



Makale / Research Paper

AISI 316L Paslanmaz Çelik ile Fe60Al40 Metaller arası Bileşiğin Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmesi

İbrahim ÇELİKÜREK^{1*}, Osman TORUN², Bedri BAKSAN¹, Akın ÖZCAN¹

^{1,*}Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 26480 Eskişehir/TÜRKİYE
cibrahim@ogu.edu.tr

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 03200 Afyonkarahisar/TÜRKİYE

Received/Geliş: 10.10.2019

Accepted/Kabul: 05.12.2019

Öz: Bu çalışmada AISI 316L paslanmaz çelik ile FeAl esaslı metaller arası bileşiğin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliği araştırılmıştır. FeAl metaller arası bileşiği vakumlu ark ergitme ocağında üretilmiş, AISI 316L paslanmaz çeliği ise piyasadan temin edilmiştir. Sürtünme kaynağı işlemi 1000 d/d sürtünme hızında, 150 MPa sürtünme basıncı altında, 6, 9 ve 12 sn sürtünme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Kaynak arayüzünün mukavemeti kesme testi ile ölçülmüştür. En yüksek mukavemet değeri 12sn süreyle kaynatılan numunede 281 MPa olarak bulunmuştur. Kaynak bölgesindeki sertlik değişimi bir malzemedeki diğerine kadar mikrosertlik ölçümüyle belirlenmiştir. Kaynak arayüzeyi Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile incelenmiş, kaynak bölgesinde bir hat boyunca yapılan bileşim analizinde alaşım elementlerinin miktarlarının değiştiği görülmüştür. Bu ise kaynak arayüzeyinde her iki malzemeyi oluşturan elementlerin difüze olduğunu açığa çıkarmıştır.

Anahtar kelimeler: FeAl esaslı metaller arası bileşikler; sürtünme kaynağı; kesme mukavemeti; sertlik.

Bonding of AISI 316 L Stainless Steel and Fe60Al40 Intermetallic Compound with Friction Welding Process

Abstract: In this study, the bonding of AISI 316L stainless steel and FeAl based intermetallic compound with friction welding was investigated. The FeAl intermetallic compound was produced in a vacuum arc melting furnace, while AISI 316L stainless steel was supplied from the market. The friction welding process was carried out at a friction speed of 1000 rpm, under a friction pressure of 150 MPa, for friction times of 6, 9 and 12 seconds. The strength of the welding interface was measured by shear test. The highest strength value was found to be as 281 MPa in the sample welded for 12 seconds. The hardness deviation in the welding zone was determined by micro hardness measurement from one material to another one. The welding interface was examined by Scanning Electron Microscopy (SEM) and the composition analysis along a line in the welding region showed that the amount of alloying elements changed. This revealed that the elements of both materials are diffused each other at the welding interface.

Keywords: FeAl based intermetallics; friction welding; shear strength; hardness.

1. Giriş

Düzenli metaller arası bileşikler belirli bir kritik sıcaklığın altında metalik malzemelerin eşsiz bir sınıfını oluştururlar. [1,2]. Metaller arası bileşikler hem kullanım sıcaklığı hem de mekanik özellikler açısından metaller ile seramikler arasındaki boşluğu doldurabilecek özelliklere sahiptir.

Bu makaleye atıf yapmak için

Çelikyürek, İ., Torun, O., Baksan, B., Özcan, A., "AISI 316L Paslanmaz Çelik ile Fe60Al40 Metaller arası Bileşiğin Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilmesi" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2020, 7(1); 267-274.

How to cite this article

Çelikyürek, İ., Torun, O., Baksan, B., Özcan, A., "Bonding of AISI 316 L Stainless Steel and Fe60Al40 Intermetallic Compound with Friction Welding Process" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2020, 7(1); 267-274.

Metaller arası bileşikler atomlar arasında yüksek bağlanma mukavemeti ve hala bağlanmanın metalik bağlanma olması nedeniyle çatlak oluşumuna karşı seramiklere nazaran daha düşük hassasiyet gösterirler [3,4].

Bu malzeme grubu içinde Nikel, Demir ve Titanyum alüminatlar yüksek sıcaklık uygulamaları için oldukça caziptirler. Son üççeyrek asırda bu malzemelerin özelliklerinin anlaşılması için çalışmalar yapılmaktadır. Al esaslı ve diğer düzenli metaller arası bileşiklerin en büyük dezavantajı oda sıcaklığında sünekliklerinin düşük olması ve gevrek kırılma sergilemesidir.

Kaynaklanabilirlik Fe_3Al alaşımının üretim teknolojileriyle ilgili özel bir konudur [5]. Aynı veya farklı malzemelerin birleştirilmesinde ergitmenin olduğu ve katı halde gerçekleşen kaynak tekniklerinin kullanıldığı bilinmektedir [6-8]. Fe_3Al alaşımının kaynağına yönelik çalışmalar çoğunlukla gaz altı Tungsten arkı (GTAW) ve elektron ışın kaynağı (EBW) gibi füzyon (ergitmeli) kaynak tekniklerinde yoğunlaşmıştır. Bu çalışmalar çatlak hassasiyetinin alaşım bileşimine bağlı olduğunu göstermektedir. Krom, Niyobyum ve Karbon ile modifiye edilen Fe_3Al alaşımları iyi kaynaklanabilirlik sergilemişlerdir. Bu alaşımda Bor ve Zirkonyum ilavesi sıcak çatlamaya neden olmuştur [9].

Alüminat esaslı metaller arası bileşiklerin oda sıcaklığındaki düşük sünekliklerinin ortamdaki nemin neden olduğu hidrojen gevrekliğinden kaynaklandığı bilinmektedir. Chiang vd. farklı alaşım elementi ve mikro yapıların mekanik özelliklere ve kaynaklanabilirliğe olan etkilerini özellikle nemli ortamlardaki kırılma üzerinde odaklanarak araştırmışlardır [10]. Ma vd. Fe_3Al alaşımının performans ve kaynaklanabilirliğinin B2-DO3 dönüşümünden çok fazla etkilendiğini raporlamışlardır [11]. Yakın zamanda yapılan bir çalışmada, Kratochvil vd. sertleştirilmiş bir yapıya sahip olan Fe_3Al tipi alaşımın kaynaklanabilirliğini araştırmıştır [12]. Diğer taraftan metaller arası bileşiklerin kendisi ve başka malzemeler ile difüzyon kaynağı yöntemiyle birleştirilmesine yönelik çalışmalar da yapılmıştır [18-23].

Sürtünme kaynağı polimerik malzemeler de dahil olmak üzere farklı malzemelerin kaynaklanabildiği katı-hal veya tam ergimenin oluşmadığı bir birleştirme tekniğidir [11-16]. Sürtünme kaynağındaki en önemli kaynak parametreleri sürtünme hızı, süresi ve basıncı ile dövme basınç ve süresidir. Fe_3Al tipi alaşımların sürtünme kaynağı hakkında çok az çalışma vardır. Sketchley vd. oksit dağılımı ile mukavemetlendirilmiş Fe_3Al esaslı alaşımın sürtünme kaynağını araştırmıştır [16].

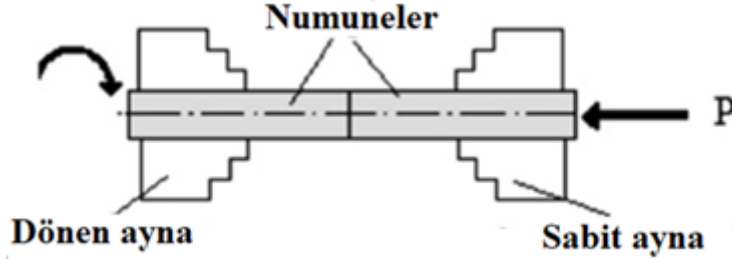
Bu çalışmada FeAl esaslı Fe60Al40 döküm alaşımı sürtünme kaynağı prosesi ile birleştirilmiş ve kaynak parametrelerinin kaynak arayüzeyindeki mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi açığa çıkarılmıştır.

2. Deneysel Çalışmalar

Fe60Al40 alaşımı sırasıyla %99,99 ve 99,7 saflıktaki Demir ve Alüminyumun Argon gazı atmosferinde arkla ergitilmesi suretiyle hazırlanmıştır. Döküm alaşımı 1000 °C sıcaklıkta 96 saat süreyle tavlansın ve fırında soğutulmuştur. Numuneler 8 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda çubuklar şeklinde işlenmiştir. Diğer malzeme olan AISI 316L paslanmaz çeliği ise piyasadan temin edilmiştir.

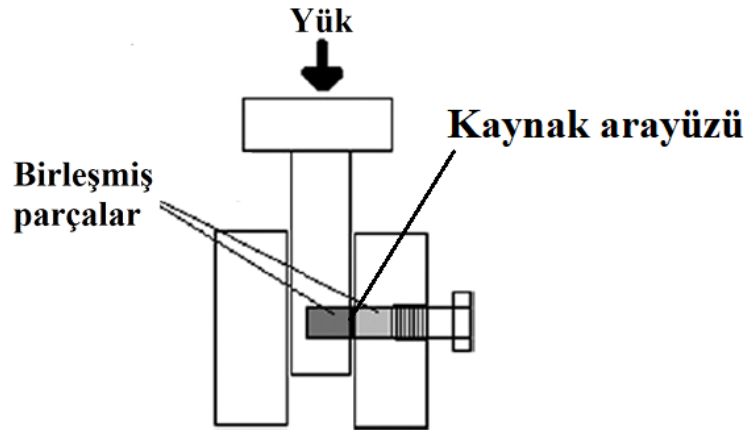
Sürtünme kaynağı işlemleri, sürekli tahrikli sürtünme kaynağı cihazında, 1000 d/d sürtünme hızında ve 150 MPa sürtünme basıncında, 3, 6 ve 9 sn sürtünme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Kaynak işleminin hemen ardından 150 MPa eksenel yığıma basıncı 10 sn süreyle uygulanmıştır. Sürtünme kaynak işleminin şematik görünümü Şekil 1'de verilmiştir. Kaynaklanmış numunelerden kaynak ara yüzeyine dik kesit alınmıştır. Kaynak ara yüzey kesitleri metalografik olarak hazırlanmış ve 30

ml H₂O, 30 ml HNO₃, 20 ml HCl ve 20 ml HF karışımından oluşan bir çözelti ile dağlanmış. Kaynak ara yüzey mikroyapıları optik ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiştir. Kaynak bölgesinin ve matris malzemelerinin kimyasal bileşimleri enerji dağılım spektroskopisi (EDS) ile tespit edilmiştir.



Şekil 1. Sürekli tahrikli sürtünme cihazının şematik görünümü.

Kaynak bölgesi boyunca sertlik değişimi bir matrizen diğerine kadar Vickers ucu kullanılarak 100 gf yükü 15 sn süreyle uygulamak suretiyle mikrosertlik ölçümü şeklinde belirlenmiştir. Kaynak bölgesinin mukavemetini belirlemek için özel olarak tasarlanmış bir kesme testi aparatı (Şekil 2) kullanılmıştır. Kesme-makaslama testleri Shimadzu AG-IS-250 üniversal test cihazında, oda sıcaklığında 10 mm/d çene hızıyla gerçekleştirilmiştir. Kesme testinden sonra numunelerin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobunda incelenmiştir.

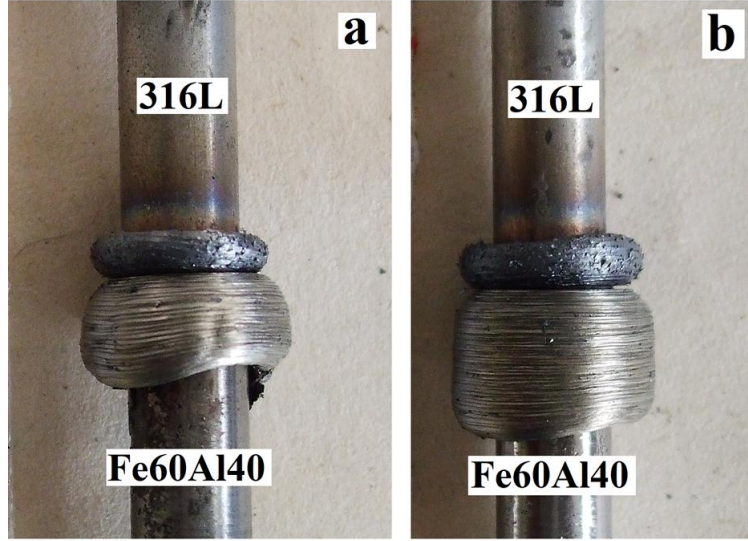


Şekil 2. Kesme-makaslama test aparatı.

3. Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

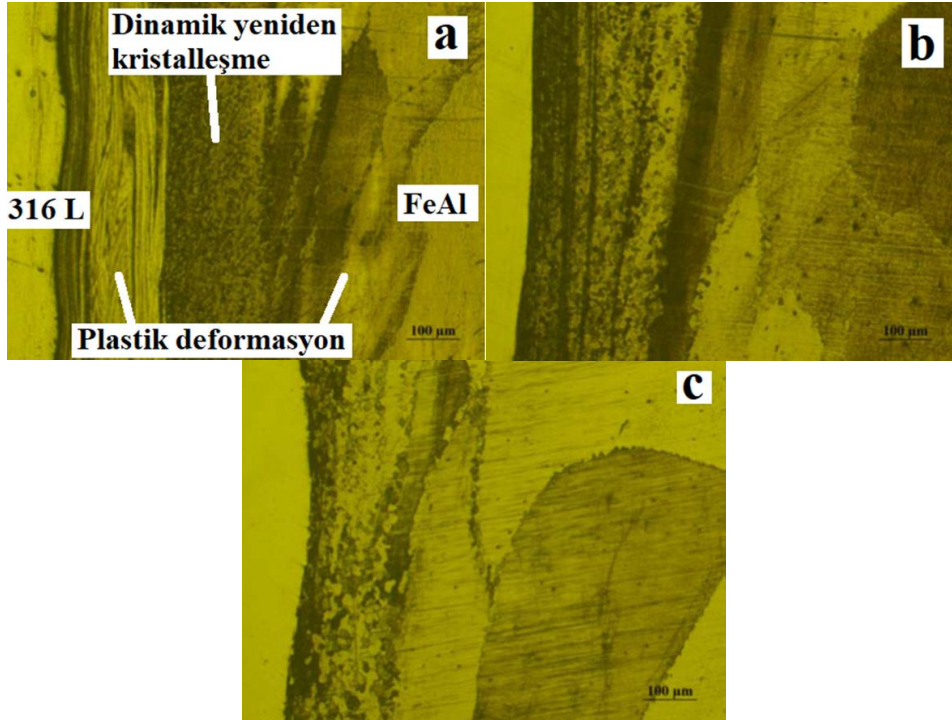
3.1. Mikroyapı

Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş numunelerin makro fotoğrafları şekil 3'de verilmiştir. Tüm numunelerde kaynak sırasında plastik deformasyon ile meydana gelen çapak (flash) oluşumu gözlenmiştir. Çapak oluşumu numune boyundaki kısılmayı (burn off) artırmaktadır. Numune boyundaki toplam kısılma kaynak süresine bağlı olarak 6, 9 ve 12 sn için sırasıyla 4,8, 9,8 ve 14,9 mm olarak ölçülmüştür. Bu şartlarda yapılan kaynak işleminde Fe60Al40 alaşımının mukavemeti 316L paslanmaz çelikten daha düşüktür. Bu yüzden Fe60Al40 tarafında oluşan çapak ve boydaki kısılma miktarı daha fazladır.



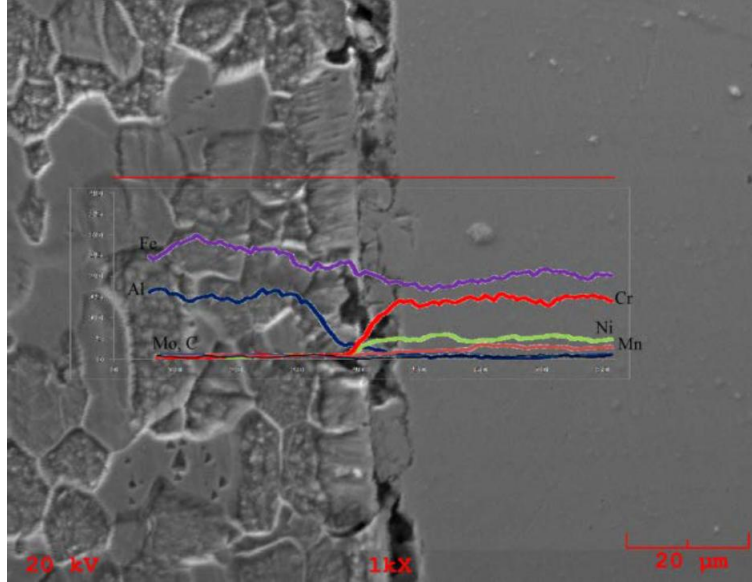
Şekil 3. a) 9 sn ve b)12 sn süreyle kaynaklanmış numunelerin makro fotoğrafları.

Şekil 4'de 6, 9 ve 12 sn süreyle kaynaklanmış numunelerin optik mikroyapıları görülmektedir. Mikrograflardan görüldüğü gibi, tüm kaynak şartlarında kaynak arayüzeyinde herhangi bir çatlak, porozite veya oksit oluşmaksızın düzgün bir birleşme sağlanmıştır. Kaynaklanan numunelerin tümünde iki ana bölge görülmektedir. Bunlar; tamamen dinamik yeniden kristalleşmiş bölge ve sadece plastik deformasyona uğramış bölgedir. Dinamik yeniden kristalleşme bölgesindeki tane boyutu oldukça küçüktür. Kaynak süresi arttıkça malzemelerdeki plastik deformasyon artmaktadır. Çünkü sürtünme süresinin artması kaynak arayüzeyindeki ısı girdisini artırmakta, artan ısıyla malzemenin mukavemeti düşerken sünekliği artmaktadır. Bu mikrograflar dinamik yeniden kristalleşme bölgesinin genişliğinin artan sürtünme süresiyle pek değişmediğini de göstermektedir. İlaveten oda sıcaklığında gevrek karakter gösteren Fe60Al40 bileşiğinin yüksek sıcaklıklarda sünek davrandığını da göstermektedir.



Şekil 4. Kaynaklanan numunelerin optik mikro yapıları. a) 6, b) 9 ve c)12 sn.

Şekil 5’de kaynak arayüzeyinin SEM mikro yapı görüntüsü ve AISI 316L tarafından dinamik yeniden kristalleşme bölgesine kadar olan enerji dağılım X-ışınları (EDXS) analizi (hat taraması) görülmektedir. Bu analiz dinamik yeniden kristalleşme bölgesinde yeniden kristalleşen tarafın FeAl tarafı olduğunu göstermektedir. Bu şartlarda yapılan sürtünme kaynağı işleminde arayüzeyde çıkılan sıcaklık Fe60Al40 alaşımının plastik deformasyonu ve yeniden kristalleşmesi için yeterliyken 316L için ise plastik deformasyonun oluşması fakat yeniden kristalleşmenin gerçekleşmemesi olarak sonuçlanmıştır.

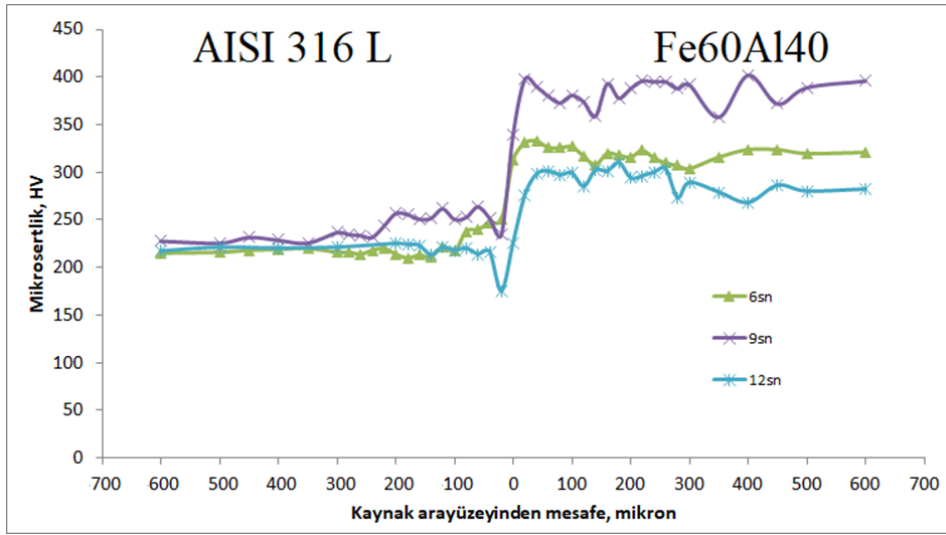


Şekil 5. 12 sn süreyle kaynaklanan numunenin SEM görüntüsü ve hat taraması EDXS analizi.

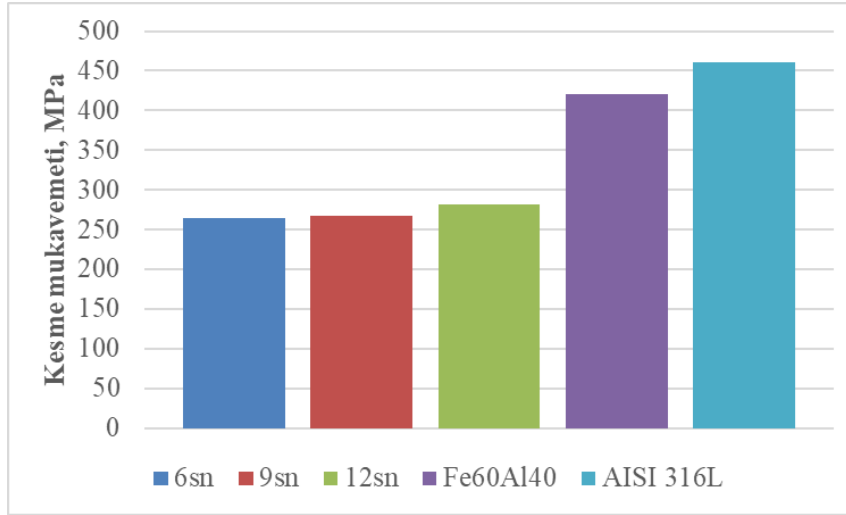
3. 2. Mekanik özellikler

Kaynak merkezinden itibaren her iki matrise doğru mikrosertlik değişimi şekil 6’da görülmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre tüm kaynak sürelerinde sertlik profilleri benzerdir. Mikro sertlik dağılımından da anlaşılacağı gibi kaynak ara yüzeyinde dinamik yeniden kristalleşme bölgesinin sertliği her iki malzemenin arasındadır ve sertlik değişiminde yumuşak bir geçiş mevcuttur. Bu malzemelerin kaynağında dinamik yeniden kristalleşme bölgesinde tane boyutunun küçülmesi sertliği çok fazla artırmamıştır. Bu bulgular yeniden kristalleşme bölgesi sınırında 316L paslanmaz çeliği tarafında düşük işlem şartlarında yeniden kristalleşmeden kalan deforme olmuş bölgenin bulunduğunu göstermektedir ve mikro yapı ile uyumludur. Daha şiddetli işlem şartları (sürtünme süresinin artması) kaynak ara yüzeyine ısı girdisini artırır, bu da yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerine çıkılmasını sağlar. Sonuç olarak ısı girdisinin fazla olduğu işlem şartlarında 316L tarafında sadece plastik deforme olmuş bölge kalmaz. Mikro yapı fotoğrafları ve mikro sertlik ölçümleri de bunu göstermektedir.

Kaynak ara yüzeyinin mukavemetini tam olarak belirleyebilmek için Şekil 2’de gösterilen kesme-makaslama aparatı kullanılmıştır. [18]. Kesme mukavemetleri belirlenirken aparat içine yerleştirilen numunelere basma yükü uygulanmış, kesmenin gerçekleştiği yük değeri kesit alanına bölünerek kesme mukavemeti belirlenmiştir. Kaynaklanan numunelerle birlikte 316L paslanmaz çeliğin ve Fe60Al40 alaşımının kesme mukavemetleri Şekil 7’de görülmektedir. Tüm işlem sürelerinde kaynak arayüzeyinin mukavemeti ana malzemelerin kesme mukavemetinden daha düşüktür ve sürtünme süresi arttıkça kaynak ara yüzey mukavemeti de artmaktadır. Sürtünme süresinin artmasıyla kaynak arayüzeyinde üretilen ısı girdisi artmakta bu da kaynak arayüzey mukavemetini artırmaktadır.

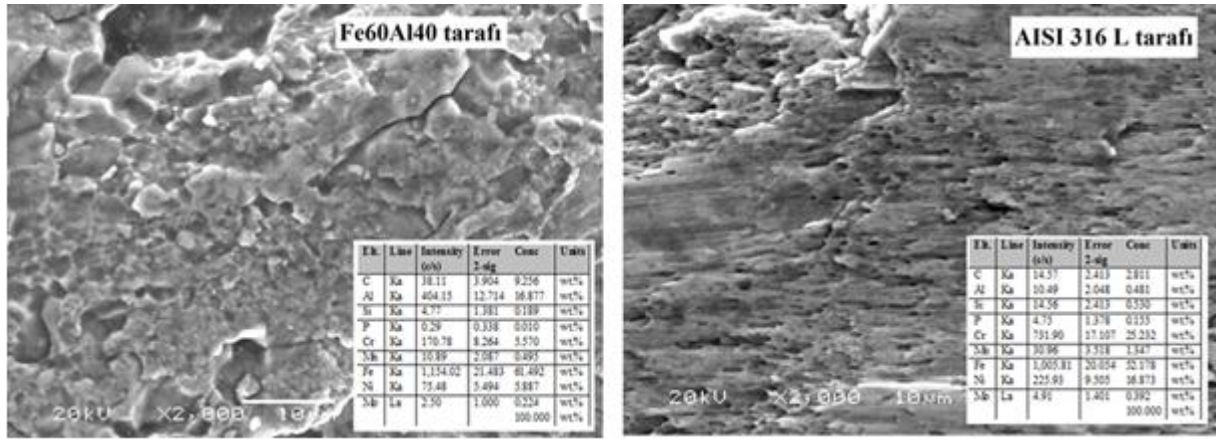


Şekil 6. Kaynak bölgesindeki sertlik değişimi.



Şekil 7. Kaynak bölgelerinin ve ana malzemelerin kesme mukavemetleri.

Kaynak ara yüzeyindeki mukavemet değerlerindeki değişim işlem sırasında üretilen ısı miktarıyla ilgili olabildiği gibi birleştirilen malzemeler farklı malzemeler olduğundan ara yüzeydeki faz değişimleri ile de ilgili olabilir. Bunu belirlemek için kesme testinden sonra her iki yüzeyde SEM EDXS analizi yapılmıştır. Şekil 8'de kesme testinden sonraki kırılma ara yüzeylerinin SEM mikro yapı fotoğrafları ve bu yüzeylerden ölçülen EDXS analizi sonuçları gösterilmektedir. SEM mikro yapı fotoğraflarından kırılmanın sünek karakterde olduğu görülmektedir. SEM-EDXS ölçümleri her ne kadar yarı kantitatif bir analiz olsa da analiz sonuçları mevcut elementlerin varlığı hakkında bir fikir verebilir. Yapılan EDXS analiz sonuçlarına göre kırılmanın kaynak ara yüzeyinden olduğu söylenebilir. Kırılarak ayrılan matrislerin kırılma yüzeyi analizlerinde kendi matrislerine ilaveten diğer matrise ait elementlerin de bulunduğunu göstermektedir. Bu durum kırılmanın tam birleşme bölgesinden olduğunu göstermektedir. İlaveten, Fe60Al40 tarafına paslanmaz çelikteki Cr ve Ni difüzyonunun paslanmaz çeliğe Al difüzyonundan daha fazla olduğu da görülmektedir. Bu sonuçlar çizgi analizi sonuçlarıyla örtüşmektedir.



Şekil 8. 12 sn süreyle kaynağı yapılan numunenin kırılma yüzeyi SEM görüntüsü ve EDXS analizi.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada FeAl esaslı metaller arası bileşik AISI 316L paslanmaz çeliği ile sürtünme kaynağı tekniği kullanılarak başarıyla birleştirilebilmiştir. Mikro yapısal incelemeler kaynak arayüzeyinde iki ana bölgenin oluştuğunu açığa çıkarmıştır. Bunlar; sadece deformasyona uğramış bölge ve deformasyon sonrası yeniden kristalleşmenin olduğu bölgedir. Kaynak arayüzeyinde boşluk ve çatlak içermeyen düzgün bir bağlanma olmuştur. Birleştirilen malzemelerin kaynak ara yüzeyi mukavemetleri birbirine yakın olsa da sürtünme süresinin artması arayüzey mukavemetinin yavaşça artmasına neden olmuştur. Arayüzeyde yeniden kristalleşme sonucu oluşan yapının tane boyutu ana malzemenin tane boyutundan küçük olsa da tane boyutundaki değişim sertlik ve mukavemeti pek fazla etkilememiştir.

Bilgilendirme: Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunca 201115012 nolu proje ile desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Liu C.T., Stiegler J.O., "Metals Handbook", 10. ed., 2, Ohio, USA, 913-942.
- [2] Çelikyürek İ., "Demir Aluminatların Borlanması ve Aşınma Özelliklerinin Belirlenmesi", Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Ens. Doktora tezi, 2007.
- [3] Liu C.T., Kumar K.S., "Ordered Intermetallic Alloys I. Nickel and Iron Aluminides", J. O. M., 1993, 38.
- [4] Froes F.H., Suryanarayana C., Eliezer D., "Synthesizing process and modeling advanced materials", J. Mat. Sci., 1992, 27, 5113.
- [5] Santella ML. In: Deeevi SC, Sikka VS, Maziasz PJ, Cahn RW, editors. "Proceedings of materials Week'96 on nickel and iron aluminides: processing, properties, and applications", Ohio, 7-9 October 1996. USA: ASM International; 1997. 321-335.
- [6] Aslan M., Kalyoncu, M., "Kaynak Prosesi Sonucu Oluşan Kalıntı Gerilmelere Kaynak Teli Isıl Genleşme Katsayısının Etkisi", El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2017, 4(3), 568-577.
- [7] Okuyan A., Uzun H., "Boru İle Lamanın Robot Ark Kaynak Tekniğiyle Birleştirilmesinde Optimum Kaynak Parametrelerinin Belirlenmesi", El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2017, 4(2), 297-307.
- [8] Kahraman F., Kasman Ş., Kahraman A., Tunuslu O., "Östenitik Paslanmaz Çelikler İle Takım Çeliklerinin Birbirleri İle Kaynağında Oluşan Kaynak Bölgesinin İncelenmesi", El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2017, 4(1), 64-71.
- [9] David S.A., Zacharia David S.A, Zacharia T., "Weldability of Fe₃Al-type aluminide",

- T.Weld J., 1993, 72(5), 201-207.
- [10] Chiang C.C., Wang S.H., Chen J.S., Chu J.P., Hsu Y.F., “Bending embrittlement of as-welded FeAl alloys”, *Intermetallics*, 2007, 15, 564-570.
- [11] Ma H , L.Y., Gerasimov S.A., Wang J.,Sun W., “Investigation of transformation models of B 2 → DO3 ordered structures for Fe3Al intermetallic under welding condition”, *Mater Lett.*, 2008, 62, 1953-1960.
- [12] Kratochvil P., Neumann H., “Welds of Fe3Al-type alloy with hardened structure”, *Intermetallics*, 2009, 17, 378-380.
- [13] Torun O, Çelikyürek İ, Baksan B., “17-4 PH Paslanmaz Çelik ve Al 7075 Alaşımının Sürtünme Kaynağı”, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2017, 4(2), 201-208.
- [14] Torun O., “Saf Bakır ve Magnezyum alaşımının Sürtünme Kaynağı”, *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2019, 27(2), 110-115.
- [15] Lee W.B., Kim Y.J., Jung S.B., “Effects of copper insert layer on the properties of friction welded joints between TiAl and AISI 4140 structural steel”, *Intermetallics*, 2004, 12, 671-680.
- [16] Sketchley P.D., Threadgill P.L., Wright I.G., “Rotary friction welding of an Fe3Al based ODS alloy”, *Mater Sci Eng.*, 2002, A329-331, 756-762.
- [17] Karabulut A., Tasgetiren S., “Continuously Driven Friction Welding Machine”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 2004, 3, 38-46.
- [18] Torun O., Gurler R., Baksan B., Celikyurek İ., “Diffusion bonding of iron aluminide Fe72Al28 using a pure iron interlayer”, *Intermetallics*, 2005, 13, 801-804.
- [19] Torun O., Çelikyürek İ., Gürler R., “Diffusion bonding of iron aluminide Fe72Al28 using a copper interlayer”, *Materials Characterization*, 2008, 59(7), 853-856.
- [20] Torun O., Çelikyürek İ., “Diffusion bonding of nickel aluminide Ni75Al25 using a pure nickel interlayer”, *Intermetallics*, 2008, 16(3), 406-409.
- [21] Torun O., Çelikyürek İ., “Microstructure and strength of diffusion bonded joint between nickelaluminide Ni75Al25 and AISI 316 L stainless steel using a nickelinterlayer”, *Kovove Materialy-Metallic Materials*, 2009, 47(4), 263-267.
- [22] Torun O., Çelikyürek İ., 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.
- [23] Torun O., “Bakır/Gümüş Ara Tabaka Kullanılarak Difüzyon Kaynağıyla Birleştirilmiş AZ91 ve Al 2024 Alaşımının Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri”, *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 2018, 5(2), 467-474.