

Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilen Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çeliğin Mekanik Özellikleri Üzerinde Elektrod Uç Tipinin Etkisinin İncelenmesi

Bilge DEMİR^a, Muhammed ELİTAŞ^{b,*}, Hüseyin KARAKUŞ^a

^a Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, 78050, Karabük, Türkiye

^{b,*} Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, 11230, Bilecik, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 09.08.2021
Kabul: 22.10.2021

Anahtar Kelimeler:
Nokta direnç kaynağı, elektrod uç tipi, kaynak çekirdek çapı, çekme makaslama dayanımı, mikrosertlik.

ÖZ

Bu çalışmada, nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliğin kaynak çekirdek çapı, çekme makaslama dayanımı ve mikrosertlik özellikleri üzerinde farklı elektrod uç tiplerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, özellikle otomotiv sektöründe tercih edilen konik yuvarlak, düz R3, düz R6 ve düz konik elektrod uçlar kullanılarak nokta direnç kaynaklı birleşimler gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri, kaynak çekirdeği geometrisi makro-mikro incelemesi, mekanik ve metalürjik incelemelere tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlar kaynak çekirdek çap değeri, mikro sertlik sonuçları ve çekme makaslama dayanım değerleri arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermiştir. Düz 3 mm yarıçap uçlu elektrotlar ile en yüksek, düz konik uçlu elektrotlar ile en düşük çekme makaslama dayanım değerleri elde edilmiştir.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.10>

Investigation of the Effect of the Electrode Tip Type on the Mechanical Properties of Advanced High Strength Steel Combined with Resistance Spot Welding

ARTICLE INFO

Received: 09.08.2021
Accepted: 22.10.2021

Keywords:
Resistance spot welding, electrode tip type, weld nugget diameter, tensile shear strength, microhardness.

ABSTRACT

In this study, the effect of different electrode tip types on weld nugget diameter, tensile shear strength and microhardness properties of advanced high strength steel combined with resistance spot welding method was investigated. For this purpose, resistance spot welded joints were performed using conical round, flat R3, flat R6 and flat conical electrode tips, which are preferred especially in the automotive industry. Test samples were subjected to weld nugget geometry macro-micro examination, mechanical and metallurgical investigations. Experimental results showed that there is a linear relationship between weld nugget diameter value, microhardness results and tensile shear strength values. The highest tensile shear strength values were obtained with flat 3 mm radius tip electrodes, and the lowest tensile shear strength values with flat conical tip electrodes.

<https://dx.doi.org/10.30855/gmbd.2021.03.10>

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv imalat endüstrisinde, nokta direnç kaynak (NDK) işlemi birincil birleştirme

teknolojisidir [1-3]. Bir araç gövdesi tipik olarak binlerce NDK içerir. Nokta kaynağı (NDK olarak da bilinir) bir direnç kaynağı işlemidir. Bu kaynak işlemi, esas olarak, bir elektrik akımından kaynak alanına

*Sorumlu yazar: muhammed.elitas@bilecik.edu.tr

To cite this article: B. Demir, M. Elitas, and H. Karakus, "Investigation of the Effect of the Electrode Tip Type on the Mechanical Properties of Advanced High Strength Steel Combined with Resistance Spot Welding", *Gazi Journal of Engineering Sciences*, vol.7, no.3, pp. 277-285, 2021. doi:10.30855/gmbd.2021.03.10

basınç ve ısı uygulayarak iki veya daha fazla metal levhayı birbirine kaynaklamak için kullanılır. Bakır alaşımli elektrotları sac yüzeylere temas ettirerek çalışır, bu sayede basınç ve elektrik akımı uygulanır ve metal sac (Çelik, Al, Mg) dirençli malzemelerden geçmesiyle üretilen ısı ile metal parçaların bu bölgede sınırlı erime ve katılaşması ile elde edilen kaynaklı birleştirmedir [4,5]. Otomobil endüstrisinin hızlı gelişimi ile otomobilin hafifliği kaçınılmaz bir trend haline geldiğinden, çift fazlı (DP) çelik gibi geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS), otomobilin toplam ağırlığını azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır [6–8]. Kaza durumunda yaralanmalara karşı gereken korumayı sağlamakta araç yapısının kabiliyeti olarak belirtilen araç çarpışma dayanımı, NDK bağlantılarının büyük ölçüde bütünlük ve mekanik performansına bağlıdır [9,10]. NDK'nın mekanik davranışlarını değerlendirmek için en sık kullanılan testlerden birisi de çekme makaslama testidir [11]. NDK birleşiminin dayanımı sıklıkla birleşimin kaynak özellikleri ile ilişkilidir. Sac/sac arayüzeyinde uzunlamasına yönde kaynak çekirdeğinin genişliği olarak tanımlanan kaynak çekirdeği boyutu, NDK kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden biridir [12–24]. Kaynak çekirdek boyutu, NDK mekanik özelliklerini belirleyen en önemli parametredir. Kaynak çekirdek boyutu ile çekme makaslama dayanımı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır [25]. NDK işlemi uygulanan malzemelerin, mekanik özelliklerini değerlendirmede dikkate alınması gereken önemli faktörlerden birisi de sertliktir. Sertlik, malzemelerin uygulanan kuvvetlere karşı dayanım ölçüsüdür. Plastiklik, akma dayanımı, süneklik ve tokluk gibi malzeme özellikleri sertlikle ilişkilidir. Bu yüzden imalat prosesinden sonra sertlik araştırmaları, malzemenin son özellikleri hakkında ipuçları verebilmektedir [26–28].

AHSS çeliklerinin NDK işleminde kaynak parametrelerinin etkisi, proses optimizasyonu, mekanik performansı ve sertlik özellikleri üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Yang vd. [29] dinamik direnç analizi yoluyla DP600 sacının silindirik tüp tek taraflı NDK kaynaklanabilirliğini incelemiştir. Eshraghi vd. [30] gerçekçi bir değer aralığında akım yoğunluğu, kaynak süresi, sac kalınlığı, elektrot yüz yarıçapı ve sıkıştırma kuvvetinin ana etkilerini ve etkileşimlerini analiz etmiştir. Frydman vd. [31] Hardox çeliklerinin kaynaklı birleştirmelerinin yapı

ve sertliğinde meydana gelen değişimi araştırmıştır. Zieman vd. [32] kaynaklı birleştirmelerin çeliğin mikroyapı, sertlik ve çekme özelliklerine olan etkisini 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 oldukça sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmada, kaynak geometrisine kaynak uç tipinin etkisi tespit edilerek endüstrideki üretime katkı sağlamak amaçlanmaktadır. Çalışmada kullanılan bakır NDK elektrod uçları, endüstride üretimde yaygın kullanılan uç tiplerinden seçilmiştir. Bu doğrultuda, çalışmada ulaşılan en iyi geometrinin uygulamada daha çok kullanılmasını sağlamak hedeflenmektedir. Bu çalışmada DP600 çeliğinin NDK işleminde ideal çekme makaslama dayanımı ve sertlik değerini elde etmek için elektrot uç tipi optimizasyonuna odaklanılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

2.1. Malzeme Mikroyapı ve Makroyapı (Material Microstructure and Macrostructure)

Bu çalışmada, 1.2 mm kalınlıkta ticari galvanizli DP600 çelik sac kullanılmıştır. Bu çelik sacın kimyasal bileşimi spektral analiz gerçekleştirilerek belirlenmiş ve Tablo 1'de gösterilmiş, mikroyapısı Şekil 1'de verilmiştir. DP600 çeliği, düşük miktarda martenzit (gri) ve ağırlıklı olarak ferrit (beyaz) fazlarından oluşmakta ve yaklaşık olarak 600 MPa çekme dayanımına sahiptir. NDK'lı ve kaynaklı numunelerin görünüm analizlerinde; mikroyapı incelemeleri için, ana malzeme ve NDK'lı numune kesit profili diskaton ile kesilmiş ve kaba zımparalamadan ince zımparaya giden ve parlatma ile bitirilen ve sonrasında %2 nital çözeltisi (%2 nitrik asit + %98 metanol) ile dağlama yapılan, standart metalografi prosedürü kullanılarak, görüntüsel olarak inceleme için hazırlanmıştır. Makroyapı çalışmaları stereo mikroskop ve mikroyapı çalışmaları Nikon Epiphot 200 optik mikroskobu ile yapılmıştır.

Tablo 1. DP600 çeliğinin kimyasal bileşimi (%ağırlık) (Chemical composition of DP600 steel (%weight))

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



Şekil 1. DP600 çeliğinin mikroyapı görüntüsü
(Microstructure image of DP600 steel)

2.2. Nokta Direnç Kaynak İşlemi

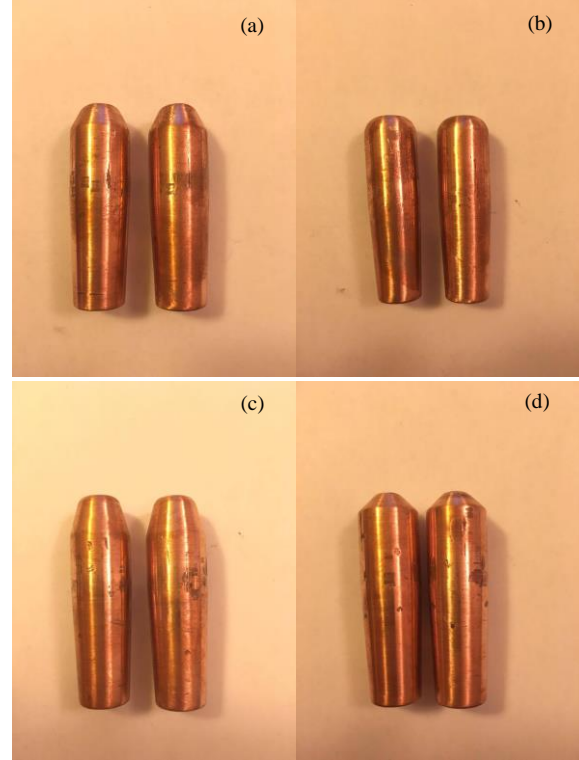
(Resistance Spot Welding Process)

NDK numuneleri, her elektrot uç tipi için 4'er çift-adet olmak üzere 100x30 mm ebatlarına giyotin makas ile kesildikten sonra üst üste bindirilip NDK işlemleri ile birleştirilmek suretiyle üretilmiştir. NDK elektrotları ticari bakır malzemeden tornalama-talaşlı imalat ile elde edilmiştir. Bu elektrotların kimyasal bileşimi Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. NDK elektrotlarının kimyasal bileşimi
(%ağırlık) (Chemical composition of RSW electrodes (weight %))

Cu	Zn	P	Fe	S	Mn	Al	Ni
99,4	0,01	0,01	0,02	0,15	0,01	0,01	0,01

NDK işlemi için dört farklı uç tipine sahip elektrot kullanılmıştır. Elektrot uç tipleri Şekil 2'de gösterilmiştir. NDK işlemleri, yarı otomatik, elektronik akım ve zaman kontrollü pnömatik basma donanımlı AC nokta direnç makinesinde su soğutmalı elektrotlarla gerçekleştirilmiştir. Kaynak işleminden önce numune yüzeyleri yağ, kirlilik gibi oluşabilecek herhangi bir temizlik problemine karşı kimyasal maddeler ile temizlenmiştir. NDK işlemi 9 kA kaynak akımı, 20 çevrim kaynak süresi ve 6 bar elektrot basıncında dört farklı elektrot uç tipinde gerçekleştirilmiştir (Tablo 3). NDK işlemi yapılırken numunelerin eksenlerinde sapma olmaması ve kıvrımların 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.



Şekil 2. Elektrot uç tipleri a) Konik yuvarlak b) Düz R6 c) Düz R3 d) Düz konik (Electrode tip types a) Conical round b) Flat R6 c) Flat R3 d) Flat conical)

Tablo 3. NDK işlemi parametreleri (RSW process parameters)

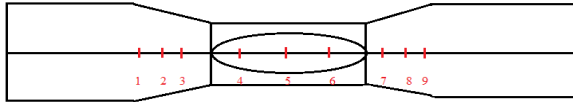
Elektrot uç tipi	Kaynak akımı (kA)	Kaynak süresi (Çevrim, 0,2 sn)	Elektrot basıncı (Bar)
Konik yuvarlak	9	20	6
Düz R6	9	20	6
Düz R3	9	20	6
Düz konik	9	20	6

2.3. Çekme Makaslama Deneyi (Tensile Shear Test)

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

2.4. Mikrosertlik Testi (Microhardness Test)

Mikrosertlik ölçümleri, Shimadzu marka Vickers sertlik ölçüm cihazı kullanılarak ana metal, ısının tesiri altındaki bölge (ITAB) ve kaynak metali boyunca eksenlere paralel doğrultuda HV 1 değerinde 15 saniye süreyle yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. NDK numunelerinin sertlik ölçüm bölgeleri Şekil 3'te gösterilmiştir.

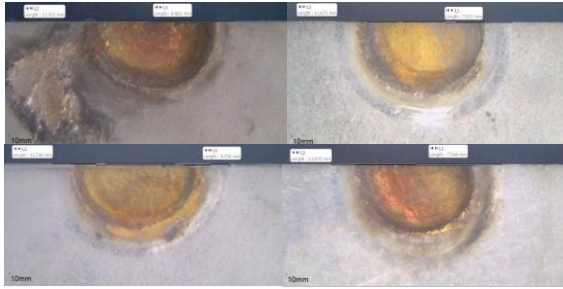


Şekil 3. NDK'lı numunelerin düzlemsel sertlik ölçüm hattı ve noktaları (Planar hardness measurement line and points of RSW samples)

3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

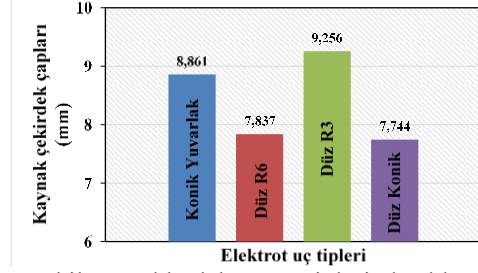
3.1. Kaynak Çekirdek Boyutu (Weld Nugget Size)

Tüm birleşim alanını belirleyen kaynak çekirdek boyutu, NDK'lı birleşimlerin çekme makaslama dayanımı özelliklerini etkileyen en önemli parametredir. NDK'lı birleşimde kaynak çekirdek boyutu ile maksimum yük ve enerji absorbe kabiliyeti arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır [25,33–36]. Kaynak çekirdek boyutu arttıkça, çentik kökü etrafında gerilim konsantrasyon faktörü azalmakta ve sonucunda çekme makaslama dayanımı artış göstermektedir [25]. 4 farklı elektrot uç tipinde gerçekleştirilen NDK işlemlerinde elde edilen kaynak çekirdek çap değerleri Şekil 4'te ve grafiksel olarak Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 4. NDK'lı numunelerin kaynak çekirdek çap ölçümleri a) Konik yuvarlak b) Düz R6 c) Düz R3 d) Düz konik (Weld nugget diameter measurements of RSW samples a) Conical round b) Flat R6 c) Flat R3 d) Flat conical)

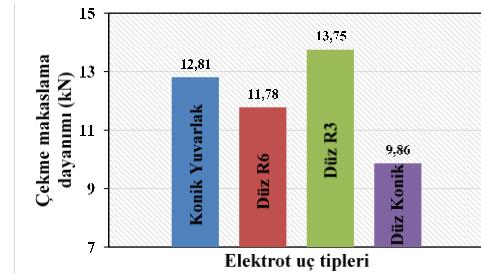
Şekil 4 ve Şekil 5 değerlendirildiğinde, en yüksek çap değerleri Düz R3 uçlu elektrotlarda (9,256 mm), en düşük değerler ise düz konik elektrot uçların (7,744 mm) kullanılması ile uygulanan NDK işlemleri ile sağlandığı anlaşılmaktadır. Elektrot uç tiplerinin farklı temas alanları, farklı akım yoğunluğu dağılımına sebep olur ve sıcaklık dağılımının simetrisini aksel yönde değiştirir [1]. Genel olarak 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. Isı girdisindeki artış ile doğru orantılı olarak kaynak çekirdek çap değerleri diğer elektrot uç tiplerinde elde edilen değerlere göre daha yüksek bulunmuştur.



Şekil 5. Farklı elektrot uç tiplerinde elde edilen kaynak çekirdek çap değerleri (Weld nugget diameter values obtained at different electrode tip types)

3.2. Çekme Makaslama Özellikleri (Tensile Shear Properties)

NDK'lı birleşimlerin mekanik performansı genellikle statik, yorulma ve darbe yükleme koşulları altında düşünülmektedir [37–43]. Araç yapılarındaki NDK'lı birleşimler, hem makaslama yüklemelerine hem de çekme yüklemelerine maruz kalmaktadır [33,44]. NDK'lı birleşimlerin mekanik davranışlarının değerlendirmede en sık tercih edilen testler; çekme makaslama, çapraz gerilme ve koç kabuğu testleridir. Çekme makaslama testi özellikle makaslama yüklemesini temsil etmektedir [44–46]. Bu çalışmada 4 farklı elektrot uç tipinin çekme makaslama özelliklerine etkisi incelenmiştir. Elde edilen çekme makaslama deney sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir.

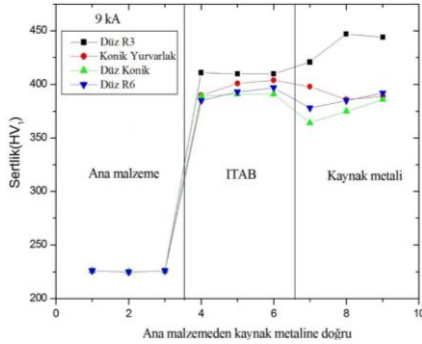


Şekil 6. Farklı elektrot uç tiplerinde elde edilen çekme makaslama kuvvet değerleri (Tensile shear force values obtained at different electrode tip types)

Çekme makaslama sonuçları (çekme yük taşıma kapasitesi), elektrot uç tipleri bakımından değerlendirildiğinde; en yüksek çekme makaslama dayanım değeri Düz R3 uçlu elektrotlar ile (13,75 kN), en düşük çekme makaslama dayanım değerinin ise düz konik uçlu elektrotlar ile (9,86 kN) elde edildiği görülmektedir. Düz R3 elektrod ile gerçekleştirilen NDK işlemlerinde akım yoğunluğu diğer elektrot uç tiplerine göre daha yüksek miktarda gerçekleşmiş ve bu durum da daha fazla bir alanda ısı üretimine yol açmıştır. Isı girdisindeki artış ile doğru orantılı olarak kaynak bölgesinde oluşan ve çekme makaslama dayanım değerini arttıran esas etken düğme (nugget) çapı (Şekil 6.) olmakla birlikte farklı uç tipleri akım geçiş modeli değerlendirildiğinde; düz

olmakla birlikte martenzit faz oranı diğer elektrot uç tiplerinde elde edilenlere göre daha fazladır. Bu sebeple en yüksek çekme makaslama dayanım değerleri Düz R3 uçlu elektrotlar ile elde edilmiş, Düz konik uçlu elektrotlar ile gerçekleştirilen ve ucun daha homojen ve yaygın bir ısı dağılımı oluşturduğu ve daha kaynak metali sıçramasına da sebep olabileceği literatür ışığında değerlendirilmektedir [1,25]. Konik ve küresel uçlarda ise merkez bölgedeki aşırı basınç ile batmanın fazlalığı ve sonuç itibarı ile bölgesel akım yoğunluğu ile sıçramaların ve düğme çapının daha düşük gerçekleşmemesi ile sonuçlandığı ve ayrıca kaynak metali bölgesindeki soğuma sırasında kaynak tane yapısının iri ve martenzit faz miktarının daha az olması ile sonuçlanabileceği değerlendirilmektedir [1]. Isı girdisindeki yaygınlık veya bölgesellik ile hem düğme boyutları ve hem de mikroyapı öznelikleri değişmekte, sonuç itibarı ile ise sertlik ve hem de çekme makaslama taşıma kapasiteleri de farklılık göstermektedir.

NDK işleminde kaynak çekirdek boyutu artıkça çekme makaslama dayanımının artış gösterdiği literatürde ifade edilmiştir [25,33–36]. Şekil 5 ve Şekil 6 birlikte değerlendirildiğinde kaynak çekirdek çap değerleriyle doğru orantılı olarak çekme makaslama dayanım değerlerinde artış gözlenmiştir. Bu doğrultuda en yüksek çekme makaslama dayanım değeri Düz R3 uçlu elektrotlar ile elde edilmiştir.



Şekil 7. Farklı elektrot uç tiplerinde elde edilen sertlik değerleri (Hardness values obtained at different electrode tip types)

3.3. Mikrosertlik Sonuçları (Microhardness Results)

Farklı elektrot uç tiplerinde gerçekleştirilen NDK işlemleri sonucunda elde edilen sertlik değerleri grafiksel olarak Şekil 7’de gösterilmiştir. Tipik olarak, NDK’lı düşük karbonlu çeliklerin kaynak metali sertlik değeri, ana metale göre yaklaşık 2-3 kat daha yüksektir [15,47]. Şekil 7 incelendiğinde, özellikle Düz R3 uçlu elektrotlar ile ana malzemeye göre kaynak metali sertlik değerinin yaklaşık 2 kat artış gösterdiği görülmektedir. Çekme makaslama yüklemelerinde, maksimum yük değeri kaynak metalinin sertliği ile orantılıdır [25]. Şekil 6 ve Şekil

7 birlikte değerlendirildiğinde farklı elektrot uç tipleri için sertlik ve çekme makaslama dayanım değerleri arasında doğrusal bir ilişki görülmektedir.

Literatürde ticari DP600 otomotiv sac çeliğinin NDK işlemlerinden sonra kaynak metalinde ortaya çıkan sertlik değerleri incelendiğinde şu sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ma vd. kaynak metalinin sertliğini 420 HV, Khan vd. farklı kaynak parametreleri altında gerçekleştirdikleri NDK işlemleri sonucunda kaynak metalinin sertliğini 350-400 HV aralığında bulmuştur [48,49]. Zhang vd. kaynak metali sertliğinin 361 HV, Xu vd. ise 340-370 HV aralığında olduğunu ifade etmiştir[38,50]. Long ve Khanna ise kaynak metalinin sertliğini 420 HV bulmuştur [36]. Bu çalışmada elde edilen sertlik değerleri ise farklı elektrot uç tipleri için 350-450 HV aralığında elde edilmiştir. Bu doğrultuda literatürde elde edilen sonuçlarla benzerlik göstermektedir. En yüksek sertlik değerleri Düz R3 uçlu elektrotlarla, en düşük sertlik değerleri ise Düz konik uçlu elektrotlarla gerçekleştirilen numunelerde elde edilmiştir.

Farklı elektrot uç tiplerinin etkisini belirlemek için, deneylerde kullanılan DP600 çeliğinin karbon eşdeğerliği, Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanmıştır [13]. Konaklama uyum faktörü ise Eşitlik 2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$CE_V = C + A(C) \times \left\{ 5 \times B + \frac{S_i}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} \right\} \quad (1)$$

$$A(C) = 0,75 - 0,25 \times \tanh\{20 \times (C - 0,12)\} \quad (2)$$

Buradan elde edilen konaklama-uyum faktörü değeri DP600 çeliği için 0,5759 ve karbon eşdeğerliği değeri ise 0,2828’dir. Kaynak metali sertliği ise Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmaktadır [49].

$$HV_{KM} = 630 \times CE_V + 188 \quad (3)$$

Eşitlik 3 kullanılarak kaynak metali sertlik değeri 366,164 HV olarak hesaplanmıştır. Şekil 7 incelendiğinde; konik yuvarlak, düz konik ve düz R6 uçlu elektrotlarda hesaplanan kaynak metali sertlik değerine yakın değerler elde edilmiştir. Beklenen sertlik değerine göre Düz R3 uçlu elektrotlarda daha yüksek sertlik değerleri gözlenmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

NDK yöntemi ile birleştirilen geliştirilmiş yüksek mukavemetli çeliğin kaynak çekirdek çapı, çekme makaslama dayanımı ve mikro sertlik özellikleri üzerinde farklı elektrot uç tiplerinin etkisinin

değerlendirildiği bu çalışmada elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- DP600 çeliğinin düşük miktarda martenzit fazı ve ağırlıklı olarak ferrit fazından oluştuğu görülmüştür.
- En yüksek kaynak çekirdek çap değerleri Düz R3 uçlu elektrotlarda, en düşük değerler ise Düz konik elektrot uçlarda görülmüştür.
- Kaynak çekirdek boyutu arttıkça çekme makaslama dayanımı artmıştır.
- En yüksek çekme makaslama dayanım değeri ısı girdisindeki artış ile doğru orantılı olarak daha fazla martenzit faz oranına sahip Düz R3 elektrotlar ile elde edilmiştir. Isı girdisindeki yaygınlık veya bölgesellik ile hem düğme boyutları ve hem de mikroyapı öznitelikleri değişmekte homojen bir yapı, geniş bir alanda martenzit fazı ile ve en büyük kaynak düğme çapının bir sonucu olarak sertlik ve çekme dayanım değerleri de artmaktadır.
- Sertlik ve çekme makaslama dayanım değerleri arasında doğrusal bir ilişki gözlenmiştir.
- Konik yuvarlak, düz konik ve düz R6 uçlu elektrotlarda hesaplama yöntemi ile elde edilen kaynak metali sertlik değerine yakın değerler elde edilirken, Düz R3 uçlu elektrotlarda ise daha yüksek sertlik değerleri gözlenmiştir.

TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmaya destek veren Karabük Üniversitesi Rektörlüğüne ve BAP Proje koordinatörlüğüne teşekkür ederiz (Proje no: KBÜBAP-17-KP-463).

ÇIKAR ÇATIŞMASI BİLDİRİMİ (CONFLICT OF INTEREST STATEMENT)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması bildirilmemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] B. Wang, L. Hua, X. Wang, Y. Song and Y. Liu, "Effects of electrode tip morphology on resistance spot welding quality of DP590 dual-phase steel," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 83, no. 9–12, pp. 1917–1926, April 2016. doi: 10.1007/s00170-015-7703-0

[2] S. Donders, M. Brughmans, L. Hermans and N. Tzannetakis, "The effect of spot weld failure on dynamic vehicle performance," *Sound and Vibration*, vol. 39, no. 4, pp. 16–25, April 2005.

[3] A. De, "Spot welding," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, no. 3, pp. 213–214, 2008. doi: 10.1179/174329308X326318

[4] A. Alzahougi, M. Elitas and B. Demir, "RSW junctions of advanced automotive sheet steel by using different electrode pressures," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 8, no. 5, pp. 3492–3495, October 2018. doi: 10.48084/etasr.2342

[5] M. Elitas and B. Demir, "The effects of the welding parameters on tensile properties of RSW junctions of DP1000 sheet steel," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 8, no. 4, pp. 3116–3120, August 2018. doi: 10.48084/etasr.2115

[6] D. K. Matlock, J. G. Speer, E. De Moor and P. J. Gibbs, "Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: an overview," *Jestech*, vol. 15, no. 1, pp. 1–12, January 2012.

[7] D. K. Matlock and J. G. Speer, *Microstructure and Texture in Steels: Third generation of AHSS microstructure design concepts*. London, Springer, 2009, pp. 185–205.

[8] E. De Moor, P. J. Gibbs, J. G. Speer, D. K. Matlock and J. G. Schroth, "AIST transactions strategies for third-generation advanced high-strength steel development," *Iron & Steel Technology*, vol. 7, no. 11, pp. 133-144, November 2010.

[9] M. Pouranvari, A. Abedi, P. Marashi and M. Goodarzi, "Effect of expulsion on peak load and energy absorption of low carbon steel resistance spot welds," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, no. 1, pp. 39–43, 2008. doi: 10.1179/174329307X249342

[10] S. M. Zuniga, "Predicting overload pull-out failures in resistance spot welded joints," Ph.D. dissertation, Stanford Univ., Stanford, USA, 1995.

[11] H. Zhang and J. Senkara, *Resistance Welding Fundamentals and Applications*. Boca Raton, CRC Press, 2011.

- [12] M. Pouranvari, H. R. Asgari, S. M. Mosavizadch, P. H. Marashi and M. Goodarzi, "Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, no. 3, pp. 217–225, 2007. doi: 10.1179/174329307X164409
- [13] P. C. Lin, S. H. Lin and J. Pan, "Modeling of failure near spot welds in lap-shear specimens based on a plane stress rigid inclusion analysis," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 73, no. 15, pp. 2229–2249, October 2006. doi: 10.1016/j.engfracmech.2006.03.017
- [14] X. Sun, E. V. Stephens and M. A. Khaleel, "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*, vol. 15, no. 4, pp. 356–367, June 2008. doi: 10.1016/j.engfailanal.2007.01.018
- [15] X. Sun, E. V. Stephens and M. A. Khaleel, "Effects of fusion zone size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high-strength steel spot welds," *Welding Journal*, vol. 86, no. 1, pp. 18-25, January 2007.
- [16] J. Nieto, M. P. Guerrero-Mata, R. Colas and A. Mani, "Experimental investigation on resistance spot welding of galvanized HSLA steel," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 11, no. 6, pp. 717–722, 2006. doi: 10.1179/174329306X153187
- [17] X. Sun, E. V. Stephens, R. W. Davies, M. Khaleel and D. J. Spinella, "Effects of fusion zone size on failure modes and static strength of aluminum resistance spot welds," *Welding Journal*, vol. 83, no. 11, pp. 308-318, November 2004.
- [18] M. Pouranvari and S. P. H. Marashi, "Critical sheet thickness for weld nugget growth during resistance spot welding of three-steel sheets," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16, no. 2, pp. 162–165, 2011. doi: 10.1179/1362171810Y.0000000016
- [19] S. Sam and M. Shome, "Static and fatigue performance of weld bonded dual phase steel sheets," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 15, no. 3, pp. 242–247, 2010. doi: 10.1179/136217110X12665778348461
- [20] M. I. Khan, M. L. Kuntz, P. Su, A. Gerlich, T. North and Y. Zhou, "Resistance and friction stir spot welding of DP600: a comparative study," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, no. 2, pp. 175–182, 2007. doi: 10.1179/174329307X159801
- [21] O. N. P. O. S. Varjenja, P. U. To, K. V. Naprednega and F. M. V. T. Jekla, "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*, vol. 46, no. 6, pp. 665–671, 2012.
- [22] A. De, O. P. Gupta and L. Dorn, "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*, vol. 210, no. 4, pp. 341–347, August 1996. doi: 10.1243/PIME_PROC_1996_210_126_02
- [23] G. Mukhopadhyay, S. Bhattacharya and K. K. Ray, "Strength assessment of spot-welded sheets of interstitial free steels," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 4, pp. 1995–2007, February 2009. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.065
- [24] K. R. Pedersen, A. Harthøj, K. L. Friis, N. Bay, M. A. Somers and W. Zhang, "Microstructure and hardness distribution of resistance welded advanced high strength steels," in *5th International Seminar on Advances in Resistance Welding, 24-26 August 2008, Toronto, Canada* [Online]. Available: DTU Orbit, <https://orbit.dtu.dk/en/> [Accessed: 08 Oct. 2021].
- [25] M. Pouranvari and S. P. H. Marashi, "Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 18, no. 5, pp. 361–403, 2013. doi: 10.1179/1362171813Y.0000000120
- [26] Z. Duan, Y. Li, M. Zhang, M. Shi, F. Zhu and S. Zhang, "Effects of quenching process on mechanical properties and microstructure of high strength steel", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, vol. 27, no. 6, pp. 1024–1028, December 2012. doi: 10.1007/s11595-012-0593-1
- [27] N. A. Özbek and E. Saraç, "Effects of tempering heat treatment temperatures on mechanical properties of carbon steels," *Gazi Journal of Engineering Sciences (GJES)*, vol. 7, no. 1, pp. 17–25, April 2021. doi: 10.30855/gmbd.2021.01.03
- [28] H. Gökçe, "Modelling and optimization for thrust force, temperature and burr height in drilling of custom 450," *Experimental Techniques*, pp. 1–15, September 2021. doi: 10.1007/s40799-021-00510-z

- [29] H. Yang, X. Lai, Y. Zhang and G. Chen, "Investigations on the weldability of high-strength steels sheet to cylindrical tube single-sided spot welding," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 49, no. 5–8, pp. 513–518, November 2009. doi: 10.1007/s00170-009-2418-8
- [30] M. Eshraghi, M. A. Tschopp, M. A. Zaeem and S. D. Felicelli, "Effect of resistance spot welding parameters on weld pool properties in a DP600 dual-phase steel: a parametric study using thermomechanically-coupled finite element analysis," *Materials & Design*, vol. 56, pp. 387–397, April 2014. doi: 10.1016/j.matdes.2013.11.026
- [31] S. Frydman and G. Pękalski, "Structure and hardness changes in welded joints of Hardox steels," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 15–27, 2008. doi: 10.1016/S1644-9665(12)60118-6
- [32] C. W. Ziemian, M. M. Sharma and D. E. Whaley, "Effects of flashing and upset sequences on microstructure, hardness, and tensile properties of welded structural steel joints," *Materials & Design*, vol. 33, pp. 175–184, January 2012. doi: 10.1016/j.matdes.2011.07.026
- [33] R. W. Rathbun, D. K. Matlock and J. G. Speer, "Fatigue behavior of spot welded high-strength sheet steels," *Welding Journal*, vol. 82, no. 8, pp. 207–218, August 2003.
- [34] T. B. Hilditch, J. y Speer and D. K. Matlock, "Effect of susceptibility to interfacial fracture on fatigue properties of spot-welded high strength sheet steel", *Materials & Design*, vol. 28, no. 10, pp. 2566–2576, December 2006. doi: 10.1016/j.matdes.2006.10.019
- [35] M. H. Swellam, G. B. Aş and F. V. Lawrence, "A fatigue design parameter for spot welds," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 17, no. 10, pp. 1197–1204, October 1994. doi: 10.1111/j.1460-2695.1994.tb01408.x
- [36] X. Long and S. K. Khanna, "Fatigue properties and failure characterization of spot-welded high strength steel sheet," *International Journal of Fatigue*, vol. 29, no. 5, pp. 879–886, May 2007. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.08.003
- [37] Y. S. Yang, K. J. Son, S. K. Cho, S. G. Hong, S. K. Kim and K. H. Mo, "Effect of residual stress on fatigue strength of resistance spot weldment," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 6, no. 6, pp. 397–401, 2001. doi: 10.1179/stw.2001.6.6.397
- [38] J. Xu, Y. S. Zhang, L. Xinmin and G. L. Chen, "Experimental investigation of fatigue performance of spot welded dual phase sheet steels," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, no. 8, pp. 726–731, 2008. doi: 10.1179/174329307X236841
- [39] X. Long and S. K. Khanna, "Fatigue performance of spot welded and weld bonded advanced high strength steel sheets," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 13, no. 3, pp. 241–247, 2008. doi: 10.1179/174329307X249379
- [40] S. Daneshpour, S. Riekehr, M. Kocak and C. H. J. Gerritsen, "Mechanical and fatigue behaviour of laser and resistance spot welds in advanced high strength steels," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 14, no. 1, pp. 20–25, 2009. doi: 10.1179/136217108X336298
- [41] H. Gaul, G. Weber and M. Rethmeier, "Influence of HAZ cracks on fatigue resistance of resistance spot welded joints made of advanced high strength steels," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 16, no. 5, pp. 440–445, 2011. doi: 10.1179/1362171810Y.0000000031
- [42] S. Daneshpour, A. H. Kokabi, A. A. Ekrami and A. K. Motarjemi, "Crack initiation and kinking behaviours of spot welded coach peel specimens under cyclic loading," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, no. 8, pp. 696–702, 2007. doi: 10.1179/174329307X238416
- [43] P. Wung, T. Walsh, A. Ourchane, W. Stewart and M. Jie, "Failure of spot welds under in-plane static loading," *Experimental Mechanics*, vol. 41, no. 1, pp. 100–106, March 2001.
- [44] M. Pouranvari and S. P. H. Marashi, "Failure of resistance spot welds: tensile shear versus coach peel loading conditions," *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 39, no. 2, pp. 104–111, 2012. doi: 10.1179/1743281211Y.0000000066
- [45] M. Pouranvari and S. P. H. Marashi, "Failure mode transition in AISI 304 resistance spot welds", *Welding Journal*, vol. 91, no. 11, pp. 303–309, November 2012.
- [46] M. Pouranvari and S. P. H. Marashi, "Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part I. Controlling factors," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 29–30, pp. 8337–8343, November 2011. doi: 10.1016/j.msea.2011.08.017

[47] M. Pouranvari, S. P. H. Marashi and D. S. Safanama, "Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part II: Experimental investigation and model validation," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 29–30, pp. 8344–8352, November 2011.

doi: 10.1016/j.msea.2011.08.016

[48] C. Ma, D. L. Chen, S. D. Bhole, G. Boudreau, A. Lee and E. Biro, "Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 485, no. 1–2, pp. 334–346, June 2008.

doi: 10.1016/j.msea.2007.08.010

[49] M. I. Khan, M. L. Kuntz, E. Biro and Y. Zhou, "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded advanced high strength steels," *Materials Transactions*, vol. 49, no. 7, pp. 1629–1637, July 2008. doi: 10.2320/matertrans.MRA2008031

[50] H. Zhang, A. Wei, X. Qiu and J. Chen, "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded dissimilar thickness DP780/DP600 dual-phase steel joints," *Materials & Design*, vol. 54, pp. 443–449, February 2014.

doi: 10.1016/j.matdes.2013.08.027

This is an open access article under the CC-BY license
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

