

# Nokta kaynaklı farklı çelik sacların yorulma dayanımlarının deneysel analizi

**Ahmet AKKUŞ\***, **Murat VURAL**

*İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul*

## Özet

*Nokta direnç kaynağı, imalat sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılan bir kaynak yöntemidir. Özellikle otomotiv ve beyaz eşya sektöründe imalatın en önemli aşamalarını bu kaynak yöntemi oluşturmaktadır. Bu tip bağlantılar, işletme sırasında statik ve dinamik yükler altında zorlanmaktadır. Özellikle dinamik yükler altında zorlanan bölgelerde oluşan hasar tipi oldukça kritik olup, bunlar yorulma hasarı olarak adlandırılırlar. Yorulma hasarı, malzeme içerisindeki bir hata veya süreksizlikten başlar, giderek ilerler ve sonunda hasarla sonuçlanır. Nokta kaynaklı bölgeler de, doğal bir çentik etkisi yapmaktadır ve dolayısıyla da yorulma hasarı açısından oldukça kritik bölgeler olarak karşımıza çıkmaktadır. İmalatta, sadece aynı özelliğe sahip saclar değil, maliyet ve konstrüktif açıdan farklı bileşime ve özelliğe sahip saclar da birbirleriyle nokta kaynağı yardımıyla kaynak edilmektedir. Bu tip nokta kaynaklı bölgelerde ortaya çıkabilecek problemlerin ve bunların yorulma dayanımlarının belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, galvanizli ve ostenitik paslanmaz çelik saclar, hem kendi aralarında hem de birbirleriyle nokta kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Her malzeme kombinasyonu için 3 farklı nokta çapına sahip numuneler elde edilmiştir. Kaynaklı numunelere uzun ömürlü yorulma deneyleri yapılmış ve her deney numunesi için S-N (kuvvet – çevrim sayısı) eğrileri elde edilmiştir. Galvanizli çelik saclardan oluşan kaynaklı bağlantılar en yüksek yorulma dayanımına sahip bağlantılardır. En düşük yorulma ömrüne sahip bağlantı ise galvanizli çelik – ostenitik paslanmaz çelik sac bağlantılardır. Bu bağlantı tipi üzerinde, yorulma sonrası çekirdek çapı ölçümleri yapılmıştır. Bu bağlantı tipi için, Paris–Erdoğan çatlak ilerleme hızı bağıntısını veren malzeme sabitleri belirlenmiştir.*

**Anahtar Kelimeler:** Paslanmaz çelik, galvanizli çelik, nokta kaynağı, yorulma.

\*Yazışmaların yapılacağı yazar: Ahmet AKKUŞ. [akkusa@itu.edu.tr](mailto:akkusa@itu.edu.tr); Tel: (212) 293 13 00 dahili: 2428.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Galvanizli ve ostenitik paslanmaz çelik sacların nokta kaynaklı bağlantılarının yorulma dayanımlarının araştırılması" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 24.03.2006 tarihinde dergiye ulaşmış, 17.05.2006 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.10.2007 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

## The experimental analysis of the fatigue strength of the spot welded different steel sheets

### Extended abstract

Resistance spot welding is a weld process which is widely used in the manufacturing areas. In the most important levels of the steel sheet constructions and especially automotive industry, the resistance spot welding is used. This type welded joints are exposed to static and dynamic forces during the operations. The failure type which occurs during dynamic forces is the most critical failure type, and it is called as fatigue failure. A fatigue failure starts from the material surfaces or a defect in the material. This defect becomes a crack during the operation, it propagates and finally the material fractures. Because the resistance spot welded areas are a natural notch, they behave like a defect or crack initiation. And thus those welded areas are most critical joints in fatigue failure.

Corrosion is one of the most important problems in the steel structures. To improve the corrosion resistance, the steel sheets are coated with Zinc, and these Zinc coated steel sheets are called as galvanized steel sheets. To decrease the cost and height, in manufacturing, not only the same sheets but only the different sheets (for example galvanized steel sheets and austenitic stainless steel sheets) are welded to each other by using resistance spot welding. Some problems can occur in spot welded different sheets during the operation, and thus it is very important to investigate those problems, especially fatigue strength of the joints.

In this study, galvanized and austenitic stainless steel sheets were joined to each other by using resistance spot welding. The thicknesses of the galvanized steel and austenitic stainless steel are 0.93 and 1.03 mm, respectively. The experiment parameters are sheet combination and weld nugget diameter. Three weld nugget diameters were selected as 4, 5 and 6 mm which are most widely used in the steel sheet joining industry. The pre-tests were performed to investigate the effect of the weld current on the nugget diameter. By using the pre-test results, resistance spot welded steel sheets series were obtained with 4, 5 and 6 mm ( $\pm 0.1$ ) nugget diameter, and galvanized – galvanized steel, galvanized – austenitic stainless steel.

The fatigue tests were performed to spot welded steel sheet specimens. The effects of the material composition on the fatigue strength of the spot welded steel sheets were investigated. The fatigue experiments in this study were performed in a laboratory environment at room temperature (19 – 25°C) using a 60 kN servo-hydraulic test machine. Specimens were exposed to a constant load amplitude sinusoidal waveform until fracture occurred or to a maximum  $1 \times 10^7$  cycles at R value 0.01. The cyclic displacement between specimen holders was measured. The variation of the specimen stiffness was evaluated after each test. Specimen stiffness was defined as  $\Delta P / \Delta l$ . Where  $\Delta P$  is the cyclic load range and  $\Delta l$  is the specimen's cyclic elongation range during fatigue testing. The specimen stiffness decreases as fatigue cracks propagate. Specimen failure was defined at 25% stiffness drop. Some welded specimens which is exposed in high loads failure as rupture. The test frequency was kept constant during the test. By using the fatigue test results, the load range versus number of cycles to failure (S – N) curves were plotted. The results show that galvanized steel sheet combination has the highest fatigue limit. The sheet combination which has the minimum fatigue limit is galvanized – austenitic stainless steel sheet combination.

Due to the spot welding nugget formation, the nugget behaves like a surface crack. In this study, to measure the nugget diameter after the fatigue and thus crack length, four identical spot welded specimens with 5 mm nugget diameter, galvanized steel – austenitic stainless steel combination were exposed to fatigue experiment 30000, 60000, 90000 and 104000 number of cycles respectively. After the fatigue tests, the remaining nugget of the welded specimens were measured, and crack lengths were evaluated. According to results, while number of cycles is increased, the crack length and crack growth rate increase.

By using the results and measured crack length for spot welded galvanized steel – austenitic stainless steel sheet combination, C and m material constant in Paris – Erdogan crack growth rate equation were obtained. The crack growth rate equation for this type spot welded joint were obtained as

$$\frac{da}{dN} = 10^{-11.3} \Delta K^{2.4}.$$

**Keywords:** Stainless steel, galvanized steel, spot welding, fatigue.

## Giriş

Modern otomobillerde yaklaşık olarak 5000 adet nokta kaynağı bulunmaktadır. Nokta kaynağı, metal sacları birleştirmek için kullanılan en etkin ve ucuz yöntemdir. Otomobil yapılarındaki bağlantılar işletme sırasında dinamik ve statik zorlanmalara maruz kaldıkları için, çoğu hasar ve çatlaklar bu kaynaklar etrafında ve özellikle de ısının tesiri altında kalan bölgelerinde (ITAB) oluşmaktadır.

Nokta kaynağından sonra, kaynak bölgesi ve ITAB'da önemli mekanik ve metalurjik değişiklikler olmaktadır. Bu değişimler, işletme sırasında özellikle de dinamik zorlamalar altında nokta kaynağının dayanımını önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca, kaynak çekirdek çapı kaynak bölgesinin yorulma dayanımını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Bunları incelemek ve gerekli tedbirleri almak, bağlantının güvenliği açısından oldukça önemlidir (Vural ve Akkuş, 2004).

Özellikle otomotiv endüstrisinde kullanılan nokta kaynaklı bağlantılar, işletme şartlarından dolayı sürekli olarak dinamik zorlamalara maruz kaldıklarından, bu tip bağlantılarda en önemli konulardan biri de yorulmadır. Bir yorulma çatlak, kaynaklı sacların ara yüzeyinde ve ITAB (Isının Tesiri Altındaki Bölge)'da başlar. Kaynak bölgesinde oluşan bir çatlakın ilerleme hızını tespit etmek ve böylece de kırılma meydana gelmeden önce, kaynaklı bağlantının güvenli çalışma süresini belirlemek son derece büyük önem taşımaktadır (Satoh vd., 1996).

Son yıllarda, galvanizli çelik saclar otomotiv endüstrisinde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek korozyon dirençleri nedeniyle bu saclar modern otomobillerde kaplanmamış çelik sacların yerini almıştır.

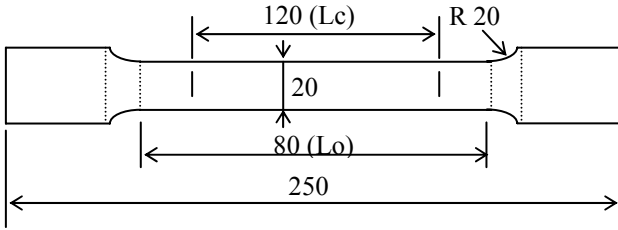
Endüstrinin hemen her alanında kullanılmasından dolayı, nokta kaynakları üzerinde pek çok araştırma yapılmıştır. Bazı araştırmacılar, ostenitik ve duplex paslanmaz çelik sacların dinamik dayanımı üzerine çalışmalar yapmışlardır (Linder vd., 1998). Başka bir çalışmada, perçin bağlantılı ve nokta kaynaklı alüminyum sac-

ların yorulma dayanımları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Buna göre, perçin bağlantılı alüminyum sacların yorulma dayanımı nokta kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımından daha yüksektir (Krause ve Chernenkoff, 1995). Bir diğer çalışmada, lazer nokta kaynaklı ve direnç nokta kaynaklı bağlantılar arasındaki fark gösterilmiştir. Bu çalışmaya göre de, lazer nokta kaynaklı bağlantıların yorulma dayanımı direnç nokta kaynaklı bağlantılarından daha yüksektir (Yang ve Lee, 1999). Otomotiv endüstrisinde kullanılan nokta kaynaklı saclar üzerinde yapılan çalışmalarda, yorulma performansı etkileyen ana parametrenin malzeme dayanımı ve mikro yapıdan daha çok geometrik faktörler olduğu tespit edilmiştir (Rathbun vd., 2003). Kaynak bölgesindeki çentik ucu gerilmeleri üzerine yapılan bir çalışmada ise, çentik geometrisi, kalıcı gerilmeler ve yorulma dayanımı üzerinde kaynak parametrelerinin (kaynak akımı, kaynak süresi, elektrot kuvveti) etkisi incelenmiştir (Anastassiou vd., 1990).

Bu çalışmada, 0.93 mm kalınlığındaki galvanizli çelik saclar ile 1.03 mm kalınlığındaki ostenitik paslanmaz çelik saclar bindirme şeklinde birbirlerine nokta kaynağı ile birleştirilmiştir. Saclar, kendi aralarında da kaynak edilerek, üç farklı malzeme kombinasyonundan oluşan deney serileri elde edilmiştir. Kaynak çekirdek çapı ana parametre olduğundan, işlem sırasında kaynak akımı değiştirilerek ve daha önce yapılan ön çalışmaların sonuçları yardımıyla, 4 – 5 ve 6 mm ( $\pm 0.1$ ) çapa sahip kaynak çekirdekleri elde edilmiştir. Elektrot basıncı ve kaynak zamanı sabit tutulmuştur. Kaynaklı parçalara uzun ömürlü yorulma deneyleri yapılmış ve her numuneye ait S – N eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler yardımıyla, çekirdek çapının ve sac kombinasyonunun bağlantının yorulma dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üç farklı sac kombinasyonundan birisi olan galvanizli çelik – ostenitik paslanmaz çelik sac çiftlerinden oluşan bağlantının yorulma sonrası çekirdek çapları ölçülerek çatlak boyları belirlenmiştir. Bu verilerden yola çıkarak, bu tip kaynaklı bağlantıya ait çatlak ilerleme eğrisi ve yine çatlak ilerleme karakteristiğini oluşturan C ve m malzeme sabitle-ri tespit edilmiştir.

## Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

Şekil 1’de, sac malzemelerden hazırlanan çekme deney parçasının boyutları gösterilmektedir (TS 138, 1978).



Şekil 1. Çekme deney numunesi boyutları (mm)

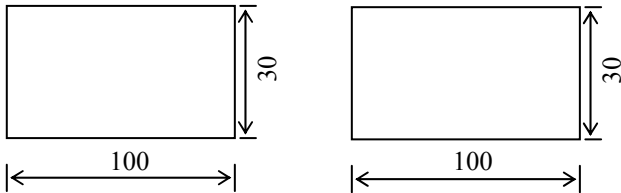
Tablo 1’de, kullanılan esas metallerin çekme deneyi sonunda elde edilen akma ve çekme dayanımları verilmiştir.

Tablo 1. Esas metallerin mekanik özellikleri

Malzeme	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Paslanmaz çelik	326	667	34.5
Galvanizli çelik	156	266	38

## Kaynak işlemleri

Kullanılan deney malzemeleri, 0.93 mm kalınlığında galvanizli yüksek dayanımlı düşük alaşımli çelik sac ve 1.03 mm kalınlığında ostenitik paslanmaz çelik sacdır. Şekil 2’de bu sacların boyutları görülmektedir.



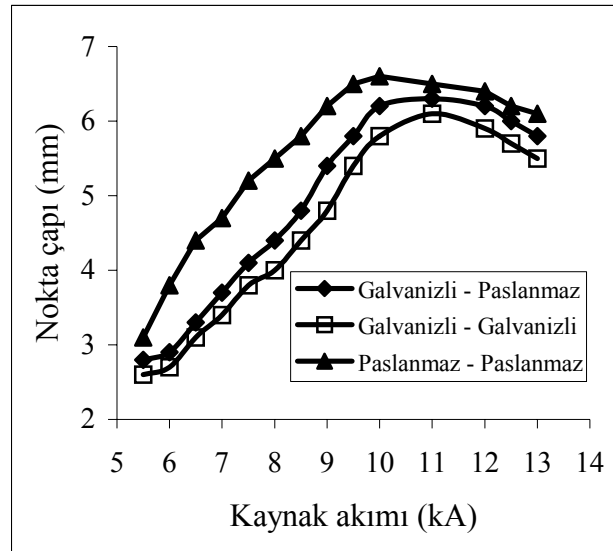
Şekil 2. Kaynak yapılacak sac numuneler (mm)

Çekirdek çapları 4, 5 ve 6 mm ( $\pm 0.1$ ) olarak belirlenmiştir, ve kaynak işlemleri sırasında her numune için 3 kN elektrot kuvveti uygulanmıştır (Aichele, 1993).

Belirlenen çekirdek çaplarını optimum bir şekilde elde etmek için, kaynak zamanı sabit tutularak kaynak akımı değiştirilmiştir. Kaynak şartları Tablo 2’de verilmektedir. Kaynak akımı 5.5 kA’den 13.5 kA’ye kadar 0.5 kA artırılarak uygulanmıştır. Kaynak işlemlerinden sonra, parçalara ayırma testi yapılmış ve çekirdek çapları elektronik bir ölçme cihazı ile ölçülmüştür. Şekil 3, kaynak akımının çekirdek çapı üzerindeki etkisini göstermektedir.

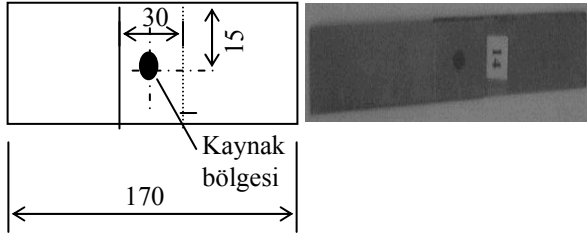
Tablo 2. Kaynak şartları

Büyükük	Değeri
Elektrot kuvveti	3 kN
Kaynak zamanı	15 periyot (1periyot= 1/50 sn)
Sıkma zamanı	25 periyot
Soğuma zamanı	20 periyot



Şekil 3. Kaynak akımının çekirdek çapı üzerine etkisi

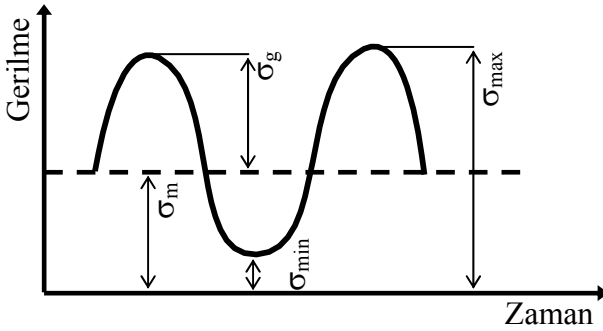
Şekil 3’ten de görüldüğü gibi, her üç malzeme kombinasyonunda da kaynak akımı arttıkça çekirdek çapı belirli bir akım değerine kadar artmaktadır. Bu kritik akım değerinden sonra, aşırı erime ve sıçramadan dolayı çekirdek çapında bir düşüş görülmektedir. Şekil 3’teki diyagram kullanılarak, istenilen çekirdek çaplarına sahip kaynaklı numuneler elde edilmiştir. Şekil 4’te, nokta kaynaklı numuneler görülmektedir.



Şekil 4. Nokta kaynaklı numune (mm)

### Yorulma deneyleri

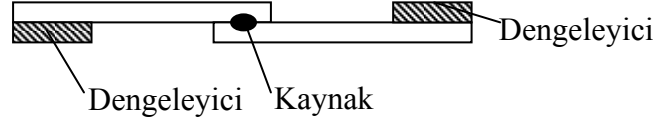
Yorulma deneyleri, oda sıcaklığındaki laboratuvar şartlarında (19 – 25 °C) 60 kN'luk ve test kontrol ünitesi Dartec servohidrolik yorulma makinasında yapılmıştır. Kaynaklı numuneler, hasar oluşuncaya kadar sabit büyüklüklü sinuzoidal dalgalı ve  $R = 0.09$  gerilme oranında yorulma yüklemesine maruz bırakılmışlardır. Şekil 5, sinuzoidal dalgalı yorulma zorlanmasını göstermektedir.



Şekil 5. Sinuzoidal dalgalı yorulma zorlaması

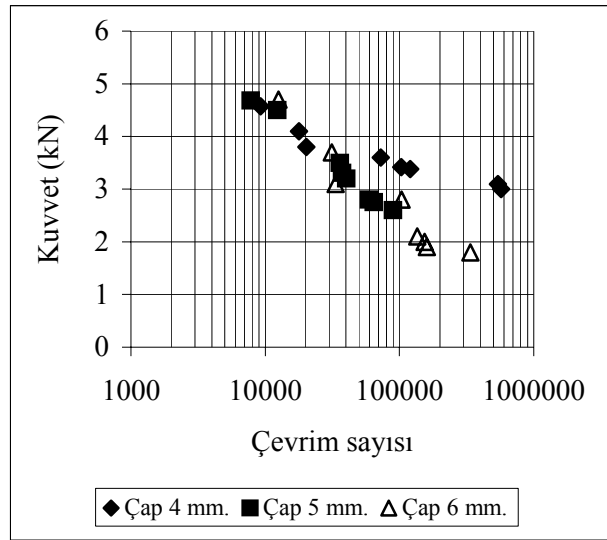
Yorulma deneyleri boyunca, numunenin deplasmanlarındaki ve uygulanan kuvvetteki değişim monitörden izlenmiştir. Numuneleri tutan çeneler arasındaki deplasmanlar, her çevrim sonrası test kontrol sisteminin monitöründen takip edilmiştir. Kaynaklı numunelerin rijitlik değeri, her bir test boyunca hesaplanmıştır. Parçaların rijitliği  $\Delta P/\Delta l$  olarak ifade edilmektedir. Burada,  $\Delta P$  tekrarlı kuvvet aralığı,  $\Delta l$  ise numunenin her bir tekrarda oluşturduğu deplasman aralığıdır. Yorulma çatlak büyüdüğüçe, numunenin rijitliği azalır. Rijitlikteki düşüş miktarı %25'i geçtiğinde, parçanın hasara uğradığı kabul edilmiştir (Rathbun vd., 2003). Yükleme frekansı, tüm testlerde 10 Hz'de sabit tutulmuştur.

Deneysel sırasında, simetrisinin bozulmaması ve oluşacak momenti engellemek için Şekil 6'dan da görüldüğü gibi, numunelerin her iki tarafına aynı kalınlıktaki saclardan 25mm uzunluğunda dengeleyiciler yerleştirilmiştir (Mod II, Sliding Mode tipi yükleme).



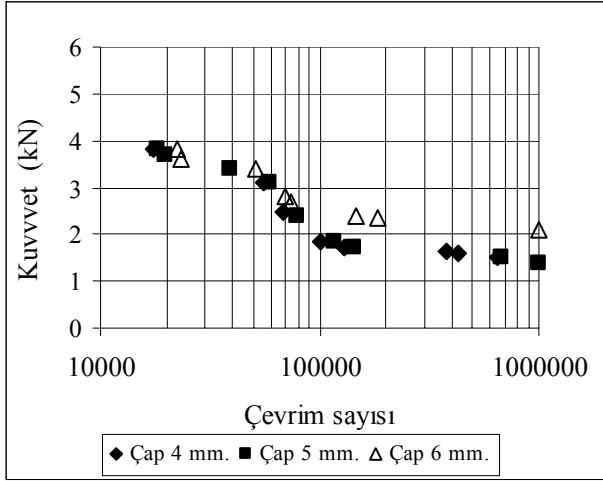
Şekil 6. Dengeleyici yerleştirilmiş kaynaklı yorulma numunesi

Şekil 7, 8 ve 9'da, sac kombinasyonlarına göre numunelere ait Kuvvet – çevrim sayısı (S-N) eğrileri verilmektedir.



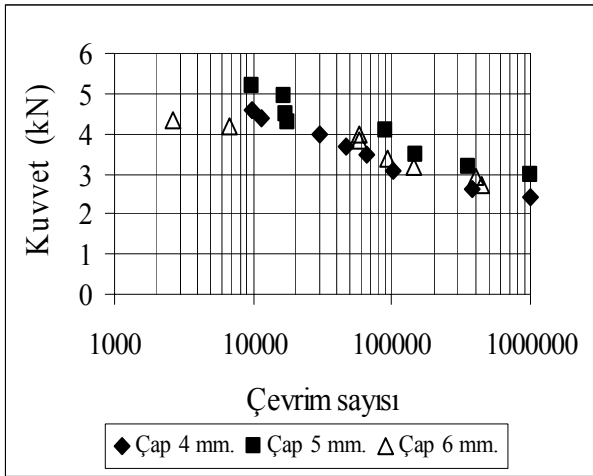
Şekil 7. Paslanmaz çelik çiftine ait S-N eğrileri

Elde edilen S-N eğrileri incelendiğinde, uygulanan kuvvet azaldıkça, numunelerin yorulma ömürlerinin de arttığı açıkça görülmektedir. Paslanmaz-paslanmaz bağlantılara ait S-N eğrilerinin görüldüğü Şekil 7 incelendiğinde, 4 ve 6 mm'lik kaynak çekirdek çapına sahip numunelerinde sırayla 3 ve 2 kN'luk kuvvet değerlerinde 100000 çevrimin üzerinde en yüksek yorulma ömürleri tespit edilirken, 5 mm'lik kaynak çekirdeğinde en yüksek yorulma ömrü 2.6 kN'luk kuvvet değerinde ve 100000 çevrimin altında tespit edilmiştir.



Şekil 8. Paslanmaz – galvanizli sac çiftlerine ait S-N eğrileri

Şekil 8’de, paslanmaz çelik sac ve galvanizli çelik saclardan oluşan nokta kaynaklı bağlantıların S-N eğrileri verilmektedir. Buna göre, 3.8 kN’luk kuvvete karşılık gelen en düşük yorulma ömürleri incelendiğinde, yorulma ömürlerinin birbirlerine yakın değerler olduğu görülmüştür.

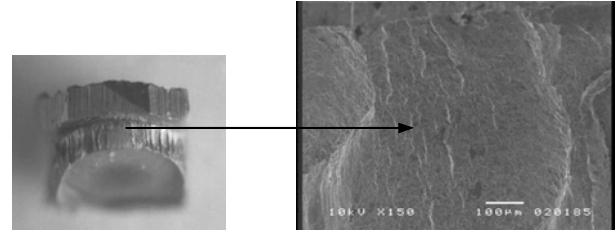


Şekil 9. Galvanizli çelik sac çiftlerine ait S-N eğrileri

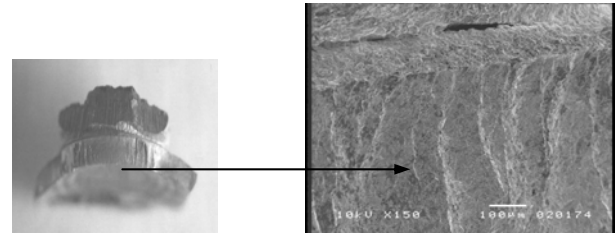
Şekil 9’da görülen galvanizli – galvanizli bağlantı çiftinde, 4 mm kaynak çekirdeği çapına sahip numunede en yüksek yorulma ömrü 2.6 kN’luk kuvvet değerinde görülürken, 5 mm çekirdek çaplı numunede bu değer 3.2 kN’a çıkmaktadır. Bu değer altındaki kuvvet aralıklarında hasar oluşmamıştır. 6 mm. çekirdek çaplı

numunede ise, hasar oluşturan en düşük kuvvet 2.7 kN’a kadar düşmüştür. Genel olarak, kaynak akımı ve dolayısıyla da çekirdek çapı arttıkça numunelerin yorulma ömürlerinde de bir artış meydana gelmektedir.

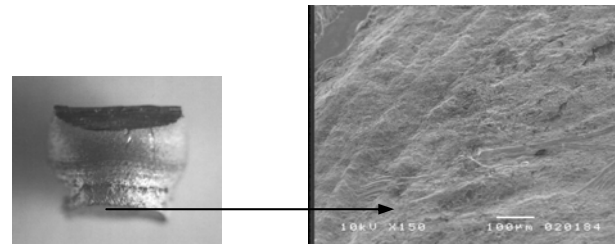
Şekil 10’da, yüksek gerilmelerde zorlanan ve koparak hasara uğrayan numunelerde yorulma sonrası son kopma bölgelerinin SEM (tarayıcı elektron mikroskobu) fotoğrafları verilmektedir.



a) Paslanmaz çelik sac bağlantı (5 mm)



b) Paslanmaz – galvanizli bağlantı (5 mm)



c) Galvanizli çelik sac bağlantı (5 mm)

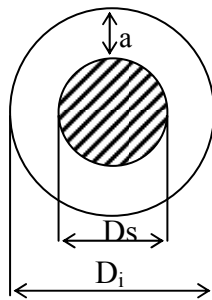
Şekil 10. Son kopma bölgelerinin SEM fotoğrafları

Yüksek gerilmelerdeki zorlamalarda bazı kaynaklı deney parçaları %25’lik rijitlik düşüşü göstermeden düşük çevrim sayılarında kaynak çekirdeğinin en dış bölgesinden koparak hasara uğramıştır. Şekil 10’da gösterilen bölgeler, bu şekilde kaynak çekirdeği dış bölgesinden koparak hasara uğrayan numunelerdeki son kopma

bölgeleridir. Bu bölgeler incelendiğinde, plastik deformasyon olmadığı ve tipik taneler arası gevrek kırılma olduğu görülmüştür.

### Çatlak boyunun belirlenmesi

Çevrim sayısına göre çatlak boyunun değişimini incelemek ve nokta kaynaklı bağlantıda çatlak ilerleme hızını tespit etmek için, çalışmalar yapılmıştır. 5 mm kaynak çekirdek çapına sahip ve galvanizli çelik – ostenitik paslanmaz çelik saclardan oluşan dört adet özdeş nokta kaynaklı numune yorulma testine tabi tutulmuştur. Bu numuneler sırasıyla 30000, 60000, 90000 ve 104000 çevrim sayısında dinamik zorlamaya maruz bırakılmış ve bu çevrimlerin sonunda deney durdurulmuştur. Bu numuneler ısıtma amacıyla, 230 °C sıcaklığa sahip fırında 30 dak. bekletilmiştir. Bu işlemde sonra saclar, kaynak bölgelerinin orta yerinden birbirinden mekanik olarak ayrılmıştır. Çatlağın kaynak çekirdeğinin her noktasından iç kısma doğru eşit olarak ilerlediği ve yorulma sonrası bölgedeki yüzey alanını (son tutma bölgesi) veren daire çapının, kalan çekirdek çapı olduğu kabul edilmiştir. Nokta kaynağı, geometrisinden dolayı yüzey çatlakları gibi hareket etmektedir. Bu nedenle, Şekil 11’den de görülebileceği gibi başlangıç çekirdek çapı ve yorulma sonrası kalan çekirdek çapı arasındaki farkın yarısı, çatlak boyu olarak alınmıştır.



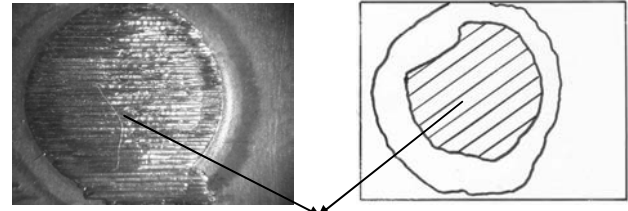
Şekil 11. Çatlak boyunun tespiti

$$\text{Çatlakboyu}(a) = \frac{D_i - D_s}{2} \quad (1)$$

$D_i$  = Yorulma öncesi ilk çap

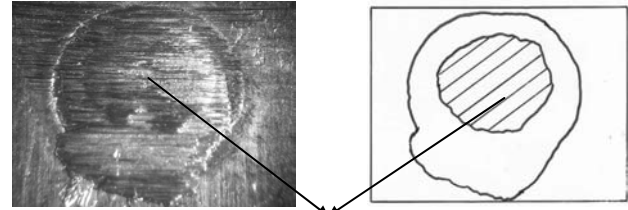
$D_s$  = Yorulma sonrası kalan çekirdek çapı

Çekirdek çap ölçümlerinin yapıldığı bölgelerin fotoğrafları ve bu bölgelerin şematik olarak görünümü Şekil 12’de verilmektedir.



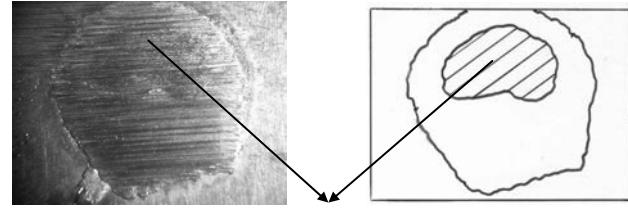
Son bağlantı bölgesi

a) 30000 çevrim



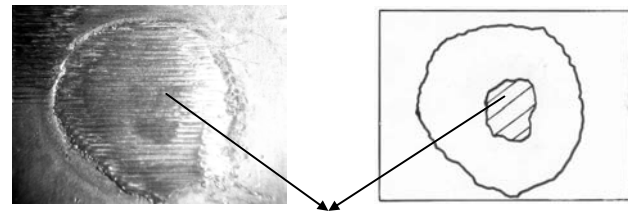
Son bağlantı bölgesi

b) 60000 çevrim



Son bağlantı bölgesi

c) 90000 çevrim

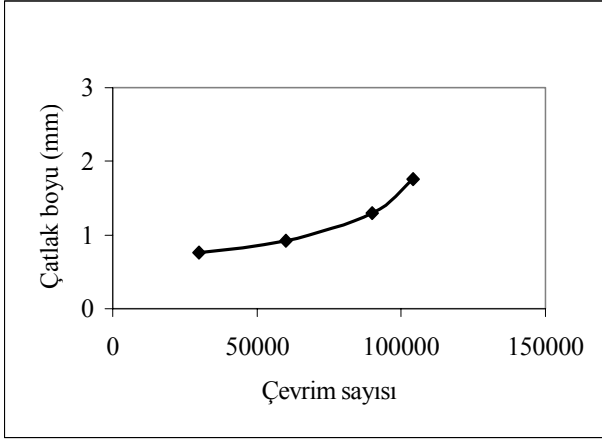


Son bağlantı bölgesi

d) 104000 çevrim

Şekil 12. Yorulma sonrası kalan kaynak bölgeleri

Yukarıdaki makro fotoğraflar yardımıyla farklı çevrim sayılarında yorulma sonrası kalan çekirdek çapları ölçülmüş ve çatlak boyları belirlenmiştir. Şekil 13’te, çatlak boyunun çevrim sayısı ile değişimi görülmektedir.



Şekil 13. Çatlak boyunun çevrim sayısına göre değişimi

Şekil 13'ten de görüldüğü gibi, çevrim sayısı arttıkça nokta çapı düşmekte ve dolayısıyla çatlak boyu artmaktadır. Ancak bu artış lineer bir artış değildir; eğrinin eğimi giderek artmaktadır. Buradan, çevrim sayısı arttıkça kaynaklı bağlantıdaki çatlak ilerleme hızının da arttığı sonucuna varılabilir.

### Bağlantıya ait malzeme sabitlerinin bulunması

Ölçülen son nokta çapları ve çatlak boyları yardımıyla, ve yukarıda verilen Şekil 13 kullanılarak, galvanizli – paslanmaz nokta kaynaklı bağlantının malzeme sabitleri olan ve bu bağlantıda çatlak ilerleme karakteristiğini belirleyen C ve m değerleri belirlenmiştir. Paris - Erdoğan bağıntısı;

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m, \quad (2)$$

çatlak ilerleme hızı ise

$$\left( \frac{da}{dN} \right)_i = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (3)$$

olup, a çatlak boyunu ve N çevrim sayısını göstermektedir. Mod II (Sliding Mode) yükleme tipine göre, nokta kaynaklı bağlantıların gerilme şiddet faktörü (Zhang, 1999);

$$\Delta K = \frac{2 \cdot \Delta F}{\pi \cdot D_{son} \cdot \sqrt{t}} \quad (4)$$

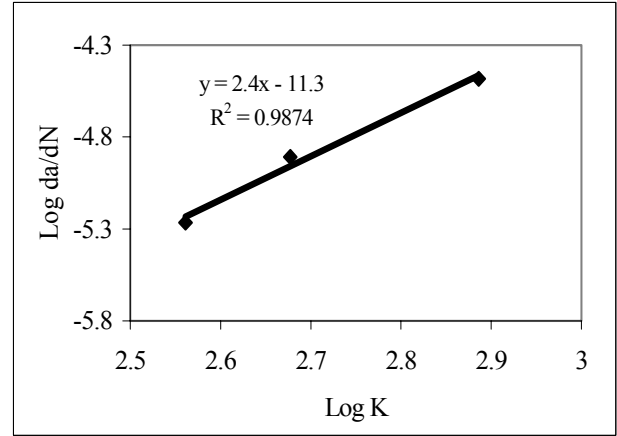
Burada,

$\Delta F$  = Tekrarlı kuvvet aralığı ( $F_{max.} - F_{min.}$ ; N).

t = Sac kalınlığı (mm)

Yukarıdaki formüllere göre,  $\frac{da}{dN}$  ve  $\Delta K$  değerleri hesap edilerek, bunların logaritmaları alınmıştır. Bu logaritmik değerler yardımıyla, (2) denkleminde verilen C ve m sabitlerini tesbit etmek için Şekil 14'te görülen

$\text{Log} \Delta K - \text{Log} \frac{da}{dN}$  grafiği çizilmiştir.



Şekil 14. Kaynaklı bağlantının  $\log \Delta K_{II} - \log \frac{da}{dN}$  grafiği

Bu grafiğin gösterdiği noktalardan geçen en uygun lineer doğrunun denklemi,

$$y = 2.4x - 11.3 \quad (5)$$

Bu denklemde,  $y = \log \frac{da}{dN}$  ve  $x = \log \Delta K$  dir.

Çatlak ilerlemesini veren (2) nolu Paris-Erdoğan bağıntısının her iki tarafının logaritması alınır,

$$\log \frac{da}{dN} = \log C + m \cdot \log \Delta K \quad (6)$$

elde edilir.



Yukarıdaki ifadeyi (5) denkleminde yerine yazarsak,

$$\log \frac{da}{dN} = -11.3 + 2.4 \log \Delta K \quad (7)$$

ifadesi elde edilir. Elde edilen son denklem ve (6) ifadesine göre,

$m = 2.4$  ve  $\log C = -11.3$ 'den,  $C = 10^{-11.3}$  bulunur.

Bu değerler, galvanizli ve ostenitik paslanmaz çelik saclardan oluşan nokta kaynaklı bağlantılara ait malzeme sabitleridir. Bu durumda, bu tip nokta kaynaklı bağlantıların çatlak ilerleme hızını veren ifade aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\frac{da}{dN} = 10^{-11.3} \Delta K^{2.4} \quad (8)$$

Burada  $\frac{da}{dN}$  : mm/çevrim ve  $\Delta K$  : N/mm<sup>3/2</sup> birimlerine sahiptir.

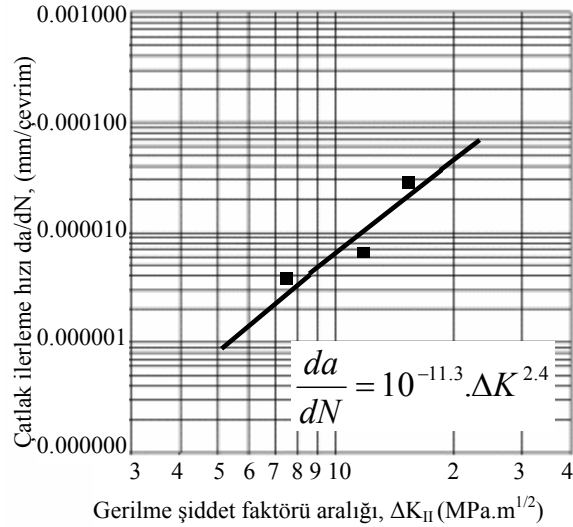
### Bağlantının çatlak ilerleme grafiği

Şekil 15'te yukarıda elde edilen değerlere göre, kaynaklı bağlantıya ait gerilme şiddet faktörü aralığı (MPa m<sup>1/2</sup>) ve çatlak ilerleme hızı (mm/çevrim) grafiği verilmektedir.

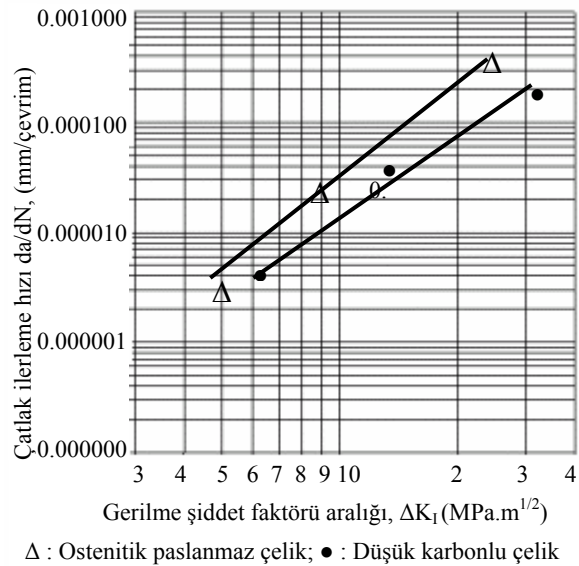
Şekil 16'da ise, literatürde yer alan düşük karbonlu çelik ve ostenitik paslanmaz çeliğe ait yorulma çatlak ilerleme eğrileri verilmektedir (ASM Handbook, 1997).

Yorulma deneyleri sırasında, kaynak bağlantısında oluşacak eğilme momentini ortadan kaldırmak amacıyla numunelerin her iki tarafına da aynı kalınlıkta dengeleyiciler yerleştirildiği için Mod II (Sliding Mode) yükleme tipi etkin-dir. Dolayısıyla, kaynaklı bağlantının çatlak ilerleme eğrisi Mod II yükleme tipine göre belirlenmiştir. Mod I yükleme tipine göre belirlenen esas metallere ait çatlak ilerleme eğrileri ile Mod II yükleme tipine göre belirlenen nokta kaynaklı paslanmaz çelik sac - galvanizli çelik

sac bağlantısına ait çatlak ilerleme eğrisi birbirleriyle karşılaştırıldığında, nokta kaynaklı sac bağlantının çatlak ilerleme eğrisinin düşük karbonlu çeliğin çatlak ilerleme eğrisine daha yakın olduğu ve çatlağın kaynaklı bağlantıda daha yavaş ilerlediği görülmektedir. Ayrıca, bu sonuçlar, Mod I yükleme tipinin Mod II yükleme tipine göre daha kritik bir yükleme tipi olduğunu da bir kez daha vurgulamaktadır.



Şekil 15. Mod II için paslanmaz çelik - galvanizli çelik sac bağlantılara ait yorulma çatlak ilerleme hızı grafiği



Şekil 16. Mod I için esas metallere ait yorulma çatlak ilerleme hızları grafiği

## Sonuçlar

Nokta kaynaklı bağlantılarda, kaynak akımının artmasıyla, çekirdek çapı da belli bir akım değerine kadar artmaktadır. Bu kritik akım değerinden sonra, aşırı erime ve sıçramadan dolayı çekirdek çapı düşmektedir. Bu da mukavemeti olumsuz yönde etkilemektedir.

Yorulma kuvveti azaldıkça, nokta kaynaklı bağlantıların yorulma ömrü artmaktadır. Galvanizli çelik saclardan oluşan kaynaklı bağlantılar en yüksek yorulma dayanımına sahip bağlantılardır. En düşük yorulma ömrüne sahip bağlantı ise galvanizli çelik – ostenitik paslanmaz çelik sac bağlantılardır.

Yorulma sonrası kaynak bölgesinde yapılan çatlak boyu ölçümlerine göre, çevrim sayısı arttıkça nokta çapı düşmekte ve çatlak boyu artmaktadır. Bu artış, lineer bir artış değildir. Çevrim sayısı arttıkça, kaynaklı bağlantıdaki çatlak ilerleme hızı da artmaktadır.

Çatlak boyu ölçümü ve yapılan hesaplamalar sonucunda, nokta kaynaklı ostenitik paslanmaz çelik - galvanizli çelik sac bağlantıya ait çatlak ilerleme karakteristiğini belirleyen C ve m malzeme sabitleri bulunmuştur. Buna göre, bu bağlantıya ait çatlak ilerleme hızını veren bağlantı, denklem (8) ile  $\frac{da}{dN} = 10^{-11.3} \cdot \Delta K^{2.4}$  şeklinde elde edilmiştir.

## Kaynaklar

Aichele, G., (1993). *Leistungskennwerte für Schweißen und Schneiden*, 22-27, DVS-Verlag, Düsseldorf.

- Anastassiou, M., Babit, M., Lebrun, J.L., (1990). Residual stress and microstructure distribution in spot welded steel sheets. Relation with fatigue behaviour, *Materials Science and Engineering A*, **125**, 141-156.
- ASM Handbook, (1997). *Fatigue and Fracture*, **19**, 637, November.
- Krause, A.R., Chernenkoff, R.A., (1995). A comparative study of the fatigue behaviour of spot welded and mechanically fastened aluminium joints, SAE International Congress and Exposition, 1-7, Detroit, Michigan, USA
- Linder, J., Melander, A., Larsson, M., Bergengren, Y., (1998). Fatigue design of spot welded austenitic and duplex stainless steel sheets, *Fracture of Engineering Materials and Structures*, **21**, 673-686.
- Rathbun, R.W., Matlock, D.K., Speer, J.G., (2003). Fatigue Behaviour of Spot Welded High Strength Sheet Steels, *Welding Journal*, **82**, 8, 207-218.
- Satoh, T., Abe, H., Nakaoka, T., Hayata, Y., (1996). The fatigue life of the spot welded joint under a repeated of R=-1, *Welding in the World*, **37**, 12-15.
- TS138, (1978). Metalik malzemelerin çekme testleri, *Türk Standartları*, Ankara.
- Vural, M., Akkus, A., (2004). On the resistance spot weldability of galvanized interstitial free steel sheets with austenitic stainless steel sheets, *Journal of Material Processing Technology*, **153-154**, 1-6.
- Yang, Y.S., Lee, S.H., (1999). A study on the joining strength of laser spot welding for automotive applications, *Journal of Metal Processing Technology*, **94**, 151-156.
- Zhang, S., (1999). Approximate stress intensity factors and notch stresses for common spot-welded specimens, *Welding Journal*, **78**, 173-179.