



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Nokta direnç kaynak yöntemi ile alüminyum ve titanyum alaşımı sacların IF çelik saclarla kaynak kabiliyetinin araştırılması

Investigation of the welding capability of aluminum and titanium alloy sheets with IF steel sheets by resistance spot welding method

Yazar(lar) (Author(s)): Özer MUTLUSU¹, Rukiye ERTAN²

ORCID¹: 0000-0001-9459-3027

ORCID²: 0000-0002-9631-4607

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Mutlusu Ö. ve Ertan R., “Nokta direnç kaynak yöntemi ile alüminyum ve titanyum alaşımı sacların IF çelik saclarla kaynak kabiliyetinin araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1003-1013, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.558297

Nokta Direnç Kaynak Yöntemi ile Alüminyum ve Titanyum Alaşımı Sacların IF Çelik Saclarla Kaynak Kabiliyetinin Araştırılması

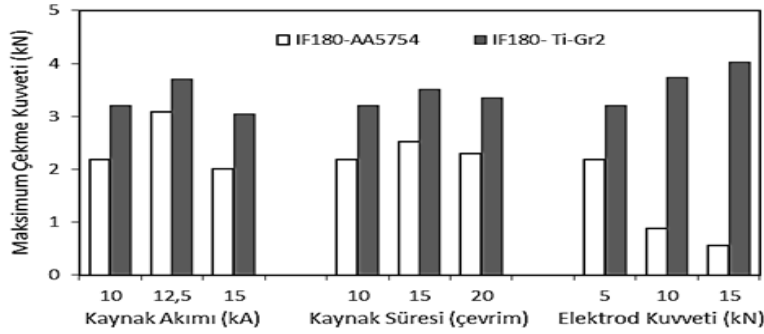
Investigation of the Welding Capability of Aluminum and Titanium Alloy Sheets with IF Steel Sheets by Resistance Spot Welding Method

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Alüminyum ve titanyum alaşımlarının IF çelik saclarla noktasal kaynak edilebilirliği kıyaslanmıştır./ Spot weldability of aluminum and titanium alloys with IF steel sheets was compared.
- ❖ Kaynak parametrelerinin mekanik özellikler ve kaynak çekirdek boyutları üzerindeki etkisi incelenmiştir./ The effect of welding parameters on mechanical properties and nugget dimensions were investigated.
- ❖ Her bir malzeme çifti için optimum kaynak parametreleri tespit edilmiştir./ Optimum welding parameters have been determined for each pair of materials.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

IF 180 çeliğinin ticari saf titanyum ve 5754 alüminyum alaşımı ile noktasal kaynak edilebilirliği farklı kaynak parametrelerinde mekanik özellikleri kıyaslanarak incelenmiştir.



Şekil. Kaynaklı numunelerin mekanik özellikleri / **Figure.** Mechanical properties of welded samples

Amaç (Aim)

IF 180 çeliğinin ticari saf titanyum ve 5754 alüminyum alaşımı ile noktasal kaynak edilebilirliği araştırılması amaçlanmıştır./ It is aimed to investigate spot weldability of IF 180 steel with commercial pure titanium and 5754 aluminum alloy.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Kaynak işlemleri elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle farklı kaynak parametrelerinde gerçekleştirilmiştir./ Welding operations were carried out by using electric resistance spot welding method in different welding parameters.

Özgünlük (Originality)

Bu çalışmada farklı malzemelerin birbirleriyle ara malzeme kullanmadan noktasal kaynak edilebilirliği araştırılmıştır./ In this study, the spot weldability of different materials without using intermediate materials was investigated.

Bulgular (Findings)

Kaynaklı numunelerin çekirdek çapı, elektrod dalma derinliği, sertlik ve çekme-makaslama testi sonuçları irdelenmiştir./The nugget diameter, electrode depth, hardness and tensile-shear test results were examined.

Sonuç (Conclusion)

Kaynak akımı ve elektrod kuvvetinin çekirdek çapı, elektrod dalma derinliği ve maksimum çekme kuvvetini önemli oranda etkilediği tespit edilmiştir./It has been determined that the welding current and electrode force significantly affect the nugget diameter, electrode immersion depth and maximum tensile force.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Nokta Direnç Kaynak Yöntemi ile Alüminyum ve Titanyum Alaşımı Sacların IF Çelik Saclarla Kaynak Kabiliyetinin Araştırılması

Araştırma Makalesi / Research Article

Özer MUTLUSU¹, Rukiye ERTAN^{2*}

¹Tofaş Türk Otomobil Fabrikası A.Ş., İstanbul Cad., No:574, Osmangazi-16110, Bursa, Türkiye

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fak., Otomotiv Müh. Böl., Grütke-16059, Bursa, Türkiye

(Geliş/Received : 26.04.2019 ; Kabul/Accepted : 02.10.2019)

ÖZ

Bu çalışmada, 1 mm kalınlığındaki yüksek mukavemetli ve derin çekilebilir IF 180 çeliğinin yine 1 mm kalınlığındaki ticari saf titanyum (ASTM Grade 2) ve 5754 alüminyum alaşımı ile noktasal kaynak edilebilirliği araştırılmıştır. Kaynak işlemleri elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle farklı kaynak akımları (10 kA, 12,5 kA ve 15 kA), kaynak süreleri (10, 15 ve 20 çevrim) ve elektrod kuvvetlerinde (5 kN, 10 kN ve 15 kN) gerçekleştirilmiştir. Kaynaklı numunelerin kaynak çekirdek çapı, elektrod dalma derinliği, sertlik ve çekme-makaslama testi sonuçları incelenerek mekanik özellikleri irdelenmiştir. Sonuç olarak, kaynak parametrelerinin IF 180 - 5754 Al alaşımı kaynak çiftinin mekanik özellikleri üzerinde IF 180 - Ti-Gr2 alaşım çiftine göre daha büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Kaynak akımı ve elektrod kuvvetinin her iki kaynak çiftinde çekirdek çapı, elektrod dalma derinliği ve maksimum çekme kuvvetini önemli oranda etkilediği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: IF180, Titanyum Gr2, 5754 Al alaşımı, nokta direnç kaynağı, mekanik özellikler.

Investigation of the Welding Capability of Aluminum and Titanium Alloy Sheets with IF Steel Sheets by Resistance Spot Welding Method

ABSTRACT

In this study, spot weldability of 1 mm thick IF 180 deep drawn high strength steel with 1 mm thick commercial pure titanium (ASTM Grade 2) and 5754 aluminum alloy was investigated. The welding operations were performed with different welding currents (10 kA, 12.5 kA and 15 kA), welding times (10, 15 and 20 cycles) and electrode forces (5 kN, 10 kN and 15 kN) by electrical resistance spot welding. The welding nugget diameter, electrode immersion depth, hardness and tensile-shear test results of the welded samples were examined and the mechanical properties were compared. As a result of the tests, it was seen that the welding parameters had a greater effect on the mechanical properties of the IF 180 -5754 Al alloy welding pair than the IF 180 - Ti-Gr2 alloy pair. It has been determined that the welding current and electrode force significantly affect the nugget diameter, electrode immersion depth and the maximum tensile force in both welding pairs.

Keywords: IF180, Titanium Gr2, 5754 Al alloy, resistance spot welding, mechanical properties.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomotiv ve havacılık sektörlerinin enerji ihtiyacı giderek artarken, yakıt ekonomisini iyileştirmek, iklim değişikliğini, çevreye verilen zararı ve insan sağlığına olan olumsuz etkileri azaltmak amacıyla araçların hafifletilmesi üzerine yoğun olarak çalışılmaktadır. Bu çalışmalar, çoğunlukla alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi hafif alaşımların kullanımını içermektedir [1-3]. Ancak araç üzerinde yüksek mukavemeti ekonomik kriterler çerçevesinde sağlamak için çelik hala en çok tercih edilen metal malzeme grubundadır. Daha radikal bir yaklaşım ise, çeliğin yoğunluğundan daha düşük yoğunluğa sahip olan alüminyum ve titanyum

alaşımlarının çelik ile birlikte kullanılması ve daha hafif sistemler üretilmesidir [3]. Otomotiv endüstrisinde farklı metallerin noktasal kaynağında genellikle elektrik direnç veya sürtünme - karıştırma nokta kaynağı kullanılmaktadır. Sürtünme - karıştırma nokta kaynağı, uygulamadaki bazı sıkıntıları nedeniyle kısıtlı kullanım alanına sahiptir [4]. Nokta direnç kaynağı ise su soğutmalı elektrotlar arasında bindirme şeklinde pozisyonlanmış plakaların, belirli bir süre boyunca akıma maruz bırakılarak ısıtılması şeklinde basit bir çalışma prensibi ile gerçekleştirilir. İşlem hızı oldukça yüksek, kontrol edilebilir bir imalat süreci ve düşük ilk yatırım maliyetine sahip olmasından dolayı bu yöntem otomotiv endüstrisinde vazgeçilmez olmuştur [5]. Elektrik direnç nokta kaynağı çelik, paslanmaz çelik, nikel, alüminyum veya titanyum alaşımlarının birleştirilmesinde en fazla

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : rukiye@uludag.edu.tr

kullanılan yöntemdir [6]. Ancak ara yüzeyde oluşan yüksek sıcaklığın etkisiyle kaynaklı bölgede mekanik ve metalurjik özelliklerde önemli değişiklikler meydana gelir. Bağlantı kalitesini önemli oranda etkileyen bu değişiklikler uygun parametre ile yapılan kaynak işlemlerinde minimum düzeyde kalır [7]. Kaynak akımı başta olmak üzere kaynak süresi ve elektrod kuvveti mekanik özellikleri belirleyen önemli parametrelerdir.

Araç üzerinde kullanılan çelik alaşımın türü parçadan beklenen performansa, maliyetine ve tasarıma uygun imalatı göz önünde bulundurularak seçilir. Çelik türleri arasında ultra düşük karbonlu (<%0,003) [8] çelikler derin çekilebilir özelliklere sahip olup otomotiv endüstrisinde yumuşak çeliklerin yerini almıştır. Bu çelikler kolay şekillendirilebilir olmalarının yanı sıra iyi kaynak edilebilir özelliklere sahiptir ve çeşitli kaynak yöntemleriyle birleştirilebilir [9, 10]. Yüksek mekanik mukavemete, iyi yorulma ve darbe direncine sahip olan bu çelikler, yapısal parçalar (uzunlamasına kirişler, traversler, B direkleri vb.) için farklı metaller ile birlikte kullanılmaktadır [11]. Özellikle Al alaşımları hafiflikleri ve sergiledikleri yüksek mekanik özellikler sebebiyle en fazla tercih edilen farklı metaller grubundadır. Bundan başka titanyum alaşımları da yüksek maliyetlerine rağmen hafif olmaları ve Al alaşımlarından daha yüksek mekanik özellikler sergilemeleri nedeniyle kullanımı gittikçe artan farklı metaller arasından sayılabilmektedir. Ancak farklı metallerin ergitme kaynağı ile birleştirilmesinde çeşitli problemler ortaya çıkmaktadır. Bunlardan en önemlisi ara yüzeyde meydana gelen intermetalik faz tabakası ve sıcak çatlak oluşumudur.

Çeliklerin hafif metaller ile elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilebilirliği konusunda literatürde kısıtlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır [12-19]. Kang ve ark. (2017) [14] yaptıkları çalışmada farklı kalınlıklardaki AA6022-T4 ve IF çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle kaynak etmişlerdir. Yorulma ve çekme-makaslama testleri, SEM görüntüleri ve kaynak çekirdek çapları ile birlikte değerlendirilerek mekanik özellikler AA6022-T4 ve AA6022-T4 kaynak çifti ile kıyaslanmıştır. Farklı metallerin kaynağında oluşan intermetalik faz ve çatlaklara rağmen aynı metallerin kaynağına göre daha yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir. Literatürde farklı metallerin kaynağı konusunda yapılan çalışmalarda kaynak işlemi genellikle kaplama veya ara yüzey tabakası yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan, Sun ve ark. (2004) [15] yaptıkları çalışmada SAE1008 çeliğini 5182-O alüminyum alaşımı ile elektrik direnç nokta kaynağı yöntemiyle ara yüzey tabakası kullanarak birleştirmişlerdir. Kaynak birleştirmelerinin statik ve dinamik dayanımları, aynı yükleme koşulları altında perçinli birleştirmeler ile kıyaslanmıştır ve perçinli birleştirmelerin daha yüksek enerji absorbe etme yeteneğine ve yorulma dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Satonaka ve ark. (2006) [16] ve Qui ve ark. (2008) [17] yaptıkları çalışmada 5052 alüminyum alaşımını direnç nokta kaynağı kullanarak SUS304 paslanmaz çelik ve SPCC soğuk haddelenmiş çelik

alaşımı ile SPCC alaşımı ara tabaka sacı kullanarak birleştirmişlerdir. Sonuç olarak kaynak mukavemeti elektrod çapının artmasıyla arttığı tespit edilmiştir. Al alaşımının SUS304 ile kaynak edilmesi durumunda kaynak ara yüzeyinde oluşan sert intermetalik faz (Fe_2Al_3 ve $FeAl_3$) tabakası 1-2 μ m gibi çok ince kalınlıklarda meydana gelirken, SPCC alaşımı ile yapılan kaynak işlemlerinde tabaka kalınlığı 7-8 μ m'ye ulaşmıştır. Bu faz tabakasının çekme-makaslama testi sonuçları üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, ancak çapraz çekme testi sonuçlarını önemli miktarda etkilediği tespit edilmiştir.

Farklı malzemelerin kaynağında meydana gelen problemleri minimize etmek amacıyla literatürdeki bazı çalışmalarda elektrik direnç kaynak yöntemi üzerinde çeşitli iyileştirmeler yapılmıştır. Kim ve ark. (2016) [18] yaptıkları çalışmada DP590 ve A5052 alaşımlarını Delta-direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi durumundaki elektrod morfolojisinin ve kaynak parametrelerinin kaynak mukavemeti üzerindeki etkisi incelemişlerdir. Zhang ve ark. (2015) [19] yaptıkları çalışmada 6008-T66 Al alaşımı ile H220YD yüksek mukavemetli çelik sacları elektrik direnç nokta kaynağı ile elektrod morfolojisini optimize ederek birleştirmişlerdir. Geliştirdikleri elektrod ile yapılan kaynaklı bağlantıların mukavemeti sıradan (F tipi) elektrodlar ile yapılanlara göre daha yüksek elde edilmiştir. Ayrıca geliştirilen elektrod ile yapılan kaynaklarda ara yüzeyde oluşan intermetalik faz tabakasının kalınlığı 4 μ m'yi aşmamıştır.

Bu çalışmada, 1 mm kalınlığındaki IF 180 çelik sac ile 1 mm kalınlığındaki ticari saf titanyum (Grade2) ve 1 mm kalınlığındaki 5754 Al alaşımı saclar herhangi bir kaplama veya ara yüzey tabaka malzemesi kullanmadan farklı kaynak akımları, süreleri ve elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağıyla birleştirilmesi durumundaki mekanik özellikleri detaylı olarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada IF 180 çelik alaşımı, ticari saf titanyum (Ti-Gr2) ve 5754 alüminyum alaşımı saclar 1 mm kalınlığında elektrik direnç nokta kaynağı yöntemi kullanılarak bindirme şeklinde kaynak edilmiştir. Bu malzemelere ait kimyasal kompozisyonlar ve mekanik özellikler, sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmiştir.

Kaynak işlemi, elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi ayarlanabilir, 180 kVA gücündeki su soğutmalı, sabit direnç nokta kaynağı makinesi ile zirkonyum alaşımli 8 mm çapında bombeli elektrotlar kullanılarak yapılmıştır. Birleştirilecek numunelerin yüzeyleri kaynak öncesi, kaynağı olumsuz etkileyebilecek kir, pas, yağ vb. maddelerden arındırılmış ve ayrıca kaynak yapılacak nokta asetona ile temizlenmiştir.

Çizelge 1. Malzemelerin kimyasal kompozisyonları (% ağırlıkça) (The chemical composition of the materials (weight %))

Malzeme	C	Mn	S	Si	Al	Cr	Ni	Ti	Mg	Fe	Cu	O
IF 180	0,002	0,05	0,008	0,011	0,046	0,019	0,012	0,07		98,9		
AA5754		0,35		0,21	95,4	0,03		0,15	2,8	0,4	0,05	
Ti-Gr2	0,1							99,2		0,3		0,25

Çizelge 2. Malzemelerin temel mekanik özellikleri (The basic mechanical properties of the materials)

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Vickers Sertlik (HV0,5)
IF 180	228	290	35	118
AA5754	195	225	12	90
Ti-Gr2	278	344	20	155

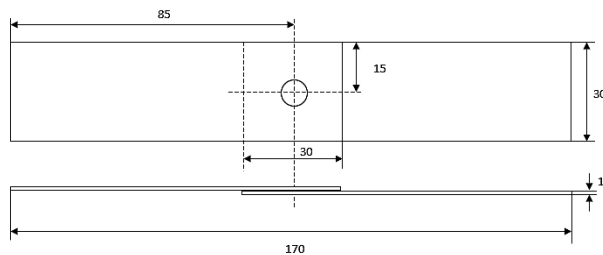
Çizelge 3. Çalışmada kullanılan kaynak parametreleri (Welding parameters used in this study)

	Akım (kA)	Kuvvet (kN)	Süre (çevrim)*		Akım (kA)	Kuvvet (kN)	Süre (çevrim)*
	IF180 – Ti-Gr2	10	5		10	IF180 – AA5754	10
15				15			
20				20			
10			10	10			
15			10	10			
12.5		5	10	12.5	5		10
15		5	10	15	5		10

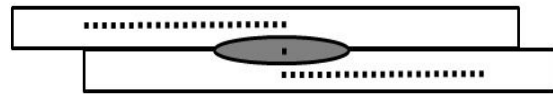
*1 çevrim = 0,02 sn

Optimum kaynak parametre aralığını tespit etmek amacıyla ön çalışmalar yapılmıştır. Numuneler Çizelge 3'de verilen kaynak parametrelerine göre direnç nokta kaynağı ile birleştirilmiş ve her bir malzeme çifti için 7 farklı numune elde edilmiştir

Kaynak sonrasında numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla çekme-makaslama ve mikrosertlik testleri yapılmıştır. Çekme-makaslama testleri 250 kN yük kapasiteli UTEST universal çekme cihazında 10 mm/dk çekme hızında oda sıcaklığında yapılmıştır. Teste tabi tutulan numunelerin teknik resmi Şekil 1'de verilmiştir.

**Şekil 1.** Elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilen çekme numunelerinin boyutları (Dimensions of tensile specimens welded by electrical resistance spot welding)

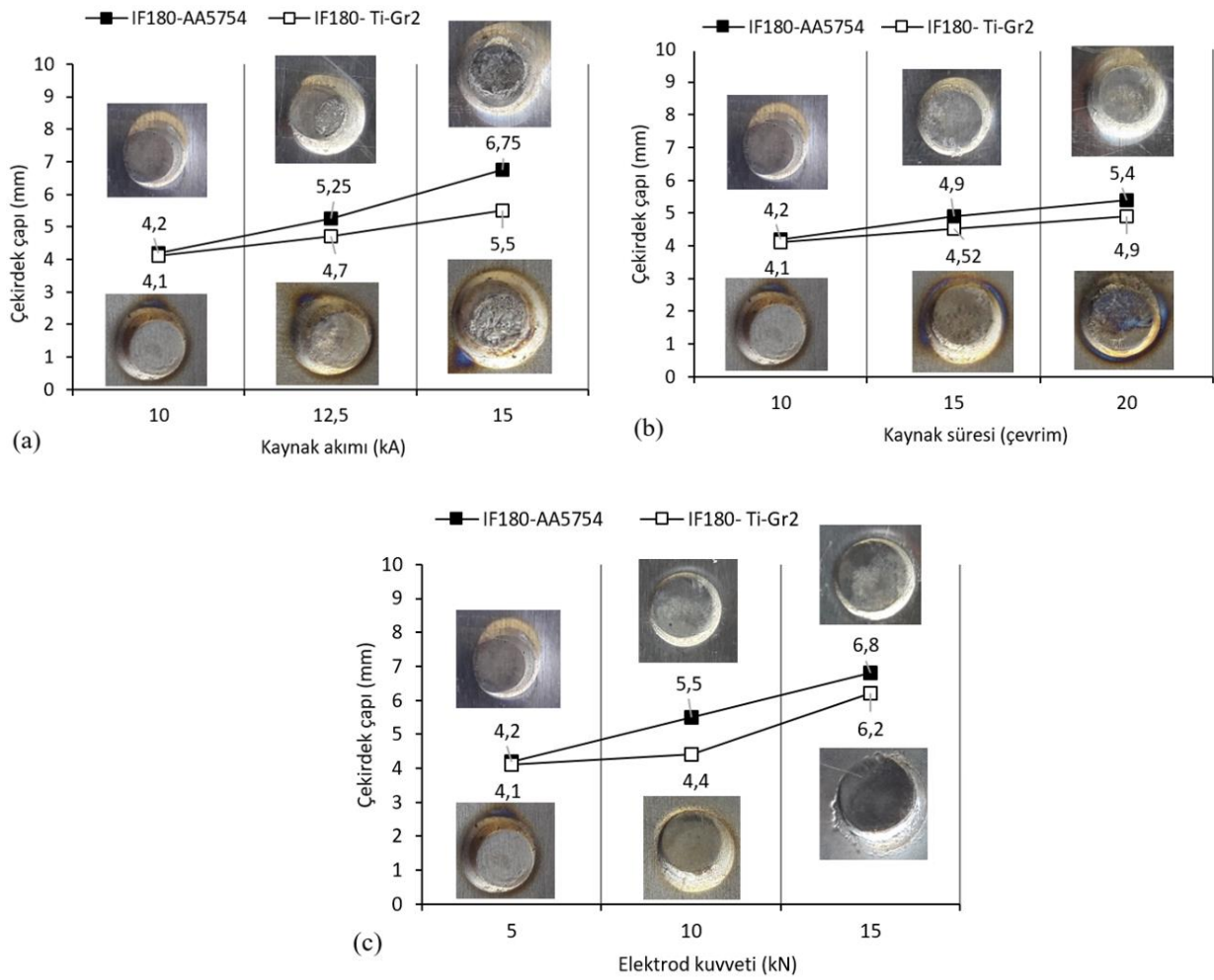
Sertlik ölçümleri Metkon marka Vickers sertlik ölçme cihazında 500 g'lık yük altında Şekil 2'de verilen noktalardan kaynak kesiti boyunca 1 mm aralıkla yapılmıştır. Çekme ve sertlik testleri aynı şartlardaki dört adet numunenin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

**Şekil 2.** Vickers sertlik ölçüm noktaları (Vickers hardness measurement points)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Kaynak Çekirdeği Çapı ve Elektrod Dalma Derinliği Ölçümleri (Weld Nugget Diameter and Electrode Dept Intensity Dimensions)

Kaynaklı bağlantılara ait çekirdek çapı ölçümü sonuçları çekirdek makro görüntüleri ile birlikte Şekil 3'de ve elektrod dalma derinlikleri sonuçları Şekil 5'te grafik olarak verilmiştir. Çekirdek çaplarının kaynak parametrelerine bağlı değişimi grafiklerinde Ti-Gr2 alaşımının sertlik değerinin yüksek olması nedeniyle çekirdek çapı değerleri tüm kaynak parametrelerinde IF 180-5754 Al alaşımı kaynak bağlantılarına göre daha düşük elde edilmiştir. Her iki malzeme çiftinde de kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrod kuvveti artışıyla birlikte çekirdek çapı da artmıştır. Kaynak akımı ve elektrod kuvvetinin çekirdek çapı değişimi üzerinde daha önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir.



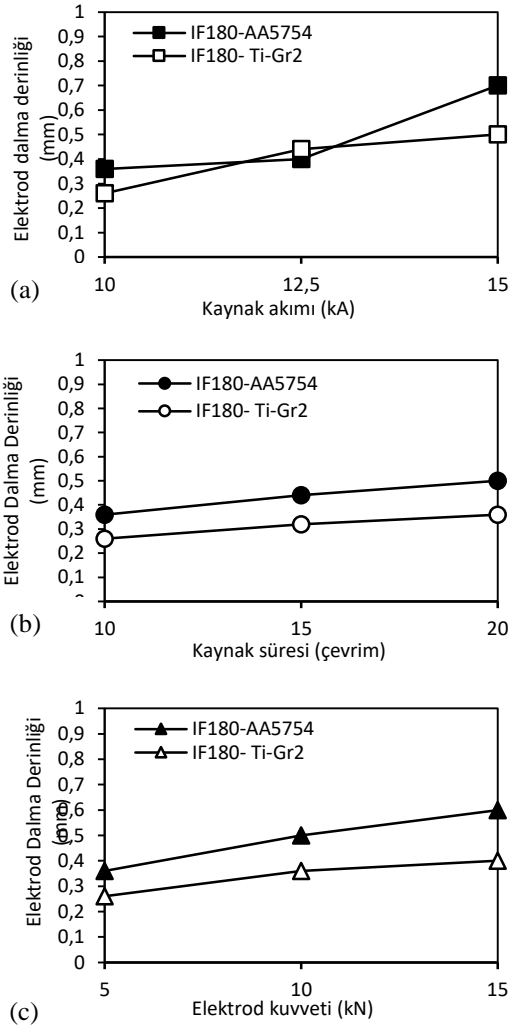
Şekil 3. 5754 Al alaşımının ve Ti-Gr2 alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak sürelerinde ve (c) elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki çekirdek çapları (Nugget diameters of the 5754 Al alloy and Ti-Gr2 alloy welded with IF 180 steel alloy under different (a) welding currents, (b) welding times and (c) electrode forces)

Şekil 4'te görüldüğü üzere en büyük elektrod dalma derinliği IF 180 - AA5754 malzeme çiftinde 15 kA kaynak akımı, 5 kN elektrod kuvveti ve 10 çevrim kaynak zamanında 0,7 mm elektrod dalma derinliği olarak ölçülmüştür. En küçük elektrod dalma derinliği ise IF 180 - Ti-Gr2 malzeme çiftinde, 10 kA kaynak akımı, 5 kN elektrod kuvveti ve 10 çevrim kaynak zamanında 0,26 mm elektrod dalma derinliği olarak ölçülmüştür. Kaynak süresi ve elektrod kuvveti artışıyla birlikte elektrod dalma derinliği IF 180 – AA5754 ve IF 180 - Ti-Gr2 her iki malzeme çiftinde birbirine paralel bir artış meydana gelmiştir. Ancak kaynak akımının artması IF-180 – AA5754 malzeme çiftini daha fazla etkilemiştir ve özellikle 15 kA kaynak akımında ani bir artış meydana gelmiştir. Bunun en önemli sebebi Al alaşımının sıcaklık artışıyla sünekliliğinin Ti alaşımına göre daha fazla artması olduğu düşünülmektedir. Literatürde kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrod kuvveti artışına bağlı olarak çekirdek çapı ve elektrod dalma derinliği değişimi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Bunlardan Durgut ve

Kaçar [20] yaptıkları çalışmada AISI 2205 çift fazlı paslanmaz çelik sacların nokta direnç kaynak kalitesine, kaynak zamanı ve akım şiddetinin etkisi araştırmıştır. Kaynak akımı ve süresi ile birlikte çekirdek çapının da arttığı görülmüştür. Hayat ve Demir [21] yaptıkları çalışmada DP 600 çelik sacların nokta direnç kaynağında kaynak süresi arttıkça elektrod dalma derinliğinin de arttığını 30 çevrimden sonra da azalmaya başladığını göstermişlerdir.

3.2.Sertlik Testleri (Hardness Tests)

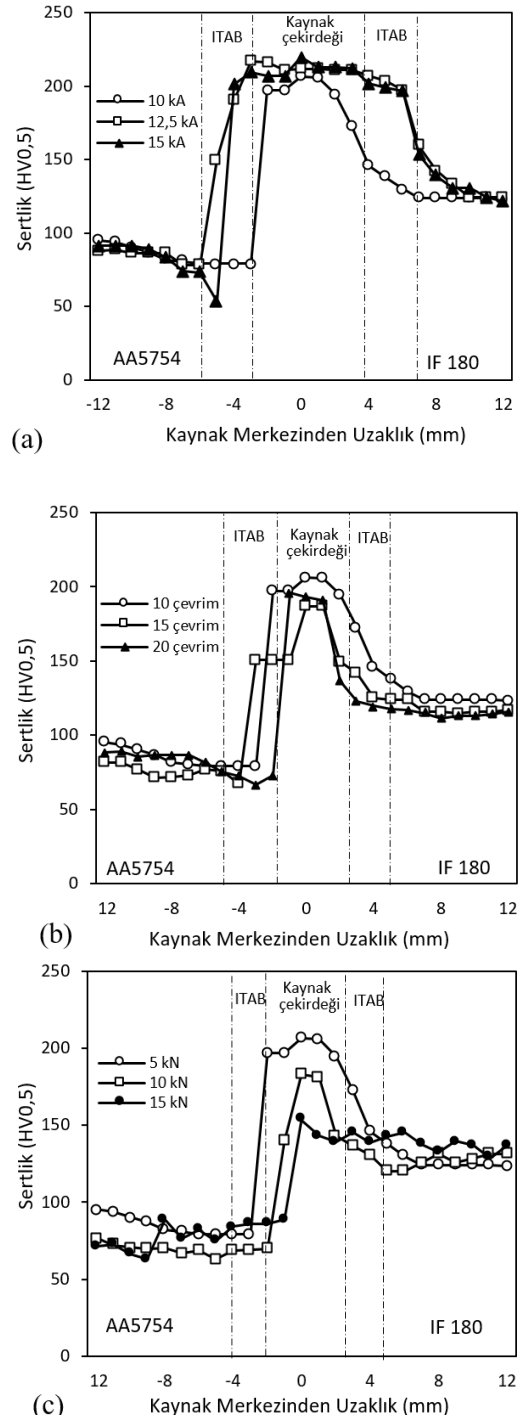
Bu çalışmada, farklı kaynak akımları, çevrim ve elektrod kuvvetlerinde kaynağı gerçekleştirilen IF 180 çelik alaşımı ve 5754 Al alaşımı malzeme çifti için noktasal birleştirmelerinin sertlik dağılımı Şekil 5'te verilmiştir. IF 180 çelik alaşımı ve Ti-Gr2 malzeme çifti için de Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 4. 5754 Al alaşımının ve Ti-Gr2 alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak sürelerinde ve (c) elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki elektrod dalma derinliği (Electrode immersion depth of the 5754 Al alloy and Ti-Gr2 alloy spot welded with IF 180 steel alloy under different (a) welding currents, (b) welding times and (c) electrode forces)

Şekil 5 (a)'da IF 180 ve AA5754 malzeme çiftinin 10 kaynak çevrimi ve 5 kN elektrod kuvvetinde kaynak bölgesindeki (ITAB ve kaynak çekirdeği) sertlik değişimi kaynak akımı değişimine bağlı olarak verilmiştir. Alüminyum alaşımının esas metal bölgesindeki sertlik değerleri tüm numunelerde yaklaşık 90 HV civarında iken IF 180 tarafındaki esas metal bölgesindeki sertlik değerleri 120 HV civarında elde edilmiştir. Kaynak merkezinde (kaynak çekirdeği) sertlik değerleri 12,5 kA ve 15 kA akımları için yaklaşık 215 HV civarında iken akımın 10 kA'ye düşmesiyle birlikte sertlik yaklaşık 195 HV değerine düşmüştür. kaynak çekirdeğinin ortalama sertlik değeri 5754 Al alaşımı esas metal bölgesine göre 2,3 kat ve IF 180 alaşımına göre 1,7 kat daha yüksektir. Literatürde, IF çeliklerinin kaynak çekirdeği bölgesindeki yüksek sertlik davranışı intermetalik faz çökeltilerinin yanısıra

plastik deformasyon ve hızlı soğuma sebebiyle dislokasyon yoğunluğunun artması olarak ifade edilmiştir [22, 23].



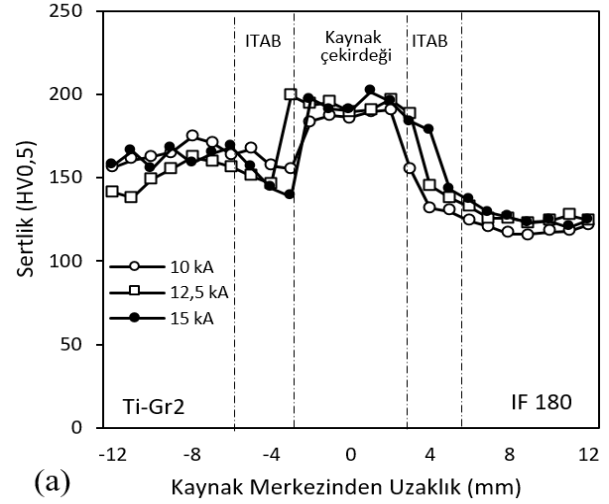
Şekil 5. 5754 Al alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak süresi ve (c) elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki sertlik profili (Hardness profile of the 5754 Al alloy spot welded with IF 180 steel alloy under different (a) welding currents, (b) welding times and (c) electrode forces)

Ergiyen bölgenin bitiminden başlayarak içeriye doğru uzanan ve ısı etkisiyle mikro ve makro yapısında önemli değişikliklerin meydana geldiği bölge olarak adlandırılan ısı tesiri altında kalan bölgede (ITAB) IF 180 tarafında belirgin bir sertlik düşüşü sergilemezken 5754 tarafında özellikle 15 kA akım değerinde 53 HV değerine düşmüştür. ITAB'daki düşüş, literatürde yapılan benzer çalışmalarda da 5000 serisi alüminyum alaşımlarında görülen bir davranıştır [24, 25]. IF180 çeliklerinde ise ITAB'da malzemede tane irileşmesine bağlı olarak daha yavaş bir düşüş meydana gelmiştir [22]. Kaynak çekirdeğinin sertlik profili genişliği açısından numuneler değerlendirildiğinde kaynak akımı artışıyla birlikte genel olarak yüksek sertliğe sahip bölgenin genişliği de artmıştır.

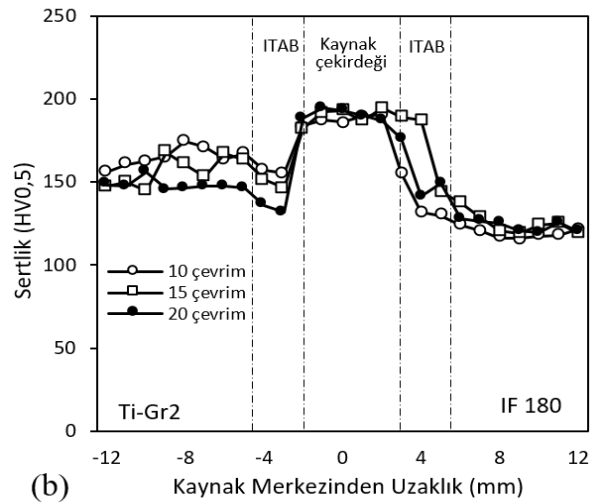
Elektrik direnç nokta kaynağı ile 10 kA kaynak akımında ve 5 kN elektrod kuvvetinde kaynak edilen IF 180 çeliği ve 5754 Al alaşımının kaynak çevrim sayısına bağlı olarak sertlik değişim profili Şekil 5 (b)'de verilmiştir. Kaynak çekirdeğinde elde edilen maksimum sertlik değeri 10 çevrim'de 216 HV ve minimum sertlik değeri 15 çevrim'de 193 HV'dir. Çevrim sayısının en yüksek olduğu 20 çevrim'de ise sertlik 197 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak çekirdeğinin sertlik profili genişliği açısından numuneler değerlendirildiğinde kaynak akımı değişiminin kıyaslandığı Şekil 5 (a)'ya göre daha dar bir bölgeyi kapsamaktadır. Çevrim sayısı ile sertlik arasında doğrudan bir bağlantı bulunamamıştır. Benzer sonuçlar literatürde de elde edilmiştir [26]. Al alaşımı ve IF 180 tarafındaki ITAB'daki sertlik değişimi 20 çevrim'de 10 ve 15 çevrime kıyasla daha düşük değerlerde ve daha geniş bir alanda yer almıştır.

Şekil 5 (c)'de IF 180 çeliği ve 5754 Al alaşımının 10 kA kaynak akımında ve 10 kaynak çevriminde, elektrod kuvveti değişimine bağlı olarak kaynak bölgesindeki sertlik değişimi grafiği verilmiştir. Elektrod kuvvetinin sertlik üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu kaynak çekirdeğinde kuvvet artışıyla sertlik değerinin %25 (5 kN ve 15 kN karşılaştırıldığında) düştüğü görülmüştür. Literatürde de farklı çelik alaşımları ile yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar elde edilmiştir [27].

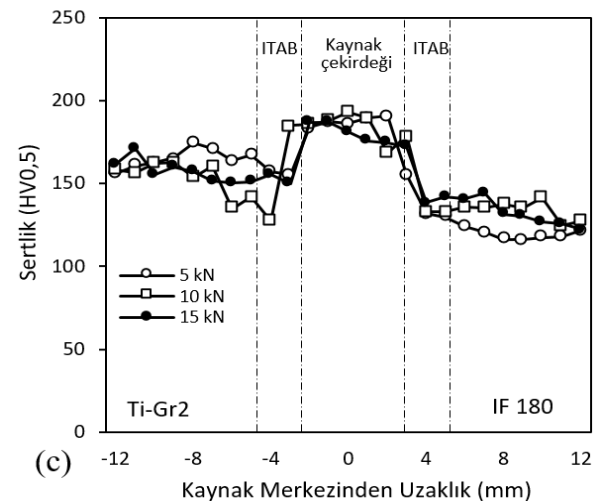
IF 180 çeliğinin Ti-Gr2 ile farklı kaynak akımlarında, 10 kaynak çevrimi ve 5 kN elektrod kuvvetinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki sertlik değişimi Şekil 6 (a)'da verilmiştir. Kaynak çekirdeğinde akıma bağlı olarak sertlikte önemli bir farklılık görülmemekle birlikte, maksimum sertlik değerleri 12,5 ve 15 kA için yaklaşık 201 HV civarında, 10 kA akım değeri için ise sertlik yaklaşık 193 HV olarak elde edilmiştir. Kaynak çekirdeğinin sertlik profili genişliği 10 kA'de daha düşük olmak üzere daha yüksek akım değerlerinde genişlik de artmıştır. ITAB'da, Ti-Gr2 tarafında esas metale yakın bölgede 15 kA'de daha belirgin olmak üzere sertlikte düşüş meydana gelmiştir. Genel olarak kaynak parametrelerinin (akım, çevrim ve elektrod kuvveti) IF 180 ve Ti-Gr2 sertliklerini önemli oranda etkilemediği tespit edilmiştir (Şekil 6).



(a)



(b)



(c)

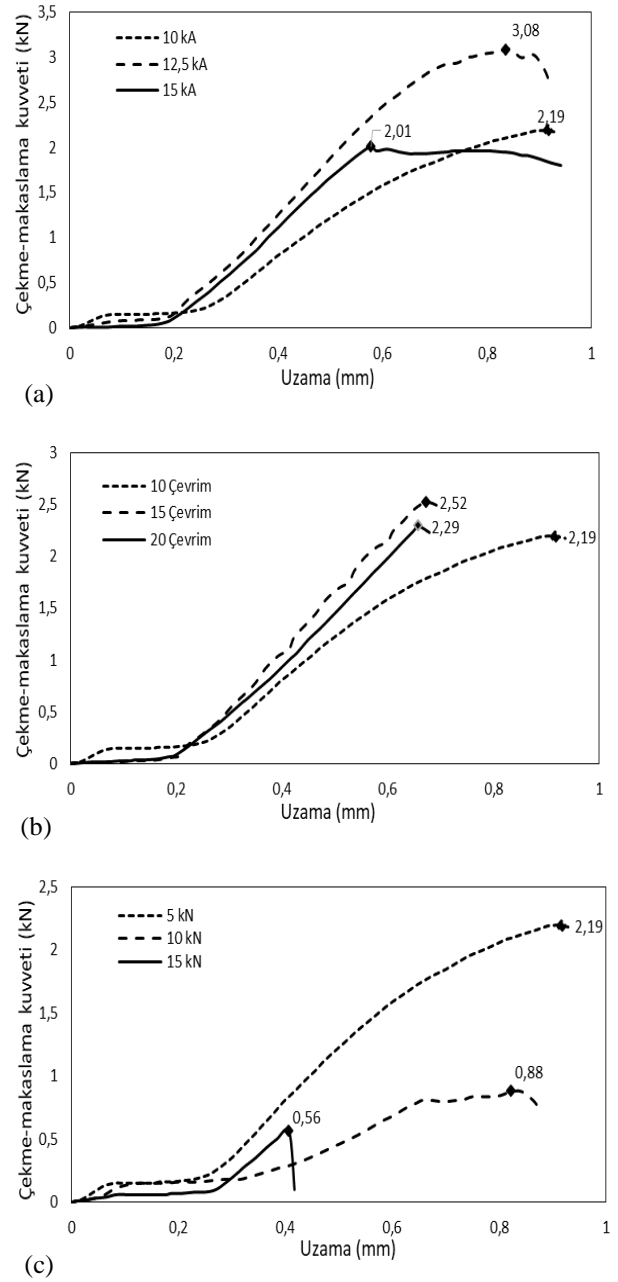
Şekil 6. Ti-Gr2 alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak süresi ve (c) elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki sertlik profili (Hardness profile of the Ti-Gr2 alloy spot welded with IF 180 steel alloy under different (a) welding currents, (b) welding times and (c) electrode forces)

3.2. Çekme-Makaslama Testleri (Tensile-shear tests)

Farklı kaynak akımları, süreleri ve elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı gerçekleştirilen IF 180 çelik alaşımı ile 5754 Al alaşımı için çekme-makaslama testi sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. IF 180 çelik alaşımı ile Ti-Gr2 alaşımı için de Şekil 8'de verilmiştir.

Şekil 7 (a)'da IF 180 ile 5754 Al alaşımının 5 kN elektrod kuvveti, 10 kaynak çevrim sayısında ve farklı kaynak akımlarında çekme-makaslama testi sonuçları karşılaştırılmıştır. Buna göre en yüksek çekme kuvveti 3,08 kN değerinde 12,5 kA kaynak akımında ve en düşük olanı da 2,01 kN değerinde 15 kA'de ölçülmüştür. Çekme mukavemetinin kaynak akımı artışıyla ilk etapta artması ve 15 kA'de tekrar düşmesi kaynak ara yüzeyinde oluşan intermetalik fazın etkisiyle olduğu düşünülmektedir [28]. Sabit kaynak akımı (10 kA) ve elektrod kuvvetinde (5 kN), kaynak süresine bağlı olarak elektrod kuvveti değişimi grafiği Şekil 7 (b)'de verilmiştir. En yüksek çekme kuvveti 15 çevrim sayısında elde edilmiştir. Kaynak süresinin daha da artmasıyla birlikte kuvvette azalma meydana gelmiştir. Maksimum kuvvette meydana gelen uzamalar açısından 10 kaynak çevriminde en yüksek uzama meydana gelmiştir. Çevrim sayısı arttıkça uzama miktarı da azalmıştır. Farklı elektrod kuvvetlerinde sabit kaynak akımı ve çevriminde yapılan kaynak bağlantılarının çekme-makaslama testi sonuçları Şekil 7 (c)'de verilmiştir. Elektrod kuvveti artışıyla birlikte çekme kuvvetinde ve maksimum çekmedeki uzama miktarında önemli oranda azalma meydana gelmiştir. Elektrod kuvvetinin 5 kN'dan 15 kN'a çıkması durumunda çekme kuvvetinde % 74 düşüş, maksimum çekmedeki uzama miktarında %54 düşüş ölçülmüştür. Şekil 5(c)'de verilen sertlik sonuçlarıyla ilişkilendirildiğinde elektrod kuvveti artışıyla birlikte sertlik değeri de çekme kuvvetiyle paralel olarak azalmıştır. Elektrod kuvvetinin belirli bir değeri aşmasıyla sacların kaynak bölgesinde (özellikle Al alaşımı tarafında) daha fazla deformasyon ve bölgesel incelmeyle birlikte çentik etkisi oluşur [29, 30]. Bu durum çekme kuvvetinin düşmesine sebep olur.

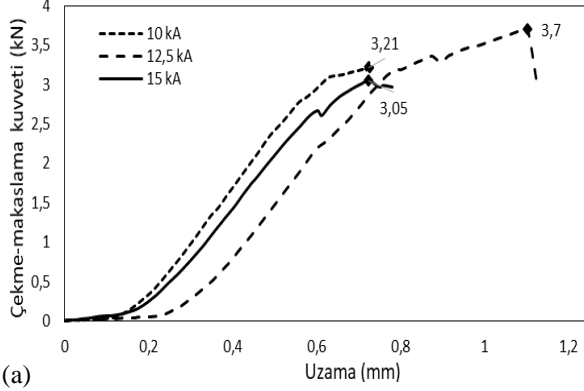
IF 180 çelik alaşımının Ti-Gr2 alaşımı ile 5 kN elektrod kuvveti ve 10 kaynak çevrimi süresince farklı kaynak akımlarında yapılan elektrik direnç nokta kaynağı işlemi sonucunda numunelerin çekme makaslama testi sonuçları Şekil 8 (a)'da verilmiştir. Kaynak akımının 12,5 kA olduğu durumda çekme kuvveti (3,7 kN) en yüksek değerini almıştır. Akım değerinin 15 kA'e yükselmesi çekme kuvvetini % 17,5 oranında düşürmüştür. Kaynak akımı artışıyla birlikte kaynak bölgesindeki ısı miktarı ve dolayısıyla nüfuziyet artar. Ancak çok yüksek kaynak akımlarında kaynak ara yüzeyinde Ti alaşımı ve çelik alaşımı arasında TiFe intermetalik faz oluşumu da hız kazanır [31]. Şekil 6 (a)'da sertlik değerlerindeki artış da bunu desteklemektedir.



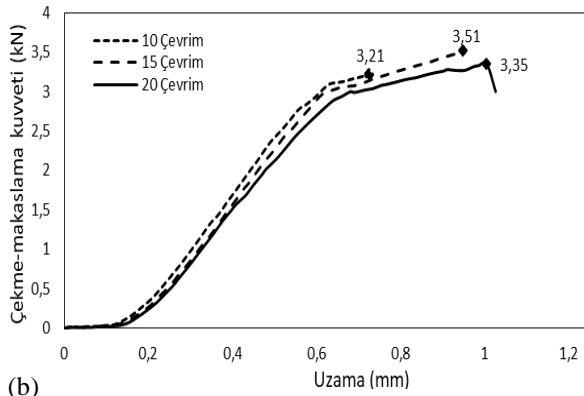
Şekil 7. 5754 Al alaşımının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak çevrimi ve (c) elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki çekme-makaslama testi sonuçları (Tensile-shear test results of the 5754 Al alloy spot welded with IF 180 steel alloy under different (a) welding currents, (b) welding times and (c) electrode forces)

Elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilen IF 180 çelik alaşımı ve Ti-Gr2 alaşımında kaynak çevrim sayısının çekme-makaslama testi sonuçlarına etkisi Şekil 8 (b)'de verilmiştir. Kaynak akımı 10 kA ve elektrod kuvveti 5 kN'da sabit tutulmuştur. Çevrim sayısındaki artış ile birlikte çekme kuvvetinde elde edilen değişim kaynak akımı değişimi ile benzer gidişat sergilemiştir (Şekil 8 (a)). Her üç kaynak çevrim sayısı için elde edilen çekme

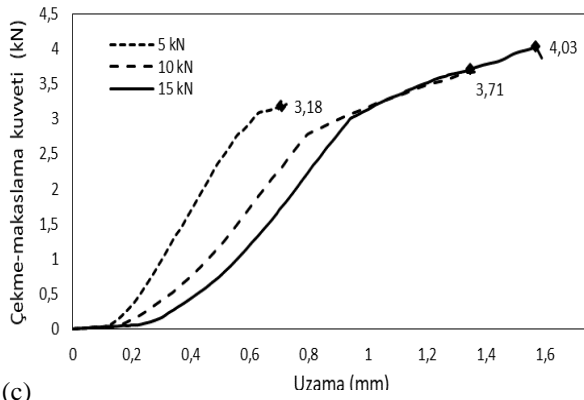
kuvveti değerleri arasında önemli bir farklılık görülmemiştir. En yüksek çekme kuvveti 15 çevrimde ve en düşük çekme kuvveti 10 çevrimde % 8'lik bir farkla elde edilmiştir.



(a)



(b)

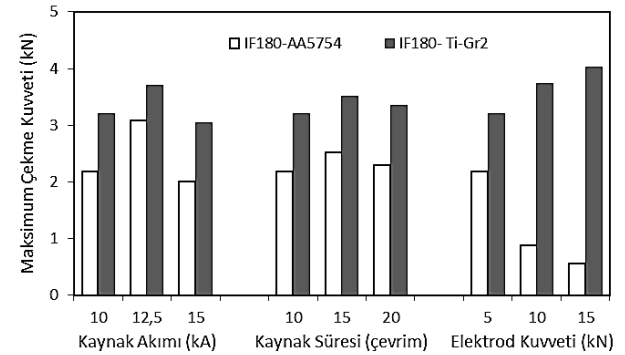


(c)

Şekil 8. Ti-Gr2 alaşımlarının IF 180 çelik alaşımı ile farklı (a) kaynak akımlarında, (b) kaynak çevrimi ve (c) elektrod kuvvetlerinde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilmesi durumundaki çekme-makaslama testi sonuçları (Tensile-shear test results of the Ti-Gr2 alloy spot welded with IF 180 steel alloy under different (a) welding currents, (b) welding times and (c) electrode forces)

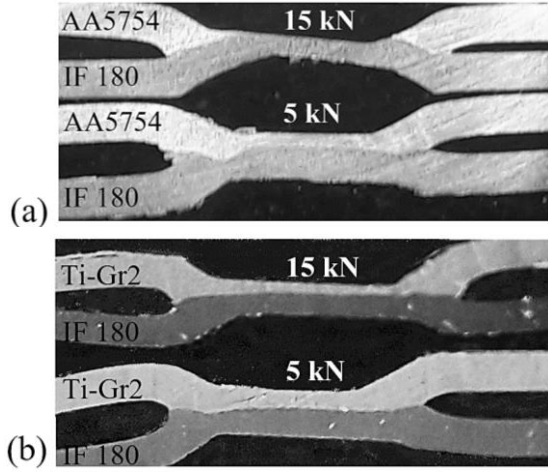
Elektrod kuvvetinin çekme kuvveti üzerindeki etkisi sabit kaynak akımı ve çevriminde Şekil 8 (c)'de verilmiştir. IF 180 çeliğinin Al alaşımı ile kaynağında sergilemiş olduğu davranışın tam tersi, IF 180 çeliği Ti alaşımı ile kaynağında elektrod kuvvetinin artmasıyla birlikte çekme kuvveti de artmıştır. Ti alaşımının Al alaşımına kıyasla daha yüksek sertliğe sahip olması (%75 daha yüksek) ve elektrodun yüksek basma kuvvetlerine karşı daha fazla direnç sergilemesiyle birlikte kaynak bölgesinde daha az kesit incelmeleri ve çentik oluşumunun minimum düzeyde kalması bu davranışı açıklamaktadır. Yeterli kaynak akımı ve sürelerinde, elektrod kuvveti artışıyla çekme kuvvetinin artışı kaynak bölgesinde daha geniş bölgede bir nüfuziyet sağlamıştır.

Şekil 7 ve Şekil 8'de verilen çekme-makaslama test sonuçlarına göre maksimum çekme kuvveti IF 180 – 5754 Al ve IF180 - Ti-Gr2 alaşımı çiftleri için Şekil 9'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Kaynak akımı ve kaynak süresine bağlı olarak IF 180 – 5754 Al ve IF180 - Ti-Gr2 kaynak çiftlerinin her ikisinde de benzer değişim görülürken, elektrod kuvvetinin tam tersi etkisi olmuştur. IF180 - Ti-Gr2 alaşımı çiftinde elektrod kuvvetinin artması maksimum çekme kuvvetini de artırırken, IF 180 – 5754 Al alaşımı çiftinde düşüş meydana gelmiştir. Al alaşımının sertlik değerinin düşük olması ve uygulanan elektrod kuvveti artışı ile birlikte bölgesel çentik etkisi ve kaynak noktasında inceltme meydana gelmesi bu davranışın sebebi olarak açıklanabilir.



Şekil 9. IF 180 – 5754 Al ve IF180 - Ti-Gr2 alaşımı kaynak çiftlerinde kaynak parametrelerinin maksimum çekme kuvveti üzerindeki etkisi (Effect of welding parameters on the maximum tensile force of IF 180 - 5754 Al and IF180 - Ti-Gr2 alloy welding pairs)

Şekil 10'da IF 180 çelik alaşımının AA5754 ve Ti-Gr2 sacları ile 5 kN ve 15 kN elektrod kuvvetlerindeki noktasal kaynağı sonucunda meydana gelen kaynak bölgesi kesit incelmeleri fotoğrafından da bu durum net olarak görülebilmektedir. 15 kN'da alüminyum alaşımı sacın kaynak çekirdeğinde sıcaklığın ve basmanın etkisiyle mikron boyutlara kadar incelendiğini, titanyum alaşımı sacın ise bundan çok fazla etkilenmediğini görmek mümkündür.



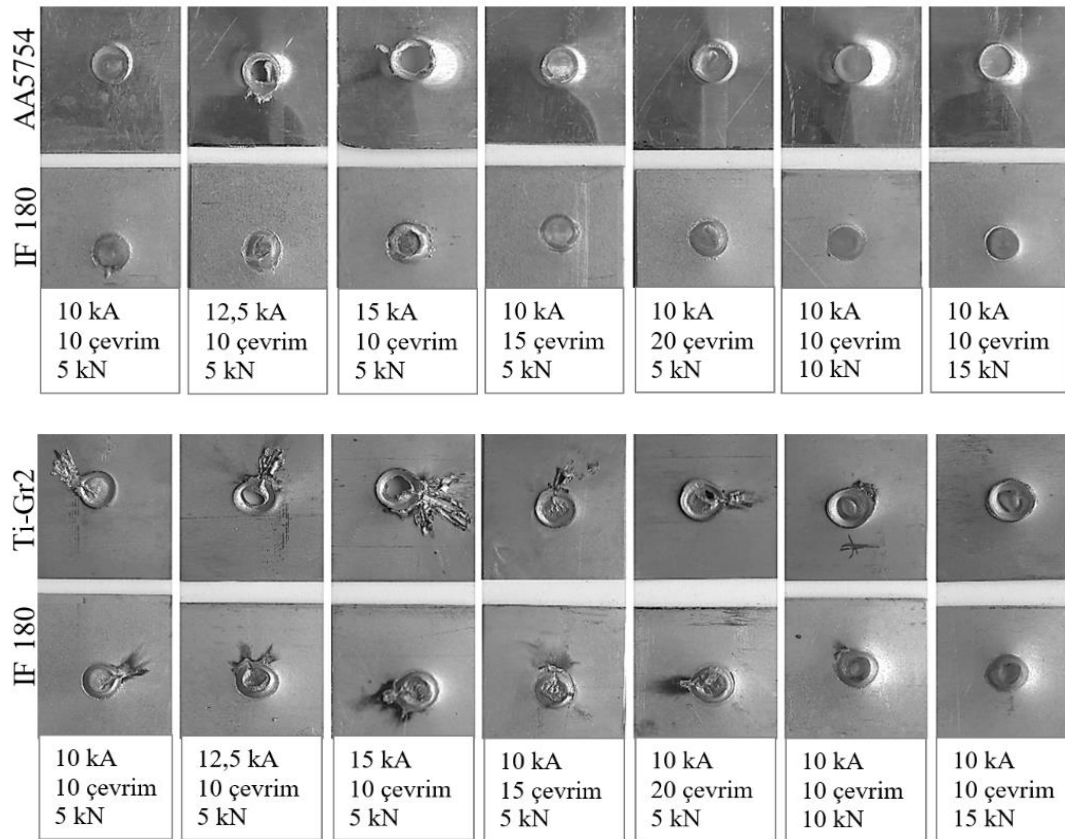
Şekil 10. 5 kN ve 15 kN elektrod kuvvetinde kaynak edilen (a) IF 180 – 5754 Al ve (b) IF 180 – Ti-Gr2 kaynak çiftinde kaynak çekirdeğinde meydana gelen incelme (Nugget region thinning of (a) IF 180 - 5754 Al and (b) IF 180 - Ti-Gr2 welding pairs under 5 kN and 15 kN electrode force)

Bu çalışmada çekme-makaslama testi sonucunda numunelerde iki tip kırılma görülmüştür. Hem IF 180 – AA5754 malzeme çiftinde hem de IF 180 – Ti-Gr2

malzeme çiftinde farklı parametrelerde kaynak edilen numunelerde sadece yüksek akım değerlerinde (12,5 kA ve 15 kA) birleştirilen numunelerde kopmanın düğme tipi kopma şeklinde ve ITAB’da meydana geldiği görülmüştür (Şekil 11). Diğer numunelerin hepsinde ayrılma tipi kopma meydana gelmiştir. Buradan da kaynak akımının gerekli nüfuziyetin sağlanması açısından kritik öneme sahip olduğu ve çekme-makaslama dayanımları da göz önünde bulundurularak optimum değerde seçilmesi gerektiği görülmüştür. Kaynak çevrim sayısı ve elektrod kuvvetinin akımın düşük olması durumunda kopma tipini etkilemediği ortaya çıkmıştır. Bunun yanında Şekil 11(b)’de IF 180 çeliğinin Ti-Gr2 alaşımı ile kaynak edilmesi durumunda kaynak ara yüzeyinde belirgin sıçramaların meydana geldiği, kaynak akımı ve kaynak süresindeki artış ile birlikte bu sıçramaların arttığı, elektrod kuvveti artışıyla da azaldığı görülmüştür.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, elektrik direnç nokta kaynağı ile derin çekilebilir IF 180 çelik alaşımı sacların 5754 Al alaşımı ve Ti-Gr2 alaşımı saclar ile farklı kaynak parametrelerinde kaynak edilmesi ve mekanik özelliklerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi ele



Şekil 11. Farklı parametrelerde elektrik direnç nokta kaynağı ile kaynak edilen (a) IF 180 – AA5754 ve (b) IF 180 – Ti-Gr2 kaynak çiftlerinde çekme-makaslama testi sonrası kopma görüntüleri (Fractured specimen images after tensile shear test of (a) IF 180 – AA5754 and (b) IF 180 – Ti-Gr2 welding pairs spot welded under different parameters)

alınmıştır. Yapılan testler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrod kuvveti artışına bağlı olarak kaynak çekirdek çapı IF180-5754 Al alaşımı çiftinde daha belirgin olmak üzere IF180 - Ti-Gr2 çiftinde de artış meydana gelmiştir. Kaynak akımı ve elektrod kuvvetinin çekirdek çapı üzerinde kaynak süresine göre daha fazla etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

- Sertlik testleri sonucunda, her iki IF180-5754 Al ve IF180 - Ti-Gr2 alaşımı çiftinde de en yüksek sertlik değerleri kaynak çekirdeğinde ölçülmüştür. IF180-5754 Al alaşımı çiftinde kaynak parametrelerine bağlı olarak kaynak çekirdeğindeki sertlik profili büyük oranda değişim sergilemiştir.

- Çekme-makaslama testleri sonuçlarına göre IF180-5754 Al alaşımı çiftinde kaynak parametrelerine bağlı olarak maksimum çekme kuvveti ve uzama miktarları kaynak parametreleri değişiminden IF180 - Ti-Gr2 alaşımı çiftine göre daha fazla etkilenmiştir.

- IF180- Ti-Gr2 alaşımı çiftinde elektrod kuvvetinin artması maksimum çekme kuvvetini de arttırırken, IF 180 – 5754 Al alaşımı çiftinde düşüş meydana gelmiştir. Kaynak kesiti incelendiğinde alüminyum alaşımı tarafında sıcaklık ve basıncın etkisiyle önemli miktarda incelmeye meydana geldiği görülmüştür. Bu durum çentik etkisi ve kaynak bağlantı mukavemetinde azalmaya sebep olmuştur.

- IF 180 – AA5754 ve IF 180 – Ti-Gr2 her iki kaynak çiftinde farklı parametrelerde kaynak edilen numunelerde sadece yüksek akım değerlerinde (12,5 kA ve 15 kA) birleştirilen numunelerde kopmanın düğme tipi kopma şeklinde olduğu, düşük kaynak akımında (10 kA) kaynak edilen diğer tüm numunelerde ise ayrılma tipi kopma meydana geldiği görülmüştür.

- IF 180 – Ti-Gr2 kaynak çiftinde kaynak akımı ve süresinin artması ile birlikte kaynak ara yüzeyinde sıçramanın arttığı, elektrod kuvveti artışı ile birlikte kaynak sıçramasının azaldığı tespit edilmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Wang S.Q., Patel V.K., Bhole S.D., Wenc G.D. and Chen D.L., "Microstructure and mechanical properties of ultrasonic spot welded Al/Ti alloy joints", *Materials and Design*, 78: 33–41, (2015)
- [2] Kaya Y. and Kahraman N., "Titanium sacların nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin çekirdek oluşumuna etkisi", *Journal of Polytechnic*, 14: 263-270, (2011)
- [3] Han L., Thornton M., Li D. and Shergold M., "Effect of governing metal thickness and stack orientation on weld

quality and mechanical behaviour of resistance spot welding of AA5754 aluminium", *Materials and Design*, 32: 2107–2114, (2011)

- [4] Che Y., Wang L., Sun D., Li H. and Geng W., "Microstructures and Mechanical Properties of Resistance Spot-Welded Steel/Aluminum Alloy Joints with Process", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27: 5532–5544, (2018)
- [5] Kianersi D., Mostafaei A. and Amadeh A.A., "Resistance spot welding joints of AISI 316L austenitic stainless steel sheets: Phase transformations, mechanical properties and microstructure characterizations", *Materials and Design*, 61: 251–263, (2014)
- [6] Pereira A.M., Ferreira J.M., Loureiro A., Costa J.D.M. and Bártolo P.J., "Effect of process parameters on the strength of resistance spot welds in 6082-T6 aluminium alloy", *Materials and Design*, 31: 2454–2463, (2010)
- [7] Vural M. and Akkus A., "On the resistance spot weldability of galvanized interstitial free steel sheets with austenitic stainless steel sheets", *Journal of Materials Processing Technology*, 153-154: 1-6, (2004)
- [8] Santos A.P.R., Mota T.C., Segundo H.V.G., Almeida L.H., Araújo L.S. and Rocha A.C., "Texture, microstructure and anisotropic properties of IF-steels with different additions of titanium, niobium and phosphorus", *Journal of Materials Research and Technology*, 7: 203-402, (2018)
- [9] Hoile S., "Processing and properties of mild interstitial free steels", *Materials Science and Technology*, 16: 1079-1093, (2000)
- [10] Campos C.A., Guerrero M., Colás R. and Garza R., "Weldability of Galvannealed Interstitial Free Steel", *ISIJ International*, 42: 876-881, (2002)
- [11] ArcelorMittal Automotive Worldwide. "High strength IF steels", <https://automotive.arcelormittal.com/europe/products/HYTSS/IF/EN> ,(03.05.2018)
- [12] Hasanbaşoğlu A., "Direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen IF çelikleri ile ostenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerinin belirlenmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2005)
- [13] Coşkun M.H., "Otomotiv endüstrisinde kullanılan IF 7114 ve DP 600 çelik sacların direnç nokta kaynağı (RSW) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağı (FSSW) yöntemleri ile birleştirilmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Fakültesi, (2009)
- [14] Kanga J., Rao H.M., Sigler D.R. and Carlson B.E., "Tensile and Fatigue Behaviour of AA6022-T4 to IF Steel Resistance Spot Welds", *Procedia Structural Integrity*, 5: 1425-1432, (2017)
- [15] Sun X., Stephens E.V., Khaleel M.A., Shao H. and Kimchi M., "Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy to Steel with Transition Material-From Process to Performance", *Welding Journal*, 83: 188-195, (2004)
- [16] Satonaka S., Iwamoto C., Qui R. and Fujioka T., "Trends and new applications of spot welding for aluminium alloy sheets", *Welding International*, 20: 858-864, (2006)
- [17] Qiu R., Iwamoto C. and Satonaka S., "Interfacial Microstructure and Strength of Steel/Al Alloy Joints Welded by RSW with Cover Plate", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 4186-4193, (2009)
- [18] Kim J.-S., Kim I.-J. and Kim Y.-G., "Optimization of welding current waveform for dissimilar material with

- DP590 and Al5052 by Delta-spot welding process”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30: 2713–2721, (2016)
- [19] Zhang W., Sun D., Han L. and Li Y., “Optimised design of electrode morphology for novel dissimilar resistance spot welding of aluminium alloy and galvanised high strength steel”, *Materials and Design*, 85: 461–470, (2015)
- [20] Durgut E. and Kaçar R., “Dubleks paslanmaz çeliklerin nokta direnç kaynağına akım şiddeti ve kaynak zamanının etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 26: 341-348, (2011)
- [21] Hayat F. and Demir, B., “Ticari DP600 çelik sacı NDK birleştirmelerinde kaynak süresinin dalma derinliği ve dayanıma etkisi”, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS’09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye
- [22] Rao S.S., Chhibber R., Arora K.S. and Shome M., “Resistance spot welding of galvanized high strength interstitial free steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 246: 252-261, (2017)
- [23] Chakraborty G., Pal T.K. and Shome M., “Microstructure development in resistance spot welded galvanized IF steel sheet”, *Materials Science and Technology*, 27: 382-386, (2011)
- [24] Chen J., Yuan X., Hu Z., Sun C., Zhang Y. and Zhang Y., “Microstructure and mechanical properties of resistance-spot-welded joints for A5052 aluminum alloy and DP 600 steel”, *Materials Characterization*, 120: 45-52, (2016)
- [25] Manladan S.M., Yusof F., Ramesh S., Fadzil M., Luo Z. and Ao S., “A review on resistance spot welding of aluminum alloys”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90: 605-634, (2016)
- [26] Hayat F., Demir B., Acarer M. and Aslanlar S., “Effect of weld time and weld current on the mechanical properties of resistance spot welded IF (DIN EN 10130-1999) steel”, *Kovove Materialy*, 47: 11-17, (2009)
- [27] Zhou K. and Cai L., “Study on effect of electrode force on resistance spot welding process”, *Journal of Applied Physics*, 116: 1-7, (2014)
- [28] Cui L., Qiub R., Hou L.L., Shen Z. and Li Q., "Resistance spot welding between steel and aluminum alloy." *5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering*, Shenzhen, China, September 19-20, (2015)
- [29] Safari M., Mostaan H., Yadegari Kh. H. and Asgari D., “Effects of process parameters on tensile-shear strength and failure mode of resistance spot welds of AISI 201 stainless steel”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89: 1853–1863, (2017)
- [30] Zhang H., Qiu X., Bai Y., Xing F., Yu H. and Shi Y., “Resistance spot welding macro characteristics of the dissimilar thickness dual phase steels”, *Materials and Design*, 63: 151–158, (2014)
- [31] Satoh G., Lawrence Y. and Qiu Y.C., “Strength and microstructure of laser fusion-welded Ti–SS dissimilar material pair”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66: 469–479, (2013)