

Koruyucu Gaz Altında Difüzyon Kaynağı ve Uygulaması

Sare ÇELİK, İrfan AY

Balikesir Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü 10100, Balikesir-TÜRKİYE

Geliş Tarihi 20.12.1996

Özet

Bu çalışmada, oksitlenmeye müsait olan saf bakır ve alüminyuma argon gazı altında difüzyon kaynak tekniği uygulandı. Bu malzemelerin difüzyonla bağlanma kabiliyetini belirlemek için bir deney seti tasarlandı ve bir seri deney yapıldı. En başarılı sonuçlar, 560°C sıcaklıkta, 4.5 MPa basınçta ve 60 dakikalık sürede elde edildi. Bu kaynak şartlarında elde edilen kopma dayanımının, endüstride kullanım için yeterli olduğu görüldü.

Anahtar Sözcükler: Difüzyon kaynağı, argon gazı,

Diffusion Welding Under Protective Gas Atmosphere and its Application

Abstract

In this study, diffusion welding technique was applied to pure copper and aluminium in argon gas. An experiment set has been designed and series of experiment have been performed. In order to investigate their bonding ability by diffusion of Al and Cu. The best results were obtained at 560°C under the pressure of 4.5 MPa for 60 minutes. It was concluded that the tensile strength level obtained under the optimum welding condition is sufficient for industrial applications.

Key Words: Diffusion welding, argon gas,

Giriş

Teknolojideki çok hızlı gelişme, pahalı veya farklı malzemelerin birbiriyle birleştirilerek kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Difüzyon kaynağı çok eskiden beri bilinmesine rağmen, özellikle son yıllarda uzay teknolojisinde, nükleer santrallerde ve elektronik sanayindeki hızlı gelişmeler, bu yöntemin kullanımını adeta zorlamıştır. Apollo uzay aracı ve uzay kapsülündeki parçalarda, nükleer santrallerdeki yakıt çubuğu koruyucu bağlantısında, bu yöntem uygulanmıştır. Uçak sanayinde, askeri ve yolcu uçaklarının uzun ve dayanıklı olan kanat parçalarında difüzyon kaynağı vardır. Soğuk hava depolarında, gaz dolmuş tesislerinde ve silah teknolo-

jisinde de aynı yöntem kullanılmaktadır.

Difüzyon kaynağı, basit bir prensibe dayanır. Bu yöntem; “*Uygun bir atmosferde, (genellikle vakum veya koruyucu gaz), uygun sıcaklık ve basınçta, katı halde malzemelerin birleştirmeleri*” olarak tarif edilebilir (Albom, 1964). Difüzyon kaynağı şartları malzemelerin cinslerine göre değişebilir. Bu kaynak yöntemi, basınç uygulayarak yapılan diğer kaynak yöntemlerinde (soğuk basınç kaynağı, sürtünme kaynağı vs.), uzun kaynak süresi, nispeten düşük deformasyon ve uygun kaynak sıcaklığında yapılması yönünden farklılık gösterir.

Bilindiği gibi özellikle endüstrideki soğuk hava

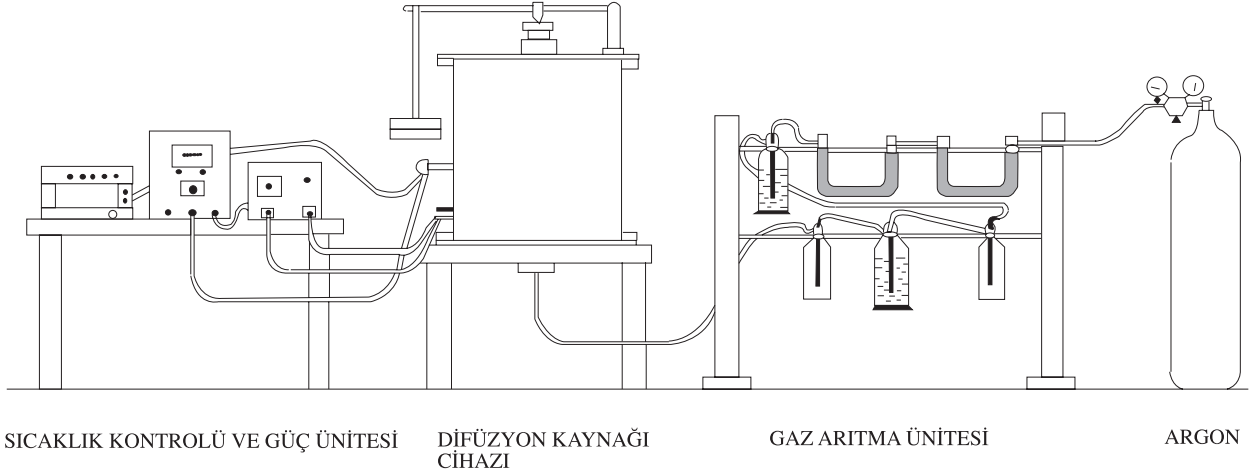
depolarında, dondurucularda ve gaz dolum tesislerinde (Al-Cu) boru bağlantıları, ısı iletimi ve yoğunluk dikkate alınarak yapılır. Her iki metalin normal atmosfer şartlarında oksitlenmeye karşı hassas olmaları nedeniyle, sökülemeyen bağlantı yapmak, bilinen ergitme kaynağı yöntemiyle oldukça güçtür. Bu nedenle koruyucu ortam çok önemlidir. Daha önceki çalışmalarda genellikle ilk yatırım maliyeti pahalı olan **vakum altında** difüzyon kaynağı yöntemi kullanılmıştır (Bartle, 1972). Bu çalışmada saf alüminyum ve bakırın **koruyucu ar-**

gon gazı altında difüzyon kaynağı yönteminin uygulanması amaçlanmıştır.

Materyal ve Metot

Deney Düzenegi

Difüzyon kaynağının ana parametrelerinden olan sıcaklık, basınç ve koruyucu ortamı içinde barındıracak bir kaynak aparatı, Şekil 1'de görüldüğü gibi tasarlanmıştır (Çelik, 1996).



Şekil 1. Difüzyon kaynağı aparatı (şematik)

Kaynak düzenegi 3 ana bölümden oluşmuştur.

1. Sıcaklık kontrolü, ve güç ünitesi
2. Difüzyon kaynağı cihazı
3. Gaz arıtma ünitesi

Isıtmının sağlandığı güç ünitesi 220 V' u 34 V' a indireyecek özel bir voltaj ayarlayıcısı içermektedir. Sıcaklık ölçümü, S tipi Platin, %10 Platin-Rodyum alaşımli termokupl ile dijital göstergeli bir cihazda yapılmıştır. Termokupl, birleşecek alüminyum ve bakır numunelerin birleşme bölgesine degecek kadar yaklaştırılmıştır. Termokupl'dan alınan sıcaklığın doğru olup olmadığını anlamak için kalibrasyona ihtiyaç vardır. Recorder'a mV metrebesinde ve belli büyüklükte voltajlar verilerek, recorder göstergesinin ne kadar ilerlediği kaydedilerek kalibrasyon yapılmıştır. Deney esnasında recorder'a çizdirilen sıcaklık değişimlerinin kontrolü, termokupl'un alındığı firmanın sıcaklık dönüşüm tablosu (sıcaklık-voltaj) ile kıyaslanarak sağlanmıştır.

Difüzyon kaynağı cihazı, iç içe geçmiş iki

silindirden oluşmuştur. En içte, numunelerin kaynaklandığı, Kanthal firmasının fibrothal RAC 100/200 tipi (2100 W, 34 V) özel yalıtılmış resistanlı bir ısıtma fırını vardır. Dış kısmı ise koruyucu, içi boş silindirik bir örtüdür. Bu örtünün üst kapağı üzerinde basınç sağlayacak bir manivela sistemi monte edilmiştir. Silindirin yan cidarından bir delik açılarak termokupl'un montesi sağlanmıştır. Aparat, fırın içine arıtılmış argon gazının kolayca girebilmesi ve çalışma rahatlığının sağlanması için dört ayak üzerinde oturtulmuştur.

Gaz arıtma ünitesi, argon gazının %99,99 saflıkta olmasına rağmen içerisinde nem ve oksijen bulunabileceği düşünülerek hazırlanmıştır. (Çelik, 1996; Welding Handbook, 1972). Nem alıcı olarak NaOH, CaCl₂ ve H₂SO₄ kullanılmıştır. Oksijen tutucu olarak pirogallol (%30 pirogallik asit %60 KOH çözeltisi 2/7 oranında karıştırılarak hazırlandı) kullanılmıştır. Karışım, 100 ml havadaki oksijenin tümünü, havayı 6-7 kez geçirmekle tamamen absorblayabilme kabiliyetine sahiptir (Alper, 1971).

Numune Hazırlama

Numuneler silindirik olarak kesilerek tornalanmış ve $\varnothing 15 \times 40$ mm boyutlarında son ölçüsüne getirilmiştir. Alın yüzeyleri, 280, 320, 400, 600, 800, 1000 grit silisyum karbür zımpara ile zımparalanmış, son işlem 1200 grit zımpara ile yapılmıştır. Yüzey pürüzlükleri, alüminyum için $R_a=0,90 \mu\text{m}$, bakır için $R_a=1,0-1,20 \mu\text{m}$ ölçülmüştür. Alın yüzeyleri silinip kurutulmuş olan numunelerden bakır altta, alüminyum üste gelecek şekilde fırın içersine yerleştirilmiştir.

Difüzyon Kaynağının Yapılması

Fırın içine yerleştirilen numunelerin her tarafını kaplayacak şekilde argon gazı gönderilmiş ve ısıtma başlatılmıştır. Sıcaklığın deney sıcaklığına erişmesi yaklaşık 30 dakika sürmüştür. Bu sıcaklığa ulaşıncaya basınç uygulanmıştır. Numuneler, bu basınçta önceden belirlenen süre ve sıcaklıklarda tutulmuştur. Sonra numuneler 200°C 'ye soğuyuncaya kadar fırın içinde basınç kaldırılarak bekletilmiş ve daha sonra fırından çıkartılmıştır.

Alüminyum ve bakır malzemelerin difüzyon kaynağı için sıcaklık, basınç ve tutma süresi, ana parametreler olarak literatürden alınmıştır (Felik-

son 1971, Kazakov 1985). Literatür araştırmaları ve düzenekte yapılan ön çalışmalar sonucu, bu parametrelerin sayısal değerleri, aşağıda verildiği gibi belirlenmiştir. Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğü önemli olmasına rağmen ikinci derecede bir parametre olarak düşünülmüştür.

Kaynak sıcaklıkları : 550°C , 560°C , 570°C

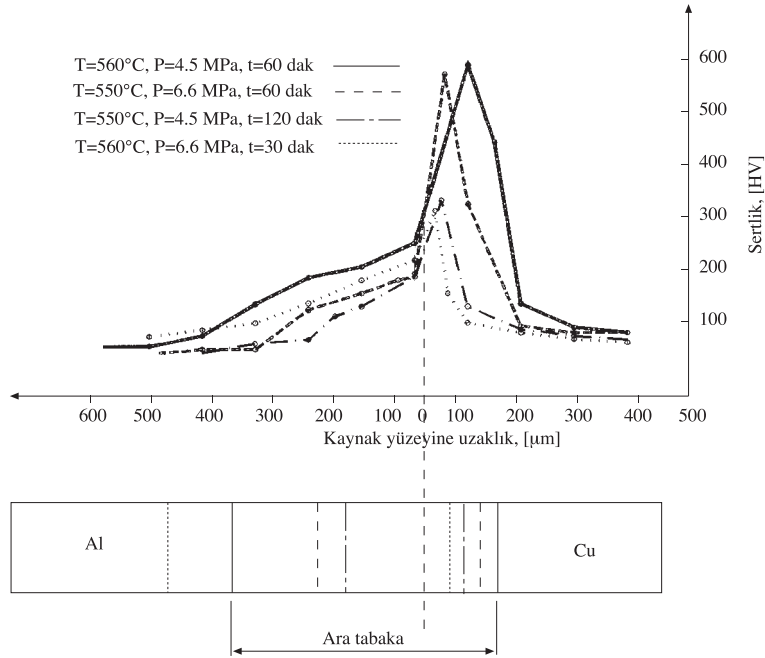
Kaynak basınçları : 4,5 MPa ve 6,6 MPa

Kaynak süresi : 30 dak, 60 dak, 120 dak

Kaynaklanmış parçalar, çekme deneyine, mikrosertlik ölçümüne, mikroyapı ve SEM'de EDS analizine tabi tutulmuştur.

Çekme Deneyi; Difüzyon kaynağı ile birleştirilen parçalar "TS 138 Çekme Deneyleri, 1978" standardı esas alınarak çekme deneyi için hazırlanmış ve 5 tonluk Instron marka çekme test cihazında 0.5 cm/dak 'lık çekme hızı ile çekme deneyleri yapılarak kopma dayanımları belirlenmiştir.

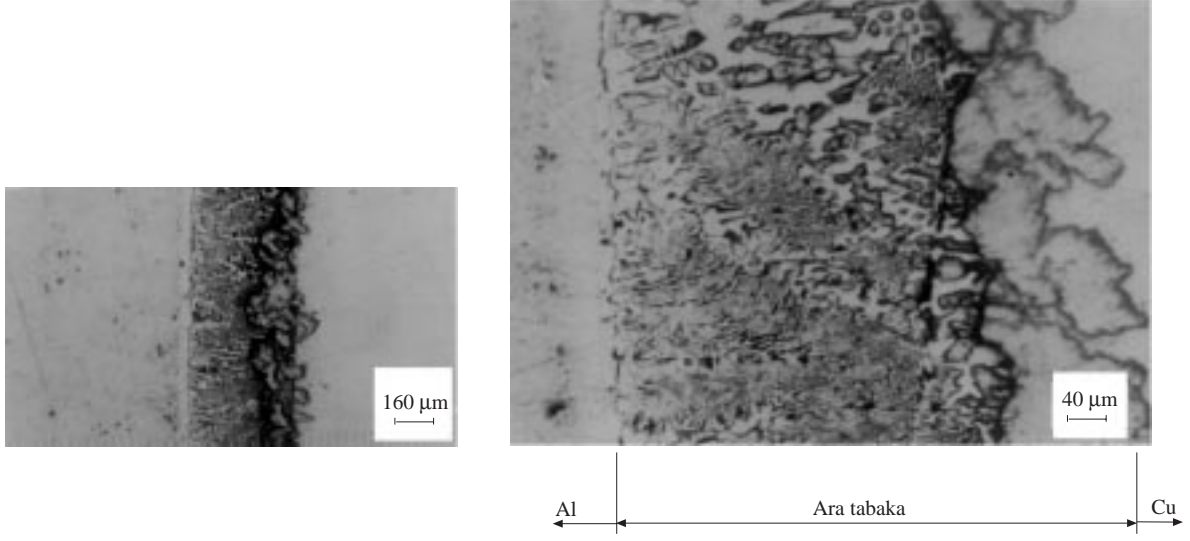
Mikrosertlik Deneyi; Değişik deney şartlarında kaynaklanmış numunelerin, birleşme bölgesinden ana metale doğru 40 g'lik yük kullanılarak mikrosertlik ölçümleri Carlzeiss Jena marka bir mikrosertlik cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 2. Değişik kaynak şartlarında birleşme bölgesindeki mikrosertlik değişimleri

Mikroyapı İncelemesi; Kaynaklı numunelerin birleşme bölgelerinde kesitler alınarak gerekli yüzey hazırlama işlemlerinden sonra alüminyum tarafı *keller* dağlayıcısı ile bakır tarafı ise

amonyumklorür-amonyumhidroksit dağlayıcısı ile dağlanmıştır. İçyapı incelemeleri Carlzeiss Jena optik mikroskobunda yapılmıştır.



Şekil 3. 560°C, 4.5 MPa, 60 dak'lık kaynaklanma şartlarındaki numunenin mikroyapı fotoğrafları

SEM'de EDS Analizi; Alüminyum ve bakır'ın difüzyon kaynağı ile birleşme bölgesinin analizleri, JEOL JSM-6400 Scanning Electron Microscope'na bağlı Tracor Voyage 2110 Energy Dispersive Spectrometer (EDS) analiz ünitesinde yapılmıştır. Ayrıca difüzyon kaynaklı parçanın kırılma yüzeyleri SEM'de incelenmiştir.

1'de görülmektedir. Çekme deneyleri sonunda kaynaklı parçalarda kopma, birleşme yerinin 1-2 mm ötesinde alüminyum tarafında meydana gelmiştir. Test parçalarında herhangi bir kesit daralması görülmemiştir. Kaynaklama parametrelerinden kaynaklama sıcaklığının, kaynak basıncının ve kaynak süresinin kopma dayanımı üzerindeki etkileri aşağıdaki şekilde değerlendirilmiştir.

Deneysel Bulgular ve Tartışma

Çekme deneyinden elde edilen sonuçlar Tablo

Tablo 1. Argon gazı altında difüzyon kaynaklı (Al-Cu) deney numunelerinin ortalama kopma dayanımları (Her bir kaynak şartı için en az üç numune denenmiştir.)

Kaynak sıcaklığı T (°C)	Kaynak basıncı P (MPa)	Kaynak süresi t (dak)	Ortalama Kopma dayanımı R_m (MPa)
550	6.6	30	35.71
550	6.6	60	58.80
550	4.5	60	28.15
550	4.5	120	44.29
560	6.6	30	47.69
560	4.5	30	36.37
560	4.5	60	60.80
570	4.5	30	25.84

Tablo 1 incelendiğinde, kaynak sıcaklığı 540 °C’de iken basıncın yüksek ve sürenin de uzun tutulması halinde bile yeterli birleşme sağlanmadığından dolayı incelemeye alınmadığı görülmektedir. Sıcaklık 570°C gibi yüksek tutulduğunda sürenin az, basıncın da düşük olması gerekmektedir. Bu halde de alüminyumda deformasyon görüldüğünden min 540°C ve max 570°C sıcaklıklarında fazla çalışma yapılmamıştır. 550°C ve 560°C sıcaklıklar için ayrı ayrı basınç ve süreler değiştirilerek kopma dayanımları denenmiştir. 550°C’de basınç artırılır (6.6 MPa) süre orta seviyede (60 dak) tutulursa kopma dayanımı artış göstermiştir. 560°C’de ise basınç düşürülür (4.5 MPa) süre orta seviyede olduğunda kopma dayanımı artmıştır. Ancak en yüksek kopma dayanım değerleri Tablo 1 ‘den görüldüğü gibi 560°C sıcaklık, 4,5 MPa basınç ve 60 dakika tutma süresi şartlarında difüzyon kaynağı yapılmış alüminyum ve bakır numunelerde elde edilmiştir.

Mikrosertlik deneylerinden elde edilen değerler ve değişimleri Şekil 2’de gösterildiği gibi bulunmuştur. Mikrosertlik değerlerinde, özellikle birleşme yerinin bakır tarafındaki difüzyon bölgesinde ani yükselmelerin olduğu gözlenmiştir (≈ 600 HV). Bunun nedeni ise; sıcaklık artarken metallerarası fazların (Al_2Cu , Al_4Cu_9) oluşumu olarak yorumlanmaktadır (Kazakov, 1985; Metals Handbook, 1972).

Optimum kaynak şartlarındaki numunelerin mikroyapısı Şekil 3’de görülmektedir. Al-Cu denge diyagramında görülen fazların karşılıkları birleşme bölgesinin mikroyapılarında açıkça gözlenmiştir. Ayrıca SEM’deki EDS analiz sonuçlarından elde edilen konsantrasyon eğrileri bunu doğrulamıştır.

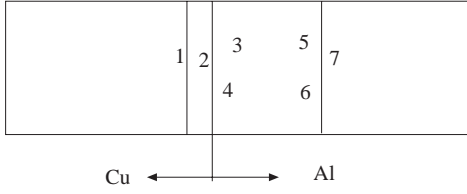
SEM’deki EDS analizleri Şekil 4’de şematik olarak gösterilen alüminyum ve bakırın difüzyon kaynağı ile birleşme bölgesindeki noktaların tanımı Tablo 2’de verilmiştir. Her kaynaklanma şartı için analiz sonuçları alınmış, konsantrasyon eğrileri çizilmiştir (Çelik, 1996). Optimum kaynak şartı için elde edilen EDS analiz sonucu Tablo 3’de ve konsantrasyon eğrisi Şekil 5’de görülmektedir. Bu konsantrasyon eğrisine göre; alüminyumun bakır tarafına yüksek oranlarda, kısa mesafelerde difüze ettiği, bakırın ise alüminyum tarafına düşük oranlarda uzun mesafelere kadar nüfuz ettiği görülmüştür. Bunun sebebi iki şekilde açıklanabilir. Birincisi, alüminyum atomları boyut olarak bakır atomlarından yaklaşık %11 daha büyük olduğundan (Smith, 1990) bakır atomlarının alüminyumun içine doğru difüzyonu daha kolay olmakta, böylece geçiş bölgesi de büyümektedir. İkincisi ise difüzyon katsayısı ile ilgilidir. Bu katsayı ana metal bakır olunca, alüminyumun bakıra geçişi daha az (500°C’de $10^{-12.6}cm^2/s$) ana metal alüminyum olduğu zaman bakırın alüminyuma geçişi daha fazla (500°C’de $10^{-10.3}cm^2/s$)dır (Vlack, 1970).

Tablo 2. EDS analiz bölgelerinin tanımı

Analiz Yeri No	Tanımı
1	Cu içinde Al’nin çözündüğü bölge
2	Cu içinde Al’nin çözündüğü bölgenin hemen altındaki ince bölge
3	Cu’ya yakın dendirit bölgesi, Al_2Cu (Cu ile aynı renk, açık)
4	Cu’ya yakın dendirit bölgesi, (Al ile aynı renk, koyu)
5	Al’ye yakın dendirit bölgesi, Al_2Cu (Cu ile aynı renk, açık)
6	Al’ye yakın dendirit bölgesi, (Al ile aynı renk, koyu)
7	Al içinde Cu’nun çözündüğü bölge

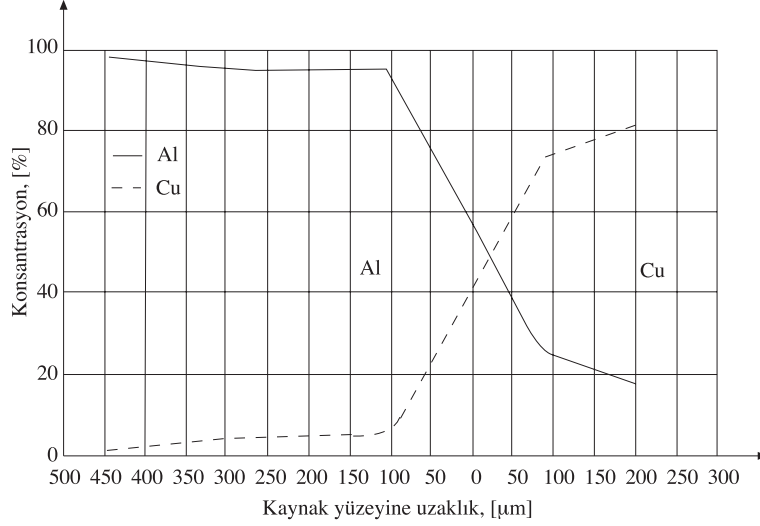
Tablo 3. 560°C, 4.5 MPa, 60 dak’lık kaynaklanma şartlarındaki numunenin EDS analiz sonuçları

Analiz Yeri No	Birleşme Bölgesinden Uzaklık (μm)	% Al	% Cu
1	200	17.95	82.05
2	80	26.23	73.27
3	100	45.78	54.22
4	100	95.50	5.50
5	300	45.28	54.72
6	300	95.43	4.57
7	450	98.65	1.35

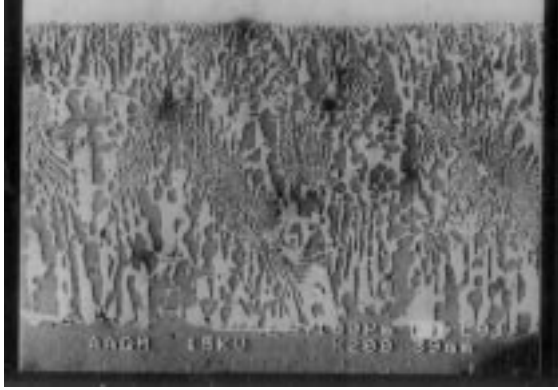


Şekil 4. EDS analiz bölgelerinin şematik gösterimi

EDS analiz sonuçlarından elde edilen birleşme bölgesinin her iki tarafındaki konsantrasyon değişimlerinin ve SEM'den alınan mikroyapı fotoğraflarının (Şekil 6), metalografik inceleme sonucu elde edilen optik mikroskop fotoğrafları ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

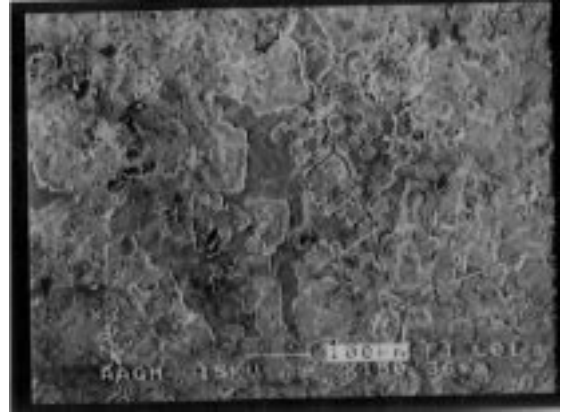


Şekil 5. 560°C, 4.5 MPa, 60 dak deney şartlarında kaynak edilmiş numunenin SEM görüntüsü



Şekil 6. 560°C, 4.5 MPa, 60 dak deney şartlarında kaynak edilmiş numunenin SEM görüntüsü

alüminyum tarafında meydana gelmiştir. Ancak kırılma yüzeyinde yapılan EDS analizinde % 15.62 oranında bakır difüzyonuna rastlanmıştır. Buna dayanarak kırılma yerinin birleşme bölgesi içerisinde olduğunu söylenebilir. Optimum şartlarda kaynaklanmış olan bir çekme numunesi kırılma yüzeyinin SEM fotoğrafı Şekil 7'de görülmektedir.



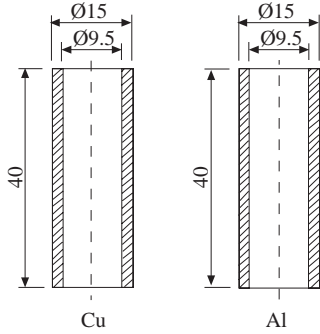
Şekil 7. 560°C, 4.5 MPa, 60 dak deney şartlarında kaynak edilmiş numunenin kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü

Kırılma yüzeyleri

Çekme deney numuneleri çıplak gözle incelendiğinde, kırılmanın hiç bir plastik deformasyon göstermeden düz yüzeyli ve gevrek tarzda olduğu görülmüştür. Buna sıcaklık yükselirken oluşan ara fazların gevrek fazlar olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Makro seviyede incelendiğinde hemen hemen tüm numunelerde kırılma, birleşmenin

Endüstriyel Uygulama

Özellikle dondurucularda, soğuk hava depolarında ve gaz dolun tesislerinde alüminyum borular ve bakır borular çok sık kullanılmaktadır. Bu nedenle boru şeklinde hazırlanmış numunelere de difüzyon kaynağı uygulanmıştır. Bu çalışmada, daha önce tesbit edilmiş olan optimum kaynak şartları altında alüminyum ve bakır borular difüzyon kaynağı ile kaynak edilmişlerdir (Şekil 8). Elde edilen kaynaklı numunelerin ortalama kopma dayanımı 48.12 MPa bulunmuş ve yeterli görülmüştür. Bu borular genellikle sanayide, yaklaşık 9 at. basınca maruz kalmaktadırlar. Difüzyon kaynağı ile birleştirilen alüminyum-bakır boru çifti, bu basınç altında test edilmişlerdir. Test sonucunda alüminyum-bakır boru çiftinde herhangi bir kopma ve kırılma olayı gözlenmemiştir (Çelik, 1996).



Şekil 8. Boru difüzyon kaynağı numuneleri

Sonuçlar

1. Bu çalışmada, alüminyum ve bakır malzeme çiftinin difüzyon kaynağında, optimum olarak sap-

tanılan 560 °C sıcaklık, 4.5 MPa basınç, 60 dak'lık bekleme süresi gibi kaynak şartlarında ve argon gazı ortamında, mekanik özellikler açısından yeterli kaynak bağlantıları elde edilmiştir.

2. Alüminyum ve bakır malzeme çiftinin en çok kullanıldığı boru numunelerde de yapılan deneylerde, daha önce belirlenen optimum kaynak şartlarında difüzyon kaynağı yapılabileceği saptanmıştır. Bu numunelerin birleştirilmelerinde de başarılı sonuçlar alınmıştır.

3. Kaynaklı parçalar, çekme deneyine tabi tutulmuş ve kopmanın gevrek şekilde, alüminyum tarafında olduğu görülmüştür. Mirosertlik ölçümlerinden de görüleceği gibi (Şekil 2) en yüksek sertlik birleşme bölgesinin bakır tarafında görülmesine karşılık kırılmanın alüminyum tarafından olma nedeni, yüksek sıcaklıkta difüzyon sırasında oluşan Al_2Cu , Al_4Cu_9 gibi fazların bakıra göre daha az sünek olan alüminyum içerisinde gevreklik yaratmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Difüzyon sırasında alüminyum tarafına bakırın düşük oranlarda daha uzun mesafelere gittiği, bakır tarafına ise alüminyumun daha yüksek oranda, fakat kısa mesafelere difüze ettiği EDS analizi ile anlaşılmıştır.

Semboller

Al : Alüminyum

Cu : Bakır

P : Kaynak basıncı, (MPa)

t : Kaynak süresi, (dakika)

T : Kaynak sıcaklığı, (°C)

R_a : Yüzey pürüzlülüğü, (μm)

R_a : Kopma dayanımı, (MPa)

EDS : Energy Dispersive Spectrometer

SEM : Scanning Electron Microscope

Kaynaklar

Albom, M. J., "Solid State Bonding", Welding J., June, 1964, p. 491-504

Alper, S. R., Hakdiyer, I., Bigat, T., "Sıma Kimya Analiz Metodları", İstanbul Üniversitesi Yayını, İstanbul, 1971.

Bartle, P. M., "Diffusion Bonding : A look at the Future", Welding J., p.799-804, 1972.

Çelik, S., "Koruyucu gaz altında saf alüminyum ve bakır'ın difüzyon kaynağı şartlarının belirlenmesi", BA.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 1966.

Bargel, H. J., Schulze, G., Çev.: Güleç, Ş., Aran, A., Malzeme Bilgisi II, Tübitak Yayınları, Gebze, 1987.

Felikson, E. I., Finkelstein, M. L., "Diffusion Welding Materials in Liquid Media", Welding Production, 1, (1971), 37-38

Kazakov, N. F., Translated from Russian Kuznetsov, B. V., "Diffusion Bonding of Materials", Pergamon Press, First Ed., 1985.

"Metals Handbook", Eighth Ed., Vol. 7, Metals Park, Ohio, 1972.

TS 138, Çekme Deneyleri (Metalik Malzemeler İçin), TSE, Ankara, 10978.

Tuncel, S., "Yüksek alaşımlı bir takım çeliği ile az alaşımlı bir ıslah çeliğinin difüzyon kaynağı ile

birleştirilmesi üzerine bir deneysel çalışma”, Ph. D. tezi, TÜBİTAK, Gebze Araştırma Merkezi, 1989.
“Welding Handbook”, Eighth Ed., Vol. 2, 1987.
Van Vlack, L. H., Materials Science for Engineers,

1970, 168-185.

Smith, W. F., Principles of Materials Science and Engineering, Second Ed., Mc Grow-Hill Publishing Company, 1990.