

# EŞİT KANAL-AÇISAL PRESLEME (EKAP) YÖNTEMİYLE AŞIRI DEFORMASYON YAPILMIŞ 7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU

\*Ahmet GÜRAL, \*Süleyman TEKELİ, \*\*Alper AYTAÇ, \*\*Mustafa TÜRKAN

\*Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, 06500 Teknikokullar, Ankara

\*\*Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Anabilim Dalı, 06500 Teknikokullar, Ankara  
[agural@gazi.edu.tr](mailto:agural@gazi.edu.tr), [stekeli@gazi.edu.tr](mailto:stekeli@gazi.edu.tr), [alperktef@hotmail.com](mailto:alperktef@hotmail.com), [mustafa.turkan 85@hotmail.com](mailto:mustafa.turkan@85@hotmail.com)

(Geliş/Received: 15.08.2011; Kabul/Accepted: 19.06.2012)

## ÖZET

Bu çalışmada, 7075 Al alaşımı Eşit Kanal-Açısal Presleme (EKAP) yöntemi ile 200 °C'de 2 mm/s presleme hızında ve Rota C kullanılarak 14 pasa kadar başarılı bir şekilde deforme edilmiştir. EKAP işleminden sonra numuneler TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu), makroyapı ve sertlik incelemeleri ile karakterize edilmiştir. Makroyapı incelemeleri, EKAP yapılmış numunelerde plastik deformasyonun kenardan merkezine doğru, saat yönünde ve girdap şeklinde olduğunu göstermiştir. Ayrıca, deformasyonun şiddeti artan pas sayısı ile artmıştır. EKAP pas sayısındaki artışla numunelerin ortalama tane boyutu etkili bir şekilde azalmıştır. Şöyle ki; EKAP yapılmamış numunedeki tane boyutu ~10 µm iken bu değer 14 pasta ~300 nm'e inmiştir. Başlangıçta tanelerde deformasyon yönünde bir bantlaşma eğilimi varken, artan paso sayısı ile daha homojen ve daha eş kesimli taneler oluşmuştur. Sertlik sonuçları, 4. pasa kadar sertliğin arttığını, 6. pasta etkili bir şekilde azaldığını, 8. pasta yeniden arttığını ve bu pastan sonra ise dinamik yeniden kristalleşme sebebiyle azaldığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** EKAP, 7075 Al alaşımı, Ultra ince tane, TEM.

## MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION OF 7075 ALUMINUM ALLOY SEVERE DEFORMED BY EQUAL CHANNEL-ANGULAR PRESSING (ECAP)

### ABSTRACT

In this study; Equal Channel Angular Pressing (ECAP) process for 7075 aluminum alloy were successfully carried out up to 14 passes at 200 °C and at pressing speed of 2 mms<sup>-1</sup> by using Route C. After ECAP processes, the specimens were characterized by Transmission Electron Microscope (TEM), hardness and macrostructural investigations. Macrostructural investigations showed that the plastic deformation in the ECAPed specimens occurred from edge to the centre, clock wise and like whirlpool. In addition, the deformation intensity increased with increasing pass number. The mean grain size of the specimens was effectively decreased with increasing ECAP pass number. That is, while the grain size of unECAPed specimen was 10 µm, this value was decreased to 300 nm at the 14th pass. At the beginning, while there was a banding tendency in the grains toward deformation direction, homogeneous and equ-axed grains were formed by increasing pass number. Hardness results showed that the hardness values increased up to 4 passes, decreased effectively at 6th pass, again increased 8th pass and after this pass, the hardness was again decreased due to dynamic recrystallization.

**Key Words:** ECAP, 7075 Al alloy, Ultra fine grain, TEM.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Düşük yoğunluk ve üretim maliyetlerinden dolayı, alüminyum ve alaşımları endüstriyel alanda yoğun olarak kullanılan metal ve alaşımları arasında ön sıralarda yer almaktadır. Bu alaşımlar, son yıllarda büyük bir gelişme gösteren otomotiv sektörü başta olmak üzere gıda, uzay ve havacılık sektörlerinde

yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Alüminyum ve alaşımlarının bu olumlu özelliklerinin yanında mekanik özelliklerinin demir esaslı malzemelere göre düşük olması bu malzemenin kullanımındaki en büyük dezavantajı oluşturmaktadır. Alüminyum ve alaşımlarının bu dezavantajları yaşlandırma ve termomekanik işlemlerle giderilebilmektedir. Yaşlandırma ısıl işlemi ile yapı içerisinde oluşan ikincil

faz partikülleri malzemenin mukavemetlenmesini sağlar. Termomekanik işlem ise (plastik deformasyon+yeniden kristalleşme) malzemenin tane boyutunu incelterek dayanımı arttırmada kullanılan önemli bir yöntemdir. Bu işlem malzeme içerisindeki tanelerde yüksek miktarda gerinim enerjisi oluşturma ve belli bir sıcaklık aralığında yeniden kristalleşme esasına dayanır. Termomekanik işlemlerle Al ve alaşımlarının tane boyutunun 10  $\mu\text{m}$ 'nin altına indirilmesinin zor olduğu bildirilmektedir [1,2]. Son yıllarda ultra ince taneli yapılar, Eşit Kanal Açısal Presleme (EKAP) yöntemi ile üretilmeye başlanmıştır. Bu teknik kullanılarak mikron altı 10-1000 nano boyutlu tane yapısı elde edilebilmektedir. EKAP işlemi metal ve alaşımın kayma sistemleri ve kesme düzlemlerinden etkilenir. Ayrıca kalıp geometrisi ve presleme rejimi işlem için önemli diğer parametrelerdir. EKAP işlemi çok adımlı tekrarlanan bir işlem olup, malzemede basit kayma ile aşırı plastik şekil değiştirmeyi oluşturur [3,4].

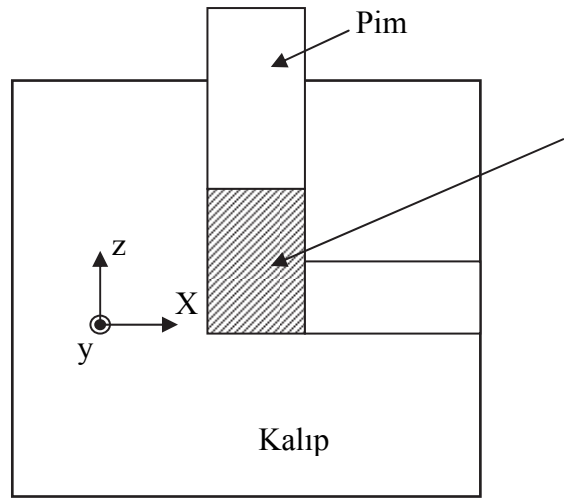
Bu çalışmada, EKAP yöntemi ile 7075 alüminyum alaşımlarında nano boyutlu taneler üretilmeye çalışılmış ve üretilen bu yapılar TEM, makroyapı ve sertlik işlemleri ile karakterize edilmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Deneysel çalışmalarda kullanılan 7075 alaşımı ACA Metal'den extürize edilmiş formda temin edilmiş olup kimyasal kompozisyonu Çizelge 1'de verilmiştir. Bu çalışmada, 20 mm kanal çapına ve 90° kanal açısına sahip EKAP kalıbı kullanılmıştır (Şekil 1). EKAP deneylerinde kullanılan numuneler üretici firmadan temin edildiği haliyle 20 mm çapında ve 1 m boyundaki çubuklardan 19,8 x 40 mm ebatında hazırlanmıştır. EKAP işlemlerinde kullanılan tüm numunelerin başlangıç boyutları aynı olup herhangi bir ısıl işleme tabi tutulmamışlardır. Numuneler, Şekil 1'de şematik olarak gösterildiği gibi kalıp içine konulduktan sonra z-ekseninden yük uygulanmış ve x-eksenine (90° lik diğer kanala) akışı sağlanmıştır. EKAP işlemlerinde farklı rota tipleri uygulanabilmektedir. EKAP rotası, bir sonraki pasoya geçişte numunenin kendi eksenini etrafında farklı açılarda döndürme esasına dayanır. Her paso geçişinde numune kendi eksenini etrafında döndürülmezse (0°) bu rota A'dır. Rota B<sub>A</sub> ise numune ilk pasoda +90°, sonraki pasoda -90° olacak şekilde devamlı ±90° olarak kendi eksenini etrafında döndürme yöntemidir. Şayet EKAP işleminde her pasoda numune sürekli +90° döndürülürse bu Rota B<sub>C</sub>'dir. Rota C'de ise EKAP yapılan malzeme kendi eksenini etrafında her pasoda 180° döndürülmektedir [5]. EKAP işlemleri 200 °C'de, Rota C kullanılarak, 25-30 ton basınç altında ve 2 mms<sup>-1</sup> presleme hızında gerçekleştirilmiştir. EKAP işlemlerinde sürtünme ve aşınmayı azaltmak için kalıp

iç yüzeylerine ve numuneye MoS<sub>2</sub> yağlayıcı tatbik edilmiştir. Bu çalışmada numuneler 14 pasaya kadar EKAP işlemlerine tabii tutulmuştur. Bu pas sayısından sonra numunelerde aşırı plastik deformasyondan dolayı çatlamlar ve kırılmalar meydana gelmiştir.

EKAP yapılmış numunelerde aşırı plastik deformasyonun etkisini makro düzeyde incelemek için numuneler x-ekseni boyunca ortadan ikiye hassas bir şekilde kesilmiştir. Ardından 220-1200 numaralı zımparalarla zımparalanan numuneler 6 ve 3  $\mu\text{m}$ 'luk elmas pasta ile parlatılmış ve 5 ml HF+ 20 ml HNO<sub>3</sub>+20 ml HCl+55 ml su karışım solüsyonu ile 1,5 dakika süreyle dağlanmıştır. Deformasyon akış çizgilerinin görüntüleri bir tarayıcıda yüksek çözünürlükte taranarak elde edilmiştir.



Şekil 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan EKAP kalıbının şematik gösterimi (Schematical illustration of EKAP die used in the experiments)

TEM çalışmaları için EKAP yapılmış numunelerin ortasından 5x5mm ebatında numuneler alınmıştır. Bu numuneler daha sonra ince zımparalarla 100-150  $\mu\text{m}$  kalınlığa kadar inceltilmiş ve her iki yüzeyi elmas pastayla parlatılmıştır. Daha sonra bu numunelerden standart bir zımba kullanılarak 3 mm çapında disk numuneler hazırlanmıştır. Bu disk numuneler, son inceltme için metanol+% 30 nitrik asit solüsyonu içerisinde -20 °C'de 15 V gerilimde jet parlaticı ile daha da inceltilmiştir. Hazırlanan bu numunelerde mikron altı tane yapılarını incelemek için Bilkent Üniversitesi UNAM laboratuvarlarında bulunan TECNAI marka TEM cihazında görüntüleme çalışmaları yapılmıştır.

EKAP yapılmış numunelerin sertlik ölçümleri Instron Wolpert Diatestor 7551 model cihazda 5 kg

Çizelge1. Deneysel çalışmalarda kullanılan alüminyum 7075 alaşımının kimyasal bileşimi (Chemical composition of aluminium 7075 alloy used in the experimental works)

Element	Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Mn	Cr	Al
Ağ. %	5,480	2,596	1,568	0,403	0,549	0,014	0,0125	kalan

yük uygulanarak Vickers cinsinden (HV5) yapılmıştır. 14 pasa kadar her bir numunenin sertlik değerleri aşırı plastik deformasyonun en yoğun olduğu bölgedeki en az 5 farklı noktadan alınan sertlik değerlerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

### 3. DENEYSSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

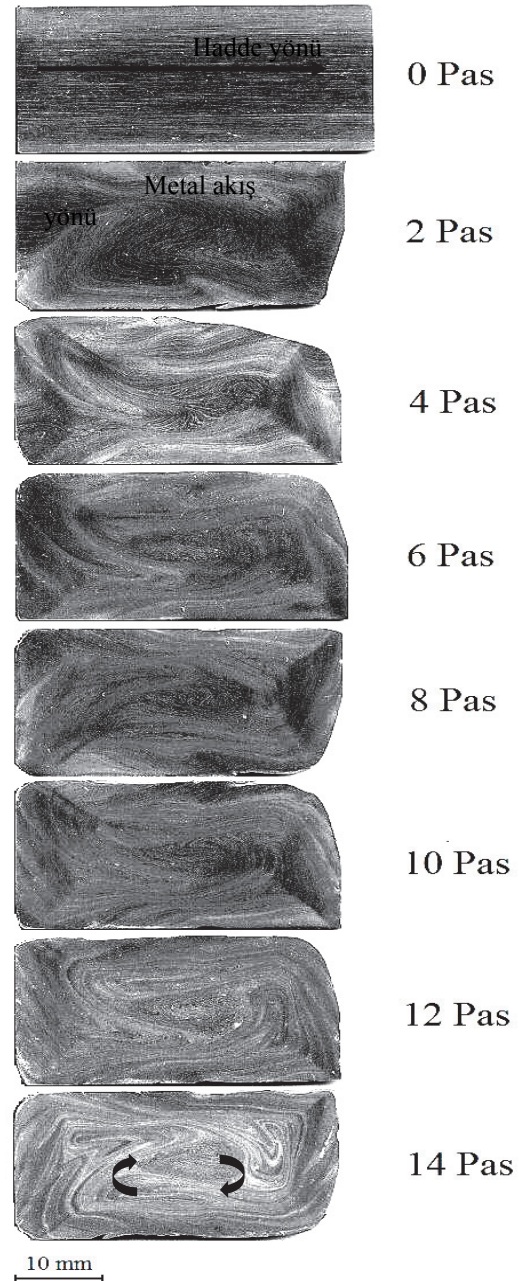
Şekil 2’de farklı pas sayılarında EKAP yapılmış numunelerin makroyapı resimleri verilmektedir. Tüm

makroyapı incelemeleri numunelerin x-ekseni boyunca yapılmıştır. Bu resimlerde ilk dikkati çeken durum EKAP yapılmış numunelerin boylarının EKAP yapılmamış numuneye oranla daha kısa olmasıdır. Bu kısalma kalıp içinde ilerleyen numunenin 90 °’lik diğer kanala geçişi sırasında kısmen kırılmasından kaynaklanmıştır. EKAP işlemi uygulanmamış orijinal olarak ekstrüzyon yapılmış numunede deformasyon çizgileri numunenin hadde yönüne paraleldir. EKAP yapılmış numunelerde ise plastik deformasyonun kenardan merkezine doğru, saat yönünde ve girdap şeklinde olduğu görülmektedir. Deformasyon şiddeti artan pas sayısı ile artmıştır. Tüm numunelerde numunenin dış kısmında oluşması muhtemel aşırı plastik deformasyonun numune ile kanal arasında oluşan sürtünmenin fazlalığından dolayı hemen hemen hiç gerçekleşmediği görülmüştür. EKAP numunelerinin merkezinde oluşan deformasyon miktarı numune çevresinde olduğundan oldukça farklıdır. Deformasyon şeklindeki bu farklılık kalıp ve numune arasında oluşan sürtünmeye bağlanabilir. 8. pastan itibaren numunelerde çok daha şiddetli karmaşık deformasyon akışı gerçekleşmiştir. 14 pas ta ise bu şiddetli deformasyon hemen hemen numunenin tamamında gerçekleşmiştir.

Şekil 3’de farklı pas sayılarında EKAP işlemi uygulanmış numunelerin TEM mikroyapıları verilmektedir. Şekil 3 (a)’dan görüleceği gibi EKAP yapılmamış numunedeki taneler eş-eksenli olup yaklaşık 10 µm civarındadır. 2 pas uygulanmış numunenin tane yapısında ise şiddetli deformasyon etkisi ile değişimler meydana gelmeye başlamış olup taneler eş-eksenliliğini kaybetmiş ve şiddetli deformasyon etkisi ile dislokasyon oluşumu belirginleşmiştir (Şekil 3 (b)). Ayrıca bu mikroyapıda yeni oluşan dislokasyonlar da görülmektedir. Malzemeye uygulanan plastik deformasyonun etkisi ile dislokasyonların hareket etmesi malzemede atom düzlemlerinin kaymasına neden olur. Tane içinde hareket eden dislokasyonlar deformasyon miktarındaki artışla beraber malzemenin dayanım ve sertliğini artırır. Ancak 2 pas tane içinde bazı değişikliklere neden olmakla beraber genel tane boyutunda çok etkili bir inceleme oluşturmamıştır.

Şekil 3 (c)’de ise 4 pas EKAP uygulanmış numuneden elde edilen TEM görüntüsü verilmektedir. Bu pas sayısında deformasyon yönüne bağlı olarak tane yapısında kısmen bir yönlenme meydana gelmiş olup henüz tane boyutunda belirgin bir küçülme meydana

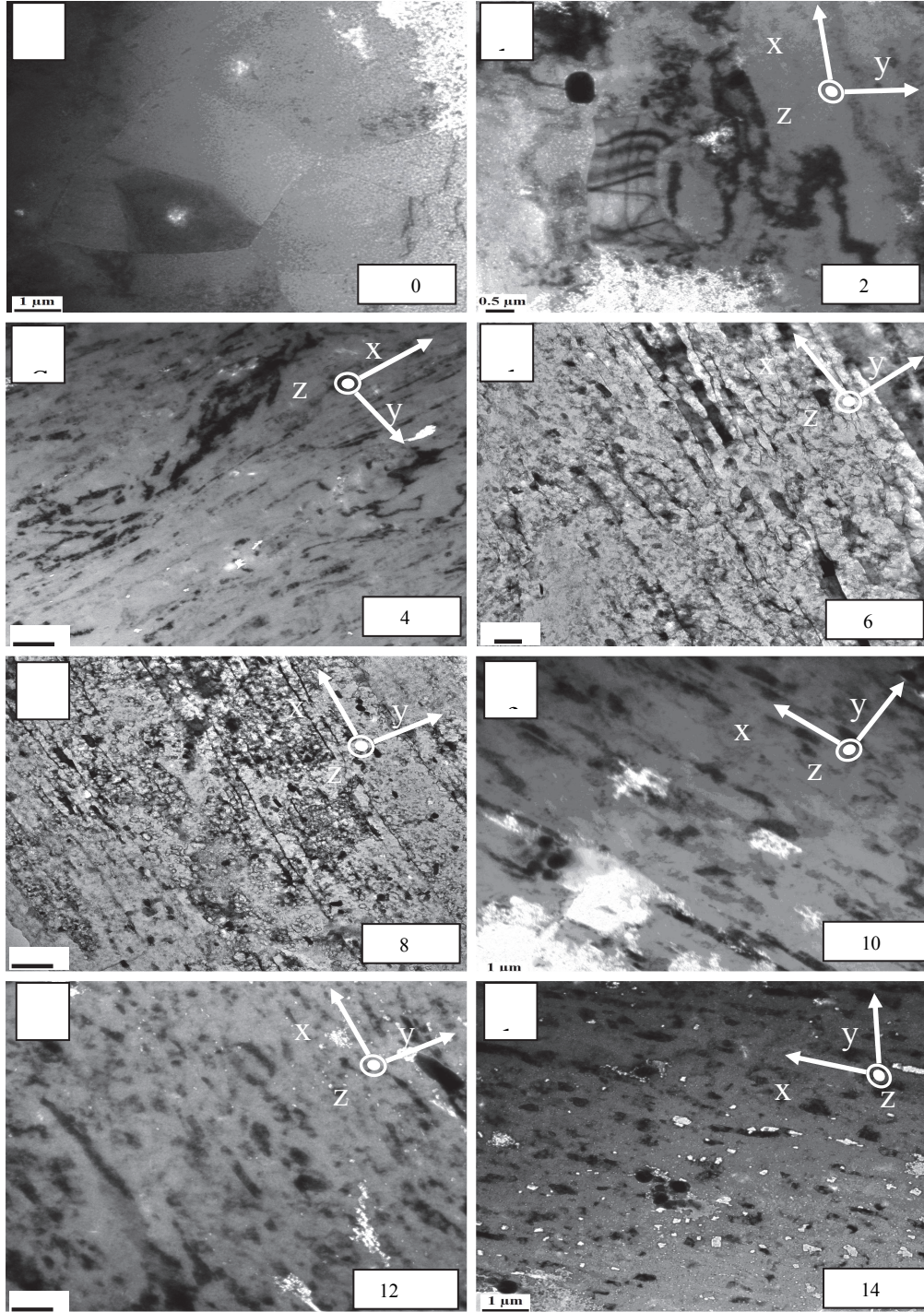
gelmemiştir. Şekil 3 (d)’de ise 6 pas EKAP uygulanmış numunenin aşırı plastik deformasyonu sonucu x-düzlemi boyunca uzamış bantlı taneler içinde meydana gelen tane bölünmeleri ve buna bağlı olarak elde edilen ultra ince taneli yapı görülmektedir. Genellikle EKAP işlemi uygulanan malzemelerde yüksek açılı tane sınırları oluşur [6]. Alt taneler bu uyumsuz düşük açılı tanelerden bölünerek oluşur. 8 pas uygulanmış numunede de yine 6 pas yapılmış numunede olduğu gibi x-düzlemi boyunca uzamış bantlı taneler görülmektedir (Şekil 3(e)). Ancak hem bantlı tanelerin kalınlığı hem de bantlar içerisinde oluşan yeni tanelerin 6 pas EKAP yapılmış numuneye göre daha da küçük olduğu belirgindir.



**Şekil 2.** Değişik pas sayılarında EKAP yapılmış numunelerinin makroyapıları (Macrostructure of the EKAPed specimens with different pass numbers)

Şekil 3(f)'de görüldüğü gibi 10 pas EKAP yapılmış numunede ise 6. ve 8. paslardaki tane yapısına göre çok farklı bir tane yapısı ortaya çıkmıştır. Bu pas sayısında nispeten tane büyümesi gerçekleştiği söylenebilir. Bunun nedeni dinamik toparlanma ve yeniden kristalleşmedir. 12 pas yapılmış numunede x-düzlemi boyunca tane yönelimleri halen görülmekle birlikte tane boyutunda belirgin bir azalma vardır (Şekil 3(g)).

EKAP işlemlerinde tekrarlı aşırı plastik deformasyonla tane içlerinde oluşan birikmiş enerji yeni alt tane sınırlarının oluşumuna harcanır ve böylece tane küçülmesi gerçekleşir. Ancak yeniden kristalleşme için yeterli bir sıcaklıkta bekleme süresi arttığında tane büyümesi de gerçekleşebilir. 10. pas EKAP işleminde büyüme eğilimi gösteren taneler, 12. pastan itibaren yeniden küçülme eğilimi göstermiştir. Bu durum, pas sayısı artışıyla tekrar tane büyümesi ve yeniden tane küçülmesi şeklinde devam edebilir.



**Şekil 3.** EKAP yapılmamış (a) ve farklı pas sayılarında EKAP yapılmış (b-h) 7075 Al alaşımının TEM görüntüleri (TEM images of 7075 Al alloy (a) unECAPed and (b-h) ECAPed with different pass numbers)

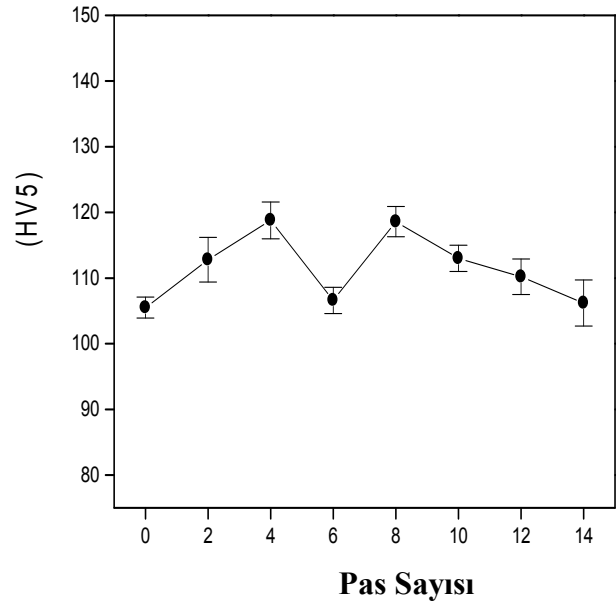
Şekil 3 (h)'de 14 pas uygulanmış numunede bantlaşma eğilimi azalmış ve yeni oluşan taneler daha ince, eş kesimli ve daha homojen dağılım göstermiştir. Bu işlem sonunda ortalama tane ebatının ~300 nm olduğu görülmüştür. Benzer sonuçların Al-Zn-Mg-Cu ve Al-Cu-Mg-Mn alaşımlarında ve benzer EKAP parametrelerinde elde edildiği görülmektedir [7,8]. Bu nedenle optimum mikroyapı bakımından 14. pas en ideal pas sayısı sayılabilir. Bu çalışmada 14 pastan daha yüksek paslarda EKAP çalışılmıştır. Ancak 14. pastan sonraki EKAP işlemlerinde numunelerde ciddi çatlaklıklar, kırılmalar, hatta parçalanmalar olmuştur. Bunun muhtemel nedeni EKAP işlemi sırasında numuneye uygulanan aşırı plastik deformasyonla tane içlerinde depo edilen enerjinin (özellikle ince taneli yapılarda) daha fazla olmasından ve buna bağlı olarak alt tane sınırları oluşmadan mikro çatlakların meydana gelmesi olarak yorumlanabilir. Daha fazla sayıda pas yapabilmek için EKAP işlem sıcaklığı artırılabilir ya da EKAP işlem rotası değiştirilebilir. Ancak daha fazla sayıda pas sayısı uygulamak için sıcaklığın yükseltilmesi tane boyutunu etkili bir şekilde daha da küçültmez aksine tane boyutunu daha da arttırabilir. EKAP işleminde temel amaç taneleri nano boyutlara kadar düşürmek, tane sınırı açılarını arttırmak ve uyumsuzlaştırmaktır.

Şekil 4'de pas sayısına bağlı olarak EKAP yapılmış numunelerin sertlik değerleri verilmektedir. Görüldüğü gibi sertlik değerleri 4. pasa kadar artarken 6. pasta ciddi oranda düşmüştür. 8. pasta sertlik değerleri yeniden artmış ve bu pas sayısından sonra 14. pasa kadar azalmıştır. Bilindiği gibi sertlik, malzemenin akma dayanımıyla orantılı olarak değişmektedir. Akma dayanımı ise Hall-petch eşitliğine göre ortalama tane boyutunun azalmasıyla artmaktadır [9]. Sertlik değerlerinin belli bir pas sayısından sonra azalması beklenmeyen bir durum gibi görülebilir. Bu şekilde sertlik değerlerinin dalgalanması, artan pas sayısının ile çoğalan dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak biriken (depolanan) enerji ve dinamik toparlanma sonucu bu enerji gevşemesine bağlanabilir.

Bununla beraber EKAP işlemi yapılan malzemelerde sertlik, tane sınırı açısı ve uyumsuzluğunun değişiminden, tane sınırlarının çoğalması gibi pek çok karmaşık mikroyapısal etkileşimlerden de etkilenebilir. Çünkü, nano yapıları malzemelerde tane sınırlarının aşırı çoğalması sonucu atomik dizilimi ve düzeni bozuk olan bu bölgeler, boşluk etkisi yaptığından malzemenin sertliğini azaltabilir [10]. Ancak diğer taraftan yeniden kristalleşme sıcaklığına yakın sıcaklıklarda EKAP işlemi yapılan malzemelerde bu çalışmada olduğu gibi, 6. pasta azalan sertlik 8. pasta tekrar artması aşırı bozulan kristal yapının yeniden toparlanma ile düzene girmiş olabileceğinden kaynaklanabilir.

Diğer taraftan aşırı plastik deformasyon sonucu artan dislokasyon yoğunluğu deformasyon sertleşmesi miktarını da arttırmaktadır. Aşırı plastik deformasyon

sonucu malzeme yapısındaki dislokasyon yoğunluğunun artması malzemenin kritik kayma gerilmesini arttırmaktadır. 4. ve 8. pasa kadar malzemenin sertliğindeki artışın nedeni bu durum ile izah edilebilir. 8. pastan sonra ise sertlikte belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Bilindiği gibi bir malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığı deformasyon miktarına bağlı olarak da değişmektedir. Malzemeye uygulanan plastik deformasyon miktarı arttıkça yeniden kristalleşme sıcaklığı da düşmektedir. EKAP işleminin 200°C'de yapılması, aşırı plastik deformasyona uğrayan malzemenin yeniden kristalleşme sıcaklığını da düşürmektedir. Yeniden kristalleşme sıcaklığının düşmesi ile malzemede dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşme oluşumuyla sertlikte tekrar bir düşüş gözlenmiştir.



Şekil 4. EKAP pas sayısı ile sertlik değişim grafiği (Hardness change with ECAP pass number)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, 7075 Al alaşımına EKAP işlemi ile 200 °C'de, 2 mm/s presleme hızında ve Rota C kullanılarak 14 pasa kadar deforme edilmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. EKAP yapılmamış numune hadde yönüne paralel deformasyon çizgilerine sahipken, 2. pastan itibaren EKAP yapılmış numunelerde plastik deformasyon akışı kenardan merkezine doğru olmuştur. Bu aşırı plastik deformasyon numunenin çevresinden merkezine doğru saat yönünde ve girdap şeklinde gerçekleşmiştir. 8. pastan itibaren numunelerde çok daha şiddetli karmaşık deformasyon akışı oluşmuştur. 14. pas EKAP işleminde ise şiddetli plastik deformasyon numunenin hemen hemen tüm kesitte etkili olmuştur.

2. EKAP işlemlerinde artan pas sayısı ile tane boyutu önemli oranda azalmıştır. Başlangıçta

tanelerde deformasyon yönünde bir bantlaşma eğilimi varken, artan pas sayısı ile daha homojen ve daha eş eksenli taneler oluşmuştur. Mikroyapı bakımından en optimum pas sayısının 14 pas olduğu anlaşılmıştır.

3. EKAP işlemi yapılan numunelerde 4. pasa kadar sertlik değerinde artış meydana gelmiştir. 6. pasta sertlikte etkili bir azalma gerçekleşmiş, 8. pasta sertlik yeniden artmış ve bu pas sayısından sonra sertlik dinamik yeniden kristalleşme nedeniyle devamlı olarak azalmıştır.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

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.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Furui, M., Kitamura, H., Anada, H., Langdon, T.G., "Influence of Preliminary Extrusion Conditions on the Superplastic Properties of a Magnesium Alloy Processed by ECAP", **Acta Materialia**, Cilt 55, 1083–1091, 2007.
2. Málek, P., Cieslar, M., Islamgaliev, R.K., "The Influence of ECAP Temperature on the Stability of Al-Zn-Mg-Cu Alloy", **Journal of Alloys and Compounds**, Cilt 378, 237–241, 2004.
3. Valiev, R.Z., Langdon, T.G., "Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement", **Progress in Materials Science**, Cilt 51, No 7, 881–981, 2006.
4. Lowe, T., Zhu, Y., "Commercialism of Nanostructured Metals Produced by Severe Plastic Deformation Processing", **Advanced Engineering Materials**, Cilt 5, 373-378, 2003.
5. Valiev, R. Z., Langdon, T.G., "Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement", **Progress in Materials Science**, Cilt 51, 881–981, 2006.
6. Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V., Zhu, Y.T., Lowe, T.C., "Paradox of Strength and Ductility in Metals Processed By Severe Plastic Deformation", **Journal of Materials Research**, Cilt 17, 5-8, 2002.
7. Zheng, L.J., Chen, C.Q., Zhou, T.T., Liu, P.Y., Zeng, M.G., "Structure and Properties of Ultrafine-Grained Al-Zn-Mg-Cu and Al-Cu-Mg-Mn Alloys Fabricated by ECA Pressing Combined with Thermal Treatment", **Materials Characterization**, Cilt 49, 455– 461, 2003.
8. Nagarajan, D., Chakkingal, U., Venugopal, P., "Influence of Cold Extrusion on the Microstructure and Mechanical properties of an Aluminium Alloy Previously Subjected to Equal Channel Angular Pressing", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 182, 363–368, 2007.
9. Petch, N.J., "The Cleavage Strength of Polycrystals", **Journal of the Iron and Steel Institute**, Cilt 174 (8), 25-28, 1953.
10. Purcek, G., Saray, O., Karaman, I., Kucukomeroglu, T., "Effect of Severe Plastic Deformation on Tensile Properties and Impact Toughness of Two-Phase Zn-40Al Alloy", **Materials Science and Engineering A**, Cilt 490, 403–410, 2008.