



Makale / Research Paper

Ni₇₅Al₂₅ Alaşımı ve 316 L Paslanmaz Çeliğin Bakır Ara Tabaka Kullanılarak Difüzyon Kaynağı

Osman TORUN^{1*}, İbrahim ÇELİKÜREK², Bedri BAKSAN²

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Bölümü, 03200 Afyonkarahisar/TÜRKİYE

²Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Metalürji ve Malzeme Müh. Bölümü Eskişehir/TÜRKİYE
otorun@aku.edu.tr

Received/Geliş: 17.04.2019

Accepted/Kabul: 16.07.2019

Öz: Nikel alüminat Ni₇₅Al₂₅ ve östenitik paslanmaz çelik 316 L malzemeler bakır bir ara tabaka kullanılarak 950 °C de farklı işlem sürelerinde vakum altında difüzyon kaynağı yöntemiyle birleştirilmiştir. Kaynakların ara yüzey mikro yapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Mikroyapı fotoğrafları, kaynak ara yüzeyi boyunca, sürekli ve iyi bir birleşim olduğunu göstermiştir. Kaynak işleminden sonra, birleştirmelerin kesme mukavemetini belirlemek için kaynaklı numunelere kesme testi uygulanmıştır. Test sonuçları, maksimum kesme mukavemetinin 120 dakika sürede kaynaklanmış numunede 225 MPa için olduğunu göstermiştir. Kaynaklı numunelerin ara yüzeyinin ve kırık yüzeylerin kimyasal bileşimleri, enerji dispersive spektroskopisi (EDS) kullanılarak belirlenmiştir. Analiz sonuçları, difüzyonun ana metaller ve bakır ara katmanı arasında gerçekleştiğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Difüzyon kaynağı, Ni₃Al, Paslanmaz çelik

Diffusion Bonding of Ni₇₅Al₂₅ alloy and 316 L stainless steel using a copper interlayer

Abstract: Diffusion bonding between nickel aluminate Ni₇₅Al₂₅ and austenitic stainless steel 316 L using a copper interlayers was carried out at 950° C under vacuum for different hold times. The microstructure of the interface of joints analyzed by scanning electron microscopy (SEM). Micrographs demonstrated that excellent bonding formed continuously along the interface. After welding process, shear tests applied to the bonded samples to determine shear of joints. Test results indicated that the maximum shear strength was 225 MPa for bonded sample treated for 120 min. Chemical compositions of the interface of the bonded samples and the fractured surface were determined using energy dispersive spectroscopy (EDS). Analysis results showed that reaction occurred between the base metals and the copper interlayer.

Keywords: Diffusion bonding, Ni₃Al, Stainless steel

1. Giriş

Spesifik mukavemet, sürünme mukavemeti ve oksidasyon direnci gibi özelliklerde daha iyi performans gösteren metalik malzemelere talebinin artmasıyla, çalışmalar demir alüminatlar, nikel alüminatlar ve titanyum alüminatları içeren intermetalik alüminatlar geliştirilmesine odaklanmıştır [1]. Düzenli intermetalik bileşikler yüksek sıcaklık kararlılığı, yüksek sürünme direnci, yüksek ergime noktası ve düşük yoğunluk potansiyelleri nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamaları için ilgi duyulan malzeme grubu olmuştur. İntermetalikler arasında, alüminatlar yüzeylerin koruyucu oksit filmleri oluşturma kabiliyeti sayesinde iyi oksidasyon direncine sahiptirler [2]. Ni₃Al alüminatlar, mükemmel yüksek sıcaklık dayanımı, düşük yoğunluk, yüksek yorulma direnci ve yüksek sıcaklık

Bu makaleye atıf yapmak için

Torun O, Çelikyürek I, Baksan B, “Ni₇₅Al₂₅ Alaşımı ve 316 L Paslanmaz Çeliğin Bakır Ara Tabaka Kullanılarak Difüzyon Kaynağı”, El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2019, 6(3); 517-524.

How to cite this article

Torun O, Çelikyürek I, Baksan B, “ Diffusion Bonding of Ni₇₅Al₂₅ alloy and 316 L stainless steel using a copper interlayer”, El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2019, 6(3); 517-524.

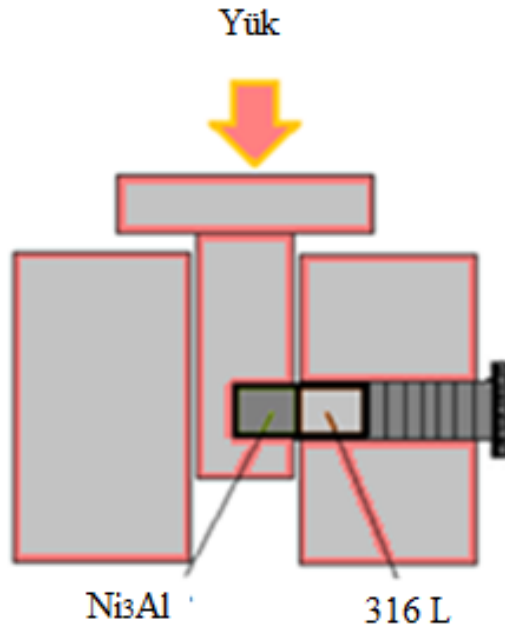
oksidasyon direnci nedeniyle son yıllarda yüksek sıcaklık uygulamaları için üzerinde yoğun olarak çalışılan bir malzeme olmuştur [3]. Kaynaklanabilirlik Ni₃Al alaşımının üretim teknolojileri ile ilgili olarak çok özel bir konudur. Nikel alüminatların kaynaklanma kabiliyetinin geliştirilmesi mühendislik uygulamalarında kullanım fırsatlarını büyük ölçüde artıracak açıktır. Ni₃Al'in kaynaklanması ile ilgili önceki yapılan çalışmalar temel olarak gaz tungsten ark (GTA) ve elektron ışın kaynağı (EB) kullanılarak ergitme kaynaklanabilirliği üzerine odaklanmıştır. Bu çalışmalar Ni₃Al alaşımlarının hem ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ) çatlama, hem de katılaşmaya duyarlı olduğunu ve çatlama hassasiyetinin hem alaşım bileşimine, hem de yapılan kaynak işlemine bağlı olduğunu göstermiştir. Daha sonraki çalışmalarda, ağırlıkça% 0.01-0.25 B içeren alaşımların kaynaklanma davranışları oldukça ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sonuçlar ağırlıkça % 0,02 B içeren alaşımların HAZ ve katılaşma çatlama karşı en dirençli alaşım olduğunu göstermiştir. Diğer çalışmalarda B katkılı Ni₃Al alaşımlarında Cr, Hf ve Zr gibi elementlerin kaynak kabiliyetine etkisi incelenmiştir [4-6]. Östenitik paslanmaz çeliklerin yüksek mukavemet, istisnai tokluğa, iyi süneklik ve şekillendirilebilirliğe sahip olması nedeniyle yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çelikler martenzitik ve ferritik çeliklerden çok daha iyi korozyon direnci sergilerler. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda mükemmel mukavemet ve oksidasyon direncine sahiptirler [7]. Bu çeliklerin ergitme kaynağı genellikle korozyonu azaltan bir sistemin parçası olduğundan birçok durumda kullanım açısından sınırlayıcı bir etkidir. Paslanmaz çeliğin ergitme kaynağında ergiyen bölgede katılaşma çatlama oluşur ve aynı zamanda ısıdan etkilenen bölgede tane irileşmesi meydana gelir. [8]. Difüzyon kaynağı titanyum alaşımları, bakır alaşımları, magnezyum alaşımları, alüminyum alaşımları, çelikler ve metallerarası bileşiklerde başarılı olarak uygulanan bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu teknik, benzer ve farklı malzemelerde distorsiyon ve fazla bir boyut değişimi olmadan malzemelerin birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılır [9-11]. Mühendislik uygulamasında kullanılan malzemelerin çoğu, çok bileşenli sistemi içerir. Yüksek sıcaklığı da kapsayan birçok uygulamada farklı malzemelerin kaynaklı bağlantısıyla elde edilen bir elemanda dış gerilme altındaki farklı malzemeler genellikle kritik bir noktayı işaret eder. Kaynaklı malzemelerin çeşitli noktalarındaki element, faz analizi, mikroyapı ve mekanik özellikler arasındaki ilişkilerin araştırılması, kaynak bağlantılarının uzun süre süreli mekanik özellik ve mikroyapı kararlılığının değerlendirilmesi için uygun bir yöntemi temsil eder. Yüksek sıcaklıklarda kaynak bağlantısı uygulamalarında, mekanik özellikler difüzyondan etkilenen bölgede kimyasal bileşim ve faz dönüşümleri ile ilişkilendirilebilir [12, 13].

Nikel alüminatların katı hal kaynağı ile ilgili literatürde çok az sayıda çalışma vardır. Son zamanlardaki bir çalışmada, Ni₃Al alaşımı ve AISI 304 paslanmaz çelik malzeme bir katı hal ile kaynak birleştirilmiştir [14]. Daha yakın zamanlarda yapılan bir çalışmada, yazar ve arkadaşı Ni₃Al alaşımını kendi kendine nikel ara tabaka kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirmişler ve başarılı sonuçlar almışlardır. Ayrıca başka bir çalışmada, Ni₃Al alaşımı ve 316 L paslanmaz malzemeyi nikel ara tabaka kullanarak difüzyon kaynağı yöntemiyle birleştirmişler ve iyi bir bağlantı elde etmişlerdir [15, 16]. Bu çalışmada, Ni₇₅Al₂₅ alaşımı ve AISI 316 L paslanmaz çelik, 950 ° C'de farklı sürelerde vakum altında birleştirilmiş, mikroyapı çalışmaları yapılmış ve mekanik özellikler incelenmiştir.

2. Deneysel Çalışmalar

Deneylerde kullanılan Ni₇₅Al₂₅ alaşımı, sırasıyla % 99.99 ve % 99.7 saflıkta nikel ve alüminyumdan argon atmosferi altında ark ocağında ergitilmiş ve metal kalıba dökülerek üretilmiştir. AISI 316 L östenitik paslanmaz çelik özel firmadan temin edilmiştir. Döküm Ni₇₅Al₂₅ alaşımı ve 316 L paslanmaz çelik malzemeler, 6 mm uzunluğunda ve 8 mm çapındaki silindirik numuneler olarak difüzyon kaynağı için uygun boyutlarda işlenmiştir. Numunelerin yüzeyleri 600, 800 ve 1200 mesh'lik zımparalarla zımparalanmış ve 1 mikron elmas pasta ile parlatılmıştır. Daha sonra Ni₇₅Al₂₅ alaşımının yüzeyi elektroliz yöntemiyle kalınlığı yaklaşık 10 mikron olacak şekilde bakır ile kaplanmıştır. Kaynak işlemi öncesi yüzeyleri asetonla temizlenmiş ve yüzeyler birbirine temas

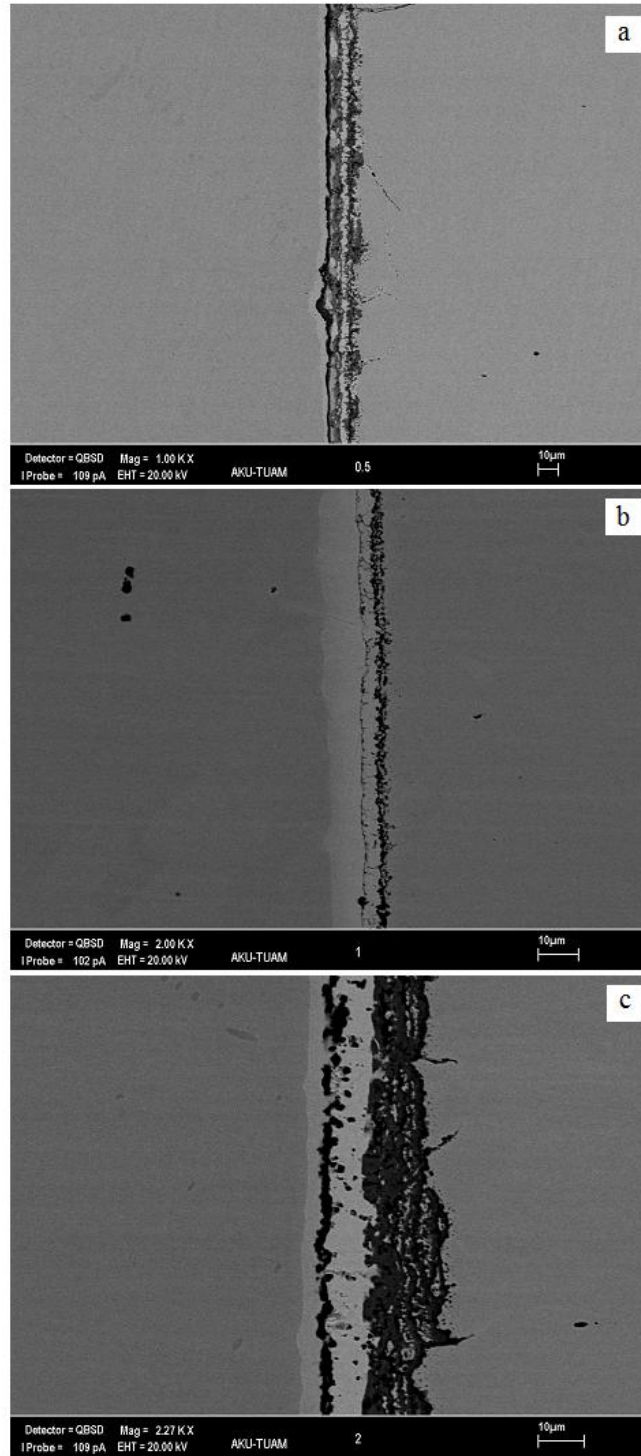
ettirilerek kaynak esnasında kaymayı engellemek için bantlanmıştır. Numuneler kaynak işlemi için difüzyon kaynak fırınına yerleştirilmiştir. Kaynak işlemleri 30, 60 ve 120 dakika sürelerde 950°C 'de ve 5.10^{-2} Pa vakum altında 5 MPa basınç uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak sonrası numuneler oda sıcaklığına kadar fırında soğutulmuştur. Her bir deney koşulu için dört adet deney yapılmıştır. Numunelerden bir tanesi metalografik incelemelerde kullanılmış, diğer üç numune kesme mukavemetini belirlemek amacıyla kesme mukavemeti testlerinde kullanılmıştır. Mikroyapı çalışmalarında kullanılacak numuneler kaynak ara yüzeyine dik olarak kesilmiş, standart metalografik işlemlerle hazırlanmıştır. Taramalı elektron mikroskobunda (SEM) kaynak bölgesi incelenmiş ve kaynak bölgesi kimyasal element analizi yapılmıştır. Ayrıca 100 g yük altında Vickers uç kullanılarak kaynaklı numunelerin mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. Kaynak bölgesi mukavemetini belirlemek amacıyla küçük numuneler için yapılmış bir kesme testi aparatı kullanılmıştır (Şekil 1). Kesme testleri oda sıcaklığında 0,5 mm/dak ilerleme hızında Shimadzu marka çekme-basma cihazında gerçekleştirilmiştir. Kesme testi sonrası, kopan numunelerin kopma yüzeyleri SEM ile incelenmiş ve enerji dağılım analizi (EDS) yapılmıştır.



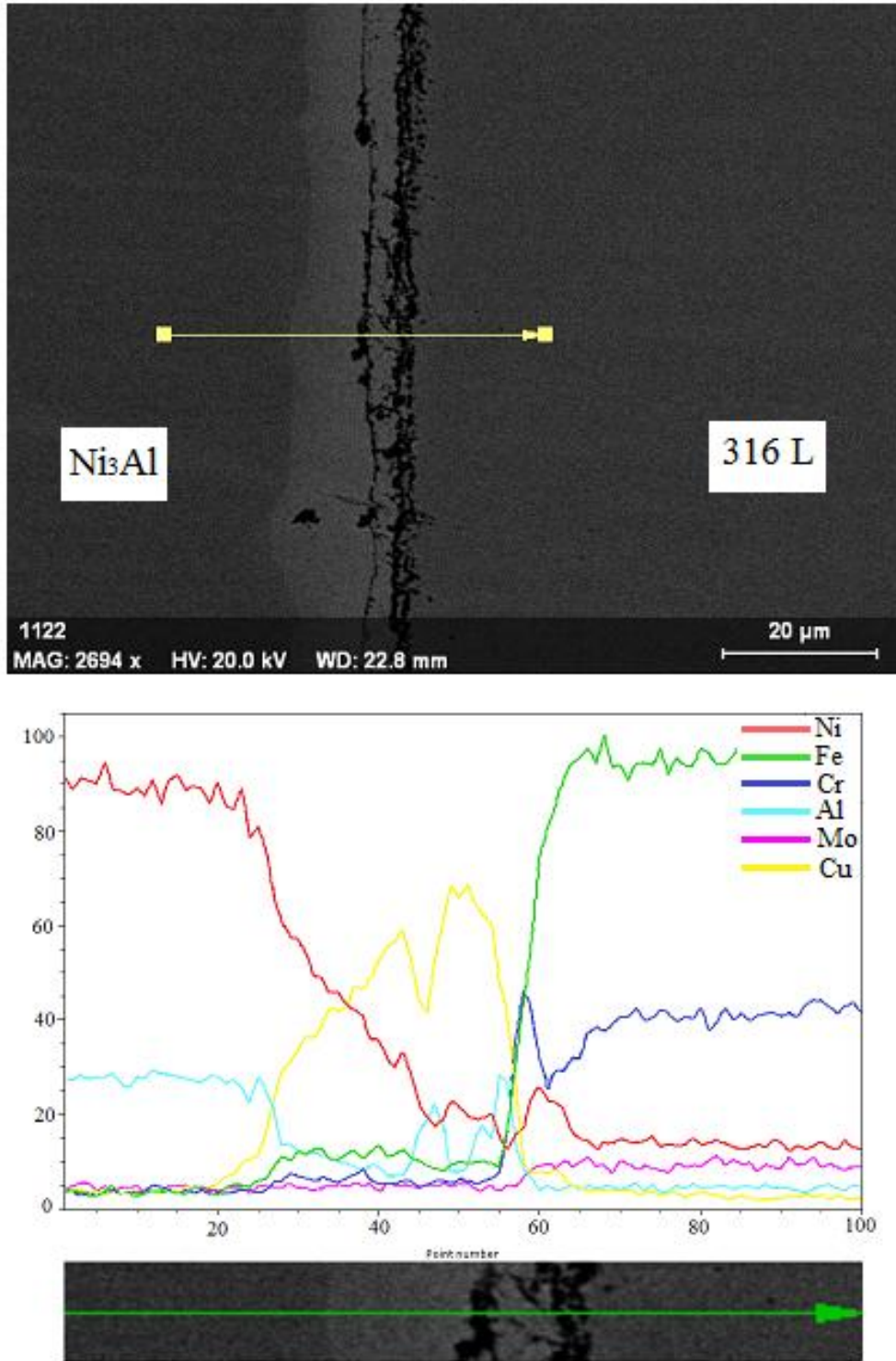
Şekil 1. Kesme testi aparatı.

3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 2 'de 30, 60 ve 120 dakika sürede birleştirilen numunelerin SEM fotoğrafları gösterilmiştir. Fotoğraflardan görüldüğü gibi bütün numuneler boşluksuz, çatlaksız ve oksitsiz olarak birleşmiştir. Kaynak esnasında paslanmaz çelik ve bakır ara tabaka arasında bir difüzyon bölgesi oluşmuştur. Kaynak süresindeki artışla difüzyon bölgesi bir miktar genişlemiştir. 60 dakika sürede birleştirilen numunenin difüzyon bölgesi ve komşu bölgelerden alınan EDS çizgi analizi Şekil 3'te verilmiştir. Analiz sonuçları, bakır ara tabaka ile Ni_3Al ve 316 L paslanmaz çelik arasında atomsal difüzyon olduğunu göstermiştir. Kaynak esnasında Ni_3Al alaşımından nikel ve alüminyum, 316 L paslanmaz çelik malzemeden krom ve demir atomları, Ni_3Al malzemeden Al ne Nikel atomları bakır ara tabakaya difüze olurken, bakır ara tabaka atomları da her iki her malzemeye difüze olmuştur. Kaynaklanmış numunelerin mikro sertlik değerleri kaynak merkezinden her iki matris malzemeye doğru ölçülmüştür.

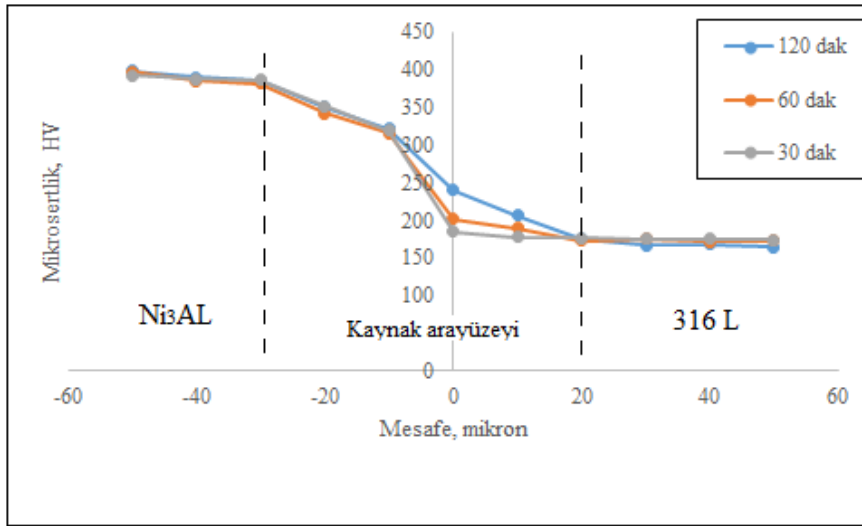


Şekil 2. 30, 60, 120 dakika sũre birleştirilmiş numuneler. a) 30 dak. b) 60 dak c) 120 dak.



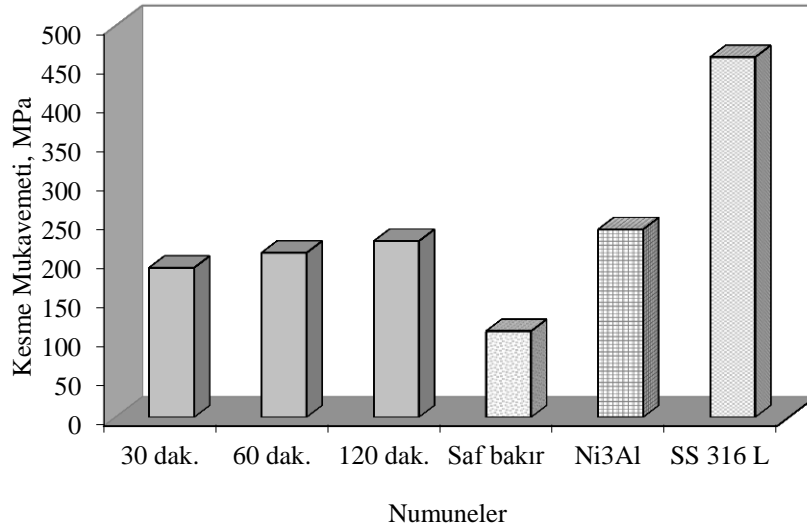
Şekil 3.. 60 dakika sürede birleştirilen numunede EDS çizgi analizi.

Sertlik ölçüm sonuçlarına göre, tüm kaynak süreleri için numunelerin sertlik profilleri benzerdir. (Şekil 4). 30 dakika sürede kaynaklanan numunenin difüzyon bölgesi sertliği $185 \text{ HV}_{0,1}$ iken, 120 dakikada kaynaklanan numunenin difüzyon bölgesi sertliği $240 \text{ HV}_{0,1}$ olarak belirlenmiştir. Tavlanmış bakırın sertliği ölçülmüş ve $110 \text{ HV}_{0,1}$ değeri bulunmuştur.



Şekil 4. 30, 60, 120 dak sürede birleştirilen numunelerin sertlik değerleri

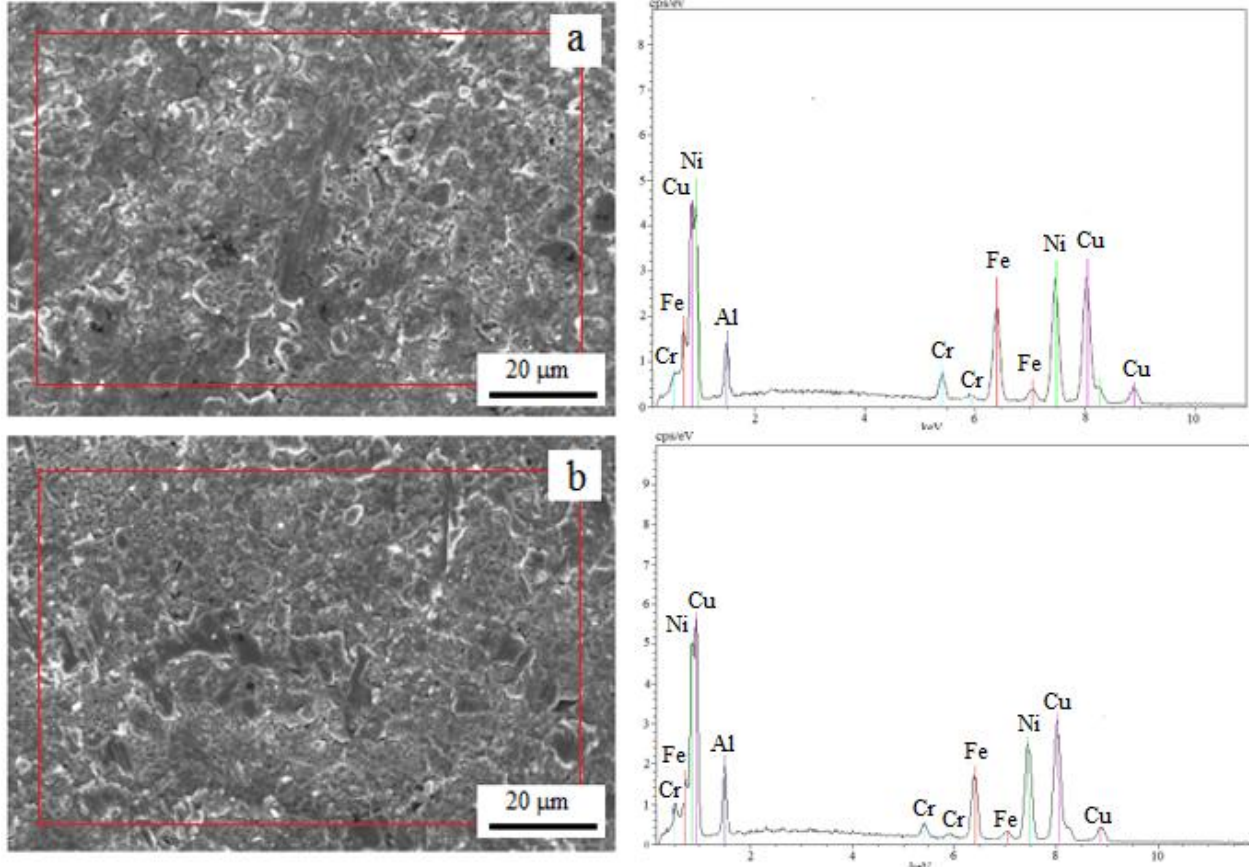
Ara tabaka olarak bakırın sertliği 110 HV_{0,1} olduğu göz önüne alınırsa, kaynak arayüzeyinde sertlik önemli bir miktarda artmıştır. Bu artışın bakır ara tabakaya difüze olan Cr, Fe, Ni ve Al atomlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle, Ni₃Al tarafında bakır ve nikel atomlarının birbirlerine doğru difüzyonunun daha fazla miktarda oluşu, bu bölgedeki sertliğin bir miktar daha fazla artmasına neden olmuştur. Kaynaklı numunelerin kesme mukavemetini belirlemek için numuneler kaynak bölgesinden kırılacak şekilde kesme aparatına yerleştirilmiş (Şekil 1) ve kaynak bölgesi mukavemeti belirlenmiştir. Farklı sürelerde kaynaklanmış bağlantıların, 900 °C 'de tavllanmış Ni₃Al alaşımının, 316 L paslanmaz çelik malzemenin ve saf bakırın kesme mukavemeti değerleri Şekil 5.' te verilmiştir.



Şekil 5. 30, 60, 120 dakika sürelerde birleştirilen ve orijinal numunelerin kesme mukavemeti değerleri.

Şekil 5'den görüldüğü gibi, kaynak süresindeki artışla bağlantıların kesme mukavemeti artmış ve en yüksek kesme mukavemeti 120 dakika sürede kaynaklanan numunede 225 MPa olarak elde edilmiştir. Bu değer saf bakırın kesme mukavemetinden bir hayli yüksektir ve Ni₃Al alaşımının kesme mukavemeti değerine oldukça yakındır. Kaynak ara yüzeyindeki süredeki artışa bağlı olarak atomsal difüzyon artmış ve bakır ara tabakaya difüze olan atom miktarını arttırmıştır. Ayrıca bakır ara tabakadan her iki matris tarafına difüze olan bakır atomlarının miktarını da arttırmıştır. Bu

durum süredeki artışla, mukavemetin artmasına neden olmuştur. Ayrıca kaynak ara yüzeyinden oluşan fazların mukavemetinin saf bakırdan daha yüksek olması nedeniyle, kaynaklı numunelerin mukavemeti saf bakıra göre daha yüksek çıkmıştır. 120 dakika süre kaynaklanmış numunenin kırık yüzey SEM fotoğrafları ve kırık yüzeylerden alınan EDS analizleri Şekil 6 'da gösterilmiştir. Analiz sonuçları kırık yüzeylerde Ni, Cu, Al ve Fe atomlarının varlığını göstermiştir. Bu bulgular kaynak ara yüzeyinden alınan EDS analiz sonuçları ile uyumludur. Ayrıca, yüzeyde belirlenen bu elementler kesme testi esnasında kopmaların difüzyon bölgesi civarından olduğunu göstermektedir. Tüm kaynak süreleri için benzer sonuçlar gözlenmiştir.



Şekil 6. 120 dakika süre birleştirilen numunenin kopma yüzeyi EDS alan analizi. a) Ni₃Al tarafı
b) 316 L paslanmaz çelik tarafı

4. Sonuçlar

1. Tüm deney koşulları için gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde boşluksuz, çatlaksız ve oksitsiz bir kaynak ara yüzeyi gözlenmiş ve başarılı bir birleşme gerçekleşmiştir.
2. Matris ve kaynak bölgesi mikro sertlik ölçümleri tüm süreler için benzer bir sertlik profili olduğunu göstermiştir. Süredeki artışla ara tabakaya ve difüzyon bölgesine daha fazla miktarda difüze olan atomlar nedeniyle, bu bölgelerde sertlik değerleri süredeki artışla bir miktar artmıştır.
3. Kaynaklı numunelerin kesme mukavemetini belirlemek için yapılan kesme testi esnasında kopmaların difüzyon bölgesi civarından olduğu yapılan kırık yüzey analizlerden anlaşılmıştır.
4. Kaynak süresindeki artışla, ara tabaka ve difüzyon bölgesine daha fazla miktarda atom difüze olmuş ve bu bölgede oluşan fazların mukavemetine katkı sağlamış bunun sonucunda kaynak süresindeki artışla, birleştirilen numunelerin kesme mukavemeti artmıştır.

Kaynaklar

- [1]. Shiue, R. K., Wu, S. K., Lee, Y. L., Transient microstructural evolution of infrared brazed Fe₃Al intermetallics using aluminum foil *Intermetallics*, 2005, 13, 818-826.
- [2]. Pank, D. R., Nathal, M. V., Koss, D. A., In: *High Temperature Ordered Intermetallic Alloys III*. Eds.: Liu, C. T., Taub, A. I., Stoloff, N. S., Koch, C. C. Pittsburgh, Pennsylvania, Materials Research Society 1988, 561.
- [3]. Liu, C. T., Stiegler, J. O., Froes, F. H. (SAM), *Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials Section. ASM Handbook. Materials Park*, 1999, E-Publishing Inc., 1.
- [4]. Santella, M. L.: In: *Proceedings of Materials Week '96 on Nickel and Iron Aluminides*. Eds.: Deevi, S. C, Sikka, V. S, Maziasz, P. J., Cahn, R. W. Materials Park, ASM International 1997, 321.
- [5]. David, S. A., Jemian, W. A., Liu, C. T., Horton, J. A., *Welding and Weldability of Nickel-Iron Aluminides*, *Weld. J.*, 1985, 64, 22-29.
- [6]. Santella, M. L., Horton, J. A., David, S. A., *Weld. J.*, 1988, 67, 63.
- [7]. *ASM Handbook: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. Materials Park, E-Publishing Inc. 1999.
- [8]. Kurt, B., The interface morphology of diffusion bonded dissimilar stainless steel and medium carbon steel couples, *J. of Mater. Proc. Technol.*, 2007, 190-138.
- [9]. Ghosh, M., Bhanumurthy, K., Kale G. B., Krishnan, J., and Chatterjee, S., Diffusion bonding of titanium to 304 stainless steel, *Journal of Nuclear Materials*, 2003, 322, 235-241.
- [10]. Torun O, Baksan B, Celikyürek I, Gürler R. Diffusion bonding of iron aluminide Fe₇₂Al₂₈ using an iron interlayer, *Intermetallics*, 2005, 13, 801–804.
- [11]. Pan, L., Luzzi D.E., A study on diffusion couples of Ti and polysynthetically twinned (PST) Ti–Al: I. Microstructure characterization, *Intermetallics*, 2006, 14, 61-70.
- [12]. M Ghosh, S Chatterjee., Effect of interface microstructure on the bond strength of the diffusion welded joints between titanium and stainless steel. *Mater Charact*, 2005, 54, 327-337.
- [13]. Sopoušek J., Buršík J., Brož P., Experimental and theoretical study of redistribution of alloying elements in Ni-based weld joints at high temperatures *Intermetallics*, 2005,13, 872-878
- [14]. Yıldırım S., Kelestemur M.H., A study on the solid-state welding of boron-doped Ni₃Al–AISI 304 stainless steel couple., *Materials Letters*, 2007, 59, 10, 1134-1137.
- [15]. Torun, O., Çelikyürek İ., Diffusion bonding of nickel aluminide Ni₇₅Al₂₅ using a pure nickel interlayer, *Intermetallics*, 2008, 16, 406-409.