

Bir Eşit Kanal Açısız Presleme Düzeneginin Kurulması ve Model Olarak Seçilen Al-Zn-Mg-Cu Alaşımında Optimum Parametrelerin Belirlenmesi

Ahmet GÜRAL*, Süleyman TEKELİ**, Alper AYTAÇ***, Çetin KARATAŞ****

*Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Metal Eğitimi Bölümü, 06500 Teknikokullar, Ankara

** Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06500 Teknikokullar, Ankara

*** Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 06500 Teknikokullar, Ankara

****Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü, 06500 Teknikokullar, Ankara

Geliş/Received : 19.07.2011, Kabul/Accepted : 25.10.2011

ÖZET

Bu çalışmada; son yıllarda ultra-ince tane üretim metodlarından biri olan ve yaygın şekilde kullanılan Eşit Kanal Açısız Presleme (EKAP) için bir test düzenegi kurulmuş, işler hale getirilmiş ve bir model malzeme olarak Al-Zn-Mg-Cu alaşımına uygulanmıştır. Optimizasyon testleri sonrası en etkili kalıp yağlayıcısının MoS₂, kanal açısının 90°, presleme basıncının 60-110 kg/mm² aralığında ve presleme hızının 2 mm/s olduğu görülmüştür. Yukarıdaki parametreler kullanılarak Al-Zn-Mg-Cu alaşımı 200 °C'de ve rota C kullanılarak 14 paşa kadar başarılı bir şekilde EKAP yapılmıştır.

Anahtar kelimeler : Eşit Kanal Açısız Presleme (EKAP), Ultra İnce Tane Üretimi, Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM)

Construction of an Equal Channel Angular Pressing Unit and Determination of Optimum Parameters for Al-Zn-Mg-Cu Alloy Chosen as A Modal Material

ABSTRACT

In this study, a test unite for Equal Channel Angular Pressing (ECAP), which is widely used as one of the ultra fine grain production method in recent years, was constructed, made functioning and was applied to Al-Zn-Mg-Cu alloy as a modal material. After the optimization tests, it was seen that the most effective lubricant for the dies was MoS₂, the die channel angle was 90°, pressing pressure was around 60-110 kg/mm² and the pressing speed was 2 mm/s. By using the parameters above, Al-Zn-Mg-Cu alloy was successfully ECAPed up to 14 passes at 200 °C and using route C.

Keywords : Equal Channel Angular Pressing (ECAP), Production of Ultra Fine Grain, Transmission Electron Microscope (TEM)

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Eşit Kanal-Açısız Presleme (EKAP), Şekil 1'de şematik olarak gösterildiği gibi bir ingot malzemenin kesit alanında herhangi bir boyut değişikliği oluşturmadan kesişen eşit boyuttaki iki kanal içinden değişik sayıda tekrarlar da basılması ile yapı içerisinde oluşan aşırı deformasyon ve ultra ince (mikron altı veya nano boyutta) taneli yapının üretildiği yeni bir tane boyutu inceleme yöntemidir (1).

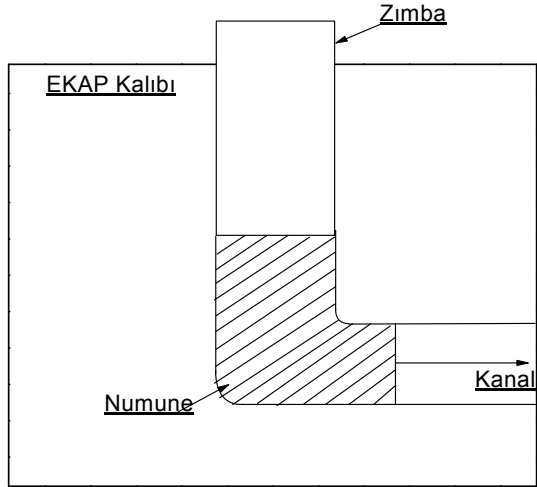
EKAP işleminde ultra ince taneli yapının üretilmesi, şiddetli plastik deformasyona maruz bırakılan ingot malzemede yeniden kristalleştirme ve bu işlemlerin tekrarlı olarak uygulanması ile sağlanır. Ayrıca, EKAP tekniği ile üretilen ince taneli malzemelerin tane sınırı açısı artmakta ve tane sınırları dengesiz duruma dönüşmektedir. Böylece malzemeler, yüksek akma, dü-

şük deformasyon sertleşmesi, yüksek süneklik ve yüksek oranda süperplastiklik sergilerler. EKAP işleminde 4 önemli parametre vardır; (a) EKAP kanal açısı: birbirleri ile kesişen eşit boyuttaki kanallar arasındaki 'θ' açısı ~ 90° olduğunda en şiddetli plastik deformasyon ve en şiddetli tane bölünmesi elde edilir, (b) EKAP rotası: her presleme işleminden sonra numune kendi eksenini etrafında 0° (rota A), ±90° (rota B_A), +90° (rota B_C) veya 180° (rota C) döndürülerek farklı kayma sistemleri aktif hale getirilir. Bu döndürme işlemleri Şekil 2'de görüldüğü gibi literatürde farklı rota isimleri almışlardır. (c) presleme hızı: tane boyutuna etkisi olmasa da düşük hızlarda presleme dengeli ve homojen dağılımlı yapının oluşmasına sebep olurlar ve (d) EKAP işlem sıcaklığı: özellikle şekillendirilmesi zor malzemelerde kayma işlemini kolaylaştırmak için oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda EKAP işlemi yapılır (1,2). Ancak, tane incelmelerinin etkili olabilmesi için EKAP sıcaklığının yeniden kristalleştirme sıcaklığının üzerine çıkarılmaması gereklidir.

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

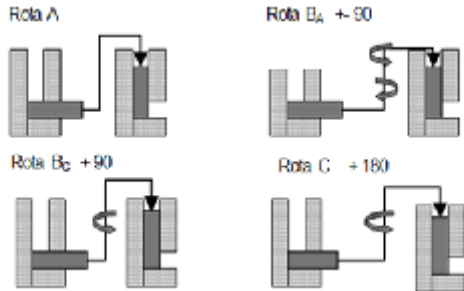
e-posta: agural@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2011.14.4, 243-248



Şekil 1. Şematik EKAP test kalıbı

1995'li yıllardan itibaren ultra ince ve/veya nano boyutlu malzemeler üzerine artan ilgi ile beraber EKAP üzerine araştırmalar da giderek yoğunlaşmıştır (3). Bilindiği gibi tane boyutundaki azalma malzemelerin mekanik özellikleri ve en önemlisi süperplastik deformasyonu üzerinde pozitif bir etkiye sahiptir. Günümüzde tane inceltme yöntemleri olarak; yeniden kristalleşme-termomekanik işlemler, toz metalurjisi, buhardan çöktürme işlemi ve mekanik öğütme (mekanik alaşımlama) yaygın şekilde kullanılmaktadır. Özellikle metalik malzemelerdeki tanelerin klasik metotlarla (termomekanik-yeniden kristalleşme) inceltmesi oldukça zordur ve maliyeti yüksektir.



Rota	Pus Sayısı							
	2	3	4	5	6	7	8	
A	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	
B ₁	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	
B ₂	90°	90°	90°	90°	90°	90°	90°	
C	180°	180°	180°	180°	180°	180°	180°	

Şekil 2. EKAP işlem rotaları (2)

Ayrıca ingot malzemedeki kaba taneli yapının termomekaniksel işlemlerle inceltmesi de çok sınırlıdır. Örneğin, Wert ve diğerleri, ingot Al-Zn-Mg-Cu alaışımının (7000 serisi) tanelerini klasik termomekanik ve yeniden kristalleşme işlemleri ile inceltmiş ve tane boyutunu ancak 10-20 μm 'a kadar düşürülebilmiştir (4). Bu sebeplerden dolayı termomekanik - yeniden kristalleşme işlemlerine alternatif olarak toz metalurjisi (TM) yöntemi kullanılmaya başlanmıştır.

Bu yöntem ile taneler mikron altında üretilmiş ve alaşımların mekanik özelliklerinde belirgin artışlar gözlenmiştir (1,5,6). Fakat toz metalurjisi yönteminin zor ve pahalı olmasından dolayı bu yöntemin endüstriyel olarak kullanımını çok yaygınlaşmamıştır. Mekanik öğütme / alaşımlama ve buhardan çöktürme işlemlerinde benzer zorluklar ile karşılaşmıştır. Klasik termomekanik-yeniden kristal-leşme, toz metalurjisi mekanik öğütme/ alaşımlama ve buhardan çöktürme işlemlerinin yukarıda bahsedilen dezavantajlarından dolayı, EKAP alternatif bir tane inceltme metodu olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Bu yöntemin başarılı olması ve kabul görmesinin en önemli sebepleri; ingot metalurjisi ile üretilen parçalara kolayca uygulanabilmesi, herhangi bir ısıl işlem gerektirmemesi, mikron altı hatta nano boyutta tanelerin kolayca üretilebilmesi ve yüksek basınç ve sıcaklıklara gereksinim duyulmamasıdır (7). Ayrıca EKAP ile malzemenin kesit alanında her hangi bir değişim meydana gelmediğinden, işlem istenilen tane boyutuna ulaşıncaya kadar tekrar edilebilir (1,8).

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Deneysel çalışmalarda kullanılan Al-Zn-Mg-Cu alaşımı ACA Metal firmasından temin edilmiş olup kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo1. Deneysel çalışmalarda kullanılan Al-Zn-Mg-Cu alaışımının kimyasal bileşimi

Zn	Mg	Cu	Si	Mn	Cr	Al
2,8	1,54	1,36	0,39	0,25	0,37	Kalan

Tüm EKAP işlemleri, 200 °C sıcaklıkta, presleme basıncı 60-110 kg/mm^2 aralığında, preseleme hızı 2mm/s ve Rota C kullanılarak yapılmıştır. Bu parametrelerin eldesi bir sonraki bölümde detaylı olarak verilecektir. EKAP yapılmış numunelerde tane boyutunu belirlemek için TEM çalışmaları yapılmıştır. Bunun için 19,8 mm çapında ve 40 mm boyundaki numunelerin ortasından 5x5mm ebadında numuneler alınmıştır. Bu numuneler daha sonra ince zımparalarla 150 μm kalınlığa kadar inceltilmiş ve her iki yüzeyi elmas pastayla parlatılmıştır. Daha sonra bu numunelerden bir zımba kullanılarak 3 mm çapında disk numuneler hazırlanmıştır. Bu disk numuneler, metanol+% 30 nitrik asit çözümü içerisinde -20 °C'de ve 15 V gerilimde jet parlatıcı ile daha da inceltirilmiştir. Hazırlanan numunelerde mikron altı tane yapılarını belirlemek için Bilkent Üniversitesi UNAM laboratuvarlarında bulunan TECNAI marka TEM cihazında görüntüleme çalışmaları yapılmıştır.

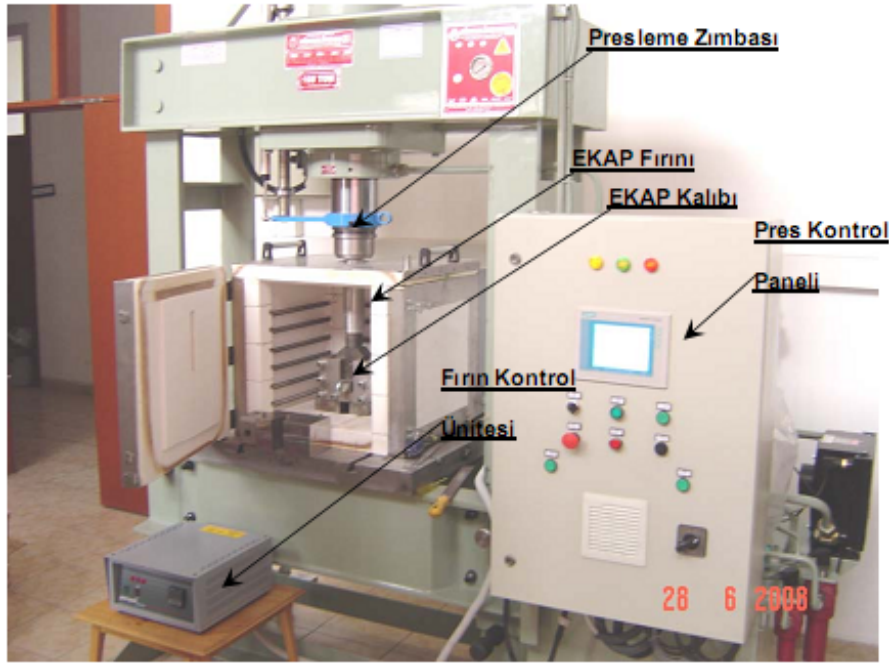
3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Şekil 3.'de verilen hidrolik EKAP presi 160 ton kapasitede ve presleme hız-yük kontrollü olup, imalatı özel bir tasarımla ile gerçekleştirilmiştir. Presin yük ve hızı hem otomatik olarak hem de manuel olarak ayarlanabilmektedir. EKAP kalıplarını ısıtmak için kullanılan fırın düzeneğinin yerleştirildiği bölüm aşağı ve yukarı hareket edebilmektedir. Presleme zımbası AISI 2379

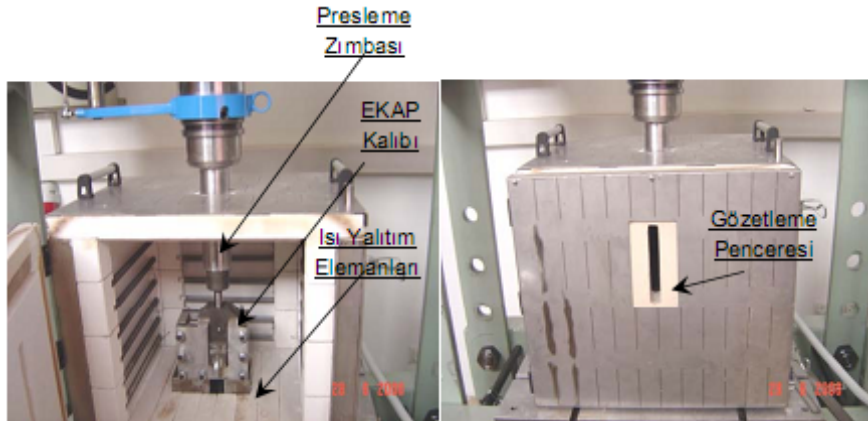
çeliğinden 10 cm çapında ve 60 cm boyunda üretilmiş olup zımbanın kalıba temas yüzeyi ısıl işlemle sertleştirilmiştir.

EKAP kalıplarını istenilen sıcaklığa ısıtmada kullanılan ve Şekil 4’de verilen fırın yine özel bir tasarımla üretilmiştir. 60x60x70 cm boyutlarındaki fırın, içine farklı boyutlarda EKAP kalıplarının yerleştirilebileceği bir büyüklüktedir. Fırının maksimum sıcaklık kapasitesi 1000 °C olup sıcaklığın kontrolü Şekil 3’de gösterilen fırın kontrol ünitesiyle sağlanmıştır. Presleme zımbasının kapalı fırın içerisindeki EKAP kalıbına etkisini sağlamak için fırının üst tarafına zımbanın 5 mm daha büyük çapta bir delik açılmıştır. Bu se-

dağılımı sağlanmıştır. EKAP deneylerine başlamadan önce fırın kapağına açılan gözetleme penceresinden EKAP kalıbının gerçek sıcaklığı bir termo-couple (ısı-çift) ile ölçülmüştür. Soğuk EKAP kalıbının hedeflenen deney sıcaklığı olan 200 °C’ye ulaşması için kapalı fırın içerisinde en az 90 dk bekletilmesi gerektiği belirlenmiştir. Böylece tüm EKAP deneyleri kalıp fırına yerleştirilip fırının çalıştırılmasından 90 dk sonra gerçekleştirilmiştir. EKAP işlemlerinde kalıbın sıcaklığının homojen ve sürekli kalması önemlidir. Bu nedenle kalıbın fırından çıkartılmadan her bir pas da 90° çevrilebilmesine olanak sağlayacak bir düzenek kuruldu. Bu düzenek, fırının kapağına açılan gözetleme penceresinden fi-



Şekil 3. EKAP deneylerinde kullanılan test düzeneği



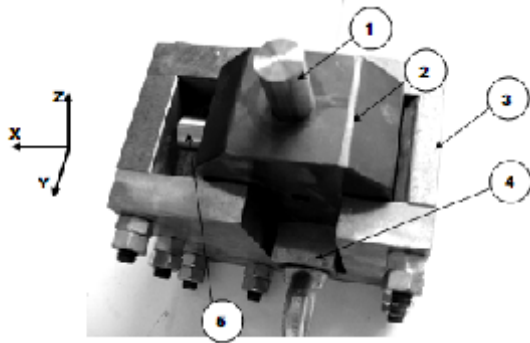
Şekil 4. Deneylerde kullanılan EKAP fırını

kilde fırın tamamen kapalı iken presleme zımbasının yukarı-aşağı hareketi sağlanmıştır. EKAP kalıbı fırına yerleştirildikten sonra kalıbın çevresi ısı yalıtım malzemeleriyle kaplanmıştır. Şekil 4’de gösterildiği gibi fırının kapağı tamamen kapatıldıktan sonra fırın devreye girmektedir. Bu sayede fırın içinde homojen sıcaklık

rın içerisine sokulan bir çevirme kolu vasıtasıyla sağlanmıştır. Kalıbın daha rahat ve seri bir şekilde 90° çevrilebilmesi için kalıp çekirdeğinin yatağından bir miktar yukarı olması gerekmektedir. Bu, kalıp yatağına ve fırının sabitlendiği alt tablaya bir delik açılarak bir krika vasıtası ile sağlanmıştır.

Şekil 5’de EKAP kalıbı ve parçaları gösterilmektedir. EKAP işleminin gerçekleştiği kısım 2 nolu kalıp çekirdeğidir. EKAP kalıp çekirdeğindeki kanal keşişme açısı 90° , kanal çapı 20 mm, zimba çapı 19.8 mm ve zimba boyu 40 mm’dir. EKAP işlemlerinde farklı döndürme rotalarından rota C kullanılmıştır.

EKAP kalıplarının üretimi ve kullanımı esnasında çeşitli problemlerle karşılaşmış olup bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir. EKAP zımbaları ve kanallarının yüzey kalitesinin istenilen hassasiyette imal edilmemesi, kanal iç çapları ve zimba iç çapları arasındaki toleransın uygun verilmemesi, kalıplar için kullanılan malzemelerin uygun olmaması, kalıbın ve zımbaların yanlış ısıl işlemi ve buna bağlı olarak sertliklerinin düşük olmasından dolayı kalıp zımbalarının kanalda şişerek sıkışması ve kalıpların parçalanması bunlara örnek olarak verilebilir. Bu nedenle yukarıda belirtilen tüm problemlerin giderilmesi için oldukça uzun zaman harcanmış ve EKAP kalıbın işlevsel olarak çalıştırılması sağlandıktan sonra model olarak seçilen Al alaşımının EKAP testleri yapılmıştır.



Şekil 5. EKAP işlemlerinde kullanılan kalıp (1); zimba, (2); EKAP kalıp çekirdeği, (3); kalıp yatağı, (4); alt blok, (5); serbest zimba

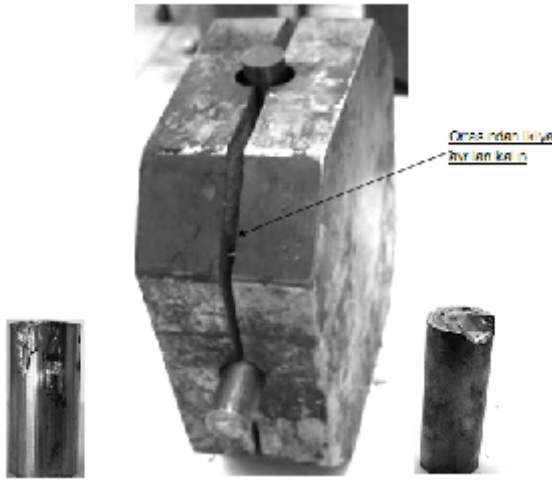
3.1. EKAP Deneilerinin Yapılışı (Application of ECAP Experiments)

Yüzeyi ve kalıp kanallarına MoS_2 yağlayıcısı sürülen 19.8 mm çapındaki EKAP numunesi Şekil 5’de verilen kalıba yerleştirilmiş ve üzerine iteleme zımbası konulmuştur. Kalıp kanalında bulunan numune ile birlikte EKAP kalıp çekirdeği kalıp yatağına yerleştirildikten sonra kalıp sisteminin tümü fırın içerisine konulmuştur. Fırın kapağının kapatılmasından sonra kalıbın 200°C ’ye ısıtılması için en az 90 dk beklenmiş ve daha sonra EKAP işlemlerine geçilmiştir. İteleme zımbasına uygulanan basınç $60\text{-}110\text{ kg/mm}^2$ aralığında olup EKAP işlemleri 2 mm/s presleme hızında yapılmıştır. Şekil 5’den de görüldüğü gibi basınç 1 no’lu pim üzerine uygulanmış ve numunenin 90° lik L şeklindeki kanallardan X eksenı boyunca akışı sağlanmıştır. Bu akış 5 numarası ile gösterilen pimin serbest olarak çıkışı ile anlaşılmıştır. Ardından kalıp çekirdeği Rota C tipi olacak şekilde 90° çevrilmiş ve 5 no’lu pim 1 no’lu pimin konumuna getirilerek her pas için aynı işlem tekrar edilmiştir.

3.2. Optimum EKAP İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi (Determination of Optimum ECAP Process Parameters)

Bu çalışmada, imal edilen EKAP kalıplarının performansı ve EKAP parametrelerini belirlemek için deneyler öncesi pilot çalışmalar yapılmıştır. Bu ön çalışmalar sırasında bazı problemlerle karşılaşmış ve bunların giderilmesi için oldukça uzun zaman harcanmıştır. Karşılaşılan problemlerin bazıları şunlardır. EKAP işlemleri sırasında 36 HRC sertliğe sahip yeterince sertleşmemiş olan kalıp alt bloğu (Şekil 5.’de 4 nolu parça) EKAP kalıp çekirdeği tarafından tahrip edilmiştir. Bu sebepten dolayı kalıp alt bloğunun sertliği 52 HRC’ye çıkarılmıştır. Kalıp zımbaları ve kalıp kanal yüzeylerinin kalitesi EKAP işleminde oldukça önemli olduğu görülmüştür. Özellikle kalıp kanallarının yüzey kalitesi düşük olduğundan EKAP numunesinin kanallarda ilerlemesi oldukça güçleşmiş ve hatta imkansızlaşmıştır. Bu nedenle sürtünmeyi azaltmak için kalıp kanalları çok daha hassas bir şekilde işlenmiştir. EKAP numunesinin kanallardaki sürtünmesini azaltmak için çeşitli kalıp yağlayıcıları denenmiştir. Ön denemelerde özellikle literatürde belirtilen grafit ve çinko stearat yağlayıcıları kullanılmış ancak bu yağlayıcıların numunelerin EKAP işlemi sırasında kalıp kanallarında ilerlemesini ve çıkarılmasını sağlayamadığı görülmüştür. Alternatif olarak MoS_2 yağlayıcısı denenmiş ve oldukça olumlu sonuç elde edilmiştir.

EKAP presleme basıncının $60\text{-}110\text{ kg/mm}^2$ aralığında olması gerektiği ön denemelerle anlaşılmıştır. Numunelerde bir parçalanma olduğunda presleme basıncı otomatik olarak 60 kg/mm^2 ’nin altına düşmüştür. Böylece ön denemelerde herhangi bir pas sırasında şayet presleme basıncı 60 kg/mm^2 ’nin altına düştüğü zaman EKAP işlemine devam edilmeyip numune kalıptan çıkartılmıştır. Presleme basıncı 110 kg/mm^2 ’i geçtiğinde ise EKAP kalıplarında ve presleme zımbalarında hasarlar olmuştur. Bu nedenle zımbalar yüksek basınçtan dolayı ya kırılmış ya da kanallarda şişerek sıkışmaya neden olmuştur. Ayrıca kalıpların bazıları su verme sonrası yetersiz sertleşme derinliğinden dolayı ortadan ikiye ayrılıp parçalanmıştır (Şekil 6). Bu nedenle bu çalışmada olduğu gibi kalın kesitli ve büyük hacimli parçaların su verme ısıl işlemlerinde çeliğin kimyasal bileşimine bağlı olarak M_s (Martensitik dönüşüm başlama sıcaklığı) sıcaklığının üzerinde malzeme tuz banyosu ortamında bekletilip B_s (Beynitik dönüşüm başlama zamanı) zamanına ulaşmadan su verilmelidir. Çünkü bu süre zarfında büyük hacimli malzemenin yüzeyi ile merkezi arasındaki sıcaklık farkı en aza indirildiğinden su verme sonrası sertleşme derinliği daha da artacak ve gerilimler azalacaktır. Bu bahsedilen ısıl işlem martemperleme veya marsuverme olarak bilinmektedir. Bu hususlar dikkate alınarak daha sonraki üretilen kalıplara bu ısıl işlemler uygulanmış ve daha yüksek performans elde edilmiştir.



Şekil 6. Hasar gören EKAP kalıp ve zımbaları

EKAP presleme hızı 0,5-3 mm/s aralığında denenmiş ve kalıp performansı açısından en iyi sonuçlar 2 mm/s lik presleme hızında elde edilmiştir. Bu presleme hızının altındaki EKAP işlemlerinde numuneler kalıp kanallarında daha yavaş ilerlemesi sonucu muhtemelen dinamik tane irileşmesi oluşmuş, böylece uygulanan basınç artmış ve artan presleme basıncı ile EKAP kalıpları hem tahrip olmuş hem de en önemlisi etkili bir tane inceltmesi yapılamamıştır. Presleme hızı 2mm/s'i geçtiğinde ise hızlı deformasyon numunenin kalıp kanalı içerisinde kaymasına yeterli zaman vermediğinden dolayı kanal içinde şişerek presleme basıncının artışına neden olmuş ve böylece kalıplar zarar görmüştür.

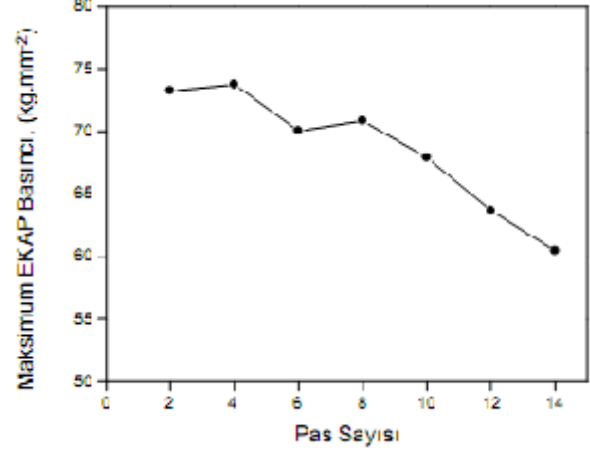
Ön denemelerde ayrıca farklı numune çap ve boyları da denenmiştir. En iyi sonuçlar numune çapının EKAP kalıp deliğinden çok az küçük olduğu değerlerde elde edilmiştir. Kalıp deliği ile çok düşük toleranslarda üretilen numunelerden iyi sonuçlar elde edilememiştir. Bunun nedeni, yağlayıcı parçacıklarının kalıp yüzeyi ile numune arasında sıkışması ve bunun sonucu oluşan sürtünmenin numunenin kalıptan çıkmasını engellemesi olarak yorumlanabilir. Kalıp deliğinden çok fazla küçük çapta olan numunelerde de EKAP işlemi gerçekleştirilememiştir. Literatürde belirtildiği gibi EKAP işlemleri değişik Rotalarda yapılabilmektedir (Rota A, Rota B_A, Rota B_C, Rota C). Bu çalışmada ise üretilen kalıbın geometrisinden dolayı tüm EKAP işlemleri Rota C'de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca literatürde değişik kanal açılarında (Φ) yapılan çalışmalarda en etkili deformasyonun kanal açısı 90° olduğunda elde edildiği görülmüştür. Bu sebeple bu çalışmada da üretilen kalıpların kanal açıları 90° seçilmiştir.

3.3. Model Olarak Seçilen Al-Zn-Mg-Cu Alaşımının EKAP Deformasyonu (EKAP Deformation of Al-Zn-Mg-Cu Alloy Chosen as Modal)

Bu çalışmada model bir malzeme olarak Al-Zn-Mg-Cu alaşımı seçilmiştir. Seçilen bu alaşım optimum işlem parametreleri olan 60-110 kg/mm² presleme basıncında, 2 mms⁻¹ presleme hızında, 200 °C de ve Rota

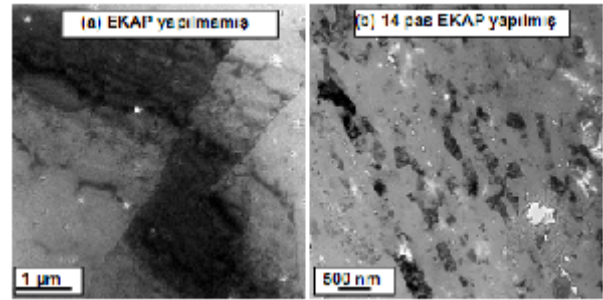
C kullanılarak 14 pasa kadar başarılı bir şekilde EKAP yapılmıştır.

EKAP işlemlerinde her pasta uygulanan maksimum basınç değerleri Şekil 7.'de verilmiştir. Bu grafikten görüleceği gibi genel olarak pas sayısındaki artışla presleme basıncı düşmüştür. Bu sonuç, EKAP işlemi ile artan her pas sayısında tane boyutunun azaldığını, mikroyapıda tane sınırı kayma mekanizmasının aktifleşerek plastik deformasyonun daha kolaylaştığı ve böylece kanal içindeki numunenin akışının daha da kolay olduğu şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 7. Pas sayısına göre EKAP presleme basıncının değişimi

Şekil 8'de EKAP yapılmamış ve 14 pas EKAP yapılmış numunelerin TEM mikroyapıları verilmektedir. Şekil 8 (a)'dan görüleceği gibi EKAP yapılmamış numunedeki taneler eş-kesimli olup yaklaşık 10 µm civarındadır. Şekil 8 (b)'de ise 14 pas uygulanmış numunedeki daha ince, eş kesimli ve daha homojen dağılım görülmektedir. Bu pas sayısında elde edilen tane boyutu yaklaşık 300 nm'dir.



Şekil 8. EKAP yapılmamış (a) ve 14 pas EKAP yapılmış (b) Al-Mg-Cu-Zn alaşımının TEM görüntüleri

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, bir EKAP test düzeneği başarılı bir şekilde kurulmuş ve işler hale getirilmiştir. Optimizasyon testleri sonrası en etkili kalıp yağlayıcısının MoS₂, kanal açısının 90°, presleme basıncının 60-110 kg/mm² aralığında ve presleme hızının 2 mm/s olduğu belirlenmiştir. Bir model malzeme olarak seçilen Al-Zn-Mg-Cu alaşımı yukarıdaki parametreler kullanılarak 200 °C de 14 pasa kadar başarılı bir şekilde EKAP yapılmıştır.

5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmaya destek sağlayan 107M299 kodlu proje kapsamında TÜBİTAK'a ve 07/2008-10 kodlu BAP projesi kapsamında Gazi Üniversitesi, Bilimsel Araştırmalar Projeler Birimine teşekkür ederiz.

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Valiev, R.Z., Langdon, T.G., "Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement", Prog. Mater. Sci., 51(7):881-981, 2006.
2. Furukawa, M., Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., Langdon, T.G., "The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing", Mater. Sci. Eng. A, 257:328-332, 1998.
3. Segal, V.M., "Materials processing by simple shear", Mat. Sci. Eng. A, 197(2):157-164, 1995.
4. Wert, J.A., Paton, N.E., Hamilton, C.H., Money, M. "Grain refinement in 7075 aluminum by thermomechanical processing", Metal. Trans. A, 12:1267-1276, 1981.
5. Ding, R., Chung, C., Chiu, Y., Lyon, P., "Effect of ECAP on microstructure and mechanical properties of ZE41 magnesium alloy", Mat. Sci. Eng. A, 527(16-17):3777-3784, 2010.
6. Zheng, L.J., Li, H.X., Hashmi, M.F., Chen, C.Q. Zhang, Y., Zeng, M.G., "Evolution of microstructure and strengthening of 7050 Al alloy by ECAP combined with heat-treatment", J. Mater. Proces. Tech., 171(1): 100-107, 2006.
7. Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K., Alexandrov, I.V., "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation", Prog. Mater. Sci., 45:103-189, 2000.
8. Hughes, D.A., Hansen, N., "High angle boundaries formed by grain subdivision mechanisms" Acta Mater., 45:3871-3886, 1997.