

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**EŞ KANALLI AÇILI PRESLEME İLE AŞIRI
PLASTİK DEFORMASYON UYGULANAN 2024
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YAŞLANDIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. İzer FRANKO

**Anabilim Dalı: MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ
Programı: MALZEME VE İMALAT**

MAYIS 2007

ÖNSÖZ

Çalışmamı hazırlamam sırasında bana yol gösteren ve emeklerini benden esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. R. Murat TABANLI'ya, her problemde sonsuz sabrıyla yardımına koşan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Turgut GÜLMEZ'e, deneyin gerçekleşmesinde önemli katkıları bulunan başta emekli teknisyen Sami FİDANLI olmak üzere teknisyen Osman ÇELEBİ ve Erdal DİNÇ'e, her adımında desteklerini hissettiğim kıymetli annem ve babama teşekkürü borç bilirim.

Mayıs 2007

İzer FRANKO

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	iv
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix
1. GİRİŞ	1
2. AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON	2
2.1 APD türleri	3
2.2 APD için gerekli koşullar	9
2.3 APD Uğramış Malzemelerin Özellikleri	9
2.3.1 Dayanım ve Süneklik	9
2.3.2 Diğer Mekanik Özellikler	10
2.3.3 Isıl Özellikler	11
2.3.4 Korozyon Dayanımı	12
2.3.5 Fiziksel Özellikler	12
2.4 Uygulama Alanları	12
2.5 İşlenebilirlik	14
3. EŞ KANALLI AÇILI PRESLEME	16
3.1 EKAP Çalışma Prensibi	17
3.2 EKAP Karakteristikleri	20
3.2.1 Mikroyapısal Karakteristikler	20
3.2.2 Mekanik Karakteristikler	28
3.3 Alüminyumun EKAP ile Şekillendirilmesi ve Yaşlandırılması	30
3.3.1 Alüminyumun Yaşlandırılması	30
3.4 Alüminyumun EKAP ile şekillendirilmesi	33
4. DENEY DÜZENEGİ	36
4.1 Çözeltiye Alma Isıl İşlemi Deney Düzenegi	36
4.2 Eş Kanallı Açılı Presleme Deney Düzenegi	37
4.3 Yaşlandırma Deney Düzenegi	41
4.4 Sertlik Ölçme Düzenegi	42
5. DENEY SONUÇLARI	43
6. SONUÇLARIN YORUMLANMASI	50
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ	56

KISALTMALAR

EKAP	: Eş Kanallı Açılı Presleme
HPT	: Yüksek Basınç Burulması
ARB	: Biriktirmeli Hadde Yapıştırması
DCAP	: Farklı Kesitli Kanal İçinde Presleme
CEC	: Tekrarlı Ekstrüzyon Basmalı
CGP	: Engellenmiş Kanallı Presleme
APD	: Aşırı Plastik Deformasyon

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
TABLO 5.1 ÇÖZELTİYE ALMA ISIL İŞLEMİ SONRASI SERTLİK DAĞILIMI.....	52
TABLO 5.2 BİR PASO EKAP SONRASI MALZEME SERTLİK DAĞILIMI.....	53
TABLO 5.3 BİR PASO EKAP SONRASI YAŞLANDIRILAN NUMUNELERİN SERTLİK DAĞILIMI....	54
TABLO 5.4 ÇÖZELTİYE ALMA ISIL İŞLEMİ SONRASI NUMUNELERDE SERTLİK DAĞILIMI.....	55
TABLO 5.5 NUMUNELERDE BİR EKAP SONRASI SERTLİK DAĞILIMI.....	55
TABLO 5.6 NUMUNELERDE İKİ PASO EKAP SONRASI SERTLİK DAĞILIMI.....	56
TABLO 5.7 ART ARDA İKİ PASO EKAP'LANAN VE YAPAY YAŞLANDIRILAN MALZEMENİN SERTLİK DAĞILIMI.....	56

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : HPT kalıbı	5
Şekil 2.2 : ARB ile plastik deformasyon	6
Şekil 2.3 : DCAP kalıbı	7
Şekil 2.4 : CEC kalıbı	7
Şekil 2.5 : CGB ile parça deformasyonu	8
Şekil 2.6 : Klasik bir EKAP kalıbı	9
Şekil 2.7 : ECAP ile üretilmiş Ti çubuk	13
Şekil 2.8 : Kemiklerde kullanılan nanoyapılı Ti alaşımlı implantlar	13
Şekil 3.1 : EKAP çalışma sistemi	16
Şekil 3.2 : EKAP ile deformasyonun oluşumu	18
Şekil 3.3 : 0	19
Şekil 3.4 : EKAP kalıp açıları	21
Şekil 3.5 : EKAP rotaları	22
Şekil 3.6 : 1.basma sonucu oluşan deformasyon	22
Şekil 3.7 : A ve B rotalarında 2.basma sonucu oluşan deformasyon	23
Şekil 3.8 : C rotasında 2.basma sonucu oluşan deformasyon	24
Şekil 3.9 : A rotasında 3., 4. ve 5. basma sonucu oluşan deformasyon	25
Şekil 3.10 : Ba ve Bc rotalarında 3., 4. ve 5. Basma işlemiyle deformasyon	26
Şekil 3.11 : C rotasında 3., 4. ve 5.Basma sonucunda oluşan deformasyon	28
Şekil 3.12 : 4 kere EKAP'lanan saf alüminyumda x, y ve z'de içyapı	29
Şekil 3.13 : 8 kere EKAP'lanan Al alaşımının süperplastikliği	30
Şekil 3.14 : Isıtmalı EKAP kalıbı	32
Şekil 3.15 : Yaşlanma mekanizması	37
Şekil 4.1 : Dairesel kesitli fırın	38
Şekil 4.2 : EKAP kalıbı	38
Şekil 4.3 : EKAP kalıbı ve basılmış numune	38
Şekil 4.4 : Kalıp kapağı	39
Şekil 4.5 : Deneyde kullanılan EKAP kalıbının teknik resmi	39
Şekil 4.6 : AA 2024 alüminyum alaşımlı numuneler	40
Şekil 4.7 : Ana ıstampa	40
Şekil 4.8 : Dartec çekme-basma cihazı	41
Şekil 4.9 : Yapay yaşlandırma düzeneği	42
Şekil 5.1 : Farklı T6 sıcaklıklarının EKAP'lanmış 2024'e etkileri	45
Şekil 5.2 : EKAP'lanmış yaşlandırılmış 2024 malzemesinde çekme deneyi	48
Şekil 5.3 : Sadece yaşlandırılan numunede çekme deneyi	49
Şekil 5.4 : Sertliklerin karşılaştırılması	49

SEMBOL LİSTESİ

ϵ	: Birim şekil değişimi
Φ	: Kalıp açısı
Ψ	: Dış köşe açısı
d	: Atom çapı
N	: Kalıptan geçiş sayısı
σ	: Akma dayanımı

EŞ KANALLI AÇILI PRESLEME İLE AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON UYGULANAN 2024 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ YAŞLANDIRILMASI

ÖZET

Bu çalışmada, aşırı plastik deformasyon metotlarından eş kanallı açılı preslemenin (EKAP) ve ardından yaşlandırmanın 2024 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Aşırı plastik deformasyon (APD), parçaya yoğun bir birim şekil değişimi uygulanması ve dislokasyonların yeniden düzenlenmesi sonucunda geleneksel yöntemlere kıyasla çok daha küçük tane büyüklüğünün elde edilmesiyle sonuçlanan bir plastik şekil değişim yöntemidir. Malzemelerde alışılmamış bir özellik olan süneklik ve yüksek dayanım kombinasyonunu sağlayan, aşırı plastik yöntemlerinden en bilineni olan eş kanallı açılı presleme (EKAP), günümüzde uygulama alanı olarak kendine en çok yer bulma potansiyeli gösteren yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu deneysel çalışmada EKAP uygulanan ve ardından yaşlandırılan AA 2024 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri iyileştirilmiş, son derece yüksek dayanım ve süneklik değerleri elde edilmiştir. Malzemenin sertliği %70 varan oranlarda artarken, malzemenin akma dayanımı %50'ye varan değerlerde artış göstermiş, malzemenin sünekliğinde ise %20'yi geçmeyen bir azalma görülmüştür.

Çalışma başlıca altı ana bölümden oluşmaktadır. Çalışman birinci kısımda kısaca deformasyon türleri, ikinci kısımda aşırı plastik deformasyon ve çalışma mekanizması, üçüncü kısımda eş kanallı açılı presleme anlatılmıştır. Dördüncü bölümde deney düzeneği anlatılmış ve ardından beşinci kısımda ise deney verileri aktarılmıştır. Altıncı kısımda deney verileri yorumlanmış ve en son kısımda da ileride yapılabilecek çalışmalarda dikkat edilmesi gereken başlıca noktalar belirtilmiştir.

Bu tezin yazılma amaçlarından biri de ülkemizde pek yaygın olmayan aşırı plastik deformasyonunun potansiyelini ve uygulanabilirliğini göstermektir.

ARTIFICIAL AGEING OF AA 2024 AFTER BEING SUPER PLASTIC DEFORMED BY EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING

SUMMARY

At this work, precipitation hardening after the effect of severe plastic deformation on aluminum alloys was studied. Severe plastic deformation (SPD), is a method, in which the material is subjected to an intensive plastic deformation, thus the dislocations are rearranged and much smaller grains are obtained in comparison with traditional methods. The most popular severe plastic deformation method is equal channel angular pressing (ECAP), which provides an unusual combination of ductility and high strength.

At this experimental work, an aluminum alloy AA 2024 was ECAPed and naturally aged. The specimens showed unique properties like high strength and good ductility after process. The hardness of the material has increased like 70% and the yield stress over 50%. The ductility of the material has decreased less than 20%.

The work consists of six chapters. In the first chapter deformation types were explained, in the second chapter severe plastic deformation and its working mechanism were described, and in the third one the equal channel angular pressing was explained. In the fourth chapter experimental setup was explained, and in the fifth chapter the results of the experiments are presented. Finally, in the last chapter the important points have been concluded.

One of the reasons of this work was to show the importance and applicability of severe plastic deformation, which is quite new in Turkey.

1. GİRİŞ

Katı cisimlerde şekil değiştirme genel olarak üç şekilde meydana gelir. Bunlar elastik, plastik ve elasto – plastik şekil değiştirme diye adlandırılırlar.

Elastik şekil değiştirmede herhangi bir zorlama etkisi altında malzemede şekil değiştirme meydana gelir. Fakat kuvvetin kalkması ile şekil değiştirme ortadan kalkar. Bütün malzemeler herhangi bir zorlama sonunda az veya çok malzeme özelliklerine ve zorlamanın büyüklüğüne bağlı olarak şekil değiştirir. Bu bakımdan bütün malzemelerde bir elastiklik sınırı olur, buna tekabül eden yük veya gerilme “elastiklik sınırı yükü” veya “gerilmesi” olarak adlandırılır.

Plastik şekil değiştirme yapılan zorlama sonunda malzemede kalan şekil değişimine verilen addır.

Elasto – plastik şekil değiştirmede ise zorlanan malzemede bir miktar şekil değiştirme meydana gelir. Zorlama kaldırıldığında şekil değiştirmenin bir kısmı ortadan kalkar, fakat bir kısmı kalır. Ortadan kalkan kısım elastik şekil değiştirme, kalan kısım ise plastik şekil değiştirmedir.

Bir katı cismin şeklini başka bir şekle dönüştürmek amacıyla uygulanan ve bu işlem sırasında cismin malzemesinde kütle ve bileşim değişikliğine yol açmayan üretim yöntemlerine plastik şekil verme yöntemleri denir. Tüm plastik şekil verme yöntemlerinde malzeme, çekme, basma ve kayma gibi temel şekil değişimlerinden birinin veya birkaçının etkisinde kalır. Plastik şekil vermede hacim sabitliği ilkesi esastır. Malzeme, takımın uyguladığı zorlamanın etkisi ile kalıcı (plastik) deformasyonlar göstererek istenilen biçime ve boyutlara ulaşır[25].

2. AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON

Aşırı plastik şekil değişimi (APŞD)ya da diğer adıyla aşırı plastik deformasyon (APD) parçaya yoğun bir birim şekil değişimi uygulanması ve dislokasyonların yeniden düzenlenmesi sonucunda geleneksel termomekanik yöntemlere kıyasla çok daha küçük, mikronaltı hatta nanometre boyutlarında taneler elde edilmesiyle sonuçlanan plastik şekil değişimidir. [1] Aşırı plastik deformasyon bir metalik malzemenin genellikle düşük sıcaklıklarda (erime sıcaklığının Kelvin cinsinden 0.3 katının altında) yüksek miktarlarda plastik birim şekil değişimine maruz bırakılarak plastik deformasyona uğraması olarak bilinir[25].

Son yıllarda aşırı plastik deformasyon (APD) ile şekillendirilmiş nanoyapılı malzemeler bilim adamlarının yoğun ilgisini çekmeye başlamıştır. Bilim adamlarının ilgisini çeken sadece nanoyapılı malzemelerin doğasında zaten bulunan fiziksel ve mekanik özellikler değil, APŞ ile üretilen nanoyapılı malzemelerin toz metalurjisi gibi diğer yöntemlerle üretilen nanoyapılı malzemelere göre sahip oldukları üstünlüklerdir.[4]

Nano yapılı malzemeler en azından bir ekseninde 1.100 nm sınırında mikroyapı içeren malzemeler olarak bilinirler. APD ile elde edilen malzemelerin genel olarak tane boyutları 100.1000nm arasında değişse de oluşan alttaneleri genelde 100 nm'nin altında olduğundan dolayı nano yapılı malzeme olarak adlandırılırlar.[15] Nano yapılı malzemelerin sentezlenmesinde birbirini tamamlayan iki çeşit yöntemden söz edilebilir. Birincisi aşağıdan-yukarı yaklaşımıdır. Bu yaklaşımda nanoyapılı malzemeler tek tek atomların birleşmesinden ya da nano partiküllerin bir araya getirilmesinden oluşmaktadır. Soygaz yoğunlaştırması, elektrodepozisyon gibi yöntemler burada sayılabilir. İkinci yaklaşım ise tepeden-aşağı yöntemlerdir. APD da yüksek birim şekil değişimine maruz kalan ama kesitinde değişimin olmadığı bir yöntem olarak ikinci tarz bir yöntemdir.

Soğuk haddelemede ya da çekme gibi yoğun deformasyonlarla düşük sıcaklıklarda mikroyapının yüksek miktarlarda küçülmesi sağlanabilmektedir ancak oluşan

yapılarda düşük açılı misoryantasyonlara rastlanmaktadır ve malzemenin sünekliği azalmaktadır[13]. APD ile oluşan nanoyapılarda ise tane boyutu 100.200nm olan tanelervardır ve yüksek açılı tane sınırları görülmektedir. Bu tarz nanoyapıların oluşması APD metotlarının düşük sıcaklıklarda çok yüksek deformasyona neden olduğu sonucunu göstermektedir.[4]

Metalik malzemelerde tane boyutunu ultra küçültmenin iki tane potansiyel avantajı bulunmaktadır [3]. Birincisi aşağıda gösterilen Hall.Petch [2] bağlantısından da görülebileceği gibi tane boyutunda küçülmenin malzemenin akma dayanımını arttırması ve aynı zamanda beklenmedik bir biçimde malzemenin tokluğunun artmasıdır. Bir diğer avantaj ise malzemenin süperplastiklik özelliği kazanabilmesidir [3].

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (1.1)$$

σ : malzemenin akma gerilmesi

σ_0 ve k : malzeme parametresi

d : tane çapı

APD ile şekillendirilmiş metalik malzemelerin tane boyutları aşırı derecede küçülürler. Eğer bu ultra küçük taneler yüksek sıcaklıklarda da kararlılıklarını koruyabilirlerse, süperplastik olmayan alaşımlarda yüksek akma dayanımlarına ve süperplastik uzamalara rastlama potansiyeli de bulunmaktadır.[7]

APD yığın halinde nano yapıları malzeme üretimi için son derece idealdir. APD ile elde edilen malzemelerin işlenebilirliği, dövülebilirliği ve şekil değiştirilebilirliği düşük maliyetle gerçekleştirilmektedir.

APD ile üretilmiş nanoyapılı malzemelerin tıbbi implantlarda, biomedikal aletlerde ve yüksek performanslı bisikletlerde kullanılabilmektedir. Daha yeni metodlar keşfedildikçe de bu malzemelerin kullanım alanı da genişleyecektir.[15]

2.1 APD türleri

Bilindiği gibi düşük sıcaklıklarda uygulanan aşırı plastik deformasyon mikroyapıda önemli küçülmelere neden olmakta ve yüksek açılı tane sınırlarına neden olmaktadır. APD ile üretilen malzemeler soygaz yoğunlaştırması, elektrodpozisyon gibi

yöntemlerle üretilen malzemeler gibi eşsiz özelliklere ve yüksek dayanımlara sahiptirler.

APD yöntemlerinin bu diğer yöntemlere göre üstünlükleri mevcuttur, boşluksuz mikronaltı ya da nanoyapılı malzeme üretilmesini sağlar, ayrıca üretilen malzemelerin dayanımlarıyla beraber süneklikleri de bazı durumlarda çok yüksek değerler çıkabilmektedir. Diğer yöntemlerle üretilen nanaoyapılı malzemelerde söz konusu olmayan bu durumlardan dolayı SPD araştırmacıların ilgisini çekmektedir [16].

APD ile parçaları şekillendiren başlıca proses türleri aşağıda sıralanmıştır [13]:

Eş kanallı açılı presleme (ECAP)

Yüksek basınç burulması (HPT)

Biriktirmeli hadde yapıştırması (ARB)

Farklı kesitli kanal içinde açılı presleme (DCAP)

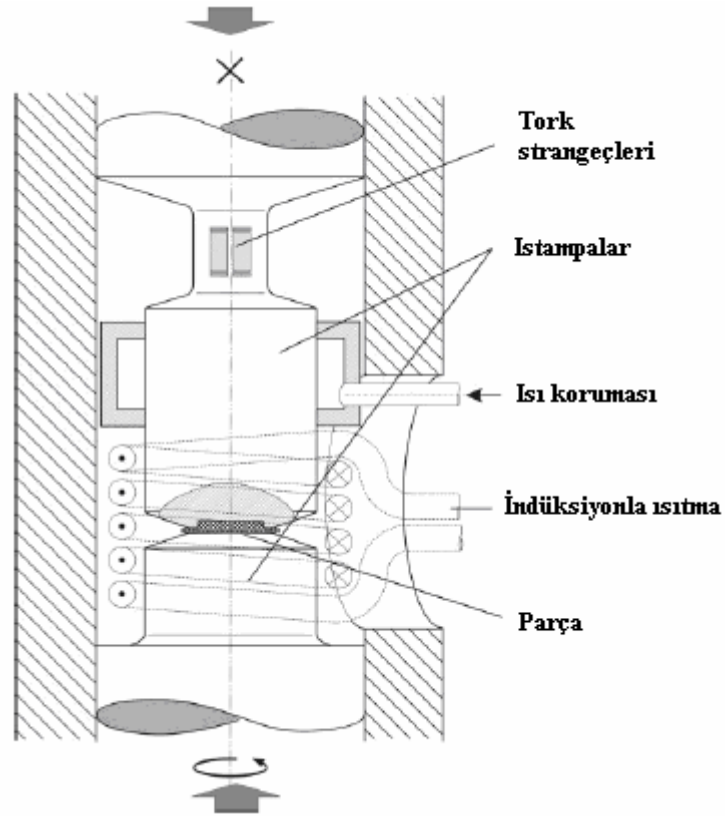
Tekrarlı ekstrüzyon basması (CEC)

Engellenmiş kanallı presleme (CGP)

HPT(High Pressure Torsion), yüksek basınç burulması, -196 ve 500 °C, arasında uygulanabilen[16] bir APD yöntemidir.

Bu yöntem disk tipli parçaların üretiminde kullanılabilir. Hidrostatik basınç altında çalışan iki ıstampadan alt ıstampa döner ve parça deformasyona uğrar. Burulma mekanizmasının etkin olduğu bu yöntemde diğer APD yöntemleriyle elde edilemeyecek kadar yüksek birim şekil değişimleri elde etmek mümkündür.[4.16]

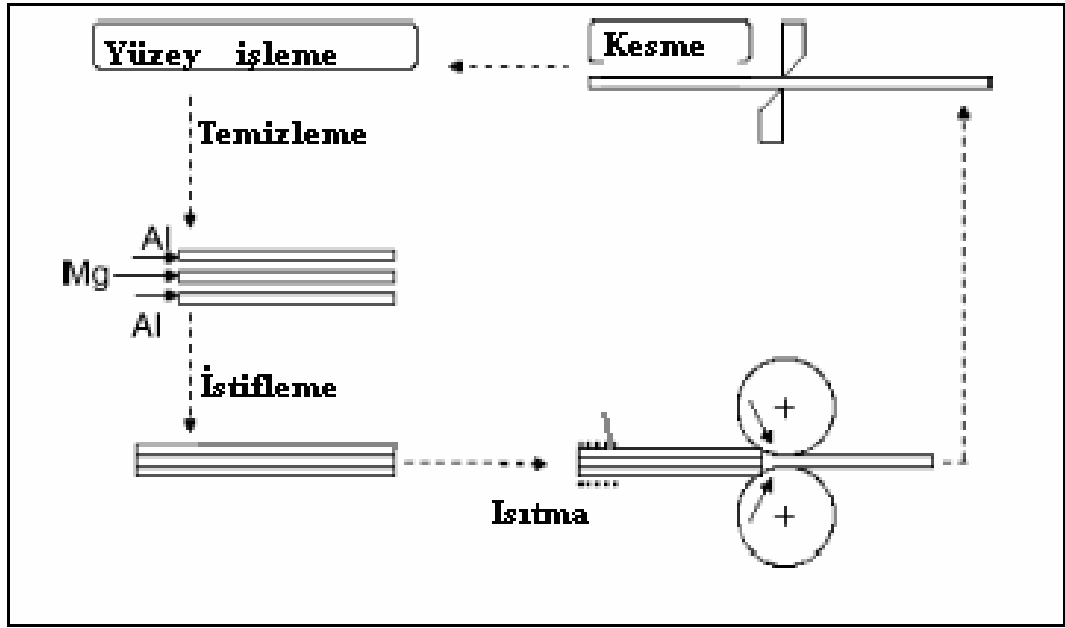
Elde edilen parçaların çapları 10-20 mm arasında, kalınlıkları ise 0,2-0,5mm arasında değişmektedir.[4]



Şekil 2.1 HPT kalıbı [16]

ARB(Accumulative roll bonding), biriktirmeli hadde yapıştırması, ultra küçük boyutta, birkaç yüz nanometre boyutunda tane boyuna sahip malzeme üretiminde kullanılan, çeşitli metal ve alaşımlarında başarıyla uygulanabilen ve yığın SPD üretiminde en çok gelecek vaat eden yöntemlerin başında gelmektedir. ARB'nin en önemli özelliği diğer APD yöntemlerine nazaran daha homojen bir içyapı sunmasıdır.[18]

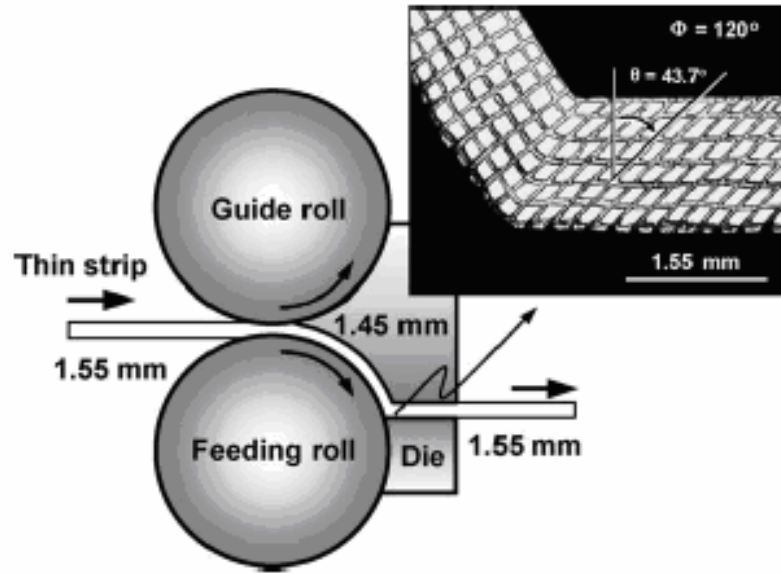
ARB işlemi yarısı haddelenmiş malzemenin ikiye bölünüp istiflenip tekrar haddelenmesidir. Altı tekrardan sonra yapı tamamen homojenleşmekte ancak yüksek sayıda tekrarlardan sonra ise malzemede hasar meydana gelmeye başlamaktadır.[13-18]



Şekil 2.2 ARB ile plastik deformasyon[19]

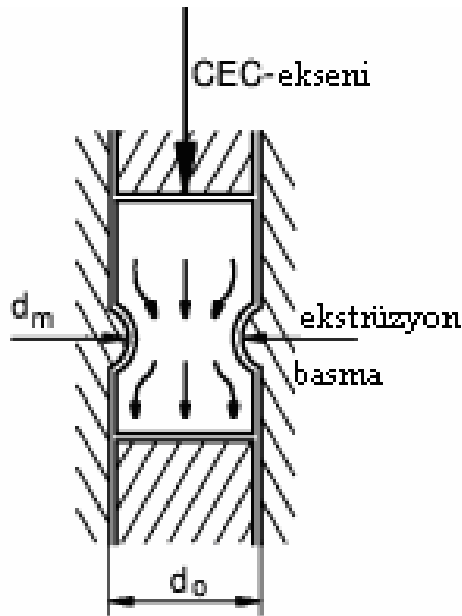
DCAP, dissimilar channel angular pressing, farklı kanallı açılı presleme ECAP'a benzemekle beraber, kalıbın eş eksenli olmaması ve haddeyle beraber yapılması nedeniyle daha farklı bir yöntemdir. Dışarıya açılan kanal parçanın girdiği kanaldan daha geniştir.[20]

Levhalar ECAP yöntemiyle şekillendirilememektedir. DCAP bu tür levhaların şekillendirilmesinde, tane iyileştirilmesinde, levha kesitlerde bir değişiklik olmadan uygulanan bir deformasyon yöntemidir. Haddeden çıkan levhanın yaklaşık 120 derecelik bir kalıptan çıkarak plastik şekil değişimi esasına dayanmaktadır.



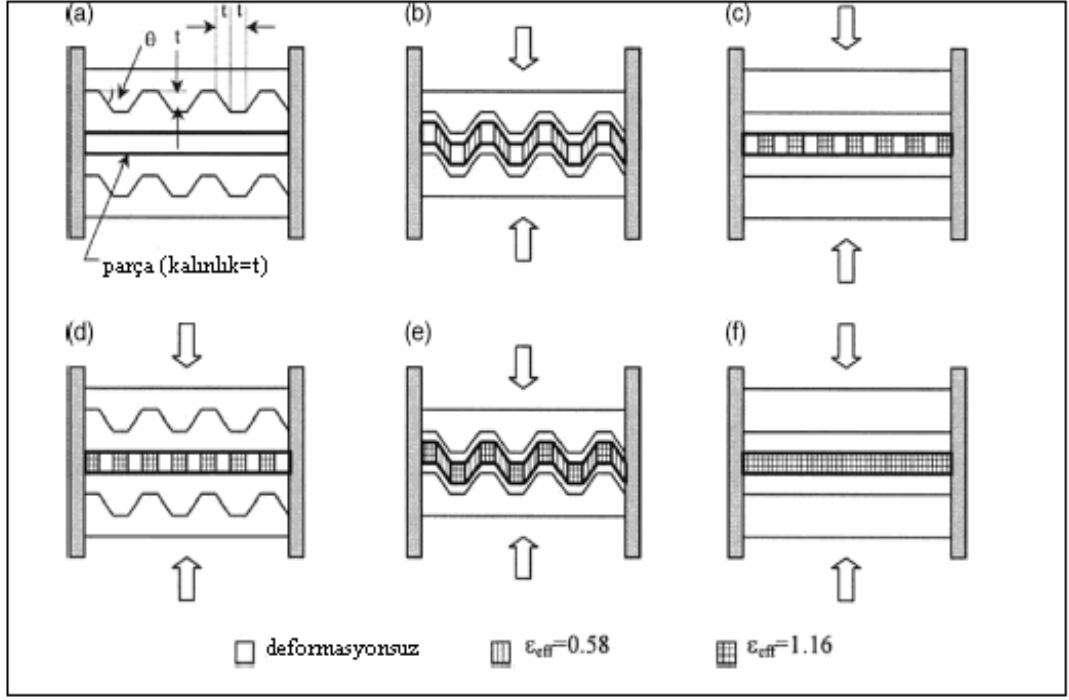
Şekil 2.3 DCAP kalıbı [21]

CEC, cyclic extrusion compression, tekrarlı ekstrüzyon basması Polonya’da geliştirilen bir yöntem. Kalıpta eş çaplı iki kanal ve bunların arasında daha küçük çaplı kanal bulunmaktadır. Üst taraftaki eş çaplı kanaldan numune itilerek düşük çaplı kanaldan geçesi sağlanıp bir çevrim tamamlanmaktadır. Daha sonra parça tekrar yukarı itilerek ikinci çevrimini yapması sağlanır. Bu çevrimlerin sayısı 36’yı bulabilmektedir.[22]



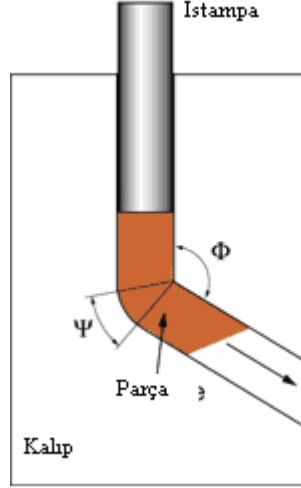
Şekil 2.4 CEC kalıbı [22]

CGP, constrained groove pressing, engellenmiş kanallı presleme, kanallı dişi ve erkek iki kalıp arasında sıkıştırılan levhanın defalarca deformasyona maruz kalmasıyla parçanın aşırı plastik deformasyona kalmasını sağlayan bir yöntemdir. Parça her deformasyondan sonra 180 derece döndürülmektedir. Bu yöntemde işlenebilen parça boyutları son derece küçüktür, ayrıca tane küçülmesi diğer SPD yöntemleri kadar etkili değildir.[23]



Şekil 2.5 CGB ile parça deformasyonu [23]

EKAP, equal channel angular pressing, eş kanallı açılı presleme farklı dereceli açılarla birbirine bakan iki eş boyutlu iki kanal arasında malzemenin preslenerek malzemeye kayma ile yoğun plastik şekil değişimi verme yöntemidir.[13,25]



Şekil 2.6 Klasik bir EKAP kalıbı

2.2 APD için gerekli koşullar

Malzemeleri APD ile nanoyapılı hale getirebilmek için dikkat edilmesi gereken bazı noktalar şunlardır:

- Elde edilecek malzemede oluşan tane sınırları yüksek açılı olmalıdır ancak bu şekilde malzemenin özelliklerinden belirgin farklar elde edilebilir.
- Elde edilecek nano malzemenin yapısının her yerde homojen olması gerekmektedir ancak bu şekilde kararlı yeni özelliklere sahip olunabilir.
- Malzemeler büyük plastik deformasyonlara maruz kaldıkları halde hasar içermemeleri gerekir.

Klasik plastik şekil değişimi yöntemlerinde haddeleme, çekme ya da ekstrüzyonda bu tür özelliklerin sağlanması beklenemez.[4]

2.3 APD Uğramış Malzemelerin Özellikleri

2.3.1 Dayanım ve Süneklik

Daha evvelden de bahsedildiği gibi kaba taneli yapılarda malzemelerin dayanımları Hall-Petch eşitliğiyle hesaplanabilmekteydi. Nano yapılı malzemeler bu eşitliğe uymakla beraber tane boyutu daha da küçüldükçe malzemenin akma dayanımının artışı daha az olmaktadır. Belli bir kritik tane boyutunun altında Hall-Petch bağıntısının tam tersini gözlemlemek de mümkün olmaktadır. Hem yüksek dayanım hem de yüksek süneklik istendiği durumlarda çok küçük tane boyutu istenmeyebilir. Süneklik nanoyapılı malzemelerde genelde azalan tane boyutuyla azalır. Özellikle

tane boyutu 20 nm'un altında olan malzemelerde süneklik ve dayanım daha büyük taneli malzemelerin dahi altına düşmektedir. İşte nano yapıları malzemelerde hem dayanımın hem de sünekliğin optimum olduğu bir sınır mevcuttur.

Nano tozların birleştirilmesiyle elde edilen malzemeler genellikle son derece gevrek olmaktadır, bunun da başlıca nedeni sıkışmış gazlar, oksidasyon ve porozitedir. Elektrodepozisyon yöntemiyle elde edilmiş nanoyapılı filmler de gene aynı şekilde elektrolitten kalan impuriter yüzünden gevrek olabilmektedirler. APD yöntemiyle üretilmiş malzemeler ise kirlilik ve porozite görülmemekte ve bu tür malzemeler genellikle yüksek dayanım ve sünekliğe sahip olmaktadır. Gösterilebilir ki, APD yöntemleri sünekliği, geleneksel plastik şekil verme yöntemlerine kıyasla çok daha az azaltmaktadır. Örneğin AA 3004 alüminyum alaşımının EKAP'lanması ve soğuk haddeyle işlenmesi karşılaştırıldığı zaman EKAP'lanan malzemenin haddelenen malzemeye kıyasla sünekliğini çok daha fazla koruduğu fark edilmiştir.

APD ile üretilen bazı malzemelerde hem yüksek dayanım hem de yüksek süneklik kombinasyonunun rastlanabildiği alışılmamış durumlar söz konusudur. Örnek vermek gerekirse üst üste 16 kere EKAP'lanan saf bakır alaşımlarında süneklik, EKAP'lanmamış kaba taneli yapıyla aynı kalırken malzemenin akma dayanımı başlangıç dayanımının birkaç katına çıkabilmektedir. Yüksek dayanım ve yüksek süneklik kombinasyonu malzemelerde çok nadir rastlanan bir özelliktir. Bu kombinasyona sahip malzemeler özellikle uzay gemisi yapımında ya da spor eşyaları üretiminde yoğun bir biçimde tercih edilmektedir. Malzemenin bu kombinasyona sahip olması için gereken deformasyon mekanizmaları tanınsa da ne yazık ki bu kadar iyi özelliklere sahip bir malzeme elde etmenin iç mekanizması günümüze kadar tam olarak anlaşılmış değildir.[15]

2.3.2 Diğer Mekanik Özellikler

Dayanım ve süneklik nano yapıları malzemelerde aranan en önemli iki mekanik özellik olmasına rağmen, yapısal uygulamalar APD ile üretilmiş malzemelerde kırılma tokluğu, yorulma dayanımı ve aşınma dayanımı gibi özelliklerde de araştırmalar söz konusudur.

APD ile üretilen malzemelerde kırılma tokluğu şu ana kadar incelenememiştir, çünkü kırılma tokluğu için yapılması gereken ölçümler büyük ölçek parçalara ihtiyaç duymaktadır, günümüz teknolojisinde de bu boyutlarda APD ile parça üretimine izin

vermemektedir. Gelecek yıllarda ilerleyen APD teknolojisiyle kırılma tokluğunu ölçmeyi sağlayacak büyüklükte parçaların üretilebileceğine inanılmaktadır.

Yorulma dayanımı ise APD’nda araştırma konusu olmuş başka önemli bir özelliktir. İlk araştırmalar, birçok APD yönteminin iyi bir yüksek devirli yorulma dayanımına ancak kötü bir düşük devirli yorulma dayanımına sahip olduğunu göstermiştir. Bu durumun açıklanması da malzemelerde yüksek devirli yorulma dayanımının malzemenin dayanımıyla, düşük devirli yorulma dayanımının ise malzemenin sünekliğiyle alakalı olmasına bağlanmıştır. Bilindiği gibi nano yapıları malzemeler başlangıç hallerindeki kaba taneli hallerine kıyasla daha yüksek bir dayanıma ancak daha düşük bir sünekliğe sahiptirler. APD’nden sonra yapılacak ortalama bir tavlama işleminden sonra malzemenin sünekliği malzemenin dayanımında bir düşüş olmadan artacaktır. Bu da malzemenin kısa devirli yorulma ömrünü iyileştirecektir. Bilye fırlatma gibi yüzey sertleştirme yöntemleri genellikle kaba taneli yapılarda malzemenin yorulma dayanımını arttırmakta ancak nano yapıları malzemelere bir etkisi bulunmamaktadır.

Nano yapıları malzemelerin dayanımı kaba taneli eş malzemelere göre daha yüksek olduğundan aşınma dayanımının da daha fazla olması beklenir. Düşük karbonlu çeliği nano yapıları hale getiren deneyler sonucunda aşınma dayanımının arttığı belirlenmiştir.[15]

2.3.3 Isıl Özellikler

Nano yapıları malzemelerde dislokasyon ya da tane sınırı gibi kristal kusurlarından dolayı düşük bir ısı stabilite beklenir. Şaşırtıcı olarak APD yöntemleriyle üretilmiş olan metaller iyi bir ısı stabilite göstermektedirler. Örneğin bir APD yöntemi olan EKAP ile üretilmiş nano yapıları ticari saf Ti dayanımında önemli bir değişiklik olmadan 400°C’de tavlatabilmektedir. Nitekim nano yapıları saf titanyum yüksek sıcaklıkta ısı olarak kararlı kalabilmesi sayesinde kendisine, tıbbi implantlar da dahil olmak üzere bir çok uygulama alanı bulmuştur. Hatta APD gibi nano yapıları malzeme etme yöntemlerinden biri olan kryojenik bilyeli öğütme ile [26] ısı özellikler daha da kararlı malzemeler elde etmek mümkündür. Genel olarak APD ile elde edilmiş malzemelerde tavlama, malzemenin sünekliğini arttırdığı ve malzemenin dayanımında da önemli bir düşüşe neden olmadığı için faydalı bir ısı işlem olarak

görülebılır. Böylelikle hem yüksek dayanım hem de yüksek süneklik kombinasyonu sağlanabilir.

2.3.4 Korozyon Dayanımı

Günümüzde APD ile şekillendirilmiş malzemelerin korozyon dayanımı ile ilgili sınırlı sayıda araştırma mevcuttur. Gene de nano yapılı titanyumun kaba yapılı titanyuma kıyasla daha iyi bir korozyon direncine sahip olduğuna dair kanıtlar vardır. Yapılan araştırmaların çoğunda nanoyapılı malzemelerin korozyon direncinin kaba taneli olan eş malzemelere kıyasla önemli bir fark göstermediği saptanmıştır, Ti’da görülen korozyon dayanımı artışın ise korozyonun daha düzenli gerçekleşmesinden olduğu tahmin edilmektedir.[15]

2.3.5 Fiziksel Özellikler

Nano yapılı katılar değişik optik ve manyetik özelliklere sahiptirler. Tane boyutları amorf tananometre sınırına değıştikçe katıların renk ve saydamlık gibi özellikleri de değışmektedir. Nano yapılı malzemelerde Curie sıcaklığı [27] yani manyetik malzemelerin manyetiklik özelliklerini kaybettikleri sıcaklıkları düşmektedir.[15]

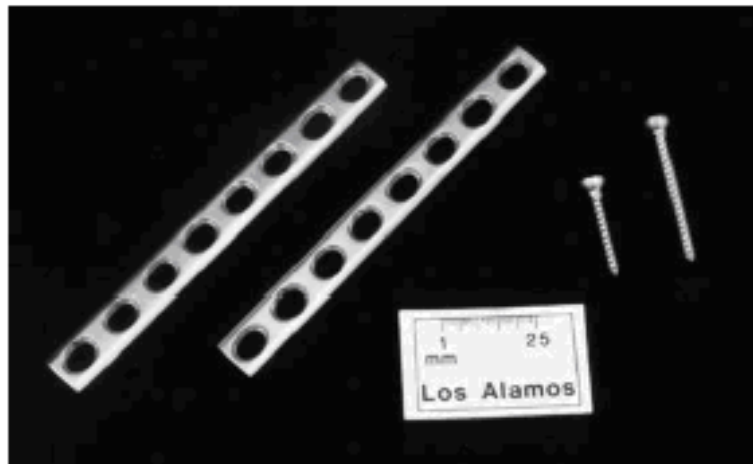
2.4 Uygulama Alanları

Nano yapılı malzemelerin kullanılabilme potansiyeli ile ilgili başlıca iki neden ortaya sürülmüştür. Birincisi üstün özellikleri ikincisi ise üstün üretilebilme özellikleridir. APD ile üretilen malzemelerin geniş skalalı bir kullanılabilme potansiyeli mevcuttur, bunun nedeni de üretim tekniğı için gerekli ekipmanın geleneksel yöntemlerle deformasyonu sağlayan ekipmanla birçok benzerlik taşımasıdır, bu da üretim için gerekli sermayeye sadece mütevazı denebilecek kadar az ek bir maliyete sebep olur. APD’nun kütle yığın üretime olanak tanınması Ti alaşımlarının EKAP yöntemiyle ucuz bir şekilde üretilmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 2.7 ECAP ile üretilmiş 50mm çapında 170mm uzunluğunda Ti çubuk [15]

Genelde AL ya da Cu gibi düşük dayanımlı malzemeleri işlemek daha kolaydır. Bu malzemelerle ilgili tam ve doğru geniş bir bilgi birikimi de mevcuttur. Al ve Cu'nun APD ile işlenmesi için ilk uygulama alanları düşük hacimli parçalarla başlayacaktır. Daha sonra APD için gerekli olan parasal hacim tam olarak belirlendiği zaman seri üretim de geçilebilecektir. İlk başta son derece hafif olan alüminyum alaşımları ilk sırayı alacaktır. Hafiflik ve yüksek dayanımları sayesinde havacılık sektöründe, bisikletlerde, otomobillerde ve botlarda kullanılabileceklerdir. İlk başta sınırlı hacimde üretilen demo ürünleri bu işin öncüsü olacaktır. Örneğin bisiklet parçalarında eklenebilecek yüksek dayanımlı alüminyum bisikleti daha hafifleştirecektir. Zaten profesyonel bir yarış bisikletinin maliyeti 3000\$ civarında olduğu için buraya APD ile üretilmiş bir parça koymak çok da güç olmayacaktır.



Şekil 2.8 Kemiklerde kullanılan nanoyapılı Ti alaşımlı implantlar

APD'nin bir diğ er kullanım alanı ise zaten yoğun bir yarışın olduğu insan hayatını kolaylaştıran ürünlerde gerçekleşecektir. Örneğin tıbbi malzemeler konusunda APD gerecekte kullanılmayı bekleyen bir yöntemdir. Ti ve Ti alaşımlarının aşırı plastik deformasyona uğradıktan sonra artan yorulma dayanımları protezler için son derece idealdir. Bir genelleme yapmak gerekirse geleneksel malzemeden en azından %25 daha avantajlı olan bir malzeme eldesi, artık yeni malzemeyi kullanma zorunluluğu doğurur. Bu duruma en uygun örnek dişçilikte kullanılan Ti implantlardır. Genelde kullanılan Ti implantların ortalama çapı 3 mm'dır. Ancak çiğneme ile oluşan yorulma malzemenin yorulma dayanımını zorlayabilmektedir. Özellikle  n dişlerde daha küçük çaplı implantlar gerekebilmektedir. APD ile üretilecek Ti implantlar 2mm ya da çok daha küçük çap boyutlarına ulaşabilmektedir.[15]

2.5  ılenebilirlik

APD'den çıkıp  ılenecek malzemeler için kesme derinlikleri ve ilerleme hızları artabilir. APD ile  ılenmiş malzemelerde daha az bir yüzey  ılme gerekir, takım aşınması azalır ve bu da takım ömrünü uzatır. Bazı  zel ürünlerde üretim maliyetinin çoğu talaşlı  ılemeye gidebilir. Örneğin spor eşyaları üretiminde kullanılan APD  ilemi sonrasında yapılacak talaşlı  ılme maliyeti APD  ileminin 10 katına çıkabilir. Bazı durumlarda aşırı plastik deformasyona uğramış malzemenin talaşlı  ılmesi son hal için yeterli olmakta ürün son bir finiş  ilemine gerek duymamaktadır. Bu da  ilem maliyetini azaltabilen bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

Dövme  ilemi uzay ve otomobil sanayinde sıkça kullanılan bir yöntemdir. APD ile şekillendirilmiş malzemelerin dövme sıcaklıklarında önemli düşüş elde edilmektedir. Örneğin APD ile şekillendirilmiş alüminyum alaşımları dövme  ilemine maruz kaldıklarında her dövme için gerekli sıcaklık azalmakta ayrıca daha sonra uygulanması gereken ısıl  ilem süresi de yarı yarıya azalmaktadır. Nitekim 12 saatten fazla ısıl  ilem gerektiren malzemelerde bu enerji tasarrufu çok önem kazanabilmektedir.[15]

Genel olarak APD ile üretilmiş malzemeleri kullanım alanlarına göre sıralayacak olursak

Biyomedikal: nano yapılı hacimsel protezler, implantlar ve benzerleri, yüksek dayanıma, hafifliğe, ayarlanabilir elastisite modülüne sahip olabilir.

Elektronik ve haberleşme: meso – mikro sinyal transformatörleri, ISDN ve diğer haberleşme ağları için yüksek frekanslarda sabit performans için, manyetik sensörler için kullanılabilir.

Çevre ve enerji: enerji verimliliği, depolama ve kazanımda önemlidir.

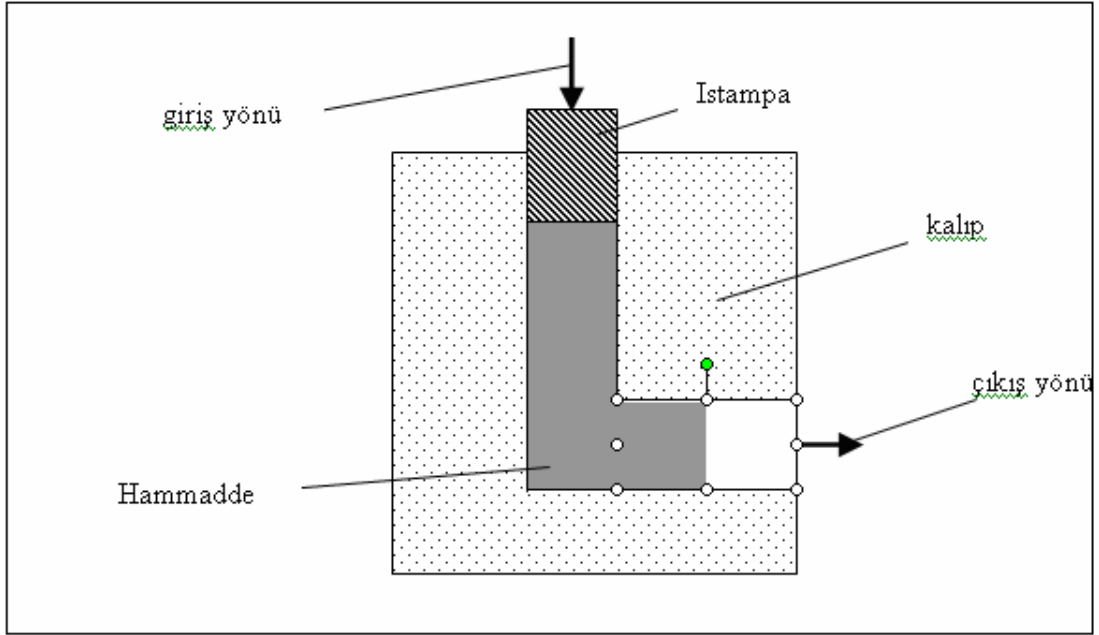
Havacılık, otomotiv, kimyasal ve savunma sanayi: hafiflik, yüksek dayanım, termal anlamda denge, düşük güç tüketim özelliklerine sahip olması nedeniyle uygulamaları bulunmaktadır.

Örneğin alüminyum esaslı bir nano yapılı alaşım, çekme dayanımı olarak 800 MPa seviyelerine kadar dayanıma aşırı plastik deformasyon yöntemiyle ulaşabilmektedir. Bu değer, mikro yapılı bir alüminyum alaşımının yaklaşık olarak 200%'ü kadardır ve çelik malzemeler ile karşılaştırılabilir. Oysa ağırlığı, çelik parçaların sadece 1/3'ü kadardır.[35]

3. EŞ KANALLI AÇILI PRESLEME

EKAP, eş kanallı açılı presleme, aşırı plastik şekil değişim yöntemlerinden biridir.

Klasik bir EKAP kalıbı aynı kesit alanına sahip birbirine dik yatay ve düşey konumdaki iki kanalın birleşmesinden oluşmaktadır. EKAP işlemi numune kanala sığabilecek şekilde işlenip düşey kanala yerleştirildikten sonra presleme işlemi ardından yatay düzlemde çıkmasıyla gerçekleşmektedir. İşlem sonrasında parçanın kesit alanında bir değişim söz konusu olmadığından bu işlem sürekli bir şekilde tekrar edilip son derece yüksek birim şekil değişimi değerlerine ulaşmak mümkündür.[6].



Şekil 3.1 EKAP çalışma sistemi [25]

Genelede metalik malzemelerde ergime sıcaklığının yarısına yakın sıcaklıklarda malzeme çekme sonrasında %200'den fazla birim şekil değişimi göstermesi durumu süperplastiklik olarak adlandırılır. EKAP işlemini diğer aşırı plastik değişim yöntemlerinden ayıran bir özelliği de başta alüminyum alaşımlar olmak üzere normalde süperplastik davranış göstermeyen alaşımlara yüksek süneklik ve süperplastik uzama özellikleri katabilmesidir.[7]

Mikronaltı ultra ince taneli alaşımların ispatlanmış olan birçok avantajları bulunmaktadır, yüksek dayanımlıdır, düşük sıcaklıklarda süperplastik özelliklere sahip olabilmektedirler ve de yeni türde malzemelerin oluşmasına neden olabilmektedirler, çökelme sertleşmesine ihtiyaç duymayan alüminyum alaşımları gibi EKAP da bu özelliklerin elde edilebileceği aşırı plastik deformasyon yöntemlerinden biridir.

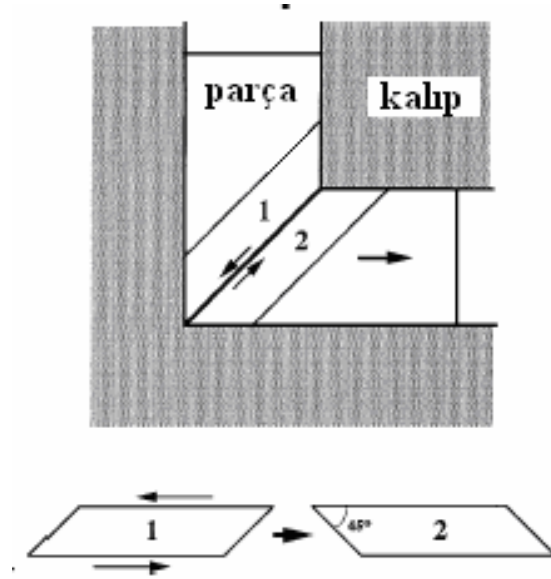
EKAP'ın önemli iki özelliği kalıptan her geçiş esnasında oluşan kayma birim şekil değişiminin kalıp açısıyla belirlenmesi ve her geçiş sonrası numune boyutlarının yaklaşık olarak aynı kalmasıdır. Plastik birim şekil değişimine uğrayan malzemenin şeklinin sabit kalması diğer geleneksel haddeleme ya da ekstrüzyon gibi malzemenin boyutlarının değiştiği yöntemlere göre büyük avantajlar sunmaktadır. Geleneksel yöntemlerde elde edilebilecek maksimum birim şekil değişimi $\epsilon = 5$ civarında iken EKAP yöntemi ile $\epsilon = 10$ 'dan büyük olduğu malzemeler elde edilebilmektedir.

Parça boyutu sabit kaldığından maksimum şekil değişimini elde edilmesi için teorik bir engel bulunmamaktadır.[5]

3.1 EKAP Çalışma Prensibi

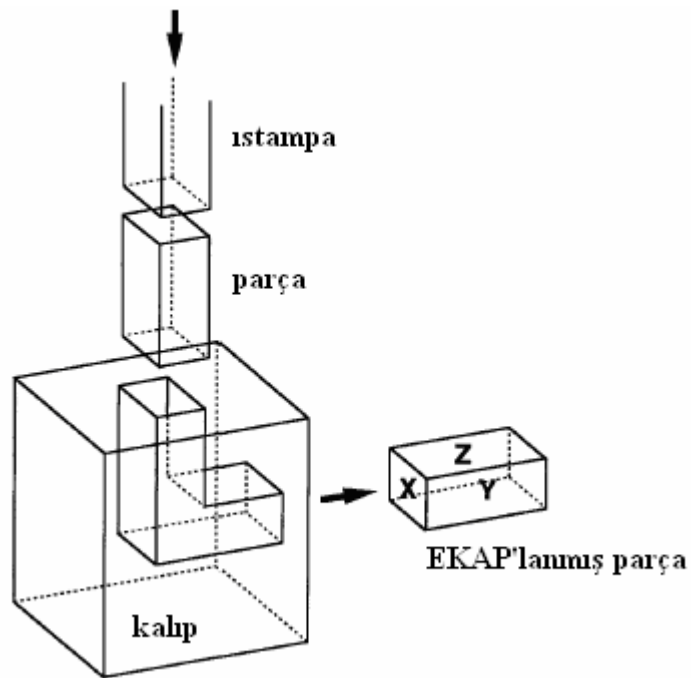
EKAP eş kesitli iki kanal içeren bir kalıpla yapılır. Kanallar birbirlerine açılı haldedirler. Parça bu kanallara tam sığacak şekilde işlenir ve kalıbın içerisine yerleştirildikten sonra yukarıdan bir ıstampa ile preslenip eş kesitli ilk kanaldan diğer kanala geçip plastik deformasyona uğraması sağlanır.

Burada basit kayma 1 ve 2 olarak gösterimli bitişik segmentlerin arasındaki kayma düzleminde gerçekleşir.[6]



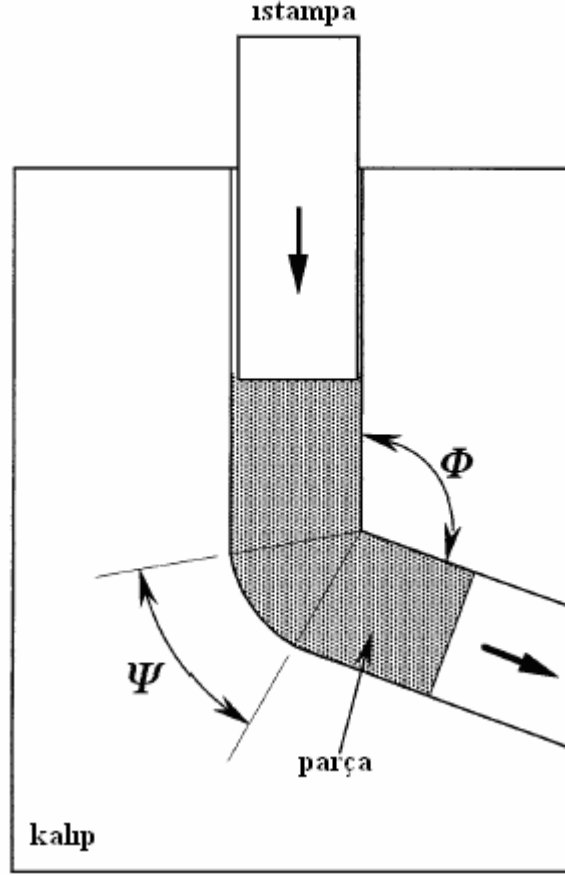
Şekil 3.2 EKAP ile deformasyonun oluşumu [6]

Parçada üç adet yüzeyden bahsetmek mümkündür, x parçanın boyunsal eksenine dik olan yüzeylerdir, y ve z ise parçanın boyuna dik yüzeylerdeki komşu yüzeylerdir.



Şekil 3.3 EKAP'lanan parçanın yüzeylerinin adlandırılması [6]

Aşağıda kalıbın içerisindeki kanalların kesiştiği yerde kanalların arasında bulunan iki iç açı Ψ ve Φ gösterilmiştir. Kanallar arasında iç açı Φ , dış kıvrımın yayını gösteren açı ise Ψ 'dir.



Şekil 3.3 EKAP kalıp açıları [6]

Parça kalıptan geçirildiği zaman Mises bağıntısından hesaplanabilen eşdeğer birim şekil değişimi değeri bu iki açıya bağlıdır.

Parça kalıptan geçirildiğinde kesit alanı değişime uğramadığından dolayı parça tekrar tekrar kalıptan geçirilebilir ve son derece yüksek bir birim şekil değişimi elde edilebilir. Tekrarlı basmalar sonucunda elde edilen toplam birim şekil değişimi:

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) + \Phi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2} \right) \right] \quad (3.1)$$

Burada N parçanın kaç kere basıldığını göstermektedir. Son zamanlarda yukarıda belirtilmiş formüle alternatif

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi + \Psi}{2} \right) + \Psi \right] \quad (3.2)$$

bağıntısı da önerilmiştir [6].İki bağıntı da ε_N için tüm Ψ yay açıları için aynı değerleri vermekte, Φ kanal açısının 90° 'ya da daha fazla olduğu durumlar için ise %5'ten az olmak suretiyle farklılık göstermektedir.

Benzer bir yaklaşım eş eksenli olmayan açılı presleme için de geliştirilmeye çalışılmıştır.

Saf alüminyumda yapılan birçok deney sonucunda Φ kanal açısının önemi anlaşılmıştır. Φ kanal açısı 90° ile $157,5^\circ$ arasında değişen değerler olarak alınmış ve yoğun plastik şekil değişimi uygulanan parçalarda ultra küçük taneli parçaları elde etmenin en kolay olduğu Φ kanal açısının 90° 'ye yakın değerler olduğu anlaşılmıştır

$\Phi=90^\circ$ olduğu değerler için birinci denklemden herhangi bir Ψ açısından bağımsız olarak bir paso sonucunda elde edilen birim şekil değişim miktarı 1'e yakın olmaktadır. Buradan da birim şekil değişim miktarı N adet paso sonucunda yaklaşık olarak N'e eşittir sonucu çıkarılabilir.

Yay açısı $\Psi=0^\circ$, kanal açısı $\Phi=90^\circ$ olduğu durumların sonlu elemanlarla modellenmesi sonucunda basma esnasında kanalların kesiştiği yerde küçük bir "ölü bölge" olduğu görülmekte ve malzemeye dolmamaktadır.[6]

3.2 EKAP Karakteristikleri

3.2.1 Mikroyapısal Karakteristikler

Bir numune tekrarlı olarak EKAP'landığında kayma karakteristiklerinin, her bir basma sonrasında değişebilen basma yönüne doğru önemli farklılıklar içerdiği gözlemlenmiştir.

Başlıca üç farklı basma rotasından bahsedilebilir:

A rotası

Tekrarlı basma işlemleri esnasında parça x,y ve z yüzeyleri yer değiştirmeden aynı şekilde basılması durumunda elde edilir.

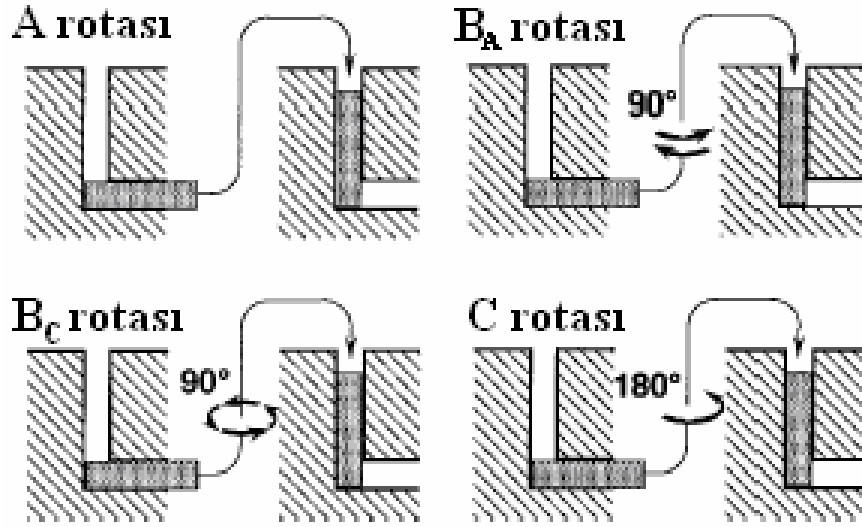
B Rotası

Tekrarlı basma işleminde kalıptan çıkarılan parçanın her bir basma öncesi y ve z eksenleri 90° dönecek şekilde kalıba geri konulması esasına dayanır. Bu rotada iki alternatif söz konusudur. Eğer parça ikinci basmadan sonra 90° döndürüldüğünde ilk

basmadaki konumuna geri döndürülürse rota Ba rotası adını alır. Eğer parça ikinci basma sonucunda ilk basmaya nazaran 180° döndürüldüyse Bc rotası adını alır.

C rotası

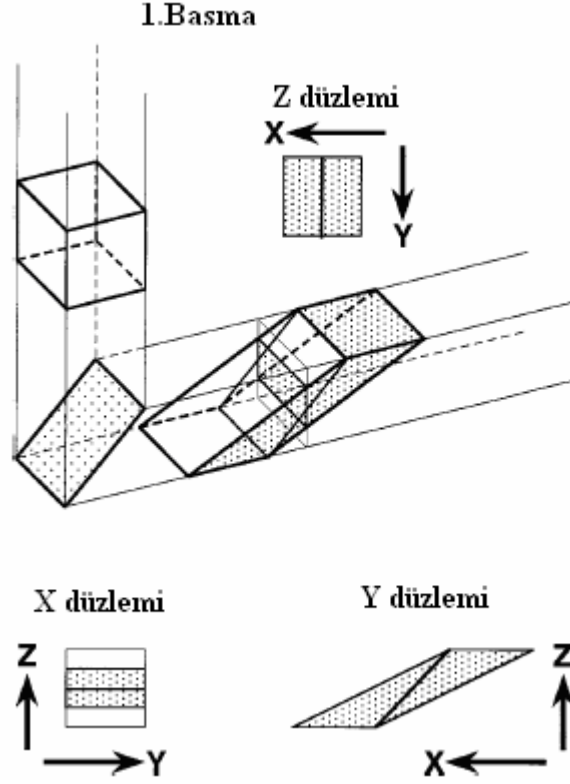
Tekrarlı basma işlemi esnasında kalıptan çıkan parçanın 180° döndürülüp kalıba tekrar konulup basılması ve bu işlemin sürekli tekrar edilmesi sırasında izlenen rotadır.[6]



Şekil 3.4 EKAP rotaları

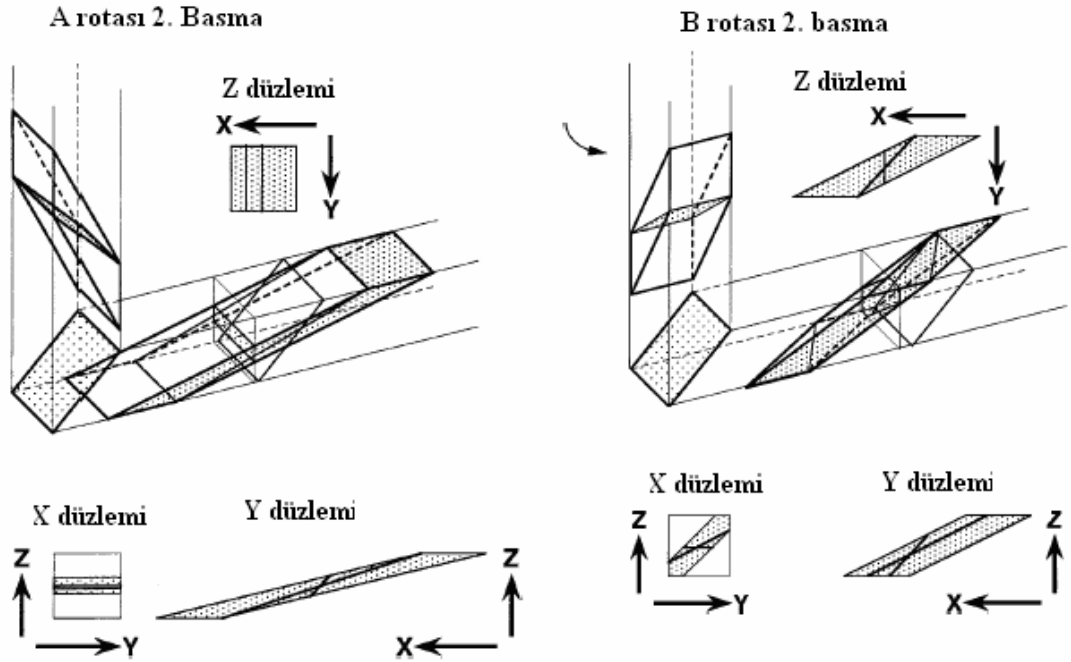
Bu üç yöntemde de malzemenin akma gerilmesinde ve dayanımında önemli artışlar gözlemlenmektedir. Ancak bu artışlar EKAP işlemi birkaç kez tekrar edildikten sonra doyuma ulaşmaktadır.[4]

Bu üç rotada oluşan kaymayı anlayabilmek için yay açısı $\Psi=0^\circ$, kanal açısı $\Phi=90^\circ$ olan bir EKAP kalıbını göz önüne almak gerekir. Burada deformasyona uğrayan bir küp düşünölmelidir. Sadece bir paso geçen bu küpün durumu aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Soldaki dikey kanalda gösterilen kübik eleman teorik kayma düzleminden geçirilmekte ve daha sonrasında da kanal çıkışında da gösterildiği gibi rombohedral bir şekil almaktadır. Gene aşağıda makroskobik tane büyümesini ve ilgili kayma düzlemini gösteren deformasyonun şekli görölebilmektedir.



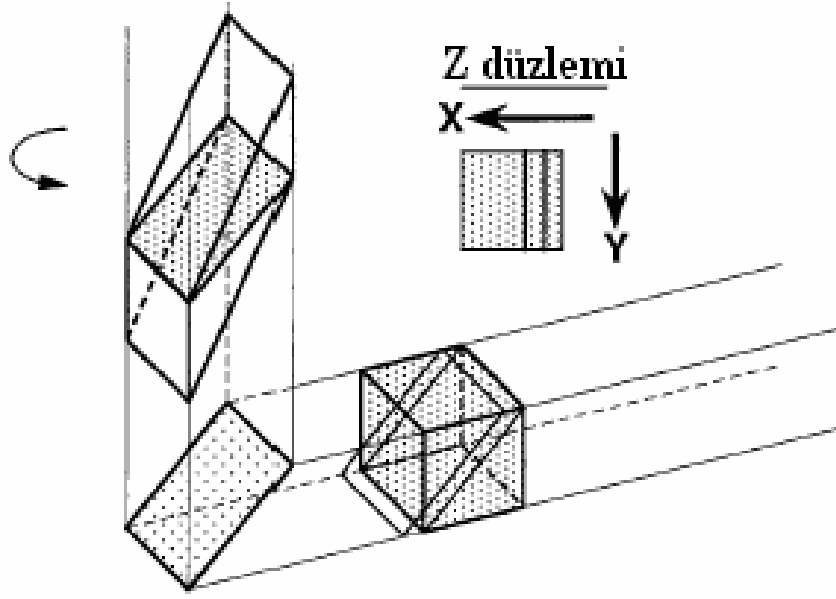
Şekil 3.5 1.basma sonucu oluşan deformasyon [6]

Parçanın kalıptan ikinci kez geçirilmesi ya parçanın rotasını hiç değiştirmeden (A rotası) ya 90° 'lik açı farklarıyla (B rotası) ya da 180° 'lik açı farklarıyla (C rotası) gerçekleşebilir. Bu üç durum da aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.6 A ve B rotalarında 2.basma sonucu oluşan deformasyon

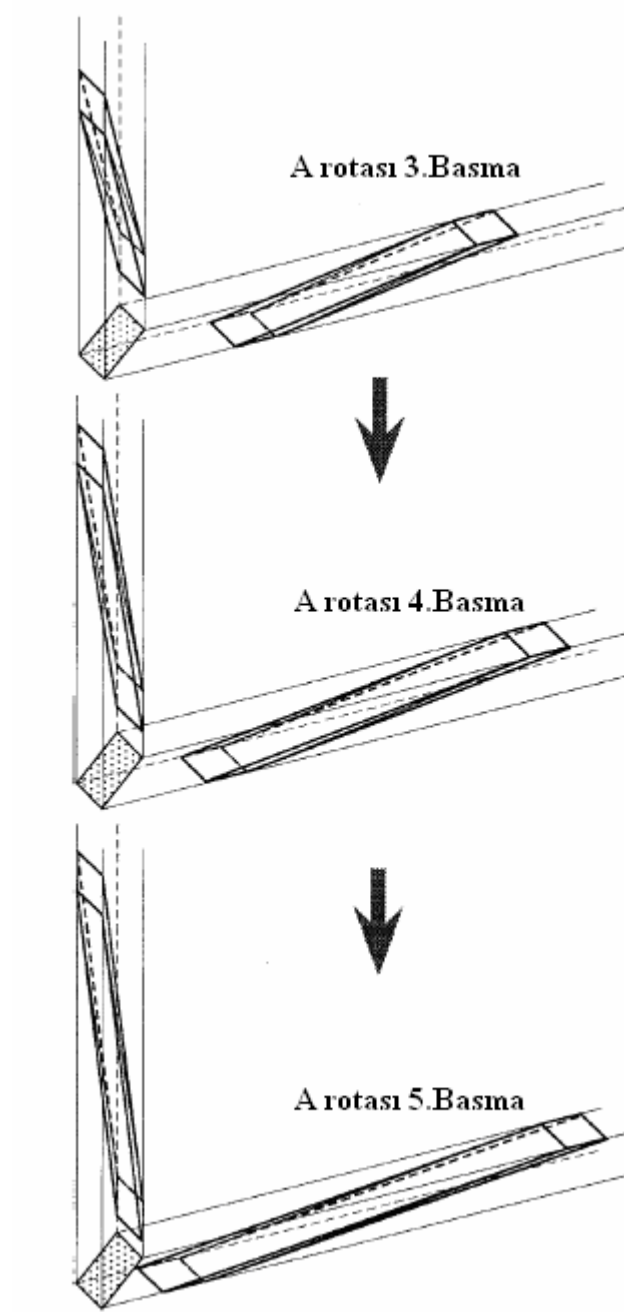
C rotası 2. basma



Şekil 3.7 C rotasında 2.basma sonucu oluşan deformasyon

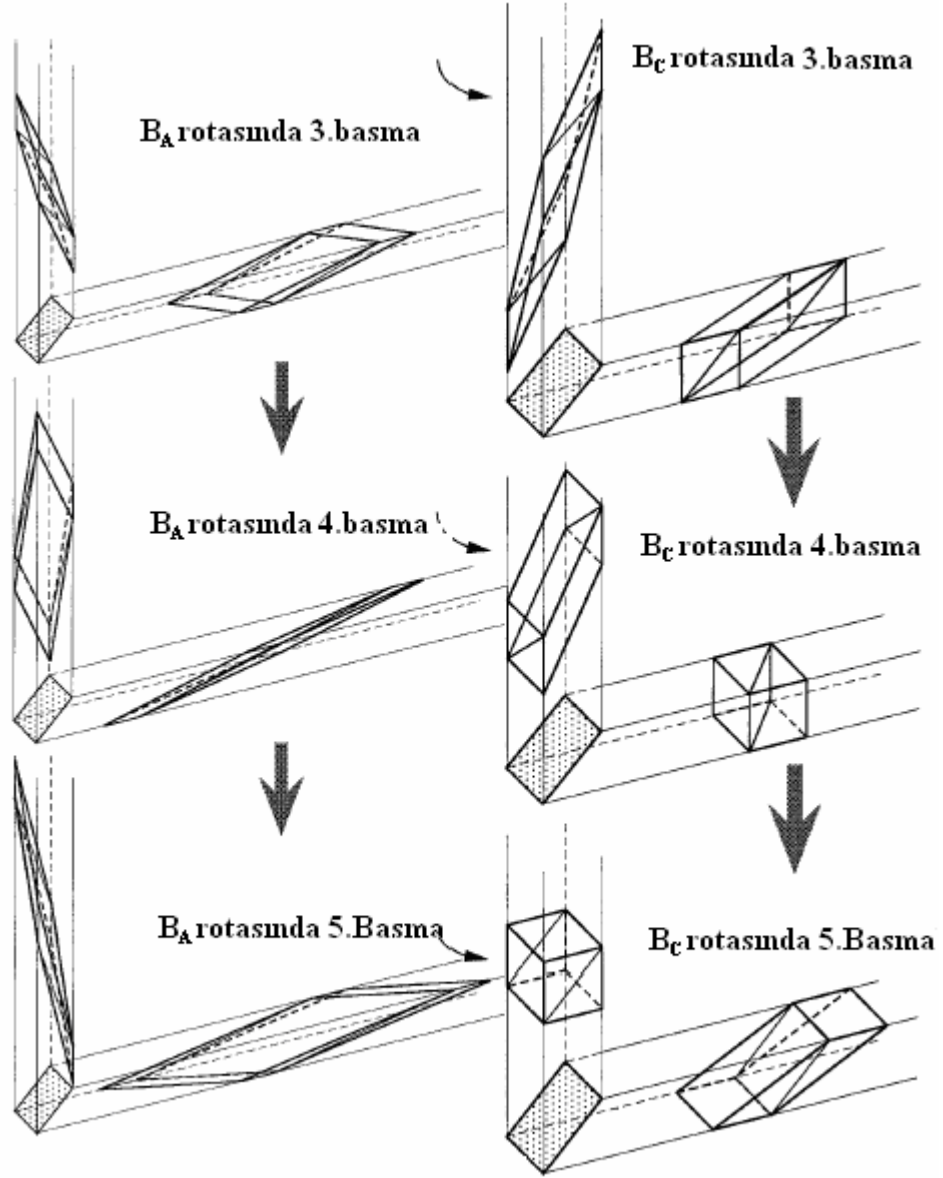
Araştırmalar A rotasında y düzleminde bulunan tanelerin yaklaşık 15°'lik açılarla x eksenine doğru uzamasına, B rotasının tanelerin dik yüzeylere doğru uzamasına, C rotasının ise kübik elemanın yeniden oluşmasına neden olduğunu göstermiştir. Burada dikkat edilmesi gereken husus bu sonuçların saf alüminyuma baz alınarak elde edildiğidir.

İkiden fazla basma işlemi tekrarlanacağı zaman Ba ile Bc rotasını birbirinden ayırmak önem kazanır. A,Ba,Bc ve C rotaları içeren ikiden çok basma işleminin olduğu durumlar için kübik elemanın alacağı tahmini şekiller aşağıda verilmiştir.



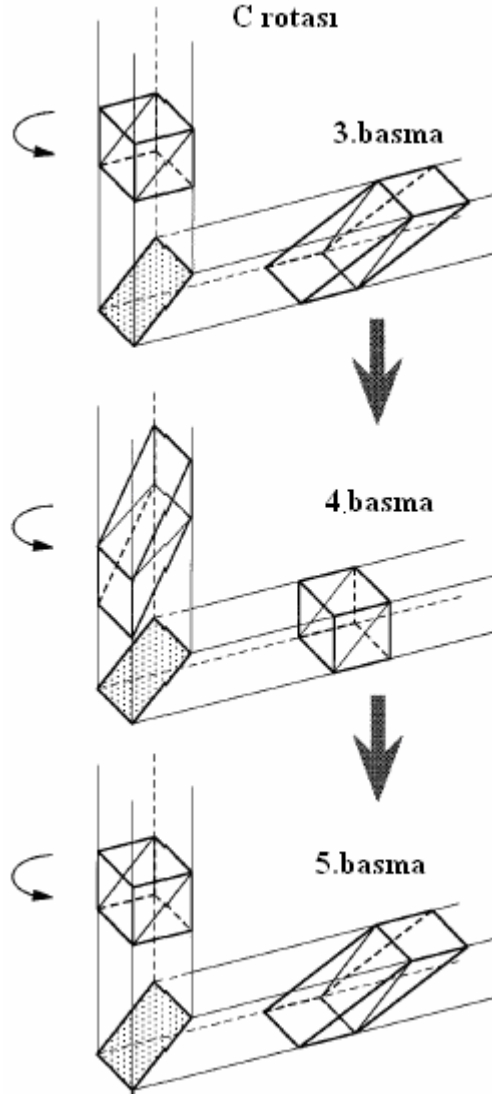
Şekil 3.8 A rotasında 3., 4. ve 5. basma sonucu oluşan deformasyon[6]

A rotasında çok sayıda EKAP sonucu oluşan deformasyon yönlenmeleri ile diğer rotalardaki deformasyon yönlenmeleri arasında önemli farklar görülmektedir.



Şekil 3.9 B_A ve B_C rotalarında 3., 4. ve 5. Basma işlemi sonucunda elde edilen deformasyon[6]

Belirlenen deformasyon yönlenmeleri malzemenin kazanacağı özellikleri hakkında bilgi vermesi açısından önem taşır.



Şekil 3.10 C rotasında 3., 4. ve 5.Basma sonucunda oluşan deformasyon[6]

A ve Ba rotaları da birbirine benzemekte ikisi de artan bir çarpılmaya neden olmaktadır. Bc ve C rotalarının da kayma karakteristikleri birbirne çok benzemekte, iki işlem sonucunda da ilk basma işleminde bozulan kübik eleman $2n$ ve $4n$ pasolar sonucunda (n = tamsayı) yeniden oluşturulmaktadır. Farklı rotaların kombinasyonlarını da içeren tahminler yapmak mümkün olabilmektedir.[6]

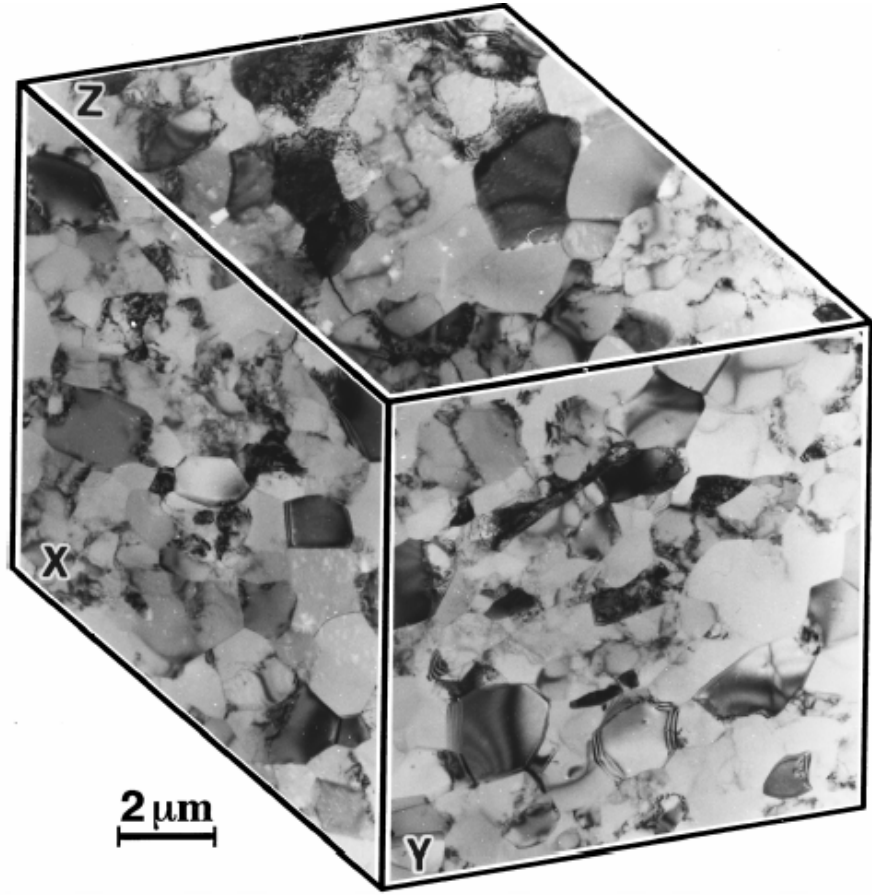
EKAP'lanan malzemelerin mikroyapı karakteristiğini incelemek için malzemenin her bir pasodan sonra değiştirilebilen basma yönünün de etkisini içeren birçok araştırma yapılmıştır. EKAP'ın en önemli sonucu olarak ortalama tane boyutunun bir pasodan sonra bile yoğun derecede azalmasıdır. Bu tane boyutundaki azalma basma işleminin hızından bağımsızdır. En son araştırmalarla kesin olarak belirlenen kanal açısının $\Phi=90^\circ$ olduğunda ve basma yönünün Bc olduğu EKAP işleminin optimum birim

şekil değişimi sağladığıdır. Bir diğer teori de A yönünün kanal açısı $\Phi=120^\circ$ olduğunda daha etkili hale geldiğidir.

EKAP'la homojen yapıyı geliştirmek için temel iki temel karakteristiktan bahsedilebilir. Bunlar basma işlemi sonunda elde edilen kararlı tane boyutu ve homojen bir yapı elde etmek için uygulanması gereken paso sayılarıdır. Görünüşe göre düşük toparlanma hızlarına sahip metaller aşırı derecede ufak taneli yapı elde etmek için son derece idealdirler ancak EKAP'lanacak bu malzemelerin homojenliğini sağlayabilmek için malzemelere uygulanması gereken paso sayısı da artmaktadır.

Örnek vermek gerekirse Bc yönü kullanılarak EKAP'lanan saf alüminyum, %1 Mg içeren alüminyum alaşımı ve %3 Mg içeren Alüminyum alaşımı ortalama stabil tane boyutu yaklaşık olarak sırasıyla 1,3 μm , 0,45 μm ve 0,27 μm olarak bulunmuştur. Ancak parça içerisinde homojen bir yapı elde edebilmek için uygulanması gereken EKAP paso sayısı sırasıyla 4, 6 ve 8 olarak belirlenmiştir. Daha alttaki paso değerlerinde malzemede homojenlik söz konusu değildir.

Aşağıdaki resimde daha evvel de belirlenen x, y ve z yüzeyleri baz alınarak oda sıcaklığında 4 kere EKAP'lanan saf alüminyumun iç yapısı görülmektedir. Burada ortalama tane boyutu 4 paso sonucunda yaklaşık 1,3 μm olmaktadır. Bu malzemenin EKAP'lanmadan evvel tavllanmış durumdaki başlangıç ortalama tane boyutu 1mm'dir.[6]



Şekil 3.11 4 kere EKAP'lanan saf alüminyumda x, y ve z yüzeylerinde içyapı [6]

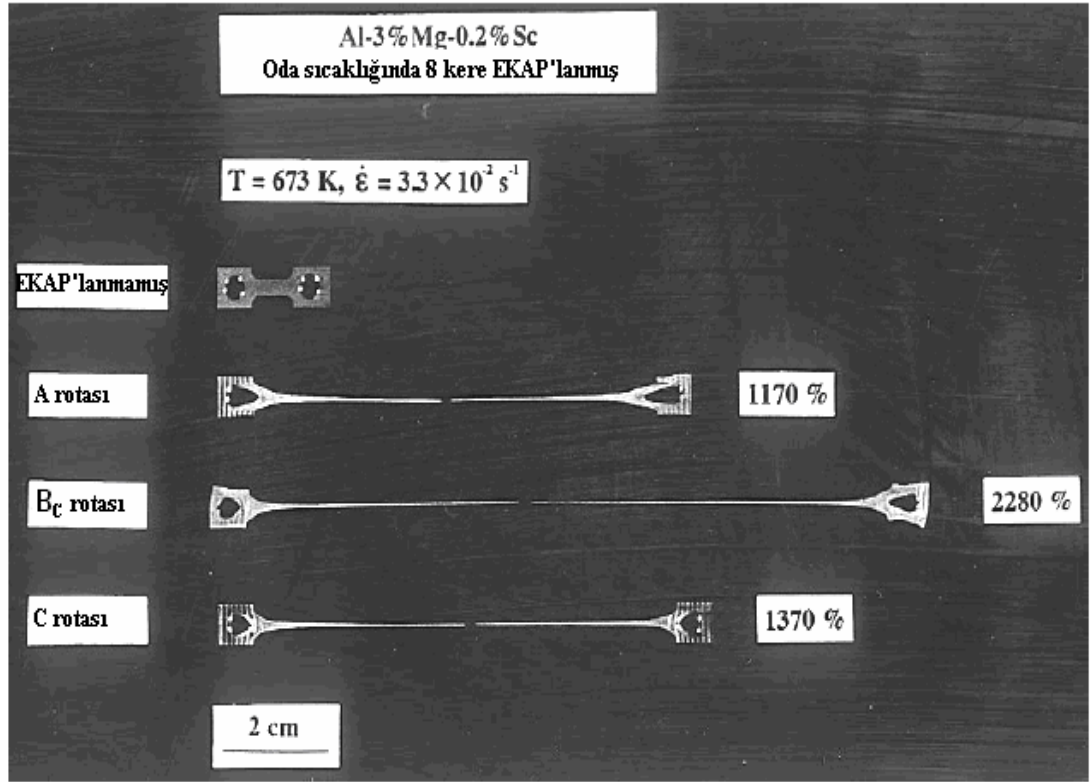
3.2.2 Mekanik Karakteristikler

Süperplastisite polikristal malzemelerin çekmeye maruz kalmaları sonucunda kopmadan önce gösterdikleri uzayabilme kabiliyeti ile ilgilidir.

Aşırı plastik şekil değişimi yöntemleri uygulandıkları malzemelerin tane boyutlarını önemli derecede küçültmektedir. Eğer bu ultraküçük taneler yüksek sıcaklıklarda da kararlılıklarını koruyabilirlerse malzeme yüksek sünekliklere ulaşabilmekte ve süperplastik uzama gösterebilmektedir.

Genellikle süperplastik uzamaya ulaşabilmek için ilk şart malzemenin tane boyutu 10 μm 'dan küçük olmalıdır. Bir diğer şart ise çekme testi mümkün mertebe yüksek sıcaklıklarda yapılmalıdır. Kabaca bu sıcaklık malzemenin Kelvin cinsinden ergime sıcaklığı olan T_m 'nin 0,5 katından büyük olmalıdır.

EKAP, Normalde süperplastik davranış göstermeyen alaşımlarda süperplastisite elde edebilmek için çok ideal bir yöntemdir.

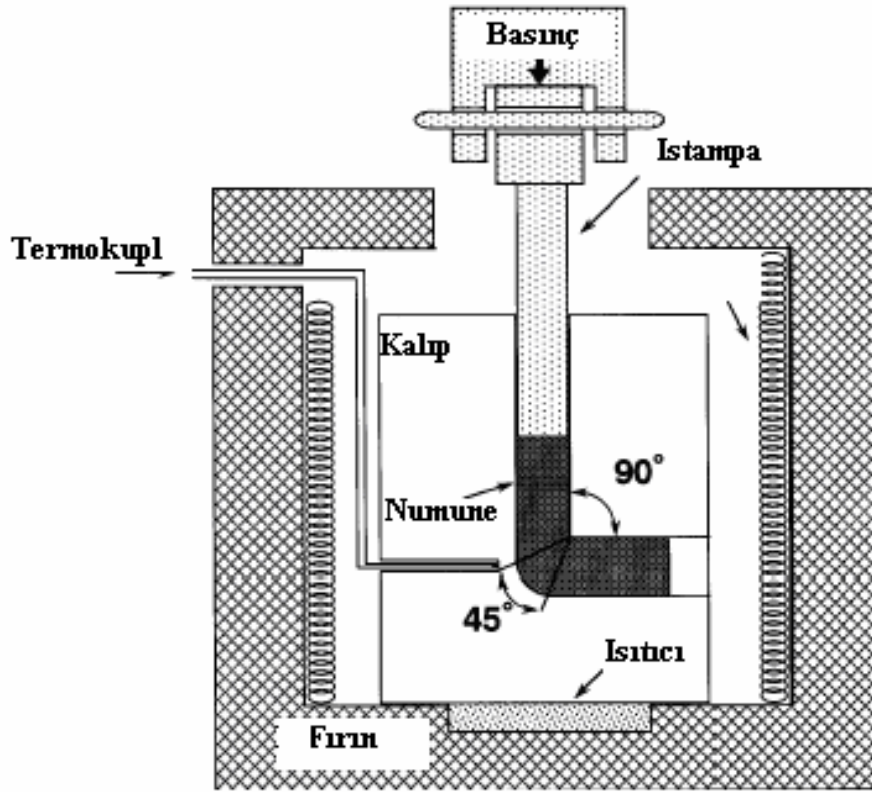


Şekil 3.12 Oda sıcaklığında 8 kere EKAP'lanan Al alaşımının süperplastikliği [34]

Örneğin 2024 alüminyum alaşımı 8 kere EKAP'landıktan sonra yaklaşık 773° K sıcaklığında %2000'nin üzerinde 7034 alüminyum alaşımları 6 ya da 8 pasodan sonra yaklaşık 673 K° sıcaklığında %1000'nin üzerinde uzama gösterebilmektedirler.[7]

Yüksek sıcaklıklarda EKAP'lanan parçanın özelliklerini koruyabilmesi için bu ultraküçük tanelerin büyümesini engelleyecek partiküller bulunmalıdır.[6]

Bilindiği gibi heksagonal sıkı paket (hcp) tipinde hücre yapısına sahip malzemeler yüzey merkezli kübik (fcc) ya da hacim merkezli kübik (bcc) malzemelere göre daha kötü plastik deformasyon özellikleri gösterirler, süneklikleri sınırlıdır. Ancak 473° K ve 673° K sıcaklığında yapılan tek paso EKAP işleminden sonra heksagonal sıkı paket yapılı Mg'un hem dayanımında hem de sünekliğinde önemli bir artış olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak da yüksek sıcaklıklarda basma esnasında rekristalizasyonda oluşan küçük taneli içyapı gösterilmiştir. Oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda EKAP işlemini gerçekleştirmek için kurulan düzenek aşağıdaki gibidir.[34]



Şekil 3.13 Isıtmalı EKAP kalıbı [34]

3.3 Alüminyumun ECAP ile Şekillendirilmesi ve Yaşlandırılması

3.3.1 Alüminyumun Yaşlandırılması

Yaşlandırma işlemi başta alüminyum olmak üzere demirdışı metallerde ve yüksek dayanımlı paslanmaz çeliklerde sertleştirme amacıyla kullanılan en önemli ısıtma işlemidir. Başta havacılık olmak üzere çeşitli sanayi dallarında kullanılan alüminyumlar yaşlandırma işlemiyle sertleştirilirler. [9] Çökelme sertleşmesi adıyla da bilinen yaşlandırma sertleşmesi işleminde amaç, sert yapıya sahip ikinci fazı ince bir şekilde matris fazının içinde çöktürmektir. İlk aşırı doymuş bir faz elde edilir, daha sonra matris fazından, zaman ve sıcaklığın etkisiyle ikinci fazın çöktürülmesi amaçlanır. Çökeltilerin boyutu, aralarındaki mesafe ve kafesle olan bağdaşıklıkları da kontrol edilerek sertlik seviyesi ayarlanır.[10]

Yaşlandırma işlemi eğer oda sıcaklığında gerçekleştirilirse doğal yaşlanma, daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşirse yapay yaşlandırma adını alır. Yaşlandırma sertleştirilmesi işleminde ilk adım katı çözeltiye alma, daha sonraki adım su verme ile aşırı doymuş çözeltiyi elde etme ve en son adım da yaşlandırarak istenen özelliklerde ikinci faz parçacıklarını elde etmedir.[10]

Yaşlanma aşırı doymuş katı fazdan zaman ve sıcaklık etkisiyle yeni bir fazın çökmesi sonucu malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin gelişmesidir. Yaşlanma ancak denge diyagramında solvüs eğrisi bulunan alaşımlarda ve sadece solvüs eğrisi içeren bileşimlerde meydana gelebilir.

Yaşlandırma işleminin gerçekleştirilmesi için alaşım çözünürlüğün azalan sıcaklıkla azalması gerekir. Yani alaşım ısıtma sonucunda solvüs eğrisi üzerinde tek fazlı olmalı ve soğutma ile de iki fazlı bölgeye geçmelidir. Matris malzemesi yumuşak ve sünek, çökelti fazı ise sert ve gevrek olmalıdır. Birçok yaşlandırılabilen malzemede çökelti sert ve gevrek metaller arası bileşiklerden oluşmaktadır. Yaşlandırılacak alaşımlar su verme sonucu aşırı doymuş çözelti oluşturabilme özelliğine sahip olmalıdır. Bazı alaşımlara daha sonra çökeltinin oluşmasını sağlayacak bir biçimde su verme işlemi uygulanamamaktadır. Su verme işlemi parçada iç gerilmelerin artmasına ve parçanın çarpılmasına neden olabilmektedir. Bir diğer yaşlanabilme şartı da oluşacak çökelti fazının bağdaşık olarak oluşmasının gerekliliğidir.

3.3.1.1 Yaşlandırma İşlemi Kademeleri

Çözeltiye Alma Isıl İşlemi

Bu işlemin amacı yüksek sıcaklıkta çözünürlüğün artmasından faydalanarak yapıdaki ikinci fazı tek faz içinde çözündürmektir. Alaşım solvus eğrisinin üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılır ve bu sıcaklıkta ikinci faz katı çözelti içinde tamamen çözününceye kadar tutulur.

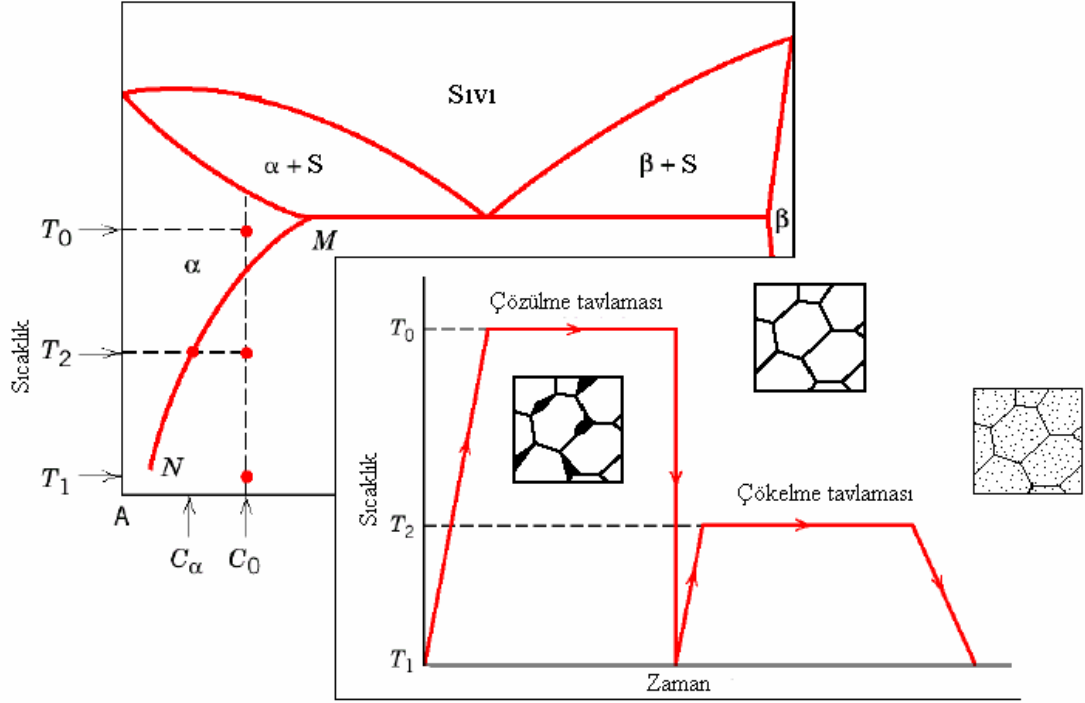
Su Verme İşlemi

Çökecek fazı içeren aşırı doymuş tek fazlı katı bir çözelti elde etmek için, çözündürme işleminden sonra alaşım, atomlara potansiyel çekirdeklenme yerlerine yayınmak için yeterli zaman vermesizin hızla soğutulur. Bu haliyle katı çözelti kararsızdır, ayrıca ani soğuma nedeniyle yapıda çok miktarda boşluk bulunur.

Yaşlandırma Isıl İşlemi

Son aşamada aşırı doymuş katı çözelti solvus sıcaklığının altında bir sıcaklığa ısıtılır. Bu sıcaklıkta atomlar kısa mesafelere yayınabilir. Aşırı doymuş katı çözelti dengesiz olduğundan alaşım elementi atomları çok sayıdaki çekirdeklenme yerlerine yayınır, çökelti oluşur ve bu çökelti büyür. Alaşım yaşlandırma sıcaklığında uzun süre bekletilirse dengeli $\alpha+\beta$ yapısı oluşur. Alaşım ani soğutmadan sonra oda sıcaklığında tutulursa yayınma çok yavaş gerçekleşeceği için β çökelti fazı genelde oluşmaz veya

oluşması uzun zaman alır. İşlem, çökelmenin oda sıcaklığında gerçekleşmesi beklenirse doğal yaşlandırma, çökelmenin oda sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta gerçekleşmesi sağlanırsa yapay yaşlandırma adını alır.[9]



Şekil 3.14 Yaşlanma mekanizması

Yaşlandırma esnasında ısı aktivasyon etkisiyle alaşım elementleri önce kenar dislokasyonlarının altında toplanmaya başlar. Bu atom kümeleri GP bölgeleri olarak tanımlanırlar. Bu bölgeler kafeste iç gerilme yarattıklarından belli oranda çarpılmaya neden olurlar ve yapının az da olsa sertleşmesine neden olurlar.

Yaşlandırma devam ettikçe bu kümeler α matris fazı ile bağdaşık β çökeltileri oluşturmaya başlarlar. Bu çökeltiler sertliğin artmasında rol oynarlar. Yaşlandırma devam ettikçe çökeltiler daha da büyürler ve kritik bir boyaya ulaşırlar. Böylelikle malzeme en yüksek sertlik değerine ulaşmış olur. Eğer yaşlandırma işlemi devam ederse çökeltilerin kafesle bağdaşıklıkları azalmaya başlar ve aşırı yaşlanma oluşur. Aşırı yaşlanma korozyon direncinin istendiği durumlar dışında istenmeyen bir özelliktir.[10]

3.4 Alüminyumun EKAP ile şekillendirilmesi

Daha evvelde de belirtildiği gibi Hall-Petch bağlantısı doğrultusunda metalik malzemelerin dayanımı küçülen tane boyutuyla artmaktadır. Malzemelerin dayanımının tane inceliği ile açıklanabilmesi ve Hall – Petch bağıntısı ile tanımlanabilmesi 1950'lerin başlarında Hall, E.O. ve Petch, N.J. tarafından bulunmuştur.

ECAP, equal channel angular pressing, eş kanallı açılı presleme 1980 yıllarında eski Sovyetler Birliği'nde Minsk'teki bir enstitüde Segal ve arkadaşları tarafından keşfedilen bir yöntemdir. Bu işlemde malzemenin dış kesit alanı değişmeden büyük plastik deformasyonlar meydana gelmektedir.[25]

Yöntemin bulunduğu sıralarda amacı metal çubuklara basit kayma mekanizmasıyla yüksek miktarda birim şekil değişimi uygulamaktı. Amaca ulaşılmasına rağmen elde edilen sonuçlar bilim dünyasında pek de merak uyandırmadı.

Ancak bu durum 1990lar'ın başında ECAP yöntemiyle elde edilen malzemelerin eşsiz özellikleriyle ilgili raporlar yazılmaya başlandığında değişecekti. Bu raporların ardından ECAP'ın endüstriyel uygulamalarıyla ilgili çalışmalar başladı.

ECAP'ın çektiği ilgi, gene aynı prensipte çalışan ancak tasarımları ve uygulandıkları malzeme tipleri daha farklı olan yeni ECAP türevlerinin oluşmasını sağladı.

Özellikle Al alaşımlarında geleneksel yöntemlerle 10 μ m'den küçük tane boyutu elde etmek son derece güçtür. Bu alüminyumun dizi hatası enerjisinin (stacking fault) yüksek olmasından ve buna bağla olarak yeni dislokasyonların kolaylıkla yeniden oluşmasından kaynaklanmaktadır. Dislokasyonlara bağlı gelişen birim şekil değişimi enerjisi alüminyum alaşımlarında az derecede depolanmıştır ve rekristalizasyon için gereken enerji daha azdır. Bu da küçük boyutlu tanelerin oluşması için çok enerji depolanmasını söyleyen tane küçülmesi teorisiyle çakışmaktadır. Ayrıca Fe bazlı alaşımların aksine Al alaşımlarında faz dönüşümüyle kristal yapıda bir değişim görülmemektedir.

Alüminyum alaşımlarında rekristalizasyondaki zorluğa rağmen bir aşırı plastik deformasyon yöntemi olan eş kanallı açılı presleme (EKAP) ile boyutları 1 μ m'den küçük taneler elde etmek mümkündür. [28]

Birçok araştırmacı EKAP'ın çeşitli alüminyum alaşımları üzerindeki etkilerini incelemiştir.

1100, 2024, 3004, 5083, 6061 ve 7075 alaşımlarında oda sıcaklıklarında EKAP'landıklarında mikronaltı tane büyüklüklerine ulaşıldığı, ayrıca ilk basma işlemi sonucunda malzemenin kopma uzamasının azaldığı, daha sonraki basma işlemlerinde ise dayanımın artmasına rağmen kopma uzama miktarında önemli bir değişme olmadığı bulunmuştur. Statik tavlama işlemleri sonucunda 1100, 3004, 5083, 6061 alaşımları için tane büyümesi 200°C'den sonra, 7075 ve 2024 alaşımları ise bu sıcaklığın 300°C'ye kadar bile çıkabildiği ayrıca EKAP işleminde tane boyutunun malzeme özelliklerine ya da mikroyapıya hiçbir etkisi olmadığı Langdon ve çalışma arkadaşları tarafından bulunmuştur.[28]

Bir başka çalışma da EKAP'lanan 2024 alaşımının yaşlandırma sonucunda alacağı değişim üzerine yapıldı. Gholinia ve arkadaşları alüminyum alaşımlarında EKAP sonrası ısıtılma işlemi gerek olmayabileceğini söylediler de [5] Kim ve arkadaşları EKAP işlemi öncesinde katı çözeltiye alınan daha sonra EKAP'lanan ve yapay yaşlandırılan malzemenin dayanımında ve sünekliğinde önemli artış olduğunu bulmuşlardır.[8]

Yine 6061 alüminyum alaşımında tek bir pasodan sonraki ısıtılma işleminin bile son derece etkili olabildiği ortalama bir süneklik korunurken son derece yüksek bir dayanıma ulaşıldığı Kim ve arkadaşları tarafından [31] bulunmuş ve bu şekilde EKAP'lanan malzemelere yaşlandırma işleminin uygulanmasının getireceği avantajlar iyicene belirginleşmiştir.,

Gene Kim ve arkadaşları tarafından yapılan son derece güncel çalışmalardan biri de EKAP'lanan 2024 alaşımının termal kararlılığı ve çekme dayanımı hakkında olmuştur. Önceki deneylerde önce EKAP'lanıp ardından yaşlandırılan numunelerin tersine burada parça önce yaşlandırılmış daha sonra eş kanallı açılı presleme işlemine maruz bırakılmıştır. Maksimum yaşlandırılan ve aşırı yaşlandırılan numuneler EKAP'lanmış, daha sonra da tavlama işlemine maruz bırakılmışlardır. Maksimum yaşlandırılan numunelerde de aşırı yaşlandırılan numunelerde de 8 basma tekrarı sonucunda yaklaşık 0,25µm'lik tane boyutuna ulaşılmış, 200°C'lik tavlama sıcaklıklarında ultraküçük tanelerin boyutlarında değişiklik olmadığı fark edilmiş, 300°C'lik tavlama sıcaklıklarında ise sınırlı bir tane büyüme hali görülmüştür. EKAP

öncesi maksimum yaşlandırma uygulanan 2024 alüminyum alaşımında, aşırı yaşlanmış ve EKAP'lanan malzemeye kıyasla, EKAP işlemi sonucunda malzeme dayanımında son derece yüksek değerler elde edilmiştir.[30]

Hong.Xing ve arkadaşlarının 2024 alüminyum alaşımıyla ilgili bu yıl yaptığı çalışmada gene EKAP'ın malzeme üzerindeki etkileri ayrıntı bir şekilde incelenmiş, uygulanan suni yaşlandırmanın süresi ve sıcaklığı değiştirilmiş, EKAP'lanan 2024'in malzemesinin sadece yaşlandırma faktörlerinin doğru ayarlanarak %37 civarında arttırılabileceğini, sertliğin tek bir pasodan sonra dahi 204 Hv'ye çıkarılabileceğini göstermiştir. Aynı şekilde malzemenin çekme dayanımı 610 MPa'la çıkmıştır, EKAP'lanmamış aynı malzemenin aynı koşullardaki çekme dayanımı 460 MPa değerlerindedir. EKAP'lanmamış ama aynı sıcaklıklarda ve sürede yaşlandırılmış aynı malzemeye göre önemsiz sayılabilecek ufak bir artış elde edilmiştir.[27]

Gene son zamanlarda Horita ve arkadaşları tarafından yapılan Al.Ag alaşımlarının yaşlanma karakteristiği ile ilgili çalışmalarda numunelerin 373K° ve 473K° sıcaklıklarında 300 saatlik peridolara kadar yaşlanmaları sağlanmış ve maksimum sertliği 373°K sıcaklığında 100 saat yaşlandıktan sonra yakalamıştır. [29]

Zheng ve arkadaşlarının 7050 alüminyum alaşımıyla ilgili yaptıkları çalışmalarda ise önceden tavlanan malzemeye EKAP sonrası yaşlandırma, EKAP sonrası kısa tavlama ardından yaşlandırma, EKAP öncesi tavlama ve sonrasında tekrar kısa tavlama gibi ısıt işlemlerin malzemenin içyapısına ve mekanik özelliklerine yaptığı etkiler araştırılmıştır. En etkili yöntemin diğer çalışmalardan da bilindiği gibi su verilmiş alüminyumun yaşlandırılmasıyla elde edildiği görülmüştür. Burada malzemenin dayanımını arttıran mekanizmaların tane küçülmesinden, çökelme sertleşmesinden ve dislokasyon yoğunluğu artmasından kaynaklandığı anlaşılmıştır. En yüksek dayanımın elde edildiği sonuçta malzemenin çekme dayanımının 677MPa olduğu belirlenmiştir. 3 paso sonucunda elde edilen bu değer aynı özelliklere sahip malzemenin sadece suni yaşlandırılması sonucunda elde edilecek sonucundan yaklaşık %30 daha fazladır.[32]

4. DENEY DÜZENEGİ

2024 alüminyum alaşımasının eş kanallı açılı presleme ile deformasyon uğratılması ve ardından yaşlandırılması işlemi için deney düzeneği kurulmuştur. Çözeltiye alma ısıtma işlemi için, ardından eş kanallı açılı presleme işlemi için, yaşlandırma işlemi için ve sertliklerin ölçülmesi için bu düzenden yararlanılmıştır.

4.1 Çözeltiye Alma Isıl İşlemi Deney Düzeneği

Çözeltiye alma ısıtma işlemi için İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojileri ABD'ne bağlı döküm laboratuvarında bulunan ve deney için yenilenen 3 fazlı, 1200°C sıcaklığa çıkabilen, homojen ısı dağılımı sağlayan dairesel kesitli fırın kullanılmıştır.

Fırında parçaların homojen bir şekilde ısınabilmesi ve sıcaklıklarını koruyabilmeleri amacıyla fırın kesitine uygun bir şekilde 280 mm çapında ve 750 mm uzunluğunda paslanmaz çelikten bir pota yaptırılmıştır. Pota, çözeltiye alma ısıtma işlemi esnasında sıcaklık 500°C civarında yaklaşık 12 saat süreceği için ve içinde bulunan çözeltiye alma ısıtma işlemini tam gerçekleştirebilmek için bulunan $BaCl_2$ (baryum klorür) çözeltisinin oluşturacağı yoğun korozyon ortamına karşı dayanımını koruyabilmesi için 316L karbonu azaltılmış astenitik paslanmaz çelikten yaptırılmıştır. Parçanın içinde bekletildiği baryum klorür, 2024 alüminyum alaşımasının çözeltiye alma ısıtma işlemi esnasında sıklıkla kullanılan bir tuzdur, 700°C sıcaklığa kadar kullanılabilir özelliğine sahiptir.



Şekil 4.1 Dairesel kesitli fırın

Aynı anda birden çok numune fırın içinde sıcaklık değişimi olmadan bekletilebilmektedir.

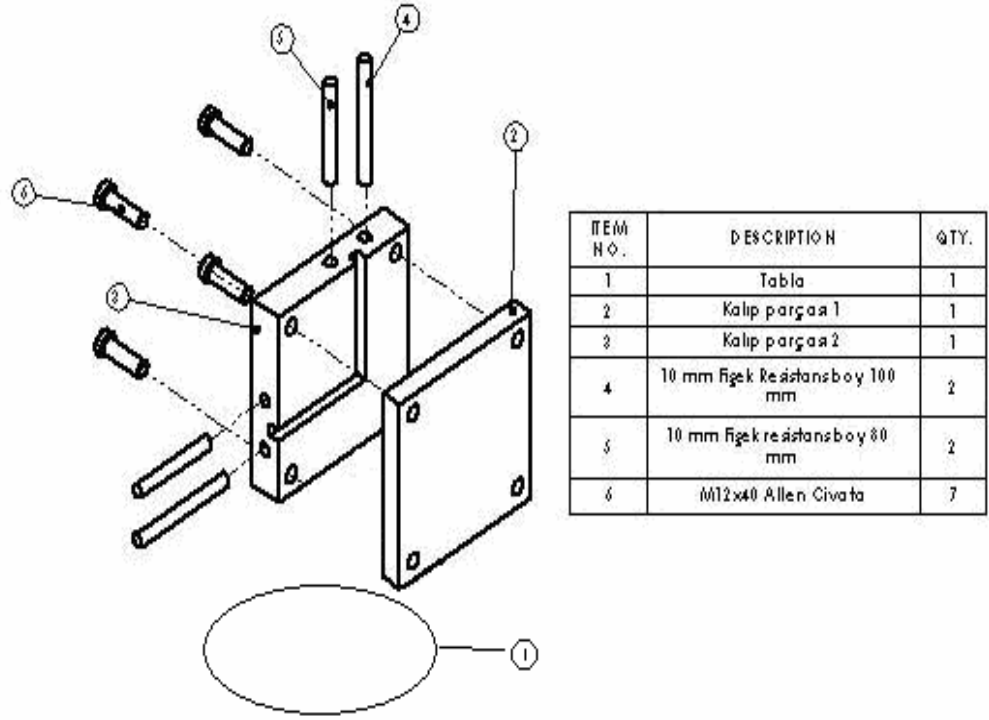
Fırında Ni-CrNi (nikel krom-nikel) eleman teline sahip, $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ duyarlılığa sahip 200°C ile 1200°C sıcaklıkları arasında çalışabilen K-Tipi termokupl ve dijital gösterge bulunmaktadır.

4.2 Eş Kanallı Açılı Presleme Deney Düzeneği

Eş kanallı açılı presleme işleminin yapılabilmesi için kalıp, numuneler ve pres kullanılmıştır.

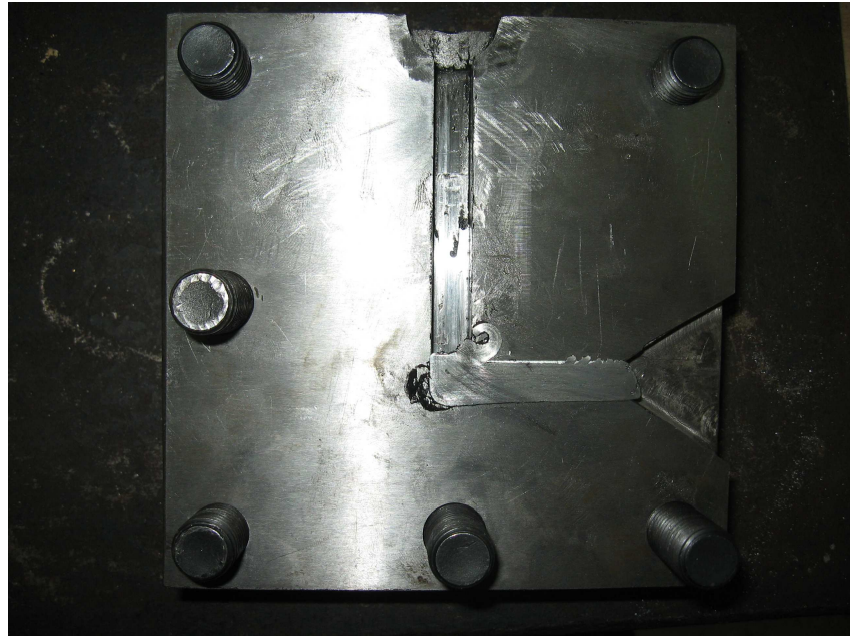
EKAP işleminin gerçekleştirilmesi için öncelikle kalıp hazırlanmıştır. Kalıp malzemesi olarak AISI 1050 çeliği kullanılmıştır.

Kalıptaki kanallar freze, radyuslar dalma erozyonla elde edilmiştir.



Şekil 4.2 EKAP kalıbı

Kalıbın talaşlı işlenmesi bittikten sonra kalıp indüksiyonla sertleştirilmiştir.

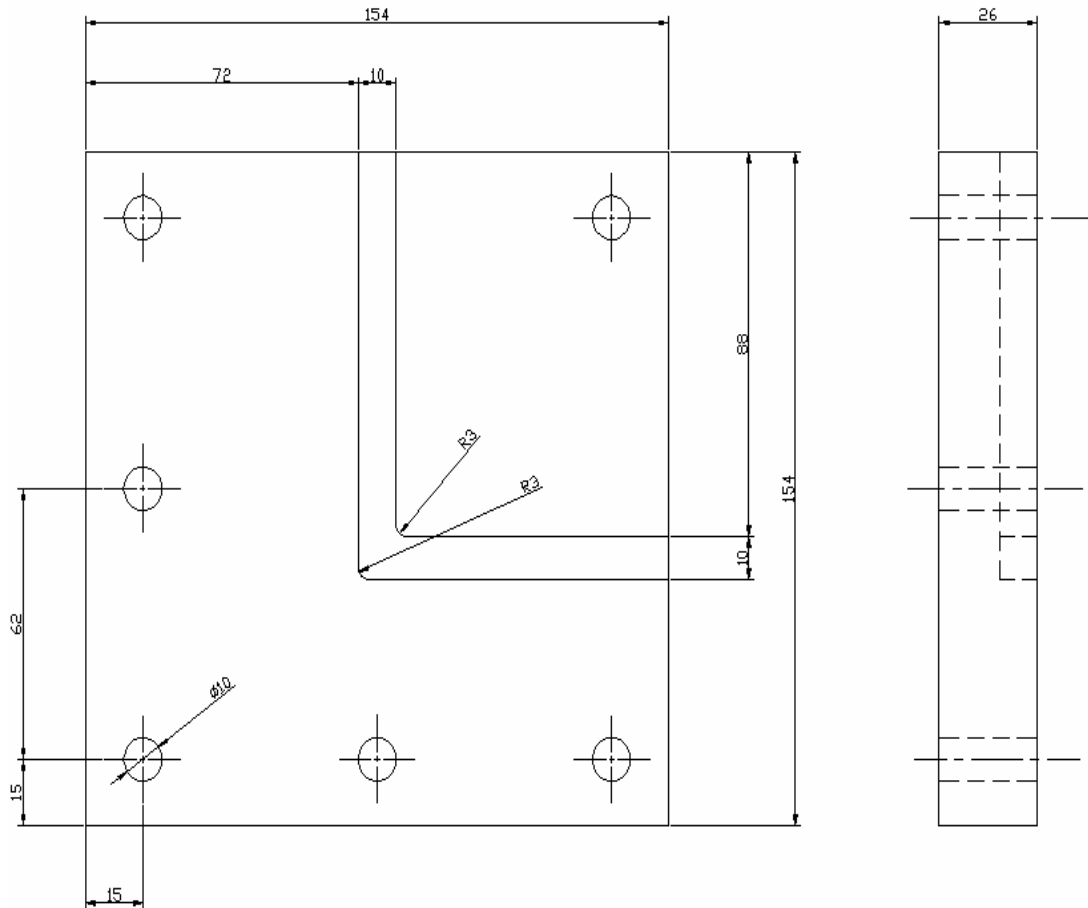


Şekil 4.3 EKAP kalıbı ve basılmış numune

Kalıp yukarıda görülen dişi kısım ve üzerini kapak olmak üzere iki kısımdan oluşmuştur. Kalıbın kapanması ve basma işlemi esnasında açılmaması için 6 adet 8.8'lik M16 cıvata ve somunları kullanılmaktadır.



Şekil 4.4 Kalıp kapağı



Şekil 4.5 Deneyde kullanılan EKAP kalıbının teknik resmi

Deneyde kullanılan numuneler AA 2024 alüminyum alaşımından üretilmiş olup karesel kesitlidirler. 9,85 mm x 9,85 mm x 65 mm çubuklar şeklinde frezede işlenmişlerdir.



Şekil 4.6 AA 2024 alüminyum alaşımlı numuneler

Parçayı basabilmek için iki adet ıstampa işlenmiştir. Ana ıstampa AISI 2080 (D3) takım çeliğinden imal edilmiş olup, 1050°C’de ostenitlenip soğutularak 59 HRc’ye ulaşması sağlanmıştır. Istampa dairesel bir baş üzerinden devam etmektedir. 10mm x 10 mm karesel kesite sahiptir. İkincil ıstampa 10mm x 10mm x 65 mm karesel kesite sahip, AISI 4340 çeliğinden üretilmiştir, 1 saat 900°C’de suverme ve ardından 200°C’de 50 dakika temperleme sonucu sertliği 58 HRc ‘ye getirilmiştir.



Şekil 4.7 Ana ıstampa

Deney İTÜ Makine Fakültesi Makine Malzemesi laboratuvarlarından Mekanik Deneyler laboratuvarında Dartec marka 60.000 kgf kapasiteli üniversal hidrolik çekme-basma cihazında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8 Dartec çekme-basma cihazı

4.3 Yaşlandırma Deney Düzenegi

EKAP'lanan parçaların yapay bir şekilde yaşlandırılabilmesi için rezistanslı, ısınabilen çelik bir kap içerisine silikon yağı konuldu. Sıcaklık ayarı Fe-Konst (demir konstantan) eleman telli, -200° ile 800°C sıcaklıkları arasında çalışabilen $\sim 52 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ duyarlılığa sahip J.tipi termokuplun bağlı olduğu dijital gösterge ve kontaktörle gerçekleştirildi.

Sistem, yaşlandırılan numunelerin bulunduğu silikon yağının sıcaklığını sabit bir şekilde tutabilmektedir.



Şekil 4.9 Yapay yaşlandırma düzeneği

4.4 Sertlik Ölçme Düzeneği

Sertlik ölçme işlemi için İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojileri ABD'na bağlı mekanik deneyler laboratuvarında bulunan Shimadzu marka Vickers sertlik ölçme cihazıyla yapılmıştır.

5. DENEY SONUÇLARI

Deneye başlanmadan evvel AA 2024 alüminyum alaşımından numuneler elde edilmiş ve boyutları 9,85 mm x 9,85 mm x 65 mm çubuklar şeklinde frezede işlenmiştir.

İlk deneyde ilk başta 6 adet numuneye çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmış ve malzeme yaşlanmaya fırsat bulanmadan malzemenin sertlik dağılımı incelenmiştir. Sertlikleri ölçülen numuneler gene yaşlanmalarına fırsat verilmeden bir paso EKAP ile plastik deformasyona uğratılmış ve sertliğindeki artış kaydedilmiştir. Daha sonrasında ise yaşlandırmanın aşırı plastik deformasyona uğratılmış malzemelerin üzerindeki etkisini ölçebilmek amacıyla numuneler yapay yaşlandırılmış ve sertliklerindeki artış kaydedilmiştir.

İkinci deneyde malzemelerde daha çok pasoda EKAP işleminin etkisini görebilmek ve bir paso EKAP'lanan numunelerle kıyaslayabilmek amacıyla farklı 2 adet numuneye yukarıda sayılan işlemlerin aynısı uygulanmış, ancak parçalar bu sefer art arda iki kere basılmışlardır. Daha sonra yaşlandırılan bu numunelerin de sertliklerindeki artış kaydedilmiştir.

Üçüncü deneyde EKAP işleminin malzemenin akma dayanımına etkisinin bulunabilmesi için EKAP'lanmamış 4 adet AA 2024 alüminyum alaşımı yapay yaşlandırılmış (T6) çekme numunesi hazırlanmıştır. EKAP'lanmış ve aynı sürede yaşlanmış numunelerden de aynı boyutlarda 4 adet çekme numunesi hazırlanmış ve malzemenin dayanımındaki değişimler gözlemlenmiştir.

İlk deneyde kullanılan Al 2024 malzemesine başlangıçta çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmıştır. 6 adet numune 495°C sıcaklıkta 12 saat bekletilmiştir ve malzemede tek faz oluşması sağlanmıştır. Daha sonra oda sıcaklığında suya daldırılarak su verme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemlerin ardından numunelerin hepsinin sertlikleri Vickers cinsinden ölçülmüştür, sonuçlar aşağıdaki gibidir.

Tablo 5.1 Çözeltiye alma ısıt işleminin sonrası sertlik ölçümleri

		Sertlik (HRv)			
<u>Numune 1</u>	<u>Numune 2</u>	<u>Numune 3</u>	<u>Numune 4</u>	<u>Numune 5</u>	<u>Numune 6</u>
98,4	99,0	94,6	85,6	102,0	99,0
95,0	94,0	96,4	94,2	97,2	95,5
101,2	96,7	89,7	96,0	98,2	85,6
103,0	96,7	98,3	106,0	95,3	93,3
105,0	99,8	99,9	105,6	109,0	94,1
92,0	100,3	94,6	102,4	99,0	94,1
<u>99,1</u>	<u>97,8</u>	<u>95,6</u>	<u>98,3</u>	<u>100,1</u>	<u>93,6</u>

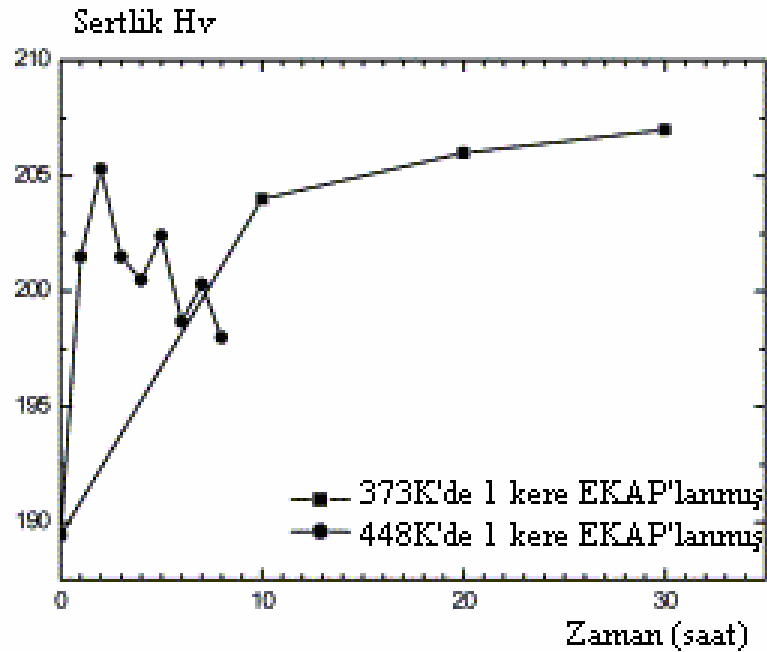
Daha sonra malzemeler yaşlanmadan EKAP ile aşırı plastik deformasyona uğratılmışlardır. EKAP işlemi 0,1mm/s ile stroke kontrollü yapılmış, malzeme yaklaşık 120kN'luk kuvvet sonrasında akma göstermiştir. Malzemenin basılması için gereken süre yaklaşık 620 saniye olarak hesaplanmıştır.

Aşırı plastik deformasyon sonrası kalıptan çıkarılan numunelerde sertlik ölçümü yapılabilmesi için yüzeyleri 1000'lik zımpara kâğıdıyla zımparalanmış, ardından parlatılmış ve alkolle temizlenmişlerdir. Parçaların sertlikleri doğal yaşlanmaya uğramamaları için EKAP işleminin hemen ardından gerçekleştirilmiştir. Numunelerin sertlikleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 5.2 Bir paso EKAP sonrası malzeme sertlik ölçümleri

		Sertlik (HRv) (1 EKAP sonrası)			
<u>Numune 1</u>	<u>Numune 2</u>	<u>Numune 3</u>	<u>Numune 4</u>	<u>Numune 5</u>	<u>Numune 6</u>
161,8	162,2	164,0	155,0	162,5	168,0
170,0	178,5	183,6	165,1	156,6	172,0
170,5	178,6	170,3	162,8	161,0	172,3
173,0	172,0	170,3	158,7	165,3	189,0
169,0	156,0	170,2	157,0	157,4	165,1
175,5	167,0	165,0	156,0	158,0	164,7
<u>170,0</u>	<u>169,1</u>	<u>170,6</u>	<u>159,1</u>	<u>160,1</u>	<u>171,9</u>

Sertlik ölçümlerinden sonra aşırı plastik deformasyona uğramış AA 2024 alüminyum alaşımının yaşlanma ile özelliklerinin değişiminin saptanabilmesi amacıyla yapay yaşlandırma işlemi başlamıştır. Numuneler 373°K (100°C) sıcaklığında yaklaşık 20 saat süreyle yaşlandırıldılar. 448°K (175°C) yaklaşık 6 süreyle de optimum sertliğe ulaşmak mümkün görünmekteydi ancak, 1 saatlik gecikmede dahi aşırı yaşlanma başladığından deneyin kesinliği açısından bu sıcaklık seçildi.



Şekil 5.1 Farklı yapay yaşlandırma sıcaklıklarının EKAP'lanmış 2024'e etkileri (8)

Yaşlandırma işlemi sonucunda numuneler alkolle temizlenmiş ve sertlikleri yeniden ölçülmüştür. Sonuçlar aşağıdaki tablodaki gibidir.

Tablo 5.3 Bir paso EKAP sonrası yaşlandırılan numunelerin sertlik ölçümleri

Sertlik (Hv) (1 EKAP sonrası yaşlandırma sonucu)					
<u>Numune 1</u>	<u>Numune 2</u>	<u>Numune 3</u>	<u>Numune 4</u>	<u>Numune 5</u>	<u>Numune 6</u>
195,8	189,0	191,7	182,3	192,2	201,0
196,0	198,9	187,3	180,1	191,9	200,1
188,8	195,4	189,0	181,0	191,8	198,4
194,9	197,2	198,0	184,4	190,0	204,0
192,3	195,0	200,1	186,0	187,8	200,6
202,0	195,0	192,5	178,9	188,0	202,0
<u>195,0</u>	<u>195,1</u>	<u>193,1</u>	<u>182,1</u>	<u>190,3</u>	<u>201,0</u>

İkinci deney için AA 2024 alüminyum alaşımından 9,85 mm x 9,85 mm x 65 mm boyutlarında 2 adet numune hazırlanmış ve çözeltiye alınmıştır. Çözeltiye alma ısıl işlemi 495°C sıcaklıkta 12 saat devam ettirilmiş ve ardından oda sıcaklığındaki suya atılarak suverme işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ilk andaki sertlik dağılımı aşağıdaki gibidir.,

Tablo 5.4 Çözeltiye alma ısıl işlemi sonrası numunelerde sertlik ölçümleri

Sertlik (Hv)	
<u>Numune 1</u>	<u>Numune 2</u>
102,1	107,6
99,3	99,1
100,1	110
111,0	104,6
100,0	107,4
99,2	97,4
<u>102,0</u>	<u>104,4</u>

Numuneler çözeltiye alma ısıtma işleminden sonra bekletilmeden 2 kere EKAP'lanmışlardır. İlk ve ikinci EKAP işlemi sonucu sertlikler aşağıdaki gibidir.

Tablo 5.5 Numunelerde bir EKAP sonrası sertlik ölçümleri

Sertlik Hv (1 EKAP sonrası)	
<u>Numune 1</u>	<u>Numune 2</u>
170,3	180,2
175,4	174,6
182,0	185,1
181,5	176,3
180,2	179,8
176,0	177,2
<u>177,6</u>	<u>178,9</u>

Tablo 5.6 Numunelerde iki paso EKAP sonrası sertlik ölçümleri

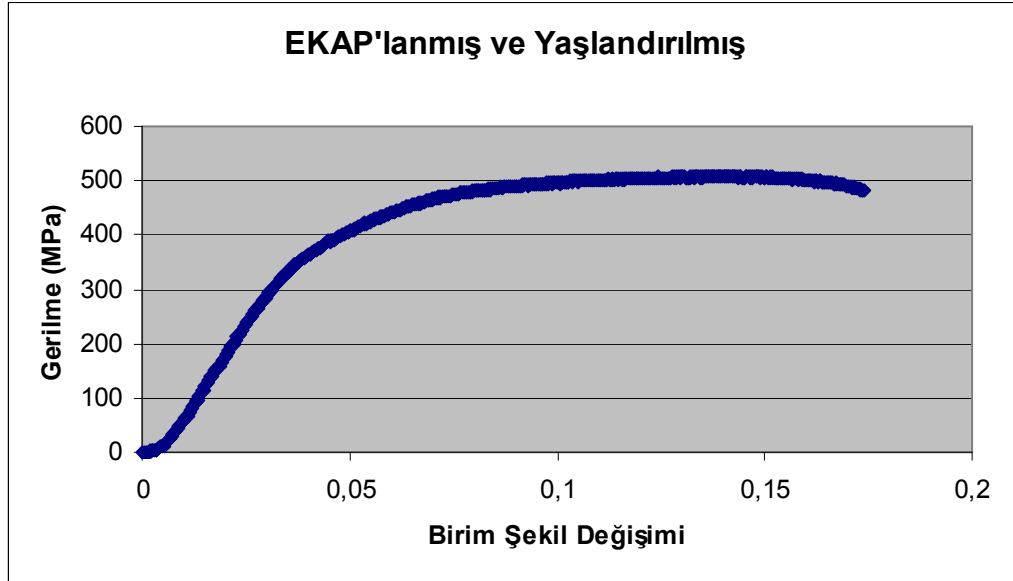
Sertlik (Hv) (2 EKAP sonrası)	
<u>Numune 1</u>	<u>Numune 2</u>
199,2	207,0
202,0	202,2
201,6	186,9
204,0	200,7
200,1	203
200,4	204,1
<u>201,2</u>	<u>200,7</u>

Numuneler 2 EKAP sonrası yaşlandırmanın etkilerini ölçebilmek amacıyla 373°K (100°C) sıcaklığında yaklaşık 20 saat süreyle yapay yaşlandırıldılar. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

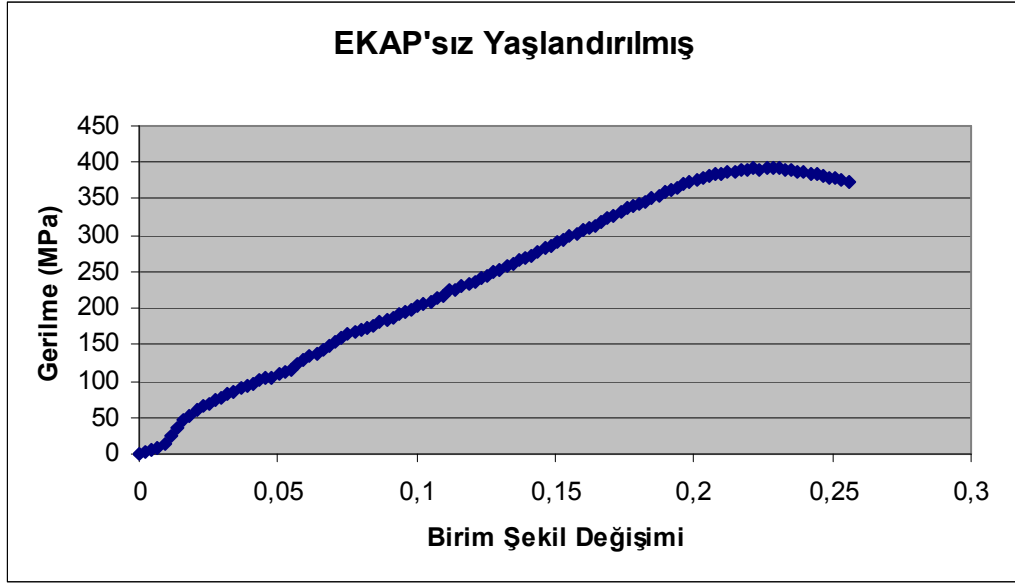
Tablo 5.7 Artarda iki paso EKAP'lanan ve yapay yaşlandırılan malzemenin sertliği

Sertlik (Hv)	
<u>Numune 1</u>	<u>Numune 2</u>
212	213
212,4	211,9
208,4	218,2
223	212,4
217,3	219,3
209,8	218
<u>213,8</u>	<u>215,5</u>

AA 2024 alüminyum alaşımının bir paso EKAP'landıktan ve yapay yaşlandırıldıktan sonraki dayanım özelliklerini, aynı malzemeye EKAP uygulanmadan sadece yapay yaşlandırma ile elde edilen dayanım özellikleri ile kıyaslayabilmek için her bir malzemedan 4'er adet numune hazırlandı. Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı.

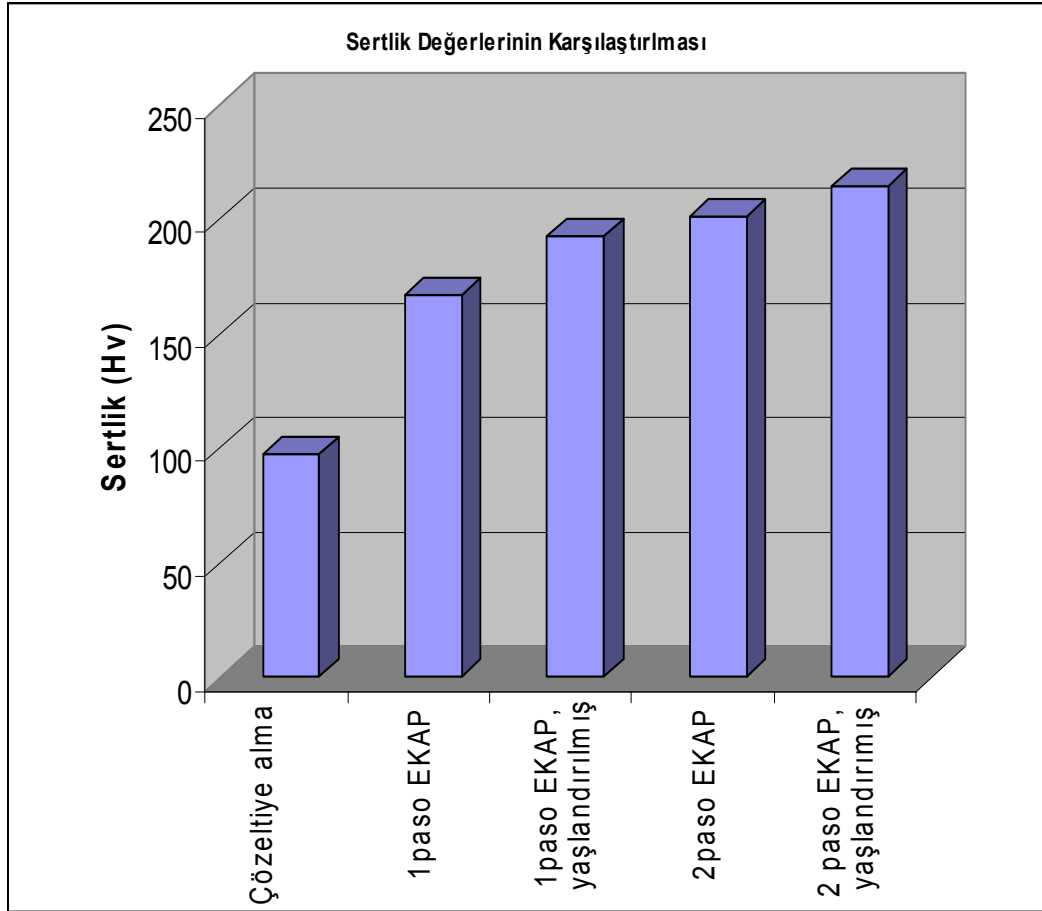


Şekil 5.2 EKAP'lanmış ve ardından yaşlandırılmış 2024 malzemesinde çekme deneyi



Şekil 5.3 Sadece yaşlandırılan numunede çekme deneyi

Yapılan deneyler sonunda malzemenin sertliğinin; çözeltiye alma ısıtma işlemi, bir paso EKAP, bir paso EKAP ardından yaşlandırma, 2 paso EKAP, iki paso EKAP ardından yaşlandırma işlemleri sonunda gösterdiği farklılıklar aşağıdaki gibidir.



Şekil 5.4 Sertliklerin karşılaştırılması

6. SONUÇLARIN YORUMLANMASI

AA 2024 alüminyum alaşımının eş kanallı açılı presleme aşırı plastik deformasyona uğratılması deneyinde birinci amacımız malzemenin EKAP'landıktan sonra sertlik ve dayanımlarındaki değişimin belirlenmesi idi.

Numunelerin bir paso EKAP sonrasında dahi %50 ile %70 arasında değişen oranlarda sertlik artışı gösterdikleri, çözeltiye alma ısıtıl işlemi sonucunda 100 Hv civarında olan sertlik değerlerinin, tek bir paso EKAP'tan sonra dahi 150 ile 170 Hv arasında değerlere yükseldiği belirlenmiştir. Aynı numunelerin yapay yaşlanmaya maruz bırakıldıklarında ise sertliklerinde yaklaşık %15'lik bir artış meydana geldiği ve sertliklerinin 195 Hv civarına geldiği tespit edilmiştir. 2024 T6 (yapay yaşlandırılmış) malzemesinin sertliğinin 140 Hv olduğu düşünülürse yöntemin malzeme üzerindeki olumlu etkisi anlaşılabilmektedir.

EKAP'lanan malzemelerden elde edilen çekme numuneleriyle yapılan çekme deneyi sonucundaysa aşırı plastik deformasyona uğrayan ve yaşlanan malzemenin akma dayanımının %30'dan fazla arttığı, EKAP'lanmamış 2024 T6 malzemesinin akma dayanımı yaklaşık 400MPa'ken EKAP'lanmış aynı özelliklere sahip malzemenin akma dayanımının 520 MPa civarında olduğu görülmüştür.

Malzemelerin akma dayanımı, ısıtıl işlemle değişebilen bir özelliktir. Dislokasyon yoğunluğunun artması, tane boyutunun küçülmesi malzemenin akmasını güçleştiren ve arttıran özelliklerdir. Malzemeler plastik deformasyona uğradıkları zaman dislokasyon yoğunluğu artmaktadır, aşırı plastik deformasyonda ise bu yoğunluk daha da artmakta ve malzemeye dayanım ve sertlik kazandırmaktadır. Aynı şekilde tane boyutunun 1mm'den 1,3µm inmesi, yani tane boyutunun neredeyse 770 kere küçülmesi de malzemenin dayanımını arttıran mekanizmalardan biridir. Malzemenin dayanımındaki ve sertliğindeki artış bu iki mekanizmaya bağlanabilir.

Diğer bir deneyde malzemenin iki kere EKAP'lanması sonucunda ve yaşlandırılması sonucunda elde edilen sertlik değerleri karşılaştırılmıştır. Malzeme ilk EKAP uygulandığında gözlemlenmiş olan yaklaşık %70'lere varabilen sertlik artışı aynı malzemeye ikinci defa EKAP uygulandığı zaman birinci EKAP sonraki sertliğe

kıyasla en fazla %18 artış göstermiştir. İlk EKAP sonrası 170 Hv civarında olan malzeme sertliği 190 Hv'ye çıkmıştır. Yaşlandırma sonucu malzeme %12 civarında bir sertlik artışı göstermiş ve 209Hv'lik bir sertliği ulaşmıştır.

Deneylerde de görüldüğü gibi EKAP yöntemi, malzemenin sertliğini ve dayanımını arttırmak için önemli bir yöntemdir. Tek bir pasoda bile malzemenin dayanım özelliklerini %50 oranında arttırmak mümkündür. Aşırı plastik deformasyon uygulanmış malzemenin özelliklerini daha da iyileştirmek ise yaşlandırma ile mümkün olabilmektedir; nitekim EKAP'lanmış malzemeye uygulanan yapay yaşlandırma ile malzemenin dayanım özellikleri daha da ileriye götürülebilirdiği bu çalışmada gözlemlenmiştir.

EKAP'lanmamış, sadece yapay yaşlandırılmış 2024 T6 malzemesinde kopma anındaki birim şekil değişimi değeri yaklaşık $\epsilon = \% 27$ 'dir. EKAP'lanmış ve yaşlandırılmış malzemede ise kopma anındaki birim şekil değişim değeri yaklaşık $\epsilon = \% 20$ olmaktadır. Buna istinaden, malzemenin aşırı plastik deformasyona uğradığı halde, akma dayanımında önemli bir artış olurken süneklikte ciddi bir kayıp ile karşılaşmadığını söyleyebiliriz.

KAYNAKLAR

- [1] **Yamashita A., Horita, Z., Langdon, T.G.,** 2000. Improving the mechanical properties of magnesium and a magnesium alloy through severe plastic deformation, *Material Science and Engineering, A* 300, 142
- [2] **Askeland, D.R.,** 1994. *The Science and Engineering of Materials*, 3. Baskı, PWS Publishing Company, Boston.
- [3] **Furukawa, M., , Horita, Z., Langdon, T.G.,** 2001 Developing Ultrafine Grain Sizes Using Severe Plastic Deformation, *Advanced Engineering Materials*, 3, 121
- [4] **Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K., Alexandrov, I.V.,**1999, Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation, *Progress in Materials Science*, 45, 105, Elsevier Science Ltd., RF.
- [5] **Gholinia, A., Prangnell, P.B., Markushev, M.V.,**1999. The effect of strain path on the development of deformation structures in severely deformed alloys processed by ECEA, *Acta Materialia*, 48, 1115
- [6] **Furukawa, M., , Horita, Z., Langdon, T.G., Nemoto, M.,** 2001. Processing of metals by equal-channel angular pressing, *Journal of Materials Science*, 36, 2835
- [7] **Furukawa, M., Horita, Z., Langdon T.G., Xu,C.,** 2003. Achieving a Superplastic Forming Capability through Severe Plastic Deformation, 5, 359
- [8] **Kim,W.C., Chung,C.S., Ma D.S., Hong, S.I., Kim, H.K.,** 2003. Optimization of strenght and ductility of 2024 Al by equal channel angular pressing (ECAP) and post-ECAP aging, *Scripta Materialia* 49, 333-338
- [9] **Göleryüz, C.G., Aran., A.,** 2001. 8090 Alüminyum Lityum alaşımlarında retrogasyon ardından yeniden yaşlandırma ısııl işlemiyle özelliklerin optimizasyonu, yüksek lisans tezi, 17, İTÜ, İstanbul.
- [10] **Demirkol, M.,** 2006, *Melzemelerin Mekanik Davranışı*, ders notları, 3-10, 22 Ocak 2001, İTÜ, İstanbul.
- [11] **Yalçın, H.,Gürü, M.** 2002, *Malzeme Bilgisi*, 121, Palme Yayıncılık

- [12] **Davis, J.R.(Editor)**, 1999. Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International, Materials Park OH.
- [13] **Işık, A.E., Gülmez, T.**, 2005. Eşit Kesitli Kanal İçinde Açılı Presleme/Ekstüzyon (ECAP/ECAE) Yoluyla Aşırı Plastik Deformasyon, yüksek lisans tezi, 9 Mayıs 2005, İTÜ, İstanbul
- [14] **Chung M.K.,Choi Y.S.,Kim J.G.,Kim Y.M.,Lee J.C.**, 2004. Effect of the number of ECAP pass time on the electrochemical properties of 1050 Al alloys, Materials Science and Engineering A366 282–291
- [15] **Zhu Y.T., Lowe T.C., Langton T.G.**, 2004. Performance and applications of nanostructured materials produced by severe plastic deformation, Scripta Materialia 51 825–830
- [16] **Pippan R., Wetscher F., Hafok M., Vorhauer A, Sabirov I.**, 2006. The Limits of Refinement by Severe Plastic Deformation, Advanced Engineering Materials, No:11 1047-1056
- [17] **Wei Q. , Zhang H.T., Schuster B.E., Ramesh K.T., Valiev R.Z., Kecskes L.**, 2006. Microstructure and mechanical properties of super-strong nanocrystalline tungsten processed by high-pressure torsion, Acta Materialia, 54 4079-4089
- [18] **Li B.L., Tsuji N , Kamikawa N**, 2006. Microstructure homogeneity in various metallic materials heavily deformed by accumulative roll-bonding, Materials Science and Engineering A 423 331-342
- [19] **Chen M.C., Hsieh H.C., Wu W.**, 2006. The evolution of microstructures and mechanical properties during accumulative roll bonding of Al/Mg composite, Journal of Alloys and Compounds 416 169-172
- [20] **Suh J.Y, Han J.H., Oh K.H., Lee J.C.**, 2003. Effect of deformation histories on texture evolution during equal- and dissimilar-channel angular pressing, Scripta Materialia 49 185-190
- [21] **Hanb J.H., Huha M, Suhb J.Y., Leea J.C.**, 2005. Controlling the textures of the Al alloy sheet via dissimilar channel angular pressing, Materials Science and Engineering A 394 60–65
- [22] **Richert M, Stu H.P., Zehetbauer M.J., Richert J, Pippan R, Motz C**, 2003. Work hardening and microstructure of AlMg5 after severe plastic deformation by cyclic extrusion and compression, Materials Science and Engineering A355 180/185
- [23] **Lee J.W., Park J.J.**, 2002 Numerical and experimental investigations of constrained groove pressing and rolling for grain refinement, Journal of Materials Processing Technology 130–131 208–213

- [24] **Langdon T.G., Valiev R.Z.**, 2006. Development in the use of ECAP processing for grain refinement, *Rev.Adv.Mat.Sci.* 13 15-26
- [25] **Özel K.**, 2005. Aşırı plastik deformasyon metodlarının alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine etkisi, yüksek lisans tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne
- [26] **Zhou F., Lee Z., Lavernia E.J., and Nutt S.R.**, 2005. The Influence of Sc on Thermal Stability of a Nanocrystalline Al-Mg Alloy Processed by Cryogenic Ball Milling, *Metallurgical And Materials Transactions A Volume 36a* 1587
- [27] **Xing X.H., Nong C.X., Gang S., Ping J.M., Jing X.X.**, 2006. Effect of ECAP on mechanical properties of 2024 Al alloy, *Materials Science and Engineering A* 1-3
- [28] **Horita Z., Fujinami T., Nemoto M., Langdon T.G.**, 2001. Improvement of mechanical properties for Al alloys using equal channel angular pressing, *Journal of Materials Pressing Technology* 117 288-292
- [29] **Ohashi K, Fujita T., Kaneko K., Horita Z., Langdon T.G.**, 2006. The aging characteristics of an Al-Ag alloy processed by equal channel angular pressing, *Materials Science and Engineering A* 437 24 - 247
- [30] **Mao J., Kang S.B., Park J.O.**, 2005. Grain refinement, thermal stability and tensile properties of 2024 aluminum alloy after equal channel angular pressing, *Journal of Materials Pressing Technology* 159 314- 320
- [31] **Kim J.K., Kim H.K., Park J.W., Kim W.J.**, 2005. Large enhancement in mechanical properties of the AL alloys after a single pressing by ECAP. *Scripta Materialia* 53 1207-1211
- [32] **Zheng L.J., Li H.X., Hashmi M.F., Chen C.Q., Zhang Y., Zeng M.G.**, 2006. Evolution of microstructure and strengthening of 7050 alloy by ECPA combined with heat treatment, *Journal of Material Processing Technology* 171 100-107
- [33] **Özel K, Akata E.H., Çan Y.**, 2006. Eşit Kanal Açısız Basma İşlemi İle İlgili Deneysel Bir Araştırma, Trakya Üniversitesi, Edirne
- [34] **Komura S, Furukawa M, Horita Z, Nemoto M, Langdon T.G.**, 2001. Optimizing the procedure of equal-channel angular pressing for maximum superplasticity, *Materials Science and Engineering A* 297 111–118

- [35] **Akihiro Yamashita A., Zenji Horita Z, Langdon T.G.,** 2001. Improving the mechanical properties of magnesium and a magnesium alloy through severe plastic deformation, *Materials Science and Engineering A300* (2001) 142–147

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında İstanbul’da doğan İzer FRANKO ilk, orta ve lise eğitimini İstanbul’da tamamladı. 2000 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi’nde eğitim hakkı kazanarak, 2004 yılında makine mühendisliğinden mezun oldu. Aynı sene İstanbul Teknik Üniversitesinde Makina Mühendisliği, Malzeme ve İmalat bölümünde yüksek lisansa başladı. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi Makine Malzemesi ve İmalat Teknolojileri ABD’nda araştırma görevliliğe kadrosuna atandı. İyi derecede İngilizce ve Almanca bilmektedir.

