarına sahip numunelerin ECAP işlemine tabi tutulması sonucunda benzer sonuçların alındığı ve numune boyutunun mekanik özellikler ve tane boyutuna farklılık etmediği görülmüştür (Horita vd., 2001).

7.2 Kanal açısı Φ 'nin etkisi

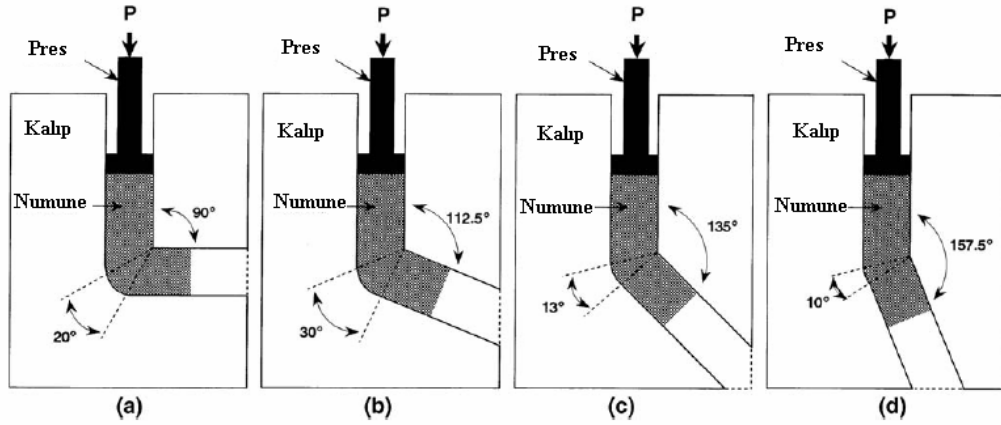
Her preslemede uygulanan toplam gerininin oluşturduğu zorlamalardan dolayı kanal açısı, Φ , en önemli deneysel faktördür ve bundan dolayı uygulanan gerinim preslenmiş mikroyapı üzerinde doğrudan etkiye sahiptir. Şekil 7.3’ de bu gerinim değerlerinden bazıları görülmektedir. Burada kanal açısının önemi elde edilen iki sonuçla belirtilmiştir. Bu sonuçlardan ilki, 90 ile 157.5 derece arasındaki kalıplarda saf Alüminyumla yapılan deneyleri, ikinci sonuç ise 90 veya 120 derecelik kanal açılına sahip iki kalıpla preslenmiş bakırla yapılan deneyleri göstermektedir (Nakashima vd., 1997).

Deneyler 90, 112.5, 135 ve 157.5 derecelere sahip dört ayrı kalıpta yapılmıştır ve bu dört kalıp Şekil 7.4’de sistematik olarak gösterilmiştir ve ayrıca köşe açısı olan Ψ değeri de gösterilmiştir (Nakashima vd., 1997).

Saf Alüminyum biletler bu kalıplara oda sıcaklığında B_C yönünde her numune art arda yapılan preslemelerde 90 derece döndürülerek preslenmiştir (Nakashima vd., 1997).

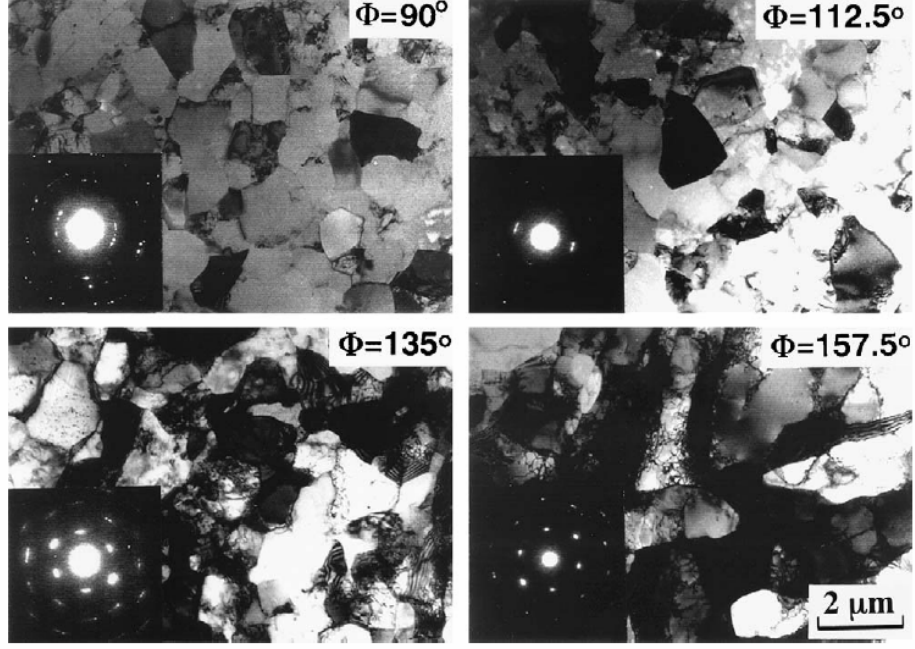


Şekil 7.3 45 ile 180 derece arasındaki kanal açılarıyla (Φ) eşdeğer gerinim ε 'in karşılaştırması: köşe açısı Ψ ; 0 ile 90 derece arasında ve $N = 1$ tek seferlik preslemeyi göstermektedir (Nakashima vd., 1997).

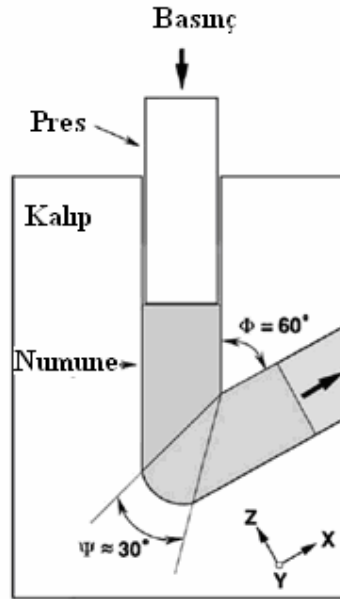


Şekil 7.4 Φ kanal açısının etkisini ölçmek amacıyla kullanılan kalıpların sistematik gösterimi: Φ değerleri a) 90° , b) 112.5° , c) 135° and d) 157.5° (Nakashima vd., 1997).

Çeşitli kanal açılarının birbirleriyle karşılaştırmasını yapabilmek amacıyla preslemeler, her numunede toplam gerinim ~ 4 olacak şekilde yapılmıştır. Numuneler 90° , 112.5° , 135° ve 157.5° derecelerde açılara sahip kalıplarda sırasıyla 4.22, 4.27, 4.21 ve 4.33 toplam gerinim değerlerinde 4, 6, 9 ve 19 defa preslenmiştir. Numuneler seçilmiş bölge elektron difraksiyon (SAED) paterni ile incelenmiş olup $12.3 \mu\text{m}$ 'lik çaptaki bir alanda elde edilen mikroyapılar Şekil 7.5'de görülmektedir (Nakashima vd., 1997).



Şekil 7.5 Şekil 7.4’de görülen kalıplarda her numuneye ~ 4 gerinim değerindeki preslemede SAED patterni ile elde edilen mikroyapılar (Nakashima vd., 1997).



Şekil 7.6 $\Phi = 60^\circ$ kanal açısına sahip bir ECAP kalıbının sistematik gösterimi (Nakashima vd., 1997).

90 derecelik kanal açılına sahip ECAP kalıpları verimli olmasına rağmen, 90 dereceden daha büyük açılara sahip kalıplar kullanılarak biletlerin preslenmesi deneysel açıdan daha kolay olduğu bilinmesi gereken önemli bir gerçektir. Bazı sert malzemeler veya düşük uzama değerine sahip malzemeler için bu önemli bir noktadır. Örneğin, ticari safiyetteki tungstenin 1000°C sıcaklıkta 90 derecelik kanal açılına sahip kalıplarda, malzemede çatlama olmasından dolayı preslenmeyeceği yapılan deneylerde görülmüştür. Fakat aynı presleme sıcaklığında kanal açısı 110 dereceye yükseltilerek yapıldığında mükemmel sonuçlar elde edilmiştir. ECAP prosesinde uygulanan gerinin artması ile kanal açısının düşmesi, 90 dereceden düşük açılı kanalların preslenmesinde performansı daha avantajlı olabilir. Şekil 7.6' da görüldüğü gibi saf Al ve Al-Mg-Sc alaşımı 60 derecelik kanal açılına sahip kalıplarda preslenmiştir. Yapılan bu deneyin sonuçlarından, $\Phi = 60$ derecelik kalıp kullanılarak mükemmel mikroyapılar elde etmenin mümkün olduğu görülmüş ve ortalama tane boyutu, $\Phi = 90$ derecelik kalıpla elde edilen tane boyutuna benzemektedir. 60 ve 90 derecelik açılara sahip kalıplarla elde edilen tane boyutları sırasıyla saf alüminyum için 1.1 μm ve 1.2 μm , Al-Mg-Sc alaşımı için 0.30 μm ve 0.36 μm olarak bulunmuştur. 90 dereceden küçük kalıpların kullanılması avantajlı görünse bile malzemenin çatlama olmadan preslenebilmesi için yüksek bir basınç gereklidir (Nakashima vd., 1997).

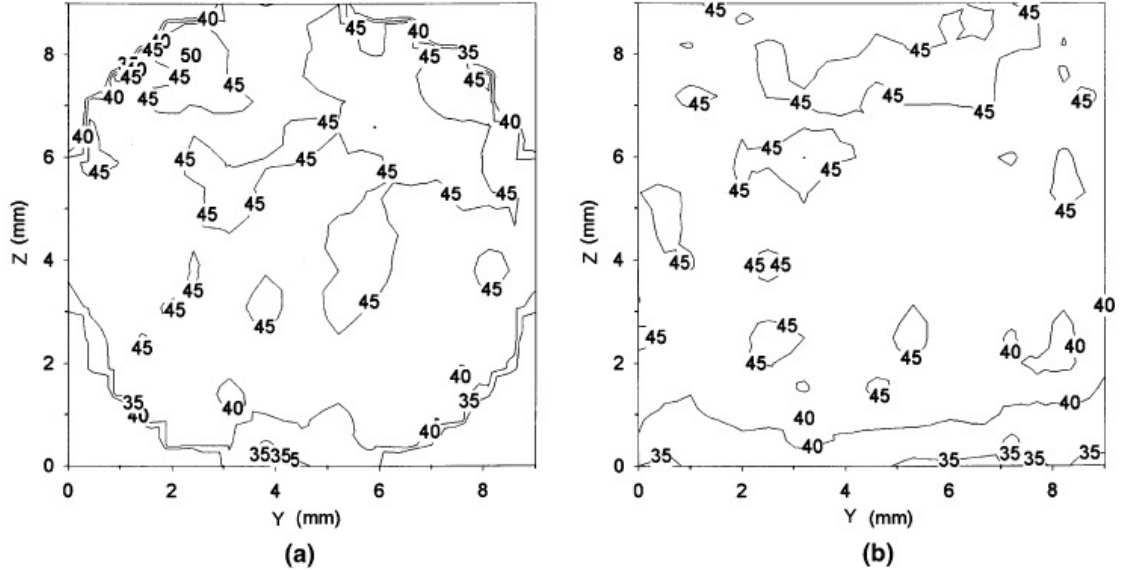
7.3 Eğim açısı Ψ 'nin etkisi

Eğim açısı, Ψ , kalıp içinde kesişen iki kanalın oluşturduğu dış yayı belirtmektedir. Bu açı numuneye uygulanan gerinin belirlenmesinde ufak bir rol oynar. Bunla birlikte çok ince taneli malzeme üretiminde bu açının önemli etkisinin olduğu incelenmiştir (Cheng ve Terence, 2007).

ECAP işleminde meydana gelen deformasyonlar, sonlu element modeli kullanılarak analiz edilmeye çalışılmış ve bu analizlerin çoğunda eğim açısı Ψ 'nin önemli etkisinin olduğu gözlenmiştir. Geleneksel iki parçalı kalıplarda $\Psi = 0$ olacak şekilde kalaylıkla uygulanabildiğinden ve bütün katı kalıplar $\Psi > 0$ açısını ister istemez içermesi gerektiğinden bu açının rolü büyüktür. Bu farklılığın önemi saf Alüminyum malzeme kullanılarak incelenmiş ve bu incelemede 10x10 mm boyutlarında kare kesit alanına sahip, $\Phi = 90^\circ$, $\Psi = 0^\circ$ olacak şekilde ve 10 mm çaplı yuvarlak kesit alanına sahip $\Phi = 90^\circ$, $\Psi = 20^\circ$ açılına sahip iki farklı kalıp hazırlanmıştır (Cheng ve Terence, 2007).

Numuneler oda sıcaklığında toplam 4 pasoluk presleme işlemine tabi tutulmuş, sırasıyla ~ 4.6 ve ~ 4.2 gerinim değerleri uygulanmış ve numunelerden ~ 0.5 mm aralıklarla boylamasına

kesitten Vickers mikro sertlik ölçümleri alınmıştır. Ölçüm sonuçlarında bu iki kalıbın birbiriyle büyük benzerlik gösterdiği görülmüştür. Bununla ilgili ölçüm haritası Şekil 7.7' de verilmiştir. İki numuneden ortalama sertlik değeri sırasıyla ~ 42.1 ve ~ 43.2 mikro HV elde edilmiştir. Şekil 7.7 dikkatlice incelendiğinde her iki numunede de benzer olarak malzeme yüzeylerine yakın bölgelerde çok az bölgesel homojensizliğe rastlanmıştır (Cheng ve Terence, 2007).



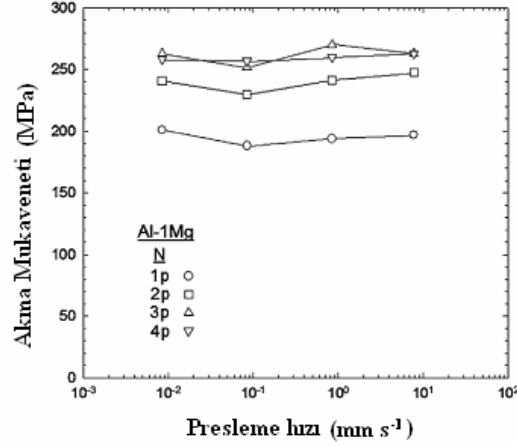
Şekil 7.7 $\Phi = 90$ derecelik ECAP kalıbı ile Bc yönü kullanılarak preslenmiş saf Al numuneden X düzlemi doğrultusunda alınan sertlik haritası: a) $\Psi = 20^\circ$, b) $\Psi = 0^\circ$ (Cheng ve Terence, 2007).

Buna karşın, bu sonuçlar, sonlu element analiz yöntemiyle elde edilen, değişik köşe açlarına sahip kalıplar kullanıldığında köşe açısı arttığında malzemede oluşan homojensizliğin de arttığı konusundaki görüşlerini desteklememektedir. Çünkü deneylerde $\Psi = 20^\circ$ ve $\Psi = 0^\circ$ köşe açlarına sahip kalıplarla yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar çok büyük oranda bir birinin aynısıdır (Cheng ve Terence, 2007).

7.4 Presleme hızının etkisi

ECAP prosesi genellikle yüksek basma hızlarına sahip yüksek kapasiteli presler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Genellikle presleme hızları $\sim 1-20 \text{ mm s}^{-1}$ değerindedir. Geleneksel mekanik test makineleriyle kullanılacak kalıpların uygunluklarına bakılmalı ve bu da presleme hızlarından daha büyük oranlarda uzayıp uzamayacağını belirleyecektir. İlk olarak 10^{-2} ile 10 mm s^{-1} arasındaki basma hızlarının saf alüminyum ve Al-%1Mg alaşımına etkisi incelenmiştir. Bu sonuçlarla presleme hızının, ECAP yöntemiyle elde edilen çok ince ve eş

tanelere önemli bir etkisinin olmadığı ispat edilmiş fakat daha düşük hızlardaki presleme işlemi daha kolay olduğu için bu presleme hızında daha düzgün dağılımlı mikroyapı elde edilmiştir (Ruslan ve Trence, 2006b).



Şekil 7.8 ECAP işleminde 1, 2, 3 ve 4 paso uygulanan Al-%1Mg alaşımının presleme hızlarıyla akma mukavemeti arasındaki ilişki: oda sıcaklığında $1.0 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ gerinim oranları kullanılmıştır (Ruslan ve Trence, 2006b).

Al-%1Mg alaşımı için presleme hızının hiçbir önemli etkisinin olmadığı, Bc yönü kullanılarak 1'den 4'e kadar numaralandırılmış presleme işlemlerindeki hızlarla, $1.0 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ gerinim oranları kullanılarak oda sıcaklığında yapılan çekme testi ile elde edilen akma dayanımının karşılaştırılması çizilerek Şekil 7.8'de gösterilmiştir. Bu sonuçlar kalıba uygulanan presleme sayısının artmasıyla dayanımın arttığını ve dayanımdaki artışın yaklaşık $N \approx 4$ preslemeden sonra durduğunu ve presleme hızının dayanımın artışına etkisinin olmadığı görülmüştür (Ruslan ve Trence, 2006b).

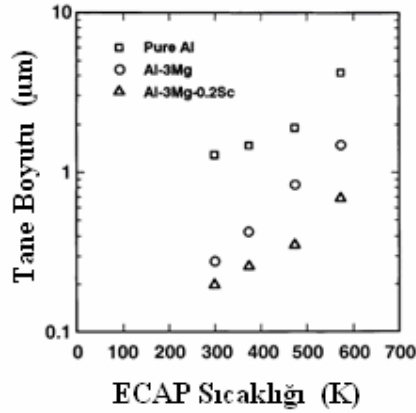
7.5 Presleme sıcaklığının etkisi

Presleme sıcaklığı kullanılan herhangi bir ECAP prosesinde en önemli faktördür, çünkü diğer faktörlere göre daha kolay kontrol edilebilir. Al, Al-%3Mg ve Al-%3Mg-%0.2Sc alaşımındaki numuneler, sıcaklığın etkisini belirlemek için oda sıcaklığından 300°C sıcaklığa kadar preslenmiştir. Presleme işleminde kullanılan iki numuneden ilki ısıtılmış, kalıba yerleştirilip 10 dakika bekletildikten sonra preslenmiştir, ikinci numune aynı fırında aynı sıcaklıkta kalıba yerleştirilip basılmıştır (Ruslan ve Terence, 2006b).

Bu deneylerin sonucunda iki önemli noktaya ulaşılmıştır. Birincisi, Şekil 7.9' da görüldüğü gibi sıcaklık artışıyla birlikte denge tane boyutu büyümüştür. İkincisi, SAED paterni ile

yapılan incelemede, artan sıcaklıkla birlikte tanelerin kırılarak tane sınırlarının arttığı, daha yüksek sıcaklıklara daha hızlı ulaşmanın taneler arasındaki boşlukların azalmasına yol açtığı ve sonuçta dislokasyonun alttane(subgrain) duvarlarında absorbe olarak azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Bu malzemeye bağlı önemli bir nokta olsa bile saf alüminyum 200 °C, Al-%3Mg alaşımı 300 °C sıcaklığında preslendiğinde yüksek oranda düşük açılı tane sınırları meydana gelmiştir (Ruslan ve Terence, 2006b).

Saf Titanyumun preslenmesi işleminde, presleme sıcaklığı 300 °C'den 350 °C' ye çıkarıldığında paralel kayma bandı oluşumundan ikizlenme bantları deformasyonu oluşumuna kadar deformasyon mekanizmasında değişik olaylar olmuştur. Bu elde edilen sonuçlar, numunelerin yüksek sıcaklıkta daha kolay preslenmesine rağmen, optimum çok ince taneli mikroyapı, presleme işlemi, malzeme preslenme işlemi esnasına hiçbir önemli çatlamanın oluşturmayacağı olabildiğince düşük sıcaklıkta yağıldığında elde edileceğini ispatlamıştır. Olabildiğince dengeli küçük tane ve en yüksek oranda yüksek açılı tane sınırlarının oluşabilmesi düşük presleme sıcaklığında elde edilebilmektedir (Ruslan ve Terence, 2006b).

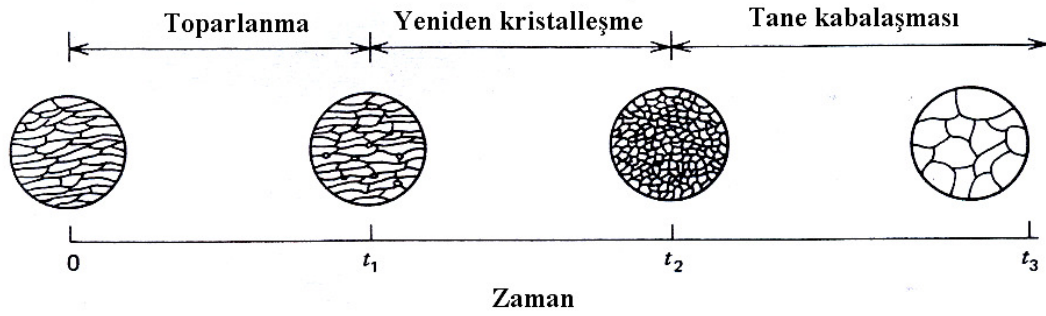


Şekil 7.9 Saf Al ve Al-%3Mg ve Al-%3mg-%0.2Sc alaşımları için çeşitli presleme sıcaklığında uygulanan ECAP işleminden sonra tane boyutu (Ruslan ve Terence, 2006a).

8. TAVLAMA VE SÜPERPLASTİSİTE

Tavlama, malzemeleri yüksek sıcaklığa ısıtma ve bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Tavlamanın amacı malzemelerde oluşan soğuk deformasyon etkilerini ortadan kaldırmak ise bu işlem yeniden kristalleşme olarak ta adlandırılmaktadır. (Çiğdem, 2006).

Metaller plastik olarak deformasyona uğratıldığında Şekil 8.1' de görüldüğü gibi tanelerde uzamalar meydana gelmektedir. Bu malzeme, metalin ergime sıcaklığının yaklaşık yarısına yakın bir sıcaklığa ısıtılıp ve bu sıcaklıkta tutulduğunda peş peşe olan birçok olayın varlığı gözlemlenmiştir. Malzeme sıcak-optik mikroskopta incelendiğinde, soğuk şekillenmiş tanelerden oluşan matriste toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane kabalaşması olaylarının varlığı gözlemlenmektedir (Şekil 8.1) (John, 1975).



Şekil 8.1 Toparlanma-yeniden kristalleşme-tane kabalaşması olaylarının sistematik görünüşü (John, 1975).

Malzemelere uygulanan tavlama işlemlerini amaçlarına göre iki başlıkta incelemek mümkündür. Bunlar geleneksel haddeleme işlemlerinden sonra uygulanan ve tanelerin yeniden kristalleşmesi amacıyla yapılan statik tavlama ve dinamik tavlama dediğimiz statik tavlama göre daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşen ve amaç olaraksa çok küçük tane boyutuna sahip malzemelerde tanelerin yeniden kristalleşmesinden çok işlemler esnasında absoblanan enerjinin giderilmesiyle mekanik dayanımı düşürmeden yüksek uzama değerlerinin elde edildiği tavlama (Kassner, 2008).

8.1 Statik tavlama

Statik tavlama geleneksel haddeleme işlemlerinden sonra uzamış tanelerin yeniden kristalleşmesi amacıyla ya nihai olarak ya da bir sonraki aşamaya geçebilmek için ara kademe olarak uygulanmaktadır. Tavlama işlemi esnasında yumuşatma birkaç adımda meydana gelir ve bunlar Şekil 8.1' de görüldüğü gibi toparlanma ve yeniden kristalleşme olarak adlandırılmaktadır (Çiğdem, 2006).

8.1.1 Toparlanma

0.5 Tm sıcaklıklarda yüksek ısı enerjiden dolayı atomlar boş noktalara kolaylıkla hareket edebilirler ve bu nedenle kolaylıkla yer değiştirebilirler. Sonuçta malzemenin mukavemeti düşer. Bu sıcaklık değerlerine erişmeden önce, 0.3 ile 0.5 Tm sıcaklıkları arasında artan atomik hareketlilik dislokasyonlarının dizilerek alt tane sınırlarını ve zamanın tanınması halinde kendine gelme olarak nitelendirilen bu proses malzemelerde deformasyonla meydana gelen aşırı serleşmenin bir kısmını ortadan kaldırarak yumuşama sağlanmaktadır. Ancak bu esnada meydana gelen olaylar yönlenmiş tane yapısında gözlenebilir bir değişim olmamaktadır. Toparlanma olarak adlandırılan bu işlem yüksek mukavemetli fakat kabul edilebilir süneklikte malzeme üretimi için kullanılmaktadır (Çiğdem, 2006).

8.1.2 Yeniden kristalleşme

0.5 Tm üzerindeki sıcaklıklarda atomlar hareket ederek nisbeten dislokasyonlardan arındırılmış (düşük dislokasyon yoğunluklu) çekirdekleri oluştururlar ve bunlar büyüyerek yüksek açılı tane sınırlarını meydana getirirler. Daha sonra yüksek açılı tane sınırı göçü ile çekirdekler büyüyerek deformasyonlu bölgeyi tamamen süpürürler. Değişik noktalarda oluşan çekirdekler yüksek açılı tane sınırları meydana getirirler ve tane özelliğini kazanırlar. Tane sınırları birbirine değene kadar göç devam eder. Tanelerin birbiriyle temaslarının tamamlandığı anda primer yeniden kristalleşme tamamlanır. Bu aşamadan sonra malzemeye enerji vermeye devam edilirse tane kabalaşması hatta iknci ve üçüncü yeniden kristalleşme olayları meydana gelir. Difüzyon sıcaklığa ve zamana bağlı bir olaydır (Çiğdem, 2006).

Soğuk deformasyon esnasında bünyede oluşan yüksek dislokasyon yoğunluğu yeniden kristalleşme için gerekli olan itici gücü oluşturmaktadır. Metallerin soğuk deformasyonu esnasında harcanan enerjinin %1 ile 10'luk bir kısmı yapıda soğuk deformasyon enerjisi olarak depolanır. Daha sonra bu enerji ısı aktivasyonun sağlanması halinde kendine gelme ve yeniden kristalleşme ile salıverilir. Deformasyon oranındaki artışla birlikte depolanan enerji

miktarı da artar. Artan soğuk deformasyon oranıyla birlikte yeniden kristalleşme sıcaklığında düşer. $0.5- 0.6 T_m$ olarak verilen yeniden kristalleşme sıcaklığı ergime sıcaklığı gibi sabit değildir, proses (tavlama öncesi soğuk deformasyon oranı, tavlama sıcaklığı ve zamanı) ve malzeme (soğuk deformasyon öncesi tane boyutu, malzemedeki alaşım elementi miktarı, bu elementlerin dağılım oranları ve ikinci fazların dağılım parametreleri; matriste çözünen alaşım elementi miktarı, matriste koherent ve inkoherent olarak çökelmiş partiküllerin tipi, boyutları, şekilleri ve hacim oranları) özellikleri tarafından belirlenmektedir (Çiğdem, 2006).

8.2 Dinamik tavlama

1940–1948 yıllarında yapılan çalışmalarda, sıcak şekillendirme işleminde bilinmeyen bir sebepten yeniden kristalleşmeyle tanelerin incelendiği ve bilinmeyen bir mekanizmayla gerinin sertleşmesinin azaldığı gözlemlenmiştir. 1965 yıllarında dinamik tavlamanın varlığı doğrulanmış ve yaklaşık 25 yıl öncede statik tavlamaya benzediği ve birbirlerinden farklı olduğu açıklanmıştır (McQueen, 2004).

Dinamik tavlama işlemi ilk olarak toprak metallere denenmiştir. Tavlama işlemi metal ve kaya şeklindeki mineraller gibi metal olmayan malzemeler için temelde aynı olmasına rağmen, yeniden kristalleşme mekanizmaları ve mikroyapısal özellikler, malzemeler arasındaki farklılıklar ve deformasyon şartları detaylı olarak araştırılmıştır. Dinamik tavlama işlemi temelde, toparlanma prosesi oldukça yavaş olan Cu, Ni ve γ -Fe gibi kübik yüzey merkezli malzemeler için amaçlanmıştır (Shimizu, 2008).

Günümüzde yapılan ECAP işlemlerinde, dinamik tavlamanın yapıya önemli etkilerinin olduğu açıklanmaktadır. Plastik deformasyon esnasında biriken enerjinin yeniden kristalleşme sıcaklığını düşürdüğü için dinamik tavlama, statik tavlamaya oranla daha düşük sıcaklıklarda yapılmaktadır (Beyerlein and Laszlo, 2009).

Dinamik tavlama işlemlerinde de statik tavlama gibi iki olay meydana gelmektedir. Bunlar: 1) çekirdeklenme ve yeni tane tanelerin büyümesi ve 2) düşük açılı alt tanelerin sürekli büyümesiyle büyük açılı tanelere dönüşmesi olarak sıralanır. Birinci olay genellikle süresiz dinamik yeniden kristalleşme ve ikinci olay ise sürekli dinamik kristalleşme olarak adlandırılmaktadır (Beyerlein and Laszlo, 2009).

Dinamik tavlama işlemleri, mikron boyutta veya mikron altı boyutta tanelere sahip malzemelerin tane boyutunu büyültmeden tavlayarak yüksek uzama değerleri elde etme amacıyla yapılmaktadır. Bu özelliklerin sağlanması ve tane kabalaşması olayının oluşmamasına, tavlama işlemlerinin yapıldığı sıcaklık ve süreleri etki etmektedir. Dinamik

tavlama işlemlerini, deformasyon öncesi uygulanan statik tavlama şartları önemli ölçüde etkilememektedir (Mao, 2004). Dinamik tavlama işlemlerinde kullanılan malzemenin saflığının artması yeniden kristalleşme sıcaklığının olduğundan daha düşük olmasını sağlamaktadır (Skrotzki vd., 2007).

Dinamik tavlama işlemlerinin etkisini araştırmak amacıyla geçmiş yıllarda çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla malzemeler ECAP işlemi öncesi iki farklı şekilde statik tavlama tabii tutularak proses edilmişlerdir. Bu tavlama a) aşırı tavlama; malzemeler 190 °C sıcaklıktaki yağ banyosunda 16 saat boyunca, b) yüksek tavlama; malzemeler 290 °C sıcaklıktaki yağ banyosunda 1 saat boyunca yapılmıştır. Tavlama sonrası ECAP işlemi uygulanan malzemeler mikron altı tane boyutuna ulaştıktan sonra diğer bir tavlama çeşidi olan ve ECAP işleminden sonra uygulanan dinamik tavlamanın etkisini belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Deneylerde yüksek tavlama ve aşırı tavlama uygulanan numuneler 1 saat boyunca 100, 200 ve 300 °C'de dinamik tavlama işlemi görmüşlerdir. Statik tavlama uygulanan malzemelerden aşırı tavlama işlemi gören numunelere 4 paso ve yüksek tavlama gören malzemelere ise 8 paso uygulanarak statik tavlamanın etkisi araştırılmıştır. 100 ve 200 °C sıcaklıklarda malzemelerin tane boyutunda herhangi bir büyüme olmamıştır. 300 °C'de tavlama malzemelerinde taneler bir miktar büyüme olmuş fakat tanelerin boyutu 1 µm seviyesinin altında kalmıştır. Bu deneylerde aşırı ve yüksek tavlama numunelerinde tane kabalaşması benzer şekilde olmuştur. Tavlama sıcaklığı arttığında tanelerdeki dislokasyon yoğunluğu azaldığı için taneler daha net bulunmaktadır (Mao, 2004).

Sonuç olarak dinamik tavlama işlemlerini uygulanan sıcaklık etkilemektedir. Bu sıcaklıklar sabit bir değer olmamakla birlikte malzemenin malzemeye değişmektedir. Plastik deformasyon öncesi statik tavlama şartları ve süreleri uygulanan plastik deformasyondan sonra elde edilen tane boyutunun değişimine etkilerinde farklılık olmamaktadır. Buna karşın statik tavlama seçilen sıcaklık veya tutma sürelerinden dolayı elde edilen tane boyutundan dolayı mikron altı seviyede tane boyutu elde etmek için uygulanan deformasyon ya da ECAP işlemlerinde paso sayısı doğal olarak artmaktadır (Mao, 2004).

8.3 Süperplastisite

Süperplastisite, çok kristalli malzemelerin çekme işlemi esnasında kopmaksızın yüksek uzama değerlerine ulaşabilme özelliği olarak adlandırılır. Çok kristalli malzemelerin süperplastik uzama özelliğine sahip olabilmesi için temel iki unsurun bulunması zorunludur. Bunlardan ilki, malzemenin tane boyutu küçük ve kararlı olmalı, özellikle tane boyutu 10µm'den küçük, ikincisi ise, difüzyonun hızlı olduğu artan sıcaklıklarda meydana gelen difüzyon kontrol prosesi olmalıdır. Artan sıcaklıklarda tane kabalaşması oluştuğu için pratikte bu iki durum birbirine zıttır. Bundan dolayı süperplastik akış yalnızca tane büyümesinin yapıda bulunan iki faz tarafında engellenen malzemelerde oluşabilir (Figueiredo vd., 2008).

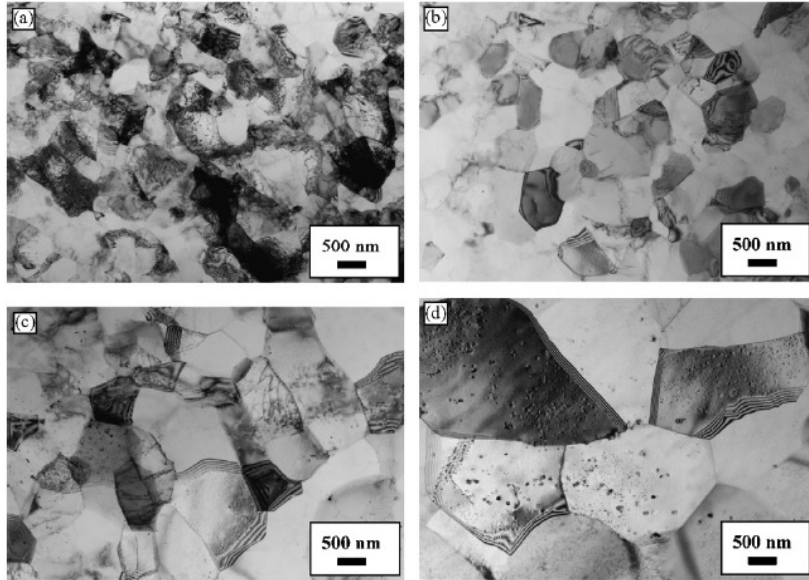
Aşırı plastik deformasyon (SPD) yöntemleriyle üretilen nano yapılı malzemeler plastik olarak geleneksel süper plastik alaşımlara göre daha düşük sıcaklıklarda ve daha hızlı oranlarda şekillendirmek mümkündür. Süper plastik şekillendirme endüstrisinde eğimli yüzeye sahip kompleks bileşenlerin şekillendirilmesi, bu tip akışların karakteristik bir özelliğidir. Bir malzemenin süper plastik şekil alabilmesi için özellikle ~ 10 µm' den daha küçük tane boyutu ve malzemenin ergime sıcaklığı olan T_m 'in 0.5 katının üzerindeki yüksek şekillendirme sıcaklığına sahip olmalıdır. Günümüzde, süper plastik şekillendirme endüstrisi, hava sahası, mimari ve spor endüstrisi gibi küçük fakat yüksek maliyetli iş alanına sahiptir. Nano yapıya sahip büyük malzemelerin üretimiyle geleneksel kaba taneli süper plastik malzemelerin kullanım alanı kısıtlanmıştır. Tane boyutunun düşürülmesiyle süper plastik şekillendirme yeteneği artmış ve şekillendirme sıcaklığında düşmüştür. Nano yapılı büyük malzemelerden çok ince taneli ve artan sıcaklıklarda kararlı levhaların üretimiyle süper plastik şekillendirmenin ticari uygulama alanı potansiyeli artmıştır (Zhu vd., 2004).

Süperplastisite, yapısal süperplastisite ve faz transferiye ilgili olan süperplastisite diye iki çeşide ayrılır. Yapısal süperplastisite, ≤ 10 µm eş dağılımla tane yapısına sahip çeşitli metal ve alaşımlarının 0.4-0.6 T_m spesifik deformasyon sıcaklıklarında ve (10^{-4} - 10^{-3} s⁻¹) düşük deformasyon oranlarında incelenebilir. SPD metoduyla düşük sıcaklık ve yüksek deformasyon şartlarında elde edilen süperplastik özellik, yüksek süperplastisite karakteristiğine sahiptir. Yalnızca metal ve alaşımlarının mikroyapı karakteristiği değil, ayrıca tanelerin sahip olduğu açılar, dislokasyon yoğunluğu, kristolografik yapı ve proses modeli ve yönüne bağlı olan ikincil fazların bileşiminde bağlı olarak tercih edilir (Ruslan vd., 2006). İkincil partiküle sahip malzemelerde partikül boyutu baskın bir etki yapmaktadır. Partikül

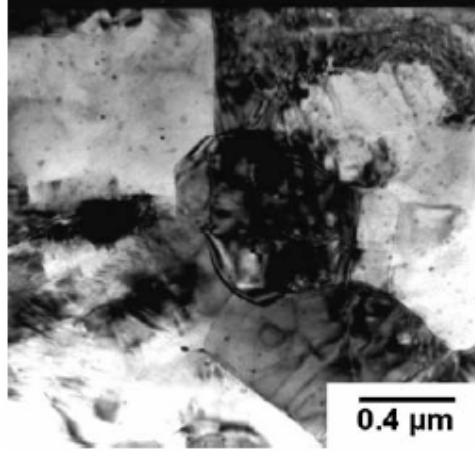
boyutu 7 μm 'den büyük olduğunda malzemeler çok ince tane boyutuna sahip olsalar bile optimum yüksek gerinim oranına sahip süperplastiklik özelliğinin kazanılması zordur. İkincil fazların dağıtılmasıyla süperplastiklik özelliklerinde önemli artış sağlanmaktadır. Bu sayede yüksek uzama değerlerine ulaşmak mümkündür (Jing-hua vd., 2007).

Alüminyum alaşımları, yavaş optimum gerinim oranlarından dolayı süperplastik uygulamalarında sınırlı kalmıştır. Süperplastik özelliğinin olması için kullanılan malzemelerin $\geq 10^{-2}\text{s}^{-1}$ optimum plastik gerinim oranına sahip olmalıdır (Liu and Ma, 2008). Alüminyum ve alaşımlarına, ECAP yöntemi kullanılarak süperplastik özellik kazandırılmıştır. 100 nm'nin altında tane boyutuna sahip nano malzemeler, çekem işleminde yüksek uzama kapasitesi gibi mükemmel süperplastik davranış sergilerler (Ruslan vd., 2006).

Geçmiş yıllarda alüminyum (Turba vd., 2007) ve magnezyum (Lapovak vd., 2008) gibi metallerin süper plastiklik özelliklerini belirlemek için bir çok deney yapılmıştır. Bu deneylerin bazılarında; Al-Mg-Zr-Sc alaşımına sahip alüminyum malzeme ECAP işlemine tabi tutulduktan sonra 300, 400, 450, 500 ve 525 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıklarda çekme işlemlerine tabi tutulmuşlardır (Turba vd., 2007).

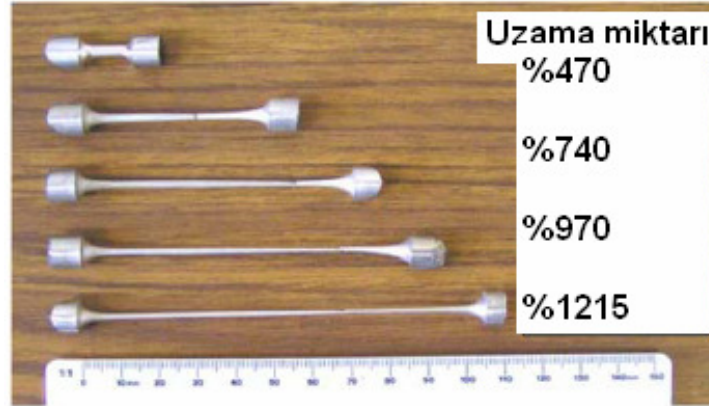


Şekil 8.2 TEM mikroyapı görüntüleri: a) başlangıç numune (ECAP işleminden sonra), b) 1 saat 300 $^{\circ}\text{C}$ ' de tavllanmış, c) 1 saat 450 $^{\circ}\text{C}$ ' de tavllanmış ve d) 1 saat 525 $^{\circ}\text{C}$ ' de tavllanmış (Turba vd., 2007).



Şekil 8.4 6 Paso sonrası magnezyumun 350 °C' de tavllanmış mikroyapı görüntüsü (Lapovak vd., 2008).

Yukarıdaki mikroyapıya sahip olan malzemeye yapılan çekme işlemi sonunda aşağıda Şekil 8.5'de görüldüğü gibi malzemede maksimum % 1215 uzama kaydedilmiştir (Lapovak vd., 2008).



Şekil 8.5 350 °C' de yapılan çekme işlemi sonrası numune görüntüsü (Lapovak vd., 2008).

9. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar uygun malzemenin belirlenmesiyle başlamış, deney düzeneğinin oluşturulması ve kullanılacak cihazların sınıflandırılması ile devam etmiştir. Prosese etki eden faktörler belirlenmiş ve bunların optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Uygun deney şartları belirlendikten sonra paso sayısı artırılarak deneyler ilerletilmiş ve sonuçlar optik ve mekanik testlerle desteklenmiştir.

9.1 Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmalarda ticari saflıkta ve 6063 alaşımına sahip alüminyum tel ve sürtünmeyi engellemek için yağlayıcılar kullanılmıştır.

9.1.1 Alüminyum Teller

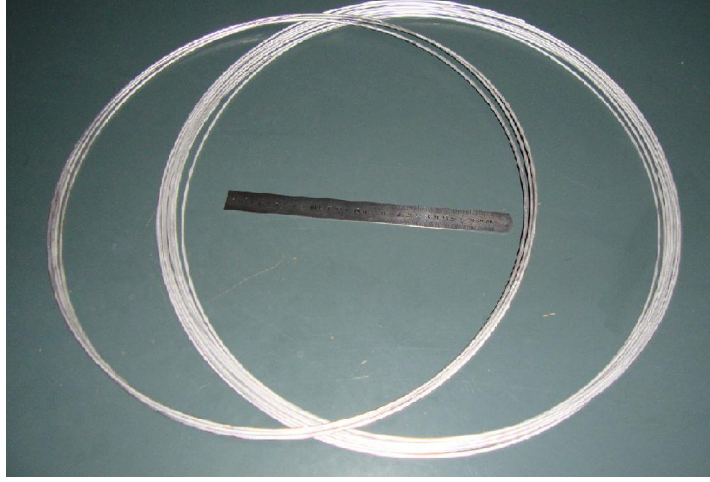
Deneysel kimyasal bileşimi çizelge 9.1’ de verilen, ticari kalitede alüminyum Etial F1 alaşımına ait ve çizelge 9.2’de verilen alüminyum 6063 alaşımına ait teller kullanılmıştır. Kimyasal bileşim tayini için Şekil 9.2’de görülen HILGER Analytical optik emisyon spektrometresi kullanılmıştır. Bu tellerin çapları 4mm olup deney esnasında malzemelerin boyları konusunda herhangi bir kısıtlama olmamaktadır. Malzemelere ait resimler Şekil 9.1’ de görülmektedir.

Çizelge 9.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan ticari saflıkta Alüminyum Etial F1 alaşımının kimyasal bileşimi.

Si	Cu	Fe	Mn	Cr	Ni	Mg	Zn	Pb	Sn	Ti	Al
0.251	0.15	0.760	000	0.003	0.001	000	0.002	0.017	0.030	0.012	Geri kalan

Çizelge 9.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan Alüminyum 6063 alaşımının kimyasal bileşimi.

Si	Cu	Fe	Mn	Cr	Ni	Mg	Zn	Pb	Sn	Ti	Al
0.328	0.16	0.312	0.010	0.003	0.007	0.617	0.012	0.028	0.029	0.01	Geri kalan



Şekil 9.1 Alüminyum Etial F1 ve 6063 alaşımlarına ait tel görüntüsü.



Şekil 9.2 Kimyasal analiz cihaz görüntüsü.

9.1.2 Kalıp Yağlayıcısı

Deneylerde kullanılan kalıpların metalik malzemeden yapılmış olmasından ve deney malzemesi olarak yine başka bir metal olan alüminyum tel kullanımından dolayı, deneyin işleyişi esnasında iki metal arasında kaçınılmaz olarak sürtünme oluşmaktadır. Oluşan bu sürtünme kuvveti prosesin işleyişi için gerekli sürtünme kuvvetinden çok büyük olduğundan gerek malzeme yüzeyinin bozulması, gerek proste süreksizlik unsurunun oluşması ve gerekse prosesin daha kolay ve verimli işlemesi için kalıp yağlayıcıları kullanılmıştır. Katı ve sıvı diye sınıflandıracağımız bu yağlayıcılar iki adet olup bunlardan ilki toz grafit ve ikincisi

ise Teknik Alüminyum A.Ş 'den tedarik edilen kimyasal bileşimi firma bünyesinde gizli olan özel alüminyum hadde yağlayıcısı kullanılmıştır. Bu yağlayıcılarla ilgili görüntüler Şekil 9.3' de toz grafit ve Şekil 9.4'de de özel alüminyum hadde yağlayıcısı görülmektedir.



Şekil 9.3 Toz grafit görüntüsü.



Şekil 9.4 Özel alüminyum hadde yağı resmi.

9.2 Kullanılan cihazlar

Deneylerin yapımı aşamasından sonra metalografik incelemeler ve mekanik testler aşamasına geçilmiştir. Bu aşamalarda sırasıyla tavlama fırını, numune hazırlama cihazı, ışık metal mikroskobu, elektrolitik parlatma cihazı, tarama elektron mikroskobu, geçirimli elektron mikroskobu, sertlik ölçüm cihazı ve son olarak ta çekme cihazı gibi teçhizatlar kullanılmıştır.

9.2.1 Tavlama fırını

Deneyleerde kullanılan malzemelerin iç gerilimlerini gidermek, malzemedeki yönlenmiş taneleri yeniden kristalleşme işlemine tabi tutmak ve sertlik değerini düşürmek amacıyla deney öncesinde, aşağıda Şekil 9.5' de görülen 1000 °C'ye kadar kullanılan PROTHERM markalı elektrik dirençli tav fırını kullanılmıştır.



Şekil 9.5 Tav fırını görüntüsü.

9.2.2 Numune hazırlama cihazları

Metalografik olarak incelenecek numuneler, elle tutulabilinecek kalınlıkta olmadığından dolayı plastik bakalite alınarak klasik metalografik hazırlama metodu uygulanmış ve bu işlemler Şekil 9.6' da görülen metalografik numune hazırlama cihazında yapılmıştır. METKON markalı bu cihaz iki hazneden oluşmakta ve birinci haznede zımparalama işlemleri ikinci haznede ise parlatma işlemleri yapılmaktadır.



Şekil 9.6 Zımparalama ve parlatma cihazı görüntüsü.

9.2.3 Işık metal mikroskobu

Zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulan numuneler mikro yapılarının incelenmesi amacıyla HF ile dağlandıktan sonra Şekil 9.7’ de görülen LEICA DFC 280 görüntü analiz mikroskobu kullanılarak mikro yapı incelemeleri yapılmıştır.



Şekil 9.7 LEICA DFC 280 Işık metal mikroskobu cihazı görüntüsü.

9.2.4 Elektrolitik dağlama cihazı

Yapılan deneylerin ilerleyen aşamalarında plastik deformasyonun artması ve buna bağlı olarak tane boyutunun belirli bir değerin altına inmesinden dolayı geleneksel dağlama metotlarına nispeten daha kolay ve verimli bir dağlama geręekleřtirmek amacıyla Şekil 9.8’ de görülen Struers Tenupol5 Twin Jet Electropolisher markalı elektrolitik parlatma ve dağlama cihazı kullanılarak dağlama işlemi geręekleřtirilmiřtir.



Şekil 9.8 Elektrolitik dağlama cihazı görüntüsü.

9.2.5 Tarama elektron mikroskobu(SEM)

Deneylerde kullanılan malzemelerin hem başlangıç hem de ilerleyen aşamalarda mikro yapı gelişimlerinin incelenmesi haricinde, malzemenin sahip olduğu fazların tayini, safsızlık elamanlarının malzeme bünyesinde nasıl dağıldığının belirlenmesi amacıyla Şekil 9.9’ da görülen JEOL- JSM - 6335 FEG model Taramalı Elektron Mikroskobu’nda 20 kV’ da incelemeler yapılmıştır. Bu aşamada da yine geleneksel zımparalama ve parlatma işlemleri sırasıyla uygulanmış ve akabinde de dağlama yapılarak incelemeler geręekleřtirilmiřtir.



Şekil 9.9 Tarama elektron mikroskobu cihazı görüntüsü.

9.2.6 Geçirimli elektron mikroskobu(TEM)

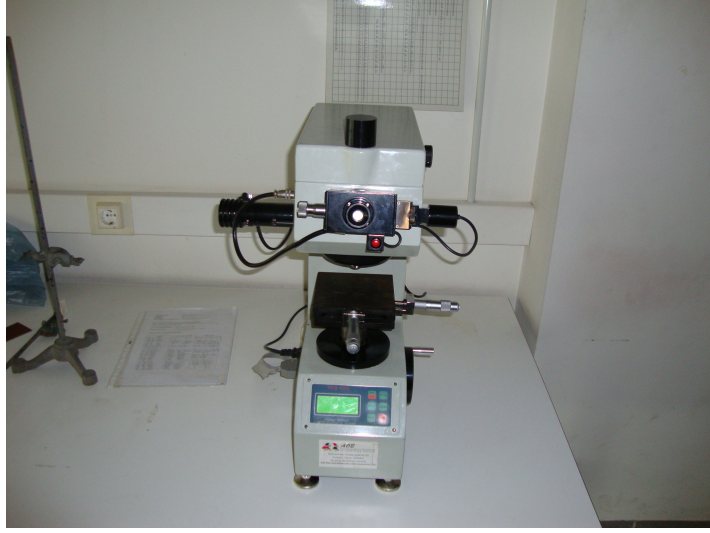
Deneylerin ilerleyen evrelerinde elde edilen numunelerde $5\mu\text{m}$ 'den daha küçük taneler oluşmuştur. Oluşan bu tanelerin ışık metal mikroskobuyla görülmesinin çok zor olmasından ve elde edilecek resimlerin görüntü kalitelerinin istenilen seviyeden daha düşük olacağından dolayı mikroyapı incelemeleri Şekil 9.10'da görülen JEOL 2100 LaB₆ HRTEM (Yüksek Çözünürlüklü Geçirim Elektron Mikroskobu) ile 100kV'da yapılmıştır.



Şekil 9.10 Yüksek Çözünürlüklü Geçirim Elektron Mikroskobu(TEM) cihazı görüntüsü.

9.2.7 Sertlik ölçüm cihazı

Deneilerin her bir aşamasında bir sonraki safhaya geçilmeden elde edilen numunelerden sertlik değerleri ölçülerek prosesin işleyişinde malzemenin sertliğine etkileri araştırılmış ve bu ölçümler Şekil 9.11'de görülen Bulut makine HVS -1000 markalı cihazı ile HV_{10} 'a göre yapılmıştır.



Şekil 9.11 Sertlik ölçüm cihazı görüntüsü.

9.2.8 Çekme cihazı

Deneylerde prosesin malzemenin mekanik özelliklerine etkisi araştırılırken sertlik ölçümlerinin yanında çekme testleri de yapılmış ve bu testler Şekil 9.12'de görülen DEVOTRANS markalı çekme cihazın gerçekleştirilmiştir.



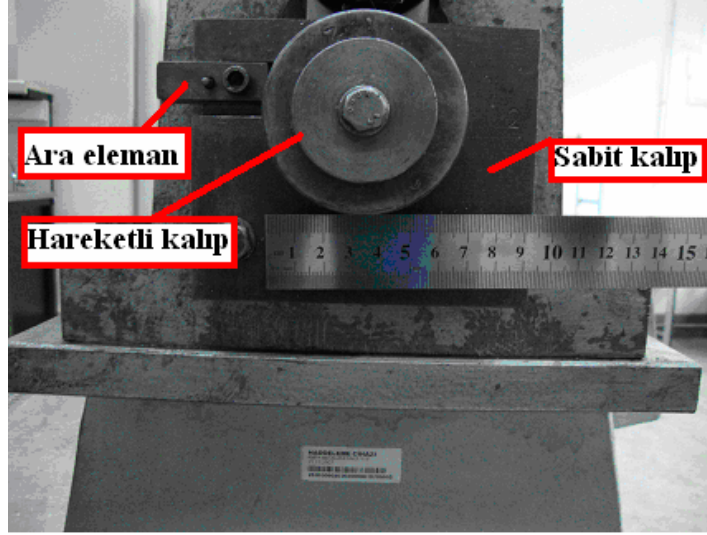
Şekil 9.12 Çekme cihazı görüntüsü

9.3 Kalıp tasarımı

Deneilerin ilk ve en önemli aşaması kalıp tasarımıdır. Kalıp tasarımı dikkatsiz ve prosese uygunluğu göz ardı edilerek yapıldığında deneye etki eden birçok parametrenin varlığı deneyin başarısızlığının saptanmasında geciktirici rol oynamaktadır. Bu nedenlerle prosese etki eden parametreler tam olarak saptanmış ve kalıp tasarımı da bu esaslar doğrultusunda gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar, süper (aşırı) plastik deformasyon çeşitlerinden biri olan eş kanallı açılmalı presleme dediğimiz ECAP prosesine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Kalıp tasarımı ECAP çeşitlerinden olan ECAP-Conform prosesine uygun olarak yapılmıştır. Kalıp tasarımı Şekil 9.13’de görüldüğü gibi hareketli ve sabit kalıp olmak üzere iki ana parçadan oluşacak şekilde yapılmıştır. Hareketli kalıp yaklaşık 70mm çapta olup, üzerine 3-4 mm ebatlarında dikdörtgen kanal açılmıştır. Bu kanallar, hareketli kalıp saat yönü doğrultusunda dönme hareketi yapmakta iken yuvarlak kesitli tel malzemesinin beslenmesi amacıyla açılmıştır. Hareketli kalıbın dışına geçirilen sabit kalıp, kanallara beslenen malzemenin kanal boşluğunda kalması amacıyla kullanılmaktadır. Bu sabit kalıbın malzeme kanal boşluğunda tutulmasının yanında, bir noktada ara bir parça ile kanal boşluğundaki numunenin durdurulmasına ve çıkış kanalı dediğimiz bölgeden kalıbın dışına alınması amacıyla da

kullanılmaktadır. Malzemenin, kanallardan kalıp dışına alınması işleminde yaklaşık 90° yön değiştirmesi, ECAP proseslerinin temel mantığıdır. Deneylerimizde de kullandığımız bu açının 90° olma zorunluluğu yoktur. Bu açı, kullanılacak ECAP çeşitlerine, istenilen plastik deformasyon oranına, oluşturulacak gerinim oranına ve kullanılacak malzemenin cinsine göre deneyi yapacak kişi tarafından isteğe bağlı olarak seçilebilir. Ayrıca bu açı seçilirken prosesin gerçekleşmesinin kolaylığı göz önünde tutulmalıdır.

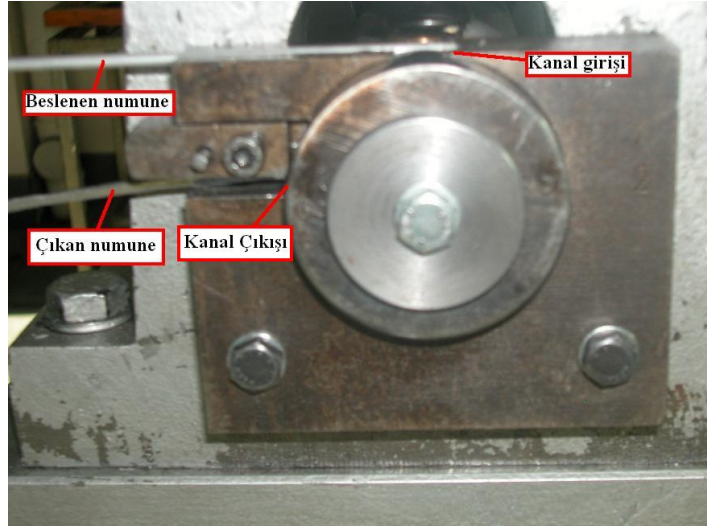


Şekil 9.13 ECAP-Conform kalıbı.

9.4 Deneyin yapılışı

Alüminyum tellerin plastik şekil değiştirmesi amacıyla kullanılan ECAP deney düzeneği kanal giriş ve çıkış yerleri, sürekli bir proseste beslenen malzeme ve çıkan malzeme ayrıntılı olarak Şekil 9.14'de gösterilmiştir. ECAP-conform prosesinin temel mantığı, hareketli kalıp dediğimiz silindirik merdane dönme hareketi yaparken merdanenin gövdesine açılmış oluklara malzemenin beslenmesi ve merdane ile malzeme arasında oluşan sürtünme kuvveti vasıtasıyla malzemenin merdaneyle birlikte ilerlemesi ve belirli bir açıdan geçirilmesi prensibine dayanmaktadır. Sabit kalıp ise merdaneyi çevreleyerek malzemenin kanal boşluğundan dışarı çıkmamasını sağlamaktadır. Merdaneyle ivme kazanan malzeme yukarıda Şekil 9.13'de belirtilen ara eleman vasıtasıyla bir noktada durmaya zorlanmaktadır. Sürtünme kuvveti bu durdurma kuvvetinden daha büyük olduğu için malzeme 90° yön değiştirerek kanal çıkışından dışarı itilmektedir. Eğer kanal ile malzeme arasında yeterli bir sürtünme kuvveti oluşturulmaz ise malzemeye hareket kazandırılmamaktadır. Dahası oluşturulmak istenen bu

sürtünme kuvveti kritik bir değerin altında olmamalıdır. Belki ilk etapta malzemenin hareketini sağlayacak sürtünme kuvveti oluşturulabilir. Oluşturulan bu kuvvet malzemenin iletilmesini de sağlayabilir. İşte oluşturulan bu değer kritik değerin altında olması halinde, malzeme kanal çıkışına kadar ilerleyerek orada durdurulduğunda mevcut kuvvet kritik değerin altında olduğu için malzeme 90° yön değiştirerek ilerleme hareketini gerçekleştirilmekte, böylelikle hem proseste süreklilik sağlanamamış hem de proses mantığı yerine getirilmemiş olmaktadır.



Şekil 9.14 Deney düzeneği.

Malzeme ilk etapta, hareketli merdane belirli bir hızda dönme hareketi yaparken kalıba beslenmekte ve ilk besleme işleminden sonra sistem kendiliğinden devam etmektedir. Kalıba silindirik olarak beslenen malzeme, hareketli merdanede oluşan sürtünme kuvvetinin etkisiyle önce yuvarlak kesitini dikdörtgen kesite dönüştürmekte ve sonra da ilerleyerek şekil değiştirmeyi tamamlamaktadır.

Kalıp şekli, boyutu, hız ve gerekli döndürme momenti deneysel olarak belirlenerek malzemenin kalıba beslenmesi sağlanmıştır. Gerek kalıbın tasarımından kaynaklanan eksiklikler gerekse kullanılan malzemenin çapının uygun olmaması şekillendirme bozulmalarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Küçük çaplı malzeme kullanıldığında malzeme hareketli kalıp tarafından kanala alınamamakta ve oluşan sürtünme kuvveti de malzemenin ilerlemesi için düşük kalmaktadır. Kalıpta yapılan düzenlemeler ve yeterli çapta malzeme seçimi bu sorunu ortadan kaldırmıştır.

Sorunsuz malzeme besleme işlemi ve yeterli sürtünme kuvvetinin sağlanmasından sonra da birçok sorunla karşılaşmıştır. Bunların en önemlisi, oluşturulan sürtünme kuvvetinin belirli bir değerin üzerinde olması halinde ortaya çıkmaktadır. Sürtünme kuvveti alt limit ve üst limit dediğimiz iki kritik değer aralığında olmalıdır. Bu üst limit aşıldığı takdirde de proseste süreksizlik yaşanmaktadır. Bu süreksizlik, kanal çıkış bölgesine gelen malzeme, gerek yön değiştirdikten sonra sürtünme kuvvetinin büyüklüğünden dolayı kalıba yapışarak sıvanma denilen olayın gerçekleşmesinden gerekse yine sürtünme kuvvetinin büyüklüğünden dolayı malzemenin kanal boşluğundan dışarı hiç alınamamasından kaynaklanmaktadır. Bu sorunun önüne geçilip sürekli ve verimli bir prosesin gerçekleşmesi yani sürtünme kuvvetinin iki değer arasında olması için yağlayıcı kullanılması şarttır. Bu amaçla katı yağlayıcı olan toz grafit ve sıvı yağlayıcı olan özel alüminyum hadde yağlayıcısı kullanılmıştır.

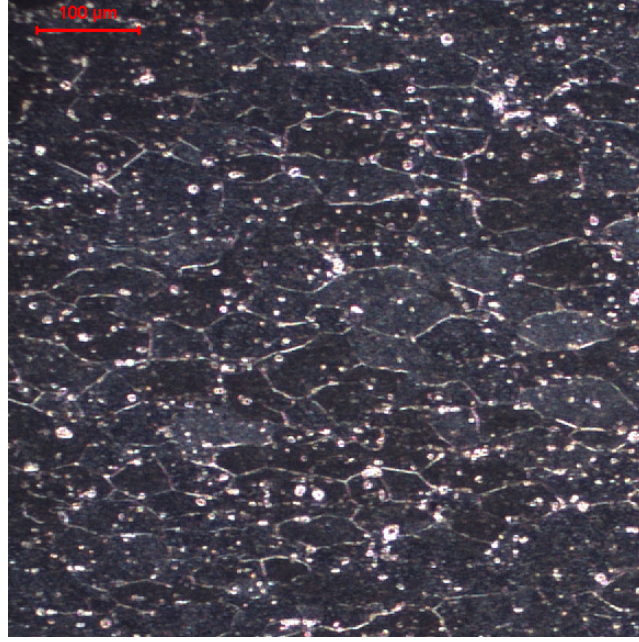
Bu sorunun aşılması için önce grafit kullanılmıştır. Grafit kullanımı ilk etapta başarılı olmuştur. Sürtünme kuvveti istenilen değere çekilmiş ve proseste süreklilik sağlanmıştır. Grafitin katı bir yağlayıcı olması başlangıçta sorun oluşturmaya bile ilerleyen süreçte grafitin bu özelliğinden dolayı mevcut sorun tekrar başlamıştır. Grafit partikülleri kalıp ile malzeme arasında hareketi kolaylaştırıcı rol oynayarak sürtünme kuvvetini azaltmaktadır. Bir süre sonra hareketi kolaylaştıran bu partiküller dar geçiş noktalarında toplanarak malzemenin sıkışmasına neden olup proseste süreksizlik oluşturmuştur. Grafitin bu özelliğinden dolayı mevcut sorunun ortadan kaldırılması için sıvı yağlayıcı kullanılmıştır. Bu amaçla özel alüminyum hadde yağı kullanılmış olup, sürtünme kuvvetini istenilen değer aralığına indirmiş ve sıvı özelliğinden dolayı dar geçiş noktalarında da sıkışmalara neden olmadığı için proseste süreklilik sağlanmıştır.

Ayrıca yağlayıcılardan istenilen diğer bir özellik ise; sürtünme kuvvetini istenilen değer aralığına getirirler bile malzeme ile kalıp arasında oluşan etkileşimden dolayı elde edilen nihai malzemenin yüzeylerinde oluşacak pürüzlüğü engellemesidir. Bu pürüzlükler, prosesin malzemeye defalarca tekrarlanarak uygulandığı düşünülürse ilerleyen evrelerde büyüyerek çatlamalara neden olmaktadır. Ayrıca deney sonrasında yapılan mekanik testlerde olumsuz etki göstermektedir. Bu nedenlerden dolayı elde edilen nihai malzemenin yüzey özellikleri de sağlanmalıdır.

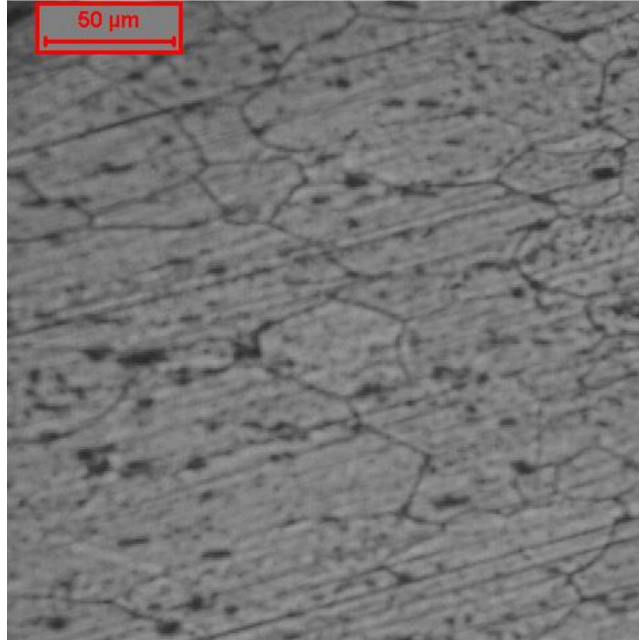
Prosesin işleyişiyle ilgili yapılan bu çalışmaların ardından 4mm çaplı Alüminyum tel Şekil 9.14’de görüldüğü gibi kanal girişine beslenmiştir. Malzemeyle kalıp arasında sürtünme oluşmuş ve oluşan bu sürtünme kuvveti malzemenin kalıp boşluğunu doldurmasını sağlamıştır. Kalıp boşluğunu dolduran malzeme, kalıbın hareketiyle ilerleyip çıkış kanalına gelerek sabit kalıp tarafından kanal çıkışı vasıtasıyla kalıp dışına itilmiş ve böylelikle paso denilen bir seferlik prosesi görmüş olmaktadır. Malzemeye uygulanan bu tek serflik paso istenilen seviyede tane boyutu elde etmek için yeterli olmamıştır. Bunun için uygulanan bu prosesin istenilen seviyede tane boyutu elde edene kadar tekrarlanması gerekmektedir. Ayrıca her paso sonrası mikroyapı incelemesi yapılarak prosesin ilerleyişi takip edilmelidir. İkinci ve daha sonraki pasolara geçilmeden, prosesin verimliliğine etki eden parametrelerden olan presleme yönü dediğimiz malzemenin kalıba beslenme yönü dikkate alınmalıdır. Mevcut yönler bölüm 5’de ayrıntılı olarak açıklanmış olup bu yönlerden Bc yönü kullanılmıştır. Yani malzeme kalıba paso öncesinde 90° döndürülerek beslenmiştir. Bu işlemler mikron ve mikron altı tane elde edene kadar devam etmiştir. Ve bu ilerlemeler her paso sonrasında mikro yapı incelemesiyle saptanmıştır.

9.5 Optimizasyon çalışmaları

Malzeme proses edilmeden önce mikroyapı incelemesi yapılarak başlangıç malzemenin yapısı ve tane büyüklüğü saptanmıştır. Mikroyapı incelemesi, malzeme sırasıyla 120, 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 mesh’lik zımparalarla zımparalama yapıp alüminayla ön parlatma ve elmas pastayla nihai parlatma işlemi gördükten sonra %2’lik HF çözeltisiyle dağlanarak yapılmıştır. Aşağıda Şekil 9.15’de başlangıç malzemenin farklı iki mikro yapı resmi verilmiştir. Resimlerde de görüldüğü gibi tanelerde bir miktar yönlenme mevcuttur. Bu durum tellerin üretimi esnasında gördüğü işlemlerden kaynaklanmaktadır.



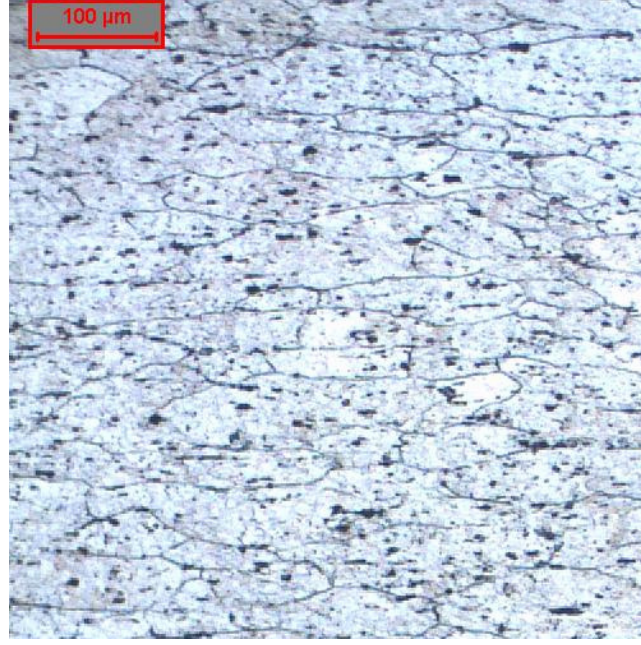
a)



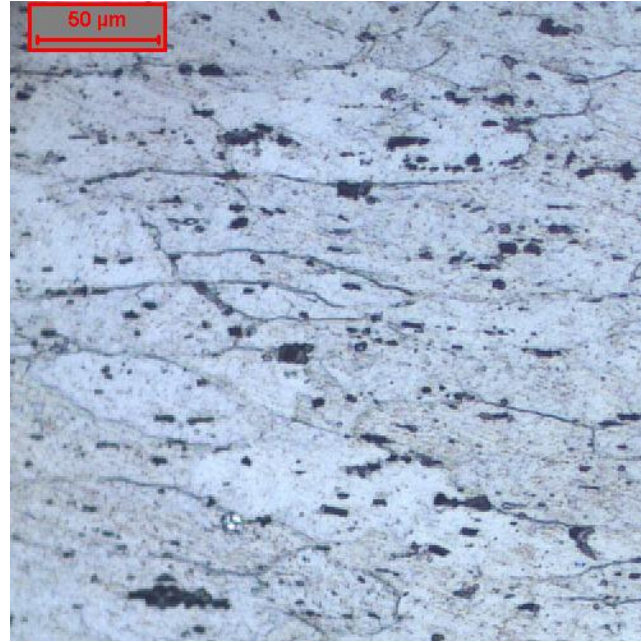
b)

Şekil 9.15 Malzemenin başlangıç mikroyapı görüntüsü, a) ve b).

Malzeme, yukarıda görüldüğü gibi mevcut yapısıyla 6 pasoluk ECAP işlemine tabi tutulmuştur. İşlemler sonrası zımparalama, parlatma ve dağlama yapılarak mikroyapı gelişimi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 9.16'de gösterilmiştir.



a)



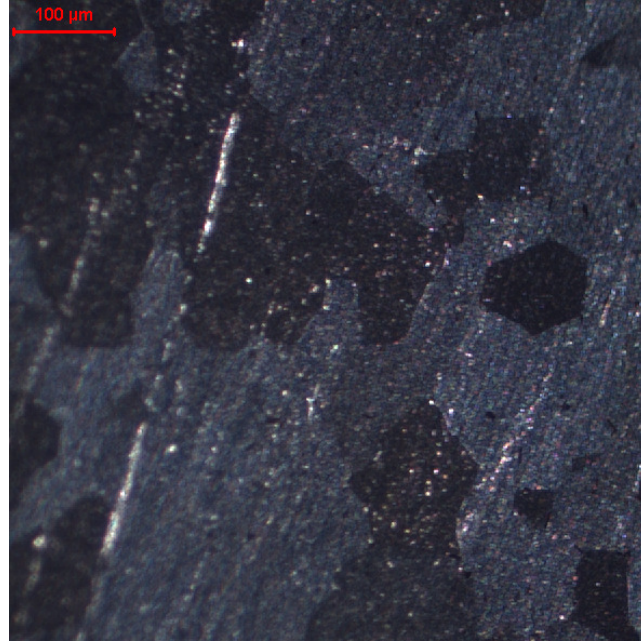
b)

Şekil 9.16 Malzemenin 6 paso sonrası mikroyapı görüntüsü, a) ve b).

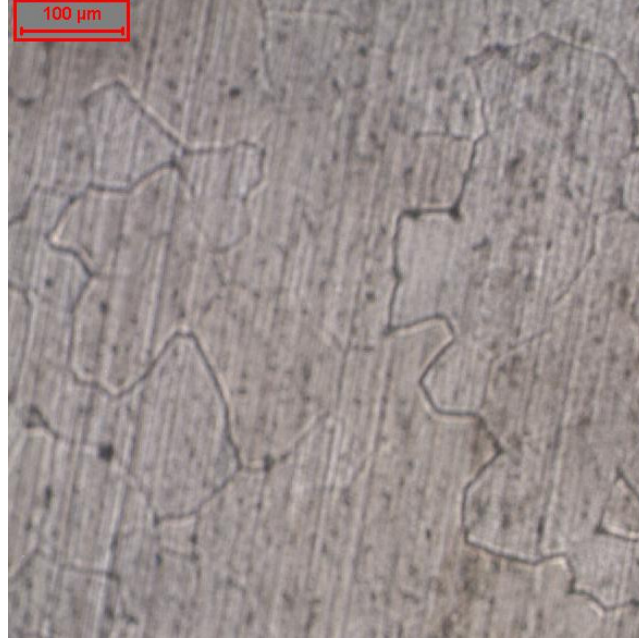
Şekil 9.16'da görüldüğü gibi başlangıç malzemesinin ECAP prosesi sonrası tane boyutunda belirgin bir azalma olmamıştır. Tane boyutunda azalma olmamasının sebebi; ticari olarak elde edilen malzemenin iç gerilmeler ve tane yönlenmesi gibi sahip olduğu mevcut mekanik özelliklerdir. Bu özelliklerden iç gerilmeler sertlik değerinin yüksek olmasını ve yüksek

sertlik değeri de prosesin uygulama zorluğunu beraberinde getirmektedir. Tane yönlenmesi ise paso işlemlerinde malzeme açıdan geçerken tanelerin kırılarak incelmesi gerekirken kırılmadan yönlenme doğrultusu boyunca bir miktar daha uzamasına yani tane incelme mekanizmasının devreye girmemesine sebep olduğu tespit edilmiştir. Bu tespitlerin sonucunda i gerilmelerin giderilmesi ve yönlenmiş tanelerin yeniden kristalleşme işlemiyle yönlenme özelliğinin giderilmesi için tavlama işlemine tabi tutulmuştur.

Tavlama işlemi için fırın sıcaklığı ilk olarak 450 °C' ye ayarlanmış ve malzeme bu sıcaklıkta 8 saat tutularak tavlama yapılmıştır. Bu işlemlerle yönlenmiş tanelerin geri kazanılması ve sertlik değerinin düşürülmesi hedeflenmiştir. Tavlanmış numunede metalografik hazırlama işlemlerinden sonra mikroyapı incelemesi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 9.17'de verilmiştir.



a)

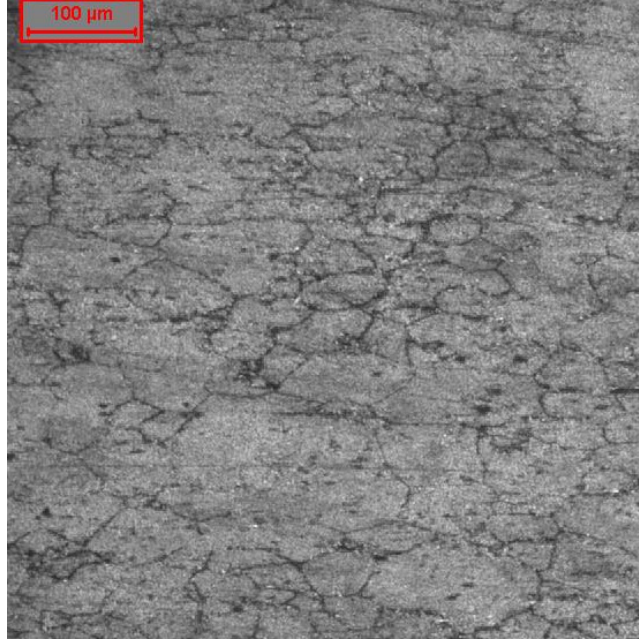


b)

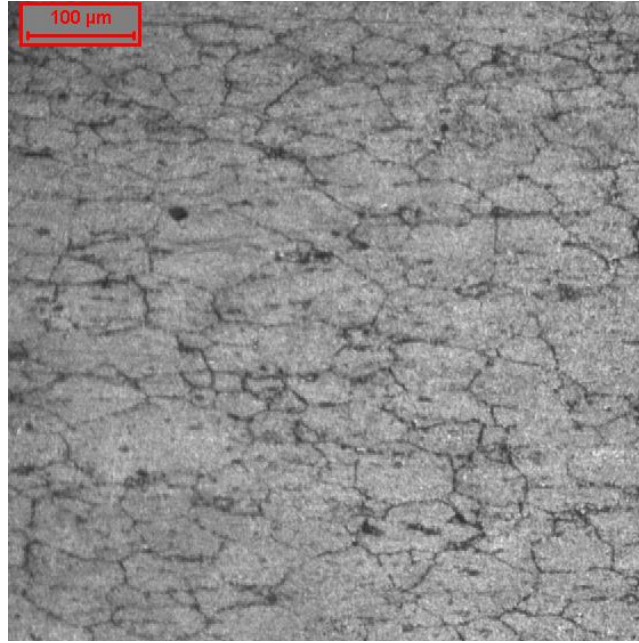
Şekil 9.17 450 °C’de 8 saat tavlanan malzemenin mikroyapı görüntüsü, a) ve b).

Tavlama işlemi sonrası yapılan incelemelerde iç gerilmelerin giderilip sertlik değerinin düştüğü ve yönlendirilmiş tanelerin geri kazanıldığı görülmüştür. Malzemede bu istenilen özelliklerin kazanılmasının yanında istenmeyen olumsuz sonuçlarda ortaya çıkmıştır. Gerek tavlama sıcaklığının çok yüksek seçilmesi buna karşın gerekse sürenin çok fazla olması yönlendirme özelliğinin giderilmesinden sonra tanelerin kabalaşmasına sebep olmuştur. Plastik deformasyonla tanelerin küçültülmeye çalışıldığı bir süreçte tane kabalaşmasının olması istenilen tane boyutuna ulaşılması için fazladan paso işleminin uygulanmasını yani malzemenin daha fazla deforme olmasını gerektirmektedir. Bunun için tavlama işlemi yapılırken yönlendirme özelliğini gerip sertlik değerini düşürürken tane kabalaşmasına fırsat verilmemelidir. Sonuç olarak tavlama işlemi yapılırken uygun sıcaklık ve süre seçilmelidir.

Farklı sıcaklık ve sürelerde tavlama işlemleri yapılmış bu işlemlerin mikro yapı üzerindeki etkilerini inceleyerek uygun tavlama sıcaklığı ve süresi araştırılmıştır. 343 °C’ de 4 saat tavlama yapılmış incelemeler sonucu bu sıcaklık ve süre ikilisinin de tane kabalaşmasına sebep olduğu görülmüştür. Daha sonra aynı sıcaklıkta 1 saat denenmiş yine kabalaşma olayına rastlanmıştır. Şekil 9.18a’da 4 saat tavllanmış ve b’ de ise 1 saat tavllanmış malzemenin mikro yapısı verilmiştir. Bunun sonucunda bu sıcaklığın da tavlama işlemi için çok yüksek olduğuna karar verilmiştir.



a)



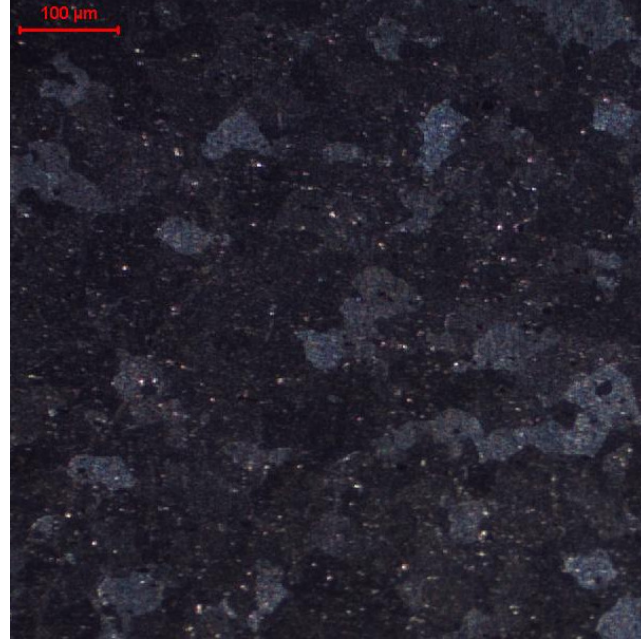
b)

Şekil 9.18 343 °C' de tavlanan malzemenin mikroyapı görüntüsü, a) 4 saat ve b) 1 saat.

Bir sonraki adımda sıcaklığı 320 °C' ye çekerek tavlama işlemi yapılmıştır. Bu sıcaklıkta tavlama süresi 2.5 ve 4 saat olarak iki farklı deney yapılmıştır. Daha sonra mikroyapı incelmesi yapılmış ve sonuçlar Şekil 9.19a'da 2.5 saat ve b'de 4 saate ait yapılar verilmiştir.



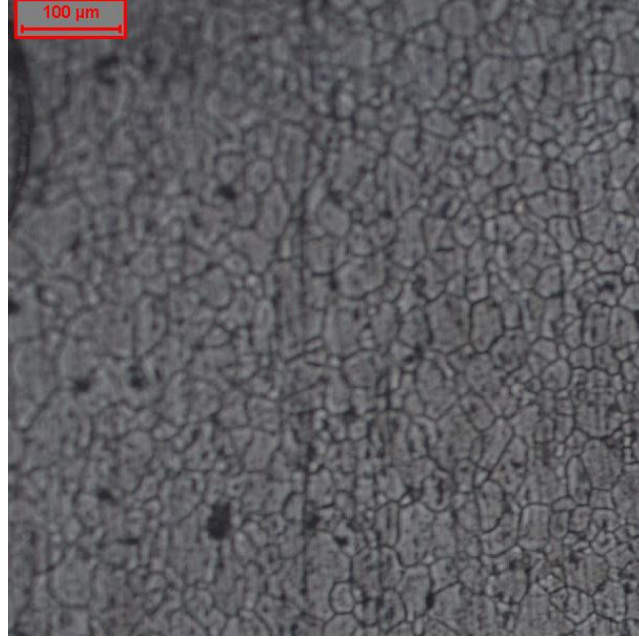
a)



b)

Şekil 9.19 320 °C'de tavlanan malzemenin mikroyapı görüntüsü, a) 2.5 saat ve b) 4 saat.

Son olarak 323 °C' de 4 saat tavlama yapılmış ve optimum koşul seçilmiştir. 320 °C'nin optimum koşula çok yakın olduğu ve sıcaklığın birkaç derece artırılarak optimum koşulun yakalanacağı saptanmıştır. Şekil 9.20'da 323 °C sıcaklığında 4 saat sürede yapılan tavlama işleminde elde edilen mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 9.20 323 °C' de 4 saat tavlanan malzemenin mikroyapı görüntüsü.

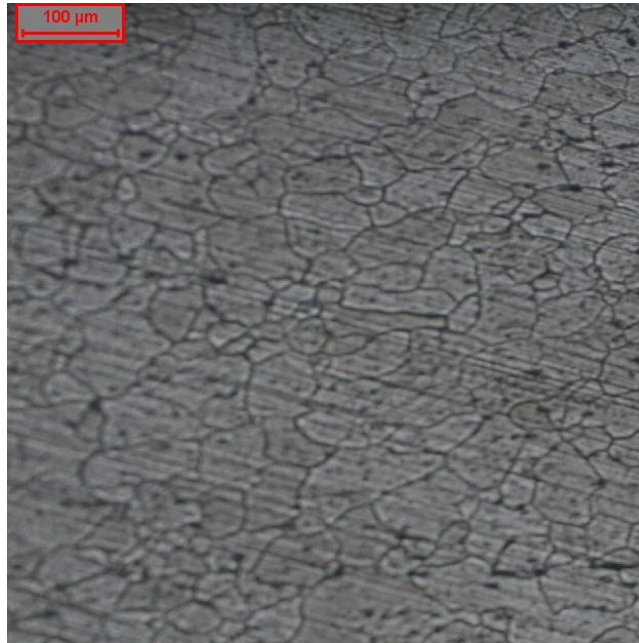
Tavlama sıcaklığı ve süresiyle ilgili yapılan bu çalışmalar sonunda 323 °C ve 4 saatlik tavlama süresinin optimum koşul olduğuna karar verilmiştir. Optimum koşulun belirlenip proses edilecek numune hazırlanarak ECAP prosesine geçilmiştir.

10. DENEYSEL SONUÇLAR

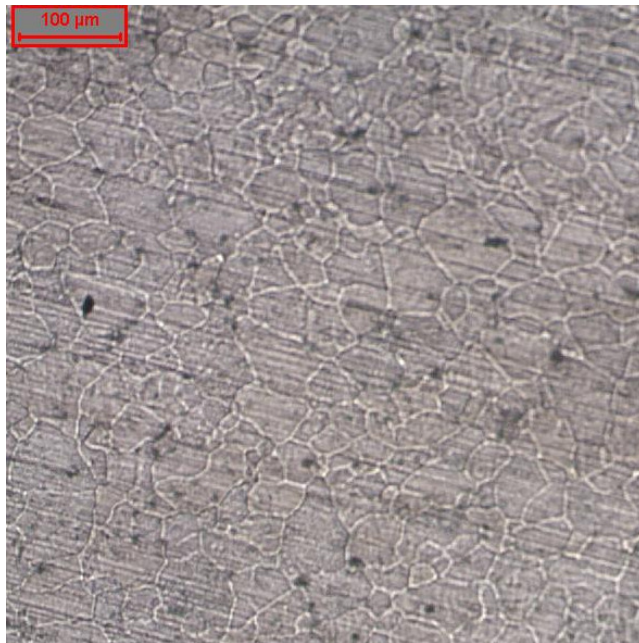
Kalıbın işleyişiyle ilgili yapılan optimizasyon çalışmalarının ve prosesin verimliliğini arttırmak için yapılan tavlama işleminin optimizasyonundan sonra paso işlemlerine geçilmiştir. Malzemeye 16. pasoya kadar proses uygulanmıştır. İlk yedinci pasoya kadar her paso sonrası mikroyapı incelemesi yapılarak kademe kademe ilerlemeler takip edilmiştir. Sekizinci pasodan sonra 11. pasoda ve daha sonrada 16. pasoda mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri ilk yedi paso için ışık metal mikroskobunda yapılmıştır. Proseste gelinen bu safhadan sonra elde edilen tane boyutunun çok düşmesi ve uygulanan plastik deformasyonun artması sebebiyle ışık metal mikroskobunda görüntü elde edilmesi ya yapılamamakta ya da çok kötü yapılar elde edilmektedir. Bundan dolayı 11. ve 16. pasolara ait mikroyapılar TEM' de yani yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobunda çekilmiştir. Ayrıca taramalı elektron mikroskobunda (SEM) malzemenin mevcut fazları ve bu fazların malzemenin yapısındaki dağılımlarına bakılmıştır. Sertlik ölçümleriyle malzemenin sertliğindeki değişimler saptanmış ve çekme testi ile çekme dayanımındaki değişimler belirlenmiştir.

10.1 Işık metal mikroskopta elde edilen mikroyapılar

Her paso sonrası malzemeler geleneksel metalografik numune hazırlama yöntemleriyle hazırlandıktan sonra dağlanarak mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. İlk yedi pasolara ait mikroyapı görüntüleri aşağıda Şekil 10.1' de verilmiştir. Bu resimlerden a) birinci pasoya, b) ikinci pasoya, c) üçüncü pasoya, d) dördüncü pasoya, e) beşinci pasoya, f) altıncı pasoya ve son olarak g) yedinci pasoya ait mikroyapı görüntüleridir.



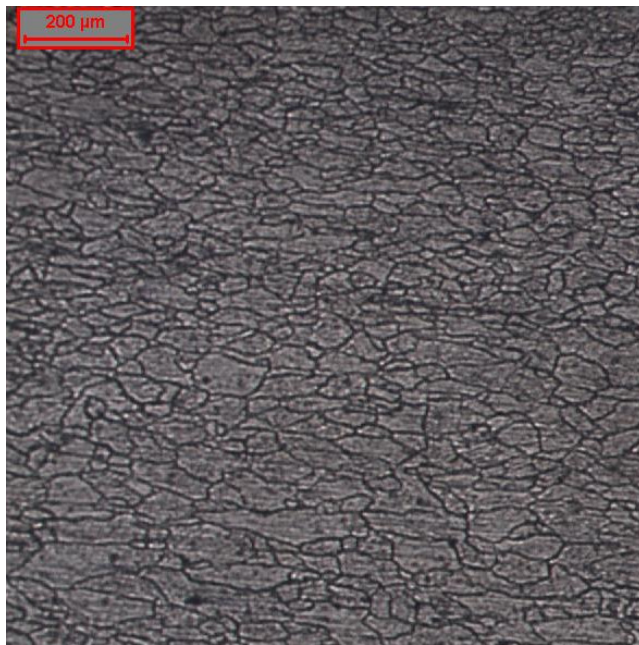
a)



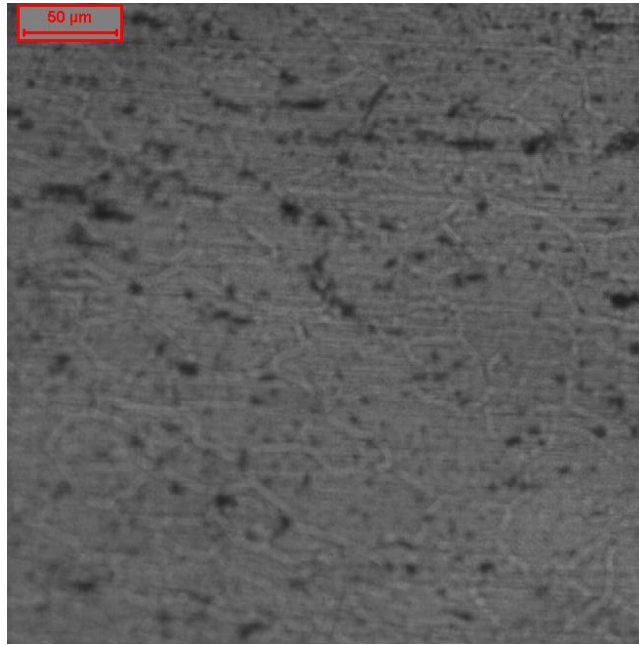
b)



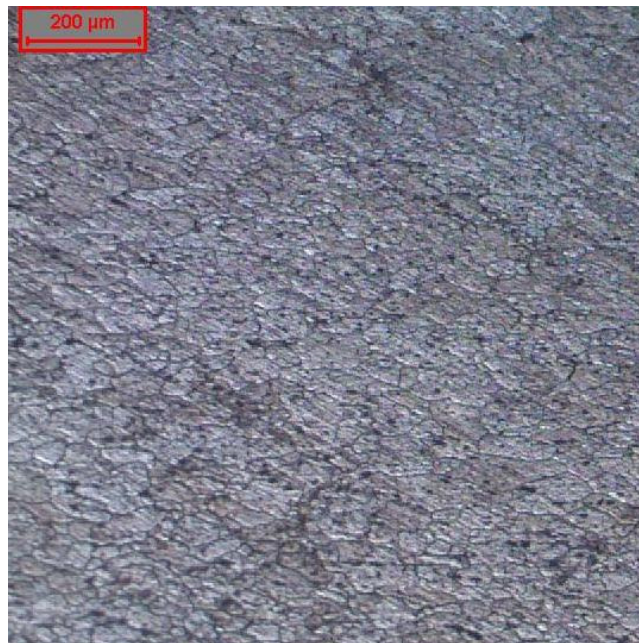
c)



d)



e)



f)



g)

Şekil 10.1 İlk yedi pasolardaki mikroyapı görüntüleri; a), b), c), d), e), f), g).

ECAP proseslerinde ilk pasoda genellikle belirgin bir tane küçülmesi olmamaktadır. Malzemenin yapısında düzensizlikler yani farklı boylarda taneler var ise bu taneler ilk pasoda dengelenerek ortalama aynı seviyeye gelirler. Eğer tam bir dengelenme olmamışsa yani malzemenin yapısında bulunan tanelerin en küçüğü ile en büyüğü arasında büyük farklılıklar var ise bu dengelenme ilk pasoda sağlanamayabilir. Bu dengelenme işlemi sonraki pasolarda devam etmektedir. Taneler ortalama aynı seviyeye gelerek küçülmeye başlamaktadırlar. Bu küçülme istenilen seviyede tane boyutu elde edene kadar devam etmektedir. Malzemeler her pasoda bir önceki durumlarına göre farklı plastik deformasyona uğradıkları için her pasoda elde edilen mikroyapılarda birbirinden farklı olmaktadır. Dahası deformasyon giderek arttığı için sonraki pasolarda tane elde etmek giderek zorlaşmakta ve bir noktadan sonra geleneksel dağlama yöntemiyle imkânsızlaşmaktadır.

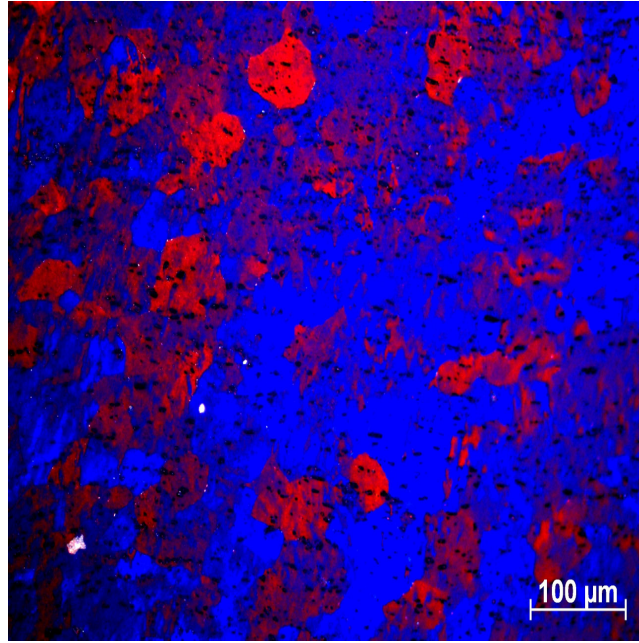
10.2 Elektrolitik parlatma ile elde edilen mikroyapılar

Proseste ilerleyen evrelerde malzemeye uygulanan plastik deformasyon giderek arttığı için bir noktadan sonra geleneksel dağlama yöntemiyle mikroyapı elde etmek imkânsız hale gelmektedir. Bundan dolayı prosesin ilerleyişi ve gelinek noktanın tayini için başka yöntemlerin kullanımı zorunlu hale gelmektedir. Yaptığımız deneysel çalışmalarda bu durumla yedinci pasodan sonra karşılaşmıştır. Bu sorunun önüne geçilmek için ilk etapta

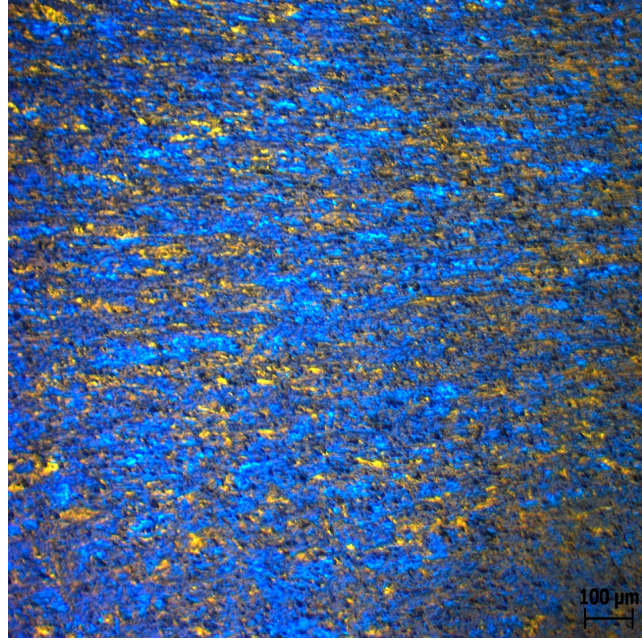
elektrolitik dağlama yöntemi kullanılarak mikroyapı elde edilmiştir.

Elektrik dağlama yöntemi, düşük akım ve voltaj kullanarak elektrolitik hücrede anot katot reaksiyonu gerçekleştirmek suretle yapılır. Bu yöntemde bildiğimiz elektrolitik hücre kullanılır. Malzeme hücrenin anot kısmına bağlanır, katot kısmına da grafit çubuk ya da paslanmaz çelik plaka konulur. Elektrolit olarak belirli bir asit çözeltisi kullanılır. Deneylerde elektrolit olarak %2.5'lik HFB₄ çözeltisi kullanılmıştır. Sistem hazır hale geldiğinde devreye akım verilerek dağlama gerçekleştirilir.

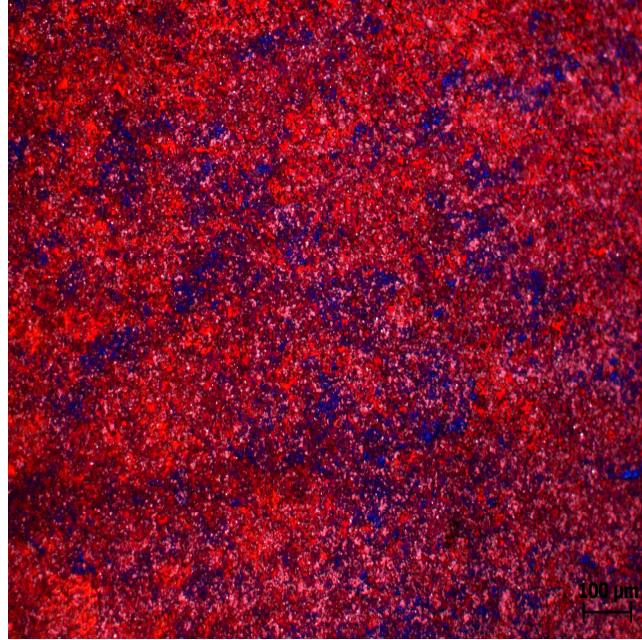
Elektrolitik dağlama yapılmadan önce geleneksel zımparalama ve parlatma işlemleri yapılır. Daha sonra dağlamaya geçilir. Aşağıda Şekil 10.2'de elektrolitik dağlama sonrası elde edilen mikroyapılar verilmektedir. Bunlardan (a) dördüncü pasoya, (b) sekizinci pasoya ve (c) onbirinci pasoya ait mikroyapıyı göstermektedir. Resimlerde de görüldüğü gibi malzemenin tane boyutu giderek azalmaktadır.



a)



b)

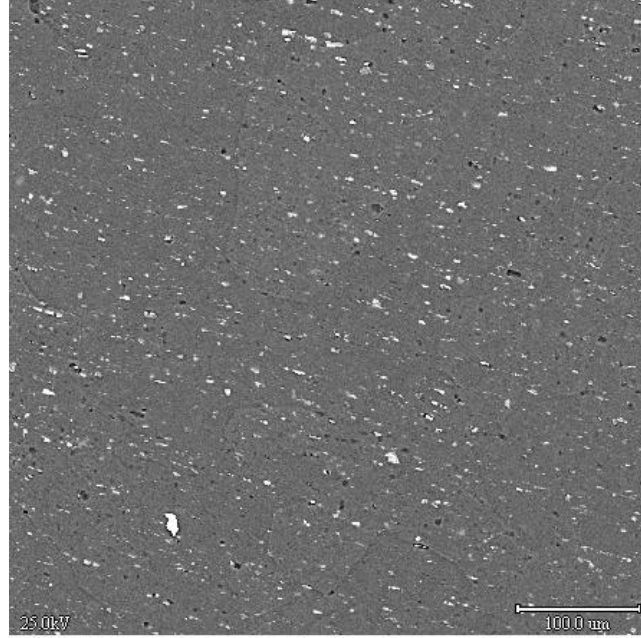


c)

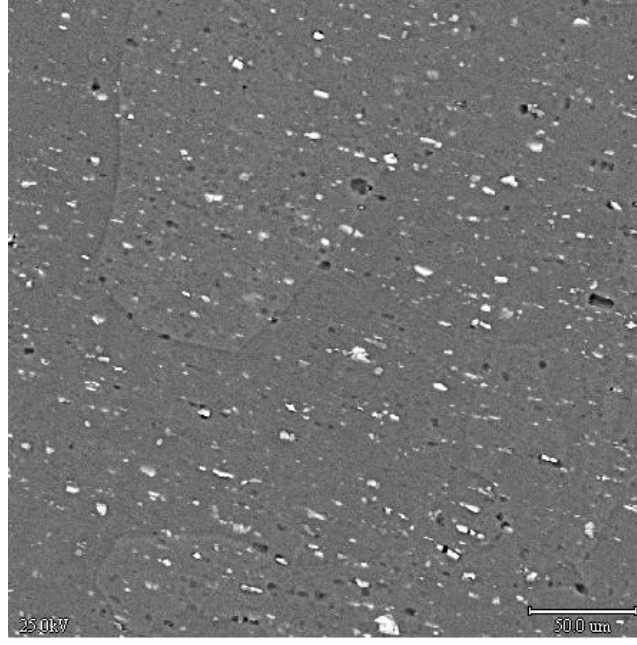
Şekil 10.2 Elektrolitik dağlanan malzemenin mikroyapı görüntüleri; a), b), c).

10.3 Tarama elektron mikroskobu görüntüsü ve faz tayini.

Tarama elektron mikroskobu kullanırken malzemedeki mikroyapıların daha net ve düzgün görülebilirliğinden çok mevcut fazlar ve bunların yapıdaki dağılımlarının saptanması amaçlanmıştır. Daha sonra geçirimli elektron mikroskobunda bu fazların hangi fazlar olduğu daha ayrıntılı görüntüsü ve EDS analiziyle belirlenmiştir. Şekil 10.3' de tarama elektron mikroskobuyla elde edilen malzemenin faz dağılım görüntüsü verilmiştir.



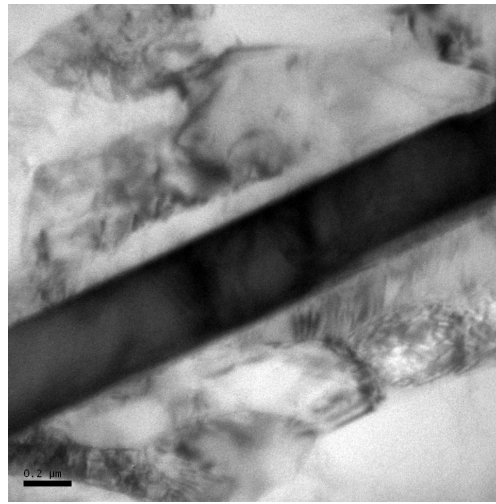
a)



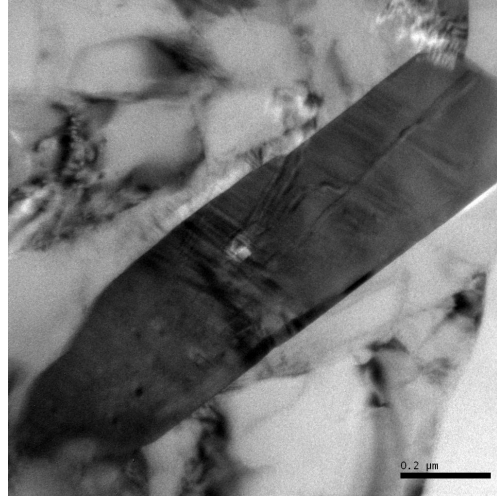
b)

Şekil 10.3 Tarama elektron mikroskop görüntüleri; a) ve b).

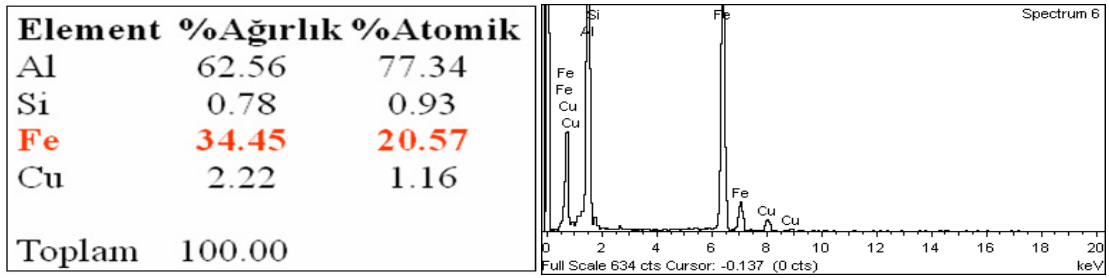
Elde edilen bu yapıların ardından bulunan bu fazların hangi fazlar olduğunu belirlemek için geçirimli elektron mikroskopunda faz görüntüsüyle birlikte EDS analizi yapılmıştır. Şekil 10.4'de demir fazının TEM görüntüsü (a ve b) ile EDS analizi (c ve d) ve Şekil 10.5'de ise silisyum fazının TEM görüntüsü (a ve b) ile EDS analizi (c ve d) verilmiştir.



a)



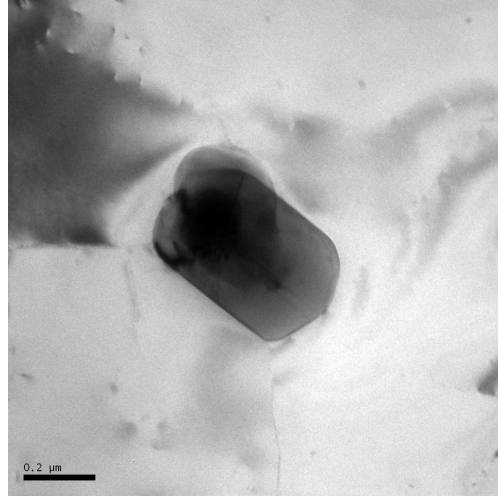
b)



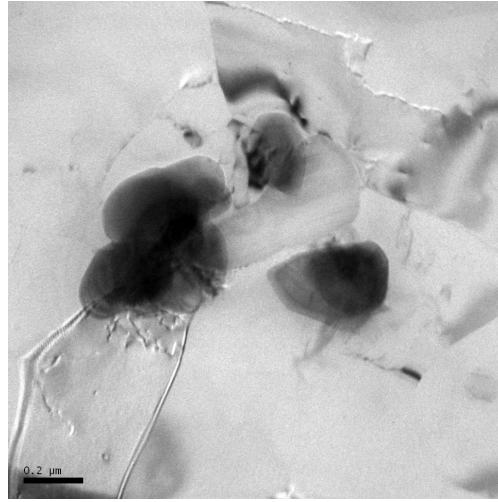
c)

d)

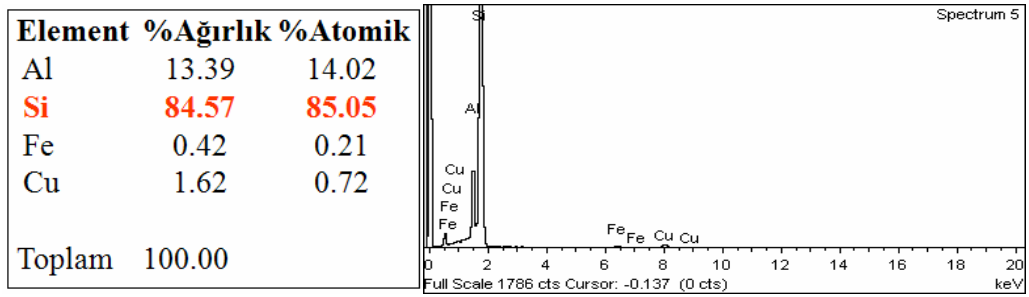
Şekil 10.4 Demir fazının TEM görüntüsü; a), b) ve EDS analizi; c), d).



a)



b)



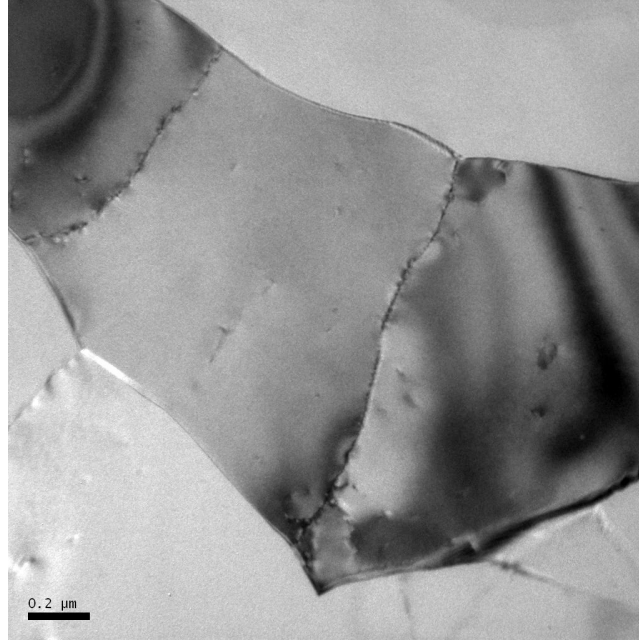
c)

d)

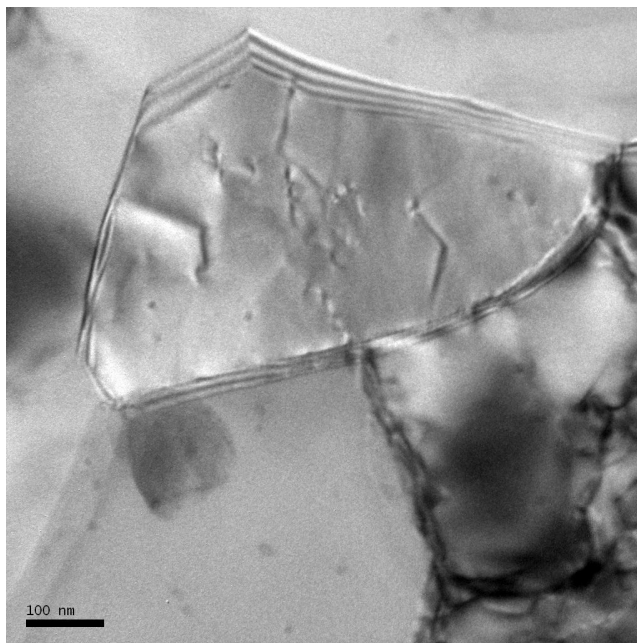
Şekil 10.5 Silisyum fazının TEM görüntüsü; a), b) ve EDS analizi; c), d).

10.4 Geçirimli elektron mikroskopuyla elde edilen mikroyapılar

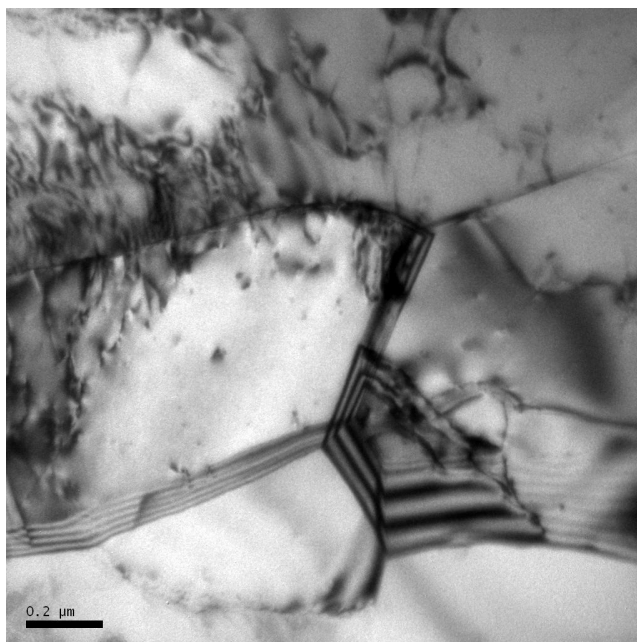
Deneyin son aşamalarında daha ayrıntılı ve net mikro yapılar elde etmek için geçirimli elektron mikroskobu kullanılmıştır. Bu incelemelerde onbirinci ve onaltıncı pasolara ait numuneler kullanılmıştır. Şekil 10.6' da onbirinci pasoya ait mikroyapı görüntüleri (a, b, c ve d) ve Şekil 10.7'de ise onaltıncı pasoya ait mikroyapı görüntüsü (a, b, c ve d) verilmiştir. Bu iki farklı pasolara ait yapılar karşılaştırıldığında onaltıncı pasoya ait yapının daha düşük tane boyutuna sahip olduğu görülmektedir ve bu pasonun tane boyutu ortalama $1\mu\text{m}$ ve altındadır. Mikron altı seviyede tane boyutuna sahip yapı elde edildikten sonra paso sayısının artırılarak daha düşük boyutlu tane elde edilmesi düşünülmemiştir.



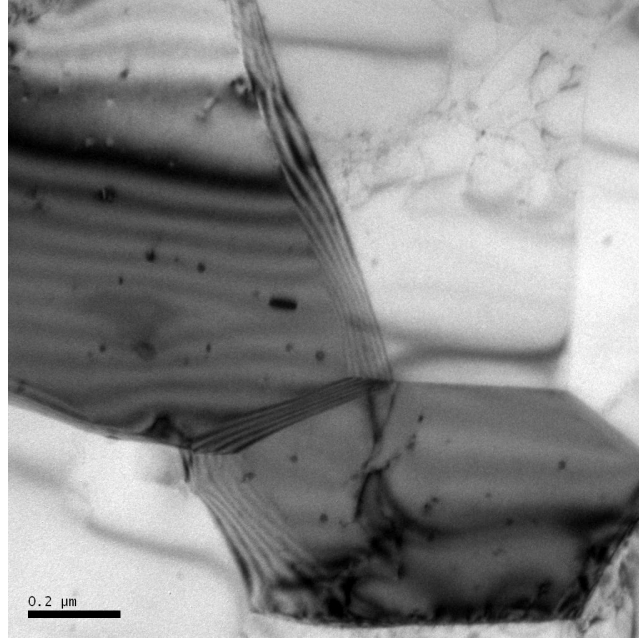
a)



b)

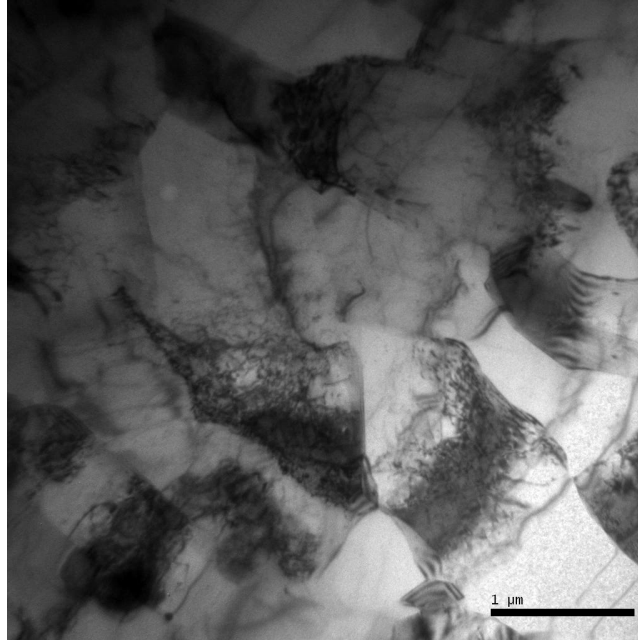


c)

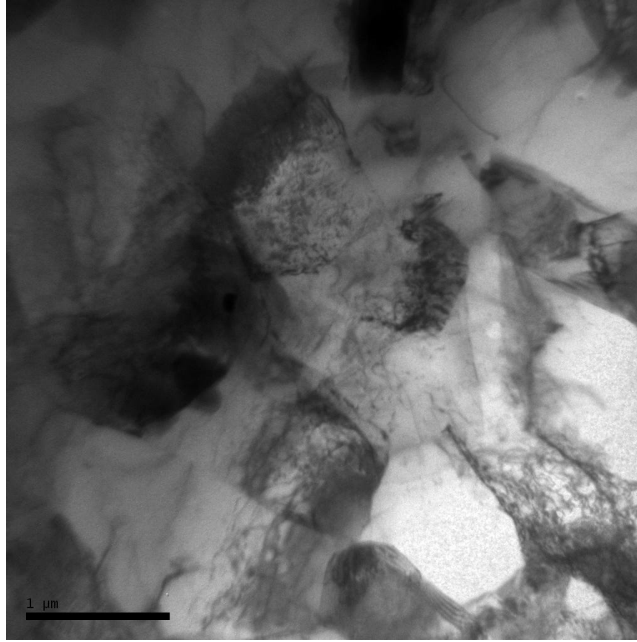


d)

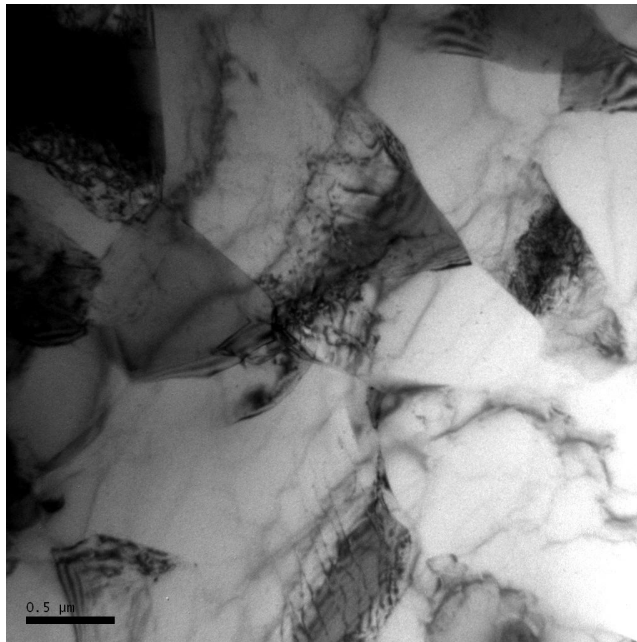
Şekil 10.6 11. pasoya ait TEM mikroyapı görüntüsü; a), b), c) ve d).



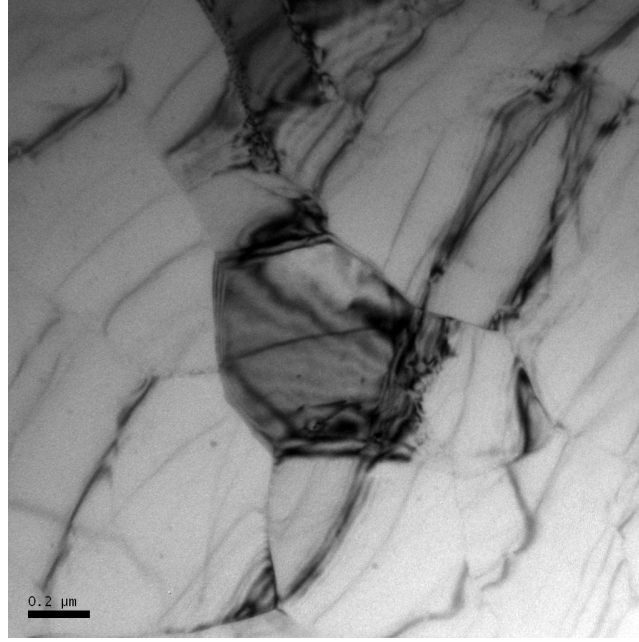
a)



b)



c)

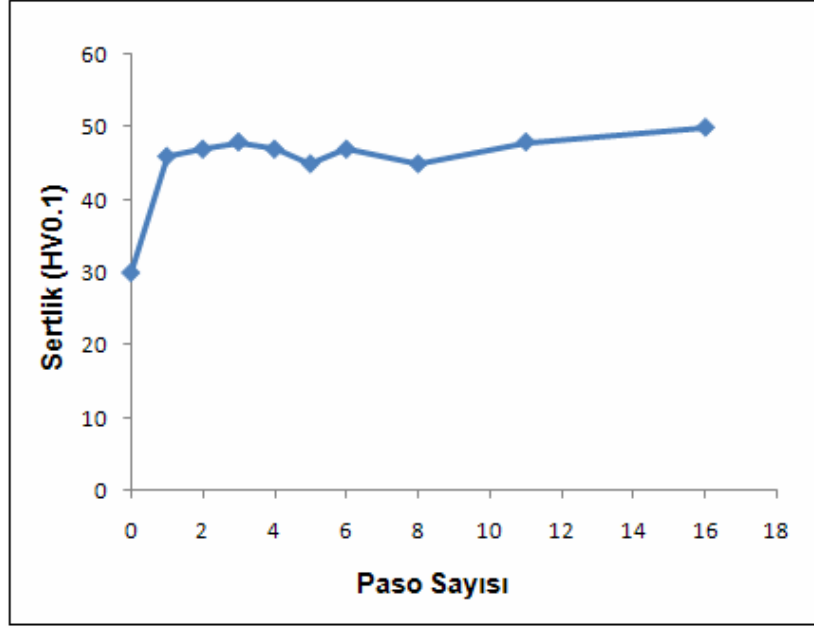


d)

Şekil 10.7 16. pasoya ait TEM mikroyapı görüntüsü; a), b), c) ve d).

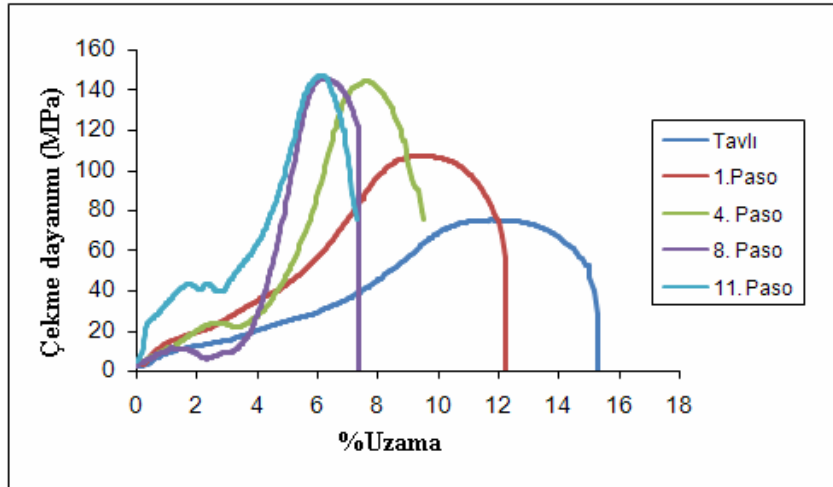
10.5 Mekanik testler

Mikroyapı incelemelerinden sonra uygulanan ECAP prosesinin mekanik özellikler üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla sertlik ölçümleri ve çekme testleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde sertlik değerlerinde tavlı malzemenin sertliği birinci paso sonunda yaklaşık bir buçuk katına kadar artmaktadır. Bu artışın sonraki pasolarda da artması beklenirken yapılan ölçümler beklentilerin dışında olmuştur. Hatta bazı pasolarda değer artması beklenirken düştüğü görülmüştür. Kısacası sertlik değerlerinde birinci pasodan sonra pek fazla bir artış görülmemiştir. Aşağıda Şekil 10.8' de elde edilen sertlik değerleri ile paso sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi birinci pasodan sonra sertlik değerinde pek fazla artış olmamıştır.

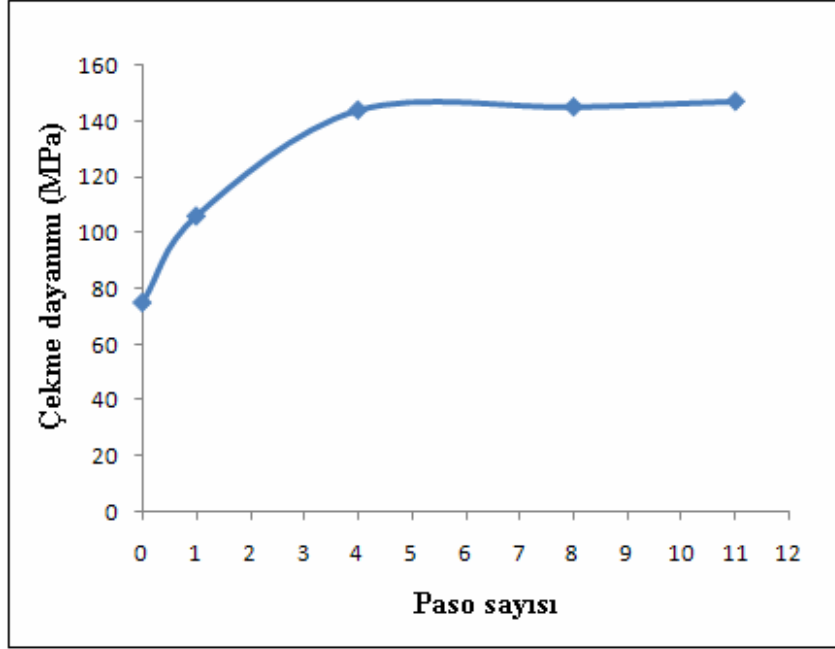


Şekil 10.8 Paso sayısı ile sertlik arasındaki ilişki.

Sertlik ölçümlerinden sonra çekme testleri yapılmıştır. Elde edilen test sonuçları Şekil 10.9’ da grafik halinde verilmiştir. Bunlardan a); çekme dayanımı ile % uzama arasındaki ilişkiyi, b); çekme dayanımı ile paso sayısı arasındaki ilişkiyi vermektedir. Grafiklerde de görüldüğü gibi çekme dayanımı dördüncü pasodan sonra pek fazla artış göstermemiştir.



a)

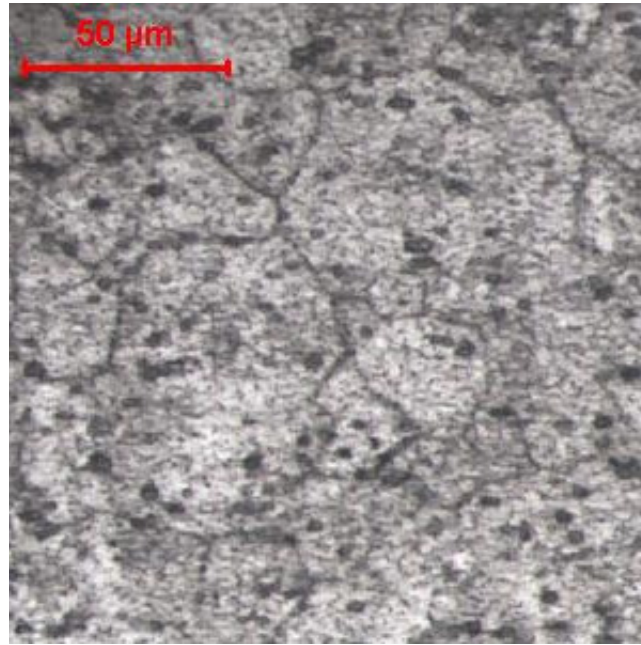


b)

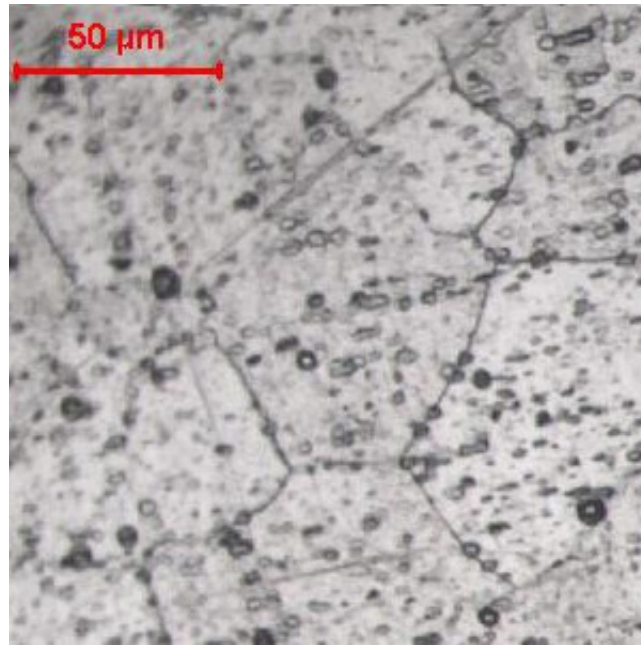
Şekil 10.9 Çekme test sonuçları; a) Çekme dayanımı ile %uzama arasındaki ilişki, b) Paso sayısı ile çekme dayanımı arasındaki ilişki.

10.6 Alüminyum 6063 alaşımıyla yapılan çalışmalar

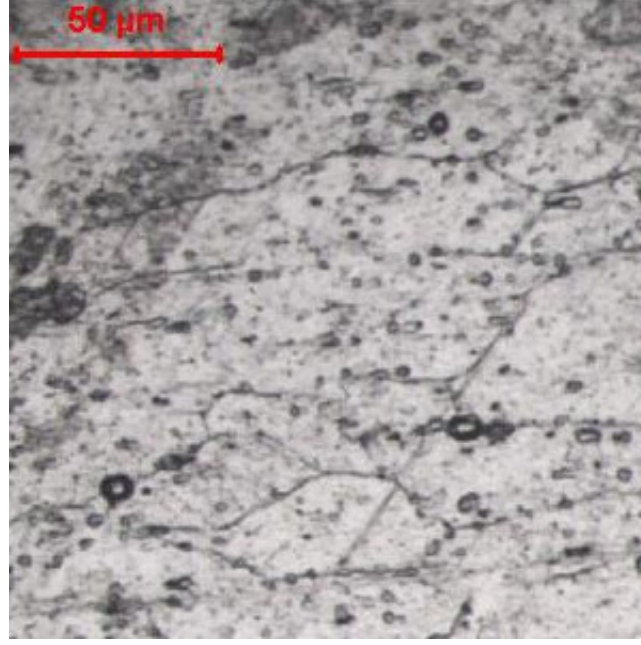
6063 alaşımında etial F1 alaşımına göre daha dar kapsamlı deneyler yapılmıştır. Bu alaşıma ait tellerde de mekanik gerilmeler bulunmaktadır. Bu mekanik gerilmeler yalnızca sertlikte olup malzemede diğer alaşımda olduğu gibi yönlenmiş taneler bulunmamaktadır. Bu alaşımda da sertliği düşürücü tavlama yapılmıştır. Tavlama işlemi 430°C 'de 3 saat süreyle yapılmıştır. Yine ilk olarak seçilen tav sıcaklığında malzemede tane kabalaşması olayı olmuştur. Bu alaşım için bir optimizasyon çalışması yapılmamıştır. Diğer alaşımda olduğu gibi deneyler Bc yönü kullanılarak dördüncü pasoya kadar yapılmış ve metalografik incelemeler ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Şekil 10.10'de mikroyapı inceleme sonuçları (a, b, c) verilmiştir. Bunlardan a); malzemenin hiç işlem görmemiş yapısını, b); malzemenin tavllanmış mikroyapısını ve c); dördüncü pasoya ait mikroyapıyı göstermektedir. Resimlerden de görüldüğü gibi tavlama sıcaklığı ve süresi uygun olmadığı için malzemede tane kabalaşması olmuştur. Dördüncü paso sonrasında tane boyutu ancak tavlammamış yapıdaki tane boyutu seviyesine inmiştir. Ayrıca tanelerde de bit miktarı yönlenme olduğu görülmektedir.



a)



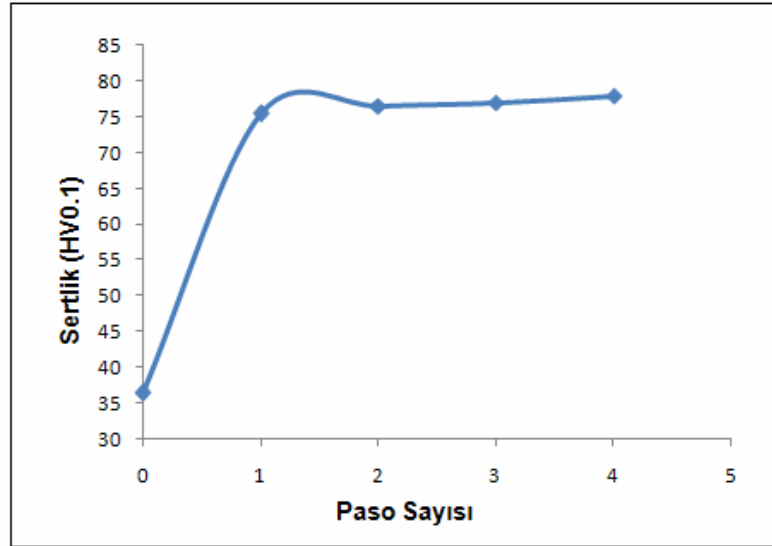
b)



c)

Şekil 10.10 6063 alaşımına ait mikroyapı görüntüleri; a), b), c).

Mikroyapı incelemesinden sonra sertlik ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 10.11’de sertlik ile paso sayısı arasındaki ilişki olarak grafik şeklinde verilmiştir. Sonuçta da görüldüğü gibi sertlik değerinde birinci pasoda büyük bir artış olmuş ve sonraki pasolarda pek fazla artış olmamıştır.



Şekil 10.11 6063 alaşımına ait sertlik ile paso sayısı arasındaki ilişki.

11. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yaptığımız bu çalışmada ticari kalitede seçilen alüminyum alaşımlarına ait tellerin tane boyutunu mikron altı seviyelere indirerek mekanik dayanımları arttırmak için ECAP-Conform prosesi uygulanmıştır. Etial F1 alaşımında 16. pasoya kadar gidilmiş sertlik değeri 30 HV'den 50 HV' ye ve çekme dayanımı 74 MPa'dan 147 MPa'ya çıkarılmıştır.

Seçilen malzemelerin mikro yapıları geliştirilerek tane boyutu küçültülmüş ve sertlik ile uyumlu eşdeğer gerinim oranı elde edilmiştir. Tane boyutunun artması dokuda heterojen yapı dağılımını meydana getirmiştir. Sertlik ve gerinim miktarı başlangıç tane boyutuna bağlı olup maksimum sertlik düşük gerinim oranlarında elde edilmektedir. Tane boyutu azaldıkça uygulanan gerinim oranları da azalmaktadır.

1. Tane boyutunun küçülmesi sertliğin artmasına, çekme dayanımının artmasına ve buna karşın kopma uzamasının düşmesine neden olmaktadır. Uygulanan 16 paso sonucu sertlik değişimi tavllanmış numunelerde % 67 oranında artmıştır. Kopma uzamasın da ise tavllanmış numunede % 98.64 artma olmuştur.
2. Malzeme üretim sırasında sahip olduğu iç gerilmeler ve tane yönlenmesi gibi etkiler nedeniyle doğrudan ECAP işlemine tabi tutulmaması gerekmektedir. Bu nedenle malzemeye yeniden kristalleşme tavi uygulanması gerekmektedir.
3. Optimum tavlama sıcaklığı araştırılarak tane kabalaşmasına fırsat vermeden tavlamanın yapılmasının gerekli olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Onaltı paso sonunda taneler ortalama 1µm boyutuna kadar düşülebilmektedir.
4. ECAP-Conform çalışmasında başlangıç tane boyutu geleneksel yöntemlerle küçültüldükten sonra yüksek aralıktaki alüminyum tellere ECAP prosesi uygulanarak ve paso sayısı artırılarak nanometre boyutlu tane elde edilmesi mümkündür.
5. Kalıp dizaynında yenilikler ve işleyişinde iyileştirmeler yapılarak daha düşük paso değerinde daha düşük boyutlu tanelerinin elde edilmesinin araştırılması önemli bir konudur.

KAYNAKLAR

Aibin, M., Yoshinori, N., Kazutaka, S., Ichinori, S., Naobumi, S., (2005), "Characteristics of Plastic Deformation by Rotary-Die Equal-Channel Angular Pressing" *Scripta Materialia* 52 , 433–437

Azushima, A., Kopp, R.K., Yang, A.D.Y., (2008), "Severe Plastic Deformation (SPD) Processes for Metals" *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 716–735.

Bayrak, Y., Sezer, R., Ekerim, A., (2009), The Effect of Severe Plastic Deformation on the Properties of Alüminyum, 5. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 13-15 Mayıs 2009, Karabük/İstanbul.

Beyerlein, I.J., Tóth L.S., (2009), "Texture Evolution in Equal-Channel Angular Extrusion" *Progress in Materials Science* 54, 427–510.

Cheng, X., Minoru F., Zenji H., Terence, G.L., (2004), "Severe Plastic Deformation as a Processing Tool for Developing Superplastic Metals" *Journal of Alloys and Compounds* 378, 27-34.

Cheng, X., Terence. G.L., (2007), "The Development of Hardness Homogeneity in Aluminum and an Aluminum Alloy Processed by ECAP" *J Matter Sci*, 42:1542-1550.

Çiğdem, M., (2006), İmal Usülleri, Çağlayan kitabevi, İstanbul

Dong, H.S., Byung, C.K., Kyung-Tae, P., Wung, Y.C., (2000), " Mikrostructural Changes Equal Channel Angular Pressed Low Carbon Steel by Statik Annealing" *Acta mater.* 48, 3245-3252

Evcimen, N., Bayrak, Y., Üçüncüoğlu, S., Ekerim, A., (2009a), Ticari Safılıktaki Alüminyumun Mikron Altı Boyutta ECAP Yöntemiyle Üretimini Optimum Koşulları, 4. Alüminyum Sempozyumu, 15-16 Ekim 2009, İstanbul/Türkiye.

Evcimen, N., Üçüncüoğlu, S., Bayrak, Y., Ekerim, A., (2009b), Alüminyumun Plastik Deformasyonla Tane Küçülmesi ve Tarama Elektron Mikroskopisi, 19. Ulusal Elektron Mikroskobu Kongresi, 22-25 Haziran 2009, Trabzon/Türkiye.

Figueiredo, R.B., Megumi, K., Cheng, X., Terence, G. L., (2008), "Achieving Superplastic Behavior in fcc and hcp Metals Processed by Equal-Channel Angular Pressing" *Materials Science and Engineering A* 493 104–110.

Fujda, M., Kvackaj, T., (2007), "Microstructure and Mechanical Properties of EN AW 6082

Aluminium Alloy Prepared by Equal-Channel Angular Pressing”, *Journal of Metals, Materials and Minerals*, Vol.17 No.2, pp. 23-27.

Fukuda, Y., Oh-ishi, K., Horita, Z., Langdon, T.G., (2002), “Processing of a Low-Carbon Steel by Equal-Channel Angular Pressing”, *Acta Materialia* 50 pp.1359-1368.

Georgy, J.R., Ruslan Z.V., Terry C.L., Yuntian, T.Z., (2004), “Continuous Processing of Ultrafine Grained Al by ECAP–Conform” *Materials Science and Engineering A* 382, 30–34,

Guoqun, Z., Shubo, X., Yiguo L., Yanjin, G., Ning, L., Xufang R., (2006) Grain Refinement Mechanism Analysis and Experimental Investigation of Equal Channel Angular Pressing for Producing Pure Aluminum Ultra-fine Grained Materials” *Materials Science and Engineering A* 437, 281–292.

Horita, Z., Fujinami, T., Nemoto, M., Longdon, T.G., (2001), “Improvement of Mechanical Properties for Al Alloys Using Equal-Channel Angular Pressing” *Jornal of Materials Processing Technology*.

Hwang, B., Gonkim, Y., Lee, S., Hwang, D.Y., Shin, D.H., (2007), “Dynamic Torsional Deformation Behavior of Ultra-Fine-Grained Dual-Phase Steel Fabricated by Equal Channel Angular Pressing” *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, Volume 38A.

Jianyu, H., Yuntian, T.Z., David, J.A., Xiaozhou, L., Terry, C.L., Robert J. A., (2003), “Development of Repetitive Corrugation and Straightening” *Materials Science and Engineering A* 371, 35–39

Jing-hua, J., Ai-bin, M., Saito, N., Watazu, A., Ping-hua, L., Nishida, Y., (2007), “Effect of Microstructures on Superplasticity of Al- 1 1 %Si Alloy” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 17 509-5 13.

John, D.V., (1975),”*Fundamental of Physical Metallurgy*” Department of Metallurgy Iowa State University Ames, Iowa.

Kamachia, M., Aida, T., Takeuchi, T., Kusui, J., Yoke, K., (2000), “ Mikrostructural Characteristics and Superplastic- Like Behavior in Aluminum Powder Alloy Consolidated by Equal-Channel Angular Pressing” *Acta matter.* 48, 2625-2632.

Kamachia, M., Furukawa, M., Horita, Z., Terence. G.L., (2003), “Equal-Channel Angular Pressing Using Plate Samples” *Materials Science and Engineering A*361 258–266.

Kassner, M.E., (2008), *Fundamentals of Creep in Metals and Alloys*, Oxford, United

kingdom.

Kim, W.J., Kim, J.K., Choo, W.Y., Hong, S.I., Lee, J.D., (2001a), “Large Strain Hardening in Ti–V Carbon Steel Processed by Equal Channel Angular Pressing” *Materials Letters* 51,177–182.

Kim, J., Kim, I., Dong, H.S., (2001b), “Development of Deformation Structures in Low Carbon Steel by equal Channel Angular Pressing” *Scripta Materialia* 45 421-426.

Lapovok, R., Estrin, Y., Popov, M.V., (2008), “Enhanced Superplasticity of Magnesium Alloy AZ31 obtained Through Equal-Channel Angular Pressing With Back-Pressure” *J Mater Sci* 43:7372–7378

Liu, F.C., Ma, Z.Y., (2008), “Achieving Exceptionally High Superplasticity at High Strain Rates in a Micrograined Al–Mg–Sc alloy Produced by Friction Stir Processing” *Scripta Materialia* 59 882–885.

Mao, J., Kang, S.B., Park, J.O., (2005), “Grain Refinement, Thermal Stability and Tensile Properties Aluminum Alloy After Equal Channel Angular Pressing” *Journal of Materials Processing Technology* 159 314-320.

McQueen, H.J., (2004), “Development of Dynamic Recrystallization Theory” *Materials Science and Engineering A* 387–389 203–208.

Medeiros, N., Baptista, S.R., Moreira, L.P., Lins, J.F.C., de Gouvêa, J.P., (2007), “Computational Simulation of an IF-Steel Deformed by Equal Channel Angular Pressing Via the Finite Element Method”, *Mechanics of Solids in Brazil*, pp. 1-12.

Minoru, F., Yoshinori, I., Horita, Z., Minoru, N., Terence G.L., (1998), “The Shearing Characteristics Associated with Equal-Channel Angular Pressing” *Materials Science and Engineering A257*, 328–332.

Minoru, F., Horita, Z., Nemoto, M., Terence G.L., (2001), “Review Processing of Metals by Equal-Channel Angular Pressing” *Journal of Material Science* 36, 2835 – 2843.

Nagasekhar, A.V., Tick-Hon, Y., (2004), “Optimal Tool Angles for Equal Channel Angular Extrusion of Strain Hardening Materials by Finite Element Analysis” *Computational Materials Science* 30, 489–495.

Nagasekhar, A.V., Tick-Hon, Y., Seow, H.P., (2007), “Deformation Behavior and Strain Homogeneity in Equal Channel Angular Extrusion/Pressing” *Journal of Materials Processing Technology* 192–193, 449–452.

- Nakashima, K., Horito, Z., Nemoto, M., Terence, G.L., (1997), "Influence of Channel Angle on the Development of Ultrafine Grains in Equal-Channel Angular Pressing" *Acta Mater.* Vol. 46, No. 5, pp. 1589-1599.
- Perez, C.J. L., Luri, R., (2008), "Study of the ECAE Process by the Upper Bound Method Considering the Correct Die Design" *Mechanics of Materials* 40, 617-628.
- Ruslan Z.V., (1997), "Structure and Mechanical Properties of Ultrafine-Grained Metals" *Materials Science and Engineering A234-236*, 59-66.
- Ruslan.Z.V., Islamgaliev, R.K., Alexandrov, I.V., (2000), "Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation" *Progress in Materials Science* 45 103-189.
- Ruslan, Z.V., Terence, G.L., (2006a), "Developments in the Use of ECAP Processing for Grain Refinement" *Rev. Adv. Mater.Sci.* 13, 15-26.
- Ruslan Z.V., Terence G.L., (2006b), "Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement" *Progress in Materials Science* 51,881-981.
- Ruslan Z.V., Islamgaliev, R. K., Yunusova, N. F., (2006), "Superplasticity of Nanostructured Materials" *Metal Science and Heat Treatment* Vol. 48, Nos. 1 – 2.
- Segal, V.M., (1994), "Materials Processing by Simple Shear" *Materials Science and Engineering A197* 157 164.
- Shimizu, I., (2008), "Theories and Applicability of Grain Size Piezometers: The Role of Dynamic Recrystallization Mechanisms" *Journal of Structural Geology* 30 899-917
- Shubo, X., Guoqun Z., Yiguo L., Yanjin G., (2006), "Numerical Studies on Processing Routes and Deformation Mechanism of Multi-Pass Equal Channel Angular Pressing Processes" *Journal of Materials Processing Technology* 176, 251-259
- Shunqi, W., Wei, ., Wang, Y., Liping, B., Chen, K., (2008), "A Modified Die for Equal Channel Angular Pressing" *Journal of Materials Processing Technology Protec-12280*; No. of Pages 5.
- Skrotzki, W., Scheerbaum, N., Oertel, G., Brokmeier, H.G., Suwas, S., Toth, L.S., (2007), "Recrystallization of High-Purity Aluminium During Equal Channel Angular Pressing" *Acta Materialia* 55 2211-2218.
- Tjong, S.C., Chen, H., (2004), "Nanocrystalline Materials and Coatings" *Materials Science and Engineering R* 45, 1-88.

Turba, K., Malek, P., Cieser, M., (2007), "Superplasticity in an Al-Mg-Zr-Sc Alloy Produced by Equal-Channel Angular Pressing" *Materials Science and Engineering A* 462 91-94

Utsunomiya, H., Hatsuda, K., Sakai, T., Saito, Y., (2003), "Continuous Grain Refinement of Aluminum Strip by Conshearing" *Materials Science and Engineering A* 372, 199-206.

Zhao, X., Jing, T.F., Gao, Y.W., Zhou, J.F., Wang, W., (2004), "A new SPD Process for Spheroidal Cast Iron" *Materials Letters* 58, 2335-2339

Zhu, Y. T., Terry C.L., (2000), "Observations and Issues on Mechanisms of Grain Refinement During ECAP Process" *Materials Science and Engineering A* 291 46-53

Zhu, Y.T., Terry C.L., Terence, G.L., (2004), "Performance and Applications of Nanostructured Materials Produced by Severe Plastic Deformation" *Scripta Materialia* 51, 825-830.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 12.09.1982

Doğum yeri Giresun

Önlisans 2000-2002 İstanbul Üniversitesi, Teknik Bilimler M.Y. O,
Makine Bölümü

Lisans 2002-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalürji Fak.,
Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü