

Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen DP600 çeliğinin çekme makaslama özelliğinin incelenmesi

Investigation of the tensile shear property of DP600 steel combined with resistance spot welding

Bilge DEMİR¹ , Muhammed ELİTAŞ^{2*} , Hüseyin KARAKUŞ¹ 

¹Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karabük Üniversitesi, Karabük, Türkiye.

bdemir@karabuk.edu.tr, hsyn_krks@windowslive.com

²Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye.

muhammed.elitas@bilecik.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 12.02.2021

Düzeltilme Tarihi/Revision: 28.09.2021

doi: 10.5505/pajes.2021.53383

Kabul Tarihi/Accepted: 11.10.2021

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada nokta direnç kaynaklı DP600 çeliğinin ideal çekme makaslama dayanımını elde etmek için farklı elektrot uç tipi (Konik yuvarlak, Düz R3, Düz R6, Düz konik) ve kaynak akımı parametrelerinin optimizasyonuna odaklanılmıştır. Kaynak prosesleri 4 farklı uç tipinin her biri için 5 ve 7 kA kaynak akımlarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar çekme makaslama dayanımını etkileyen en önemli değişkenin kaynak akımı olduğunu göstermiştir. Kaynak akımı arttıkça çekme makaslama dayanımı artmıştır. Kaynak çekirdek çap değeri ile çekme makaslama dayanımı arasında doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Düz 3 mm yarıçap uçlu elektrotlar ile en yüksek, konik yuvarlak uçlu elektrotlar ile en düşük çekme makaslama dayanımı değerleri elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: DP600 çeliği, Nokta direnç kaynağı, Kaynak çekirdek çapı, Çekme makaslama dayanımı.

Abstract

This study focused on optimization of different electrode tip types (Conical round, Flat R3, Flat R6, Flat conical) and welding current parameters to obtain the ideal tensile shear strength of resistance spot welded DP600 steel. Welding processes were carried out at 5 and 7 kA welding currents for each of the 4 different tip types. Experimental results showed that welding current is the most important variable affecting tensile shear strength. As the welding current increased, the tensile shear strength increased. It has been determined that there is a linear relationship between the nugget diameter value and the tensile shear strength. The highest tensile shear strength values were obtained with flat 3 mm radius electrode tips and the lowest with conical round tip electrodes.

Keywords: DP600 steel, Resistance spot welding, Weld nugget diameter, Tensile shear strength.

1 Giriş

Malzemelerin seçimi, araç tasarımında kilit aşamalardan biridir. Emniyet, yakıt verimliliği, çevrecilik, üretilebilirlik, sağlamlık, kalite, maliyet gibi çeşitli faktörler otomotiv uygulamaları için malzeme seçimini belirlemektedir. Araçların ağırlığını azaltma isteği, araç üreticilerinin malzeme seçiminde verimliliği maksimize etmek için araştırmaya itmiştir. Bu sonuçları araç gövdesinde elde edebilmek için, araç üreticileri alternatif malzemelere yönelmiştir [1]-[5]. Otomotiv çelikleri mekanik performanslarına bağlı olarak üç farklı grupta kategorize edilebilir: düşük dayanımlı çelikler (arayer atomsuz ve yumuşak çelikler), geleneksel yüksek dayanımlı çelikler (karbon-mangan, fırında sertleştirilebilir ve yüksek dayanımlı düşük alaşım çelikler) ve geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerdir [AHSS] [6]-[8]. AHSS çelikleri üç kuşak olarak adlandırılmaktadır. AHSS çeliklerinin ilk jenerasyonunda öncelikli olarak ferrit esaslı mikro yapılar bulunmaktadır. Bu jenerasyon; çift faz (DP), TRIP, CP ve martenzitik çeliklerden oluşmaktadır. Günümüzde, bu jenerasyon otomotiv endüstrisinde özellikle nokta direnç kaynak (NDK) yöntemi ile birleştirilerek sıklıkla kullanılmaktadır [8]-[10].

Bir malzemenin kaynak edilebilirliği, otomotiv endüstrisindeki uygulamasına yol gösteren en önemli faktörlerden biridir [11]. Araç parçaları (kızak, kapılar vb.) ince metal saclardan

yapılmakta ve NDK ile birleştirilmektedir. NDK, otomotiv üretimi için önemli bir birleştirme prosesidir [12]. Gaz tungsten ark kaynağı, lazer nokta kaynağı ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı prosesleri gibi birçok ileri nokta kaynak teknolojileri mevcut olmasına rağmen, geleneksel NDK özellikle otomotiv endüstrisinde sac metal birleşimlerinde kullanılan baskın prosesdir [13]. Yüksek operasyon hızları ve otomasyon veya robotik uygulamalar için uyumlu olması NDK prosesinin en önemli özellikleridir [14]. Kaza durumunda yolcuların yaralanmalarına karşı yeterli korumayı sağlamak için araç yapısının kabiliyeti olarak tanımlanan araç çarpışma dayanımı, NDK'ların büyük ölçüde bütünlük ve mekanik performansına bağlıdır [15],[16]. NDK'ların kalite, performans karakteristikleri, araçların tasarımında sağlamlık ve emniyetin belirlenmesi için önemlidir.

NDK'nın mekanik davranışlarını değerlendirmek için en sık kullanılan testler; çekme makaslama, çapraz gerilme ve koç kabuğu testleridir [17]. NDK birleşiminin dayanımı sıklıkla birleşimin kaynak özellikleri ile ilişkilidir. Sac/sac arayüzeyinde uzunlamasına yönde kaynak çekirdeğinin genişliği olarak tanımlanan kaynak çekirdeği boyutu, NDK'ların kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir [18]-[30]. Tüm birleşim alanını belirleyen kaynak çekirdek boyutu, NDK'ların mekanik özelliklerini yöneten en önemli

*Yazışılan yazar/Corresponding author

parametredir. Kaynak çekirdek boyutu ile maksimum yük taşıma kapasitesi arasında orantılı korelasyon vardır [14].

Kaynak parametrelerine bağlı olarak değişim gösteren ısı girdisi tarafından birleşimin genel bağlanma alanını belirleyen kaynak çekirdeği boyutu kontrol edilmektedir. Genellikle yüksek performanslı NDK elde etmek için optimum ısı girdisi bulunmaktadır. Kaynak akımını artırarak ısı girdisinin artırılması özellikle kaynak çekirdek boyutundaki artıştan dolayı mekanik davranışı geliştirmektedir. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde Wang ve diğ. [31] DP590 çeliğinin NDK işlemi için farklı elektrot uç morfolojisi altında sonlu elemanlar modellemesini ABAQUS yazılımında gerçekleştirip, kaynak çekirdek şekli ve boyutunu incelemiştir. X.Q. Zhang ve diğ. [32] kaynak parametreleri içerisinde kaynak akımının kaynak zamanına göre kaynak dayanımı üzerindeki etkisinin daha fazla olduğunu belirtmiştir. Khan ve diğ. çalışmalarında [33] NDK'lı DP600, DP780 ve TRIP780 geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliklerini incelemiştir. Bu çalışmada NDK'ların optimal kaynak koşullarında gerçekleştirilmesi ve sonuç yapı ve özellikleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Zhang ve diğ. çalışmalarında [34] farklı kalınlığa sahip DP780-DP600 çelik malzemeleri arasındaki mekanik özelliklerde meydana gelen değişimi incelemek için NDK işlemleri gerçekleştirmiş ve kaynak çekirdek boyutunun çekme makaslama dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Hong-Seok ve diğ. [35], DP780/22MnB5 arasında NDK işlemini gerçekleştirerek kaynak edilebilirliğini araştırmıştır.

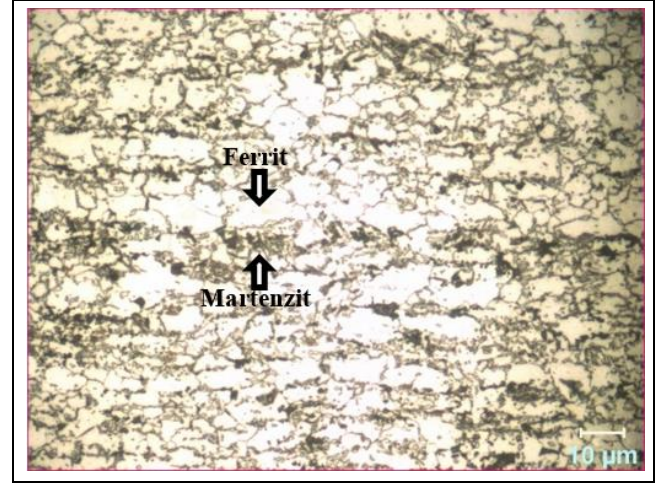
Bu çalışmada özellikle otomotiv endüstrisinde AHSS çelikleri içerisinde en sık kullanıma sahip DP (dual-phase) çelikleri arasından DP600 çeliği incelenmiştir. Literatürde gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde DP600 çeliğinin mekanik özellikleri üzerinde kaynak akımı, kaynak süresi, elektrot kuvveti gibi NDK parametrelerinin etkisi ile ilgili çalışmalara rastlanmıştır. Fakat, farklı elektrot uç tiplerinin etkisi ile ilgili sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmada, farklı elektrot uç tipleri ile kaynak akımının etkisi de değerlendirileceği için literatürde bu konu ile ilgili boşluğu doldurması bakımından önem arz etmektedir. Kaynak geometrisine kaynak uç tipinin etkisi tespit edilerek endüstrideki üretime katkı sağlamak amaçlanmaktadır. Çalışmada kullanılan bakır kaynak uçları, endüstride üretimde yaygın kullanılan uç tiplerinden seçilmiştir. Bu doğrultuda, çalışmada ulaşılan en iyi geometrinin uygulamada daha çok kullanılmasını sağlamak hedeflenmektedir. Arzu edilen özelliklerde kaynak elde edebilmek için ideal kaynak parametrelerinin belirlenmesi çok önemlidir. Bu çalışmada DP600 çeliğinin NDK işleminde ideal çekme makaslama dayanımını sağlamak için farklı elektrot uç tipi ve kaynak akımı parametrelerinin optimizasyonuna odaklanılmıştır.

2 Deneysel çalışmalar

2.1 Malzeme

Bu çalışmada 1.2 mm kalınlığa sahip ticari galvanizli DP600 çelik sac kullanılmıştır. Bu çelik sacın kimyasal bileşimi spektral analiz gerçekleştirilerek tespit edilmiş ve Tablo 1'de gösterilmiş, mikroyapısı Şekil 1'de verilmiştir. DP600 çeliğinin, Image Analysis programı ile hesaplanan faz çeşidi ve faz hacim oranları; yaklaşık olarak %80 ferrit (beyaz) ve %20 martenzit (gri-renkli olduğunda kahverengi) şeklindedir ve yaklaşık olarak 600 MPa çekme mukavemetine sahiptir. Martenzit parçacıkları ferrit tane sınırlarında yer almaktadır. Ferrit ve

martenzit fazlarının birbirlerine göre morfolojik yapıları sıcak haddeleme ve mikro segregasyonun bir sonucu olarak kısmen bantlaşmış bir yapı göstermektedir. Tane boyutları kısmi homojen bir yapı göstermektedir. Mean Linear Intercept yöntemi ile BS EN ISO ve ASTM standardına uygun olarak yapılan ölçüm ile ferrit tane boyutu yaklaşık 6.4 μm ve martenzit tane boyutu yaklaşık 1.7 μm 'dir.

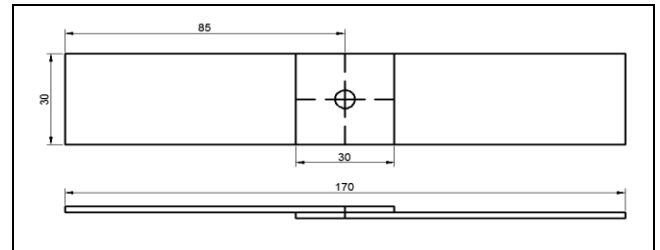


Şekil 1. DP600 çeliğinin mikroyapısı.

Figure 1. Microstructure of DP600 steel.

2.2 Test numunesi ve NDK şartları

NDK numuneleri Şekil 2'de gösterilen boyutlarda hazırlanmıştır. NDK elektrotları ticari bakır malzemeden üretilmiş ve elektrotların kimyasal bileşimi Tablo 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. NDK numunelerinin şematik görünümü ve kaynak pozisyonu.

Figure 2. Schematic view and welding position of RSW samples.

NDK işleminde dört farklı uç tipine sahip elektrot kullanılmıştır. Elektrot uç tipleri Şekil 3'te gösterilmiştir. NDK'lar, BAYKAL marka yarı otomatik, elektronik akım ve zaman kontrollü pnömatik basma donanımlı AC NDK makinesinde su soğutmalı elektrotlarla her kaynak parametresi için dört numune üretilecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Kaynak işleminden önce numune yüzeyleri yağ, kirlilik gibi oluşabilecek herhangi bir temizlik probleminde karşı kimyasal maddeler ile temizlenmiştir. NDK işlemi 5 ve 7 kA kaynak akımlarında, 20 çevrim kaynak süresi ve 6 bar elektrot basıncında dört farklı elektrot uç tipinde gerçekleştirilmiştir (Tablo 3). Kaynak işlemi yapılırken numunelerin eksenlerinde sapma olmaması ve kıvılcıkların sıçramaması için ahşap kalıplar kullanılmış ve basma kuvvetinin sabitliği makinenin manometresinden kontrol edilmiştir. Isı girdisinin fazlalığından dolayı uçların su soğutma sistemi sürekli kontrol altında tutulmuştur.

Tablo 1. DP600 çeliğinin kimyasal bileşimi (%ağırlık).

Table 1. Chemical composition of DP600 steel (wt%).

Çelik	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Al	Ti	V	Sn	Fe
DP600	0.077	0.253	1.86	0.006	0.177	0.012	0.127	0.002	0.004	0.006	97.472

Tablo 2. Elektrot kimyasal bileşimi (%ağırlık).

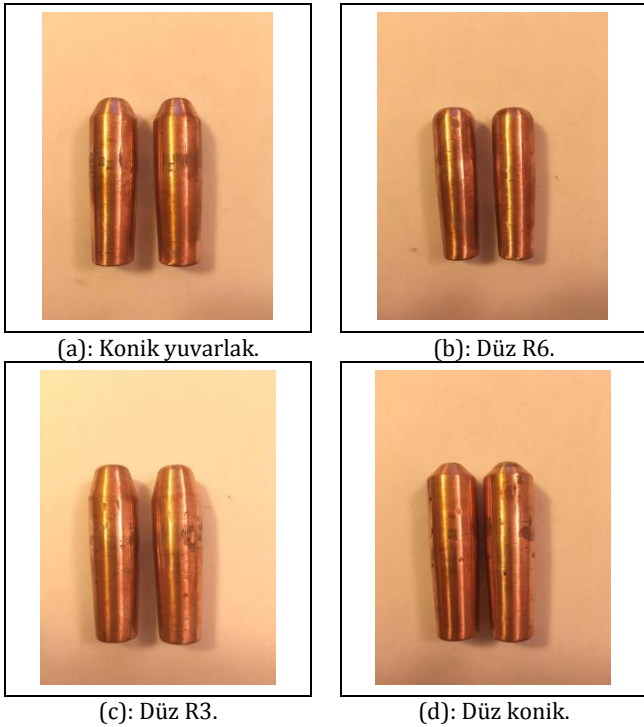
Table 1. Electrode chemical composition (wt%).

Cu	Zn	P	Fe	S	Mn	Al	Ni
99.4	0.0115	0.0144	0.0207	0.150	0.0062	0.0054	0.0050

Tablo 3. NDK işlemleri parametreleri.

Table 3. RSW process parameters.

Elektrot uç tipi	Kaynak akımı (kA)	Kaynak süresi (çevrim)	Elektrot basıncı (bar)
Konik yuvarlak	5 ve 7	20	6
Düz R6	5 ve 7	20	6
Düz R3	5 ve 7	20	6
Düz konik	5 ve 7	20	6



(a): Konik yuvarlak.

(b): Düz R6.

(c): Düz R3.

(d): Düz konik.

Şekil 3. Elektrot uç tipleri.

Figure 3. Electrode tip types.

2.3 Çekme makaslama deneyi

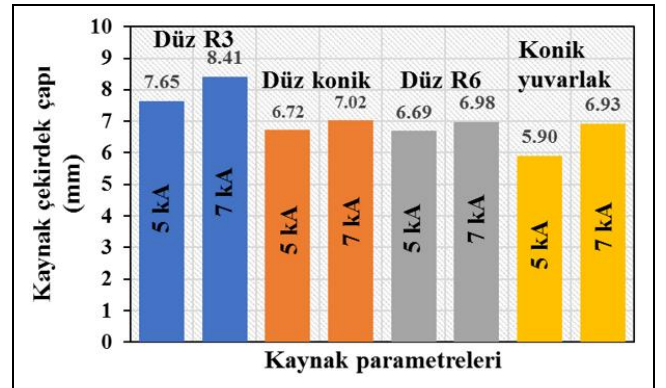
Çekme makaslama testi, 50 kN kapasiteli Shimadzu marka çekme test cihazı ile ASTM E8 standardına göre her parametre için üretilen 3 numuneye 2 mm/dk. çene hızında uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınarak çekme makaslama dayanım değerleri elde edilmiştir.

3 Deneysel sonuçlar

3.1 Kaynak çekirdek boyutu

Tüm birleşim alanını belirleyen kaynak çekirdek boyutu, NDK bağlantılarının çekme makaslama dayanımı özelliklerini (tensile load bearing capacity-çekme yüklenme taşıma kapasitesi) yöneten en önemli parametredir. NDK işleminde

kaynak çekirdek boyutu ile maksimum yük ve enerji absorbesi arasında orantılı korelasyon bulunmaktadır [14],[36]-[39]. Kaynak çekirdek boyutu arttıkça, çentik kökü etrafında gerilim konsantrasyon faktörü azalmakta ve bu doğrultuda çekme makaslama dayanımı artış göstermektedir [14]. 5 ve 7 kA kaynak akımı değerlerinde farklı elektrot uç tiplerinde gerçekleştirilen NDK işlemlerinde elde edilen kaynak çekirdek çap değerleri Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Farklı kaynak akımları ve elektrot uç tiplerinde elde edilen kaynak çekirdek çap değerleri.

Figure 4. Weld nugget diameter values were obtained at different welding currents and electrode tip types.

Genellikle yüksek performanslı NDK elde etmek için optimum ısı girdisi bulunmaktadır. Kaynak akımının kritik üst değere kadar yükseltilmesiyle ısı girdisinin artırılması özellikle kaynak çekirdek boyutunda artışa neden olmaktadır ve bu durum da mekanik davranışı geliştirmektedir [14]. Şekil 4 incelendiğinde bütün elektrot uç tipleri için kaynak akımı arttıkça kaynak çekirdek çap değerlerinde artış görülmüştür. Elektrot uç tipleri açısından kaynak çekirdek çap değerleri kıyaslandığında; en yüksek değerler Düz R3 uçlu elektrotlarda, en düşük değerler ise konik yuvarlak elektrot uçlarında görülmüştür. Bu durum; Elektrot temas alanı, Düz konik geometride Düz R6 geometriye nispeten daha düşüktür. Temas alanındaki düşüş daha yüksek direncin oluşumuna ve $Q = I^2 \times R \times t$ eşitliğine göre daha yüksek ısı girdisine sebep olmaktadır. Isı girdisindeki artış ile orantılı olarak düz konik geometride Düz R6 geometriye göre kaynak çekirdek çap değerinde az da

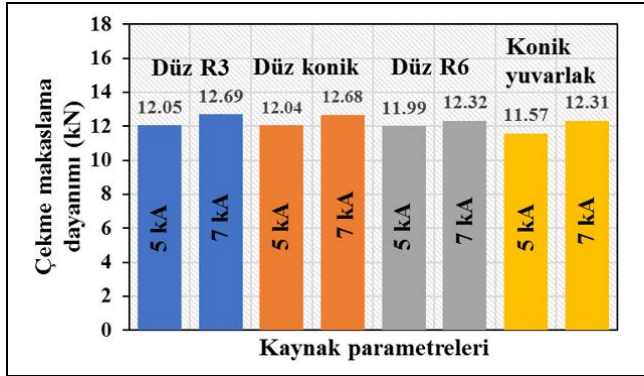
olsa artış görülmesine sebep olmuştur şeklinde yorumlanmıştır. Elektrot uç tiplerine göre kaynak çekirdek çap değerleri arasındaki ilişki Denklem 1'de özetlenmiştir.

$$\text{Düz R3} > \text{Düz konik} > \text{Düz R6} > \text{Konik yuvarlak} \quad (1)$$

Wang ve diğerleri de çalışmalarında benzer NDK akım değerlerinde, Elektrot uç tiplerinin farklı temas alanları, farklı akım yoğunluğu dağılımına yol açtığını ve sıcaklık dağılımının simetrisini eksenel yönde değiştirdiğini göstermişlerdir [31]. Yukarıda belirtilen sonuçlar ve literatür ışığında; Düz R3 elektrod ile gerçekleştirilen NDK işlemlerinde akım yoğunluğu diğer elektrot uç tiplerine göre daha yüksek miktarda gerçekleşmiş ve bu durum da daha fazla ısı üretimine yol açmıştır denilebilir. Dolayısıyla ısı girdisindeki artış ile de doğru orantılı olarak kaynak çekirdek çap değerleri diğer elektrot uç tiplerinde elde edilen değerlere göre az da olsa daha yüksek bulunmuştur (Şekil 4) açıklaması yapılabilir.

3.2 Çekme makaslama özellikleri

NDK mekanik performansı genellikle statik, yorulma ve darbe yükleme şartları altında düşünülmektedir [40]-[46]. Servis süresince araç yapılarındaki NDK'lar; hem bitişik sacların nispi yer değiştirmesi veya dönüşü nedeniyle makaslama yüklemelerine hem de saclara dik doğrultuda bitişik saclar arasında uygulanan ayırıcı kuvvetlerden dolayı çekme yüklemelerine maruz kalmaktadır [36],[47]. NDK'nın mekanik davranışlarını değerlendirmek için en sık kullanılan testler; çekme makaslama, çapraz gerilme ve koç kabuğu testleridir. Çekme makaslama testi baskın olarak makaslama yüklemesini (kaynak arayüzüne makaslama kuvveti) temsil etmektedir [47]-[49]. Bu çalışmada da farklı elektrot uç tiplerinin ve kaynak akımlarının çekme makaslama özelliklerine etkisi incelenmiştir. Farklı kaynak parametrelerinde elde edilen çekme makaslama deney sonuçları Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Farklı kaynak parametrelerinde elde edilen çekme makaslama kuvvet değerleri.

Figure 5. Tensile shear force values were obtained at different welding parameters.

Şekil 5'te verilen grafikte kaynak akımının etkisi değerlendirildiğinde bütün elektrot uç tiplerinde kaynak akımı arttıkça birleşimlerin çekme makaslama yük taşıma kapasitelerinin ısı girdisi ile doğru orantılı olarak arttığı görülmektedir. Marashi ve diğ. [50], Fukumoto ve diğ. [51], Tutar ve diğ. [52] ve Sun ve diğ. [53] benzer çalışmalarında çeşitli malzemelerin NDK'lı birleşimlerini araştırmışlardır ve kaynak akımının artmasının çekme makaslama yük taşıma kapasitesini arttırdığını belirtmişlerdir. 7 kA kaynak akımından daha yüksek değerlerde gerçekleştirilen NDK işlemlerinin ön çalışmalarında sıçramalar ve kaynak bölgesinde anormallikler

gözlenmiştir. Genel olarak kabul edildiği gibi, NDK işleminde sıçrama oluşumu genellikle aşırı kaynak süresi, kaynak akımı veya yetersiz elektrot basıncının bir sonucu olarak gerçekleşmektedir. Kaynak metaline uygulanan kaynak ısı kritik bir değeri aştığında, ergimiş metal kaynak çekirdeğini kırar ve dışarı atılır. Sıçrama oluşumu da fiziksel özelliklerin bozulmasının yanında NDK kaynaklı birleşimin çekme makaslama dayanım değerini de düşürmektedir [54]. Elektrot uç tipleri bakımından değerlendirildiğinde; en yüksek çekme makaslama dayanım değerinin hem 5 kA hem de 7 kA kaynak akımlarında Düz R3 uçlu elektrotlar ile, en düşük çekme makaslama dayanım değerinin ise konik yuvarlak uçlu elektrotlar ile elde edildiği görülmektedir. Yukarıda da açıklandığı Kaynak çekirdek boyutu açıklaması ile bağlantılı ve paralel olarak, burada da; elektrot temas alanı, Düz R3 geometride diğer geometrilere nispeten daha düşük olması ve buna bağlı olarak temas alanındaki düşüşle birlikte daha yüksek direncin oluşumuna sebep olmaktadır açıklaması geçerlidir. Direnç değerindeki artış ile doğru orantılı olarak da akım yoğunluğu da artış göstermiştir. Bu sebeple, Düz R3 elektrod ile gerçekleştirilen NDK işlemlerinde akım yoğunluğu diğer elektrot uç tiplerine göre daha yüksek miktarda gerçekleşmiş ve bu durum da daha fazla ısı üretimine yol açmıştır. ısı girdisindeki artış ile doğru orantılı olarak kaynak çekirdek çap değerleri diğer elektrot uç tiplerinde elde edilen değerlere göre daha yüksek olarak gerçekleşmektedir.

NDK işleminde kaynak çekirdek boyutu arttıkça çekme makaslama dayanımının artış gösterdiği literatürde ifade edilmiştir [14],[36]-[39],[55]. Şekil 4, Şekil 5 birlikte değerlendirildiğinde kaynak çekirdek çapıyla doğru orantılı bir şekilde NDK'lı DP600 otomotiv sac çeliğinin çekme makaslama kapasitesinde artış gözlenmiştir. Bu doğrultuda her ne kadar birbirlerine yakın değerler elde edilse de en yüksek çekme makaslama dayanım değeri Düz R3 elektrotlar ile 7 kA kaynak akımında (12.69 kN) elde edilmiştir. Bu deney parametrelerindeki hassas değişimler daha geniş çalışmalar ile daha hassas olarak ortaya konulabilir. Bu konu sektörel olarak önemli ve fayda oluşturabilecek bir konudur.

4 Sonuçlar

NDK'lı DP600 çeliğinin ideal çekme makaslama dayanımını elde etmek için farklı elektrot uç tipleri ve kaynak akımı parametrelerinin optimizasyonuna odaklanıldığı bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

1. DP600 çeliğinin düşük miktarda martenzit fazı ve ağırlıklı olarak ferrit fazından oluştuğu görülmüştür,
2. Kaynak akımı arttıkça kaynak çekirdek çap değerlerinde artış görülmüştür,
3. Elektrot uç tipleri açısından kaynak çekirdek çap değerleri kıyaslandığında; en yüksek değerler düz R3 uçlu elektrotlarda, en düşük değerler ise konik yuvarlak elektrot uçlarda görülmüştür,
4. Kaynak çekirdek boyutu arttıkça çekme makaslama dayanımını artmıştır,
5. En yüksek çekme makaslama dayanım değeri Düz R3 elektrotlar ile 7 kA kaynak akımında elde edilmiştir.

5 Conclusions

The results obtained in this study focusing on optimization of different electrode tip types and welding current parameters to obtain the ideal tensile shear strength of DP600 with RSW are as follows:

1. It was observed that DP600 steel consists of a low amount of martensite phase and predominantly ferrite phase,
2. As the welding current increases, it has been observed that the weld nugget diameter values increase,
3. When weld nugget diameter values are compared in terms of electrode tip types; the highest values were seen on the Flat R3 tip electrodes, the lowest values were seen on the conical round electrode tips,
4. As the weld nugget size increased, the tensile shear strength increased,
5. The highest tensile shear strength value was obtained with flat R3 electrodes at 7 kA welding current.

6 Teşekkür

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje No: KBÜBAP-17-KP-463).

7 Yazar katkı beyanı

Gerçekleştirilen çalışmada Bilge DEMİR fikrin oluşması, tasarımın yapılması, kullanılan malzemelerin temin edilmesi ve elde edilen sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında; Muhammed ELİTAŞ fikrin oluşması, literatür taraması, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi başlıklarında; Hüseyin KARAKUŞ literatür taraması ve analizlerin gerçekleştirilmesi başlıklarında katkı sunmuşlardır.

8 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".

9 Kaynaklar

- [1] Gould JE, Khurana SP, Li T. "Predictions of microstructures when welding automotive advanced high-strength steels". *Welding Journal*, 85(5), 111-116, 2006.
- [2] Steel Market Development Institute. "The Evolving Use of Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications". www.autosteel.org (23.09.2021).
- [3] Hayat F, Demir B, Acarer M. "Tensile shear stress and microstructure of low carbon dual phase Mn-Ni steels after spot resistance welding". *Metal Science and Heat Treatment*, 49(9-10), 484-489, 2011.
- [4] De Cooman BC. "Structure-properties relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite". *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 8(3-4), 285-303, 2004.
- [5] Sedat A, Ertan R, Özgül HG, "Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilen yüksek mukavemetli çeliklerin mekanik özelliklerinin incelenmesi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 63-68, 2018.
- [6] Kuziak R, Kawalla R, Waengler S. "Advanced high strength steels for the automotive industry". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 8(2), 103-117, 2008.
- [7] Zuidema BK. "Bridging the design-manufacturing-materials data gap: material properties for optimum design and manufacturing performance in light vehicle steel-intensive body structures", *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 64(9), 1039-1047, 2012.
- [8] Matlock DK, Speer JG, De Moor E, Gibbs PJ. "Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: an overview". *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 15(1), 1-12, 2012.
- [9] Matlock DK, Speer JG. *Third Generation of AHSS: Microstructure Design Concepts*. Editors: Haldar A, Suwas S, Bhattacharjee D. Microstructure and Texture in Steels, 185-205, London, England, Springer, 2009.
- [10] De Moor E, Gibbs PJ, Speer JG, Matlock DK, Schroth JG. "AIST transactions strategies for third-generation advanced high-strength steel development". *Iron & Steel Technology*, 7(11), 133-144, 2010.
- [11] Xia M, Tian Z, Zhao L, Zhou YN. "Fusion zone microstructure evolution of Al-alloyed TRIP steel in diode laser welding". *Materials Transactions*, 49(4), 746-753, 2008.
- [12] Donders S, Brughmans M, Hermans L, Tzannetakis N. "The effect of spot weld failure on dynamic vehicle performance". *Sound and Vibration*, 39(4), 16-25, 2005.
- [13] De A. "Spot welding". *Science and Technology of Welding and Joining*, 13(3), 213-214, 2008.
- [14] Pouranvari M, Marashi SPH. "Critical review of automotive steels spot welding: process, structure, and properties". *Science and Technology of Welding and Joining*, 18(5), 361-403, 2013.
- [15] Pouranvari M, Abedi A, Marashi P, Goodarzi M. "Effect of expulsion on peak load and energy absorption of low carbon steel resistance spot welds". *Science and Technology of Welding and Joining*, 13(1), 39-43, 2008.
- [16] Zuniga SM. Predicting Overload Pull-out Failures in Resistance Spot Welded Joints. PhD Thesis, Stanford University, California, USA, 1995.
- [17] Zhang H, Senkara J. *Resistance Welding: Fundamentals and Applications*. 2nd ed. Florida, USA, CRC Press, 2011.
- [18] Pouranvari M, Asgari HR, Mosavizadch SM, Marashi PH, Goodarzi M. "Effect of weld nugget size on the overload failure mode of resistance spot welds". *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(3), 217-225, 2007.
- [19] Lin PC, Lin SH, Pan J. "Modeling of failure near spot welds in lap-shear specimens based on a plane stress rigid inclusion analysis". *Engineering Fracture Mechanics*, 73(15), 2229-2249, 2006.
- [20] Sun X, Stephens EV, Khaleel MA. "Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high strength steel spot welds under lap shear loading conditions". *Engineering Failure Analysis*, 15(4), 356-367, 2008.
- [21] Sun X, Stephens EV, Khaleel MA. "Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high-strength steel spot welds". *Welding Journal*, 86(1), 18-25, 2007.
- [22] Nieto J, Guerrero-Mata MP, Colas R, Mani A. "Experimental investigation on resistance spot welding of galvanized HSLA steel". *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(6), 717-722, 2006.
- [23] Sun X, Stephens EV, Davies RW, Khaleel M, Spinella DJ. "Effects of fusion zone size on failure modes and static strength of aluminum resistance spot welds". *Welding Journal*, 83(11), 308-318, 2004.
- [24] Pouranvari M, Marashi SPH. "Critical sheet thickness for weld nugget growth during resistance spot welding of three-steel sheets". *Science and Technology of Welding and Joining*, 16(2), 162-165, 2011.
- [25] Sam S, Shome M. "Static and fatigue performance of weld bonded dual-phase steel sheets". *Science and Technology of Welding and Joining*, 15(3), 242-247, 2010.
- [26] Khan MI, Kuntz ML, Su P, Gerlich A, North T, Zhou Y. "Resistance and friction stir spot welding of DP600: a

- comparative study". *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(2), 175-182, 2007.
- [27] Varjenja ONPOS, To PU, Naprednega KV, Jekla FMVT. "Dependence of the fracture mode on the welding variables in the resistance spot welding of ferrite-martensite DP980 advanced high-strength steel". *Materiali in Tehnologije*, 46(6), 665-671, 2012.
- [28] De A, Gupta OP, Dorn L. "An experimental study of resistance spot welding in 1 mm thick sheet of low carbon steel". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 210(4), 341-347, 1996.
- [29] Mukhopadhyay G, Bhattacharya S, Ray KK. "Strength assessment of spot-welded sheets of interstitial free steels". *Journal of Materials Processing Technology*, 209(4), 1995-2007, 2009.
- [30] Pedersen KR, Harthøj A, Friis KL, Bay N, Somers MA, Zhang W. "Microstructure and hardness distribution of resistance welded advanced high strength steels". *5th International Seminar on Advances in Resistance Welding*, Toronto, Canada, 2008, 24-26 August 2008.
- [31] Wang B, Hua L, Wang X, Song Y, Liu Y. "Effects of electrode tip morphology on resistance spot welding quality of DP590 dual-phase steel". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(9-12), 1917-1926, 2016.
- [32] Zhang XQ, Chen GL, Zhang YS. "Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels". *Materials & Design*, 29(1), 279-283, 2008.
- [33] Khan MI, Kuntz ML, Biro E, Zhou Y. "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded advanced high strength steels". *Materials Transactions*, 49(7), 1629-1637, 2008.
- [34] Zhang H, Wei A, Qiu X, Chen J. "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded dissimilar thickness DP780/DP600 dual-phase steel joints". *Materials & Design*, 54, 443-449, 2014.
- [35] Choi HS, Park GH, Lim WS, Kim B. "Evaluation of weldability for resistance spot welded single-lap joint between GA780DP and hot-stamped 22MnB5 steel sheets". *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(6), 1543-1550, 2011.
- [36] Rathbun RW, Matlock DK, Speer JG. "Fatigue behavior of spot-welded high-strength sheet steels". *Welding Journal*, 82(8), 207-218, 2003.
- [37] Hilditch TB, Speer JG, Matlock DK. "Effect of susceptibility to interfacial fracture on fatigue properties of spot-welded high strength sheet steel". *Materials & Design*, 28(10), 2566-2576, 2007.
- [38] Swellam MH, Aş GB, Lawrence FV. "A fatigue design parameter for spot welds". *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 17(10), 1197-1204, 1994.
- [39] Long X, Khanna SK. "Fatigue properties and failure characterization of spot-welded high strength steel sheet". *International Journal of Fatigue*, 29(5), 879-886, 2007.
- [40] Yang YS, Son KJ, Cho SK, Hong SG, Kim SK, Mo KH. "Effect of residual stress on fatigue strength of resistance spot weldment". *Science and Technology of Welding and Joining*, 6(6), 397-401, 2001.
- [41] Xu J, Zhang YS, Xinmin L, Chen GL. "Experimental investigation of fatigue performance of spot-welded dual phase sheet steels". *Science and Technology of Welding and Joining*, 13(8), 726-731, 2008.
- [42] Long X, Khanna SK. "Fatigue performance of spot-welded and weld bonded advanced high strength steel sheets". *Science and Technology of Welding and Joining*, 13(3), 241-247, 2008.
- [43] Daneshpour S, Riekehr S, Kocak M, Gerritsen CHJ. "Mechanical and fatigue behavior of laser and resistance spot welds in advanced high strength steels". *Science and Technology of Welding and Joining*, 14(1), 20-25, 2009.
- [44] Gaul H, Weber G, Rethmeier M. "Influence of HAZ cracks on the fatigue resistance of resistance spot welded joints made of advanced high strength steels". *Science and Technology of Welding and Joining*, 16(5), 440-445, 2011.
- [45] Daneshpour S, Kokabi AH, Ekrami AA, Motarjemi AK. "Crack initiation and kinking behaviors of spot-welded coach peel specimens under cyclic loading". *Science and Technology of Welding and Joining*, 12(8), 696-702, 2007.
- [46] Wung P, Walsh T, Ourchane A, Stewart W, Jie M. "Failure of spot welds under in-plane static loading". *Experimental Mechanics*, 41(1), 100-106, 2001.
- [47] Pouranvari M, Marashi SPH. "Failure of resistance spot welds: tensile shear versus coach peel loading conditions". *Ironmaking & Steelmaking*, 39(2), 104-111, 2012.
- [48] Pouranvari M, Marashi SPH. "Failure mode transition in AISI 304 resistance spot welds". *Welding Journal*, 91(11), 303-309, 2012.
- [49] Pouranvari M, Marashi SPH. "Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part I. Controlling factors". *Materials Science and Engineering: A*, 528(29-30), 8337-8343, 2011.
- [50] Marashi P, Pouranvari M, Amirabdollahian S, Abedi A, Goodarzi M. "Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steels". *Materials Science and Engineering: A*, 480(1-2), 175-180, 2008.
- [51] Fukumoto S, Fujiwara K, Toji S, Yamamoto A. "Small-scale resistance spot welding of austenitic stainless steels". *Materials Science and Engineering: A*, 492(1-2), 243-249, 2008.
- [52] Tutar M, Aydın H, Bayram A. "Elektrik direnç punta kaynağı ile kaynak edilmiş TWIP çeliklerinde kaynak parametrelerinin Taguchi yöntemi ile optimizasyonu". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4), 650-657, 2018.
- [53] Sun DQ, Lang B, Sun DX, Li JB. "Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded magnesium alloy joints". *Materials Science and Engineering: A*, 460-461, 494-498, 2007.
- [54] Elitas M, Demir B. "The effects of the welding parameters on tensile properties of RSW junctions of DP1000 sheet steel". *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8(4), 3116-3120, 2018.
- [55] Alzahougi A, Elitas M, Demir B. "RSW junctions of advanced automotive sheet steel by using different electrode pressures". *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 8(5), 3492-3495, 2018.