

Erdemir 1314 Kalite Galvanize Çelik Sac Levha İle Al 5052-H32 Alaşımı Sac Levha Bağlantılarının Dayanım ve Yorulma Özellikleri

Strength And Fatigue Properties Of Erdemir 1314 Quality Galvanized Steel Sheet Metal and Al 5052-H32 Alloy Sheet Metal Joints

Ahmet ÇETKİN^{1*}, Yılmaz BAYDEMİR¹

¹Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar, Türkiye.
acetkin@aku.edu.tr, ylmzbydmr4588@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 29.09.2023
Kabul Tarihi/Accepted: 20.11.2024

Düzeltilme Tarihi/Revision: 10.07.2024

doi: 10.5505/pajes.2024.20805
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, otomotiv sanayinde kullanılan ve birbirleriyle metalürjik uyumsuz Erdemir 1314 kalite galvanize çelik ile Al 5052 H32 alaşımı sac levhalar, üç farklı birleştirme metoduyla tek noktadan bağlanmış, levha bağlantılarının dayanımı ve yorulma davranışları araştırılmıştır. Erdemir 1314 kalite galvanize çelik ile Al 5052 H32 alaşımından oluşan sac metal malzemelere, mekanik özellikleri belirlemek amacıyla TSE EN ISO 6892-1 standardına göre çekme testi uygulanmıştır. Kullanılan saclara OES ve elektrikli direnç kaynağı metodu ile birleştirilen numuneler üzerinde çizgi EDX analizleri ile kaynak bölgesindeki malzeme dağılımlarının oransal yapısı belirlenmiştir. TS EN ISO 14273 kesme deneyi standardına göre birleştirilmiş numunelerin maksimum ayrılma kuvvetleri elde edilmiş ve bu üç farklı sac levha birleştirme metodu ile TSE EN ISO 14324 standardına uygun olarak yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Elektrikli direnç kaynağı metodlarından biri olan nokta kaynağı metodu ile yapılan birleştirmelerin diğer bağlantı metodlarına göre daha yüksek ayrılma dayanımı ve az rijit bir bağlantı formuna sahip Kendisi Delen Perçinleme tekniğinin ise yorulma ömrü açısından daha üstün özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektrik Direnç Kaynağı, Form Punta, Kendiliğinden Delen Perçinleme, Sac Levha Birleştirme Metodları, Yorulma Sınırı

Abstract

In this study, metallurgically incompatible Erdemir 1314 grade galvanized steel and Al 5052 H32 alloy sheet metal plates used in the automotive industry were connected at a single point by three different joining methods, and the strength and fatigue behaviour of the plate joints were investigated. Tensile tests were applied to sheet metal materials consisting of Erdemir 1314 grade galvanized steel and Al 5052 H32 alloy in accordance with TSE EN ISO 6892-1 standard to determine the mechanical properties. The proportional structure of the material distribution in the weld zone was determined by line EDX analyses on the samples joined by OES and electric resistance welding methods. The maximum separation forces of the joined specimens were obtained according to TS EN ISO 14273 shear test standard and fatigue tests were carried out with these three different sheet metal joining methods in accordance with TSE EN ISO 14324 standard. It has been determined that the joints made with the spot welding method, which is one of the electric resistance welding methods, have higher separation strength and less rigid connection form than the other joining methods, while the Self-Piercing Riveting technique has superior fatigue life.

Keywords: Resistance Spot Welding, Clinching, Self-Piercing Riveting, Sheet Metal Joining Methods, Fatigue Limit

1 Giriş

Otomotiv dünyası, CO₂ emisyonunun atmosfere verdiği olumsuz etkileri azaltıcı seçeneklerden biri olan taşıt ağırlıklarını azaltmaya yönelik çok sayıda uğraşı içerisinde. Burada yönelim alüminyum alaşımlarının daha fazla alanda kullanımı üzerinde yoğunlaşmaktadır. İdeal mekanik özellikleri, çeliğe göre düşük özgül ağırlığı, korozyona karşı mukavemeti, enerjiyi absorbe etme yeteneği, kolay işlenebilmesi ve şekil verilebilmesinin yanı sıra geri dönüştürülebilirlik özellikleri nedeniyle alüminyum, en ideal malzeme gruplarının başlarında gelmektedir. Araç üretimlerinde kullanılan her bir birim çelik yerine materyalin alüminyum ile değişimi, ömrü boyunca aracın Dünya atmosferine on birim daha az CO₂ emisyonuna sebep olacağı hesaplanmıştır [1]. Fakat alüminyum alaşımlarının hem yorulma özellikleri hem de sonlu bir ömre sahip olmaları bu alaşımların en önemli zayıflıklarıdır [2].

Araç üretiminde farklı malzemelerin birlikte kullanılması zorunluluğunu kaçınılmaz olarak beraberinde getirmiştir. Günümüz otomotiv endüstrisinde tercih edilen en önemli yapı

malzemelerinden alüminyum ve çelik malzemelerin birlikte kullanılması ise bazı problemleri öne çıkarır. Özellikle iki malzeme arasındaki erime noktası ve termal genleşme farkı, aracın yapım aşamasında çoğunlukla başvuru elektrikli direnç nokta/punta kaynağı metodunda (EDK) (Resistance Spot Welding) bazı temel zorluklar barındırır. Mühendisler sac levha birleştirmede elektrik direnç kaynağı metoduna ait bazı problemlerin üzerinden gelmek için alternatif olarak form punta (FP) (Clinching) ve kendisi delen perçinleme (KDP) (Self Piercing Riveting) gibi bazı mekanik birleştirme yöntemleri geliştirmişlerdir. Otomotiv endüstrisinde taşıt bileşenlerinin alüminyum ve çelik malzemelerin bağlantılarında kullanılan bu sac levha birleştirme metodlarının, seyir esnasında oluşan periyodik kuvvetler altında zorlandığı ortamlardaki yorulma davranışlarını belirlemeyi de önemli kılar.

Sac levha birleştirme tekniklerinin dayanım ve yorulma özellikleri konusunda çok sayıda bilim insanı çalışmış, farklı teknikler, farklı eklentiler ve farklı malzemelerin bağlantı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırmalarda özellikle FP metodunun yorulma davranışı üzerindeki çalışmaların halen yetersiz olduğu vurgulanmaktadır [3]. Bizim kullandığımız benzer bağlantı metodlarını kullanan Mori vd. [4], otomobil

*Yazışılan yazar/Corresponding author

panellerinde kullanılan Al5052-H32 levhaları kesme tipinde ve çapraz yapıda birleştirmiş ve elde ettiği numunelere yorulma testi uygulamıştır. Çekme testleri ve yorulma testlerinde KDP metot hem statik dayanım hem de yorulma limitleri açısından diğer iki sac levha birleştirme metoduna göre daha kazanım sunduğunu belirlemişlerdir. FP metotta birleştirilen sac levha numunelerin çekme testleri neticesinde elde edilen statik mukavemet değerleri EDK ile birleşimleri yapılan numunelerin yaklaşık yarısı olmasına rağmen yorulma dayanımı açısından birbirlerine yakın performans göstermiştir. Çalışmalarında diğer yandan otomotiv sanayinde gövde panellerinin birleşimlerinde sık kullanılan EDK ile yorulma dayanımı açısından benzer paralellik gösteren FP metodun düşük işletme maliyeti açısından EDK ile yapılan birleşimlere karşı uygun bir alternatif olduğu kanısı yer almaktadır. Yine aynı malzemeyi kullanan Kang ve Kim [5], sac levhaları soyma, çapraz germe ve çekme-kesme konfigürasyonlarında birleştirerek yorulma mukavemet değerlerini belirlemişlerdir. Birleştirme konfigürasyonları için yorulma ömrünü 10^6 çevrim döngüsü kıstas alarak, sırası ile yorulma dayanım sınırlarının statik dayanım sınırlarına oranlarını %11, %14 ve %34 olarak hesaplamışlardır. Yorulma çatlağı başlangıçlarının ise üst ve alt sacların arasındaki aşındırma hasarı sebebiyle gerçekleştiği belirlemişlerdir.

Woo [6], yapmış olduğu yüksek lisans tezinde farklı kalınlıklarda tek eksen ve çok eksenli çapraz germe ve çekme kesme konfigürasyonunda birleştirilen Al 6016 alaşımı sac levha ile DX54D çelik sac levhanın yorulma ömürlerini üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada SPR yorulma ömrü tahmini için kullandıkları nCode Rupp modeli uyumluluğunu ve performansını doğrulamışlar, KDP metot ile EDK metodun yorulma ömürleri açısından uyumluluğunu belirlemişlerdir.

Abe vd. [7], yapmış oldukları çalışmada ultra yüksek mukavemetli çelikler olan galvanizlenmiş JAC 980Y ve kaplanmamış JSC 980Y levhaları FP metot ve EDK ile birleştirerek, statik ve yorulma dayanımlarını karşılaştırmışlardır. FP yöntemde birleştirilen numunelerde, sac levhalardaki deformasyon konsantrasyonunu azaltarak sacların hasarını önlemek için kalıp çapı ve derinliği optimize etmişlerdir. EDK ile birleştirilen numunelerin statik dayanım değerlerini daha yüksek ve yorulma testlerinde ise FP metot ile yapılan birleştirmelerin diğer tipteki numunelerin yaklaşık 2.5 katı olduğu belirlenmişlerdir.

Zhou vd. [8], çalışmalarında alüminyum alaşımı AL5052 sac levhalar ile SPFC 440 yüksek mukavemetli çelik levhaların KDP metot ile birleşimlerinin kalitesini, perçin yükseklikleri ile levhaların birbirlerine göre konumunun etkisine göre incelemişlerdir. Alt taraftaki sac levhanın alüminyum olması ve perçin yüksekliğinin 8 mm olarak seçildiğinde diğer perçin yüksekliklerine göre daha iyi dayanım sağladığı ve kullanılan KDP perçinlerinin sac levha toplam kalınlığını 2.5 mm geçmesi durumunda yorulmaya karşı daha iyi bir direnç gösterdiği belirlenmiştir.

Spitsen vd. [9], 1008 çelik sac levhayı EDK ile çekme-kesme numuneleri formunda birleştirip yorulma dayanımını artırmak amacıyla EDK işlemi sonrasında literatürde "Cold welding" olarak geçen soğuk işlem uygulamasını özel olarak tasarlanmış bir cihaz kullanılarak kaynak bölgesinde düzenli basınç bölgesi oluşturarak gerçekleştirmişlerdir. Soğuk işlem uygulanan numunelerin yorulma mukavemetlerinin %67 oranında arttığını tespit etmişlerdir. Daneshpour vd. [10] ise çift fazlı yüksek dayanımlı çelik sac levha (DP780) ile derin çekme çeliği (DC04) sac levhayı çekme-kesme konumunda üst üste

bindirerek tek nokta üzerinden EDK ve Lazer nokta kaynağı uygulayarak çekme-kesme kuvvetleri altında levhaların yorulma dayanımlarını incelemişlerdir. Farklı bir birleştirme tekniği kullanan Uematsu vd. [11], yapmış oldukları çalışmada T4 ısıtılmış Al-Mg-Si alaşımı levhaları, elektrik direnç kaynağı ve sürtünme direnç karıştırma nokta kaynağı ile üst üste bindirerek çekme-kesme yorulma testleri üzerine çalışmışlardır. Uygulanan yükü etkin performansla taşıyan çekirdek alanına göre değerlendirdiklerinde sürtünme direnç karıştırma nokta kaynağı ile oluşturulan numune bağlantılarının yorulma mukavemetleri daha üstün çıkmıştır. Yine bir başka teknik kullanan Duric vd. [12], direnç elemanı kaynağı ile AW 5754 H22 alüminyum alaşımı ile DP500 çelik sac levhanın birleşimlerinin dayanım, mikro yapısını, mikro sertliğini ve yorulma dayanımını incelemişlerdir.

Farklı sac kalınlıklarının etkisine odaklanan Zhao vd. [13], çalışmada Al 5052 alaşımı sac levhayı çekme kesme konfigürasyonunda üst üste bindirmeli bir şekilde tek nokta üzerinden KDP sac bağlantı metodu ile birleştirip bağlantıların yorulma davranışlarını, hasar modları ve konumlarını yanı sıra aşınma hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Yapılan testler neticesinde sac kalınlığının artması ile mevcut bağlantıların yorulma ömründe artış olduğunu fakat yorulma ömründeki artışın kısıtlı olduğunu, yorulma hasarı modlarının sac kalınlığından etkilendiğini ve sac levha bağlantı noktaları levha ara yüzlerinde aşınma meydana geldiğini belirlemişlerdir.

Yapılan çalışmada Sakaguchi vd. [14] yeni bir birleştirme yöntemi olan çukur punta kaynağı (DSW) ile birleştirilen iki tip çelik ve alüminyum alaşımı sac bağlantılarına çekme-kesme testleri ve yorulma testleri yapmıştır. DSW bağlantılarının hem çekme kesme mukavemetini hem de yorulma mukavemetini, kendiliğinden delen perçinleme (SPR) bağlantılarına eşit veya daha büyük olduğunu belirlemiştir. Sonlu eleman analizi, teğetsel gerilimin esas olarak sürtünme katsayısı tarafından yönetildiğini ve ayrıca çelik sac mukavemetinden etkilendiğini göstermiş, daha yüksek mukavemetli çelik, daha düşük teğetsel gerilime yol açarak DSW bağlantısı için daha uzun yorulma ömrü sağladığını tespit edilmiştir.

Uematsu vd. [15], A6061-T6 ve 304 plakaları arasındaki bindirmeli kesme bağlantılarını yapıştırma ile sağlamış, maksimum çekme-kesme yükleri, artan Al levha kalınlıkları ile arttığı gözlemlenmiştir. Artan Al plaka kalınlığı ile yorulma mukavemetleri de artmıştır. FEM analizleri, Al tarafındaki yapıştırıcının kenarındaki gerilme konsantrasyonunun, Al plaka kalınlığının artmasıyla azaldığını ve bunun da çekme ve yorulma özelliklerinin Al plaka kalınlığına bağlılığı ile ilişkili olabileceğini ortaya koymuştur.

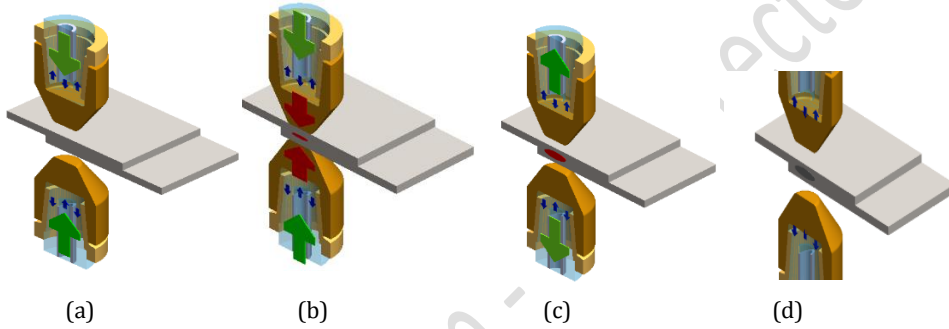
DP590/AA5754 arasında yapılan bağlantının mikroyapısı, kırılma davranışı ve hasar mekanizması makro ve mikro açılardan analiz eden ve yorulma hasar mekanizması ve yorulma aşındırma mekanizması inceleyen Zhang vd [16] KDP bağlantılarının yorulma ömrü esas olarak ana çatlağın başlamasından ve ilerlemesinden etkilendiği tesbit etmiş, plakalar arası yorulma aşınması, önemli miktarda granüler aşındırıcı kalıntıların çoğunlukla oksitlendiği perçinlerin yakınındaki bölgede şiddetli olduğunu belirlemiştir. Aynı bağlantı metodu üzerinde çalışan Chong vd. [17] çelik ile alüminyum bağlantılarının yapısal optimizasyonu için simülasyonla modellediği KDP bağlantısında daha iyi sonuçlar elde etmiştir.

Bu çalışmada, otomotiv endüstrisinde tercih edilen ve metalürjik olarak birbirinden farklı malzemeler olan 5000 serisi Al 5052 alaşımı sac levha ile Erdemir 1314 kalite düşük

karbonlu galvanize çelik sac levhayı, otomotiv endüstrisinde kullanılan üç farklı sac levha birleştirme metodu (FP, EDK, KDP) ile TSE EN ISO 14273 standardında belirtilen kesme-ayırma test formuna uygun olarak tek nokta üzerinden bağlantıları yapılmış, hazırlanan numunelere TSE EN ISO 14324 standardına uygun olarak yorulma testleri uygulanmıştır. Hem dayanım hem de yorulma davranışı açısından bu üç tekniğin de birbirlerinden farklı özellikler gösterdiği tespit edilmiştir.

2 Sac Levha Bağlantı Teknikleri

Sac levhalarla imalat sürecinin en önemli parçası aslında levhaların birleştirilmesi işlemidir. Sac kalınlığı, malzeme çeşitliliği, işlemin geriye dönük düzeltilebilmesi, sürecin uzunluğu vb. birçok parametre metot seçimini etkileyen faktörlerdir. Bu parametrelere göre üstünlüklere sahip vidalama, perçinleme, kenetleme, kaynaklama ve adheziv yapıştırma gibi birçok teknik halen uygulanmaktadır. Bu tekniklerin de tabii ki bazı avantajlar elde etmek için kendi özel uygulamaları da mevcuttur.



Şekil 2.1 Nokta Direnç Kaynağı Uygulama Aşamaları

Figure 2.1 Resistance Spot Welding Application Stages

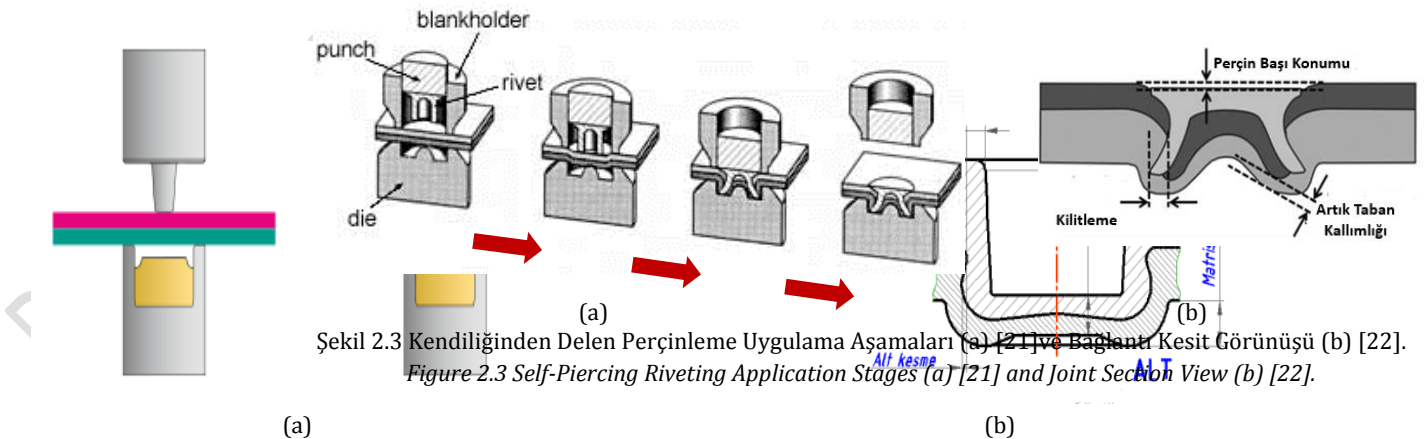
Elektrikli nokta direnç kaynağı, kaynakların içerisinde en çok tercih edilen türdür. Bağlantısı yapılacak sac levhalar arasındaki birleşme, sacların iki bakır elektrot arasına alınarak ve belirli bir baskı kuvveti uygulanması ve kısa bir süre boyunca elektrik akımının geçişi ile sağlanır. Birleştirme için gerekli düşük gerilim - yüksek akım bir transformatörde

elektrotun sac levhalara uyguladığı ilk kuvvet zamanı ile elektrik akımının verildiği ilk an arasındaki geçen süredir (Şekil 2.1-a). Kaynak zamanı, uygulanan kaynak akımının sac levhalara uygulandığı süre boyunca geçen zamandır (Şekil 2.1-b). Tutma zamanı, uygulanan kaynağı soğutmak için elektrotların sac levhalara halen kuvvet uyguladığı ama kaynak akımının kesildiği (Şekil 2.1-c), ölü zaman ise elektrotların sac levhalar ile temasının kesildiği süreçtir (Şekil 2.1-d).

Etkili bir nokta direnç kaynağı yapabilmek için yüzey kalitesi, kaynak elektrotunun boyut ve malzemesinin seçimi, kaynak akımı, kaynak ve bekleme süresi vb. birçok parametre şartlarını sağlamak gerekir.

Günümüz otomotiv endüstrisinde özellikle magnezyum levhaların kullanımında tercih edilen en yaygın birleştirme/kenetleme metodu Form Punta yöntemidir. Bu yöntem perçin, vida ve diğer mekanik bağlantı elemanlarına ihtiyaç duymadan, sac levhaları bölgesel olarak meydana getirilen deformasyonla birleştirir. İlk zamanlarda klima ve havalandırma sistemleri alanında kullanılması düşünülen bu

metot, günümüzde çelik konstrüksiyondan otomotiv endüstrisine kadar farklı endüstri kollarında başarı ile kullanılmaktadır [18,19]. Geçmiş yıllarda basit yapılı el ile uygulaması gerçekleştirilen uygulamalardan bugün robot kolları vasıtasıyla bağlanarak otomasyon işlemlerine uygun hale de getirilmişlerdir [20].



Şekil 2.3 Kendiliğinden Delen Perçinleme Uygulama Aşamaları (a) [21] ve Bağlantı Kesit Görünüşü (b) [22].

Figure 2.3 Self-Piercing Riveting Application Stages (a) [21] and Joint Section View (b) [22].

Şekil 2.2 Hareketli Birleştirme Prosesi (a) [20] ve Form Punta Kesit Görünüşü (b) [18].

Figure 2.2 Movable Joining Process (a) [20] and Section View of Clinching Joint (b) [18].

üretilir.

Nokta direnç kaynağının uygulaması Şekil 2.1'de gösterildiği gibi temelde dört farklı aşamadan oluşur. Sıkıştırma zamanı,

Form Punta tekniğinin uygulaması temelde dört aşamadır. Birinci aşamada; sac levhalar başlangıçta zımba ile alt kalıp arasında sabitlenir. İkinci aşamada zımba, sac levhaları kalıba

doğru ilerlemeye zorlar ve sonra levhaları kalıbın içerisine doğru iter. Üçüncü aşamada ise deforme olan sac levhalar kalıp tabanı ile temas eder, zımbanın aşağı yöndeki hareketi malzemeyi radyal olarak akmaya ve bir kenetleme formu oluşturmaya zorlar. Dördüncü ve son aşamada malzeme akışı, sac levhaları sıkıca bir arada tutan mekanik bir kilitleme sağlar (Şekil 2.2-b) ve sonunda zımba geriye çekilir.

Bazı form punta metotlarında dairesel, dikdörtgen, düz birleştirme, hareketli birleştirme (Şekil 2.2-a), çift etkili birleştirme, özel birleştirme tekniği gibi farklı tipte uygulamaları vardır [22].

Kendisi delen perçinleme teknolojisi özellikle çok katmanlı levhaları sorunsuz bir şekilde birleştirmesine olanak sağlar [23]. Bu yöntem kendi geçeceği perçin deliğini kendisi açan perçinlemeli bir çeşit form punta yöntemidir. Sac levhaları mekanik bir bağlantıda perçinleme işlemi için genelde yarı boru tipinde perçinler kullanılır. Birinci aşamada sac levhalara kalıp ile pot çemberi arasında bir sıkıştırılma uygulanır (Şekil 2.3-a). Yarı boru formundaki perçin, makinede mevcut bulunan bir pres yardımıyla sac levhalara zımba ile kalıp arasında birleştirilecek konumda yönlendirilerek çakılır. Üçüncü

kabiliyetine sahip olmasının yanı sıra yüksek yorulma dayanımı verir.

Deneylerde kullanılan düşük karbonlu galvanize çelik Erdemir 1314 ile Al 5052 alüminyum alaşımı deney numunelerinin kimyasal bileşimleri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji ve Uygulama Merkezi (TUAM)'nde Optik Emisyon Spektroskopisi

Çizelge 3.1 OES ile Belirlenmiş Erdemir 1314 Galvanize Çelik Kimyasal Bileşimi

Table 3.1 Chemical Composition of Erdemir 1314 Galvanized Steel Determined by OES

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Nb%
<0.001	<0.001	0.068	0.010	0.016	0.006	<0.002	<0.002	0.010
Al%	Cu%	Co%	B%	Ti%	V%	W%	Sn%	As%
0.136	0.024	<0.002	0.0008	0.035	0.008	<0.005	<0.001	<0.005
Ca%	Mg%	Ce%	La%	Pb%	Sb%	Te%	Zr%	Fe%
0.0011	<0.0005	0.034	<0.005	<0.002	<0.005	<0.001	<0.001	99.641

Çizelge 3.2 OES ile Belirlenmiş Al 5052 Alaşımı Kimyasal Bileşimi

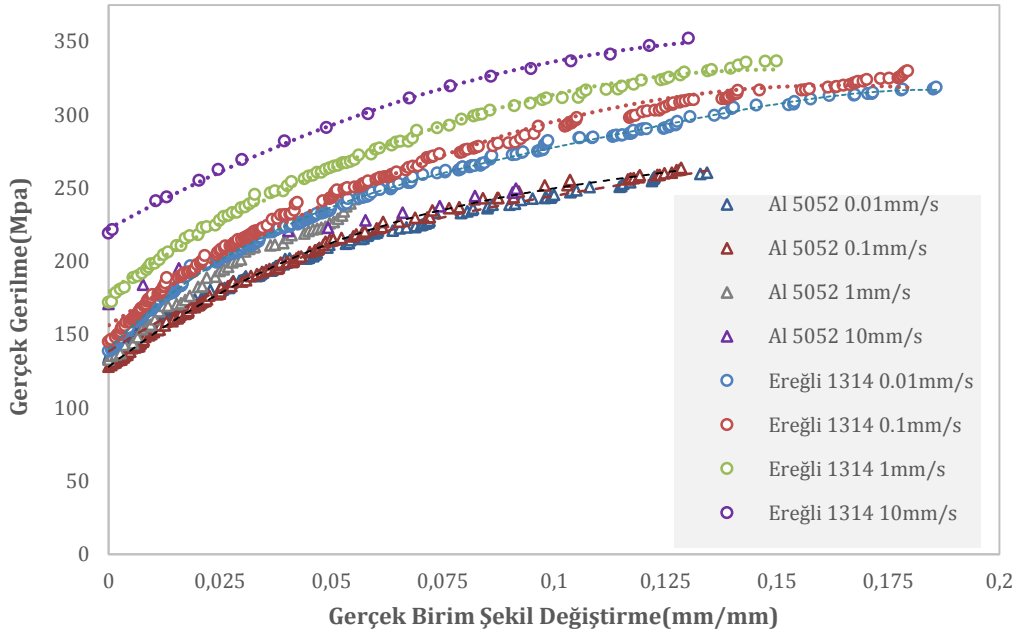
Table 3.2 Chemical Composition of Al 5052 Alloy Determined by OES

Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%	Ni%	Ti%
0.041	0.227	0.022	0.198	13.862	0.032	0.009	0.016	0.031
V%	Pb%	Sn%	Sr%	Be%	Ca%	Co%	B%	Ag%
0.007	0.014	0.008	0.0002	0.0008	0.0005	<0.0005	0.0005	<0.005
Bi%	Ga%	Sb%	P%	Zr%	Al%			
<0.0005	0.011	0.015	<0.005	<0.005	97.976			

aşamada perçin, üst tabakadaki sac levhayı deler ve kalıbın formu, perçinin alt tabakadaki sac levha içerisinde mekanik bir kilit oluşturmak üzere genişlemesini sağlar. Kalıbın şekli olarak alt tabakadaki sac levhanın alt kısmında bir kenetlenme formu oluşturur (Şekil 2.3-b). Son aşamada, birleştirme işlemi gerçekleştirildikten sonra zımba, sac levhalar üzerinden geriye çekilerek operasyon tamamlanır.

3 Materyal ve Metot

Bu çalışmada bilhassa soğuk şekillendirme kabiliyetinden dolayı (BMC, Ford, Mercedes, Renault) gibi otomotiv firmalarında yaygın olarak kullanılan ve 1 mm kalınlığa sahip Erdemir 1314 kalite düşük karbonlu galvanize çelik sac levha kullanılmıştır. Alüminyum alaşım ise yine 1 mm kalınlığa sahip 5000 serisi Al 5052 alaşımı sac levhadır. Yapısında %2,5 magnezyum (Mg) içeren Al 5052 alaşımının korozyona karşı direnci yüksek, kaynaklanabilir ve soğuk şekillendirme



Şekil 3.1 Al 5052 ve Erdemir 1314 Kalite Çelik için Farklı Çekme Hızlarında Gerçek Gerilme-Birim Şekil Değişirme Eğrisi
Figure 3.1 True Stress- Strain Curves for Al 5052 and Erdemir 1314 Quality Steel at Different Test Rates

Çizelge 3.3 Deney Malzemelerinin Farklı Hızlarda Gerçekleştirilmiş Mekanik Özellikleri
Table 3.3 Mechanical Properties of Materials at Different Test Speeds

Malzeme	Erdemir 1314 Galvanize Çelik				Al 5052 Alaşımı			
	0.01	0.1	1	10	0.01	0.1	1	10
Çekme Hızları (mm/s)	0.01	0.1	1	10	0.01	0.1	1	10
Akma Dayanımı (MPa)	125.3	165.7	224.1	292.1	147.1	193	142.1	213
Max Çekme Dayanımı (MPa)	256.7	285.1	297.1	305.1	234.7	231.2	219.7	219.7
Uzama (%)	32.9	32.8	27.8	15.9	17.6	16.9	15.8	14.1

(OES) cihazında belirlenmiştir. Numunelerinin içerisindeki element ve yüzdeleri, her iki alaşım için Çizelge 3.1'de ve Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Erdemir 1314 ile Al 5052 alaşımı sac levhanın mekanik özelliklerini tespit etmek amacıyla farklı çekme hızlarında, TSE EN ISO 6892-1 standardına göre hazırlanmış sac levha numunelere çekme testleri uygulanmıştır. Gerçekleştirilen çekme deneyleri neticesinde gerçek gerilme - gerçek birim şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Çekme hızları her bir galvanize çelik ve alüminyum alaşımından oluşan malzeme grupları için 0.01mm/s, 0.1mm/s, 1mm/s, 10mm/s hızlarında ve herbir grupta onar adet numune ile gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda elde edilen gerçek gerilme - gerçek birim şekil değiştirme grafikleri farklı çekme hızlarında birlikte Şekil 3.1'de görülebilir. Numuneler TSE EN ISO 6892-1 standartlarına göre belirlenen ölçü değerlerinde CNC lazer kesim cihazlarında kesilmiştir.

Kullanılan malzemelerin farklı çekme hızlarında ve yine TSE EN ISO 6892-1 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilen testler ile elde edilen numunelerin akma dayanımları, maksimum çekme dayanımları ve % uzama değerleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Statik bağlantı ayrılma kuvvetini tespit etmek amacıyla numuneler kesme deneyi için TSE EN ISO 14273 standardına uygun olarak tek nokta üzerinden birleştirilmiştir. Alüminyum alaşımın yüzeylerinde yer alan ve uniform olarak dağılmayan oksit tabakası oldukça yüksek elektrik direncine sahiptir ve yüksek sıcaklık değerlerinde ergir. EDK tekniği uygulanan bağlantılarda oldukça problem oluşturan yüzeylerindeki bu oksit tabakası, EDK uygulamasından önce mekanik ve kimyasal yollarla uzaklaştırılmıştır. Kimyasal yolla temizlik metodunda kullanılan çözelti bileşenleri %12 Nitrik asit ve %0.4 hidroklorik asitten oluşmaktadır. Numuneler bu çözelti 2-6 dakika arasında kimyasal banyo şeklinde uygulandıktan sonra saf su ile durulama işlemi uygulanmıştır.

Standarta uygun sac levha bağlantıları ise AKÜ Makine Elemanları Laboratuvarında bulunan 30 kVA DC elektrik direnç nokta kaynağı makinasında (Şekil 3.2-a), konik uçlu %99 bakır oranına sahip 6 mm çaplı elektrotlar ile yapıldı. EDK metodu ile gerçekleştirilen birleştirmelerde olduğu gibi yine sac levhaların form punta ile birleştirmeleri, TOX firması tarafından üretilen 45 kN güç kapasiteli yarı pnömatik yarı hidrolik prensipte çalışan ve AKÜ Makine Elemanları Laboratuvarında bulunan bir form punta makinesinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.2-b). Makinadaki mevcut kalıplar ideal olarak toplam levha kalınlığı



Şekil 3.2 Üç Farklı Sac Levha Bağlantı Tekniğe Ait Cihazlar a-EDK b-FP c-KDP

Figure 3.2 Devices of Three Different Sheet Metal Joining Techniques a-RSW b-Clinching c-SPR

2-4 mm'ye kadar olan sac levha birleştirmelerine kullanılmaktadır.

Özellikle farklı metal malzeme gruplarının birleştirilmesinde bir alternatif olarak sunulan KDP metodunun ülkemizde kullanımı henüz yaygın değildir. Deney numuneleri, özel sektöre hizmet veren bir firmanın yardımı ile birleştirilmiştir (Şekil 3.2-c). Yapılan bağlantılarda kullanılan perçin 55.9 kN'luk bir kuvvet ile, 230 mm/s ekleme hızında ve 0.051 s bekleme süresinde deney numunelerine nüfuz ederek levhaları birleştirmiştir. Bağlantısı tamamlanmış numunelere kesme-ayırılma ve yorulma deneylerinin uygulanması A.K.Ü Makine Elemanları Laboratuvarında mevcut olan Instron 8801 model yorulma cihazında gerçekleştirilmiştir. Cihazın kapasitesi 100 kN olup servo hidrolik test sistemi statik ve dinamik testlerle beraber düşük ve yüksek frekanslarda yorulma deneylerine imkan tanımaktadır. Deneylerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri TSE EN ISO 6892-1 standardına uygun belirlendikten sonra alüminyum alaşımı ve galvanize çelikten oluşan deney malzemeleri üç farklı sac levha birleştirme metodu ile TSE EN ISO 14273 standardında birleştirilerek bağlantıların dayanabileceği maksimum kesme-ayırılma kuvveti değerleri belirlenmiştir.

Birleştirilen deney numunelerin kesitindeki bağlantı formlarını incelemek için numuneler, birleşim noktalarından AKÜ Metalurji ve Malzeme laboratuvarında bulunan Metacut-M250 kesme makinesinde kesilmiş, Metkon marka numune parlatma cihazında yeterli yüzey kalitesine ulaşınca kadar yüzeyleri parlatılmış ve gereken uygulanmalarda Remet IPA 30 sıcak bakalıte alma cihazında numuneler kalıplanmış ve nital dağılayıcı uygulanarak dağlanmış, bu yüzeylerin incelenmesi

AKÜ Mineraloji Laboratuvarında yer alan Leica DMS 300 ile gerçekleştirilmiştir.

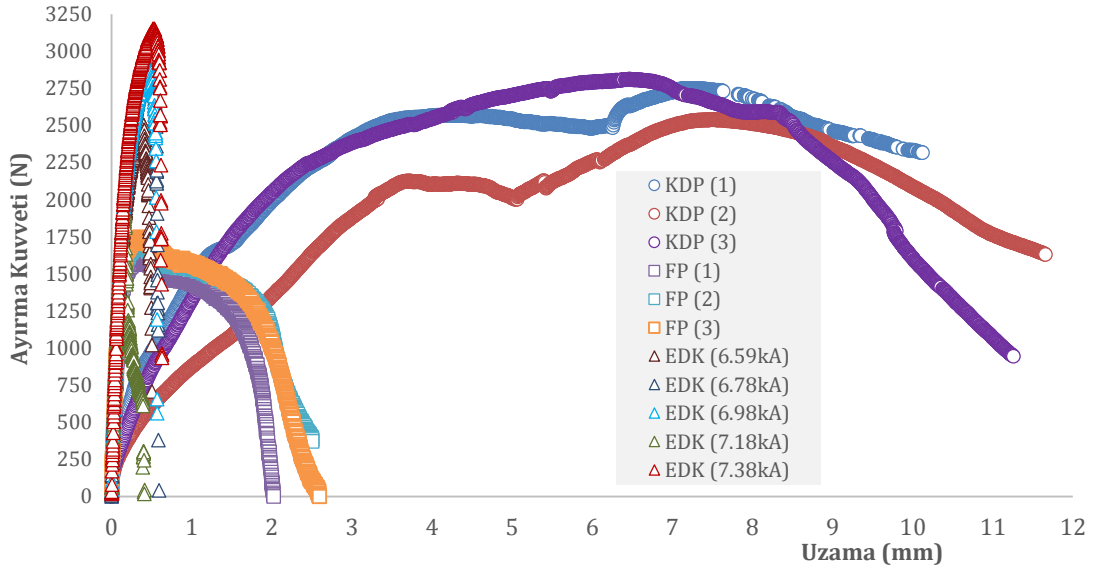
4 Sonuçlar ve Tartışma

TSE EN ISO 14273 standardına uygun olarak birleştirilen numunelerin ortalama kesme-ayırılma kuvvet değerleri Instron 8801 cihazında elde edilmiştir. Deneyler 1 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiş ve bağlantısı tamamlanmış numunelerin birbirinden tamamen ayrılmasına kadar uygulanmış ve her bir metot için en az yirmi adet deney sonucu ortalama hesaplama işleminde kullanılmıştır (Çizelge 4.1).

Sac Levha Birleştirme Metodu	Ortalama Kesme-Ayırılma Kuvveti
Elektrikli Direnç Nokta/Punta Kaynağı (RSW)	3451.1 N
Kendisi Delen Perçinleme (SPR)	2848.7 N
Form Punta (Clinching)	1848.6 N

Çizelge 4.1 Üç Farklı Sac Levha Birleştirme Metodu için TSE EN ISO 14273 Deneyi Ortalama Ayırma Kuvveti

Table 4.1 TSE EN ISO 14273 Test Average Separation Force for Three Sheet Metal Joining Methods.



Şekil 4.1 Farklı Sac Birleştirme Metotları ile Birleştirilen Numunelerin Kesme Deneyi ile Elde Edilen Ayırma Kuvveti-Uzama Eğrileri

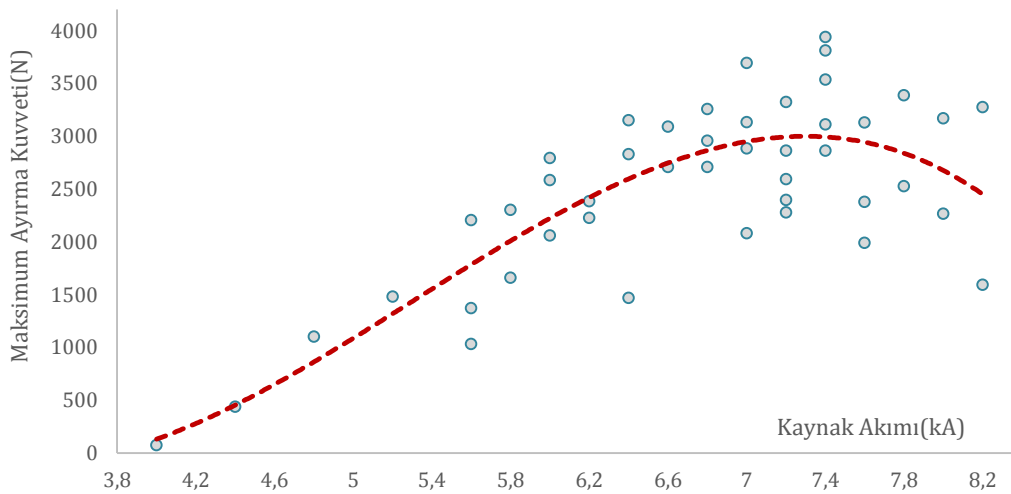
Figure 4.1 Separation Force-Elongation Curves Obtained by Shear Test of Samples Joined with Different Sheet Metal Joining Methods

Şekil 4.1'de üç farklı sac birleştirme metoduyla birleştirilen numunelerin kesme-ayırma kuvveti ile oluşan deplasman değişimi grafikleri birlikte verilmiştir. EDK bağlantılarda kullanılan kaynak akımının ayırma kuvvetine büyük etkisi Şekil 4.1'de oldukça açıkça gözükmemektedir. Yine burada metodların bağlantı yapısına göre birbirleri ile olan büyük ayrılma deplasman farkları da yorulma ile ilgili sonuçlarda etkisini göstermektedir.

FP metot ile birleştirilen numuneler şiddetli yerel plastik deformasyona maruz kalarak form almaktadır. Bağlantının dayanımı alt ve üst sac levhanın buradaki S kenetlenme formuna bağlıdır [24]. Alt kesme ve boyun kalınlığı parametreleri FP metot ile gerçekleştirilen bağlantının gücünü belirlerken taban kalınlığı ise bağlantı kalitesinin bir

göstergesidir. Bağlantılarda daha az sünek malzemeler bağlantının üst kısmında tercih edilmez. Sünek ve mukavemeti daha yüksek malzemeler bağlantıda üst kısımda bulunması önerilir [24,25]. FP metodu uygulamasında Alüminyum sac levhanın çelik sac levhaya göre üst konumda olduğu birleştirmeler (1848,61 N), çelik sacın üst konumu da birleştirildiği için bulunan ortalama ayırma kuvveti değeri değerinin altında değerinde kaldığı (833,2 N) görülerek, yorulma testlerinde çelik levhanın üst konumda olduğu durum tercih edilmiştir (Şekil 4.3.a-b).

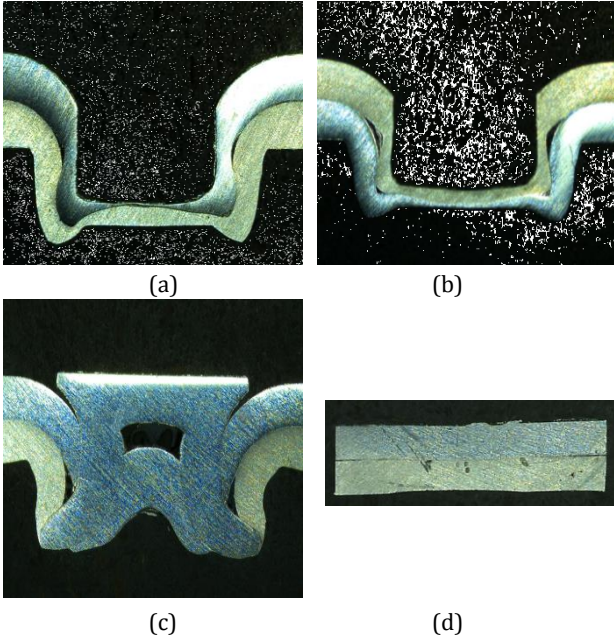
Deney numunelerine uygulanan kaynak parametrelerinde literatürde tavsiye edilen elektrot baskı kuvveti (250 kgf) sabit tutularak farklı kaynak akımlarında bağlantılar yapılmıştır. Burada keza bekleme süresi 25 Cycle, kaynak süresi 8 Cycle



Şekil 4.2 Kaynak Akımının Bağlantı Ayırma Kuvvetine Etkisi

Figure 4.2 Effect of Welding Current on Separation Force

sabit alınırken kaynak akımı 6.4-8.4 kA değerleri arasında seçilmiş ve 7.38 kA kaynak akımının optimal sonuç verdiği belirlenmiş (Şekil 4.2), EDK yorulma test uygulamaları bu değer kullanılarak oluşturulmuştur.



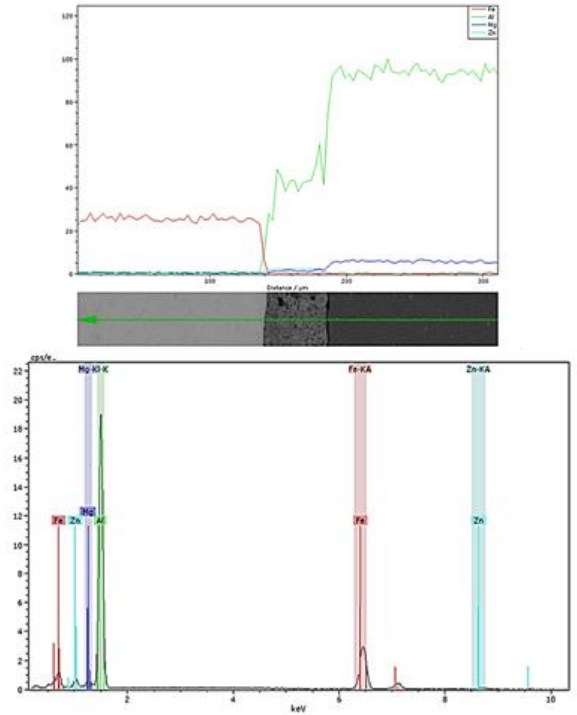
Şekil 4.3 Bağlantı Kesit Görünüşleri a) Çelik Sac Levha Üst konum FP b) Alüminyum Sac Levha Üst Konum FP c) Çelik Sac Levha Üst konum KDP d) Çelik Sac Levha Üst konum EDK

Figure 4.3 Joints Section Views a) Steel Sheet Metal Top Position for Clinching b) Aluminum Sheet Metal Top Position for Clinching c) Steel Sheet Metal Top Position - SPR d) Steel Sheet

KDP metot ile uygulamalarda perçin, üst sacı delip geçerek alt sacda perçinin uç kısımlarının alt saca kılavuzluk eden kalıbın eşliğinde etek formunda genişleyerek bağlantı gerçekleşir. Daha yüksek dayanımlı bir birleştirme için kullanılan perçinin üst sac levhayı delemek kadar güçlü ve uç kısımlarının etek formunu alt sac levha içerisinde alacak kadar esnek olması istenir [26]. Bağlantıdaki kilit mesafesi (Interlock) sağlıklı bir birleştirme için önemlidir. Şekil 4.3-c'de görüldüğü gibi iyi bir kilit yapısı oluşturulmuştur.

EDK bağlantısına sahip numunelerin kesit görüntüleri çıkarılmış (Şekil 4.3-d) ve EDS analizi Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji ve Uygulama Merkezi (TUAM)'nde bulunan (EDX - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) detektörü yardımıyla tespit edilmiştir. Birleşim bölgelerinin ara yüzünde ergime sıcaklığının demir elementinden daha düşük olduğundan alüminyum elementince göre daha zengin olduğu tespit edilmiştir. Arayüzde oluşan intermetalik faz da çeliğin korozif ortama karşı korumasını sağlayan kaplama elementi çinko (Zn) ve alüminyum alaşımının içerisinde bulunan Magnezyum (Mg) elementinin varlığı da tespit edilmiştir. Her iki analiz sonuçları Şekil 4.4'de verilmiştir.

Yorulma deneyleri, AKÜ Makine Elemanları Laboratuvarında bulunan 100 kN kapasiteli Instron marka 8801 model çekme ve yorulma cihazında R=0,1 gerilme oranında çekme-çekme gerilme tipinde 10 Hz frekans değişimi uygulanmış, yorulma çevrim sınırı için literatürde geçerli 10^6 çevrim sayısı kullanılmıştır. Daha önce elde edilen ayrılma kuvvet oranlarına



Şekil 4.4 EDK Metot ile Birleştirilen Numuneler için Çizgi EDS Analizleri

Figure 4.4 Line EDS Analyzes for Samples Joined with the RSW Method

göre %90, %75, %66, %50, %33, %25, %20 değerlerinde yorulma testleri gerçekleştirilmiştir. Ancak özellikle FP bağlantılarında zorunlu olarak daha yüksek % oranları için testler yapılmıştır. Şekil 4.5'de kullanılan her bir sac levha birleştirme metodu için % ayırma-kesme kuvveti oranı ile çevrim sayısı ilişkisi, Şekil 4.6'da ise bu üç sac levha birleştirme metodu için ayırma-kesme kuvveti oranı ile çevrim sayısı ilişkisi grafik olarak verilmiştir.

5 Sonuçlar

Otomotiv endüstrisinde aranan özelliklerin hepsini de karşılayabilecek tek bir malzeme bulmak imkansızdır. Birlikte olması avantaj oluşturabilecek iki malzemenin birlikte kullanımı, bu kez farklı problemleri ortaya çıkarır. Farklı metalurjik özelliklere sahip olan çelik ve alüminyum malzemelerde olduğu gibi tüm yapıyı daha hafif hale getirmeye çalıştığımızda bağlantılar bazı problemlere sahiptir. Özellikle otomotiv endüstrisinde oldukça sık başvurulan EDK metodu ile gerçekleşen bağlantılar problem oluşturunca, bazı alternatif mekanik kenetlenmeli sac birleştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu çalışmamızda EDK tekniği yanı sıra bu tekniklerden FP ve KDP'nin dayanım ve yorulma özellikleri ile üzerine gerçekleştirilmiştir. TSE EN ISO 14273 standartlarına göre kesme-ayrılma ve TSE EN ISO 14324 standartlarına göre yorulma deneyleri uygulanarak yapılan değerlendirmeler sonucunda;

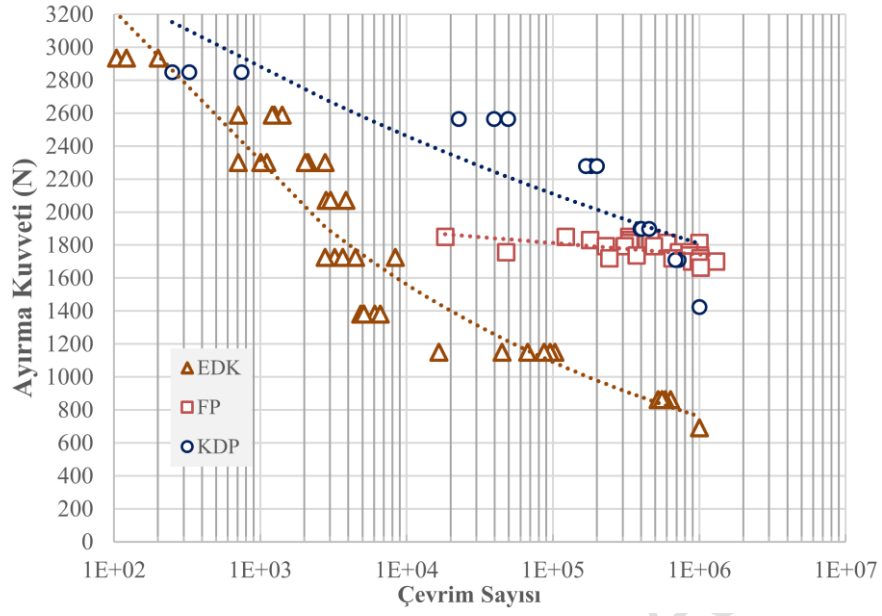
- ✓ EDK metot ile yapılan bağlantıda 250 kgf elektrot kuvveti, 25 cycle sabit bekleme süresi, 8 cycle sabit kaynak süresinde ve 7.38 kA kaynak akımında optimal bir dayanım değerine ulaşılmıştır.

- ✓ Üç farklı sac levha birleştirme metodu için TSE EN ISO 14273 standartlarında kesme deneyleri sonucunda en yüksek ortalama ayırma kuvveti değeri EDK metot ile yapılan sac levha bağlantılarında tesbit edilmiştir (3451.1 N). Bu değer KDP için 2848.7 N ve FP metodu için 1848.6 N olduğu hesaplanmıştır.
 - ✓ Üç farklı sac levha birleştirme metodu için belirlenen 10^6 çevrim sayısı için, yorulma ömür sınır değerleri; FP metot ile gerçekleştirilen sac levha bağlantılarında ayrılma değerinin %90 oranı olan 1663.75 N, KDP metot ile ayrılma dayanımının %50 oranı olan 1424.3 N ve EDK metot ile ayrılma dayanımının %20 oranı olan 690.22 N değerinde olduğu görülmüştür. Sonuçta yorulma ömrü en yüksek FP metodu olarak belirlenirken, EDK metodu ile yapılan bağlantı yapılarında daha yüksek yorulma ömrüne ulaşılması, FP ve KDP metodlarında saclar arasındaki kenetlenmedeki zayıf rijitliğin nedeni ile ileri geldiği düşünülmektedir.
 - ✓ EDK ile gerçekleştirilen bağlantı dayanımının uygulanan diğer iki bağlantı metoduna göre daha yüksek olmasına rağmen, daha az rijit yapıdaki bağlantıların yorulma ömür değerlerinin yüksek değerler almasının, ayrılma uzaması ile ilişkili olduğu değerlendirilmiştir.
 - ✓ Gerek deneysel gerek sonlu elemanlar tekniği ile yapılan çalışmalarda kaynaktaki ısısının, kaynak çekirdeğininin etrafında metalurjik bir çentik oluşturan lokal bir sertleşmeye yol açtığı ve bunun sonucunda da yapının dayanıklılığını azaldığı belirtilmiştir [27]. Bu da punta kaynaklı bağlantıların daha düşük yorulma sınırına sahip olmasının en önemli nedenidir. Ancak sac kalınlığı, çekirdek çapı vb. parametreler kaynaktaki hem dayanım hem de yorulma üzerinde oldukça etkili değişimlere yol açtığı da bir gerçektir [27, 28, 10, 11].
 - ✓ FP tekniğinde son derece etkili kalıp formu, kalıplama hızı, ön delme, bölgesel ısıtma vb. konularda yapılan araştırmalar [29,30] ve KDP tekniğinde farklı perçin yapısı [31] benzeri iyileştirmeler dayanımı ve yorulma ömrünü artırır da [32] kullandığımız üç teknikte de genel anlayışa uygun olarak [33] EDK tekniğinde dayanım diğerlerine kıyasla üstün olmasına rağmen yorulma ömrü KDP tekniğinde çok daha iyi olduğu görülmüştür.
- constant welding time and 7.38 kA welding current in the connection made with RSW method.
 - ✓ As a result of shear tests in accordance with TSE EN ISO 14273 standards for three different sheet metal joining methods, the highest average separation force value was determined in sheet metal connections made with RSW method (3451.1 N). This value was calculated as 2848.7 N for SPR and 1848.6 N for CL method.
 - ✓ For the number of 10^6 cycles determined for three different sheet metal joining methods, the fatigue life limit values were 1663.75 N which is 90% of the separation value in sheet metal joints made by CL method, 1424.3 N which is 50% of the separation strength with SPR method and 690.22 N which is 20% of the separation strength with RSW method. As a result, the highest fatigue life was determined as the CL method, while the higher fatigue life of the connection structures made with the RSW method is thought to be due to the weak stiffness in the interlocking between the sheets in the CL and SPR methods.
 - ✓ Although the strength of the connection made with RSW is higher than the other two connection methods applied, it is evaluated that the high fatigue life values of the joints with less rigid structure are related to the separation elongation.
 - ✓ In both experimental and finite element technique studies, it has been reported that the heat of the weld causes a localised hardening around the weld nugget forming a metallurgical notch, which in turn reduces the strength of the structure [27]. This is the most important reason for the lower fatigue limit of spot welded joints. However, it is also a fact that parameters such as sheet thickness, core diameter, etc. lead to highly effective changes in both strength and fatigue [27, 28, 10, 11].
 - ✓ Although researches on die form, forming speed, pre-punching, local heating etc., which are highly effective in CL technique [29,30] and improvements such as different rivet structure in SPR technique [31] increase the strength and fatigue life [32], in accordance with the general understanding in all three techniques we used [33], although the strength is superior in RSW technique compared to others, fatigue life is much better in SPR technique.

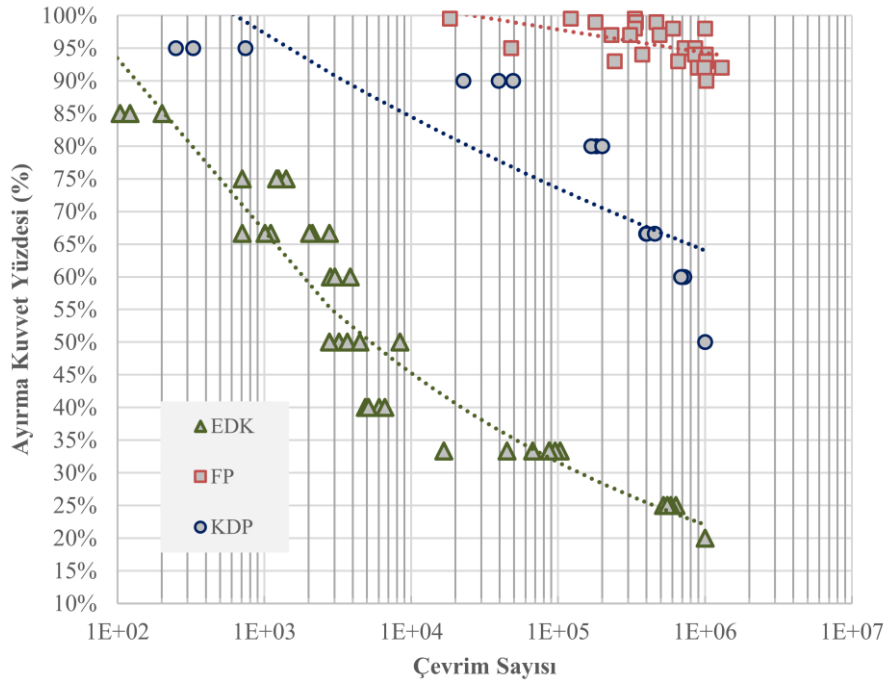
6 Conclusions

In the automotive industry, it is impossible to find a single material that can meet all of the required properties. The use of two materials that can be advantageous together creates different problems this time. When we try to make the whole structure lighter, as in the case of steel and aluminium materials with different metallurgical properties, the connections have some problems. Especially in the automotive industry, the RSW method, which is frequently used in the automotive industry, has been developed as an alternative mechanical clamping sheet metal joining method. In this study, besides the RSW technique, the strength and fatigue properties of CL and SPR were investigated. As a result of the evaluations made by applying shear-separation tests according to TSE EN ISO 14273 standards and fatigue tests according to TSE EN ISO 14324 standards;

- ✓ An optimum strength value was achieved at 250 kgf electrode force, 25 cycles constant waiting time, 8 cycles



Şekil 4.5 Üç farklı Sac Levha Birleştirme Metodu için Ayrırma-Kesme Kuvveti & Çevrim Sayısı İlişkisi
 Figure 4.5 Separation-Shear Force & Number of Cycles Relationship for Three Sheet Metal Joining Methods



Şekil 4.6 Üç farklı Sac Levha Birleştirme Metodu için % Ayrırma-Kesme Kuvveti Oranı & Çevrim Sayısı İlişkisi
 Figure 4.6 Relationship between Separation-Shear Force% Ratio & Number of Cycles for Three Sheet Metal Joining Methods

7 Teşekkür

xxx

8 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Yazar 1 fikrin oluşması, sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi, testlerin yapılması, makale yazım ve denetimi başlıklarında; Yazar 2 literatür taraması, malzemelerin temini, numune hazırlanması, testlerin

yapılması, sonuçların değerlendirilmesi, kullanılan sonuçların incelenmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

9 Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

“Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur”
 “Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır”.

10 Kaynaklar

- [1] Başer TA, "Alüminyum Alaşımaları ve Otomobil Endüstrisinde Kullanımı", Mühendis ve Makina, 53, 51-58, 2012.
- [2] Akdı S, Demirpolat H, "Farklı Malzemelerden Üretilen Otomotiv Parçalarının Teknik ve Ekonomik Karşılaştırılması", The International Conference on Materials Science, Mechanical and Automotive Engineerings and Technology, 21-23 Haziran 2019, Kapadokya/Türkiye
- [3] Fulong L, Wei C, Chengjiang D, Jinlong G, Xiaotao Z, Yutao M, Limin D, "Research advances in fatigue behaviour of clinched joints", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 127, 1-21, 10.1007/s00170-023-11547-2, 2023.
- [4] Mori K, Abe Y, Kato T, "Mechanism of Superiority of Fatigue Strength for Aluminium Alloy Sheets Joined by Mechanical Clinching and Self-Pierce Riveting", Journal of Materials Processing Technology, 212, 1900-1905, 2012.
- [5] Kang S H, Kim H K, "Fatigue Strength Evaluation of Self-Piercing Riveted Al-5052 Joints Under Different Specimen Configurations", International Journal of Fatigue, 80, 58-68, 2015.
- [6] Woo A, "Resistance Spot Weld Fatigue Life Prediction Method Compatibility with Self-Piercing Rivets", The University of Waterloo, M.Sc. Thesis, 98p, Waterloo Ontario, 2022.
- [7] Abe Y, Kato T, Mori K, Nishino S, "Mechanical Clinching of Ultra-High Strength Steel Sheets and Strength of Joints", Journal of Materials Processing Technology, In Press, 2014.
- [8] Zhao L, He X, Xing B, Lu Y, Gu F, Ball A, "Influence of Sheet Thickness on Fatigue Behavior and Fretting of Self-Piercing Riveted Joints in Aluminum Alloy 5052", Materials and Design, 87, 1010-1017, 2015.
- [9] Spitsen R, Kim D, Flinn B, Ramulu M, Easterbrook ET, "The Effects of Post-Weld Cold Working Processes on the Fatigue Strength of Low Carbon Steel Resistance Spot Welds", Asme Journal of Manufacturing Science and Engineering, 127, 718-723, 2005.
- [10] Daneshpour S, Riekehr S, Koçak M, Gerritsen CHJ, "Mechanical and Fatigue Behaviour of Laser and Resistance Spot Welds in Advanced High Strength Steels", Science and Technology of Welding and Joining, 14, 20-25, 2009.
- [11] Uematsu Y, Tokaji K, "Comparison of Fatigue Behaviour Between Resistance Spot and Friction Stir Spot Welded Aluminium Alloy Sheets", Science and Technology of Welding and Joining, 14, 62-71, 2009.
- [12] Duric A, Milcic D, Burzic Z, Klobcar D, Milcic M, Markovic M, Krstic V, "Microstructure and Fatigue Properties of Resistance Element Welded Joints of DP500 Steel and AW 5754 H22 Aluminum Alloy", Crystals, 12, 1-15, 2022.
- [13] Zhou Z J, Huang Z C, Jiang Y Q, Tang N L, "Joining Properties of SPFC440/AA5052 Multi-Material Self-Piercing Riveting Joints, Materials", 15, 2-17, 2022.
- [14] Sakaguchi M, Kurokawa Y, Nakamura F, Hashimura T, "Fatigue strength of steel-aluminum alloy dissimilar lap joints fabricated by dimple spot welding for automotive application", Fatigue Fract Eng Mater Struct, 47(3), 939-951, 2024.
- [15] Uematsu Y, Ozeki Y, Toasa C, "Tensile-shear properties of steel-Al adhesively bonded dissimilar joints and the effect of Al plate thickness", Sci Rep 13, 19819, 2023.
- [16] Zhang Y, Jiang J, Wang T, Lei B, Xu C, Liao C, Peng J, "Fatigue behaviour and life prediction of self-piercing riveted joints in DP590/AA5754 dissimilar sheets", Thin-Walled Structures, Volume 200, 111971, ISSN 0263-8231, 2024.
- [17] Chong X, Dengfeng W, Dewen K, Shuang W, Changqing D, "Material-structure-process-performance integrated optimization method of steel/aluminum self-piercing riveted joint", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 132, 10.1007/s00170-024-13483-1, 2024.
- [18] Çetkin A, "The Clinching Joints Strength Performance of EN 10346: 2015 DX52D+Z Sheets", Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 21(1): 217-228, 2021.
- [19] Kaya H, "Form Punta (Clinching) Yöntemiyle Birleştirilmiş İnce Sac Levhaların Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 80s, Afyon, 2012.
- [20] <https://tr.tox-pressoteknik.com/applications/Form-punta/sheet-metal-Form-punta-shapes/sheet-metal-Form-punta-shapes/>, 27.09.2023
- [21] Turan M, "Perçinsiz Sac Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi", Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 53s, Afyon, 2019.
- [22] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-self-piercing-riveting-and-how-does-it-work>, 27.09.2023
- [23] Silva EL, Höche D, Bouali AC, Serdechnova M, Sesenes RL, Scholz CS, "Digital Modelling of The Galvanic Corrosion Behaviour of a Self-Piercing Riveted AZ31 - AA5083 Hybrid Joint", Mat.-wiss. u. Werkstofftech, 48, 529-545, 2017.
- [24] Çetkin A, "Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Galvanizli Çelik-Alüminyum Sac Form Punta Bağlantılarının Mekanik Özelliklerinin Araştırılması", Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7, 25-38, 2010.
- [25] Jiang T, Liu ZX, Wang PC, "Quality Inspection of Clinched Joints of Steel and Aluminum", Int J Adv Manuf Technol, 76, 1393-1402, 2015.
- [26] Mori K, "Assessing the Suitability of Materials for Self-Piercing riveting (SPR)", Woodhead Publishing Limited, 232p, Cambridge, 2014.
- [27] Heidrich D, Zhang F, Fang X, "Fatigue Strength of Rivet Resistance Spot Welding Technique in Comparison with Self-Piercing Riveting for Multi-material Body-in-White Structure", J. of Materi Eng and Perform, 30, 3806-3821, 2021.
- [28] Marwah S F, Ahmed A, Ibtihal A M, "Investigating Spot Weld Fatigue Failure with Experimental and Finite Element Analysis Methods", Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering, Volume 8-1, Number 2, 2024.
- [29] Zhao H, Han L, Liu Y, Liu X, "Experimental and Numerical Investigations on the Impact of Surface Conditions on Self-Piercing Riveted Joint Quality", Coatings, 13, 858, 2023.
- [30] Xu F, Wang H, Gao M, Liu H, Xu L, "Connection of difficult-to-form sheets by clinching process: A review", Materials Science and Technology. 2022;38(10):622-644.
- [31] Gupta S, Ganesh N R, Das S, Asati B, "Joining of Dissimilar Galvanized Steel Sheets by Resistance Spot Welding and Self-piercing Riveting", Advances in Additive Manufacturing and Metal Joining, Springer, 2023.

- [32] Huang Z C, Zhang Y C, Jiang Y Q, "Forming Qualities and Mechanical Properties of AA5052 Aluminum Alloy Self-piercing Riveted Joints Connected by Tubular and Semi-tubular Rivets" Journal of Materials Engineering and Performance. 10.1007/s11665-024-09497-1, 2024.
- [33] Comparing clinching and self-piercing rivets to spot welding - TWI (twi-global.com), 09.07.2024.

Düzenlenmemis Sürüm - Uncorrected Version