

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Östenitik Paslanmaz Çelik ve IF Çeliğinin Nokta Direnç Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmesine Kaynak Parametrelerinin Etkisi

Effect of Welding Parameters on Joining Austenitic Stainless Steel and IF Steel with Spot Resistance Welding Method

Kadir Kaya¹, Yakup Kaya^{2*}

¹MEB Altın Safran İlkokulu Karabük

²Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Karabük

Geliş / Received: 22.04.2022

Kabul / Accepted: 03.10.2022

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author) Yakup Kaya, ykaya@karabuk.edu.tr

ÖZ: Bu çalışmada, 1,2 mm kalınlığındaki yüksek korozyon dayanımlı paslanmaz (AISI 316 L) çelik ve yaşlanmaya dayanıklı ve ekstra derin çekmeye uygun çok düşük karbonlu arayer atomsuz IF (7114) çelikleri farklı parametreler kullanılarak nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilmiş ve kaynak parametrelerinin (3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5, 7 ve 9 kA kaynak akımı ve 10, 20, 30, 40 ve 50 çevrim kaynak süresi) kaynaklı birleştirmelere etkisinin belirlenmesi için araştırmalar yapılmıştır. Birleştirme dayanımlarını incelemek için numunelere çekme-makaslama testleri uygulanmış ve testler sonucunda numunelerin kırılma tipleri de araştırılmıştır. Ayrıca, numunelerin kaynak bölgeleri üzerinde sertlik ve mikroyapı çalışmaları yapılmıştır. Kaynaklı numuneler üzerinde gerçekleştirilen çekme-makaslama testleri sonucunda, çekme-makaslama dayanımlarının elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi artışına bağlı olarak arttığı tespit edilmiştir. Ek olarak çekme-makaslama testleri sonrasında tüm numunelerde kopma, IF 7114 çeliği ITAB'ında meydana gelmiştir. Sertlik testleri sonucunda, en yüksek sertlik değeri AISI 316 L-IF 7114 kaynak çekirdeğinden ölçülmüş onu sırasıyla ITAB'lar (AISI 316 L ITAB>IF 7114 ITAB) ve ana malzemeler (AISI 316 L ana malzeme>IF 7114 ana malzeme) izlemiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda, artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresiyle kaynak çekirdeği kesitinin genişlediği ve artan ısı girdisi sebebiyle de IF 7114 ITAB'ında belirgin bir tane irileşmesi olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Paslanmaz çelik, IF çeliği, nokta direnç kaynağı, mekanik özellikler, mikroyapı

ABSTRACT: In this study, 1,2 mm thick high corrosion resistant stainless (AISI 316L) and very low carbon, resistant aging and suitable extra deep drawing interstitial free IF (7114) steels were combined by resistance spot welding method using different parameters and the welding parameters (3 and 6 kN electrode forces, 3, 5, 7 and 9 kA welding currents and 10, 20, 30, 40 and 50 cycle welding times) studies have been conducted to determine the effect on welded joints. Tensile-shear tests were applied to the samples in order to examine the strength of the welded joints and the fracture types of the samples were investigated as a result of the tests. In addition, hardness and microstructure studies were done on the welded regions of the samples. As a result of the tensile-shear tests carried out on the welded samples, it was determined that the tensile-shear strength of the joints increased depending on the increase in electrode force, welding current and welding time. In addition, after the tensile-shear tests, rupture of all samples occurred in IF 7114 steel the heat effected zone (HAZ). As a result of the hardness tests, the highest hardness value was measured from AISI 316 L-IF 7114 the weld nugget, followed by HAZs (AISI 316 L HAZ>IF 7114 HAZ) and base materials (AISI 316 L base material>IF 7114 base material), respectively. As a result of the microstructure investigations, it was observed that the weld nugget cross section expanded with increasing electrode force, welding current and welding time, and a significant grain coarsening occurred in IF 7114 HAZ due to increased heat input.

Keywords: Stainless steel, IF steel, resistance spot welding, mechanical properties, microstructure

1. GİRİŞ

Paslanmaz çelik, birçok endüstri ve çevresinde geniş kullanım alanına sahip önemli bir mühendislik malzemesidir. Paslanmaz çeliklere yüksek korozyon direncini kazandıran yüzeyinde bulunan krom oksit tabakasıdır. Paslanmaz çelikler; baskın metalürjik faz dağılımına göre östenitik, martenzitik, ferritik, çökeltme sertleşmeli ve dubleks olarak sınıflandırılmaktadırlar [1], [2]. Paslanmaz çelikler içerisinde en yüksek kullanım %70 ile östenitik paslanmaz çeliklere aittir [3]. Bu çelikler, üstün korozyon dayanımı ve yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sayesinde depolama ve basınç tankları, makine üretim parçaları ve hijyen gerektiren gıda sektörü gibi birçok alanda kullanılan önemli bir malzemedir [4].

Dünyada son zamanlardaki teknolojik gelişmeler ve artan rekabet ortamı, sürekli müşteri memnuniyeti gerektirmektedir. Çelik endüstrisinde bu teknoloji ve rekabete ayak uydurmak zorunda kalmıştır. Arayer atomsuz (Interstitial-Free, IF) çeliklerde bu son teknoloji ürünlerinden birisidir [5]. IF çelikleri derin çekilebilirlik ve kaynak edilebilirliklerinin iyi olması nedeniyle özellikle otomobil, elektronik eşya, beyaz eşya vb. endüstrilerinde kullanımı artmaktadır [6]. IF çeliği sahip olduğu düşük akma mukavemeti ve yüksek "r" değeri sayesinde ekstra derin çekilebilmekte ve çok karmaşık parçaların üretiminde kullanılmaktadır. IF çeliği içeriğinde bulunan C ve N miktarı vakumlu gaz giderme sistemi ve Ti ve/veya Ti + Nb ilave edilmesiyle 20 ppm'e kadar azaltılmıştır ve yaşlanma göstermeyen yüksek şekillendirilebilirlik özelliği sağlanmaktadır [7].

Teknolojik gelişmeler ve araştırmalarla elde edilen malzemelerin de kendine has özelliklerini kaybetmeden birleştirilebilmesi gerekmektedir. İmalat endüstrisinde en çok kullanılan birleştirme yöntemlerinden biri de kaynaktır. Nokta direnç kaynak yöntemi; seri imalata uyarlanabilen ve epeyce yaygın kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem; ilave metal kullanılmaması sebebiyle hafif olması, yüksek kaynak dayanımı, estetik görünüm, operatör becerisi gerektirmemesi ve yüksek kaynak hızı gibi sebeplerle de otomotiv ve uçak sanayinde, ayrıca metal eşya üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır [8].

Bu çalışmanın amacı; yüksek korozyon dayanımı, mekanik özellikleri ve kolay şekillendirilebilir olması dolayısı ile başta otomotiv, kimya ve mutfak eşyası endüstrisi olmak üzere birçok alanda kullanılan östenitik paslanmaz çelik (AISI 316L) ve yüksek şekillendirilebilirlik ve derin çekme özelliklerinden dolayı başta otomotiv ve beyaz eşya endüstrisi olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılan arayer atomsuz IF (Interstitial Free) çeliği (7114) levhaları, nokta direnç kaynağıyla 40 farklı parametrede (3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5, 7 ve 9 kA kaynak akımı ve 10, 20, 30, 40 ve 50 çevrim kaynak süresi) birleştirilerek, kaynaklı birleştirmelerin, mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılmasıdır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, 1,2 mm kalınlıktaki östenitik paslanmaz çelik ve IF çeliği saclar nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynak işleminde kullanılan AISI 316L ve IF 7114 çelik sacların kimyasal bileşimleri Tablo 1'de, mekanik özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

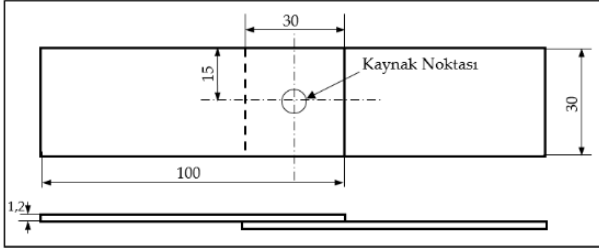
Tablo 1: Sacların kimyasal bileşimi (%Ağırlık).

	C	Mn	P	S	Ti	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
AISI 316 L	0,008	1,75	0,045	0,003	-	0,95	17,8	12	2,7	Kalan
IF 7114	0,005	0,15	0,006	0,005	0,068	-	-	-	-	Kalan

Tablo 2: Sacların mekanik özellikleri.

	Akma Dayanımı (N/mm ²)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Uzama (%)
AISI 316 L	207	539	55
IF 7114	210 max	270-350	38

Kaynak işlemleri için AISI 316 L ve IF 7114 saclar, giyotin makas ile 100x30x1,2 mm boyutlarında kesilmiş ve nokta direnç kaynak standartlarına uygun olarak Şekil 1'de verilen ölçülerde üst üste bindirilerek kaynak işlemlerine hazır hale getirilmiştir. Kaynak işlemlerinde Baykal SPP 60 tipi (Şekil 2) su soğutmalı ve pnomatik kontrollü nokta direnç kaynak makinası kullanılmıştır. Ek olarak kaynaklı parçaların standart olması için bütün kaynak işlemlerinde IF 7114 sacı altta, AISI 316 L sacın ise üstte olmasına dikkat edilmiştir. Ayrıca ön deneyler yapılarak, AISI 316 L çelik ile IF 7114 çelik sac malzemelerin başarıyla birleştirileceği kaynak parametreleri belirlenmiştir.



Şekil 1: Nokta direnç kaynak standart ölçüleri.



Şekil 2: Kullanılan kaynak makinesi.

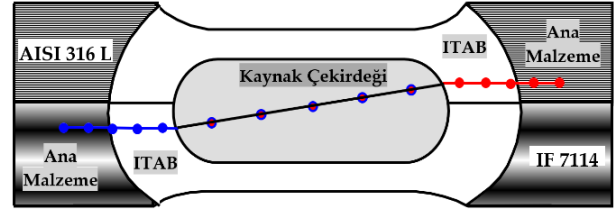
Deneysel çalışmalarda kullanılan kaynak parametreleri Tablo 3'te verilmiştir. Kaynak işlemleri her bir parametreden 4 adet (3 adet çekme-makaslama ve 1 adet mikroyapı/mikrosertlik) olmak üzere toplamda 160 adet yapılmıştır.

Tablo 3: Kaynak parametreleri.

Elektrod kuvveti (kN)	Kaynak Akımı (kA)	Kaynak Zamanı (çevrim)				
3	3	10	20	30	40	50
	5					
	7					
	9					
6	3	10	20	30	40	50
	5					
	7					
	9					

Kaynaklı numunelerin (170x30 boyutlarında) çekme-makaslama dayanımlarının belirlenmesi için, Shimadzu marka (5 ton) çekme cihazı kullanılarak 2 mm/dk çekme hızında çekme deneyleri yapılmıştır. Her bir parametreden 3'er adet çekme-makaslama testi yapılmış ve bu sonuçların ortalaması alınmıştır. Ayrıca kaynaklı numuneler üzerinde mikroyapı ve mikrosertlik çalışmaları yapılabilmesi için numunelerin

bindirme bölgesi (kaynak çekirdeği) ortasından kesilerek (15x30 mm) hazırlanmıştır. 15x30 mm boyutlarında hazırlanan mikroyapı numuneleri bakalite alınmış ve daha sonra bu numunelere zımparalama ve parlatma (standart metalografik numune hazırlama) işlemleri uygulanmıştır. Parlatma işlemleri biten numunelerin AISI 316 L tarafı %10 oksalik asit çözeltisinde ve elektrolitik olarak dağlanır iken IF 7114 tarafı ise %3 nitrik asit çözeltisinde dağlanmıştır. Dağlama işlemlerinden sonra numuneler, NIKON Epiphot 200 optik mikroskop ile görüntülenmiştir. Mikroyapı çalışmalarından sonra aynı numuneler mikrosertlik ölçümlerinde de kullanılmıştır. Sertlik değişimlerini belirlemek için Şekil 3'te görülen noktalardan Shimadzu HMV marka cihaz ile 500 g yük uygulanarak HV (HV_{0,5}) cinsinden sertlik ölçülmüştür.



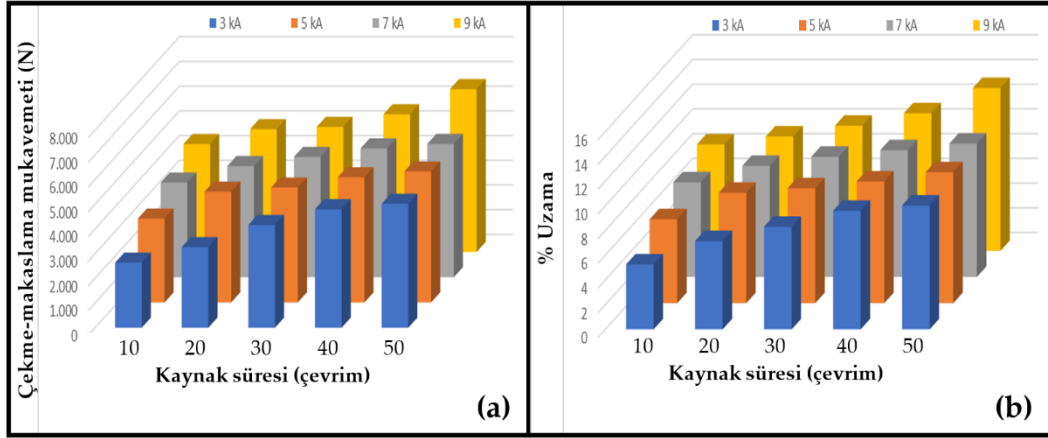
Şekil 3: Mikrosertlik ölçüm noktaları.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

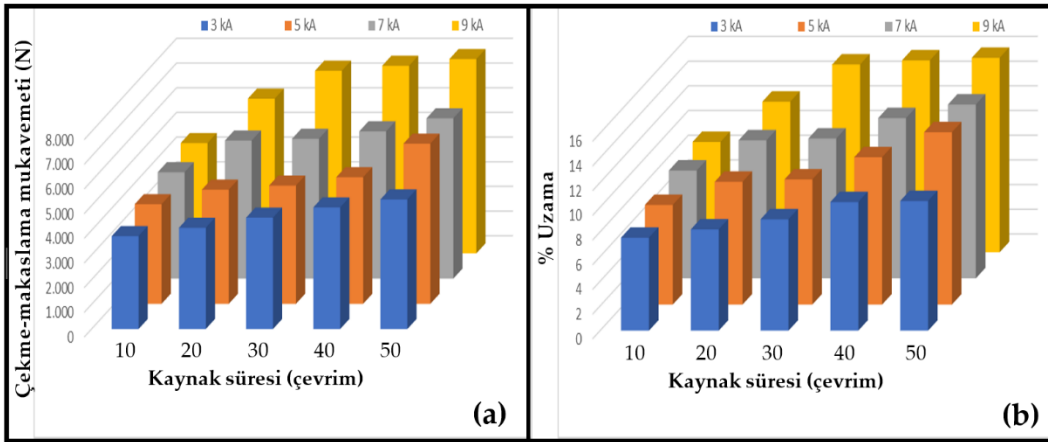
3.1 Çekme-makaslama testi ve kırılma tipi incelemesi

Nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 numunelere çekme-makaslama testleri uygulanmış ve kullanılan farklı kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çekme-makaslama testi sonuçları Şekil 4 ve 5'te verilmiştir.

Şekil 4-5 incelendiğinde, en yüksek çekme-makaslama mukavemeti 7.877 N ile 6 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerden elde edilmiştir. Ayrıca en yüksek % uzama miktarı 17,75 ile aynı parametreden elde edilmiştir. En düşük çekme-makaslama mukavemeti ise 3.396 N ile 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak süresinden elde edilirken, en düşük % uzama miktarı da 6,79 ile aynı parametreden elde edilmiştir.



Şekil 4: 3 kN elektrod kuvvetinde birleştirilmiş numunelerin çekme testi grafikleri; a) çekme-makaslama, b) % uzama.



Şekil 5: 6 kN elektrod kuvvetinde birleştirilmiş numunelerin çekme testi grafikleri; a) çekme-makaslama, b) % uzama.

3 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 numunenin çekme-makaslama mukavemeti 4.482 N ve % uzaması 8,93 olarak ölçülmüştür. Diğer parametreler sabit elektrod kuvveti artırıldığında; 6 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 4.626 N ve % uzaması 9,94 olarak belirlenmiştir.

6 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 40 çevrim kaynak süresinde birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 numunenin çekme-makaslama mukavemeti 4.925 N ve % uzaması 10,42 olarak ölçülmüştür. Diğer parametreler sabit kaynak akımı artırıldığında; 6 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 40 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 5.130 N ve % uzaması 11,93 olarak ölçülürken, 6 kN elektrod kuvveti, 7 kA kaynak akımı ve 40 çevrim

kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 5.967 N ve % uzaması 12,98 olarak ölçülürken, 6 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 40 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 7.605 N ve % uzaması ise 15,54 olarak ölçülmüştür.

3 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak süresinde birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 numunenin çekme-makaslama mukavemeti 3.396 N ve % uzaması 6,79 olarak ölçülmüştür. Diğer parametreler sabit kaynak süresi artırıldığında; 3 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 4.482 N ve % uzaması 8,93 olarak ölçülürken, 6 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 30 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 4.652 N ve % uzaması 9,30

olarak ölçülürken, 6 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 40 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 5.066 N ve % uzaması 9,85 olarak ölçülürken, 6 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numunelerin çekme-makaslama mukavemeti 5.301 N ve % uzaması ise 10,60 olarak belirlenmiştir.

Şekil 4-5 genel olarak incelendiğinde, kaynak işlemlerinde kullanılan parametrelerin (elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi) artmasıyla birlikte çekme-makaslama mukavemeti ve % uzama değerlerinin de arttığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak ise elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi artmasıyla kaynak bölgesi ısı girdisinin arttığı buna bağlı olarak da çekirdek çapı artmasıyla birleştirmelerin çekme-makaslama mukavemetlerinin de arttığı belirlenmiştir.

Referans [8]'de nokta direnç kaynak yönteminde kaynak bölgesi ısı girdisinin $Q=I^2.R.t$ formülüyle hesaplandığı, bu formülde I 'nin iş parçasından geçen akımı, R 'nin toplam direnci ve t 'nin ise kaynak süresini ifade ettiğini bildirilmiştir. Ayrıca elektrod kuvvetinin artmasıyla, R toplam direncinin azalacağı, iş parçasından geçen akımın artacağı ve dolayısıyla ısı girdisinin de artacağı, sonuç olarak ise ısı girdisi artışıyla, kaynak çekirdeği çapının artacağı ve kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama mukavemetlerinin de artışına sebep olacağı rapor edilmiştir.

Hasanbaşıoğlu, IF 7114 çeliği ile AISI 304 ve AISI 316 L östenitik paslanmaz çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve kaynak akımı artışına bağlı olarak artan ısı girdisiyle, kaynak çekirdeği boyutları ve birleştirme arayüzey kesit kalınlığının arttığı, artan kaynak akımı ile birleştirme çekme-makaslama dayanımının da arttığını bildirmiştir [6]. Hasanbaşıoğlu ve Kaçar, IF 7114 ve AISI 316 L östenitik paslanmaz çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynak akımındaki artmaya paralel olarak çekirdek çapında artma oluştuğunu ve bu artışa bağlı olarak da birleştirmelerin çekme-makaslama dayanımında artış meydana geldiğini rapor etmişlerdir [9]. Vural ve Akkuş, galvanizli arayer atomsuz çelik levhalar ile östenitik paslanmaz çelik levhaları nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynak akımı

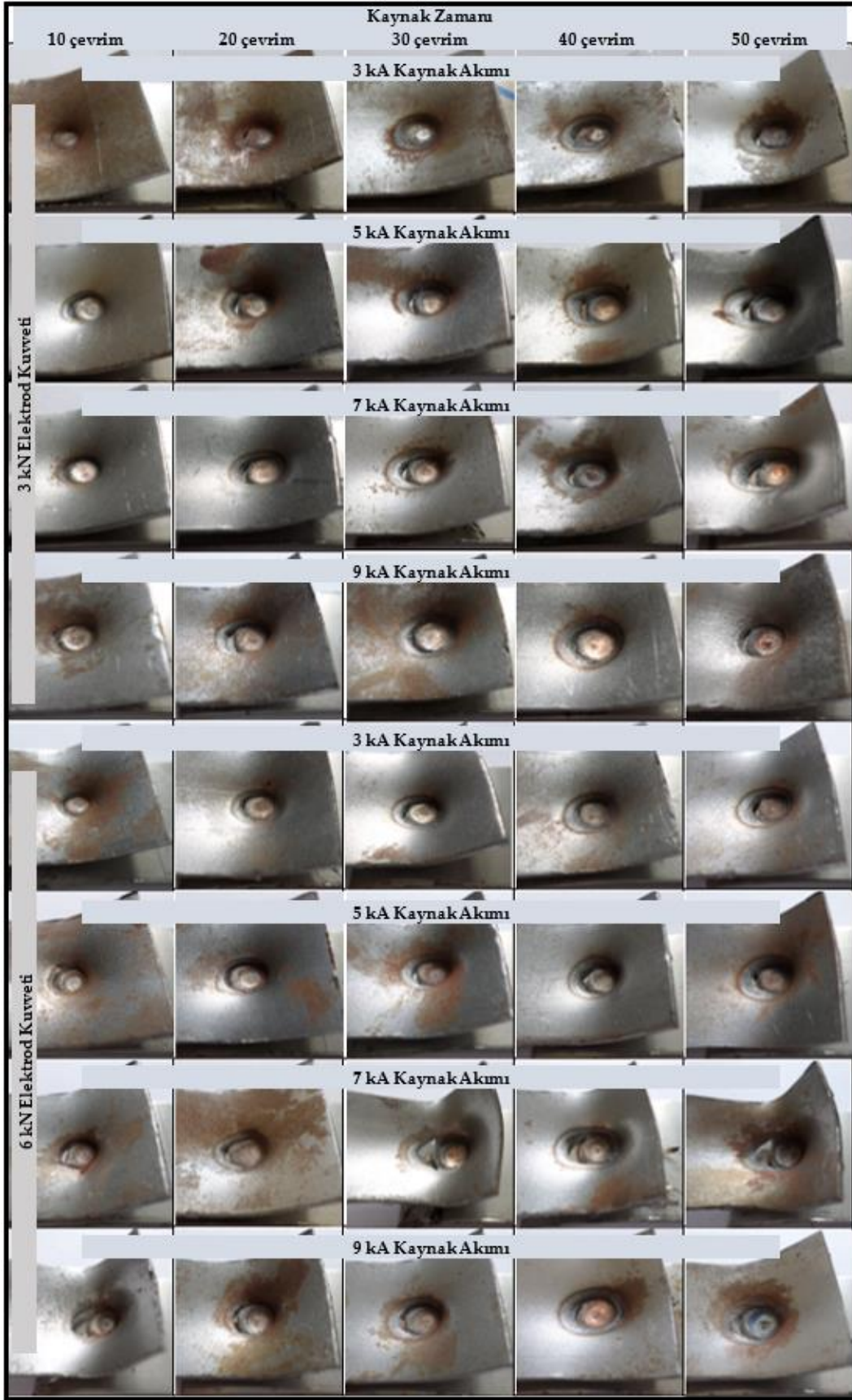
arttırıldığında kritik akım değerine kadar kaynak çekirdeği çapı arttığı, kaynak çekirdeği çapı arttıkça çekme-makaslama mukavemetinin de arttığını bildirilmişlerdir [10].

Nokta direnç kaynak yönteminin kullanıldığı diğer çalışmalarda, Baydemir (AISI 430 ferritik ve AISI 310) artan kaynak akımı ve kaynak zamanı ile kaynak çekirdeği çapı ve elektrod dalma derinliğinin arttığı, buna bağlı olarak da çekme-makaslama mukavemetinin arttığını [11], Hayat vd. (IF) kaynak akımı ve/veya kaynak süresi artması ile kaynak çekirdeği çapının arttığı ve böylece çekme-makaslama ve çekme-sıyırma dayanımlarının arttığını [12], Hayat vd. (7315 IF) kaynak süresinin ve/veya kaynak akımının artmasıyla birlikte kaynak çekirdek çapının arttığı buna bağlı olarak ise nokta kaynaklı numunelerin çekme-makaslama dayanımının da arttığını rapor etmişlerdir [13].

Şekil 6'da nokta direnç kaynak yöntemiyle farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilmiş AISI 316 L-IF 7114 çelik numunelerin çekme-makaslama testleri sonucu kaynak bölgesi kopma görüntüleri verilmiştir.

Şekil 6 incelendiğinde, nokta direnç kaynaklı AISI 316 L-IF 7114 çeliklere uygulanan çekme-makaslama testleri sonrasında tüm numunelerde kopma, daha düşük mukavemete sahip olan IF 7114 çelik tarafında meydana gelmiştir. Referans [14]'te AISI 316 L mukavemetinin 539 N/mm² ve IF 7114 mukavemetinin ise 270-350 N/mm² olduğu bildirilmiştir. Kullanılan çelik malzemelerin mukavemetleri incelendiğinde, kopmanın IF 7114 çelik malzemede meydana gelmesi beklenen bir durumdur. Ayrıca, birleştirmelerin tümünde kopmanın IF çeliği tarafında ve ITAB tane irileşmesi bölgesinden başladığı tespit edilmiştir.

Hasanbaşıoğlu [6] (IF 7114-AISI 304 ve IF 7114-AISI 316 L), Hasanbaşıoğlu ve Kaçar [9] (IF 7114 ve AISI 316 L) ve Hasanbaşıoğlu vd. [15] (AISI 304 ve IF 7114) arayer atomsuz IF çeliği ve östenitik paslanmaz çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve birleştirilen numunelere uygulanan çekme-makaslama testleri sonrasında ise IF çeliği ITAB'ında meydana gelen tane irileşmesinden dolayı en zayıf bölge olduğunu, tüm şartlar ve kaynak parametrelerinde kopmanın IF çeliği tarafında meydana geldiğini bildirmişlerdir.



Şekil 6: Çekme-makaslama testi sonucu kaynak bölgesi kopma görüntüleri.

Ek olarak, çekme-makaslama testi sonucu kopma tipleri (Şekil 6) incelenerek, farklı kaynak parametrelerinin kopma tipine etkisi araştırılmıştır.

Hayat vd. nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin çekme-makaslama testleri sonucunda; ayrılma, düğme ve yırtılma tipi olmak üzere üç farklı kopma tipinin olduğunu bildirmiştir [12]. Aslanlar vd. düğme tip kopmada, kaynak süresi artmasıyla ısı girdisinin arttığını, buna paralel olarak da kaynak çekirdeği çapının arttığını ve çekme-makaslama mukavemetinin de arttığını, bunun ise kullanılan kaynak parametrelerinin uygun olduğunu gösterdiğini ifade etmiştir [16]. Düğme tipi kopma, nokta direnç kaynaklı numunelerde istenilen bir kopma tipidir. Aslanlar vd. ayrılma tip kopmada, düşük kaynak akımı sebebi ile düşük ısı girdisi meydana geldiğini, buna paralel olarak da yetersiz kaynak çekirdeği çapı ve çekme-makaslama mukavemetinin de ana malzeme mukavemetinden daha az olduğunu, bunun ise kullanılan kaynak parametrelerinin yetersiz olduğunu gösterdiğini bildirilmişlerdir [17]. Aslanlar vd. yırtılma tip kopmada, aşırı kaynak akımı artışı sebebi ile aşırı ısı girdisi meydana geldiğini, buna paralel olarak da aşırı ergime ve fişırma oluştuğu ve çekme-makaslama mukavemetinde azalma olduğunu, bunun ise kullanılan kaynak parametrelerinin aşırı olduğunu gösterdiği tespit etmişlerdir [16]. Ayrılma ve yırtılma tipi kopmalar, nokta direnç kaynaklı numunelerde istenilmeyen kopma tipleridir.

Bu çalışmada, kaynak işlemlerinden önce kullanılacak parametreleri belirlemek için ön testler yapıldığı için nokta direnç kaynaklı numunelerin çekme-makaslama testleri sonucunda ayrılma ve yırtılma tipi kopmalar olmamış, bütün parametrelerde de düğme tipi kopma meydana gelmiştir. Çekme-makaslama testleri sonucunda, kaynak çekirdeği çekme-makaslama mukavemetinin, IF 7114 malzeme (AISI 316 L-IF 7114 numunelerde kopma tüm parametrelerde de IF çeliği tarafında meydana gelmiştir.) çekme-makaslama mukavemetinden daha yüksek olması sebebi ile düğme tipi kopma meydana gelmiştir. Nokta direnç kaynaklı numunelerde, düğme tipi kopma istenilen bir kopma tipi olmasından dolayı ön testlerle belirlenerek seçilen ve kullanılan kaynak parametrelerinin uygun olduğu söylenebilir.

3.2 Sertlik testi

Nokta direnç kaynak yöntemi ile farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 çelik malzemelerin (ana malzemeler, ITAB'ları ve kaynak çekirdeği) sertlik değişimlerini incelemek için kaynaklı numunelere sertlik testleri uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri Şekil 3'te gösterildiği gibi AISI 316 L ve IF 7114 çelik saclarda yatay ekseninde birbirine paralel olarak toplamda 15 noktada (Ana malzemeler 4, ITAB 6 ve kaynak çekirdeği 5 nokta) yapılmıştır.

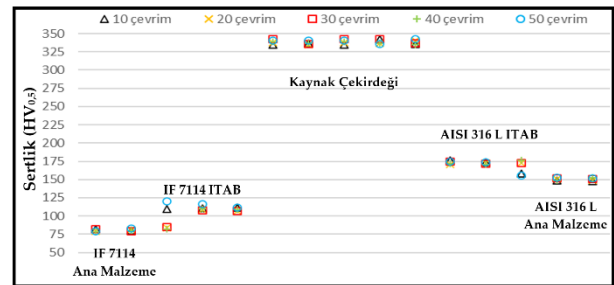
3 kN kaynak kuvvetinde gerçekleştirilen sertlik sonuçları sırasıyla Şekil 7-10 ve 6 kN kaynak kuvvetinde gerçekleştirilen sertlik sonuçları sırasıyla Şekil 11-14'te verilmiştir



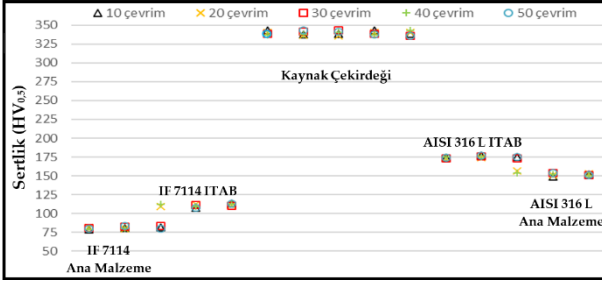
Şekil 7: 3 kN elektrod kuvveti ve 3 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.



Şekil 8: 3 kN elektrod kuvveti ve 5 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.



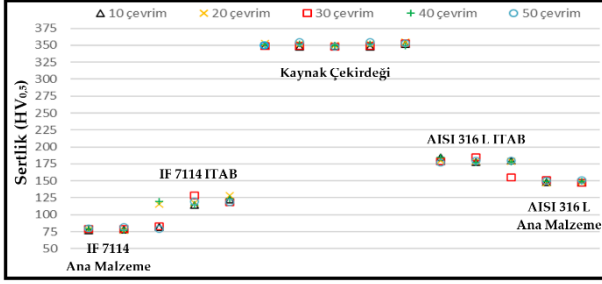
Şekil 9: 3 kN elektrod kuvveti ve 7 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.,



Şekil 10: 3 kN elektrod kuvveti ve 9 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.



Şekil 14: 6 kN elektrod kuvveti ve 9 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.



Şekil 11: 6 kN elektrod kuvveti ve 3 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.



Şekil 12: 6 kN elektrod kuvveti ve 5 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.



Şekil 13: 6 kN elektrod kuvveti ve 7 kA kaynak akımında birleştirilmiş numunelerin sertlik grafiği.

Şekil 7-14'teki sertlik grafikleri genel olarak değerlendirildiğinde; kaynak çekirdeğinden (kaynak metalinden) ana malzemelere doğru ilerledikçe (sol taraf IF 7114 ve sağ taraf AISI 316 L) sertlik değerlerinde azalma olduğu görülmektedir. En yüksek sertlik değerleri AISI 316 L-IF 7114 kaynak çekirdeğinden ölçülmüş onu sırasıyla ITAB'lar (AISI 316 L ITAB>IF 7114 ITAB) ve ana malzemeler (AISI 316 L ana malzeme>IF 7114 ana malzeme) izlemektedir.

Farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen numunelerin sertlik test sonuçları birbirleri ile kıyaslandığında ise, en yüksek sertlik değeri, belirgin olmamakla birlikte, 6 kN elektrod kuvveti ve 9 kA kaynak akımında birleştirilen numunelerin kaynak çekirdeğinden 359 ± 5 HV olarak ölçülmüştür. En düşük kaynak çekirdeği sertliği de 3 kN elektrod kuvveti ve 3 kA kaynak akımında birleştirilen numunelerde 333 ± 5 HV olarak ölçülmüştür. Ayrıca, kaynak işlemlerinde kullanılan ana malzemelerin sertlik değerleri ise AISI 316 L 151 ± 5 HV ve IF 7114 81 ± 5 HV olarak tespit edilmiştir.

Kaynak süresinin sertlik değerleri üzerindeki etkileri incelendiğinde, 6 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı 10, 20, 30, 40 ve 50 çevrim kaynak sürelerinde kaynak çekirdeği sertliği 339 ± 5 HV- 354 ± 5 HV aralığında ölçülmüştür. Kullanılan bütün parametrelerde de kaynak süresinin sertlik profiline (kaynak çekirdeği ve ITAB'lara) belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Kaynak akımının sertlik değerleri üzerindeki etkileri incelendiğinde ise, 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde 333 ± 5 HV- 337 ± 5 HV aralığında ölçülmüştür. Diğer parametreler sabit kaynak akımı artırıldığında; 3 kN elektrod kuvveti, 5 kA kaynak akımı ve 20

çevrim kaynak süresinde 335 ± 5 HV- 337 ± 5 HV olarak ölçülürken, 3 kN elektrod kuvveti, 7 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde 335 ± 5 HV- 340 ± 5 HV olarak ölçülürken, 3 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 20 çevrim kaynak süresinde 336 ± 5 HV- 340 ± 5 HV olarak ölçülmüştür. Kullanılan bütün parametrelerde de kaynak akımının sertlik profiline (kaynak çekirdeği ve ITAB'lara) belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Son olarak, elektrod kuvvetinin sertlik değerleri üzerindeki etkileri incelendiğinde ise, 3 kN elektrod kuvveti, 7 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak süresinde 335 ± 5 HV- 342 ± 5 HV aralığında ölçülmüştür. Diğer parametreler sabit elektrod kuvveti artırıldığında; 6 kN elektrod kuvveti, 7 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak süresinde 351 ± 5 HV- 358 ± 5 HV olarak ölçülmüştür. Kullanılan bütün parametrelerde de elektrod kuvvetinin artmasıyla sertlik profilinde (kaynak çekirdeği ve ITAB'lara) bir artış olduğu görülmüştür.

Çekme-makaslama kısmında da belirtildiği gibi elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresi artışına paralel olarak kaynak esnasında malzemelere uygulanan ısı girdisi de artmaktadır. Yüksek ısı girdisi ile kaynak bölgesinde ısı daha uzun süre kalmakta ve hızlı soğumayla birlikte sertlik artışına sebep olmaktadır. Fakat çalışmamızda kaynak akımı ve kaynak süresi parametrelerinin sertlik profiline belirgin bir etkisi görülmemiştir. Bunun sebebi olarak, AISI 316 L tarafında, östenitik paslanmaz çeliklerin ısı ile sertleştirilememesi olarak ön görülürken, IF 7114 tarafının ise kimyasal içeriğinde soğuma hızı ve sertleşebilirliğe etkisi olan C ve Mn miktarının düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ek olarak elektrod kuvveti artışı ile sertlik değerlerinde artış meydana gelmesini ise kaynak esnasında elektrodun oluşturduğu deformasyon sertleşmesiyle açıklanabilir.

Hasanbaşıoğlu AISI 304-IF 7114 ve AISI 316L-IF 7114 çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve birleştirmelerin sertlik profillerinin incelenmesi sonucunda, bütün parametre ve şartlarda, en yüksek sertlik değerinin kaynak çekirdek merkezinden elde edildiğini, birleştirmelerin ITAB kaba tane kısmında kaynak çekirdek merkezine yakın değerler elde edilirken

ITAB kısmı dönüşüme uğramış kısmında ise ana malzemeye yakın sertlik değerleri elde edildiği rapor edilmiştir. Ayrıca paslanmaz çelikler ve IF çeliği taraflarında, kaynak akımı artmasına rağmen ölçülen sertlik değerlerinin birbirine çok yakın olduğu bildirilmiştir. Ek olarak birleştirmelerin paslanmaz çelik tarafında kaynak akımı artışına bağlı olarak belirgin bir artış olmadığı rapor edilmiştir [6]. Hasanbaşıoğlu ve Kaçar IF 7114 ve AISI 316 L çelikleri nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve birleştirmelerin sertlik değerleri incelendiğinde, en yüksek sertlik değerlerinin genellikle kaynak çekirdeği merkezinden ölçüldüğünü bildirmişlerdir. Ayrıca IF çeliği kimyasal bileşimi ve östenitik paslanmaz çeliklerin ise ısı ile sertleşmemesi sebebiyle, artan kaynak akımına rağmen birleştirmenin iki tarafında da birbirine yakın sertlik değerleri ölçüldüğü rapor edilmiştir [9]. Vural ve Akkuş, galvanizli arayer atomsuz çelik levhalar ile östenitik paslanmaz çelik levhaları nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve sertlik testleri sonucunda, en büyük sertlik değerlerinin kaynak külçesi (çekirdeği) ortasından (350 HV) elde edildiği bildirilmiştir [10].

3.3 Mikroyapı çalışmaları

Nokta direnç kaynak yöntemiyle farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirilen AISI 316 L-IF 7114 sac malzemelerin orijinal mikroyapı görüntüleri Şekil 15 ve Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 15: AISI 316 L paslanmaz çelik ana malzeme mikroyapı görüntüsü.

Şekil 15'te görüldüğü gibi AISI 316 L paslanmaz çelik malzemenin yapısı östenit tanelerinden oluşmaktadır. IF 7114 çelik malzemenin yapısı ise (Şekil 16) kimyasal bileşimindeki çok düşük karbon miktarından dolayı eş eksenli ferrit tanelerinden meydana gelmektedir.



Şekil 16: IF 7114 çeliği ana malzeme mikroyapı görüntüsü.

Şekil 17-20'de örnek olarak bazı parametrelerde nokta direnç kaynak yöntemiyle birleştirilmiş numunelerin 40-60 adet mikroyapı görüntüsü birleştirilerek elde edilmiş ve kaynak metali (kaynak çekirdeği kesiti), ITAB (iri tane, ince tane) vb. kısımların büyütülerek oluşturulmuş detay mikroyapı görüntüleri verilmiştir.

Şekil 17-20'de verilen nokta direnç kaynaklı birleştirmelerin üst bölümü AISI 316 L, alt bölümü ise IF 7114 malzemeye aittir. Kaynak çekirdeği kesiti mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; birleştirmelerde kaynak çekirdeği kesitinin, uygulanan elektrod kuvveti etkisi, IF 7114 çeliği sertliğinin (81 ± 5 HV), AISI 316 L paslanmaz çelik sertliğinden (151 ± 5 HV) daha düşük olması ve IF çeliği tarafının paslanmaz çeliğe göre daha şekillendirilebilir olmasından dolayı IF 7114 çelik tarafına doğru çökmeye uğradığı görülmüştür. Ayrıca birleştirme arayüzeyi incelendiğinde, asimetric kaynak çekirdeği oluştuğu, kaynak çekirdeği kesitinin AISI 316 L tarafında IF 7114 tarafına oranla daha kalın olduğu görülmektedir. Bunun da paslanmaz çelik tarafının ısı iletim katsayısının daha düşük olmasından kaynaklandığı öngörülmektedir.

Numunelerin kaynak çekirdeği kesit mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresiyle kaynak çekirdeği kesitinin genişlediği görülmektedir. Artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresiyle, kaynak çekirdeği kesiti genişlemesinin sebebi, artan ısı girdisinin etkisi olarak düşünülmüştür. Ek olarak, AISI 316 L paslanmaz çelik ana malzemenin tamamen östenit tanelerinden oluştuğu, IF 7114 çelik ana malzemenin ise ferrit tanelerinden oluştuğu görülmüştür. Daha yüksek ısı iletim katsayısı sebebiyle (yaklaşık 3 katı), IF 7114 çelik

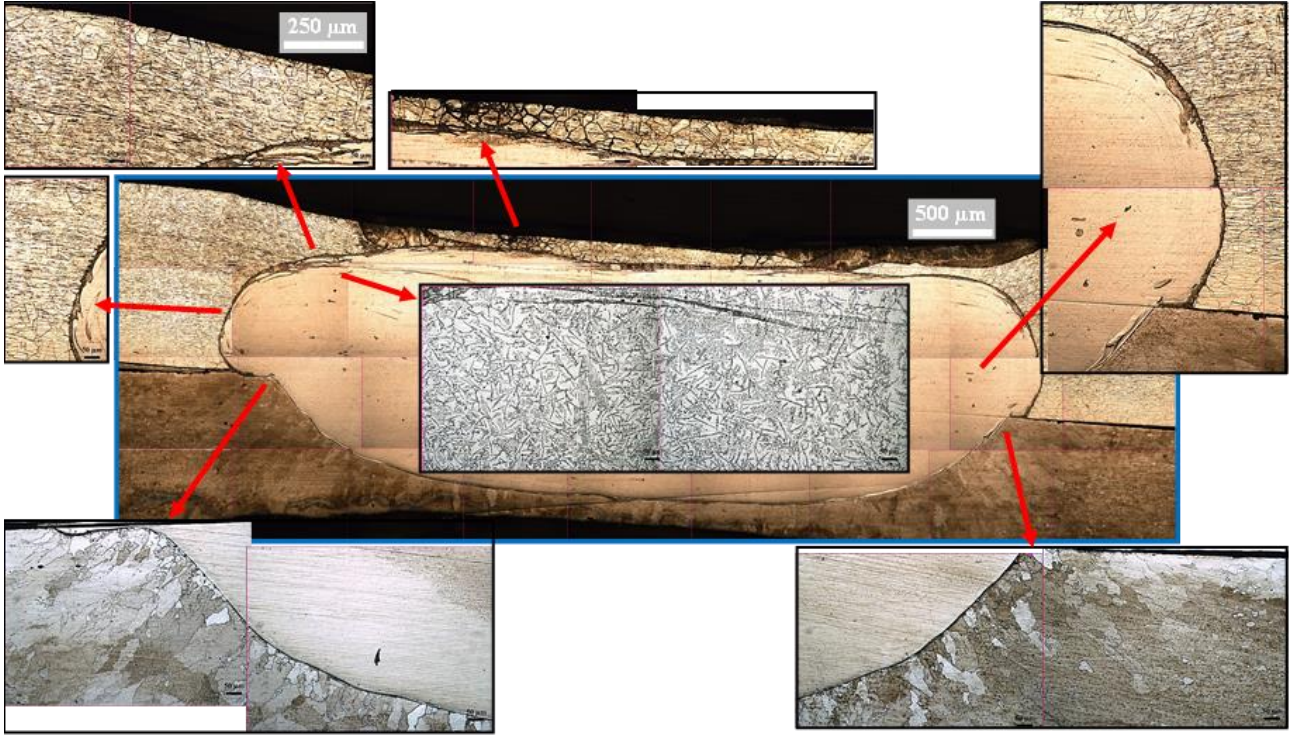
ITAB'ının AISI 316 L paslanmaz çelik ITAB'ına göre daha dar bir alanda oluştuğu tespit edilmiştir. Kaynak çekirdeği kesiti dışında görülen küçük taneler ise elektrod kuvveti ve ergime hızından dolayı oluşmaktadır. Ayrıca, artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresiyle benzer mikroyapıların oluştuğu, artan ısı girdisi nedeniyle tane boyutlarının arttığı fakat IF 7114 tarafında ise belirgin bir tane irileşmesi oluştuğu görülmektedir.

Şekil 21'de kaynak çekirdeği kesiti detay mikroyapı görüntüsü (kaynak metali ve ITAB) verilmiştir.

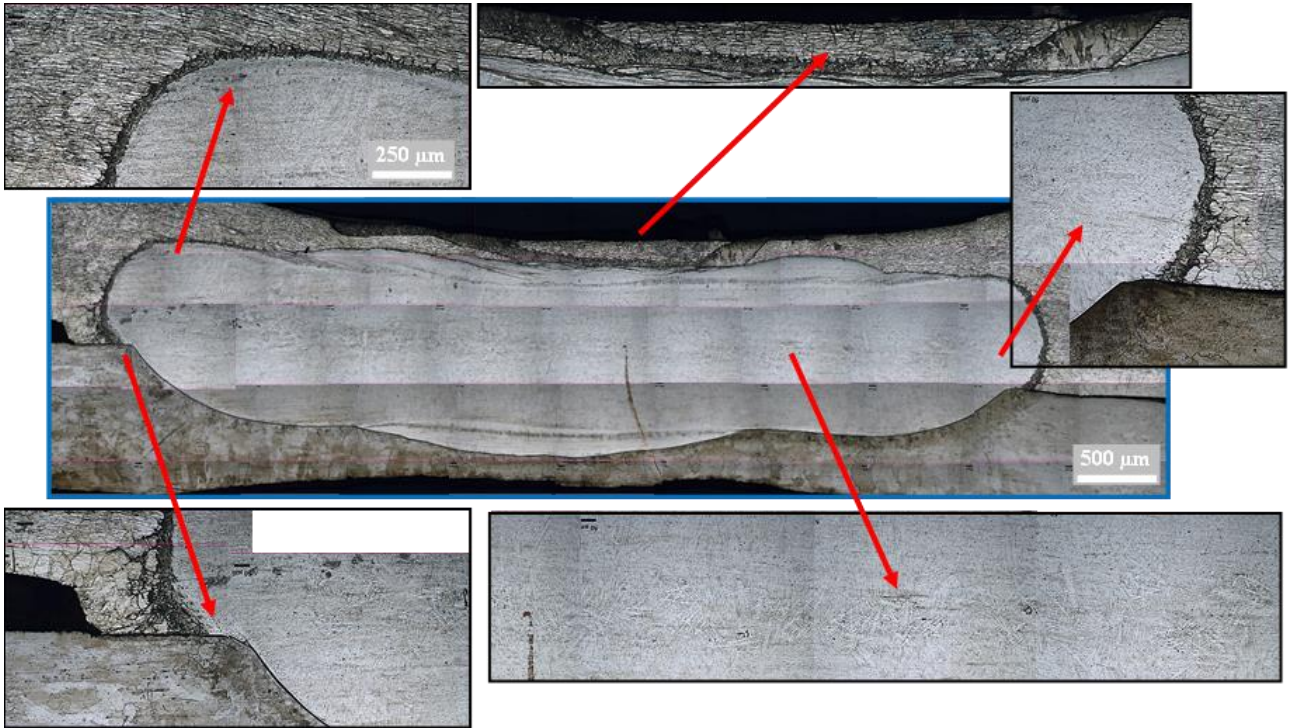
Şekil 21'deki kaynak çekirdeği kesiti detay mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, kaynak metalinin sütunsal tanelerden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca birleştirmelerin kaynak metalindeki tanelerin AISI 316 L ana malzemeye göre ısı iletim katsayısı daha yüksek olan IF 7114 çelik ana malzemeye doğru yönlendiği tespit edilmiştir.

Birleştirmelerin ITAB'ları incelendiğinde ise, AISI 316 L östenitik paslanmaz çelik tarafında aşırı tane irileşmesi görülmez iken, IF 7114 tarafında aşırı tane irileşmesi görülmektedir. Ayrıca ITAB iri taneli bölgede oluşan tanelerin de ana malzemeye doğru belirgin bir yönelme tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak ise IF çeliğinin yüksek ısı iletim katsayısından dolayı, kaynak sonrasında ısıyı çekerek soğumanın IF tarafına doğru olması ve yüksek ısıya daha uzun süre maruz kalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

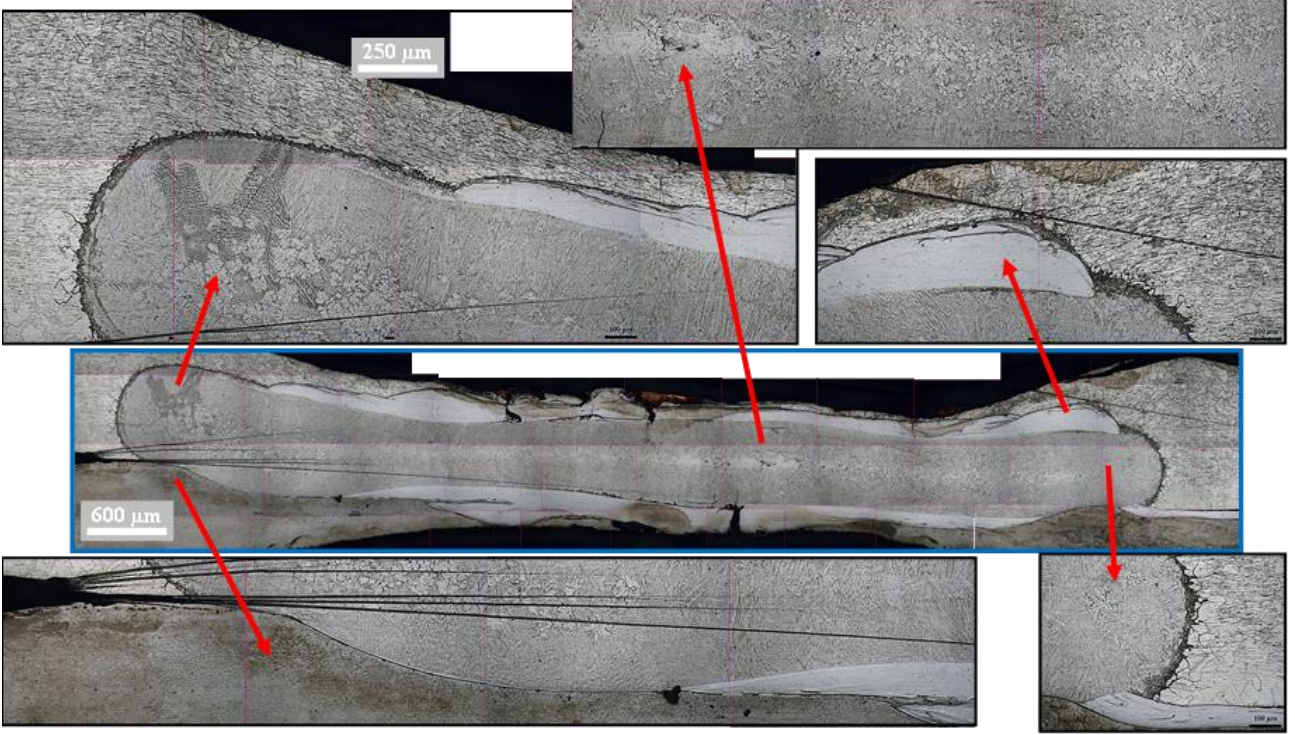
Hasanbaşoğlu IF 7114-AISI 316 L çelik sacları nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve mikroyapı çalışmaları sonucunda, birleştirmelerde IF çeliği tarafına doğru çökme olduğu, paslanmaz çelik tarafının daha kalın kaynak kesitine sahip olduğu, IF çeliği ITAB'ının paslanmaz çeliğe göre daha dar bir alanda oluştuğu ve IF çeliği ITAB'ında aşırı tane irileşmesi meydana geldiği bildirilmiştir [6]. Diğer çalışmalarında, Hasanbaşoğlu ve Kaçar IF 7114-AISI 316 L [9] ve Hasanbaşoğlu vd. IF 7114 IF-AISI 304 [15] çelik sacları nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirmiş ve mikroyapı çalışmaları sonucunda, IF çeliği ITAB'ı üzerinde aşırı tane büyümesi oluştuğunu rapor etmişlerdir.



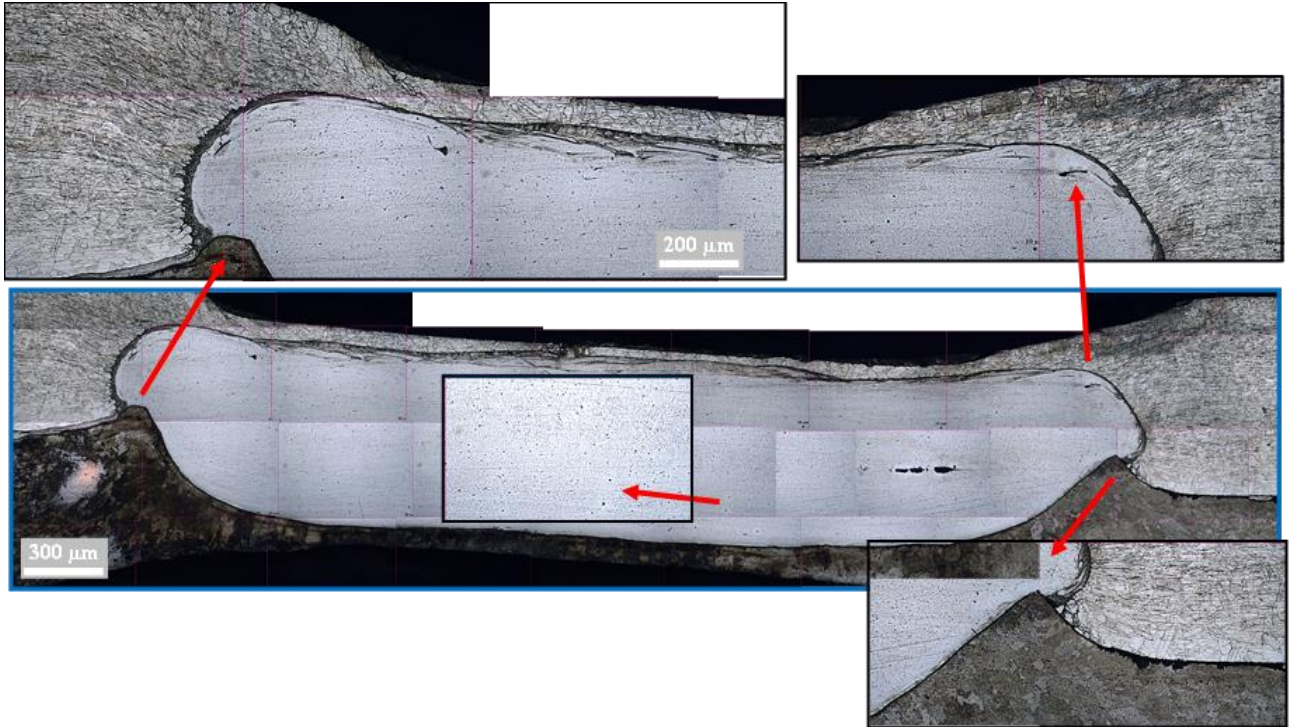
Şekil 17: 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 10 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numune detay mikroyapı görüntüsü



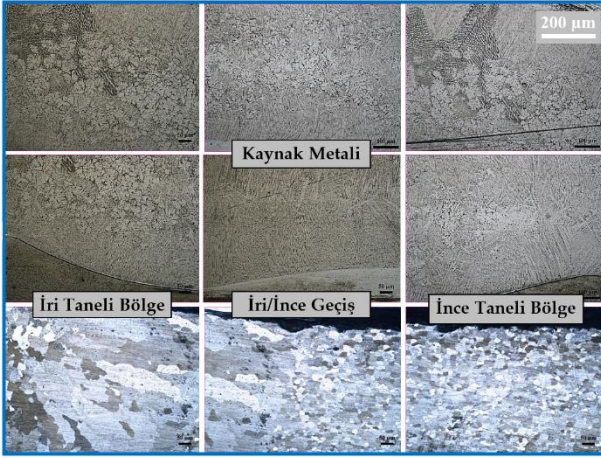
Şekil 18: 3 kN elektrod kuvveti, 3 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numune detay mikroyapı görüntüsü.



Şekil 19: 3 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numune detay mikroyapı görüntüsü.



Şekil 20: 6 kN elektrod kuvveti, 9 kA kaynak akımı ve 50 çevrim kaynak süresinde birleştirilen numune detay mikroyapı görüntüsü.



Şekil 21: Farklı parametrelerde birleştirilmiş numunelerin kaynak çekirdeği kesiti detay mikroyapı görüntüleri.

Nokta direnç kaynak yönteminin kullanıldığı benzer çalışmalarda; Lee vd., AISI 316 östenitik paslanmaz çelik ve IF (arayer atomsuz) çeliğini birleştirmiş ve mikroyapı çalışmaları sonucunda, kaynak çekirdeğinin asimetrik olduğu, kaynak çekirdeği yapısının östenit ve martenzitten oluştuğu bildirilmiştir [18]. Vural ve Akkuş, galvanizli arayer atomsuz çelik levhalar ile östenitik paslanmaz çelik levhaları birleştirmiş ve galvanizli çelik saclarda çinko tabakanın, asimetrik kaynak çekirdeği oluşumuna neden olduğunu ve elde edilen asimetrik kaynak çekirdeğinin kaynak akımı artışından olabileceği bildirilmiştir [10].

4. SONUÇ

AISI 316 L ve IF 7114 çeliklerin farklı parametreler kullanılarak nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirildiği ve kaynak parametrelerinin (3 ve 6 kN elektrod kuvveti, 3, 5, 7 ve 9 kA kaynak akımı ve 10, 20, 30, 40 ve 50 çevrim kaynak zamanı) kaynaklı birleştirmelere etkisinin belirlenmesi için yapılan bu çalışma sonucunda;

- Farklı kaynak parametreleri kullanılarak nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen numunelerin tümünde birleştirme sağlanmıştır.
- Artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresiyle birlikte çekme-makaslama mukavemeti artmıştır.
- Çekme-makaslama testleri sonrasında tüm numunelerde kopma, IF 7114 çeliği ITAB'ında meydana gelmiştir.

- Sertlik testleri sonucunda, en yüksek sertlik değeri AISI 316 L-IF 7114 kaynak çekirdeğinden ölçülmüş onu sırasıyla ITAB'lar (AISI 316 L ITAB>IF 7114 ITAB) ve ana malzemeler (AISI 316 L ana malzeme>IF 7114 ana malzeme) izlemektedir.
- Kaynak çekirdeği kesit mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresiyle kaynak çekirdeği kesitinin genişlediği tespit edilmiştir.
- Birleştirme arayüzeyi incelendiğinde, asimetrik kaynak çekirdeği kesiti olduğu, kaynak çekirdeği kesitinin AISI 316 L tarafında IF 7114 tarafına oranla daha kalın olduğu belirlenmiştir.
- Mikroyapı incelemeleri sonucunda, artan elektrod kuvveti, kaynak akımı ve kaynak süresiyle kaynak çekirdeğinin genişlediği ve artan ısı girdisi sebebiyle de IF 7114 ITAB'ında belirgin bir tane irileşmesi olduğu gözlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

- [1] A. Türkyılmazoğlu "Dubleks, martenzitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin kaynağı", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, s. 16-55, 2006.
- [2] A. Yürük "Elektrik nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilen farklı özellikteki paslanmaz çeliklerin kaynak bölgesinin karakterizasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, s. 1-109, 2015.
- [3] E. Gözütok, N. Kahraman, A. Durgutlu ve B. Gülenç "The influence of hydrogen addition to the shielding argon gas in TIG welding of AISI 304 materials, 1th International Conference On Welding Technologies, ICWET'09, 11-13 June Ankara/Turkey, pp. 778-786, 2009.
- [4] N. Çörten, A. Şener, Y. Kaya ve N. Kahraman "AISI 304 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin TIG kaynağıyla birleştirilebilirliğinin incelenmesi", 4. uluslararası kaynak teknolojileri konferansı ve sergisi (ICWET'16), 11-13 Mayıs 2016, Gaziantep-Türkiye, s. 1488-1496, 2016.
- [5] A. Bak "Arayer atomu içermeyen (IF) çeliklerde ve bu çeliklerin nokta direnç kaynaklı bağlantılarında deformasyon yaşanmasının mekanik özelliklere etkisi", Yüksek Lisans Tezi,

- Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, s. 1-107, 2010.
- [6] A. Hasanbaşoğlu "Direnc kaynak yöntemiyle birleştirilen IF çelikleri ile östenitik paslanmaz çeliklerin kaynak kabiliyetlerinin belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak, s. 1-36, 2005.
- [7] M. Ekici "IF çeliklerinin MIG-Brazing yöntemi ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, s. 1-204, 2016.
- [8] Y. Kaya "Titanium sacların nokta direnc kaynağı ile kaynaklanabilirliğinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, s. 1-112, 2010.
- [9] A. Hasanbaşoğlu and R. Kaçar "Resistance spot weldability of dissimilar materials (AISI 316 L-DIN EN 10130-99 Steels)", Mater. Des. 28 (6), pp. 1794- 1800, 2007.
- [10] Vural and A. Akkuş "On the resistance spot weldability of galvanized interstitial free steel sheets with austenitic stainless steel sheets", Journal of Mate. Proces. Tech. 153(1), pp. 1-6, 2004.
- [11] M. Baydemir "Östenitik AISI 310-ferritik AISI 430 paslanmaz çeliklerin elektrik direnc nokta kaynağı ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 1-159, 2011.
- [12] F. Hayat, B. Demir, M. Acarer and S. Aslanlar "Effect of weld time and weld current on the mechanical properties of resistance spot welded IF (DIN EN 10130-1999) steel", Kov. Mater. 47 (1), pp. 11-17, 2009.
- [13] F. Hayat, B. Demir, M. Acarer and S. Aslanlar "Adhesive weld bonding of interstitial free steel at spot welding for automotive application", Kov. Mater. 48, pp. 137-143, 2010.
- [14] K. Kaya "Östenitik paslanmaz çelik ve if çeliğinin nokta direnc kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, s. 1-87, 2022.
- [15] A. Hasanbaşoğlu, R. Kaçar, S. Gündüz ve B. Gülenç "Akım şiddetinin AISI 304 - IF 7114 direnc kaynaklı birleştirmeleri özelliklerine etkisi", Kaynak Teknolojisi V. Ulusal Kongresi, Kocaeli, s. 45-52, 2005.
- [16] S. Aslanlar, A. Uğur, U. Özaraç and E. İlhan "Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding", Mater. Des. 29, pp. 1427-1431, 2008.
- [17] S. Aslanlar, A. Uğur, U. Özaraç, E. İlhan and Z. Demir "Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding", Mater. Des. 28, pp. 2-7, 2007.
- [18] J. B. Lee, D. G. Nam, N. H. Kang, Y. D. Kim, W. T. Oh and Y. D. Park "Resistance Spot Welding of Dissimilar Materials of Austenitic Stainless Steels and IF (Interstitial Free) Steels", Korean J. Mater. Res. 19(7), pp. 574-580, 2009.