

SÜRTÜNME KAYNAĞIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ AISI 1040/DUPLEX PASLANMAZ ÇELİK ÇİFTİNDE SÜRTÜNME SÜRESİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

İhsan KIRIK,^{*1}Niyazi ÖZDEMİR²

^{*1}Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 13000, BİTLİS
²Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ
E mail: alihsankirik@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, AISI 1040/AISI 2205 çelik çifti sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilerek, sürtünme süresinin birleşme bölgesinde oluşan mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine olan etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Sürtünme kaynakları tarafımızdan imal edilen PLC kontrollü sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde yapılmıştır. Kaynaklı bağlantılar, devir sayısı 1700 dev/dak, sürtünme basıncı 30 MPa, yığma basıncı 60 MPa, yığma süresi 4 sn ve 3, 5, 7, 9, ve 11 sn' lik sürtünme süreleri seçilerek gerçekleştirilmiştir. Kaynak sonrası birleşme ara yüzeyinde meydana gelen yapısal değişiklikler SEM ve EDS analizleri yapılarak belirlenmiştir. Ayrıca, kaynaklı bağlantıların mekanik davranışlarını belirlemek için mikrosertlik ve çekme testi uygulanmıştır. Mikroyapı ve mekanik test sonuçlarından, sürtünme süresinin bağlantı mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. En yüksek çekme dayanımı, 1700 dev/dak devir sayısı ve 3 sn' lik sürtünme süresi kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıda gerçekleştirildi.

Anahtar Kelimeler: Sürtünme kaynağı, AISI 1040 çelik, Duplex paslanmaz çelik, Sürtünme Süresi

EFFECT OF FRICTION TIME ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANIC PROPERTIES OF FRICTION WELDED AISI 1040/DUPLEX STAINLESS STEEL

ABSTRACT

In this study, the effect on the characteristic microstructure and mechanic properties of friction time on the couple steels AISI 1040/AISI 2205 stainless steel joining with friction welding method was experimentally investigated. Friction welding experiment were carried out in privately prepared PLC controlled continuous friction welding machine by us. Joints were carried out under 1700 rpm rotation speed, with 30MPa process friction pressure, 60MPa forging pressure, 4 second forging pressure and under 3, 5, 7, 9 and 11 second friction time, respectively. After friction welding, the bonding interface microstructures of the specimens were examined by SEM microscopy and EDS analysis. After weld microhardness and tensile strength of specimens were carried out. The result of applied tests and observations pointed out that the properties of microstructure were changed with friction time increased. The excellent tensile strength of joint observed on 1700 rpm rotation speed and 3 second friction time sample.

Keywords: Friction Welding, AISI 1040, Duplex Stainless Steel, Friction Time

1.GİRİŞ

Kaynak teknolojisindeki gelişmelerle birlikte ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi oldukça güç ve problemlili olan; farklı kimyasal bileşimdeki malzemeler, katı hal kaynak teknikleri ile sorunsuz bir şekilde kaynaklanabilmektedir. Bu yöntemler içerisinde en yaygın kullanım alanına sahip yöntem sürtünme kaynak yöntemidir. Sürtünme ısı ile gerçekleştirilen bu yöntem, gelişen teknoloji ile birlikte dünyada birçok ülkede endüstride geniş olarak uygulama alanı bulmuş, ticari bir üretim yöntemi olarak yerini almıştır. Kaynak teknolojisinde; farklı bileşim ve farklı kristal yapıdaki malzemelerin birleştirilmesi zordur. Kaynak sonrası oluşan iç gerilmeler, cüruf, gözenekler, gevrek intermetalik fazlar, kaynağın kalitesini etkileyen unsurlardır. Sürtünme kaynağında malzemelerin ergime sıcaklığına ulaşmadan birleşmeleri sayesinde bahsedilen olumsuz unsurlar en az seviyelere inmektedir. Sürtünme kaynağı; biri sabit diğeri dönel harekete sahip iki parçanın ara yüzeylerinde oluşturulan sürtünme yolu ile mekanik enerjinin ısı enerjisine dönüştürülmesi sonucunda ortaya çıkan ısıdan yararlanılarak eksenel basınç altında ara yüzeyde plastik deformasyon oluşturularak yapılan bir katı hal kaynak yöntemidir [1-4]. Sürtünme kaynağında, sürtünme süresi boyunca sürtünen yüzeyler eksenel basınç altındadır. Isıtma veya sürtünme fazı olarak adlandırılan bu süreç, birleşme bölgesinde plastik deformasyon sıcaklığına ulaşmaya kadar devam eder. Bu sıcaklıkta dönme hareketi ani frenleme ile durdurulur ve eksenel basınç yaklaşık iki kat artırılarak yığıma oluşturulur. Normal şartlar altında ara yüzey ergimez. Çünkü meydana gelen sıcaklık, malzemelerin ergime sıcaklığından daha düşüktür. Bu kaynak tekniğinde ilave metal ve koruyucu gaze gerek yoktur. Özellikle simetrik olarak dönebilen hacimli parçaların birleştirilmesinde kullanılan bir katı hal kaynak yöntemi olup avantajları; yüksek malzeme tasarrufu, düşük üretim zamanı ve farklı metalik malzemelerin kaynağının mümkün olmasıdır [5-9].

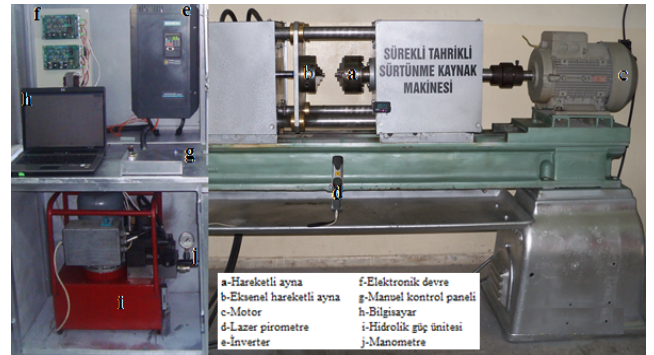
Duplex paslanmaz çelikler yüksek oranda krom (%18-28 Cr) ve (%4,5-8 Ni) oranında nikel içeren çeliklerdir. Yapının ferrit ve ostenit fazlarından oluşması nedeniyle bu çelikler, duplex olarak adlandırılır. Bunlar; optimum özelliklerini, yapılarındaki fazlarının birbirlerine eşit miktarda bulduklarında sergilerler. Duplex paslanmaz çeliklerin alaşım katkıları, hem ostenit hem de ferrit oluşturuculardır. Duplex paslanmaz çeliklerde kullanılan ana alaşım elementleri içerisinde Cr ve Mo ferrit oluşturucu, Ni, C, N ve Cu ostenit oluşturucudur. Ostenit ve ferrit oluşturucu alaşım elementlerinin dengesi, malzeme

mikroyapısını oluşturmaktadır. Duplex paslanmaz çeliklerin sahip olduğu yüksek alaşım içeriği ve ferritik bir matris gevrekleşmeye karşı hassasiyeti ve mekanik özellik kaybını özellikle de tokluğu düzeltir. Bu çelikler; özellikle yağ, gaz, petrokimya ve kâğıt endüstrisi gibi uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Uygun kaynak yöntemleri ve dolgu metalleri kullanıldığında ostenitik, ferritik ve çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler, karbonlu çelikler ve düşük alaşımli çelikleri de içine alan kaynak edilebilir çeliklerle başarılı bir şekilde birleştirilebilirler[10].

Yapılan araştırmalar incelendiğinde farklı bileşime sahip orta karbonlu çelikler ile duplex paslanmaz çeliklerin sürtünme kaynak tekniği ile birleştirilmeleri hakkında ki çalışmalar yok denecek kadar azdır. Bu sebeple birleştirme teknikleri içinde farklı metallerin birleştirilmesinde en avantajlı ve kısa sürede yapılabilen katı hal yöntemlerinden sürtünme kaynak yöntemi kullanılmıştır. Bu çalışmada, AISI 1040 çeliği ile duplex paslanmaz çelik çiftinin sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve sürtünme süresinin ara yüzeydeki mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine olan etkileri araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

Deney çalışmalarında, 12 mm çapında ticari olarak temin edilen standart AISI 1040 ile AISI 2205 çelik çifti kullanıldı. Bu çeliklere ait kimyasal kompozisyon Tablo 1 de verilmiştir. Kaynak işleminden önce, çubuk halinde temin edilen deney numuneleri, sürtünme kaynak makinasının özellikleri dikkate alınarak 12 mm çapında ve 70 mm uzunlukta torna tezgâhında işlenerek hazırlandı. Kaynak işlemleri, Şekil 1' de resmi verilen sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde Tablo 2' de ki kaynak parametreleri kullanılarak gerçekleştirildi.



Şekil 1. Sürekli Tahrikli Sürtünme Kaynak Makinesi

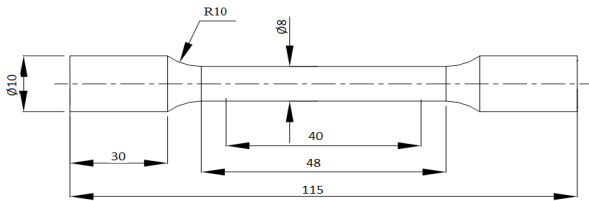
Tablo 1. Deneysel Çalışmalarında Kullanılan Malzemelerin Kimyasal Analizleri

Malzeme	Alaşım Elementi(% Ağırlık)							
	%C	%Mn	P≤%	S≤%	%Cr	%Mo	%Ni	%Fe
AISI 1040	0.37-0.44	0.60-0.90	0.040	0.050	-	-	-	Kalan
AISI 2025	0.01-0.03	1.68-2.00	0.026	0.001	21-23	1.3320	3.374	Kalan

Tablo 2. Kaynak Parametreleri

Numune no	Sürtünme süresi(sn)	Devir sayısı(Dev/dak)	Sürtünme basıncı(MPa)	Yığılma basıncı(MPa)	Yığılma süresi(sn)
S1	3	1700	30	60	4
S2	5	1700	30	60	4
S3	7	1700	30	60	4
S4	9	1700	30	60	4
S5	11	1700	30	60	4

Kaynak sonrası, numunelerin birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişimi belirlemek amacıyla; numuneler birleşme hattına dik doğrultuda kesilerek, yüzeyleri 80-1200 zımpara ile zımparalandıktan sonra 3 µm' lik elmas pasta ile parlatıldı. AISI 1040 için %98 alkol + %2 HNO_3 ile 3-5 saniye süre ve duplex için %50 HNO_3 ve %50 saf su kullanılarak elektrolitik dağlandı. Kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesinde oluşan yapısal değişim SEM ve EDS analizleri yapılarak belirlendi. Mikrosertlik ölçümleri, LEICA MHF-10 marka test cihazında Hv sertlik skalası ile 100 gr'lık yük altında 0,5 mm aralıklarla gerçekleştirilecektir. Kaynaklı numunelerin bağlantı mukavemetini belirlemek için, TS EN ISO 6892-1 standardına uygun olarak Şekil 2'de verilen ölçülerde çekme numuneleri hazırlanarak 50000 N yük kapasitesine sahip SHİMADSU marka çekme cihazında, 1mm/dak. çekme hızı kullanılarak çekme deneyleri gerçekleştirildi.



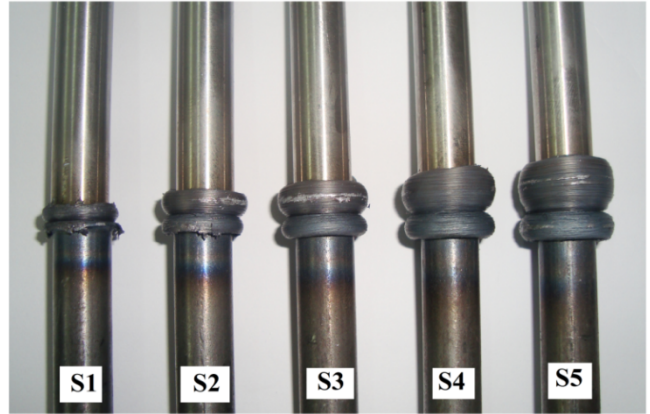
Şekil 2. Çekme Numune ölçüleri

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

3.1. Sürtünme Kaynaklı Bağlantıların Mikroyapı İncelemeleri

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen S1, S2, S3, S4 ve S5 no' lu numunelere ait makro görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. Fotoğraftan açıkça görüldüğü gibi, artan sürtünme süresine bağlı olarak dışarı taşan malzeme miktarında artış gözlenmektedir. Kaynak sonrası yapılan boyca kısılma ölçümleri neticesinde, en büyük kısılma S5 nolu numunede

10 mm olarak tespit edilmiştir. Boyca kısılma en çok duplex paslanmaz çelik tarafında meydana gelmiştir. Paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığında ısı iletim katsayıları sade karbonlu çeliklere göre %60 daha düşüktür. Bu nedenle, sürtünme kaynağı esnasında birim zamanda arayüzeyde ulaşılan sıcaklık derecesi duplex paslanmaz çelik tarafında artış kaydedilmiştir.



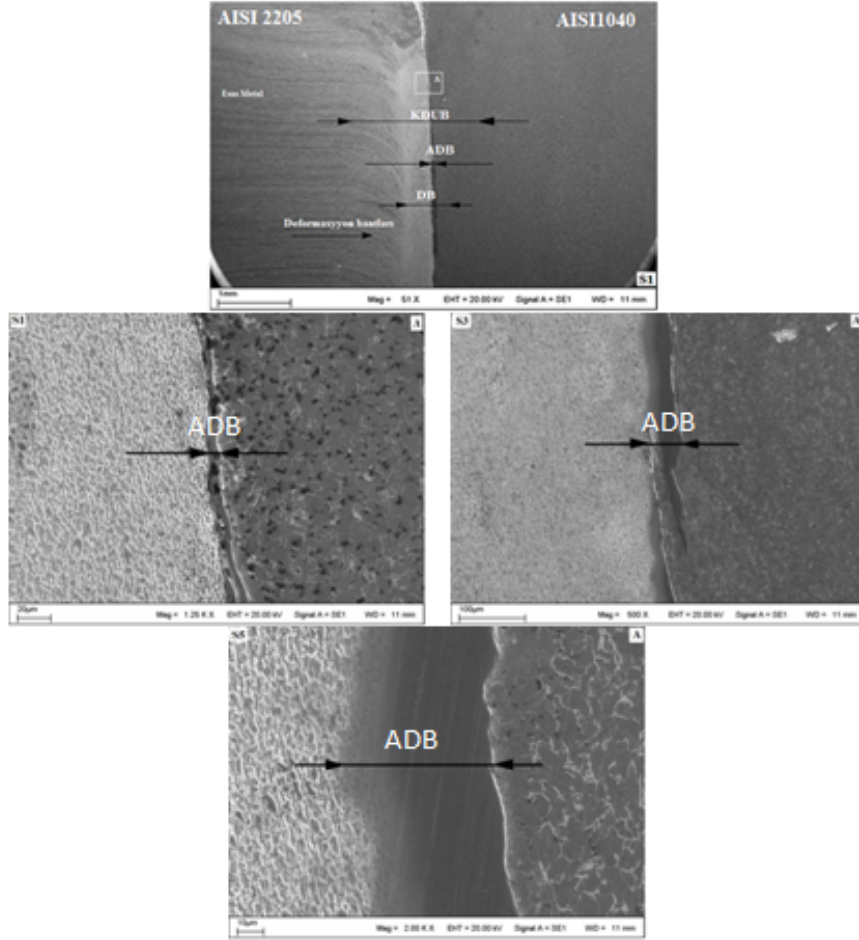
Şekil 3. Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş numuneler

Bu sıcaklık farkı, duplex paslanmaz çelik tarafında malzemenin viskoz hale gelme derecesini artırarak, birim zamanda daha fazla malzemenin dışarı taşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, bu kaynaklı bağlantılara ait makro fotoğraflar incelendiğinde, artan sürtünme süresine bağlı olarak ısıdan etkilenen bölgenin genişliğinde artış görülmektedir. Bu değişim AISI 1040 tarafında net olarak görülmektedir.

Farklı sürtünme süresi kullanılarak sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş S1, S3 ve S5 nolu kaynaklı bağlantıların birleşme yüzeyi üzerinde alınan SEM fotoğrafları Şekil 4'te sırasıyla verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait SEM

fotoğrafları incelendiğinde, birleşme yüzeyinde kalıntı, boşluk ve bağlantısız bölgelerin olmadığı görülmektedir. Kaynak sonrası birleşme bölgesi üzerinde yapılan analiz sonuçlarından, literatüre uygun dört farklı bölgenin varlığı

görülmektedir. Bunlar; aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB) birleşme çizgisinde, deformasyona uğramış bölge (DB), kısmen deformasyona uğramış bölge (KDUB) ve esas metal (EM) olarak belirtmişlerdir [11].



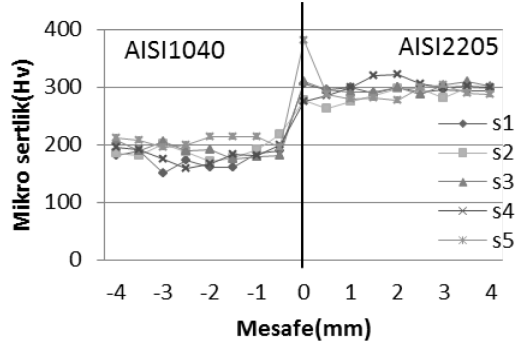
Şekil 4. S1,S3 ve S5 Numunelerinin Birleşme Bölgelerinden Alınan SEM Görüntüleri

Sürtünme kaynağı ile birleştirilen kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesinde meydana gelen en belirgin değişim ADB ve DB bölgelerinde görülmektedir. Sürtünme süresinin bu bölgelerde meydana gelen yapısal değişim üzerine önemli etkisi olduğu açıktır. Bilindiği üzere, arayüzeyin sürtünme etkisi altında kalma süresine bağlı olarak birim zamanda ulaşılan sıcaklık derecesi artmaktadır. Arayüzeydeki sıcaklık artışı, ekstrüzyon derecesini artıracaktır ve bunun sonucu olarak birleşme bölgesinde şiddetli termo-deformasyon sonucu tane küçülmenin etkin olduğu bir yapının ortaya çıkmasına yol açar. Bu durum bilhassa, yüksek sürtünme süreleri kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantılarda daha belirgin olarak ortaya

çıkılmaktadır. S1, S3 ve S5 kaynaklı bağlantıların birleşme arayüzeyi üzerinde alınan SEM fotoğraflarından, artan sürtünme süresine bağlı olarak ADB bölgesindeki değişim açıkça görülmektedir (Bkz. Şekil 4).

3.2. Sürtünme Kaynaklı Bağlantıların Mikrosertlik İncelemeleri

Farklı sürtünme süreleri kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantıların birleşme merkezinden ana metale doğru 0,5 mm aralıklarla yapılan mikrosertlik ölçüm sonuçları Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Mikrosertlik Eğrileri

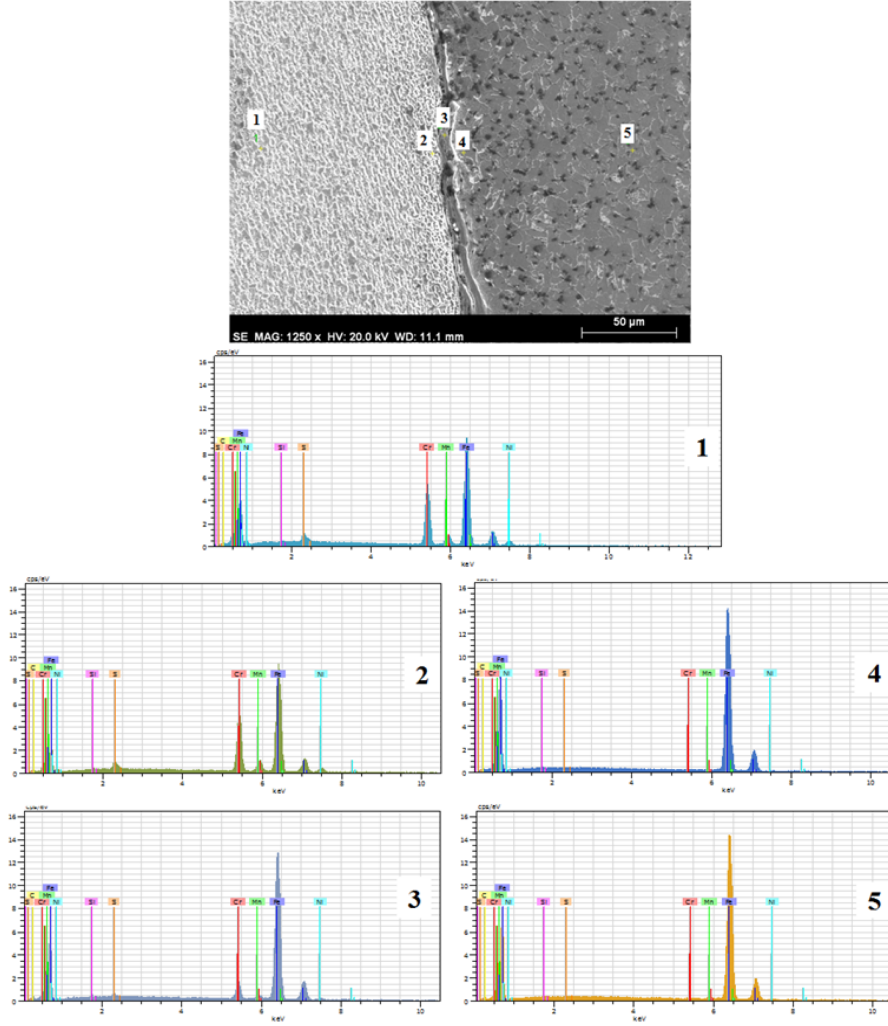
Kaynaklı bağlantıların sertlik dağılım eğrilerine bakıldığında, bütün numunelerde sertliğin arakesitte (ADB bölgesi) en yüksek olduğu görülmektedir. Birleşme bölgesinden her iki tarafa doğru gidildikçe sertliğin düştüğü, deforme olmayan bölgede malzemelerin orijinal sertliğine ulaştığı görülmektedir. Elde edilen sertlik eğrileri kendi aralarında kıyaslandığında; en yüksek sertlik 11 sn sürtünme süresi kullanılarak birleştirilen S5 kaynaklı bağlantıda 360 Hv olarak kaydedilmiştir. Bu değişim, sürtünme süresinin artmasıyla ADB'de ulaşılan sıcaklık derecesi artıracağı ve bunun sonucu olarak sürtünme basıncının şiddetli deformasyon etkisi sonucu ortaya çıkan deformasyon sertleşmesi ve tanelerde küçülmeye bağlı olarak ortaya

çıktığı düşünülmektedir. Ayrıca, artan sürtünme süresine bağlı olarak arayüzeyde ulaşılan sıcaklık derecesi artacaktır. Daha önceden yapmış olduğumuz çalışmalarda, demirli malzemelerin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesinde arayüzeyde ulaşılan sıcaklık derecesinin A3 sıcaklığın üzerinde olduğu belirtilmiştir. Bu sıcaklık derecesinde östenite dönüşmüş olan AISI 1040 tarafında ani soğuma sonrası martenzitik dönüşüm kaçınılmazdır. Kaynaklı bağlantıların birleşme arayüzeyinde ulaşılan bu sertlik artışı, AISI 1040 tarafında martenzitik dönüşüm, AISI 2205 tarafında ise dövme sertleşmesi ve kısmen de olsa krom karbür çökmesi sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir.

S1 numunesinin birleşme bölgesinden ana metale doğru beş farklı noktadan alınan EDS analizleri Şekil 6'da verilmiştir. EDS analiz sonuçlarından, AISI 1040 çeliği tarafında birleşme bölgesine yaklaşık 20 µm mesafede Cr'un difüzyona uğradığı gözlemlendi. Mn ise daha az difüze olduğu tespit edildi (Tablo 3). Cr ve Fe oranlarının bölgelere göre dağılımlarına bakıldığında Cr oranının AISI 1040 tarafına doğru gidildikçe hızla düştüğü Fe oranının ise tam aksine arttığı gözlemlenmiştir. Sonuçlardan, bağlanma şeklinin hem mekanik kilitleme ve az da olsa difüzyon şeklinde olduğu görülmektedir. Ayrıca, bu elementlerin konsantrasyonlarında ki artma ve azalma; sertlikteki değişimin temel kaynağını oluşturduğu düşünülmektedir.

Tablo 3. S1 Numunesinin Birleşme Bölgesindeki EDS Analiz Sonuçları

EDS Noktası	Alaşım Elementleri(% Miktar)			
	Mn	Cr	Si	Fe
1	5.13	21.79	0.46	58.73
2	5.68	20.92	0.86	61.16
3	5.96	5.85	0.59	79.02
4	5.78	0.77	0.44	87.38
5	5.52	0.50	0.45	86.88



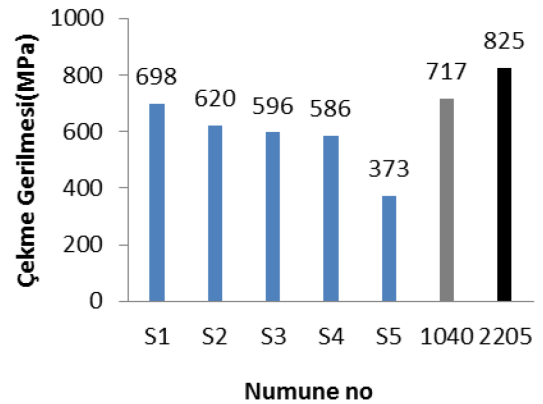
Şekil 6. S1 Numunesinin Birleşme Bölgesinden Alınan EDS Analizleri

3.3. Sürtünme Kaynaklı Bağlantıların Mekanik Özellikleri

Çekme deneyi sonrası numunelerin makro fotoğrafları Şekil 7'de ve gerilme-uzama grafiği Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 7. Çekme Numunelerinin Makro Görüntüsü



Şekil 8. Sürtünme Kaynaklı Bağlantıların Çekme Dayanımları

Çekme deneyi sonuçlarına göre, en yüksek çekme mukavemeti S1 no' lu numunede 698 MPa ve en düşük çekme mukavemeti ise S5 no' lu numunede 373 MPa olarak elde edilmiştir. Çekme testi sonrası yapılan incelemede, S1

ve S2 kaynaklı bağlantılar birleşme bölgesinin dışında AISI 1040 tarafında boyun vererek sünek bir kırılma davranışı sergilerken, S3, S4 ve S5 no' lu kaynaklı bağlantılar AISI 1040 tarafında ITAB bölgesinde boyun vermeksizin kırıldıkları görülmektedir. Ayrıca, kırılmanın ITAB bölgesinde ortaya çıktığı S3, S4 ve S5 no' lu numunelerde gevrek kırılma, S1 ve S2 no' lu numunelerde ise sünek kırılma gözlenmiştir. Artan sürtünme süresine bağlı olarak kaynaklı bağlantıların çekme gerilmesinde doğrusal bir düşüş gözlemlendi. Yüksek sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen kaynaklı bağlantılarda (S3, S4 ve S5), yüksek ısı girdisi arayüzey sıcaklığının A3 sıcaklığı üzerine çıkması sonucu AISI 1040 tarafında östenite dönüşen yapının yüksek soğuma nedenli martenzite dönüşümü ile birlikte gevrek kırılma davranışı gözlenmiştir. Ayrıca, sürtünme süresinin hem termo-mekanik etki hem de yapısal değişim üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

AISI 1040/AISI 2205 duplex paslanmaz çelik çiftinin sürekli tahrikli sürtünme kaynak yöntemi ile yapılan birleştirme işleminde birleşme ara yüzeyinde ve ısıdan etkilenen diğer bölgelerde, artan sürtünme süresine bağlı olarak meydana gelen mikro yapı ve mekanik özelliklerindeki değişimleri üzerine yapılan bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edildi.

1. Bu çalışmada, AISI 1040 çeliği ile AISI 2205 duplex paslanmaz çelik çifti beş farklı sürtünme süresi kullanılarak sürtünme kaynak yöntemi ile başarılı bir şekilde birleştirilmiş olup birleşme arayüzeyinde kalıntı, boşluk ve bağlantısız bölgelerin olmadığı görülmüştür.
2. Kaynaklı bağlantıların birleşme arayüzeyi üzerinde alınan mikroyapı fotoğraflarının tamamında, literatüre uygun dört farklı bölgenin oluştuğu görülmüştür. Bunlar; aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB), deforme olmuş bölge (DB), kısmen deformasyona uğramış bölge (KDUB) ve esas metal (EM). En çok yapısal değişim DB ve ABD bölgelerinde gözlenmiştir. Artan sürtünme süresine bağlı olarak bu bölgelerin genişliğinde artış gözlenmiştir.
3. Çekme deneyi sonuçlarına göre, en yüksek çekme mukavemeti S1 no' lu numunede 698 MPa ve en düşük çekme mukavemeti ise S5 no' lu numunede 373 MPa olarak

elde edilmiştir. Çekme testi sonrası yapılan incelemede, S1 ve S2 kaynaklı bağlantılar birleşme bölgesinin dışında AISI 1040 tarafında boyun vererek sünek bir kırılma davranışı sergilerken, S3, S4 ve S5 no' lu kaynaklı bağlantılar AISI 1040 tarafında ITAB bölgesinde boyun vermeksizin kırıldıkları görülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Özdemir, N., "Tane küçültülmüş düşük alaşımlı yüksek karbonlu çeliklerin sürtünme kaynağını birleştirilebilirliğinin araştırılması" Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, Elazığ. 2002.
- [2] Dinç, D., "AISI 1040 ve AISI 304 çeliklerinin sürtünme kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin araştırılması", Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Y. Lisans Tezi, Balıkesir, 2006.
- [3] Sahin M.ve Erol Akata H., "Joining with friction welding of plastically deformed steel", Journal of Materials Processing Technology, 142, 239-246, 2003.
- [4] ASM Handbook.. "Failur analysis and prevention", U.S.A., (11), 1992.
- [5] Jenning, P., "Some properties of dissimilar metal joint made by frictionwelding", The Welding Institue, Abinhton Hall, Cambridge, 141-153, 1971.
- [6] Tylecote, R.Y., "The solid phase welding of metals", Edward Arnold Ltd., London, (1), 50, 1968.
- [7] Sereigın, S.A, Sabantsev, V.P., "The friction welding of quenched steel", Weld. Prod., 20- 23, 1977.
- [8] Özdemir, N., "Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI304L/AISI4340steel as a function rotational speed" Material letters, 59, 2504-2509, 2005.
- [9] Ünal E., Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI4340 çeliği ile paslanmaz çeliklerin yorulma dayanımının araştırılması, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 2003.
- [10] Noble D. N., Selection of wrought duplex stainless steels, ASM Metals Handbook, V:6, 471-479, 1993.
- [11] Ozdemir N., "Investigation of the mechanical properties of friction welded joints between AISI 304L and 4340 steel as a fontion rotational speed", Materials letters; 59: 2504-2509, 2005.