



ISSN: 1306-3111/1308-7223
NWSA-Technological Applied Sciences
NWSA ID: 2013.8.2.2A0080

Status : Original Study
Received: January 2013
Accepted: April 2013

E-Journal of New World Sciences Academy

Serdar Mercan

Cumhuriyet Univeresity smsmercan@gmail.com Sivas-Turkey

Niyazi Özdemir

Firat University Technology Faculty Elazig-Turkey

<http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2013.8.2.2A0080>

**AISI 2205 / AISI 1020 MALZEME ÇİFTİNİN SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE
BİRLEŞTİRİLMESİ**

ÖZET

Bu çalışmada, kendi sınıfında en yaygın kullanım alanına sahip AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik ile kaynak kabiliyeti yüksek ve aynı zamanda uygun fiyat avantajına sahip düşük karbonlu AISI 1020 çelik çifti farklı işlem parametreleri (1300, 1500 ve 1700 dev/dk devir sayısı, 4, 6 ve 8sn sürtünme süresi ve 40 MPa sürtünme basıncı) kullanılarak katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ile birleştirilmiştir. Elde edilen bu kaynaklı bağlantıların birleşme arayüzeyinde meydana gelen değişiklikler SEM analizi ile belirlenmiştir. Kaynaklı bağlantılara çekme testi uygulanarak hasar süreçleri incelenmiş olup, bağlantı arayüzeyine dik doğrultuda mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda; bu iki malzemenin sürtünme kaynak yöntemiyle problemsiz olarak birleştirildiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI 2205, AISI 1020, Sürtünme Kaynağı,
Mikroyapı, Mekanik Özellikler

**A COUPLE OF AISI 2205 / AISI 1020 METARIAL COMBINATION WITH FRICTION
WELDING METHOD**

ABSTRACT

In this study, AISI 2205 duplex stainless steel which has the widest usage area in its own category and, both higher welding capability and lower carbonaceous AISI 1020 steel pair providing with affordable price advantage is joined with continuous drive friction welding which is one of the solid-state methods by using different treatment parameters (1300, 1500, and 1700 rpm rotation speed, 4, 6, and 8s friction time, and 40 MPa friction pressure). For microstructure examination, SEM analyse method are examined so as to determine amendments which will be able to occur in the interface of merger. It was determined with microstructure amendments in the joint interworking by completing micro hardness measurements perpendicular to the joint interface. It was aimed to examine the damage processes by executing tension test to the welded joints. As a result of the investigation, it was found the two materials are combined friction welding method without any problems.

Keywords: AISI 2205, AISI 1020, Friction Welding,
Microstructure, Mechanical Properties



1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mühendislik uygulamalarındaki gelişmeler, yeni malzeme türlerinin bulunması ve ihtiyaçların artması imalat yöntemlerini de etkilemiştir. Kaynak tekniği de bu imalat yöntemlerinden biridir ve bunun sonucunda kaynak teknikleri işlem cinsine göre ergitme ve katı hal kaynak yöntemleri olarak iki şekilde gruplandırılmışlardır. Ergitme kaynak yöntemlerinde birleştirilen metalik malzemelerin her ikisi birleşme yüzeylerinin ergimesi ve eriyik karışımın katılaşması sonucu birleştirilirler. Söz konusu ergime nedeni ile farklı metallerin, fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonlarına bağlı olarak ergitme kaynak yöntemleri kullanılarak birleştirilmeleri hemen hemen imkânsızdır. Bu ihtiyacı gidermek amacı ile katı hal kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Katı hal kaynak yönteminde aynı ya da farklı iki malzeme çifti ergime sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta, basınç etkisinin oluşturduğu plastik deformasyon ve ekstrüzyonla birleşmesi sağlanır [1 ve 2]. Katı hal kaynak yöntemleri arasında sürtünme kaynak yöntemi en sağlıklı ve en sık kullanılan yöntemdir. Sürtünme kaynak yönteminde, işlem sürecinde ergime olmadığından katılaşmada olmamaktadır. Dolayısıyla katılaşma sırasında oluşabilecek kristal yapı farklılaşması, ergimiş metal içerisinde yabancı madde kalma riski ve katılaşma hızına bağlı olarak meydana gelebilecek çatlamlar sürtünme kaynak yönteminde görülmez [3]. Bu avantajlarından dolayı farklı bileşimdeki malzemelerin birleştirilmesinde, katı hal kaynak yöntemleri tercih edilirler [1 ve 2]. Sürtünme kaynak yöntemi üzerine yapılan ilk çalışmaların 15. yüzyılda başladığı bilinmektedir. Sürtünme kaynak yönteminin uygulama alanlarının geliştirilebilmesi aynı zamanda birleştirilen parçaların bağlantı kalitesinin arttırılabilmesi için incelemeler günümüzde de devam etmektedir [4 ve 5].

Sürtünme kaynağında bir erime bölgesinin olmayışı, ısı tesiri altındaki bölgenin dar olması ve kaynağın çevresindeki plastik olarak deforme olmuş malzemenin varlığı sürtünme kaynağı ile birleştirilen malzeme mikroyapılarındaki belirgin özelliklerini teşkil eder [2]. Aşırı deformasyona uğramış bölge malzemelerin basınç altında birbirine karıştığı ve tamamen deformasyona uğradıkları bölgedir. Her iki malzeme atomlarının karşılıklı olarak birbiri içine difüzyona uğradıkları görülür. Bu bölgede aşırı derecede mekanik bir karışma olayı olduğundan, difüzyon olayı daha zorunlu olarak meydana gelmektedir. Malzemelerin birbirine karıştığı aşırı deformasyona uğramış bölge ile esas metal arasında ısıdan etkilenen bölge bulunmaktadır. Isıdan etkilenen bölge (IEB) yaklaşık olarak malzemelerin ergime sıcaklığının yarısına kadar yükseldiği ve bu sıcaklığın üzerindeki bölgelerdir. Aynı zamanda termomekanik etkiye de maruz kalan bu bölge, deformasyona uğramış ve kısmen deforme olmuş iki farklı yapıdan oluşmaktadır. Isıdan etkilenen ancak plastik deformasyonun olmadığı kısımlarda, kısmen deformasyona uğramış bölgenin içinde yer almaktadır. Bu bölgede malzeme sürtünme sırasında oluşan ısıdan etkilenir ve özelliklerinde değişimler ortaya çıkar[6].

Dubleks paslanmaz çeliklerin (DPÇ) mikroyapısı, ferrit matris tarafından sarılan östenit tanelerinden oluşur. İçerdikleri bu iki faz nedeniyle östenitik ve ferritik çeliklerin sahip oldukları avantajlara ve dezavantajlara sahiptirler [7]. Doubleks paslanmaz çeliklerin kaynak işleminde ortaya çıkan sıcaklık değişimleri, kaynak metalinin ve ısıdan etkilenen bölgenin içerdikleri ferrit ve östenit oranını değiştirir. Bununla birlikte paslanmaz çeliklerin kaynağında meydana gelen yapısal değişimler (tane irileşmesi, MX çökeltileri, M_3C karbürü, M_7C_3 karbürü, $M_{23}C_6$ karbürü, Sigma (σ) fazı, Laves fazı, Z fazı, Kapa (χ) fazı, Chi (G) fazları, delta ferrit vb.) malzemenin mekanik



özelliklerinin ve korozyon direncinin düşmesine neden olur. Ergitme kaynak yöntemi, kaynak prosedürü, kullanılan ilave metalin türü bu oranı dengeleyecek şekilde seçilmeli ve uygulanmalıdır; kaynak işlemindeki ısıl çevrimler nedeni ile meydana gelebilecek mikroyapısal değişiklikler ve çökelmeler engellenebilsin [8,9]. Ancak, sürtünme kaynak yönteminde özellikle ergimenin olmaması, çok kısa zamanda tamamlanması ve hızlı soğuma nedeniyle yukarıda anlatılan metalurjik değişimler elimine edilebilmektedir [10, 11 ve 12]

Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, Satyanarayana vd. [13], paslanmaz çelik çiftlerini sürtünme kaynağı ile birleştirmiş ve kaynak parametrelerinin mikroyapı, mekanik özellikler ve kırılma davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. En uygun kaynak parametrelerini belirleyerek, sağlıklı kaynakların ancak belirli kaynak parametrelerinin kombinasyonları ile elde edilebileceğini belirtmişlerdir. N. Özdemir [14], AISI 304L östenitik paslanmaz çelik ile AISI 4340 çelik çiftini sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirmiştir. İncelemelerinde, devir sayısının kaynaklı bağlantının kalitesine olan etkisini araştırmıştır. Mikroyapı ve mikrosertlik ölçümleri yapmış ve sonuç olarak devir sayısının sürtünme kaynağı ile birleştirilen çelik çiftinin çekme dayanımı üzerinde etkili olduğunu belirlemiştir. N. Özdemir ve Orhan [15], termomekanik işlemlerle tane boyutu küçültülmüş ötektoid üstü, ultra yüksek karbonlu çeliklerin sürtünme kaynağı ile birleştirilmesini inceleyerek kaynak parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Kaynak sonrası elde edilen mikro yapı, mikro sertlik analizi ve mekanik testler sonucunda, kaynak işlemi boyunca oluşan mikroyapı dikkate alınarak değerlendirildiğinde; her bir kaynak parametresinin kaynaklı bağlantının kalitesini bir miktar etkilediğini ancak mekanik ve metalurjik özelliklere en önemli etkinin devir sayısı, sürtünme basıncı ve sürtünme süresinin kombinasyonu ile elde edildiğini bildirmişlerdir. Çelik ve arkadaşları [16], sürtünme kaynaklı bağlantılarda aynı guruptaki metallerin çekme dayanımlarının birbirine çok yakın çıktığını ve ısı tesiri altındaki bölgede sertlik değişiminin kaynak parametrelerine göre çeşitlilik gösterdiğini bildirmişlerdir. Bununla birlikte sürtünme kaynaklı bağlantıların çekme dayanımlarının esas malzemesinin (AISI 1050) çekme dayanımlarının %6 üzerinde olduğunu ve en düşük çekme dayanımının ise %1,9 daha düşük olduğunu belirtmişlerdir.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Farklı kimyasal bileşime sahip metalik malzemelerin ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesi güç ve problemlidir. Aynı zamanda, metalik malzemelerin ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde, birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişim ve kaynak hataları nedeni ile meydana gelen yüksek gerilmeler, kaynaklı bağlantıların hasar sürecinde olumsuz rol oynamaktadır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında; farklı kimyasal bileşime sahip metal çiftleri, bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme kaynak yöntemi ile yüksek bağlantı kalitesinde birleştirilmesi amaçlanmıştır, böylece bi-metalik uygulamalar ile malzeme maliyetleri düşürülebilecek ve ihtiyaca uygun farklı metal çiftleri birlikte kullanılabilir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada, Ø12X6000 mm'lik çubuklar halinde ticari olarak temin edilen AISI 1020 çeliği ile AISI 2205 DPÇ kullanılmıştır. Her iki çelik çiftine ait kimyasal kompozisyon Tablo 1'de verilmiştir. Kaynak numuneleri, 70 mm boyunda ve 12 mm çapında torna tezgâhında işlenerek hazır hale getirilmiştir. Sürtünme kaynakları, tarafımızdan



tasarlanıp geliştirilen sürekli tahrikli sürtünme kaynak makinesinde Tablo 2’de verilen değişken parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. AISI 1020 ve AISI2205 çelik çiftlerine ait kimyasal kompozisyon
(Table 1. Chemical composition of AISI 1020 and AISI 2205 steels)

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	N
AISI 1020	0,207	0,441	0,102	0,007	0,006	0,095	0,019	0,078	0,017	0,1	---
AISI 2205	0,018	1,686	0,309	0,026	0,003	22,333	3,379	4,932	---	0,097	0,191

Tablo 2. Sürtünme kaynağı deneylerinde kullanılan parametreler
(Table 2. Parameters which used friction welding experiments)

Numune No	Kaynak Parametreleri				
	Devir Sayısı (dev/dk)	Sürtünme Süresi (sn)	Sürtünme Basıncı (MPa)	Yığma Basıncı (MPa)	Yığma Süresi (sn)
S1	1300	4	40	80	2
S2		6	40	80	3
S3		8	40	80	4
S4	1500	4	40	80	2
S5		6	40	80	3
S6		8	40	80	4
S7	1700	4	40	80	2
S8		6	40	80	3
S9		8	40	80	4

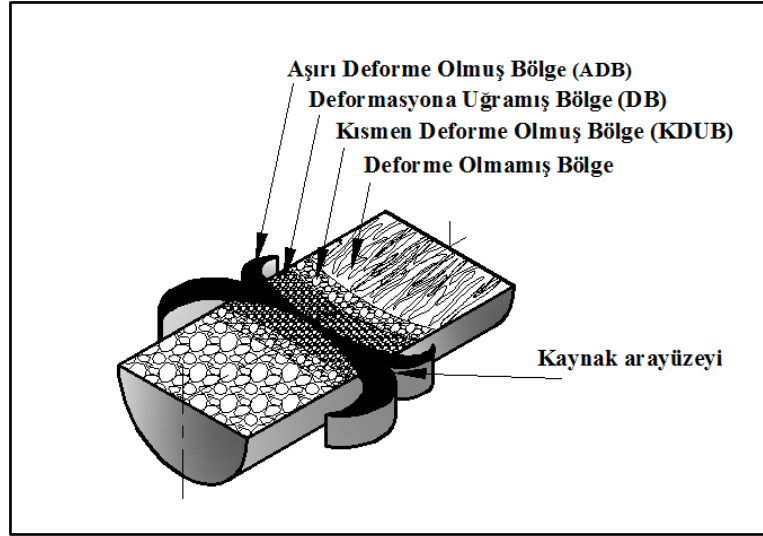
Kaynak sonrası, numunelerin birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişikliklerin incelenmesi amacıyla numuneler; birleşme arayüzüne dik doğrultuda, 25 mm boyunda soğutma sıvısı kullanılarak kesilmiştir. Daha sonra merkezdeki yapıya ulaşabilmek amacı ile numuneler orta eksenine kadar işlenmiş ve yüzeyler düzlem haline getirilmiştir. Hazırlanan mikroyapı numunelerine geleneksel temizleme ve parlatma yöntemi kullanılarak sırasıyla 80, 120, 240, 600, 800 ve 1200 mesh’lik zımpara ile zımparalanarak 3 µm’lik elmas pasta ile parlatılmış ve dağlamaya hazır hale getirilmiştir. Dağlama işleminde AISI 1020 çeliği için %2 NHO₃ + %98 alkol karışımı kullanılarak 5 sn süre ile nital dağlama yapılmıştır. AISI 2205 DPÇ için %25 NHO₃ + %75 saf su karışımında 7,5 V altında 30sn süre ile elektrolitik olarak dağlama işlemi yapılmıştır.

Kaynak parametrelerinin birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişim üzerine olan etkisini belirlemek için optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeler yapılmıştır. Sürtünme kaynağı ile birleştirilen numunelerin oda sıcaklığında akma ve kopma dayanımlarını tespit etmek amacı ile çekme deneyleri uygulanmıştır. Çekme deney numuneleri; TS EN ISO 6892-1/Mart 2011 Standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Ayrıca, kaynaklı bağlantılar üzerinde birleşme hattına dik doğrultuda 10 N yük altında ve 0,5 mm aralıklarda mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARI (RESULTS OF EXPERIMENTS)

Sürtünme kaynak yönteminde, kaynak sonrası birleşme arayüzünde meydana gelen yapısal değişim bazı araştırmacılar tarafından üç farklı bölgeye ayrılarak incelenmiştir. Bu bölgeler Şekil 1’de gösterildiği gibi; esas malzeme (EM), deformasyon bölgesi (DB), kısmen dönüşüme

uğramış bölge (KDUB), olarak isimlendirilmektedir [17]. Bununla birlikte deformasyon bölgesi (DB) içinde kalan, ancak yapısal olarak farklılık gösteren aşırı deforme olmuş bölgenin (ADB) varlığı yapılan detaylı SEM çalışması ile belirlenmiştir. Aşırı deforme olmuş bölgenin deformasyon bölgesinin dışında, ilave bir bölge olarak kabul edilmesi ile yapı dört farklı bölüm olarak belirlenmiş ve incelenmiştir. Tanımlanan bu dört bölgenin boyutlarının, işlem parametrelerine bağlı olarak değişim gösterdiği literatürde vurgulanmaktadır [14 ve 10]. Bu çalışmada, farklı kimyasal bileşime sahip iki metal çifti kullanılmıştır bu nedenle, birleşme arayüzünün her iki tarafında farklı mikroyapılar ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla her iki metal çifti için kaynak bölgesinde meydana gelen yapılar ayrı ayrı incelenmiştir.



Şekil 1. Mikroyapı değişikliğinin meydana geldiği bölgeler
(Figure 1. Regions which occurred microstructural changes)

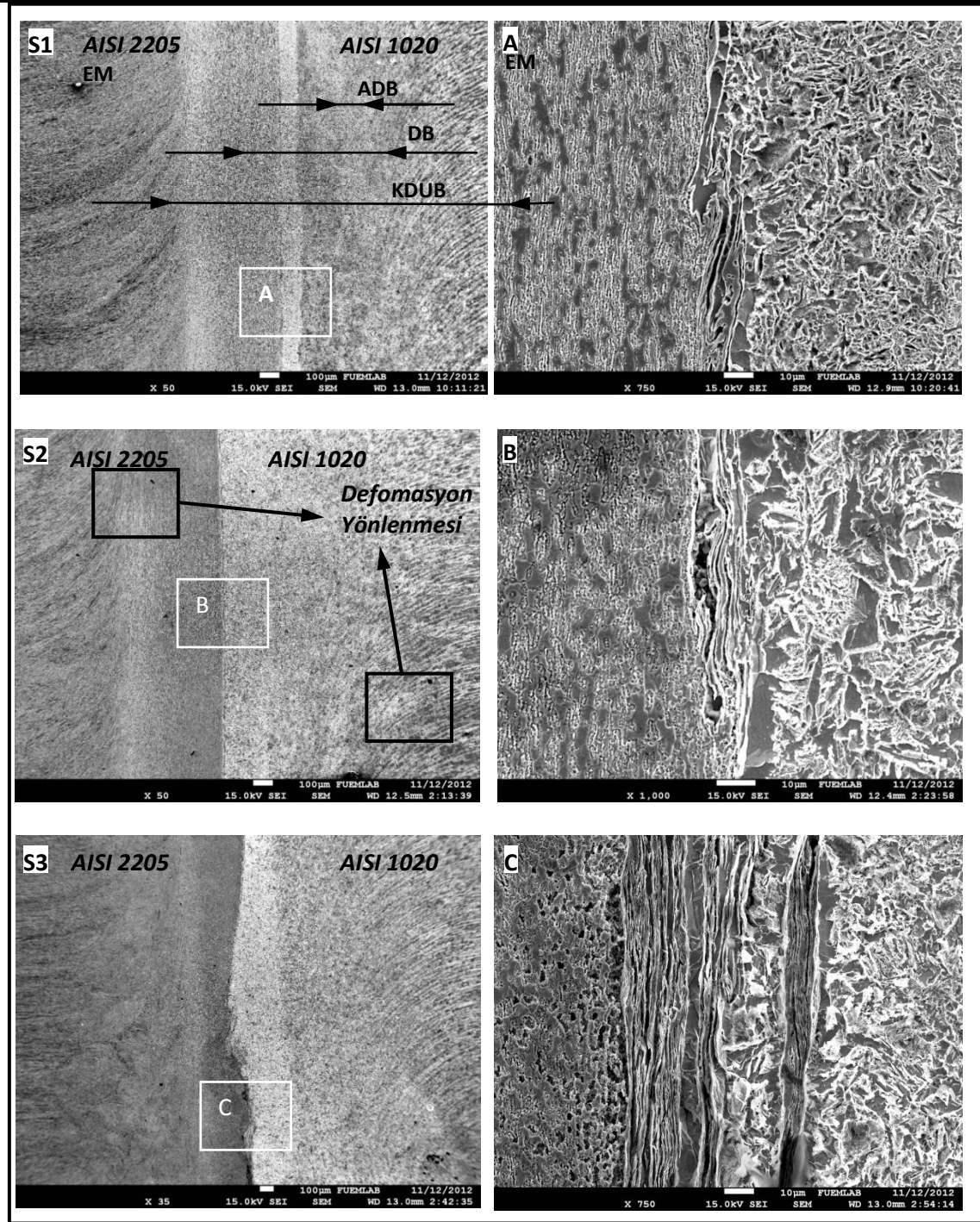
1300 dev/dk devir sayısı, 40 MPa sürtünme basıncı, 4, 6 ve 8 sn sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen S1, S2 ve S3 nolu kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası ara yüzey SEM fotoğrafları Şekil 2'de verilmiştir. Kaynak sonrası birleşme bölgesinin aşırı deformasyona uğramış bölge (ADB), deformasyona uğramış bölge (DB), kısmen deformasyona uğramış bölge (KDUB) ve esas metal (EM) olarak, literatürde belirtildiği gibi dört bölgeden meydana geldiği görülmektedir. Bu kaynaklı bağlantıların arayüzeyinden alınan SEM fotoğrafları incelendiğinde, birleşme arayüzeyinde boşluk, çatlak ve bağlantısız bölgelerin olmadığı görülmektedir.

Her bir numuneye ait SEM fotoğraflarında, arayüzeyde meydana gelen yapısal değişiklikler ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Kaynaklı bağlantı arayüzey ayrıntılı SEM fotoğraflarının alındığı kısımlar ve bu fotoğraflar A, B ve C harfleri ile belirtilmiştir. Ayrıntılı SEM fotoğrafları incelendiğinde S1 nolu kaynaklı bağlantı arayüzeyinde birleşme hattına dik yönelmiş tanelerden oluşan ve ADB'ne bitişik, DB'de meydana gelen yapısal değişim artan sürtünme süresine bağlı olarak farklılık gösterdiği görülmüştür. Artan sürtünme süresine bağlı olarak ısının tesiri altındaki bölgenin genişlediği, bunun sonucunda aksenal basıncın dövme etkisinin arttığı açıkça görülmektedir. Bu bölgede malzemenin dışarı taşma rejimi ve deformasyona uğramış bölgenin genişliğindeki artış açıkça gözlemlenmektedir. Birleşme arayüzeyinden ana malzemeye doğru gidildikçe sıcaklık ve dövmenin etkisi



ile her iki malzemede tanelerin küçüldüğü ve numune eksenine dik doğrultuda yönlenmenin meydana geldiği görülmektedir.

Farklı sürtünme süreleri kullanılarak yapılan bu kaynaklı bağlantıların birleşme bölgesinde meydana gelen yapısal değişim ve sürtünme süresinin bu yapısal değişim üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. S1, S2 ve S3 nolu numunelerin SEM fotoğraflarında görülen, birleşme arayüzünün her iki tarafında sıcaklık ve aksel basıncın etkisi ile aşırı deformasyona uğramış bölgenin genişliği ve şeklinin sürtünme süresine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Ara yüzey sürtünmesi ile her iki malzeme karışımından meydana gelen ve birleşme hattına dik doğrultuda yönelen bu bölgedeki düzensizlik kaynaklı bağlantıların mekanik davranışları üzerinde önemli etkiye sahip olduğu Özdemir [2] tarafından belirtilmiştir. Kaliteli kaynaklı bağlantılar elde etmek için, başlangıç arayüzey sürtünmesi ile meydana gelen karışım bandının dışarı atılması için yeterli aksel basınç ve sürtünme fazının kullanılması gerekir [2]. 4sn sürtünme süresi kullanılarak yapılan S1 nolu kaynaklı bağlantı arayüzeyinde meydana gelen aşırı deformasyona uğramış bölgedeki düzensizlik açıkça görülmektedir. Düşük sürtünme süresi kullanılarak yapılan kaynaklı bağlantılarda bu düzensizliğin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bu durum, yeterli seviyede viskoz hale gelmemiş, arayüzeydeki malzemenin dışarı ekstrüze edilmesi için gerekli sürenin kullanılmamış olmasından kaynaklanmaktadır. Sürtünme süresinin uzun seçilmesi durumunda, arayüzeyin sıcaklık etkisinde kalma süresi artmaktadır. Böylece, aksel basıncın arayüzey malzemesinin dışarı atılmasında daha etkin olacağı ve daha fazla miktarda malzeme taşınımının sağlanacağı bilinmektedir. Bu nedenle yüksek sürtünme süresinin kullanıldığı S3 nolu numunede ADB, S1 nolu numuneye göre daha düzenli bir yapıda meydana geldiği görülmektedir.



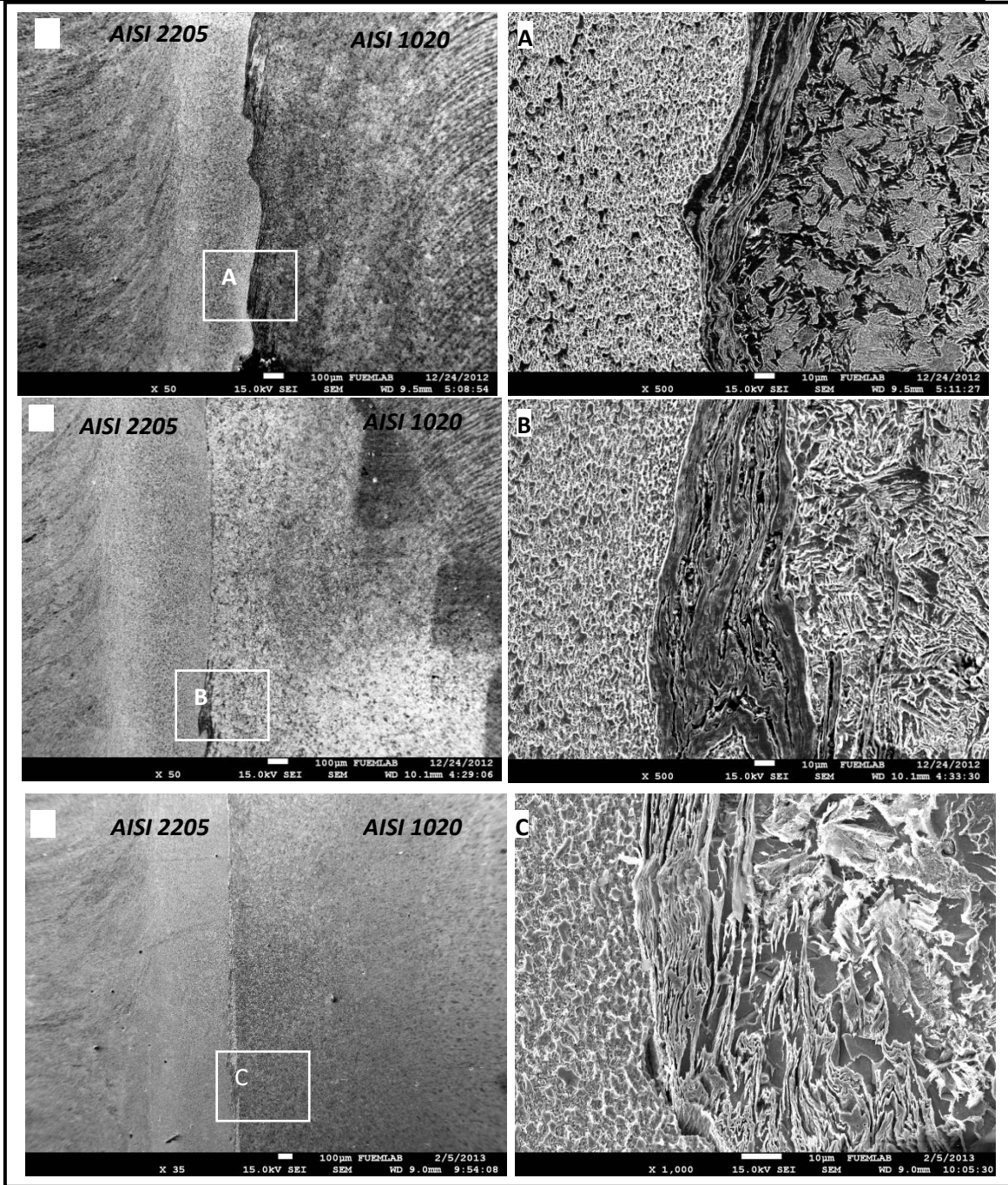
Şekil 2. 1300 dev/dk ile birleştirilen numunelerinin arayüzey SEM görüntüleri
(Figure 2. SEM images of the interface of the samples were joined with 1300 Rpm)

1500 dev/dk devir sayısı, 40 MPa sürtünme basıncı, 4, 6 ve 8sn sürtünme süreleri kullanılarak birleştirilen S4, S5 ve S6 nolu kaynaklı bağlantılara ait kaynak sonrası ara yüzey SEM fotoğrafları Şekil 3'te verilmiştir. SEM fotoğrafları incelendiğinde, her üç numunede de çatlak, boşluk ve bağlantısız bölgenin olmadığı görülmektedir. S4, S5 ve S6 nolu numunelerde sürtünme süresinin



azalmasına bağlı olarak ADB'nin daraldığı ve bu bölgenin azalan sürtünme süresi ile birlikte daha düzenli bir yapı oluşturduğu görülmektedir. Azalan sürtünme süresi ile kayma bantlarının karışım bölgesinde daha dar bir alanda birbirine paralel düzgün bir yapıda meydana gelmiş olmalarına rağmen, sürtünme süresi 4sn olan S4 nolu numunede ADB' deki çizgisel bağlantı hattının girinti ve çıkıntılar meydana getirdiği, sürtünme süresi daha yüksek olan diğer S5 ve S6 nolu numunelerde ise kaynak arayüzeyindeki bağlantı hattının daha düz bir şekilde meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun, bir önceki guruba göre artan devir sayısına rağmen, düşük sürtünme süreleri kullanıldığına, viskoz hale gelen malzemenin dışarı atılabilmesi için yeterli sürenin olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Her üç numune SEM fotoğraflarında aksenal basınç etkisi ile malzemelerin kaynak ara yüzeyinden aktığı ve yön değiştirdiği görülmektedir. Malzemelerin plastik deformasyon yeteneğine bağlı olarak aksenal basıncın etkisiyle aşırı deformasyondan dolayı meydana gelen kayma bantları Şekil 3'te belirgin bir biçimde görülmektedir. Kaynak ara yüzeyine yakın, deformasyonun etkili olduğu bölgeden uzaklaştıkça bu kayma bantlarının yoğunluğu azalmaktadır. Kaynak ara yüzeyine yakın bölgelerde ise basınç etkisi ile oluşan deformasyonun, kaynak ara yüzeyine paralel doğrultuda yönlendirilmiş küçük taneli bir yapı meydana getirdiği görülmektedir. ADB' nin iki tarafındaki bu bölgeler kaynak ara yüzeyinden ana metale doğru gidildikçe azalmıştır. Küçük taneli bu yapının genişliğinin her iki ana malzeme tarafında plastik şekil değiştirme yeteneklerine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Aynı zamanda ince taneli bu yapıda, tanelerin küçülme miktarının da sürtünme süresine bağlı olarak değiştiği artan sürtünme süresinin sıcaklığı arttırması ve plastik deformasyonun daha etkili olmasına neden olduğu için sürtünme süresindeki artış ile birlikte tanelerin daha fazla küçüldüğü görülmüştür.



Şekil 3. 1500 dev/dk ile birleştirilen numunelerinin arayüzey SEM görüntüleri
(Figure 3. SEM images of the interface of the samples were joined with 1500 Rpm)

1700 dev/dk devir sayısı ve 40 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi (4, 6 ve 8sn) kullanılarak birleştirilen S7, S8 ve S9 nolu numunelerin kaynak sonrası birleşme arayüzeyinden alınan mikroyapı SEM fotoğrafları Şekil 4'te verilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait fotoğraflar incelendiğinde; kaynak arayüzeyinde bağlantı kalitesini olumsuz etkileyebilecek çatlak, boşluk ve bağlantısız bölgelerin olmadığı görülmektedir. Her iki malzemenin ADB bölgesinde kayma bantları açıkça görülürken DB, ve KDUB'lerinde

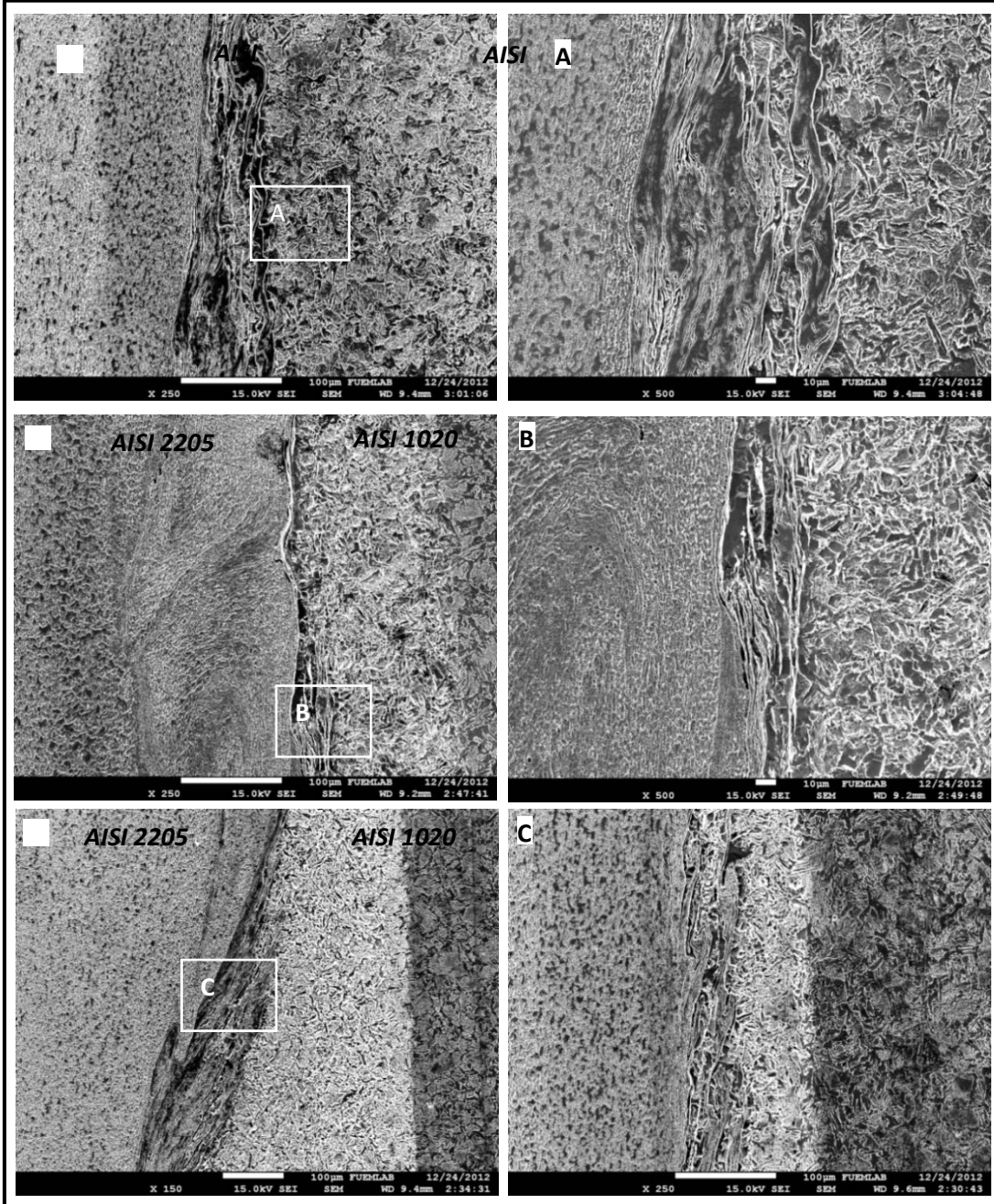


tanelerin plastik deformasyonun etkisi ile yönlendikleri görülmektedir.

Bu kaynaklı bağlantıların arayüzeyinden alınan SEM fotoğrafları incelendiğinde, artan sürtünme süresine bağlı olarak ADB, DB ve KDUB'lerde meydana gelen yapısal değişiklikler net olarak görülmektedir. Bu değişim üzerinde, yüksek devir sayısı ve artan sürtünme süresinin önemli rol oynadığı bilinmektedir [17]. 1300 ve 1500 dev/dk ile birleştirilen numunelerde sürtünme süresindeki artışa bağlı olarak bağlantı arayüzeyinde bulunan ve bağlantı mukavemeti üzerinde olumsuz etkileri bilinen ADB bölgesi genişlediği tespit edilmiştir. Ancak artan devir sayısı (1700 dev/dk) ile birlikte düşük sürtünme sürelerinin kullanılması ADB'nin daha geniş olmasına neden olduğu açıkça görülmektedir. Bu durum artan devir sayısının arayüzey sıcaklığını arttırması sonucu viskoz hale gelen malzeme miktarının artması ancak sürtünme süresinin düşük olması durumunda arayüzeydeki bu malzemenin dışarı atılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte yüksek devir sayıları ile yüksek sürtünme sürelerinin birlikte kullanılması ADB'nin dar ama bu bölgedeki düzensiz yapının önemli oranda artmasına neden olmaktadır.

Bu numuneler bir önceki grup ile kıyaslandığında ise, artan devir sayısına bağlı olarak bağlantı arayüzey sıcaklığı ve dışarı taşan malzeme miktarıda artmıştır. Bu etki nedeni ile 1300 ve 1500 dev/dk devir sayısı ile birleştirilen numunelere göre ADB'de daralma meydana gelirken bu bölgenin her iki tarafındaki DB'lerin genişlediği görülmektedir. Bu bölgelerin geniş olması devir sayısı ile birlikte artan sıcaklığın numuneler üzerinde daha geniş bir alanı etkilemesinden kaynaklanmaktadır. Dönme hızındaki artış kaynak ara yüzeyinden taşan malzeme miktarını arttırmakta ve aşırı deforme olan bölgenin daralmasını sağlamaktadır [18]. Aynı zamanda artan sürtünme süresinin etkisi ile dışarı taşan malzeme miktarı daha fazla arttığı için ADB'nin daha dar bir alanda meydana gelmesine sebep olmaktadır.

AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin ısı iletim katsayısının AISI 1020 çeliğine göre düşük olması nedeni ile plastik şekil değiştirme miktarının AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında daha fazla olduğu görülmektedir. Kırık [10], basınç altında ısıdan etkilenmiş bölgelerde tane küçülmesi meydana geldiğini kaynak yerinden yatay doğrultuda ana malzemelere doğru tane büyüklüğünün giderek arttığını ve belli bir mesafeden sonra ana malzemelerin mikro yapılarına dönüştüğünü belirtmiştir. Mikroyapı fotoğrafları incelendiğinde, kaynak arayüzeyinden ana malzemeye doğru ilerlendiğinde; AISI 1020 çelik tarafında yaklaşık 4 mm sonra, AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında ise yaklaşık 2 mm sonrada tanelerin büyüyerek ana malzemedeki tane büyüklüklerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4. 1700 dev/dk ile birleştirilen numunelerinin arayüzey SEM görüntüleri
(Figure 4. SEM images of the interface of the samples were joined with 1700 Rpm)

Sürtünme kaynaklı bağlantılarda mikrosertlik ölçümleri, farklı parametrelere bağlı olarak ortaya çıkan yapısal değişimi ve bu değişimin, malzemenin sertliği üzerine olan etkisini belirlemek amacıyla yapılmıştır. Bu amaçla SEM analizi için hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Üç farklı devir sayısı (1300, 1500 ve 1700 dev/dk), 40 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi (4, 6 ve 8sn) kullanılarak gerçekleştirilen kaynaklı bağlantıların, birleşme merkezinden ana metale doğru çizgisel bir hat boyunca 0,5 mm aralıklarla yapılan mikrosertlik ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 5, 6



ve 7'de verilmiştir. Sürtünme kaynaklı bağlantılarda mikrosertlik dağılımı literatüre uygun olarak üç bölgede değişmektedir. Bu bölgeler aşırı deforme olmuş bölge (ADB), deformasyona uğramış bölge (DB) ve kısmen deformasyona uğramış bölge (KDUB) olarak adlandırılmaktadır. Kaynak ara yüzeyinde değişiklik gösteren mikrosertlik sonuçları, esas malzemeye ulaşıldığında ana malzeme sertlik değerlerinde elde edilmiştir. Bu kaynaklı bağlantılara ait sertlik profilleri incelendiğinde, her dokuz numunede de benzer bir sertlik dağılımının ortaya çıktığı görülmektedir. Bu dağılımda sertliğin, kaynak arayüzeyine yakın bölgelerde yükseldiği daha sonra bir miktar düştüğü ve esas metale doğru gidildikçe malzemelerin ana sertlik değerlerine ulaştığı görülmektedir.

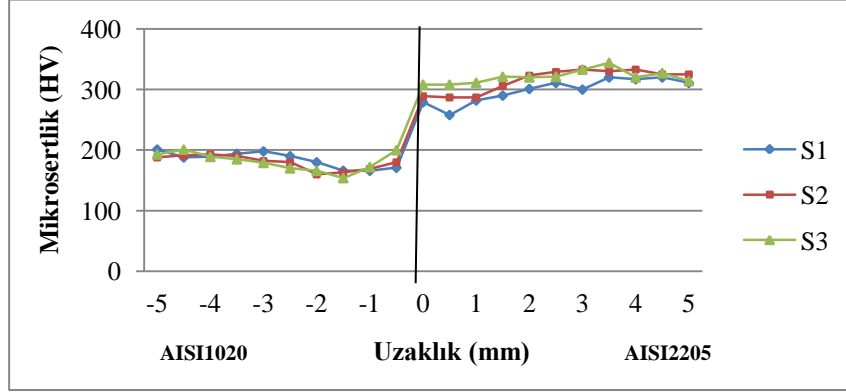
Daha önce yapılan araştırmalarda temas alanındaki sıcaklığın 1sn gibi kısa bir süre içinde 1000°C'ye ulaştığı bildirilmiştir [19]. Bununla birlikte malzemeler arasında ısı iletiminin farklı olması her iki malzeme tarafında IEB' ninde farklı olmasına neden olmuştur. Sertlik profilleri birbirine benzemekle birlikte; sürtünme süreleri ve buna bağlı olarak malzemeler üzerinde oluşan ısı dağılımının farklı olması nedeni ile IEB'lerin genişlikleri farklılık göstermektedir. Yüksek sürtünme süresinin (8sn) kullanıldığı numunelerde IEB'in daha geniş olduğu ve sertlik değerlerinin, 4 ve 6sn sürtünme süreleri ile birleştirilen diğer numunelere göre bir miktar arttığı görülmektedir. Mikrosertlik sonuçları dikkate alındığında, sürtünme süresinin IEB'nin genişliği ve arayüzeydeki sertlik değerleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir [10]. Artan sıcaklık ve dövme etkisinin oluşturduğu deformasyon sonucu sertlik değerlerinin kaynak bölgesine yakın kısımlarda her iki malzeme tarafında yükseldiği ve daha sonra bir miktar düştüğü görülmektedir. Bu bölgedeki sertlik değişiminin, arayüzeyde ulaşılan sıcaklığın temperleme etkisi yapması sonucunda ortaya çıktığı düşünülmektedir.

S1-S9 nolu kaynaklı bağlantılarda, kaynak arayüzeyinden ölçülen en yüksek sertlik değeri S3 nolu numunede 308 HV, en düşük sertlik değeri ise S7 nolu numuneden 268 HV olarak ölçülmüştür.

Yılmaz [20], yaptığı bir çalışma sonucunda; artan sürtünme süresinin, kaynak bölgesinde daha yüksek bir sertlik değeri verdiği, yığılma basınçlarındaki değişim ise maksimum sertliği pek etkilemediğini bildirmiştir. 1300 dev/dk ile yapılan kaynaklı bağlantılarda sertlik değerleri artan sürtünme süreleri ile artmıştır ancak 1500 dev/dk ile yapılan kaynaklı bağlantılarda sürtünme süresindeki artış sertlik değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Bu durum artan devir sayısına paralel olarak artan sıcaklık nedeni ile bağlantı arayüzeyinde deforme olan ve sertliği arttıran yapının arayüzeyden uzaklaştırılması nedeni ile ortaya çıktığı düşünülmektedir. Bununla birlikte 1700 dev/dk ile yapılan kaynaklı birleştirmelerde sürtünme süresindeki artış, sertlik değerlerini arttırmıştır. Bu durumun ise yüksek devir sayılarının, yüksek deformasyon etkisi meydana getirmesi ile ortaya çıkan deformasyon sertleşmesi ve tanelerde meydana gelen küçülme miktarının artmış olması ile ortaya çıktığı düşünülmektedir. Sertlik değerlerinin değişimindeki bu durumun, devir sayısına bağlı olarak ortaya çıkan sıcaklık değerlerine, plastik deformasyon şiddetine ve dışarı taşan malzeme miktarına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Dolayısıyla sertlik değerlerindeki değişim; devir sayısı, sürtünme süresi ve aksenal basıncın birlikte etkisi ile ortaya çıkmaktadır.

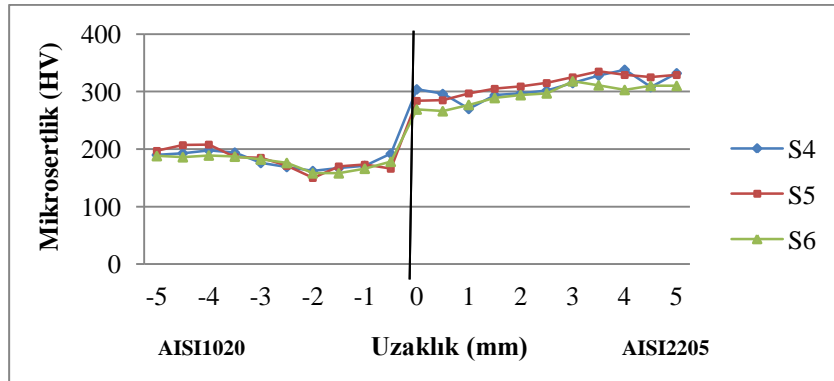
AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik tarafında sertlik değerleri literatürde bildirildiği gibi kaynak arayüzeyinde yüksek çıkarken, kaynak arayüzeyinden ana malzemeye doğru yaklaşık 0,5-1 mm uzaklıkta düşüş göstermiştir. Bu azalmanın, düşük karbonlu bir çelik olan AISI 1020 çelik tarafına doğru gerçekleşen element difüzyonu ve artan

sıcaklığın oluşturduğu temper etkisi ile meydana geldiği düşünülmektedir. Kaynak arayüzüne yakın bölgelerde ise aşırı dövülmüş tanelerin sertlik değerlerini yükselttiği görülmektedir.



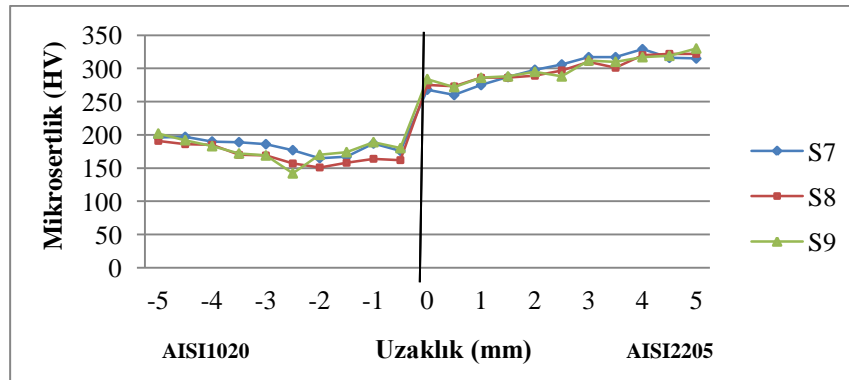
Şekil 5. 1300 dev/dk ile birleştirilen numunelerin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları

(Figure 5. Micro hardness distribution on welding region of samples joined with 1300 Rpm)



Şekil 6. 1500 dev/dk ile birleştirilen numunelerin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları

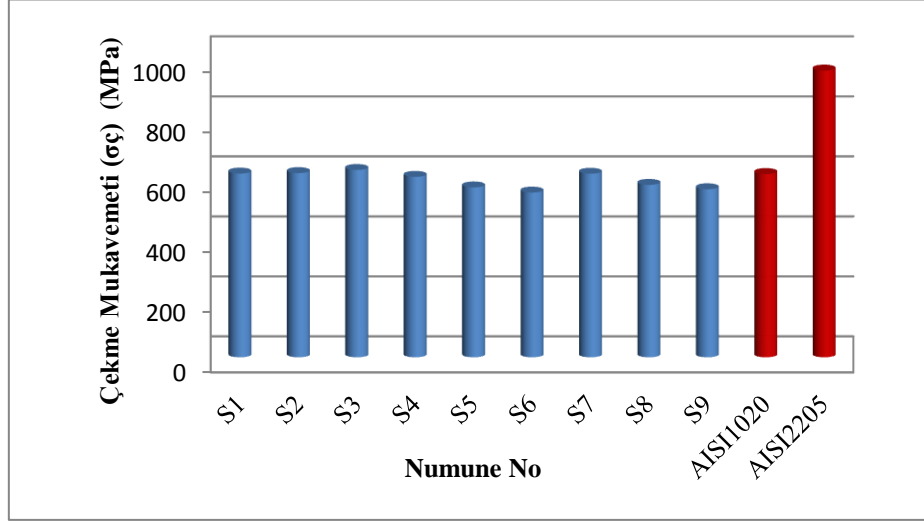
(Figure 6. Micro hardness distribution on welding region of samples joined with 1500 Rpm)



Şekil 7. 1700 dev/dk ile birleştirilen numunelerin kaynak bölgesindeki mikrosertlik dağılımları

(Figure 7. Micro hardness distribution on welding region of samples joined with 1700 Rpm)

Deneylerde kullanılan ana malzemeler (AISI 1020 ve AISI 2205) için çekme deneyi uygulanmış ve AISI 1020 çeliğinin maksimum çekme gerilmesi 610,780 MPa, AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait maksimum çekme gerilmesi 955,681 MPa olarak tespit edilmiştir. Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilen AISI 2205 ve AISI 1020 malzemelere ve kaynaklı numunelerin tamamına ait çekme test sonuçları Şekil 8'de grafik halinde gösterilmektedir.



Şekil 8. Çekme test sonuçlarına ait grafik
(Figure 8. Diagram of results of the tensile test)

1300 dev/dk devir sayısı, 40 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi (8, 6 ve 4sn) kullanılarak birleştirilen S1, S2 ve S3 nolu kaynaklı bağlantılara ait çekme testi ile elde edilen mekanik değerler incelendiğinde AISI 1020 çeliğinin çekme dayanımının üzerinde değerler elde edildiği görülmüştür. Ayrıca bu numunelere ait akma sınırı ve maksimum çekme gerilmesi, artan sürtünme süresine bağlı olarak artış sergilemiştir. S1, S2 ve S3 nolu numunelerden ölçülen maksimum çekme gerilmesi değerleri sırasıyla 612.269, 613.923 ve 624.407 MPa olarak kaydedilmiştir. Özdemir ve Orhan [15], yaptıkları çalışma ile sürtünme kaynaklı bağlantılarda, artan sürtünme süresine bağlı olarak gerilme değerlerinde artma olduğunu bildirmişlerdir.

1500 dev/dk devir sayısı 40 MPa sürtünme basıncı ve 4, 6 ve 8sn sürtünme sürelerinin kullanıldığı S4, S5 ve S6 nolu numunelere ait maksimum çekme gerilmesi değerleri sırasıyla 601.303, 566.199 ve 549.001 MPa olarak kaydedilmiştir. Sürtünme süresinin azalması ile maksimum çekme gerilmesi değerlerinin arttığı görülmektedir. Literatürde artan sürtünme sürelerinin kaynak arayüzeyinde ADB' de meydana getirdiği yapısal değişim nedeni ile çekme mukavemet değerlerini azalttığı bildirilmiştir [10]. Bu durum, sürtünme süresindeki değişimin termo-mekanik etki ve bu etkiye bağlı meydana gelen yapısal değişim üzerinde önemli rol oynadığını göstermektedir. Bu numuneler bir önceki grupta bulunan numunelerle kıyaslandığında, artan devir sayısına bağlı olarak çekme gerilmesi değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durumun, artan devir sayısına bağlı olarak arayüzeyde ulaşılan sıcaklık, dışarı taşan malzeme miktarında artış ve genişlemiş IEB ile birlikte şiddetli termo-mekanik etki sonucu tanelerin yönlenmesine bağlı olduğu düşünülmektedir. Literatürde, malzeme eksenine paralel olmayan yönelmelerin bağlantının mekanik davranışları üzerinde olumsuz etkiye sahip olduğu bildirilmiştir [21]. Sürtünme kaynaklı bağlantıların kaynak arayüzeyine yakın bölgelerde,



tanelerin malzeme eksenine dik doğrultuda yönlendikleri mikroyapı incelemelerinde gösterilmiştir.

1700 dev/dk devir sayısı, 40 MPa sürtünme basıncı ve üç farklı sürtünme süresi (4, 6 ve 8sn) kullanılarak birleştirilen S7, S8, S9 nolu numunelere ait maksimum çekme dayanımları sırasıyla 611.798, 574.616 ve 560.114 MPa olarak ölçülmüştür. S7, S8 ve S9 nolu numunelerde artan sürtünme süresi ile maksimum çekme gerilmesi değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durumun artan sürtünme süresi ile deforme olan bölgenin genişlemesi ve IEB'nin büyümesi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Isı etkisi altındaki bölgenin büyüklüğünün mukavemet değerlerini olumsuz etkilediği literatürde bildirilmiştir [22].

5. SONUÇLAR (RESULTS)

Farklı kaynak parametreleri kullanılarak sürtünme kaynağı ile birleştirilen AISI 2205 / AISI 1020 malzeme çifti sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş ve yapılan incelemeler ile aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir:

- Bu çalışmada; AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik ile kaynak kabiliyeti yüksek ve aynı zamanda uygun fiyat avantajına sahip düşük karbonlu AISI 1020 çelik çifti farklı işlem parametreleri (1300, 1500 ve 1700 dev/dk devir sayısı, 4, 6 ve 8sn sürtünme süresi ve 40 MPa sürtünme basıncı) kullanılarak katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan sürekli tahrikli sürtünme kaynağı ile başarılı bir şekilde birleştirilmiştir.
- Kaynaklı bağlantıların arayüzeyinden alınan mikroyapı fotoğraflarından, sürtünme kaynaklı bağlantıların literatürde belirtilen dört temel bölgeden meydana geldiği görülmüştür. Bu bölgeler kaynak arayüzeyinden başlayarak esas metale doğru sıralandığında a. Aşırı deforme olmuş bölge, b. Deforme olmuş bölge, c. Kısmen deformasyona uğramış bölge ve d. Esas metal olduğu görülmüştür.
- Kaynak sonrası arayüzeyde, farklı kaynak parametrelerine bağlı olarak en önemli yapısal değişimin ADB ve DB'de meydana geldiği görülmüştür. Aşırı deformasyona uğramış bölge, kaynak arayüzeyinin sürtünmesi ile termo-dinamik etki sonucu iki metalin karışımından oluşan bir bant olarak ortaya çıkmaktadır. Deformasyon bölgesinin ise kullanılan parametrelere bağlı olarak numune eksenine göre dik yönelmiş ve küçülmüş tanelerden meydana geldiği görülmüştür.
- Sürtünme kaynaklı bağlantılarda mikrosertlik dağılımının ADB, DB ve KDUB' de değiştiği ancak dokuz numunede de benzer bir sertlik dağılımının ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bu dağılımda sertliğin, kaynak arayüzeyine yakın bölgelerde yükseldiği daha sonra bir miktar düştüğü ve esas metale doğru gidildikçe malzemelerin ana sertlik değerlerine ulaştığı belirlenmiştir. S1-S9 nolu kaynaklı bağlantılarda, kaynak arayüzeyinden ölçülen en yüksek sertlik değeri S3 no'lu numunede 308 HV, en düşük sertlik değeri ise S7 no'lu numuneden 268 HV olarak ölçülmüştür.
- Sürtünme kaynaklı bağlantılarda, kullanılan kaynak parametrelerine bağlı olarak bağlantı mukavemetinin ana malzemeye (AISI 1020) göre daha yüksek çıkabileceği gibi ana malzeme mukavemet değerlerinin de altında da çıkabilmektedir. Bu değişimin bağlantı arayüzeyinde meydana gelen yapısal farklılıklar nedeni ile ortaya çıktığı tespit edilmiş olup kullanılan kaynak parametrelerine bağlı olarak her bir grup



kendi içinde değerlendirildiğinde ADB bölgesinin düzensiz yapıda olmasının bağlantı mukavemetini düşürdüğü görülmüştür.

- 1300 dev/dk devir sayısı kullanılması durumunda yüksek sürtünme süresinin (8sn) bağlantı mukavemetini arttırdığı ancak artan devir sayılarında (1500, 1700 dev/dk) bağlantı mukavemeti açısından düşük sürtünme sürelerinin kullanılması gerektiği görülmüştür. Bunun temel sebebinin arayüzeyde viskoz hale gelen malzemenin dışarı yönlendirilmesi ve uzaklaştırılmasına bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Aynı parametre gurubunun kullanıldığı kaynaklı bağlantıların maksimum çekme gerilmesi değerlerinin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) yönetim birimi tarafından (Proje No.1002) desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Çil, E., (2009). Sürtünme kaynağıyla birleştirilmiş paslanmaz çelik ve bakır parçaların kaynak bölgesi özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
2. Özdemir, N., (2002). Tane küçültülmüş düşük alaşımlı yüksek karbonlu çeliklerin sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirliğinin araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
3. Dinç, D., (2006). AISI 1040 ve AISI 304 çeliklerinin sürtünme kaynak yöntemiyle kaynak edilebilirliğinin araştırılması, Y. Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
4. Çelik, Ö., (2008). Sürtünme kaynağı yapılmış farklı malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi, Y. Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bil. Enstitüsü, Manisa.
5. Gürler, M., (2000). Alüminyum alaşımlarının sürtünme kaynak özellikleri, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul.
6. Meriç, C., Köksel, S.N., Erdoğan, T.M., ve Okur, A., (2008). "Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş farklı malzemelerin kaynak bölgesinin incelenmesi, C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi 4.2, 135-144.
7. Dolutaş H. ve Cavcar M., (2001).. DP. Çeliklerin Kaynağı, Oerlikon Kaynak Elektrodları ve Sanayi A.Ş.
8. Balbi, M., Avalos, M., Bartali, El A., and Armas, A.I., (2009). Microcrack growth and fatigue behavior of a duplex stainless steel, International Journal of Fatigue, 31, 11-12, 2006-2013.
9. Külekçi M.K., Şık, A., ve Kaluç, E., (2008). Effects of tool rotation and pin diameter on fatigue properties of friction stir welded oap joints, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 36/9, 877-882.
10. Kırık, İ., (2012). Sürtünme kaynağı ile birleştirilen AISI 1040/AISI 304L çelik çiftinin elektrokimyasal korozyon davranışının araştırılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
11. Ersözlü, İ., (2006). Sürtünme kaynak makinasının bilgisayar kontrollü çalıştırılması ve SAE 4140 ve SAE 1050 çeliklerine uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.
12. Kırık, İ., Özdemir, N. ve Çalığülü, U., (2013). Effect of particle size and volume fraction of the reinforcement on the



- microstructure and mechanical properties of friction welded MMC to AA6061, Kovove Materialy - Metallic Materials, In press.
13. Satyanarayana V.V., Reddy, M.G., and Mohandas, T., (2005). Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels, *Journal of Materials Processing Technology*, 160, 2, 128-137.
 14. Ozdemir, N., (2005). Investigation of the mechanical properties of friction-welded joints between AISI 304L and AISI 4340 steel as a function of rotational speed, *Materials Letters*, 59, 19-20, 2504-2509.
 15. Ozdemir, N. ve Orhan, N., (2005). Microstructure and mechanical properties of friction welded joints of a fine-grained hypereutectoid steel with 4% Al, *Journal of Materials Processing Technology*, 166, 1, 63-70.
 16. Çelik, S. ve Ersözlü, İ., (2009). Investigation of the mechanical properties and microstructure of friction welded joints between AISI 4140 and AISI 1050 steels, *Materials and Design*, 30, 970-976.
 17. Taşkın, M., Çay, V.V. ve Özdemir, N., (2005). Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş AISI 430/Ç 1010 çelik çiftinin arayüzey mikroyapı değerlendirmesi, *Teknoloji* 8, 1, 65-70.
 18. Ozdemir, N., Sarsılmaz, F. ve Hasçalık, A., (2007). Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI 304L to 4340 steel, *Materials and Design*, 28, 301-307.
 19. Mitelea, I. and Craciunescu, C.M., (2010). Parameter influence on friction welding of dissimilar surface-carburized/volume-hardened alloyed steels, *Materials and Design*, 31, 2181-2186.
 20. Yılmaz, M., (1993). Farklı takım çeliklerinin sürtünme kaynağında kaynak bölgesinin incelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
 21. Ozan, S. ve Çay, V.V., (2004). Sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AISI 420 / AISI 1010 çelik çiftinin arayüzey mikroyapı özelliklerinin incelenmesi, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*.
 22. Kırık, İ. ve Özdemir, N., (2012). Otomotiv endüstrisinde kullanılan sürtünme kaynak makinesi imalatı ve farklı özellikteki AISI 1040/AISI 304L çelik çiftlerinin sürtünme enerjisi kullanılarak birleştirilmesi, *E-Journal of New World Sciences Academy*, 1308-7231, 7, 3, 2A0077.