

SÜRTÜNME KAYNAĞI İLE BİRLEŞTİRİLEN SONDAJ BORULARININ YORULMA DAVRANIŞLARI

Hayriye ERTEK EMRE*, Ramazan KAÇAR*

*Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Müh. 78050, KARABÜK
hayriyeertek@karabuk.edu.tr, rkacar@karabuk.edu.tr

(Geliş/Received: 14.08.2012; Kabul/Accepted: 11.04.2013)

ÖZET

Sondaj endüstrisinde kullanılan çelik borular servis şartlarında farklı yükler altında kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada; N80-N80 aynı cins ve N80-42CrMo4, N80-S355J2 farklı cins çelik borular sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Birleştirmelerin yorulma davranışları araştırılarak, bulgular sertlik değerleri ve çekme dayanımı ile beraber değerlendirilmiştir. Sürtünme kaynaklı birleştirmelerin yorulma davranışlarının artan çekme dayanımı ve sertlik ile iyileştiği bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: N80 sondaj boru çeliği, 42CrMo4, S355J2, Sürtünme kaynağı, Yorulma dayanımı

FATIGUE BEHAVIOURS OF FRICTION WELDED DRILL PIPES

ABSTRACT

The drilling pipes are used under the different load in the service condition. In this study, N80-N80 similar drill pipes and N80-42CrMo4, N80-S355J2 dissimilar steel pipes were welded with friction welding process. The fatigue behavior of welded samples was investigated and the results were interpreted by considering the hardness values and tensile strength. It was found that the fatigue behaviour of friction welded samples recovered by the increasing tensile strength and hardness.

Keywords: N80 drill pipe steel, 42CrMo4, S355J2, Friction welding, Fatigue strength

1.GİRİŞ(INTRODUCTION)

Sondaj endüstrisinde kullanılan borunun kullanım ömrü ve ekonomiklik unsuru gözetilerek gövde kısmı genellikle API standardında hazırlanan sondaj boru çeliğinden, dişli uç kısmı ise genellikle düşük alaşımli 42CrMo4 veya S355J2 çeliğinden üretilmektedir. Bu durum sondaj endüstrisinde kullanılan aynı ve farklı cins boruların kaynakla birleştirilerek kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Ancak yapılan literatür araştırmaları kaynaklı bağlantı ve ITAB 'dan kaynaklanan hataların sondaj endüstrisinde önemli bir payının olduğunu göstermektedir [1].

Bilindiği üzere ergitmeli kaynak yöntemleri ile birleştirme sonucunda termal çevrime bağlı olarak birleşme bölgesinin özelliklerinde değişim olması kaçınılmazdır. Oluşan bu değişimin kabul edilebilir sınırlarda olması ve tasarımda sorun oluşturmaması çok önemlidir. Bu amaçla birleştirme işleminde belirtilen sakıncaları giderecek şekilde kaynak

yöntemi seçilmelidir. Sürtünme kaynak yöntemi, bu noktada aynı ve farklı cins malzemelerin birleştirilmesinde başarılı bir şekilde uygulanan katı hal kaynak yöntemi olarak ön plana çıkmaktadır [2,3]

Sondaj sırasında yer altına inen aynı ve farklı cins boru birleştirmeleri statik, dinamik ve ani kuvvetlere maruz kalmaktadır. Bu amaçla; sürtünme kaynaklı bağlantıların çekme dayanımları, toklukları ve yorulma davranışları önem arz eder. Şahin [4] yaptığı bir çalışmada sürtünme kaynağı ile birleştirilen yüksek hız çelikleri ile orta karbonlu çelik bağlantısının yorulma davranışını incelemiştir. Birleştirmenin yorulma dayanımının birleştirilen çeliklerin dayanımlarından daha düşük olduğunu belirtmiştir. Şahin [6], yürüttüğü diğer bir çalışmada östenitik paslanmaz çeliklerin (AISI304) sürtünme kaynaklı birleştirmelerinin arayüzey özelliklerini incelemiş ve kaynaklı bağlantılarının esas metale göre yorulma dayanımlarının, çekme dayanımlarıyla benzerlik gösterdiğini ve esas metal yorulma

Çizelge 1. Sondaj boruların kimyasal bileşimi (% ağırlık) (Chemical composition of drilling pipes (% wt))

Kalite %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Co	W
N80	0,35	0,27	1,43	<0,001	0,01	0,09	0,007	0,05	0,06	0,01	0,01
42CrMo4	0,41	0,23	0,68	0,01	<0,002	0,96	0,15	0,027	<0,001	0,006	0,01
S355J2	0,2	0,43	1,25	0,017	0,004	0,004	<0,005	0,03	<0,001	0,002	<0,01

Çizelge 2. Sondaj boruların mekanik özellikleri (Mechanical properties of drilling pipes)

Kalite %	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	%Uzama	Sertlik (HV _{0,2})
N80	≥689	552~758	<16	242
42CrMo4	670-720	417	11-18	300
S355J2	490-630	355	22	208

dayanımlarına yakın olduğunu rapor etmiştir. Ochi vd. [5] sürtünme kaynak yöntemi ile birleştirilmiş SUS304 paslanmaz çelik bağlantılarının yorulma ve çekme dayanımını incelemiştir. Bazı birleştirmelerin yorulma dayanımlarının ana malzeme yorulma dayanımından daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun sebebi olarak da kaynak birleşme arayüzeyinin hemen yanındaki malzemenin çalışma sertleşmesi sonucu sertleşmesini delil olarak göstermektedirler.

Literatür araştırmaları genel olarak [7-12] farklı cins malzemelerin sürtünme kaynaklı birleştirmelerinde mikroyapı karakteristikleri ve birleşme arayüzeyinde faz oluşumları üzerinde yoğunlaşmaktadır. Çalışmalarda birleştirmelerin sertlik dağılımı ve çekme dayanımları etraflıca araştırılmış ve raporlanmıştır. Ancak; bu konuda yapılan yorulma dayanımı çalışmaları ise çok sınırlı kalmıştır. Dikkat çeken en önemli hususlardan bir tanesi de sondaj endüstrisinde kullanılan aynı ve farklı cins boruların sürtünme kaynaklı birleştirmelerinin yorulma davranışları ile ilgili bilgiye rastlanılmamaktadır.

Bu sebeple çalışmada, sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş aynı ve farklı cins boru bağlantılarının servis şartlarında maruz kaldığı dinamik kuvvetler göz önünde bulundurularak yalnızca yorulma davranışları araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

2.1 Malzeme ve metot (Material and method)

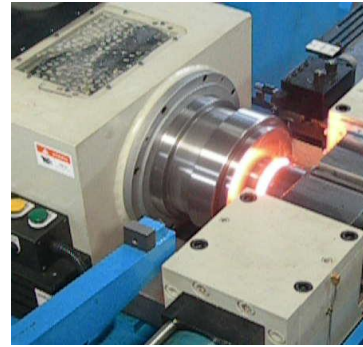
Bu çalışmada sondaj endüstrisinde geniş bir yelpazede kullanılan üç farklı çelik boru kullanılmıştır. Sürtünme kaynağı ile birleştirilmek

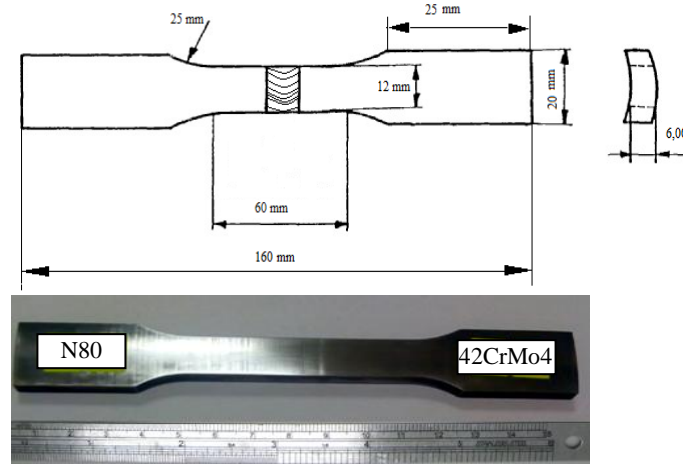
üzere seçilen borular N80, 42CrMo4 ve S355J2 kalitedir.

Birleştirmede kullanılacak sondaj boruları Ø88,9 çap, 9 mm kesit kalınlığı ve 100 mm boyunda olacak şekilde tornada işlenerek hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılmış olan sondaj borularının kimyasal kompozisyonları Çizelge 1 'de, mekanik özellikleri de Çizelge 2 'de verilmiştir.

2.2 Deney Numunelerinin Birleştirilmesi (Joining of test samples)

Bu çalışmada, sondaj endüstrisinde en çok kullanılan N80 (API- 5CT), 42CrMo4 ve S355J2 kalite çelik borulardan 3 'er adet; N80-N80 aynı cins ve N80-42CrMo4, N80-S355J2 farklı cins boru birleştirmeleri gerçekleştirilmiştir. Sürtünme kaynak işlemi, Roto-friction sürtünme kaynak makinesinde yapılmıştır (Şekil 1). Kaynak parametreleri; sürtünme süresi 10 sn, yığma süresi 9 sn, devir sayısı 20 devir/sn, sürtünme basıncı 50 bar (5MPa), yığma basıncı 143 bar (14,3 MPa) olarak ayarlanmıştır.

**Şekil 1.** Sürtünme kaynak işlemi (Friction welding processes)



Şekil 2. EN 895 standardında hazırlanmış çekme numunesi (Tensile test sample prepared according to EN895)

2.3. Birleştirmelere Uygulanan Çekme Testi (Tensile test applied for welded sample)

Çekme test numunesi elde edebilmek amacıyla kaynaklı borunun iç ve dış yüzeylerinden kaynak sonrasındaki plastik deformasyon çıkıntıları ve kalıntılar tornada talaş kaldırılarak 6 mm cidar kalınlığına düşürülmüş ve kaynak yönüne dik EN 895 standardına göre çekme test numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 2).

Çekme deneyi 100 kN kapasiteli Schimadzu marka çekme test cihazında 5mm/dak çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel hataları minimize edebilmek amacıyla her bir deney çifti için 3 adet deney numunesi test edilmiştir.

2.4. Birleştirmelerin Sertlik Ölçümü (Hardness measurement of welded samples)

Kaynak sonrası numunelerin sertlik ölçümü ve metalografik incelemelerini gerçekleştirmek için, numune yüzeyleri birleşme bölgesine dik doğrultuda diskotom kesme cihazında kesilmiştir. Numuneler sırasıyla 320, 600, 800, 1000 ve 1200 meshlik zımparalar yardımıyla zımparalanmıştır. Yüzeyleri zımparalanan numuneler 3 µm ve 1 µm'luk elmas pasta ile parlatılmıştır. %2 lik nitrik asit çözeltisi ile dağlanan numuneler mikrosertlik ve metalografik inceleme (optik mikroskop, SEM analizi) için hazır duruma getirilmiştir.

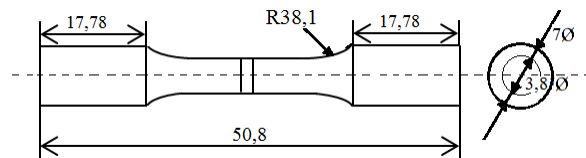
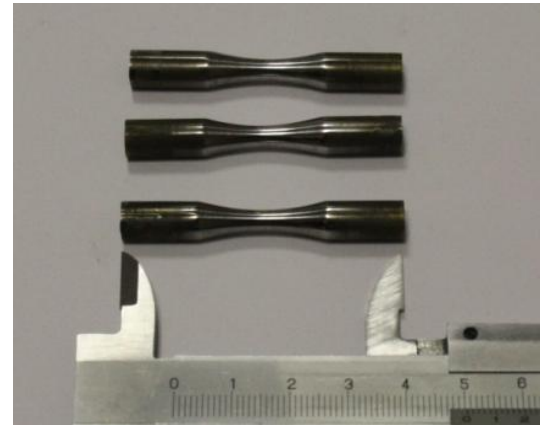
Sertlik dağılımı kaynaklı bağlantıyı tamamen alacak şekilde aynı hatta ve esas metalden kaynak eksenine doğru belirli ölçüm aralıkları ile mikrosertlik ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Ölçme işlemi FV-700 HMV MICRO HARDNESS TESTER marka Vickers sertlik ölçüm cihazında

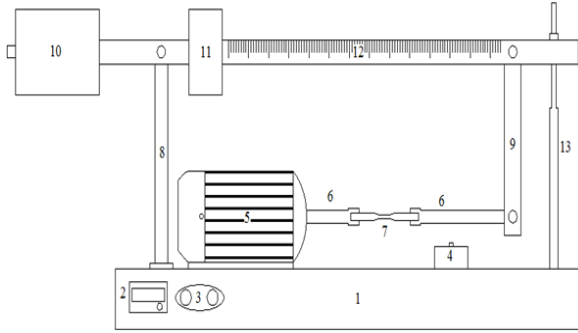
yapılmıştır. Deney işlemi sırasında elmas piramit uca 200gr yük uygulanmıştır.

2.5. Birleştirmelere Uygulanan Yorulma Testi (Fatigue tests applied for welded samples)

Elde edilen sürtünme kaynaklı boru birleştirmelerini bir bütün şekliyle yorulma testine tabii tutmak mümkün olmadığı için birleştirilen boru üzerinden, numune ortası kaynak bölgesine denk gelecek şekilde, Şekil 3'deki boyutlarda hazırlanan içi dolu silindirik yorulma numuneleri Wöhler tipi döner eğmeli test cihazında yorulma testine tabii tutulmuştur. Şekil 4'de Wöhler tipi yorulma test cihazı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3. Yorulma deney test numunesi boyutları (Fatiguetest samples dimension)



- | | |
|-------------------------|-----------------------|
| 1- Alt tabla | 8- Mesnet elemanı |
| 2- Numaratör (sayaç) | 9- Dikey yük iletici |
| 3- Start-stop butonları | 10- Denge ağırlığı |
| 4- Şviç anahtar | 11- Hareketli ağırlık |
| 5- Motor | 12- Sürgü kolu |
| 6- Numune tutucular | 13- Dengeleme çubuğu |
| 7- Numune | |

Şekil 4. Wöhler tipi yorulma test cihazı
(Wöhler type fatigue test machine)

Her bir aynı ve farklı cins boru birleştirmesi için 9 adet yorulma numunesi hazırlanmıştır. Eğmeli yorulma makinesi kullanılarak birleştirmelerin yorulma davranışları belirlenmeye çalışılmıştır. Tüm deneylerde sınır çevrim sayısı olarak literatürde tavsiye edilen $N=10^7$ alınmıştır [13-15]. Deneylerde kullanılan eğilme momenti (M_e) değerlerinden, eğilme gerilmesi (σ) aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\sigma(\text{MPa})=32.P.L/(\pi.d^3) \quad (1)$$

Burada;

σ : Gerilme (MPa)

P: Uygulanan kuvvet (Newton)

L: Uzaklık (mm)

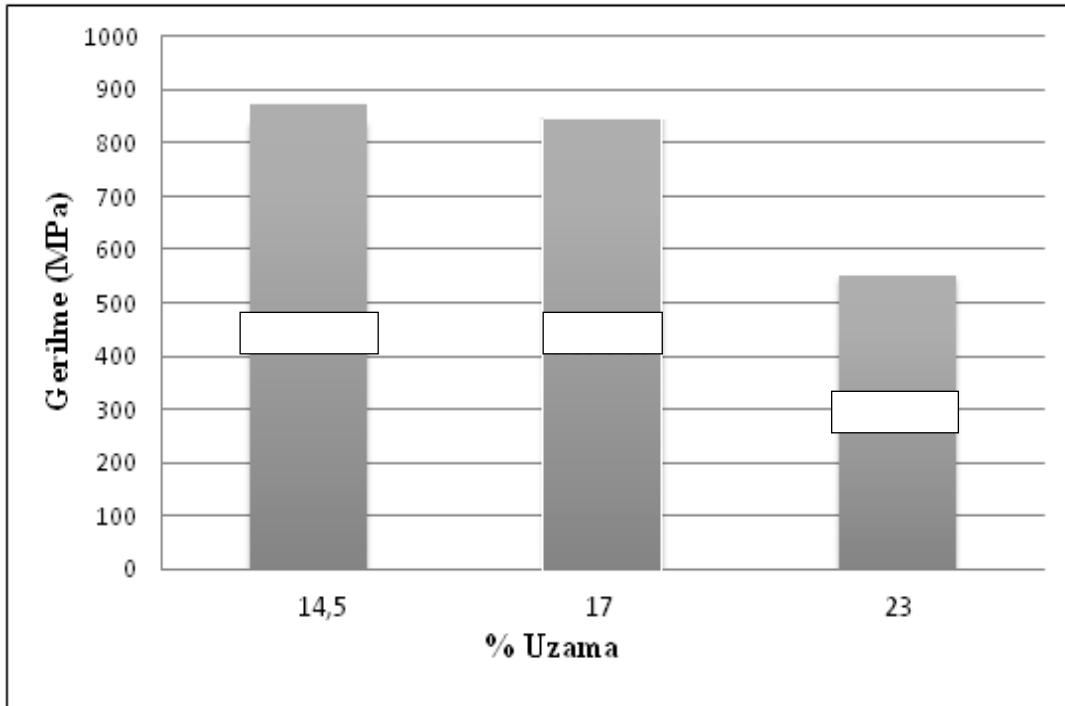
d: Numune çapı (ince çap) (mm)

Yorulma testlerinde numunelerin başlangıç gerilmelerinin tespiti için numunelere, önce düşük çevrim değerlerinde çatlama ve kopma gösterecek derecede yüksek gerilmeler uygulanarak yorulma deneylerinin kalibrasyonu yapılmıştır. Daha sonra bütün numunelere yüksek çevrimli yorulma testleri uygulanmıştır ve sonuç olarak çevrim sayıları belirlenip S-N diyagramı elde edilmiştir. Wöhler eğrileri en yüksek gerilmeye karşılık gelen çevrim sayısı olarak logaritmik işaretlenerek çizilmiştir.

3. SONUÇLAR VE İRDELENMESİ (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1 Çekme Test Sonuçları (Tensile test results)

Servis şartlarında statik bir çekme kuvveti etkisi altında kalan birleştirmenin davranışını belirlemek üzere hazırlanan test numunelerine çekme deneyi uygulanmıştır. Her bir şart için üç deney numunesi test edilmiş ve ortalama sonuçlar grafiksel olarak Şekil 5 'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Kaynaklı birleştirmelerin çekme dayanımları (Tensile strength of welded samples)

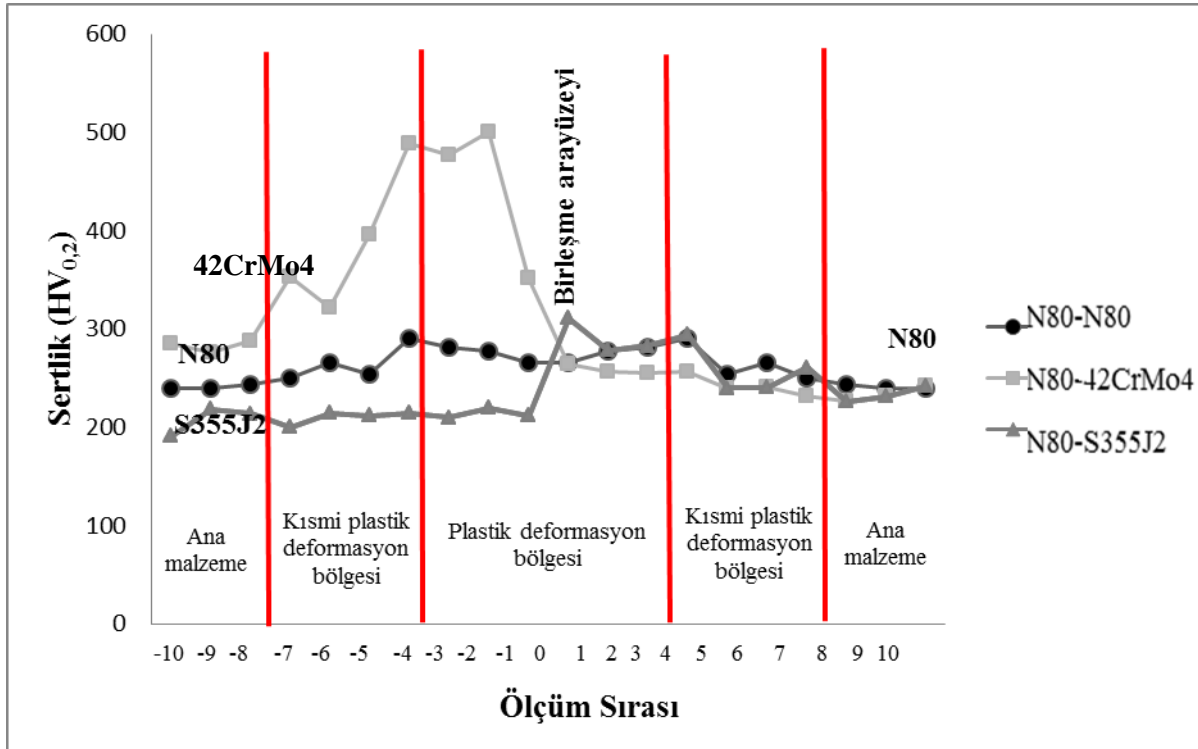
Şekil 5'den görüldüğü gibi, çalışmada kullanılan tüm sürtünme kaynaklı boru birleştirmelerinde en yüksek çekme dayanımı N80-42CrMo4 farklı cins boru birleştirmesinde, daha sonra N80-N80 aynı cins boru birleştirmesinde elde edilirken, en düşük çekme dayanımı N80-S355J2 farklı cins boru birleştirilmesinde tespit edilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin en yüksek % uzama miktarı ise N80-S355J2 farklı cins boru birleştirilmesinde tespit edilmiştir. N80-N80 aynı cins boru birleştirmesinde çekme dayanımı 842MPa ve % uzama miktarı %17 olarak tespit edilmiştir. N80-42CrMo4 farklı cins boru birleştirmesinde çekme dayanımı 872MPa ve % uzama miktarı %14,5, N80-S355J2 birleştirilmesinde ise çekme dayanımı 551MPa ve % uzama miktarı %23 bulunmuştur.

N80-N80 aynı cins ve N80-42CrMo4 farklı cins boru birleştirmesinde test numunesi N80 ana malzeme tarafından koparken, N80-S355J2 birleştirilmesinde kopma S355J2 tarafından gerçekleşmiştir. Çalışmada kullanılan tüm sürtünme kaynaklı boru birleştirmelerinin birleşme bölgesinden değil de esas metalden kopması bağlantının kabul edilebilir ve sağlam bir birleştirme olduğuna işaret etmektedir.

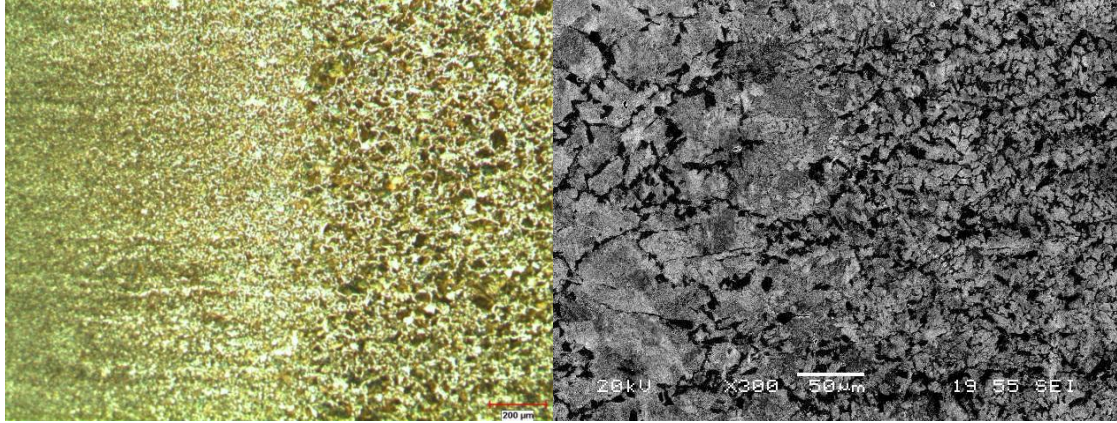
3.2 Sertlik Ölçüm Sonuçları (Results of hardness measurement)

Aynı ve farklı cins kaynaklı birleştirmelerin sertliğini belirlemek amacıyla numune üzerinde ana metalden birleşme ara yüzüne doğru sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik dağılımı Şekil 6'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Çalışmada birleştirmeler üç ayrı bölge olarak değerlendirilmiştir [3]. Bu bölgeler kaynak birleştirme arayüzünde tamamen plastik deformasyona maruz kalmış bölge, tane boyutunun birleşme arayüzeyi bölgesine göre daha büyük olduğu kısmen deformasyona uğrayan bölge ve deformasyona uğramamış esas metalin olduğu bölge.

Şekil 6'dan görüldüğü gibi tüm birleştirmeler için birleşme arayüzünün hemen yanındaki bölgede en yüksek sertlik değerine ulaşılmıştır. Bu sertlik artışının nedeni ise tanelerin parçalanması ve incelenmesi ise termomekanik karıştırma sonucu olan düşük sıcaklıklarda yüksek plastik deformasyona bağlı yeniden kristalleşmeyle ilgili olduğu düşünülmektedir. Benzer şekilde Lippold ve Odegard[16]'da yürüttükleri çalışmada düşük sıcaklıklarda veya yüksek deformasyon hızlarında daha fazla yeni tanecik çekirdeklendiğini ve sonuç olarak daha ince taneli yapının oluştuğunu rapor etmişlerdir. Şekil 7'de görüldüğü gibi sürtünme kaynağı yapılmış N80-N80 birleştirmesinin plastik deformasyon bölgesinin tane boyutu, dinamik olarak yeniden kristalleşmiş halde, ana malzemeye göre daha ince yapıdadır.



Şekil 6. Sürtünme kaynak numunelerinin sertlik profili(Hardness profile of friction welded samples)



Şekil 7. Plastik deformasyon bölgesinde yeniden kristalleşen taneler (Optik mikroskop 5x, SEM 2000 x) (Dynamic recrystallized grains in plastic deformed zone).

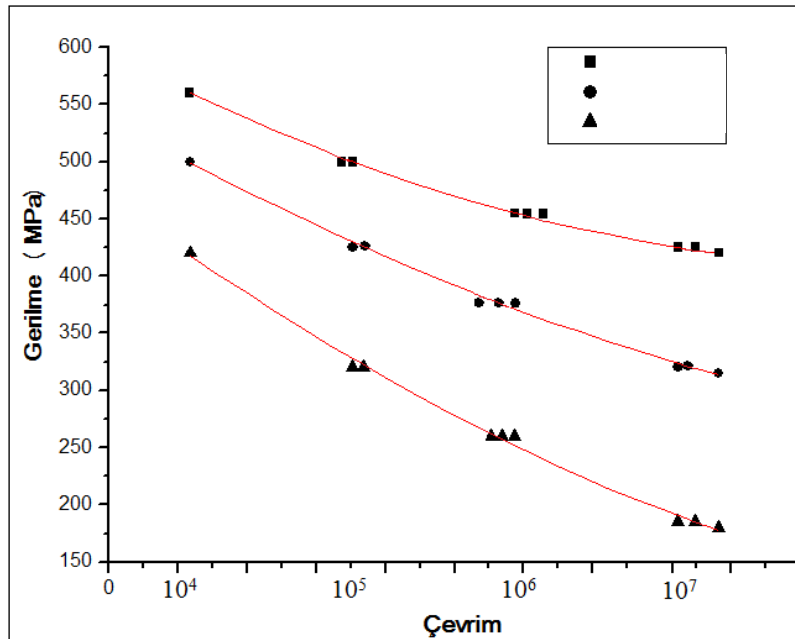
Şekil 6' da görüldüğü gibi N80-N80 aynı cins birleştirmesinde N80 borunun sertliği ana metalde yaklaşık 242 HV_{0,2} ölçülürken kısmi deformasyona uğrayan bölgede ortalama 246 HV_{0,2} olarak bulunmuştur. En yüksek sertlik değeri plastik deformasyon bölgesinde 273 HV_{0,2} olarak tespit edilmiştir. Birleşme ara yüzeyinde ise sertlik değeri yaklaşık olarak 260 HV_{0,2} olarak ölçülmüştür.

N80-42CrMo4 farklı cins boru birleştirmesi ara yüzeyinde sertlik değeri yaklaşık olarak 320 HV_{0,2} olarak ölçülmüştür. 42CrMo4 boru tarafının sertliği ana metalde yaklaşık olarak 305 HV_{0,2}, kısmi deformasyona uğrayan bölgesinde yaklaşık olarak 335 HV_{0,2} olarak ölçülmüştür. 42CrMo4 boru tarafının plastik deformasyona uğrayan bölgesinde sertlik maksimum değerine ulaşmış ve en yüksek 488 HV_{0,2} ölçülmüştür.

N80-S355J2 birleşme ara yüzeyinde sertlik değeri yaklaşık olarak 232 HV_{0,2} olarak ölçülmüştür. S355J2 boru tarafının sertliği ana metalde yaklaşık olarak 208 HV_{0,2}, kısmi deformasyona uğrayan bölgede ortalama 210 HV_{0,2} olarak ölçülmüştür. S355J2 boru tarafının plastik deformasyona uğrayan bölgesinde sertlik en yüksek 220 HV_{0,2} ölçülmüştür.

3.3. Yorulma Test Sonuçları (Fatigue Test Results)

Çalışmada kullanılan aynı ve farklı cins boru birleştirmeleri servis şartlarında dinamik kuvvetlere de maruz kalmaktadırlar. Elde edilen sürtünme kaynaklı boru birleştirmelerinden hazırlanan yorulma numuneleri Wöhler tipi test cihazında yorulma testine tabi tutulmuşlardır. Deney sonucu elde edilen Wöhler eğrileri en yüksek gerilmeye karşılık gelen çevrim sayısı olarak işaretlenerek sonuçlar Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Numunelerin yorulma deney sonucu (S-N grafiği) (Fatigue test results of samples (S-N curve))

Şekil 8 'den görüldüğü gibi birleştirilen aynı ve farklı cins sondaj borularının yorulma dayanımı değerleri incelendiğinde tüm numuneler için 10^7 çevrim sayısı olan yorulma ömrüne ulaşılmıştır. N80-42CrMo4 farklı cins boru birleştirmesinin yorulma dayanımı en yüksek 425MPa olarak tespit edilmiştir. N80-N80 aynı cins boru birleşmesinin yorulma dayanımı 320MPa, bulunurken, N80-S355J2 birleştirmesi yorulma dayanımı ise en düşük 185MPa olarak tespit edilmiştir. İlave olarak aynı ve farklı cins boru birleştirmelerinin yorulma dayanım sonuçları ile çekme test sonuçlarının paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. En yüksek çekme dayanımına sahip olan N80-42CrMo4 farklı cins boru birleştirmesinin yorulma dayanımının en yüksek ve en düşük çekme dayanımına sahip N80-SS355J2 birleştirmesinin yorulma dayanımı, birleştirmeler içerisinde en düşük bulunması bu durumu net olarak göstermektedir. Bu durumun birleştirmelerin kaynak bölgesinin sertlik dağılımı ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Bunda; sürtünme kaynak işlemi sürecinde meydana gelen termomekanik işlemin kaynaklı bağlantının birleşme arayüzeyi ve ısı tesiri altında kalan bölgesinde meydana gelen yapısal dönüşümler ve bazı mukavemet arttırma mekanizmalarının etkili olduğu düşünülmektedir. Takdir edilmelidir ki kaynak sırasında ulaşılan sıcaklık ve aynı zamanda kaynak sonrasında soğuma hızı ve kimyasal kompozisyon yapısal dönüşümler üzerindeki etkin parametrelerdendir. Bir başka çalışmada belirtildiği üzere; özellikle; N80-42CrMo4 farklı cins boru birleştirmesinin birleşme arayüzeyinin 42CrMo4 tarafında oluşan martenzitik yapı sertlikte artışa sebep olmuştur [16].

Sürtünme kaynağı yapılan birleştirmede sürtünme ve deformasyona bağlı olarak malzemelerin birbirine karıştığı bir bölge ile bunun etrafında her iki ana malzemenin ısıdan etkilenen bölgeleri bulunmaktadır. Isıdan etkilenen bölgede ulaşılan sıcaklık yaklaşık olarak malzemelerin ergime sıcaklığının yarısına kadar yükseldiği veya bu sıcaklığın üzerine bir miktar çıktığı yerlerdir [17,18]. Bu durum sürtünme kaynağı sırasında farklı malzemelerde martenzitik içyapı dönüşümü meydana getirebilmektedir. Düşük alaşımlı çeliklerde mikroyapının mekanik özelliklere etkisi çok fazladır. Örneğin çeliğin martenzit yapısı en önemli etkiye sahiptir. Çeliğin martenzit hacim oranı arttıkça yorulma dayanımı değeri artmaktadır [19,20].

N80-42CrMo4 malzeme birleştirmesinde literatürde belirtildiği gibi [21] özellikle martenzitik dönüşüm gösterme eğilimi olan 42CrMo4 malzemenin N80-42CrMo4 birleşmesinde, N80-N80 birleşmesi ve N80-S355J2 birleşmesine göre birleşme bölgesindeki sertlik artışına neden olmaktadır.

Bu durum birleştirmelerin çekme dayanımını arttırırken aynı zamanda yorulma dayanımı üzerinde

olumlu etki meydana getirdiği düşünülmektedir. Sertlik ve çekme dayanımı yüksek olan malzemelerde yorulma dayanımının yüksek çıkması da beklenen bir durumdur [22,23].

Aynı ve farklı cins boru birleştirmelerinin bilhassa birleşme arayüzeyine sınır plastik deformasyon bölgesinde birleşme sırasında sürtünme ve deformasyona bağlı olarak meydana gelen sıcaklık artışı ile dinamik olarak yeniden kristalleşmenin olduğu rapor edilmektedir [24]. Dinamik olarak yeniden kristalleşme durumuna göre tane yapısının incelenmesi bu bölgenin sertliğinin artmasına ve dolayısıyla ile çekme mukavemetinin artmasına ve dolayısıyla yorulma davranışına etki eden ikinci unsur olarak düşünülebilir.

Farklı cins boru birleştirmelerinde şu üçüncü hususta göz önünde bulundurulmalıdır. Farklı kimyasal bileşime, dolayısıyla ile farklı mekanik özelliklere sahip iki çelik borunun kaynak işlemi sırasındaki, sürtünme, deformasyon, karışım ve difüzyon gibi unsurlara bağlı olarak ortaya çıkan yapı ve özellikler birleştirmeyi oluşturan malzemelerin mikroyapı ve özelliklerinden farklı olması kaçınılmazdır. Bu durum kendisini birleştirmenin arayüzey, tamamen ve kısmen plastik deformasyona uğrayan bölgelerinde net olarak gösterir. Bağlantının sertlik artışı ile birlikte çekme dayanımı artarken yorulma davranışlarında da bir iyileşme beklenir.

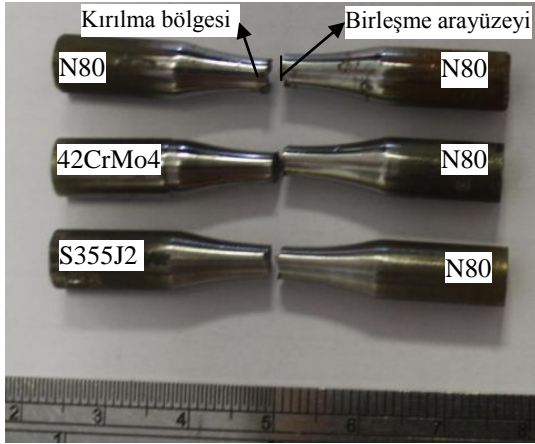
Çalışmada en göze batan hususlardan bir tanesi de farklı cins boru birleştirmelerinde mekaniksel özellikleri düşük olandan, daha yüksek mekanik özellikleri olana yakın değerlerde bir yorulma dayanımının elde edilmesidir. Bu durum tamamen sürtünme kaynak yöntemine bağlı olarak meydana gelen yapısal dönüşüm, difüzyon, tane incelenmesi ve çalışma sertleşmesine bağlı olarak bağlantının her iki yanındaki sertlik ve mukavemet artışının derecesine bağlı olarak değişmektedir.

Örneğin; Paventhan vd.[25], tarafından yürütülen bir çalışmada orta karbonlu çelik ve östenitik paslanmaz çelik malzeme çiftinin sürtünme kaynağının yorulma davranışını incelemişlerdir. Çalışma neticesinde östenitik çelik ana malzemenin, orta karbonlu çeliklere göre çekme, uzama ve ana malzeme dayanımının daha yüksek olması sebebiyle orta karbonlu çeliklere göre daha yüksek bir yorulma dayanımı sergilediği sonucuna varmışlardır. Ayrıca sürtünme kaynaklı birleştirmelerin çekme dayanımı, uzama ve çentik darbe dayanımının birleştirilen esas malzemedan daha düşük olması da, birleştirmelerin daha düşük yorulma dayanımı sergilemelerinin nedeni olarak düşünülmektedir.

Deney numunelerinin yüzey kaliteleri de yorulma davranışları üzerinde etkin olan hususlardan bir tanesidir. Yüzey işleme kalitesi arttıkça malzemenin

yorulma davranışı da olumlu yönde etkilendiği diğer çalışmalarda rapor edilmiştir [26,27]. Sert malzemelerin talaşlı işleme kalitesi arttığından dolayı düzgün işlenmiş, yüzeyinde işleme izi ve çentigi bulundurmeyen numunelerin yorulma ömürlerinin uzun olması beklenir.

Yorulma deneyi sonrasında koparak ayrılan deney parçaları metalografik dağlama işlemine tabi tutularak incelenmiş ve yorulma kırılmalarının olduğu yer saptanmıştır. Yorulma kırılmalarının meydana geldiği bölge makrografik olarak Şekil 9 'da gösterilmiştir. Yorulma kırılması kesitin ince olduğu kaynaklı bölgenin hemen yanındaki sertliği tamamen plastik deformasyon bölgesine göre daha düşük olan kısmen plastik deforme olan bölgesinde olduğu düşünülmektedir. Yapılan çalışmalarda da belirtildiği gibi, kaynaklı bağlantıların yorulma testi sonrasında kırılmanın bağlantının en ince kesitli olduğu yerden, en zayıf ve hassas bölgesi olan ısıdan etkilenmiş bölgede yada çentik olan yerden kırıldığı görülür [26,28].



Şekil 9. Kırık yorulma numuneleri (Fractured fatigue test samples)

4. GENEL SONUÇLAR (CONCLUSION)

Yürütülen bu çalışmada, genel olarak elde edilen bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Sürtünme kaynağı ile birleştirilen aynı ve farklı cins sondaj boruları servis şartlarında dinamik, tekrarlı gerilmeler altında başarı ile kullanılabilir. Bu durum sondaj borularının birleştirmesinde sürtünme kaynak yönteminin ergitmeli kaynak yöntemleri yerine tercihen kullanılabilirine işaret etmektedir.
- Kaynaklı bağlantıların yorulma davranışlarının çekme dayanımları ve sertlik ölçümleri ile paralellik gösterdiği tespit edilmiştir. Yapısal dönüşümler ve yeniden kristalleşmeyle oluşan tane inceliği veya çalışma sertleşmesiyle meydana

gelen mukavemet artışı sertlik ve çekme dayanımını artırırken aynı zamanda yorulma dayanımı üzerinde olumlu etki meydana getirdiği düşünülmektedir.

En yüksek yorulma dayanımı N80-42CrMo4 birleştirmesinde, en düşük ise N80-S355J2 farklı cins boru birleştirmesinde tespit edilmiştir. Bu durum farklı kimyasal bileşime sahip iki çeliğin sürtünme kaynak işlemi sırasındaki, karışım, deformasyon ve dinamik olarak yeniden kristalleşmeye ve çalışma sertleşmesine bağlı olarak ortaya çıkan iki ana malzemeden farklı yapı ve özelliklere sahip kaynak bölgesine atfedilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde sürtünme kaynak işleminin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen BRG firmasına, yorulma deneylerinin gerçekleştirilmesini sağlayan, Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi öğretim üyesi, çok kıymetli hocam Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK'e teşekkürü bir borç bilirim.

KAYNAKLAR(REFERENCES)

1. Cignu, U., Fabri, F., Giovanannoni, A., "Geothermal cementing, cementing table, advancement in cementation techniques in the Italian geothermal wells", **Report National Electric Energy Agency**, 1-4, 1975.
2. Donohue, J. J., "The friction welding advantage", **Welding Journal**, 80 (5), 30-34, 2001.
3. Sathya, P., Aravindan, S., NoorulHaq, A., "Mechanical and metallurgical properties of friction welded AISI304 austenitic stainless steel", **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, 26 (5-6), 505-511, 2005.
4. Sahin, M., "Joining with friction welding of high speed and medium carbon steel", **J. Mater. Process Technol.** 10, 168-202, 2005.
5. Ochi, H., Ogawa, K., Sawai, T., Yamamoto, Y., Tsujino, R., Suga, Y., "Evaluation of tensile strength and fatigue strength of SUS304 stainless steel friction welded joints", **Proceedings of the Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference**, Honolulu, Hawaii, USA, 25-30, 2003.
6. Şahin, M., "Evaluation of the joint-interface properties of austenitic-stainless steels (AISI 304) joined by friction welding", **Materials and Design**, 28, 2244-2250, 2007.
7. Satyanarayana, V. V., Madhusudhan, R.G., Mohandas, T., "Dissimilar metal friction welding of austenitic-ferritic stainless steels", **Journal of Materials Processing Technology**, 160, 128-137, 2005.

8. Mitelea, I., Craciunescu, C.M., "Parameter influence on friction welding of dissimilar surface-carburized/volume hardened alloyed steels", **Materials and Design**, 31, 2181-2186, 2010.
9. Özdemir, N., Sarsılmaz, F., Haşçalık, A., "Effect of rotational speed on the interface properties of friction-welded AISI304L to 4340 steel", **Materials and Design**, 28, 301-307, 2007.
10. Ananthapadmanaban, D., "A study of mechanical properties of friction welded mild steel to stainless steel joints", **Materials and Design**, 30, 2642-2646, 2009.
11. Ates, H., Turker, M., Kurt, A., "Effect of friction pressure on the properties of friction welded MA956 iron based super alloy" **Materials and Design**, 946-953, 2007.
12. Meshram, S. D., Mohandas, T., Madhusudhan, R.G., "Friction welding of dissimilar pure metals", **J. Mater. Process Technol.**, 184, 330-337, 2007.
13. Shimatani, Y., Shiozawa, K., Nakada, T., Yoshimoto, T., Lu, L., "The effect of the residual stresses generated by surface finishing methods on the very high cycle fatigue behavior of matrix HSS", **International Journal of Fatigue**, 33 (2), 2122-131, 2011.
14. Mutoh, Y., Jayaprakash, M., "Tangential stress range-compressive stress range diagram for fretting fatigue design curve", **Tribology International**, 44 (11), 1394-1399, 2011.
15. Carmo, D. J., Dias, J. F., Santos, D. B., "High cycle rotating bending fatigue property in high strength casting steel with carbide free bainite", **Materials Science and Technology**, 28 (8), 991-993, 2012.
16. Fujii H., Cui L., Tsuji N., Maeda M., Nakata K., Nogi K., "Friction Stir Welding Of Carbon Steels", **Materials and Science Engineering**, 429, 2006 p. 50-57.
17. Meriç, C., Köksal, N. S., Erdoğan, M.T., "Sürtünme kaynağı ile birleştirilmiş farklı çeliklerde kaynak bölgesinin incelenmesi", **CBÜ Soma Meslek Yüksek Okulu Teknik Bilimler Dergisi**, 2 (10), 135-144, 2008.
18. Song, Y., Liu, Y., Zhu, X., Yu, S., Zhang, Y., "Strength distribution at interface of rotary-friction-welded aluminum to nodular cast iron", **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 18 (1), 14-17, 2008.
19. Boyer, H. E., "Atlas of fatigue curves" **Metals Park: American Society for Metals**, 1-12, 1986.
20. Subaşı, M., Karataş, Ç., "AISI 42CrMo4 Çeliğinde Sertlik, Yorulma Dayanımı İlişkisi" **KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 13 (1), 21-27, 2010.
21. Arivazhagan, N., Singh, S., Prakash, S., Reddy, G. M., "Investigation on AISI304 austenitic stainless steel to AISI42CrMo4 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding", **Materials and Design**, 32, 3036-3050, 2011.
22. Dawles, C.J., "Friction stir welding", **The Welding Institute, Abingthor Hall, Cambridge** Adapte by Roy Woodward, Brimingham and Christian Lerory, EAA, 1999.
23. Şık, A., Ertürk, İ., Önder, M., " AA2024 alüminyum alaşımının sürtünme karıştırma kaynağında farklı parametrelerin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi", **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 16 (2), 139-147, 2010.
24. Lippold J.C., Odegard B.C., "Microstructure evolution during inertia friction welding of austenitic stainless steels", **Weld J.**, 63, 1984 pp. 35-38.
25. Paventhan, R., Lakshminarayana, P.R., Balasubramanian, V., "Fatigue behavior of friction welded medium carbon steel and austenitic stainless steel dissimilar joints", **Materials and Design**, 32, 1888-1894, 2011.
26. Lee, D.G., Jang, K.C., Kuk, J.M., Kim, I.S., "Fatigue properties of inertia dissimilar friction-welded stainless steels", **Journal of Materials Processing Technology**, 155-156, 1402-1407, 2004.
27. Dülek E., Orman Ş., Karataş Ç., Sarıtaş S., "Bilyalı dövme parametrelerinin Ç1020 çeliğinin yorulma dayanımına etkisi ve oluşan kalıcı gerilmenin katman kaldırma yöntemi ile araştırılması" **J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ**, 20(3), 289-295, 2005.
28. Haşçalık, A., Ünal, E., Özdemir, N., "Fatigue behavior of AISI 304 steel to AISI 4340 steel welded by friction welding", **J Mater Sci**, 41, 3233-3239, 2006.

