

AŞIRI PLASTİK DEFORMASYONUN ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ KAYNAĞI ÜZERİNE ETKİSİ

Mümin Şahin

Prof. Dr., Trakya Üniversitesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, Edirne
mumins@trakya.edu.tr

Cenk Mısırlı

Yrd. Doç. Dr., Trakya Üniversitesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, Edirne
cenkm@trakya.edu.tr

Derviş Özkan*

Mak.Yük.Müh., Trakya Üniversitesi,
Makine Mühendisliği Bölümü, Edirne
dervisozkan@gmail.com

ÖZET

Aşırı plastik deformasyon metodu, iş parçasını yüksek genlemelere maruz bırakarak nano mertebesine yakın mikroyapı iyileşmesi sağlanan bir malzeme üretim işlemidir. Nano yapı malzemeler, yüksek mukavemet, düşük elastisite modülü, yüksek tokluk, yüksek difüzyon aktivasyonu ve düşük sıcaklıklarda yüksek süper plastiklik özellikleri gibi özellikler sunar. Elde edilen bu özelliklerinden dolayı aşırı plastik deformasyon araştırmacıların artan bir hızla ilgisini çekmektedir. Sürtünme kaynak yöntemi ise parçaların ara yüzeylerinde sürtünme yoluyla oluşturulan mekanik enerjinin, ısı enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilen ısı yardımıyla gerçekleştirilen bir katı-hâl kaynak türüdür.

Bu çalışmada, aşırı plastik deformasyona uğramış 5083 alüminyum alaşımına sürtünme kaynağı uygulandıktan sonra mekanik ve metalurjik özelliklerindeki değişimler deneysel olarak incelenmiş; kare kesitli eşit kanal açıl basmakalıbı ve deneysel malzeme olarak 5083 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Daha sonra elde edilen parçalar sürtünme kaynak yöntemiyle birleştirilmiştir. Birleştirmelere çekme deneyi, sertlik testi uygulanmış ve birleştirmelerin metalurjik incelemeleri yapılarak elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aşırı plastik deformasyon, eşit kanal açıl basma, 5083 alüminyum alaşımı, sürtünme kaynağı

The Effect on the Welding of Severe Plastic Deformed Aluminum Alloys

ABSTRACT

Severe plastic deformation, by exposing high-expansion of the work piece, is a process method of the material close to the state of nanostructure. Nano-structured materials show properties such as high strength, low elasticity module, high toughness, high diffusion activation and high super plasticity at low temperatures. Because of these properties obtained, severe plastic deformation draws attention of researchers with an increasing rate. Friction welding method, a solid-state welding process, is a welding method that is generated by the help of heat obtained with conversion of mechanical energy into thermal energy at the interface of the work pieces.

In this study, 5083 aluminum alloys were the severe plastic deformed and, later, the parts were joined friction welding method. Then, the mechanical and metallurgical properties of the joints have been experimentally investigated. However, square cross – sectional equal channel angular pressing die and 5083 Aluminum alloy specimen as a test material were used in this study. The obtained parts were joined by friction welding method. Tensile test, hardness test and metallurgical properties of the joints were examined. Then, the obtained results were commented on.

Keywords: Severe plastic deformation, equal channel angular pressing, 5083 aluminum alloy, friction welding

* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 08.05.2012

Kabul tarihi : 30.07.2012

20-21 Ekim 2011 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından İstanbul'da düzenlenen Geleceğin Teknolojileri Sempozyumu'nda sunulan bildiri, yazarınlarca güncellenerek ve genişletilerek bu makale hazırlanmıştır.

Şahin, M., Mısırlı, C., Özkan, D., O. 2012. "Aşırı Plastik Deformasyonun Alüminyum Alaşımlarının Kaynağı Üzerine Etkisi," TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 630, s. 26-33.

1. GİRİŞ

Son zamanlarda yapılan birçok çalışma, aşırı plastik deformasyona maruz kalmış nano yapı malzemeleri elde etmeye çalışmaktadır. APD (Severe Plastic Deformation-Aşırı Plastik Deformasyon) tekniğinin içerisinde EKAB (Equal Channel Angular Pressing-Eşit Kanallı Açıl Basma) yöntemiyle, gözenekliliğin az olması ve hacim değişikliği olmadan nano yapı kristal malzemelerin ve yüksek dayanım, tokluk ve artırılmış süperplastiklik gibi ultra iyileştirilmiş tanecikli yapıların üretilmesi en önemli avantajları olarak bilinmektedir. Metalik yapılar, kaynak gibi herhangi bir metotla birleştirilmiş bağlantılara gereksinim duyabilir. Kaynak esnasında, EKAB yöntemiyle elde edilmiş yapının fazla değişmeden kalması önemlidir. Bu yüzden kaynak için gerekli özel yöntemin seçilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, sürtünme kaynağı gibi katı hâl yöntemi burada önem kazanacaktır [1-3].

2. AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON VE EŞİT KANALLI AÇIL BASMA

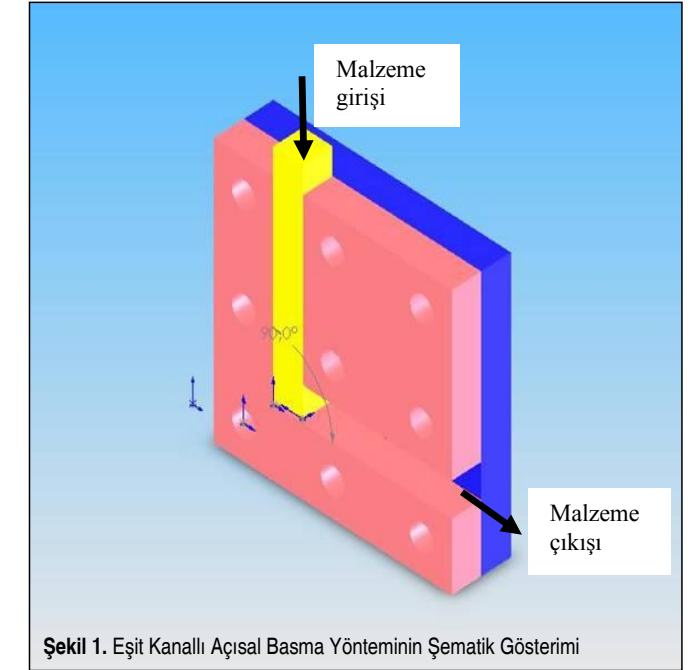
Nano kristalli metaller ve alaşımlar, kaba tanecikli yapılar nazaran mekanik ve fiziksel özelliklerinin kombinasyonundan dolayı büyük öneme sahiptirler. Nano ve nano yapıya yakın malzemelerin deformasyon davranışlarını daha iyi anlamak için bu malzemelerin kütle biçimlendirmelerini test etmek gereklidir. EKAB yöntemiyle belirlenen ortalama tane boyutu 200 ile 1000 nm arasındadır [4].

Metal malzemelerde mekanik özelliklerin geliştirilmesi için ultra iyi tanelerin elde edilmesinde iki yöntem vardır. Bunlar, erime noktasının 0,3 katı altındaki sıcaklıkta aşırı plastik deformasyon ve toz metalurjisi yöntemidir.

Aşırı plastik deformasyon metalik malzemelerde erime noktasının 0,3 katı altında yüksek derecede plastik genlemelere maruz kalan plastik deformasyonlar olarak bilinir. Aşırı plastik deformasyon, kaba taneli mikroyapıların düzenli hücre bloklarına ve dislokasyon hücrelerine bölünmesiyle oluşur. Malzemenin genlemesi artarken mikroyapısal boyutlar küçülür. Geleneksel üretim yöntemleri yüksek genlemelerde malzemenin hasara uğramadan deformasyonunu sağlayamaz. EKAB metodunun en karakteristik özelliği, işlem sonrası malzemenin kesit alanının sabit kalmasıdır. Bu yüzden kesit değişmesi olmadan yüksek derecelerde plastik deformasyon mümkündür. Bu nedenle, bir parça plastik genleme artışıyla birden çok kez aşırı deformasyona uğratılabilir. Bu işlemde, işlem esnasında; kalıp tasarımı, hız, sıcaklık, sürtünme ve ön tasarım gibi optimum işlem koşullarının bilinmesi parçanın plastik deformasyon davranışlarının belirlenmesi açısından son derece önemlidir.

EKAB yönteminde eşit boyutlu birbiriyle 90 derece açılı iki köşesi bulunan kalıp Şekil 1'de gösterilmektedir. Ham ma-

mul bir zımba vasıtasıyla kalıbın bir tarafından basılıp diğer tarafından boyutları değişmeden çıkarılmaktadır. Bu esnada malzeme kayma deformasyonuna maruz kalmaktadır. İşlemin birden çok tekrarlanması halinde plastik deformasyon genleme miktarında bir artma olacaktır.



Şekil 1. Eşit Kanallı Açıl Basma Yönteminin Şematik Gösterimi

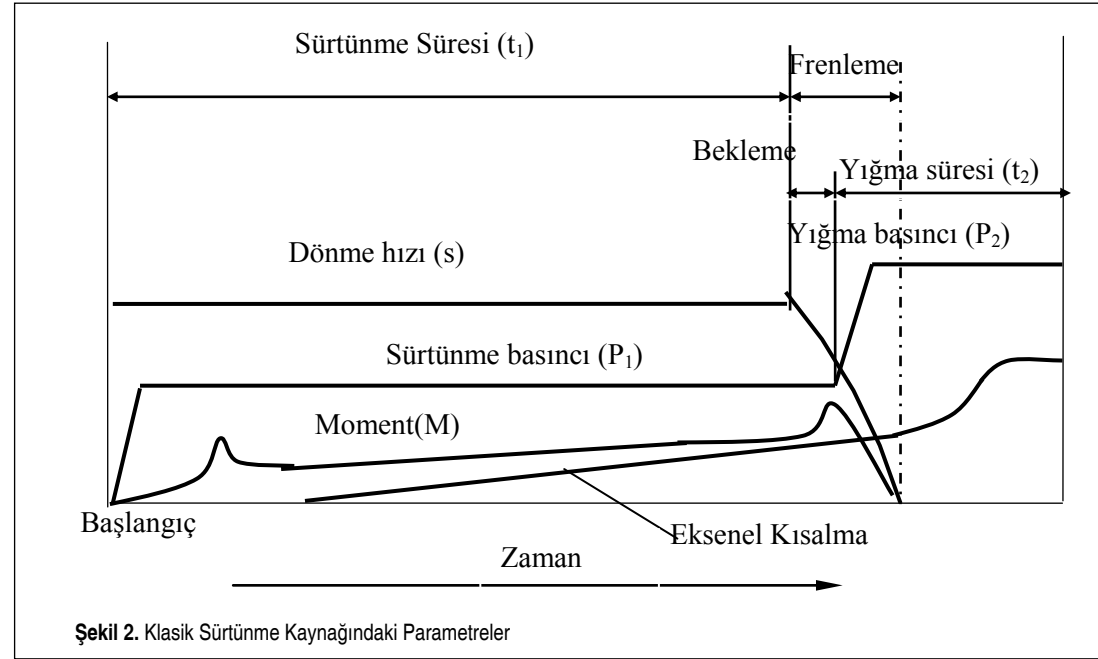
Eşit kesitli yanal ekstrüzyon EKAB'nin özel bir formudur. Bu metotta birbirini 90 derecelik açıyla kesen iki kanal bulunur. Bu kanalın formu S şeklinde olup θ açısı her kanalda eşittir ve buna S tip eşit kesitli yanal ekstrüzyon adı verilir. Bu metotta malzeme kanalın bir tarafından zımba vasıtasıyla preslenip kanalın diğer tarafından deforme olmuş; ancak ölçülerinde herhangi bir değişiklik olmadan alınmış halde elde edilir. Bu işlemin birden çok tekrar edilmesi halinde toplam genlemede artma meydana gelir [5-11].

3. SÜRTÜNME KAYNAĞI METODU

Bu işlemde ısı, parça yüzeylerinin dışarıdan herhangi bir enerji olmadan basınç altında döndürülmesiyle oluşan mekanik enerjinin termal enerjiye dönüşmesiyle elde edilir. Sürtünme kaynağının bilinen bazı avantajları yüksek parça tasarrufu, kısa üretim süresi ve farklı metal veya alaşımdan parçaların birbirine kaynakla birleşmesine imkân tanınmasıdır. Sürtünme kaynağı ayrıca dairesel veya dairesel olmayan kesitlerin birleştirilmesinde de kullanılabilir. Sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığılma süresi, yığılma basıncı ve dönme hızı sürtünme kaynağının en önemli parametreleridir [12-20].

Genelde sürtünme kaynağı, sürekli tahrik ve atalet sürtünme kaynağı olmak üzere iki ana başlığa ayrılır.

Çalışmanın olduğu sürekli tahrik yönteminde parçalardan biri



Şekil 2. Klasik Sürtünme Kaynağındaki Parametreler

sabit s dönme hızı ile dönerken, diğer parça önceden belirlenmiş P_1 sürtünme basıncıyla dönen parçaya belirli bir süre t_1 kadar bastırılır. Sonrasında dönen parçaya uygulanan tahrik serbest bırakılır ve parça aniden dururken, basınç belirlenmiş t_2 süresince yine önceden belirlenmiş P_2 yığılma basıncına kadar yükseltilir. Bu kaynak metodunun parametreleri Şekil 2’de gösterilmektedir [14-20].

Sürtünme kaynağıyla ilgili araştırmalar 1970’li yıllarda başlamış olup, kısa sürede gelişme göstermiştir. Kinley sürtünme kaynağının prensiplerini araştırmış, Murti istatistik analizin yardımıyla sürtünme kaynağının parametrelerinin önemini bulmuş, Şahin yüksek hız, karbon ve ostenitik paslanmaz çeliklerin deneysel ve bilgisayar simülasyonu üzerinde çalışmalarda bulunmuştur. 5083 alüminyum EKAB yöntemi için çeşitli çalışmalar kabul görmüş ve özellikleri hakkında kapsamlı şekilde çalışmalar yapılmış ve bu çalışmada da aşırı plastik deformasyonun, alüminyum alaşımlarının sürtünme kaynağı üzerine etkileri araştırılmıştır. Ayrıca; numunelere çekme ve sertlik deneyleri uygulanmış, mikroyapı özellikleri sunulmuş ve tartışılmıştır.

Tablo 1. Al 5083 Malzemenin Kimyasal Kompozisyonu [20]

Malzeme	%	%	%	%	%	%	%	%	%	Diğer		Alınan malzemenin çekme dayanımı (MPa)
										Her biri	Toplam	
AA	0.40	0.40	0.10	0.30	4.0	0.05	-	0.25	0.15	0.05	0.15	305
5083				-	-	-						
				1.0	4.9	0.25						

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

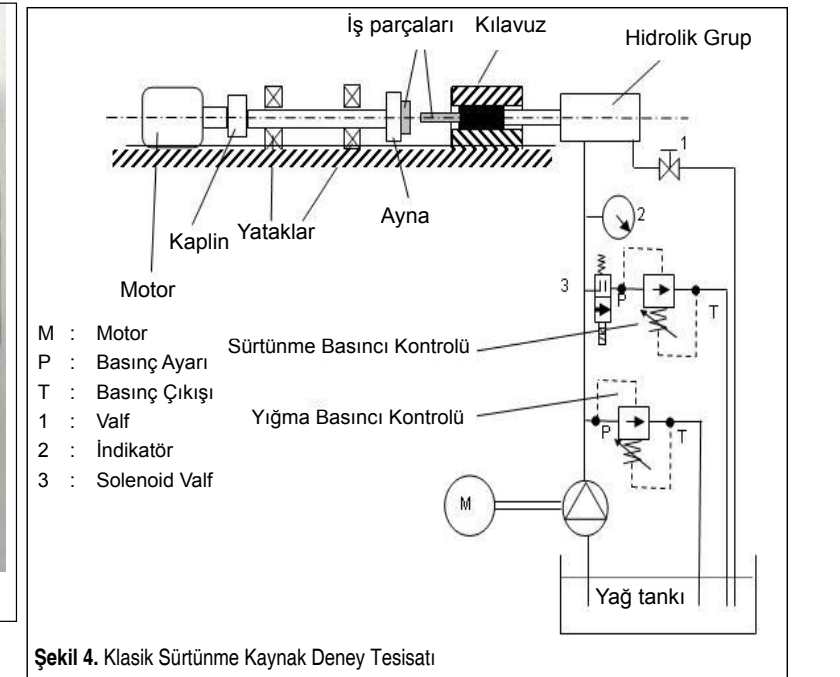
Deneylerde malzeme olarak 5083 Al alaşımı ve kare kesitli EKAB kalıbı aşırı plastik deformasyon için kullanılmıştır. İlk olarak alınan 5083 alaşımları sürtünme kaynağıyla birleştirilmiştir. Sürtünme süresi, yığılma süresi, sürtünme basıncı ve yığılma basıncı gibi kaynak için gerekli olan parametreler belirlenmiştir. Sonrasında alınan 5083 alüminyum malzemeler kare kesitli olarak hazırlanmış ve EKAB kalıbında bir derece plastik deformasyon maruz bırakılmıştır. Elde edilen kare kesitli parçalar, talaş kaldırılarak silindirik forma getirilmiş ve sonrasında parçalar önceden laboratuvar şartlarında oluşturulmuş sürekli tahrik sürtünme kaynağı tezgâhında birleştirilmiştir.

4.1 Deneysel Malzemesi

Al 5083 malzemenin kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 3. Deneyde Kullanılan Kalıp



Şekil 4. Klasik Sürtünme Kaynak Deney Tesisatı

4.2 EKAB İçin Kalıp

Bu çalışmada talaş kaldırma işleminin rahatlığından dolayı kare kalıp tercih edilmiştir. Alınan Al alaşımlar, bir derece deforme olmuşlardır. Deformasyonda 150 tonluk hidrolik pres kullanılmıştır. Deneyde kullanılan kalıbın resimleri Şekil 3’te verilmiştir.

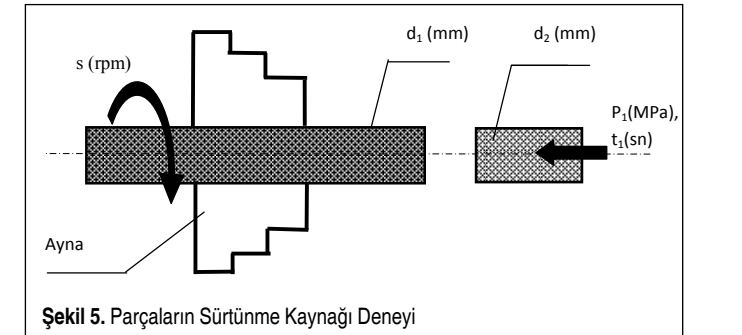
Alınan 5083 Al malzemeler, 70 mm uzunluk ve 12 mm genişlikte tam kare kesitli olarak işlenmiştir.

4.3 Sürtünme Kaynağı Deneyi

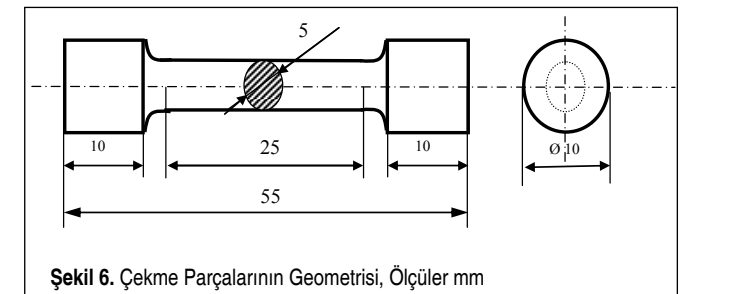
İlk olarak alınan 5083 Al iş parçaları hiçbir plastik deformasyona uğramadan sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş ve sonrasında optimum kaynak parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra alınan parçaların bir bölümü bir derece aşırı plastik deformasyona uğratılmıştır. EKAB kalıbı deformasyon için kullanılmıştır. Bu tür bir işleme düzlem genleme hali denilmektedir. Bu bakımdan deforme olmuş malzemenin kesiti önemli değildir. Bu amaçla kolay işlenebilen alüminyum kare kesitli kalıp hazırlanmıştır. Sonrasında elde edilen parçalar, optimum parametreleri kullanarak sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirilmişlerdir.

Bu çalışmada sürekli tahrik sürtünme kaynağı yöntemi laboratuvar şartlarında uygulanmıştır. Şekil 4’te tesisatın şematik resmi verilmiştir [14]. Parçaların sürtünme kaynağı deneyi Şekil 5’te gösterilmiştir.

Önceden yapılan bir çalışmada, pilot testler kullanılarak bu malzemenin kaynağı için belirlenen optimum parametreler; sürtünme süresi 3 saniye, sürtünme basıncı 35MPa, yığılma süresi 15 saniye, yığılma basıncı 90MPa ve bunun yanında motor



Şekil 5. Parçaların Sürtünme Kaynağı Deneyi



Şekil 6. Çekme Parçalarının Geometrisi, Ölçüler mm

tahrik gücü 4kW ve dönme hızı 1410 d/dak’ dır [20]. Sonrasında çekme ve yorulma testleri hem kaynaklı ve hem de kaynaklı olmayan durum için yapılmıştır (Şekil 6).

Optimum kaynak koşulları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Sürtünme Kaynağı Deneyindeki Parametreler

5083 Alüminyum d_1 (mm)	5083 Alüminyum d_2 (mm)	Sürtünme süresi- t_1 (sn)	Sürtünme basıncı- P_1 (MPa)	Yığılma süresi- t_2 (sn)	Yığılma basıncı- P_2 (MPa)
10	10	3	35	15	90

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

İki takım halinde yapılan deneylerde, 15 saniye yığıma süresi ve 90 MPa yığıma basıncı sabit tutularak numuneler için uygun sürtünme süresi ve basıncı elde etmeye çalışılmıştır. İlk takımda sürtünme süresi değişirken, sürtünme basıncı 35 MPa da sabit tutulmuş, ikinci takımda sürtünme süresi 3 saniyede sabit tutulurken sürtünme basıncı değiştirilmiştir.

5.1 Çekme Deneyleri

Deneyler için alınan alüminyum alaşımı deney numuneleri silindirik formda talaş kaldırarak işlenmiş ve birleştirilmiş, sonrasında birleştirmelerin çekme dayanımları araştırılmıştır.

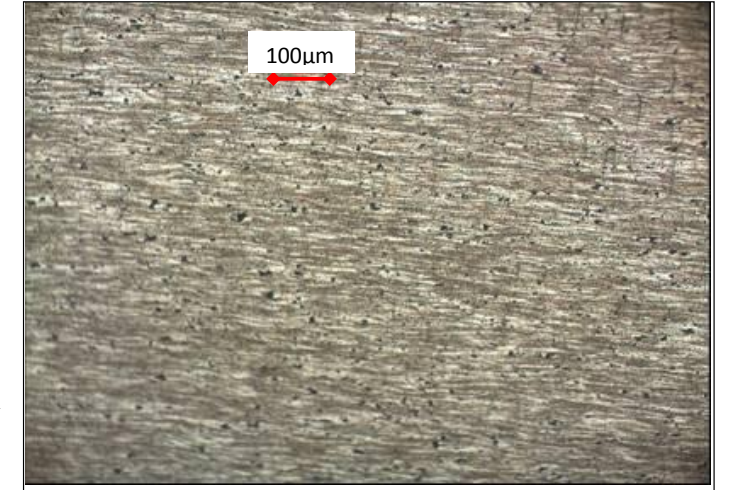
Sürtünme süresi ve basıncına göre belirlenen çekme dayanımlarının varyasyonları Şekil 7 ve 8’de verilmiştir. Birleştirmelerin en yüksek kuvvetinin 10 mm çapa bölünmesiyle çekme dayanımları hesaplanmıştır.

Sonrasında alüminyum alaşımlar, bir derece EKAB işlemine tabi tutulmuş ve elde edilen numuneler silindirik formda hazırlanmıştır. Daha sonra bunlar sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirilmiş ve çekme dayanımları araştırılmıştır. Hesaplanan çekme dayanımlarının sürtünme süresi ve basıncına bağlı değişimde olduğu görülmüştür (Şekil 7 ve 8).

Şekil 7 ve 8’den görüldüğü üzere birleştirmelerin dayanımları, sürtünme süresi ve sürtünme basıncıyla artmaktadır. Ek olarak en yüksek dayanımın elde edildiği belirlenen optimum

sürtünme süresi 3 saniye ve optimum sürtünme basıncı 35 MPa’dır.

İşlem yapılmadan önce satın alınan 5083 alüminyum alaşımının çekme dayanımı, yaklaşık olarak 305 MPa iken bir derece aşırı plastik deformasyona uğramış alaşımın çekme dayanımı 420 MPa olarak belirlenmiştir. Şekil 7 ve 8’de de görüldüğü üzere bir derece aşırı plastik deformasyona uğramış alüminyumunda çekme dayanımı, sürtünme süresi ve basıncıyla artmaktadır. Bu gösteriyor ki aşırı plastik deformasyona uğramış malzemenin değerleri pekleşme nedeniyle artmaktadır. Satın alınan ve sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş parçaların çekme dayanımları aynı olurken, EKAB işlemine tabi tutulmuş ultra iyi taneli alüminyumun çekme dayanımı, satın alınan alüminyumdan yaklaşık olarak 1,4 kat daha yüksek olmaktadır [7, 8, 20].

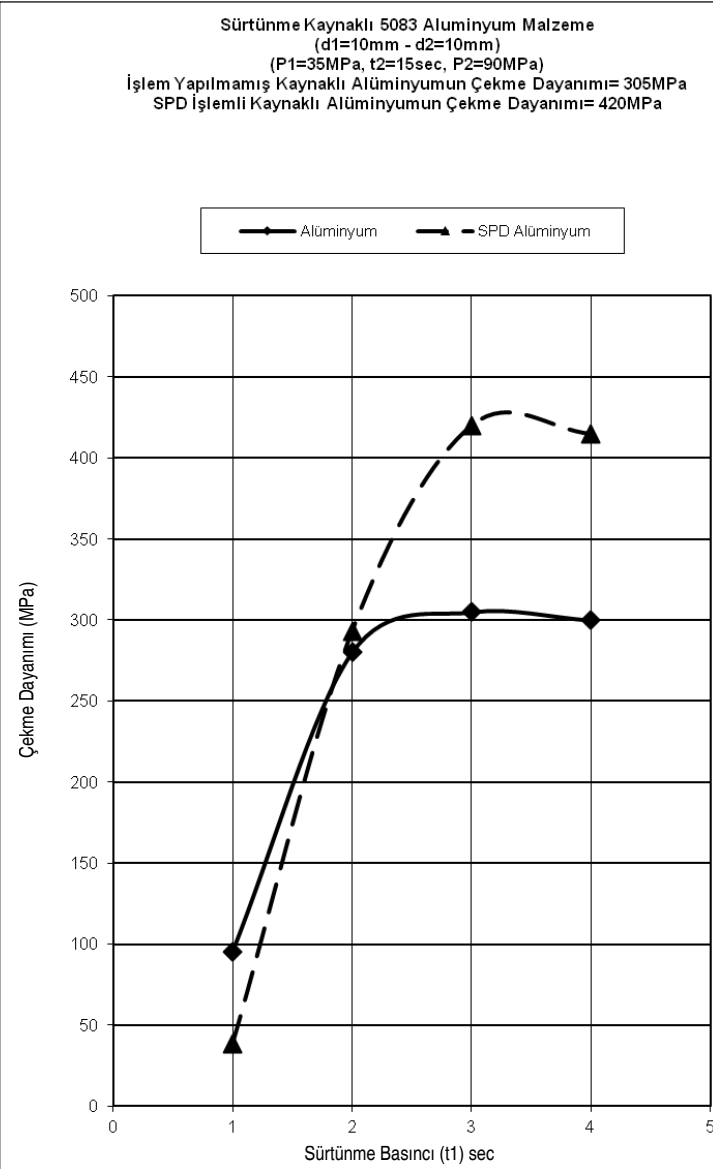


Şekil 10. Alüminyum Malzemenin Mikroyapısı

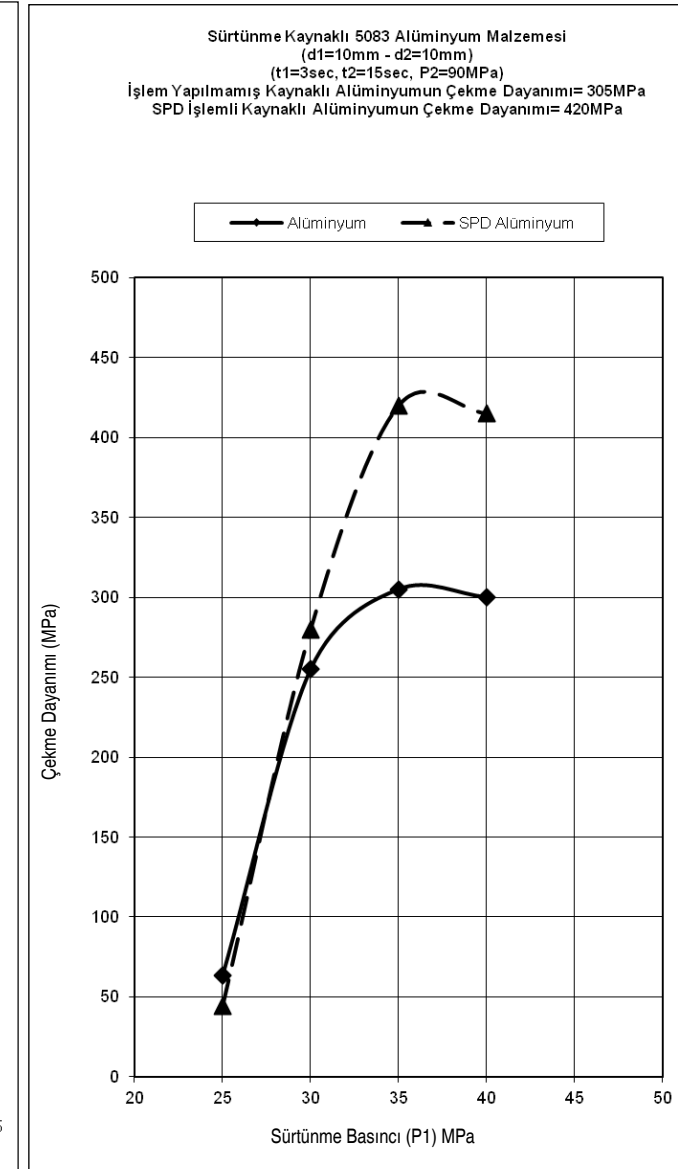
Açıktır görülmektedir ki çözünmeyen fazların partikül değişimi, aşırı plastik deformasyonla ilişkilidir. Bir derece plastik deformasyonun etkisi Şekil 10’da görülmektedir. Partikül boyutu yaklaşık olarak 200 nm genişliğindedir.

Kaynak esnasında, yığıma basıncıyla oluşan plastik deformasyon ve sürtünme ısıyla metalin tekrar kristalize olması genellikle görülen bir olaydır. Bunlar çoğunlukla kaynak bölgesindeki fazların değişiminde etkili olabilir. Bunun dışında bazı intermetalik fazlar kaynak bölgesinde şekillenebilirler. Bu intermetalik fazlar, birleştirmelerin ara bölgesindeki özellikleri azaltacak yönde etkili olurlar. Bu yüzden kaynak bölgesinde oluşan faz bileşenlerinin XRD analiziyle tespiti son derece önemlidir. Bu çalışmada kaynak bölgesi test edilmiştir, bölgenin XRD test sonuçları Şekil 11 ve 12’de gösterilmiştir.

Şekil 11’e göre analiz sonrasında kaynak bölgesinde olu-



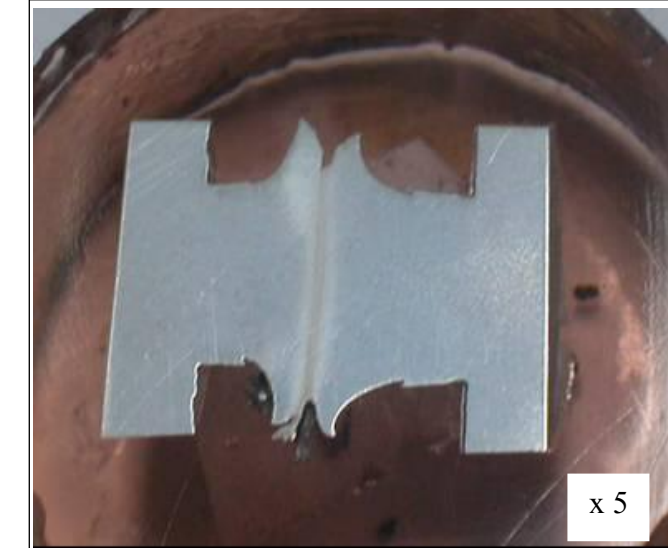
Şekil 7. Çekme Dayanımının Sürtünme Süresiyle Değişimi



Şekil 8. Çekme Dayanımının Basınca Bağlı Değişimi

5.2 Mikroyapı İncelemeleri

Şekil 9’da alüminyum birleştirmelerinin makro boyutta görüntüsü verilmiştir.

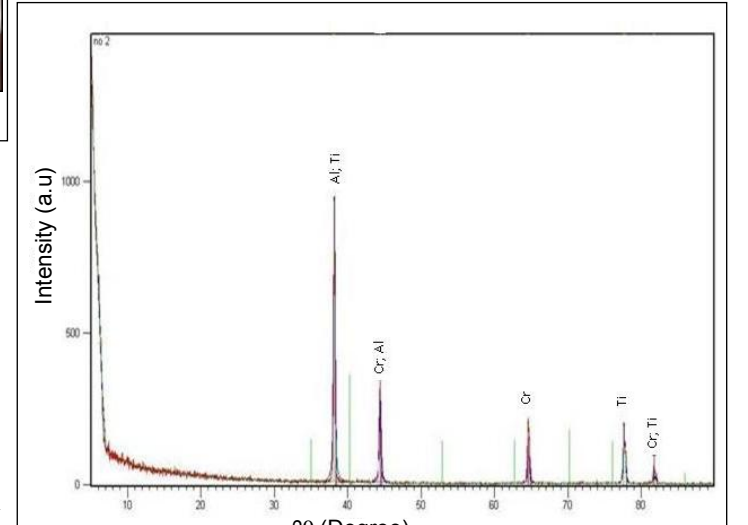


Şekil 9. Alüminyum Birleşiminin Makro Boyutta Görüntüsü

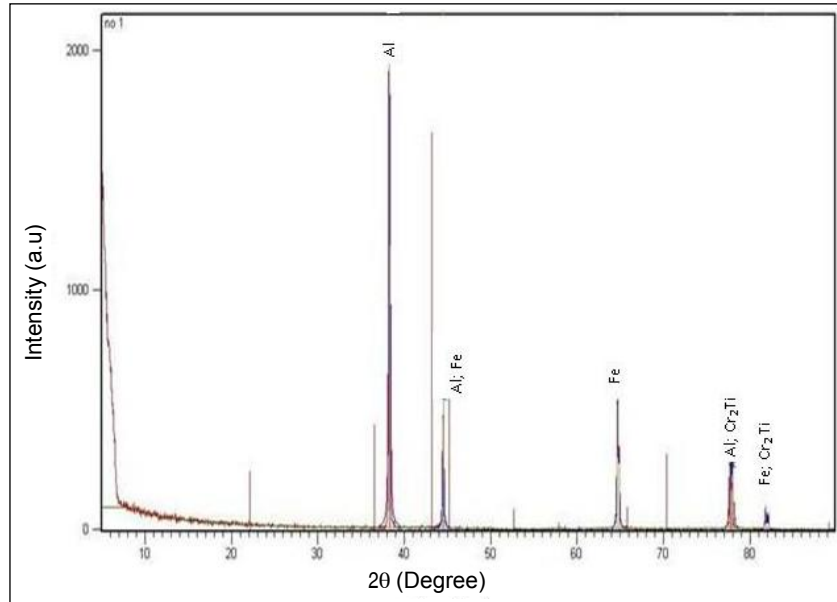
Sonrasında Şekil 10’da alüminyumun mikroyapısı görüntüsü verilmiştir.

Bununla birlikte, birleştirmelerde ara yüzeylerindeki fazların belirlenmesi amacıyla XRD analizi gerçekleştirilmiştir. Kaynaklanmış alüminyum birleştirmelerinin XRD analiz sonucu Şekiller 11 ve 12’de verilmiştir.

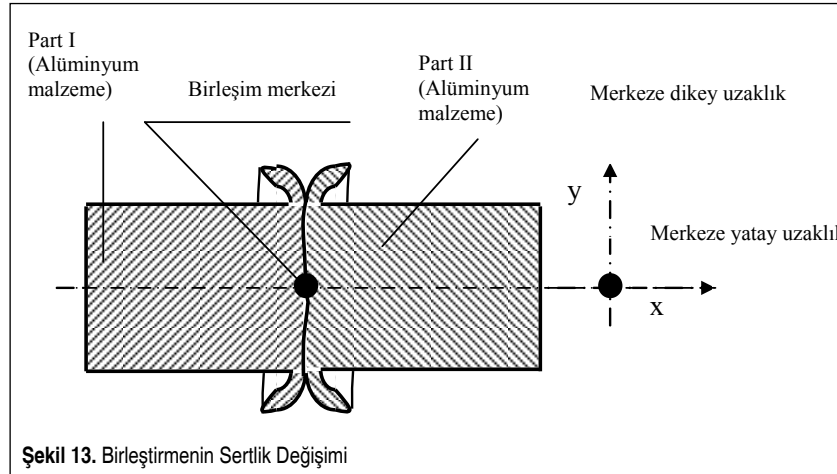
Genellikle 5xxx serisi alaşımlar, Mg_2Al_3 ve Mg_2Si parçacıkları ile krom ve manganez içeren intermetalik fazlar içerirler. Şekil 10’da $MnAl_6$ partikülleri görülmektedir. Bu fotoğrafta küçük ve siyah bölgeler magnezyum veya manganez gibi çözünmemiş fazlar içeren parçacıklar olabilir.



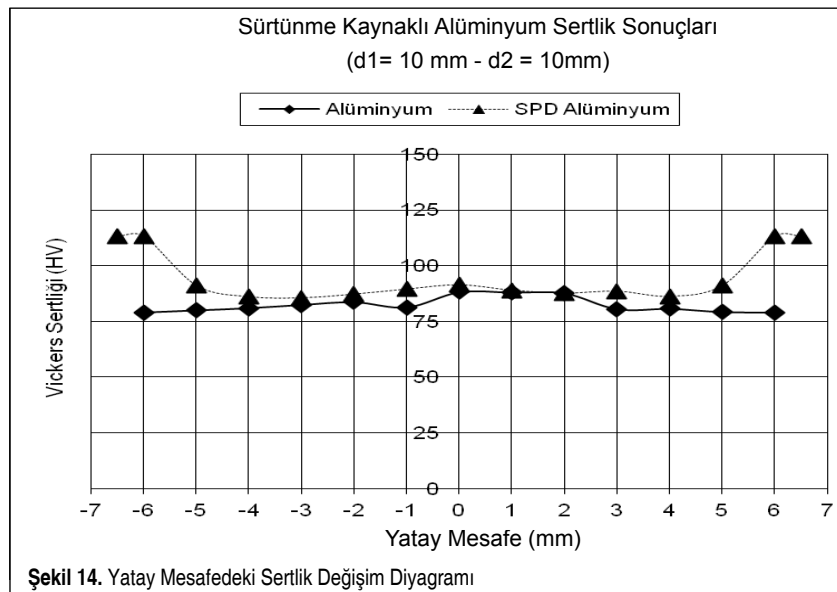
Şekil 11. Kaynaklanmış Alüminyum Birleşiminin XRD Analizi



Şekil 12. Kaynaklanmış SPD Alüminyum Birleştirmesinin XRD Analizi



Şekil 13. Birleştirmenin Sertlik Değişimi



Şekil 14. Yatay Mesafedeki Sertlik Değişim Diyagramı

şan ara fazlar $AlFe$, $AlFe_3$, Fe_3Al , $AlCrFe_2$, $AlTi_3$, Al_3Fe_4 olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, aşırı plastik deformasyona uğratılmış ve sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş alüminyumun ara fazları $AlCr$, $AlTi$, $AlFe_3$ ve $AlFe$ 'dir (Şekil 12).

5.3 Sertlik İncelemeleri

Birleştirmelerin sertlik değişimleri farklı noktalarda mikro sertlik testi ile belirlenmiştir (Şekil 13).

Şekil 14'te kaynaklanmış ve bir derece EKAB işlemine tabi tutulup kaynaklanmış alüminyumun, yatay mesafede sertlik değişimleri görülmektedir.

Şekil 14'te görüldüğü üzere 5083 alüminyum alaşımının sertlik değeri yaklaşık 78HV iken, bir derece aşırı plastik deformasyona uğramış 5083 alüminyum alaşımının sertliği daha yüksek olmaktadır. Ancak birleştirmelerin en yüksek sertlik değerleri, kaynak ara yüzeyinden uzakta tespit edilmiştir. Aşırı plastik deformasyon, malzemenin dayanımını ve sertliğini arttırmaktadır. Bununla birlikte, bir derece aşırı plastik deformasyonun sertlik değerinin artışı Şekil 14'te gösterilmektedir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, bir derece aşırı plastik deformasyona uğramış ve sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş alüminyumun mekanik ve metalurjik özellikleri araştırılmıştır. Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş parçalar çekme sertlik testlerine tabi tutulmuş ve kaynak gölgesindeki fazlar XRD analiziyle araştırılmıştır. Deneysel parçasının mikroyapısı araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Satın alınan ve bir derece EKAB deformasyonuna tabi tutulan alüminyum malzemeler sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş ve çekme dayanımı araştırılmıştır. Görüldüğü gibi birleştirmelerde sürtünme süresi ve sürtünme basıncının arttıkça çekme dayanımı da yükselmiştir. Ancak birleştirmelerin çekme dayanımını maksimum seviyeye ulaştıktan sonra ısının etkisiyle azalmıştır. Küçük açılı sınırlı alt taneler kayma bantlarında oluşmuştur.

Mikroyapısal sonuçlardan da görülebileceği üzere tane boyutunun küçültülmesi sertlik ve mekanik özelliklerde belirgin bir artma göstermiştir. Çekme dayanımı ve sertliğin artışı malzemenin EKAB yönteminin ilk geçişinde maksimum noktaya ulaşmaktadır. Ancak 5083 alüminyum parçalarda bir derece aşırı plastik deformasyon için maksimum sertlik kaynak yüzeyinden daha uzakta tespit edilmiştir. Bunun nedeni işlem sonrası yeniden kristalleşmenin etkisi olmaktadır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar, bu çalışmadaki destekleri için Trakya Üniversitesi ile HEMA Endüstri A.Ş.'ye teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

1. Segal, V.M., Reznikov, V.I., Drobysheskiy, A.E., Kopylov, V.I. 1981. Russian Metal, 1:99.
2. Shin, D.H., Kim, Y.S., Lavernia, E.J., 2001. Acta Mater, 49:2387.
3. Chang, S.Y., Ahn, B.D., Hong, S.K., Kamado, S., Kojima, Y., Shin, D.H. 2005. "Tensile Deformation Characteristics of a Nano-Structured 5083 Al Alloy," Journal of Alloys and Compounds, 386:197-201.
4. Chauhan, M., Roy, I., Mohamed, F.A. 2005. "Creep Behavior in Near-Nanostructured Al 5083 Alloy," Materials Science and Engineering, A. 24-7:410-1.
5. Liu, Z., Wang, Z. 1999. "Finite-Element Analysis of the Load of Equal-Cross-Section Lateral Extrusion," J. Mater Process Tech., 94:193-6.
6. Lee, D.N. 2000. "An Upper-Bound Solution of Channel Angular Deformation," Scripta Mater, 43:115-8.
7. Horita, Z., Fujinami, T., Nemoto, M., Langdon, T.G. 2001. "Improvement of Mechanical Properties for Al Alloys Using Equal-Channel Angular Pressing," J. Mater Process Tech., vol. 117, p. 288-92.
8. Valiev, R.Z., Alexandrov, I.V., Zhu, Y.T., Lowe, T.C. 2002. "Paradox of Strength and Ductility in Metals Processed by Severe Plastic Deformation," J. Mater Res., January, 17(1):5-8.
9. Ivanisenko, Y., Wunderlich, R.K., Valiev, R.Z., Fecht, H-J. 2003. "Annealing Behaviour of Nanostructured Carbon Steel Produced by Severe Plastic Deformation," Scripta Mater, 47:947-52.
10. Alkorta, J., Sevillano, J.G. 2003. "A Comparison of FEM and Upper-Bound Type Analysis of Equal-Channel Angular Pressing (ECAP)," J. Mater Process Tech., 141:313-8.
11. Balasubramanian, N., Langdon, T.G. 2005. "An Analysis of Superplastic Flow After Processing by ECAP," Materials Sci. and Eng. A., 410-1:476-9.
12. Kinley, W. 1979. "Inertia Welding: Simple in Principle and Application," Weld and Met. Fab., October, 585-9.
13. Murti, K.G.K., Sundaresan, S. 1983. "Parameter Optimization in Friction Welding Dissimilar Materials," Met Const., June, 15(6):331-5.
14. Akata, H.E., Sahin, M. 2003. "An Investigation on The Effect of Dimensional Differences in Friction Welding of AISI 1040 Specimens. Industrial Lubrication & Tribology," 55(5): 223-32.
15. Şahin, M., Akata, H.E. 2003. "Joining with Friction Welding of Plastically Deformed Steel," J. Mater Process Tech., 142:239-46.
16. Şahin, M., Akata, H.E. 2004. "An Experimental Study on Friction Welding of Medium Carbon and Austenitic Stainless Steel Components," Industrial Lubrication & Tribology. 56:122-9.
17. Şahin, M. 2005. "Joining with Friction Welding of High-Speed Steel and Medium-Carbon Steel," J Mater Process Tech., 168:202-10.
18. Şahin, M. 2005. "An Investigation into Joining of Austenitic-Stainless Steels (AISI 304) with Friction Welding," Assembly Automation, 25(2):140-5.
19. Şahin, M. 2004. "Simulation of Friction Welding Using A Developed Computer Program," J. Mater Process Tech., 153-4:1011-8.
20. Şahin, M., Akata, H.E., Özel, K. 2008. "An Experimental Study on Joining of Severe Plastic Deformed Aluminium Materials with Friction Welding Method," Materials & Design. 29(1):265-74.
21. ASM Metals Handbook, ASM 1985;1., 8th ed., Metals Park Ohio.
22. ASM Metals Handbook, ASM 1985;7., 8th ed., Metals Park Ohio.