



Investigation of microstructure and mechanical properties of dissimilar electrical resistance spot welded TBF/DP600 steel sheets

Hakan Aydın^{1*}, İmren Öztürk Yılmaz², Abdullah Yasin Bilici²

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bursa Uludag University, 16059, Bursa, Turkey

²Beycelik Gestamp Inc., BTSO Organized Industrial Zone, 16215, Bursa, Turkey

Highlights:

- TBF and DP600 steel sheets used in the automotive industry
- Dissimilar electrical resistance spot welding
- Effect of welding parameters on weld properties

Keywords:

- TBF steel
- DP600 steel
- Electrical resistance spot welding
- Welding parameters
- Microstructure
- Mechanical properties

Article Info:

Research Article
Received: 18.10.2020
Accepted: 30.07.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.808950

Acknowledgement:

The authors are grateful to Beycelik Gestamp Inc. for financially supporting to this R&D project.

Correspondence:

Author: Hakan Aydın
e-mail:
hakanay@uludag.edu.tr
phone: +90 224 294 0652

Graphical/Tabular Abstract

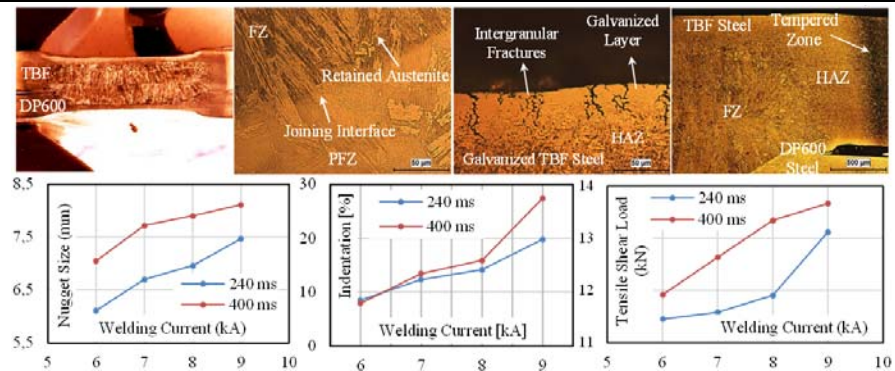


Figure A. Microstructure and weld properties of dissimilar resistance spot welded TBF/DP600 steel sheets.

Purpose: The present study aims to investigate the effect of welding parameters on the microstructure and mechanical properties of dissimilar electrical resistance spot welded TBF/DP600 steel sheets.

Theory and Methods:

TBF and DP600 steels with a thickness of 1.2 mm were spot-welded with a digitally controlled welding machine using a copper alloy electrode of 6.0 mm diameter. TBF steel was welded both with and without galvanized. Welding currents of 6 kA, 7 kA, 8 kA, 9 kA, and welding times of 250 ms and 400 ms were used. The nugget diameter of the spot-welded samples was determined by image processing technique. The indentation depths at the electrode pressure points of the samples were measured by ultrasonic technique. Microhardness measurements and tensile shear tests were performed to determine the mechanical properties of the spot welds. Optical microscope was used for microstructural characterization.

Results:

TBF and DP600 steels did not mix completely in fusion zone. Increasing the welding current and time increased the mixing ratio in fusion zone, the nugget size, indentation depth and load bearing capacity, and expanded the HAZ. TBF steel was more affected by the weld thermal cycle. Liquid metal embrittlement microcracks initiating from the surface in the HAZ of galvanized TBF steels were observed in the high heat input, while corrosion started rapidly in the weld region of ungalvanized TBF steels. The highest hardness were observed in the HAZ on the TBF steel side. However, a significant softening occurred in the transition zone between the HAZ and base metal on the TBF steel side. The nugget size, indentation depth and load bearing capacity were found to be relatively higher in the galvanized TBF steel combination. Fractures are of the fusion zone button type with higher welding strength in high heat input, while fractures are of partial fusion zone button type with lower welding strength in low heat input. If TBF steel is galvanized, relatively higher weld strength was obtained in the welding parameters providing relatively lower heat input.

Conclusion:

The microstructure and mechanical properties of dissimilar electrical resistance spot welded TBF/DP600 steel sheets have changed significantly depending on the welding parameters. In dissimilar electrical resistance spot welded TBF/DP600 steel sheets having the same thickness, DP600 steel with lower strength has determined the welding strength. Electro-galvanized TBF steel sheets have the liquid metal embrittlement crack sensitivity during the welding process at high heat input.



Elektrik direnç punta kaynağı ile birleştirilen TBF/DP600 çeliklerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi

Hakan Aydın^{1*}, İmren Öztürk Yılmaz², Abdullah Yasin Bilici²

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa, Türkiye

²Beyçelik Gestamp A.Ş., BTSO Organize Sanayi Bölgesi, 16215, Bursa, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Otomotiv sanayinde kullanılan TBF ve DP600 çelik sacları
- Farklı malzemelerin elektrik direnç punta kaynağı
- Kaynak parametrelerinin kaynak özelliklerine etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 18.10.2020
Kabul: 30.07.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.808950

Anahtar Kelimeler:

TBF çeliği,
DP600 çeliği,
elektrik direnç punta kaynağı,
kaynak parametreleri,
mikroyapı,
mekanik özellikler

ÖZ

Çalışmada, punta kaynağıyla birleştirilen TBF ve DP600 çeliklerinde kaynak parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. TBF çeliği hem kaplamalı hem de kaplamasız olarak kaynak edilmiştir. Mikroyapı karakterizasyonunda optik mikroskoptan yararlanılırken, mekanik özelliklerin belirlenmesinde mikrosertlik ve çekme testleri kullanılmıştır. Numunelerdeki çökme miktarları ultrasonik teknik ile ölçülmüşken, çekirdek çapları görüntü işleme ile belirlenmiştir. EB mikroyapı görüntülerinden çeliklerin birbirine tamamen karışmadığı görülmüştür. Kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ITAB'ı genişletmiş, EB'deki karışma oranını, çekirdek çapını, çökme miktarını ve yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. TBF çeliği DP600 çeliğine kıyasla ısıdan daha fazla etkilenmiştir. Kaplamasız TBF çeliklerinin kaynak bölgesinde korozyon hızla başlarken, kaplamalı TBF çeliklerinin ITAB'ında ise yüksek ısı girdisinde SMK esaslı yüzeyden başlayan mikroçatlak oluşumları gözlenmiştir. En yüksek sertlik değerleri TBF tarafında ITAB'da gözlenmiştir. Ancak, TBF tarafında ITAB ve temel malzeme arasındaki geçiş bölgesinde önemli yumuşama meydana gelmiştir. Çekirdek çapı, çökme miktarı ve yük taşıma kapasitesi kaplamalı TBF grubunda nispeten daha yüksektir. TBF/DP600 çeliklerinin kaynaklı bağlantılarının kaynak mukavemetini DP600 çeliği belirlemiştir. Düşük ısı girdisinde kırılmalar daha düşük kaynak mukavemetine sahip KEBB tipinde iken yüksek ısı girdisinde kırılmalar daha yüksek kaynak mukavemetine sahip EBB tipindedir. TBF çeliğinin kaplamalı olması durumunda daha düşük ısı girdisi sağlayan kaynak parametrelerinde de nispeten yüksek kaynak mukavemeti elde edilmiştir.

Investigation of microstructure and mechanical properties of dissimilar electrical resistance spot welded TBF/DP600 steel sheets

H I G H L I G H T S

- TBF and DP600 steel sheets used in the automotive industry
- Dissimilar electrical resistance spot welding
- Effect of welding parameters on weld properties

Article Info

Research Article
Received: 18.10.2020
Accepted: 30.07.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.808950

Keywords:

TBF steel, DP600 steel,
electrical resistance spot
welding,
welding parameters,
microstructure,
mechanical properties

ABSTRACT

Effects of welding parameters on microstructure and mechanical properties of spot-welded TBF/DP600 sheets were investigated. TBF was welded with and without electro-galvanizing. Microhardness and tensile tests were carried out, and microstructure characterized by optical microscopy. Nugget size was determined by image processing, indentation was measured by ultrasonic technique. Steels were not completely mixed with each other in FZ. Increasing in welding current and time expanded HAZ and increased mixing-ratio in FZ, nugget size, indentation and load capacity. TBF was more affected by thermal cycle than DP600. LME-based microcracks in HAZ of galvanized TBF at high heat input were observed, while corrosion started rapidly in weld zone of ungalvanized TBF. Highest hardness was observed in HAZ on TBF side. However, significant softening occurred in transition zone between HAZ and base metal on TBF side. The nugget size, indentation and load capacity were higher in galvanized TBF group. In dissimilar spot-welded TBF/DP600 sheets, DP600 has determined weld strength. Fractures are of fusion zone button type with higher weld strength in high heat input, while fractures are of partial fusion zone button type with lower weld strength in low heat input. In galvanized TBF, higher weld strength was obtained in lower heat input.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *hakanay@uludag.edu.tr, imrenyilmaz@beycelikgestamp.com.tr, abdullahbilici@beycelikgestamp.com.tr / Tel: +90 224 294 0652

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, enerji verimliliğini arttırmak ve sera gazı salınımını azaltmak otomotiv sektörünün öncelikli araştırma konuları arasına girmiştir [1-3]. Buna bağlı olarak, araç ağırlığının azaltılması yakıt tüketimini azaltmada en öne çıkan Ar-Ge çalışmaları haline gelmiştir [4, 5]. Hafifletme sayesinde araç, harekete geçmek için daha az enerjiye ihtiyaç duyacak, bunun sonucu olarak CO₂ salınımı da azalacaktır [5-7].

Günümüzde, otomobillerde kullanılan metal malzemelerin önemli bir kısmını çelik saclar oluşturmaktadır. Çelik saclarla ilgili yapılacak en küçük bir iyileştirmenin bile etkisi büyük olmaktadır. Bu anlamda, otomotiv sektöründe daha hafif tasarımlara olanak sağlayacak yeni nesil yüksek mukavemetli çelik sacların kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir [8, 9]. Nitekim araç üreticileri araç ağırlığını azaltmaya yönelik 1000 MPa'nın üzerindeki çelik sacları, özellikle güvenliğin ön planda olduğu parçalarda tercih etmeye başlamışlardır. Bu kapsamda tercih edilen çeliklerden biri de 3. nesil geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS) sınıfında yer alan dönüşüm etkili plastisite (TRIP) katkılı beynitik ferrit (TBF) çelikleridir. TBF çeliği ilk defa Japon üretici Kobe Steel tarafından tanıtılmıştır [10]. TBF çelikleri hem yüksek mukavemet hem de yüksek derin çekilebilirlik (yüksek süneklik) kombinasyonunu bir arada bulundurmasıyla oldukça dikkat çekicidir. TBF çelikleri, kalıntı ostenit içeren beynitik ve/veya temperlenmiş martenzitik ana yapıya sahiptir [11-13]. İçerdiği kararlı kalıntı ostenit, bu çelik sınıfının anahtar bileşenidir. Bu çeliklerin yüksek mukavemetini ince taneli beynitik ve/veya temperlenmiş martenzitik yapı sağlarken, yüksek uzama oranları TRIP etkisini ortaya çıkaran kalıntı ostenitik inklüzyonlar sayesinde [14, 15].

Otomotiv sektöründe çelik sac kullanımının söz konusu olduğu yerlerde kaynaklı bir üretim düşünülemez. Otomotiv sanayinde kullanılan çelik sacların kaynağında en fazla kullanılan yöntem elektrik direnç punta kaynağıdır. Doruk vd. [16, 17] yaptıkları çalışmalarda günümüzde üretilen sedan araç gövdelerinde ortalama 4.000 ile 6.000 arasında punta kaynağı uygulandığını ve diğer kaynak yöntemlerine göre araç gövdesinin oluşturulmasında %85 oranında elektrik direnç punta kaynağı kullanıldığını

bildirmişlerdir. Kaynak kalitesinin istenen seviyede olabilmesi de ancak uygun kaynak parametrelerinin seçimiyle mümkün olabilmektedir. Otomotiv sanayinde araç gövdesinde aynı türdeki çelik sacların birleştirilmesinin yanı sıra farklı türdeki çelik sacların birleştirilmesi kaçınılmaz bir gerekliliktir [7]. Bu sebeple, yeni nesil çelik sacların hali hazırda otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılan çelik saclarla kaynak edilmesi kaçınılmazdır. Bu husus çerçevesinde, farklı mukavemete sahip farklı türdeki çelik sacların elektrik direnç punta kaynağı ile birleştirilmelerinde çeşitli kaynak problemleri ortaya çıkabilmektedir. Bu bağlamda, elektrik direnç punta kaynağı ile birleştirilmiş yeni nesil yüksek mukavemetli çelik sacların farklı çelik saclarla birleştirilmesine yönelik kaynak davranışlarının belirlenmesine ihtiyaç duyulacağı açıktır.

Bu çalışmada, yeni nesil kaplamasız ve kaplamalı TBF çelik sacları ile otomotiv sanayinde en yaygın kullanılan DP600 çelik sacı elektrik direnç punta kaynağı ile birleştirilecektir. Böylece, otomotiv sanayinde bu çeliklerin kaynak işlemleri sürecine katkı sağlanarak otomotiv sektörüne adaptasyonu hızlanmış olacaktır. Bu çalışma kapsamında, kaplamasız ve kaplamalı TBF çeliklerinin DP çelikleri ile elektrik direnç punta kaynağı ile birleştirilmelerinde kaynak parametrelerinden kaynak akımı ve kaynak zamanının kaynak bölgesi makro ve mikro yapısına, yük taşıma kapasitesine ve bunun yanı sıra çekirdek çapı ve çökme değerlerine etkileri detaylı bir şekilde incelenecektir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

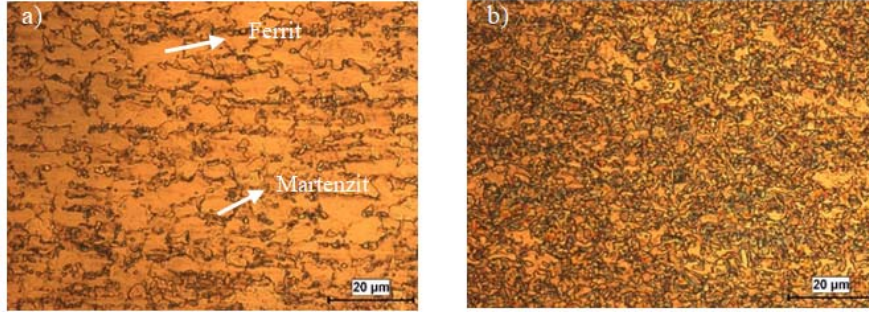
Bu çalışmada kullanılan 1,2 mm kalınlıklarındaki elektrogalvaniz kaplamalı ve kaplamasız TBF çelik sacı ile DP600 çelik sacı ticari olarak temin edilmiştir. Bu çelik sacların kimyasal kompozisyonları ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2'de verilmiştir. Bu çeliklere ait mikroyapılar Şekil 1'de görülebilir. DP600 çeliğinin mikroyapısı yumuşak ferrit (açık renkli bölge) ana yapısı içerisinde ferrit tane sınırlarında yer alan sert martenzit (koyu renkli bölge) adacıklarından oluşmaktadır (Şekil 1a). Ayrıca, ferrit tanelerinin hadde doğrultusunda uzamış ve yönlenmiş olduğu da Şekil 1a'dan görülebilmektedir. Diğer taraftan, TBF çeliğinin mikroyapısı ise beynit, martenzit ve lamellerarası kalıntı ostenit filmlerden oluşmaktadır [12-14] (Şekil 1b). Kaynak numuneleri, AWS (Amerikan Kaynak

Tablo 1. Çalışmada kullanılan TBF ve DP600 çelik saclarının kimyasal kompozisyonları (% Ağ.).
(Chemical composition of TBF and DP600 steel sheets used in the study (wt.%))

Çelik Sac	C	Mn	Si	P	Al	Nb
TBF	0,18±0,03	1,4±0,25	0,8±0,2	0,03±0,01	0,03±0,015	0,03±0,015
DP600	0,09±0,01	1,7±0,3	0,20±0,05	0,02±0,01	0,04±0,01	0,002±0,01

Tablo 2. Çalışmada kullanılan TBF ve DP600 çelik saclarının mekanik özellikleri.
(Mechanical properties of TBF and DP600 steel sheets used in the study)

Çelik Sac	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
TBF	755±20	1105±30	17±2
DP600	400±20	630±20	23±2

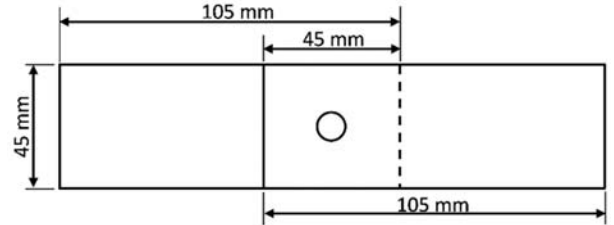


Şekil 1. Çalışmada kullanılan (a) DP600 ve (b) TBF çelik saclarının temel malzeme içyapıları
(Base metal microstructures of (a) DP600 and (b) TBF steel sheets used in this study)

Topluluğu) D8.9M standartlarına [18] uygun ölçülerde (105x45mm) hadde yönleri boyunca olacak şekilde lazer kesme makinasında kesme işlemleri yapılarak hazırlanmıştır (Şekil 2). Tüm kaynak işlemleri 240 kVA kapasiteye sahip hassas parametre kontrolüne imkân tanıyan robotik elektrik direnç punta kaynak makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Üretim şartlarına ve koşullarına uygun standart birleşimler gerçekleştirilmesi amacıyla prosese ve numune boyutlarına uygun bir kaynak fikstürü tasarlanarak üretilmiş ve kaynak işlemlerinde bu fikstür kullanılmıştır. Kaynaklı numuneler 6 mm çaplı bakır alaşımı elektrotlar kullanılarak üretilmiştir. Kaynak elektrotlarında meydana gelebilecek aşınmaların deney sonuçlarına etkisini ortadan kaldırmak için her 25 kaynak işlemi sonrasında kaynak elektrotu yenisi ile değiştirilmiştir. Çalışmada kaynak akımı olarak 6 kA - 7 kA - 8 kA - 9 kA, kaynak zamanı olarak 240 ms - 400 ms kullanılmıştır. Elektrot kuvveti 2,25 kN değerinde sabit tutulmuştur. Bu kaynak parametreleri kullanılarak TBF çeliğinin kaplamalı ve kaplamasız olma durumuna göre tüm kombinasyonların kaynaklı bağlantıları oluşturulmuştur.

Kaynak işlemlerinden sonra, kaynaklı numuneler, makro ve mikro yapı incelemeleri için kaynak merkezi boyunca enine kesit alınacak şekilde metalografik kesme cihazı ile hassas bir şekilde kesilmiştir. Sonrasında, enine kaynak kesitleri bakalite alınıp, numuneler 0,3 µm'ye kadar parlatma işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Son olarak, bu metalografik numuneler %4 Nital solüsyonu (4 ml HNO₃ + 96 ml etil alkol) ile dağlanmıştır. Optik mikroskop görüntüleri polarize ışık altında Clemex görüntü analiz sistemine sahip Nikon DIC mikroskobu ile alınmıştır. Kaynaklı numunelerin elektrot baskı noktalarındaki çökme miktarları elektrik direnç punta kaynak prosesine özel ultrasonik test cihazı ile ölçülmüştür. Kaynaklı numunelerin çekirdek çapları ise görüntü işleme ile hassas bir şekilde belirlenmiştir. Öncelikle çalışma kapsamında üretilen tüm punta kaynakları yüksek çözünürlüklü olarak fotoğraflanmıştır. Sonrasında bu fotoğraflar optik mikroskoba aktarılmıştır. Fotoğraflardaki punta bölgelerinin farklı bölgelerindeki kontrast farklılıkları 0-250 frame arasında skalaya bölünerek analiz edilip punta çekirdeklerinin sınırları belirlenmiştir. Kontrast farklılıkları ile belirlenen çekirdek sınırları optik mikroskop NIS Elements-D programı kullanılarak çekirdek çapı ölçümleri tamamlanmıştır. Kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için numuneler mikrosertlik ve

çekme testlerine tabi tutulmuşlardır. Kaynak bölgesi içerisinde yer alan farklı karakteristiğe sahip kaynak zonlarının sertlikleri DUROLINE-M mikrosertlik cihazı ile 100 g yük altında 10 s süre ile seçilen metalografik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir kaynak zonuna ait sertlik değeri 10 sertlik ölçümünün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Diğer taraftan, kaynaklı numunelerin yük taşıma kapasitelerini belirlemek amacıyla numunelere AWS D8.9M standartlarına uygun olarak çekme testleri uygulanmıştır [18]. Çekme testleri oda sıcaklığında ve 5 mm/dk çekme hızı ile bilgisayarlı ZWICK çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Herbir parametre grubu için en az 3 deney numunesine çekme testleri uygulanarak ortalama kopma yükleri tespit edilmiştir.



Şekil 2. Kaynak numunesi [18] (Welded sample)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

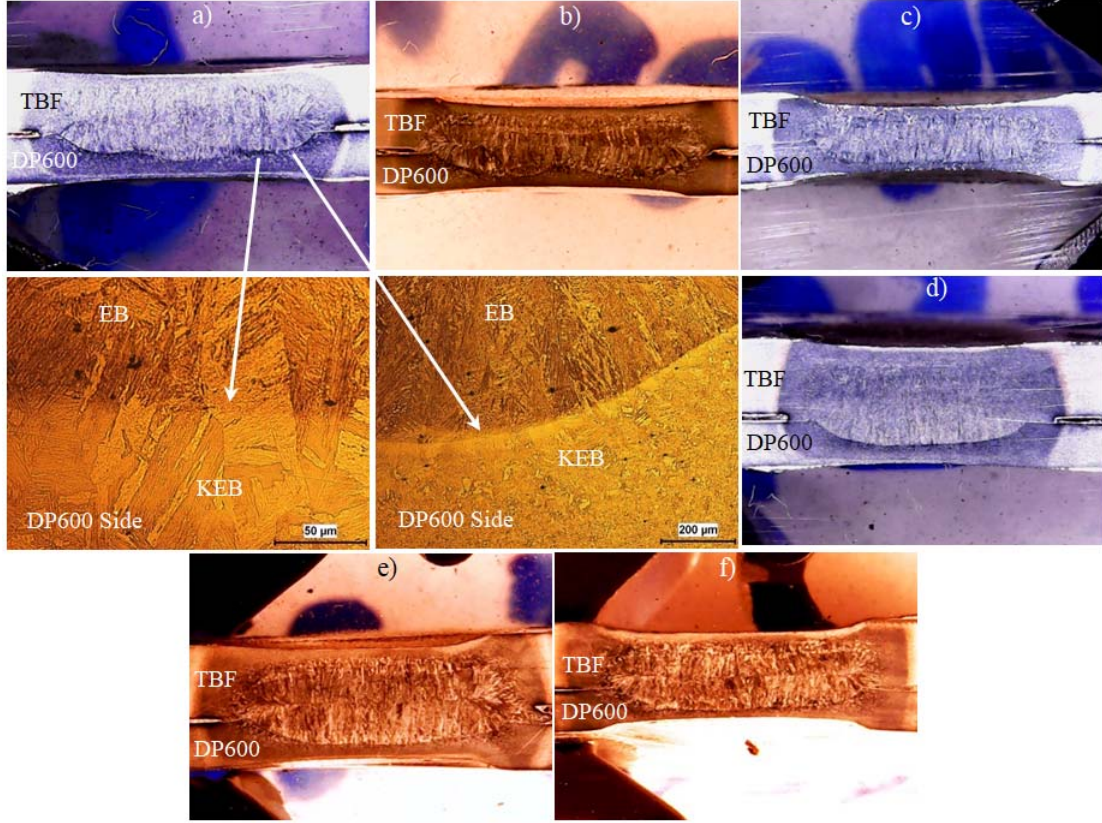
Isı girdisi en düşük, en yüksek ve orta düzeyde olacak şekilde seçilen kaynaklı birleştirmeler makro düzeyde incelendiğinde herhangi bir kaynak hatası (gözenek, çatlak vs.) ile karşılaşılmaştır (Şekil 3). TBF çeliğinin kaplamasız ve kaplamalı kombinasyonlarının makro görüntülerinde önemli bir farklılık göze çarpmamıştır. Numunelerin makro görüntülerinde her iki sacın birleşim bölgelerinde makro hata oluşumu izlenimi söz konusu olsa da yüksek büyütmeyle çıktığında bu bölgelerde herhangi bir hatanın olmadığı net olarak görülmektedir (Şekil 3a). Bu hata izlenimi makro fotoğraf çekimindeki ışık ayarı ile ilgilidir. Farklı kompozisyondaki her iki metalin birleşim bölgesinin belirgin bir şekilde ortaya çıkması oldukça dikkat çekicidir. Her iki sacın birleşim bölgesi detayına inildiğinde, her iki metalin birbirine karıştığı erime bölgesi (EB) ve DP600 çeliği tarafında karışmanın tam anlamıyla gerçekleşmediği kısmi erime bölgesi (KEB) olduğu

görülmektedir. Kaynak bölgesindeki oldukça hızlı soğuma koşulları yeterli difüzyon zamanı olmamasından dolayı KEB'in ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Ancak, kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ile (ısı girdisi artışı ile) soğuma hızının nispeten yavaşlaması mertebesinde her iki metalin birbirine karışma oranının arttığı (EB'in genişlediği ve buna bağlı olarak KEB'in daraldığı) ve buna ilave olarak ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) genişlediği görülmektedir (Şekil 3). Ancak, ısı girdisi artışı kaynak bölgesindeki elektrot baskı noktalarındaki çökme miktarını da arttırmıştır. Şekil 3'deki makro fotolardan EB karışım bölgesinde TBF çeliğinin daha etkin bir şekilde karışıma katıldığı anlaşılmaktadır. Bu da, her iki çeliğin kimyasal kompozisyonları itibariyle farklı elektriksel öz dirençlerine (veya elektriksel iletkenliğe) sahip olmalarından ileri gelmektedir. Çeliklerin elektriksel iletkenliği, alaşım tipi ve içeriğine göre büyük ölçüde değişir: Çeliklerdeki karbon ve alaşım elementi oranı artışı ile elektriksel iletkenlik önemli ölçüde azalır, diğer bir deyişle elektriksel öz dirençleri artar [19]. Ayrıca, çeliklerin elektriksel iletkenliği kristal yapı düzenine de bağlıdır. Bir çelikteki her faz, spesifik kristal yapısına bağlı olarak farklı bir elektriksel iletkenliğe sahiptir. Yani, elektriksel iletkenlik ostenit, ferrit, martenzit, beynit ve perlit mikro yapıları için farklıdır. Örneğin, içyapıda beynit veya martenzit fazlarının artışı elektrik iletkenliği düşürür [20]. Bu unsurlar göz önüne alındığında, TBF çeliğinin DP600 çeliğine nazaran daha yüksek karbon, alaşım elementi, beynit veya martenzit fazı içermesi TBF çeliğinin daha yüksek elektriksel öz dirence sahip olacağı anlamına gelmektedir. Buna bağlı olarak da, daha yüksek elektrik öz direncine sahip TBF çeliğinin karışım bölgesi EB'e katkısı daha fazla olmuştur. Numunelerin EB ile KEB arasındaki birleşme ara yüzeyleri Şekil 3 ve Şekil 4'de net olarak görülmektedir. Kaplamasız ve kaplamalı TBF kombinasyonlarının EB ve KEB'lerinde herhangi bir belirgin farklılık göze çarpmamaktadır (Şekil 4). EB ve KEB'de esasen sert ve gevrek martenzitik yapılar ortaya çıkmıştır. Ancak, karışımın tam anlamıyla gerçekleştiği EB'de nispeten yüksek karbon ve alaşım elementi içeriğine istinaden çok daha etkin martenzit (tetragonalitesi daha yüksek) oluşumu söz konusu olmuştur. Ayrıca, EB'deki segregasyon sonucunda karbon oranının bölgesel olarak yüksek olabileceği yerlerde lokal kalıntı ostenitler de ortaya çıkmaktadır (Şekil 4).

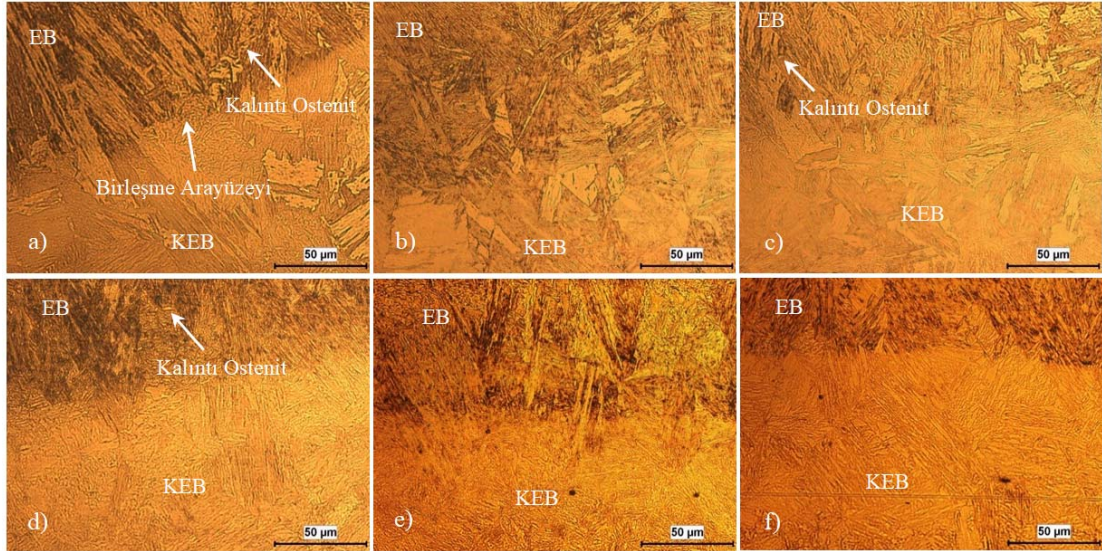
Atmosferik koşullarda bir süre bekletilen (yaklaşık 15 gün süre sonunda) punta kaynaklı numunelerin kaynak bölgesinin kaplamasız TBF çeliği tarafında korozyon oluşumlarının hızla başladığı gözlenmiştir (Şekil 5a). Yani, kaplamasız TBF çeliğinin kaynak sonrası kaynak bölgesinde atmosfer koşullarında korozyon hassasiyeti önemli ölçüde artmıştır. Diğer taraftan, kaplamalı TBF çeliği kullanıldığında kaynak bölgesinin TBF çeliği tarafında aynı atmosfer koşullarında ve süresinde herhangi bir korozyon izine rastlanmamıştır (Şekil 5b-Şekil 5d). Ancak, kaplamalı TBF çeliği kombinasyonunda ITAB'da yüzeyde kaplama tabakası içerisinden başlayan mikroçatlak oluşumları (40-50 µm uzunluğunda) oldukça dikkat çekicidir (Şekil 5c, Şekil 5d ve Şekil 6f). TBF çeliğinde kaplama tabakası elektrik

direnç punta kaynak prosesinde ITAB'da çatlak oluşum riskini önemli ölçüde arttırmıştır. Kaplamalı TBF çeliği kombinasyonunda düşük ısı girdisine sahip 6 kA - 240 ms kaynak parametrelerine sahip numunede herhangi bir çatlak oluşumuna rastlanmamışken, yüksek ısı girdisine sahip 7 kA - 400 ms ve 9 kA - 400 ms kaynak parametreleri ile kaynak edilen numunelerde ise mikroçatlak oluşumları meydana gelmiştir (Şekil 5b-Şekil 5d). Kaplama tabakası ve çeliğin yüksek mukavemetli olmasını sağlayan fazların mevcudiyeti (martenzitik ve beynitik fazlar) elektrik direnç punta kaynağında ısı girdisi artışı (kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ile) ile kaplama tabakasından başlayan mikroçatlak oluşum riskini arttırmaktadır. Yani, kaplamalı çelik sacın mukavemetinin artması (sert ve gevrek fazlara sahip olması) ile bu mikroçatlak oluşum riski çok daha etkin hale gelmektedir. Şekil 5'teki mikroçatlak oluşumları incelendiğinde, yüzeyde kaplama tabakasından başlayan mikroçatlakların genel itibariyle tane sınırları boyunca meydana geldiği görülmektedir. Bu husus, kaplama tabakasında yer alan çinko metalinden kaynaklanan tane sınırlarında meydana gelen "sıvı metal kırılmalılığı (SMK)" ile ilişkilidir. Çeşitli araştırmacılar da [21-23] yaptıkları çalışmalarda, sac yüzeyi üzerindeki elektrogalvanize çinko kaplamanın ve kaynak esnasındaki yüksek ısı girdisinin SMK'ya sebep olabileceğini buna bağlı olarak da yüzeyden başlayan çatlakların ortaya çıkabileceğini bildirmişlerdir. SMK, kaynak esnasında düşük ergime sıcaklığına sahip çinko ve çinko ötektiklerinin sıvılaşarak ITAB'daki tane sınırlarına nüfuz etmesiyle ortaya çıkan kırılmalar olarak açıklanabilir. TBF çeliği içerisinde yer alan Mn, Si ve Al elementleri de çeliğin elektrik direncini önemli ölçüde artırıp kaynak esnasında daha yüksek ısı üretimine sebep olarak punta kaynağının kritik bölgelerinde SMK riskini arttırmaktadır. Bu nedenle, TBF çelikleri için SMK riski, düşük alaşımli çeliklere kıyasla çok daha yüksektir. Punta kaynağında esasen SMK için kritik bölge kaynak esnasında ergimenin meydana gelmediği ve mikroyapının tamamen ostenite dönüştüğü ITAB'dır. Mikroçatlaklara sebebiyet veren SMK da yüksek ısı girdisine sahip yüzeye yakın ITAB'daki ostenit tane sınırlarının tercihli (seçici) olarak ergimesinden kaynaklanır. Kaplamalı TBF çeliğinin elektrik direnç punta kaynağında çatlak oluşum riski bu çeliğin kaynağında diğer otomotiv saclarına nazaran daha hassas tedbirlere ihtiyaç duyulacağı açıktır: i) Isı girdisine bağlı olarak kaynak parametrelerinin optimizasyonu; ii) Elektrot baskı kuvvetinin hassas kontrolü; iii) Hassas elektrot eksen kontrolü (her iki elektrotun eş baskı oluşturabilmesi) gibi tedbirlerin alınması gerekebilir.

TBF tarafındaki ITAB bölgesinde kaplamasız ve kaplamalı TBF kaynak kombinasyonlarında anlamlı bir farklılık göze çarpmamaktadır (Şekil 6). Kaynaklı numunelerin ITAB'ları incelendiğinde, TBF çeliği tarafındaki ITAB'ın ısıdan çok daha fazla etkilendiği görülmektedir (Şekil 6, Şekil 7). Bu da, TBF çeliğinin DP600 çeliğine nazaran daha fazla beynitik ve martenzitik fazları içermesi ile ilgilidir. TBF tarafındaki ITAB'ı kabaca 3 bölgeye ayırmak mümkündür: 1) Kaba taneli ısı tesiri altındaki bölge (KTITAB), 2) İnce taneli ısı tesiri altındaki bölge (İTITAB) ve 3) Temperlenen



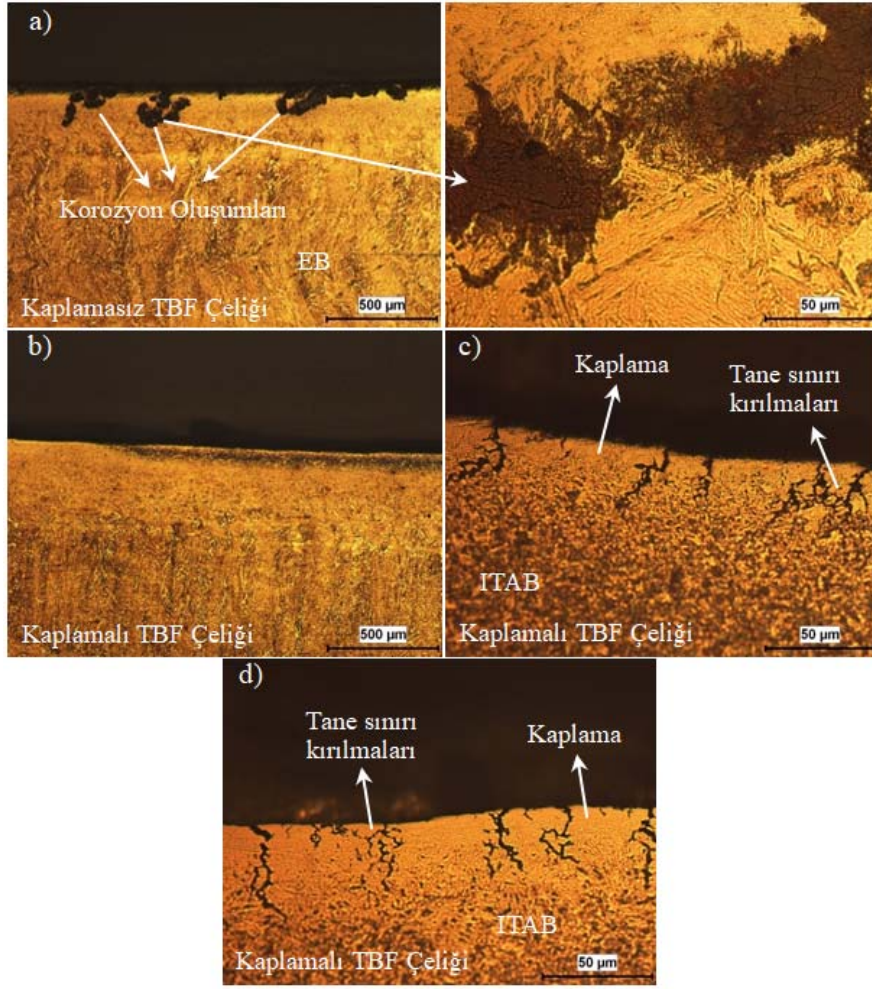
Şekil 3. Kaynaklı numunelerin makro ve mikroyapıları (a,b,c: Kaplamasız TBF; d,e,f: Kaplamalı TBF). a, d) 6 kA-240 ms; b, e) 7 kA-400 ms; c, f) 9 kA-400 ms. (EB: Erime Bölgesi; KEB: Kısmi Erime Bölgesi)
(Macro and microstructures of welded samples (a, b, c: Ungalvanized TBF; d, e, f: Galvanized TBF)) (EB: Fusion Zone; KEB: Partial Fusion Zone)



Şekil 4. Kaynaklı numunelerin erime bölgesi mikroyapıları (a,b,c: Kaplamasız TBF; d,e,f: Kaplamalı TBF). a, d) 6 kA-240 ms; b, e) 7 kA-400 ms; c, f) 9 kA-400 ms. (EB: Erime Bölgesi; KEB: Kısmi Erime Bölgesi)
(Fusion zone microstructures of welded samples (a, b, c: Ungalvanized TBF; d, e, f: Galvanized TBF)). (EB: Fusion Zone; KEB: Partial Fusion Zone)

bölge. EB yakınındaki KTITAB'ın maruz kaldığı sıcaklık A_3 (tamamen ostenit dönüşümünün gerçekleştiği sıcaklık) sıcaklığı üzerindedir. Bu sıcaklıkta bu bölgede tüm içyapı ostenite dönüştüğünden, kaynak sonrası soğuma esnasında

soğuma hızına bağlı olarak içyapı genel itibariyle beynitik ve martenzitik yapılara sahip olmuştur. Oluşan fazlar itibariyle bu bölge oldukça sert ve gevrek bir yapıdadır. Bu bölgedeki oldukça yüksek sıcaklık yeniden kristalleşmenin de teşviki

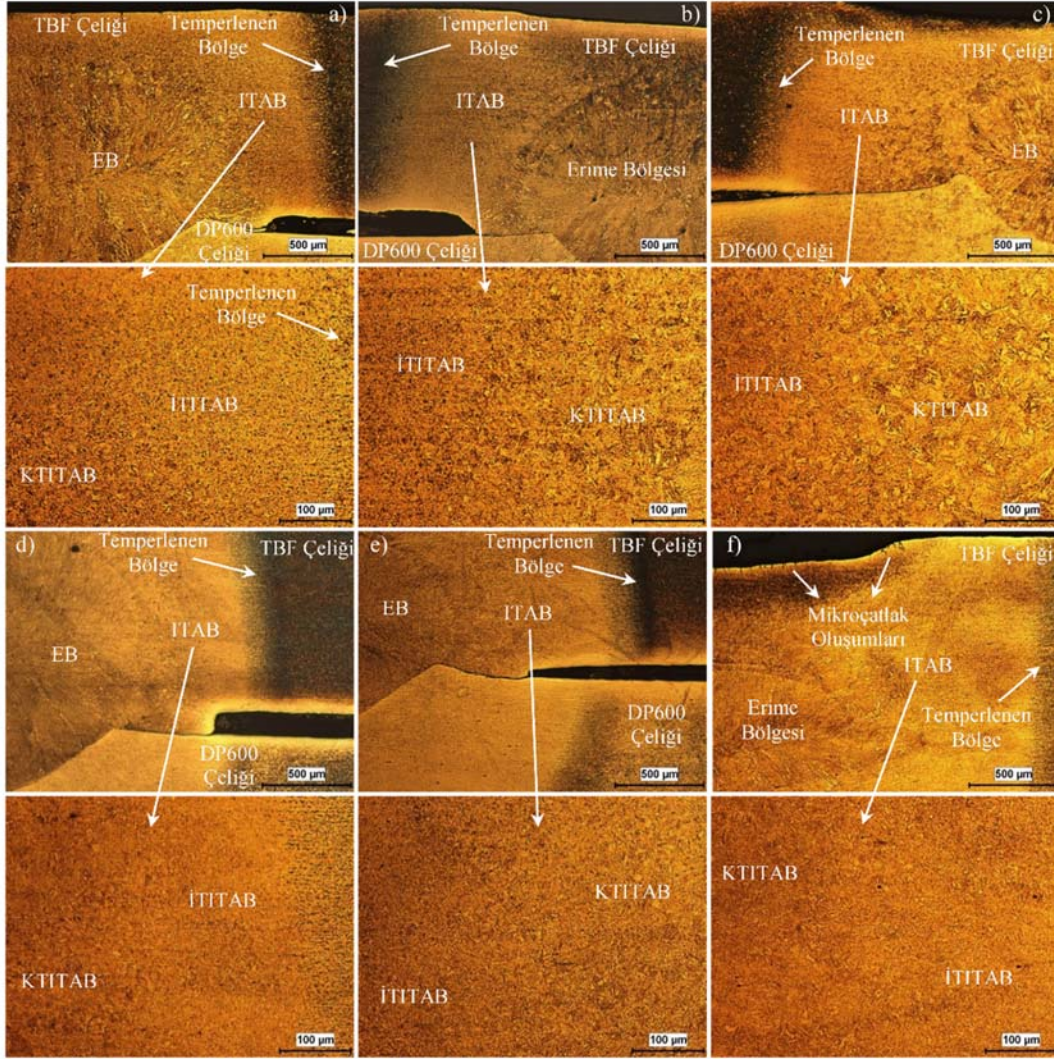


Şekil 5. Kaynaklı numunelerde korozyon ve mikroçatlak oluşumları. a) 9 kA-400ms (kaplamasız TBF çeliği); b) 6 kA-240ms (kaplamalı TBF çeliği); c) 7 kA-400ms (kaplamalı TBF çeliği); d) 9 kA-400ms (kaplamalı TBF çeliği); (Corrosion (a) and microcrack formations (b-d) in the welded samples)

ile ostenit tanelerinin irileşmesine sebep olduğundan soğuma sonrasındaki içyapı nispeten kaba taneli bir hal almıştır. ITAB içerisinde EB'den temel malzeme (TM) yönünde KTITAB'dan sonra İTITAB'ı karşımıza çıkarmaktadır. KTITAB tarafında bu bölgedeki sıcaklık A_3 'ün üzerinde iken, diğer tarafında (TM tarafında) sıcaklık A_1 sıcaklığı ile A_3 sıcaklığı arasındadır. Sıcaklığın A_3 'ün üzerinde olduğu bölgelerde içyapı ağırlıklı olarak yine beynitik ve martenzitik fazlardan oluşmaktadır. Hem ince taneli hem de sert fazlara sahip olan bu bölge kaynak bölgesi içerisinde en yüksek sertlik değerlerine sahip olacağı ön görülmektedir. Sıcaklığın A_1 ile A_3 arasında olduğu bölgelerde ise içyapıda beynitik ve martenzitik fazların yanısıra ferrit fazı da ortaya çıkmaktadır. Yeniden kristalleşmenin etkisi ile bu iki bölgede de taneler oldukça ince yapıdadır. Bu bölgede ferrit oluşumundan kaynaklı sertlik temel malzeme yönünde düşmeye başlayacağı aşıkardır. KTITAB ve İTITAB bölgelerindeki iç yapılar da ayrıca lokal olarak az miktarda kalıntı ostenitlerin de mevcudiyetini vurgulamak gerekir. ITAB'ın TM'ye geçiş kısmında ise TM'nin sadece temperlenmiş olduğu bir bölge bulunmaktadır. Bu bölgedeki

sıcaklık değerleri A_1 sıcaklığının altındadır. Nitekim bu bölgede TM içyapısı temperleneceğinden TBF tarafında en düşük sertlik değerleri bu bölge içerisinde yer alacaktır (yumuşama bölgesi). Bu bölgede sert ve gevrek martenzitik ve beynitik fazların etkileri nispeten ortadan kalkacaktır. Kaynak akımı ve kaynak zamanı artışına bağlı olarak kaynak esnasındaki ısı girdisi artışı ITAB'daki tane yapısını kabalaştırmıştır. Bu husus ısı girdisi artışı ile ostenit tanelerinin (prior austenite grains) irileşmesinden ileri gelmektedir. Ayrıca, kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ITAB genişliğini belirgin bir biçimde arttırmıştır (Şekil 6).

DP600 çeliği tarafındaki kaynak bölgesi incelendiğinde de, kaplamalı ve kaplamasız kombinasyonlar arasında belirgin bir farklılık görünmemektedir. DP600 çeliği tarafındaki kaynak bölgesinde de TBF çeliği tarafındaki benzer dönüşümler karşımıza çıkmaktadır (Şekil 7). Ancak, daha düşük sertliğe ve mukavemete sahip DP600 çeliği tarafında çeliğin kimyasal kompozisyonu itibarıyla sert fazların (martenzitik ve beynitik fazların) oluşma etkinliği de TBF tarafına göre daha düşük düzeyde kaldığı anlaşılmaktadır.

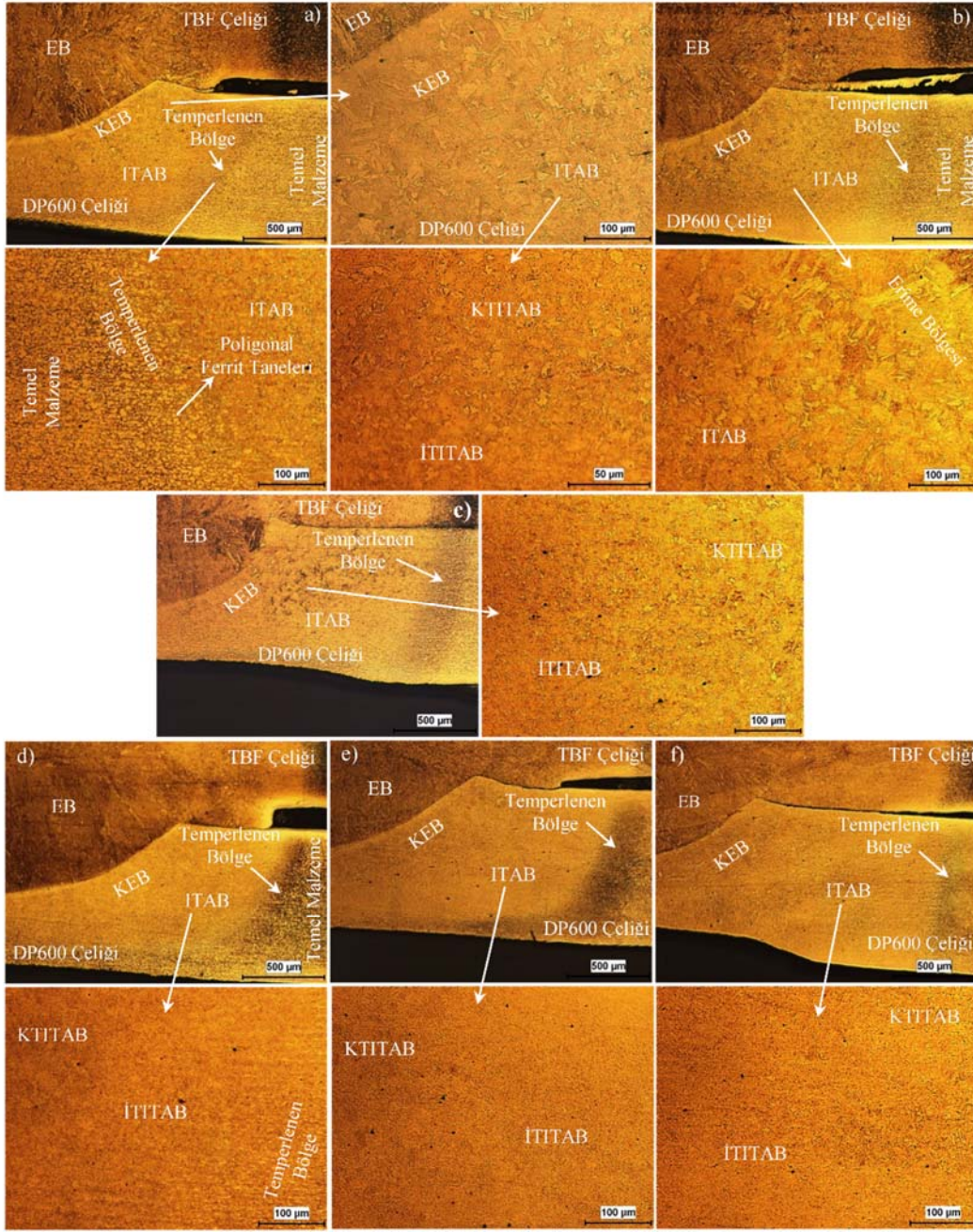


Şekil 6. Kaynaklı numunelerin TBF çeliği tarafındaki ITAB mikroyapıları (a,b,c: Kaplamasız TBF; d,e,f: Kaplamalı TBF). a, d) 6 kA-240 ms; b, e) 7 kA-400 ms; c, f) 9 kA-400 ms. (İTITAB: İnce Taneli Isı Tesiri Altındaki Bölge; KTITAB: Kaba Taneli Isı Tesiri Altındaki Bölge; EB: Erime Bölgesi) (HAZ microstructures in TBF steel side of the welded samples (a, b, c: Ungalvanized TBF; d, e, f: Galvanized TBF)) (İTITAB: Fine Grained Heat Affected Zone; KTITAB: Coarse Grained Heat Affected Zone; EB: Fusion Zone)

DP600 çeliği tarafını da TBF çeliği tarafındakine benzer şekilde İTAB bölgesini 3 bölgeye ayırabiliriz: 1) KTITAB, 2) İTITAB ve 3) Temperlenen bölge. EB yakınında KTITAB'da kaynak esnasındaki sıcaklık A_3 'ün üzerine çıkmıştır. Yüksek sıcaklıklarda yeniden kristalleşmeye maruz kalarak tane irileşmesinin gözleendiği bu bölgenin içyapısı genel itibariyle beynitik ve martenzitik fazlardan oluşmaktadır. Nispeten daha düşük sıcaklıklarda yeniden kristalleşmeye maruz kalan İTITAB'da ise tane yapısı oldukça incedir. Bu bölgede temel malzeme yönünde martenzitik ve beynitik fazlar azalma eğiliminde olup temel malzemeye yaklaştıkça yumuşak poligonol ferrit fazları da ortaya çıkmaktadır. İTAB'dan temel malzemeye geçiş bölgesinde ise temel malzeme içyapısı A_1 sıcaklığı altında genel itibariyle temperlenmiştir. Kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ısı girdisi artışına bağlı olarak kaynağın bu

tarafında da İTAB'ı ve temperlenen bölgeyi genişletmiştir (Şekil 7). Ayrıca, İTAB içerisinde oluşan martenzitik ve beynitik yapıların da ısı girdisi artışı ile kabalaştığı söylenebilir.

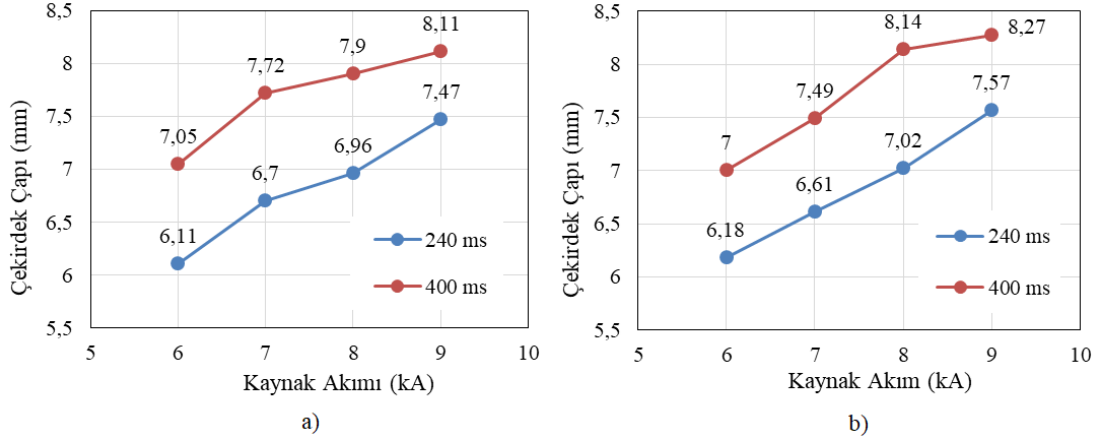
Elektrik direnç punta kaynağında TBF çeliğinin kaplamalı olması çekirdek çapını yüksek kaynak akımlarında nispeten bir miktar arttırmıştır. Her iki gruba ait kaynaklı numunelerin çekirdek çapları kaynak akımı artışı ile belirgin bir şekilde artmaktadır (Şekil 8). Kaynak akımı 6 kA'den 9 kA'ye artırılması ile 240 ms kaynak zamanında kaplamalı ve kaplamasız TBF gruplarında çekirdek çapı %22 civarında artarken, 400 ms kaynak zamanında ise çekirdek çapı kaplamasız grupta %15, kaplamalı grupta %18 artmıştır. Kaplamalı TBF grubundaki kaynaklı numunelerin çekirdek çaplarının yüksek kaynak akımlarında bir miktar daha büyük



Şekil 7. Kaynaklı numunelerin DP600 çeliği tarafındaki ITAB mikroyapıları (a,b,c: Kaplamasız TBF; d,e,f: Kaplamalı TBF). a, d) 6 kA-240 ms; b, e) 7 kA-400 ms; c, f) 9 kA-400 ms. (İTITAB: İnce Taneli Isı Tesiri Altındaki Bölge; KTITAB: Kaba Taneli Isı Tesiri Altındaki Bölge; EB: Erimel Bölgesi; KEB: Kısmi Erimel Bölgesi) (HAZ microstructures in TBF steel side of the welded samples (a, b, c: Ungalvanized TBF; d, e, f: Galvanized TBF)) (İTITAB: Fine Grained Heat Affected Zone; KTITAB: Coarse Grained Heat Affected Zone; EB: Fusion Zone; KEB: Partial Fusion Zone)

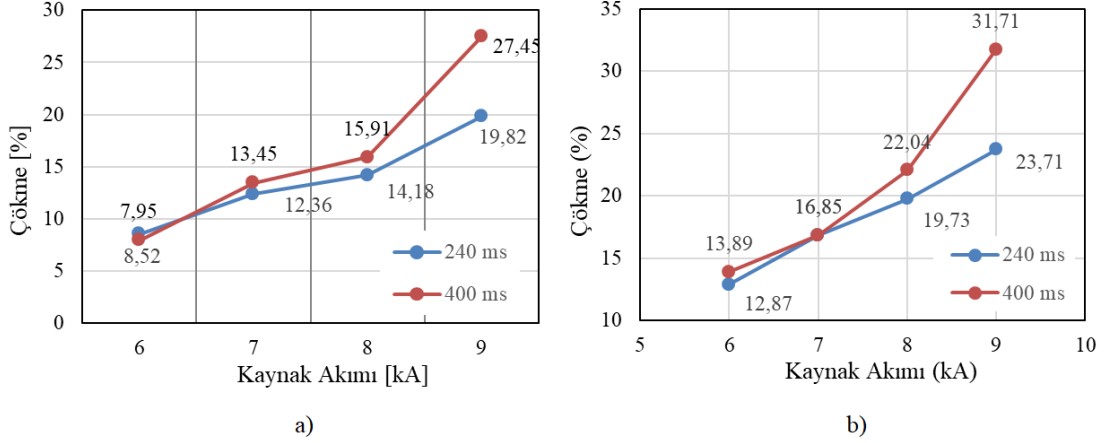
olması ve 400 ms kaynak zamanında kaynak akımı artışı ile kaplamalı gruptaki çekirdek artışındaki kısmi artış kaplama tabakasının kaynak esnasındaki toplam elektrik direncinin artışına (dolayısıyla ısı girdisi artışına) katkı sağlaması ile ilişkilendirilebilir. Her iki grupta da kaynak zamanı aynı kaynak akımında çekirdek çapını daha yüksek değerlere öteleyen, yüksek kaynak zamanında kaynak akımı artışı ile çekirdek çapı artışı azalmıştır. Kaynak akımının daha da

arttırılması ile çekirdek çapının bir miktar daha artacağı ön görülebilir. Ancak, bu artış kullanılan elektrot çapı itibarıyla de sınırlı olacağı açıktır. Her iki gruptaki kaynaklı numunelerin çökme değerlerine bakıldığında, kaynak akımı ile çökme miktarlarının arttığı görülmektedir (Şekil 9). Kaynak zamanı artan kaynak akımlarında çökme değerlerini daha üst değerlere ötelemiştir. Her iki grupta yüksek kaynak zamanında (400 ms) ve yüksek kaynak akımında (9 kA) ısı



Şekil 8. Kaplamasız (a) ve kaplamalı (b) TBF kombinasyonundaki kaynaklı numunelerin çekirdek çaplarının kaynak akımı ve kaynak zamanı ile değişimi

(Change of the nugget diameters of welded samples in ungalvanized (a) and galvanized (b) TBF combination with welding current and welding time)



Şekil 9. Kaplamasız (a) ve kaplamalı (b) TBF kombinasyonundaki kaynaklı numunelerin çökme miktarlarının kaynak akımı ve kaynak zamanı ile değişimi

(Change of the indentations of welded samples in ungalvanized (a) ve galvanized (b) TBF combination with welding current and welding time)

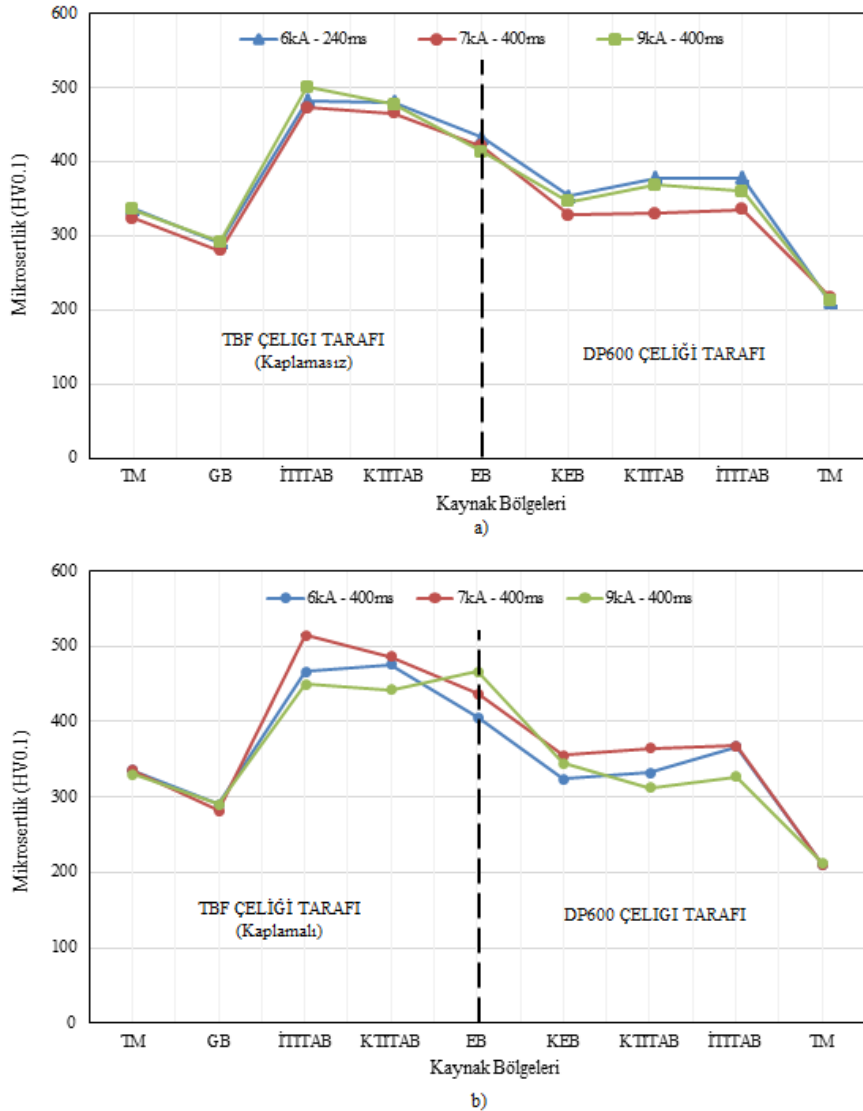
girdisinin önemli ölçüde artması ile çökme miktarındaki artış hızlanmıştır. Diğer taraftan, her iki grupta da düşük kaynak akımlarında kaynak zamanının çökme üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır. Kaplamasız TBF grubundaki kaynaklı numunelerde kaynak akımı 6 kA'den 9 kA'ye artırılması ile 240 ms kaynak zamanında çökme miktarı 2,5 kat civarında artarken, 400 ms kaynak zamanında ise çökme miktarı 3 katın da üzerinde artmıştır (Şekil 9a). Kaplamalı TBF grubundaki kaynaklı numunelerde ise kaynak akımı 6 kA'den 9 kA'ye artırılması ile 240 ms kaynak zamanında çökme miktarı 1,8 kat civarında artarken, 400 ms kaynak zamanında ise çökme miktarındaki artış 2,3 kat civarındadır (Şekil 9b). Ancak, çökme miktarları aynı kaynak parametrelerine sahip tüm numunelerde TBF çelik sacının kaplamalı olması durumunda daha yüksek değerlerdedir. Bu anlamda, TBF çeliğindeki kaplama tabakası çökme miktarında bir miktar artışa sebep olmuştur. Bu da daha önce belirtildiği gibi, TBF çeliği kaplama tabakasının punta kaynağı esnasındaki toplam elektrik direncini artırarak enerji girdisini (ısı girdisini) arttırmasına atfedilebilir. 9 kA

kaynak akımı ve 400 ms kaynak zamanında maksimum çökme miktarı kaplamasız TBF çeliği kombinasyonunda %27,45 iken kaplamalı TBF çeliği kombinasyonunda ise %31,71'dir. Çökme değerlerinin otomotiv üreticileri kabulü için parçanın bulunduğu konum (görünür yüzey veya görünmeyen yüzey) öne çıkmaktadır. Kaput üstü gibi görünür yüzeyde çökme değeri estetik görünüm açısından önemlidir. Diğer taraftan kaput altı gibi görünmeyen yüzeyde ise çökme değeri kaynak mukavemeti açısından öne çıkabilmektedir. Ancak, kabul edilebilir çökme değerleri otomotiv üreticileri arasında farklılıklar göstermektedir. Çökme değerleri için otomotiv üreticilerini bağlayıcı belirlenmiş herhangi bir standart mevcut değildir. Genel olarak, estetik görünümün öne çıkmadığı kullanım yerlerinde mukavemet kaybı da göz önünde bulundurularak otomotiv üreticileri için maksimum çökme değeri % 35-40 civarında kabul edilmektedir. Bu çalışmadaki her iki gruptaki kaynaklarda elde edilen çökme değerleri otomotiv ana sanayinin kabulü içerisinde değerlendirilebilir. Ancak, daha yüksek ısı girdisi sağlayacak kaynak akımı ve kaynak

zamanı değerlerinin kullanılması durumunda özellikle kaplamalı TBF çelik sacı için çökme miktarının otomotiv sanayinin kabulü dışında kalma ihtimalini ortaya çıkabileceğini de vurgulamak gerekir.

Kaplamasız ve kaplamalı TBF kombinasyonundaki punta kaynaklı numunelerin kaynak bölgesi sertlik dağılımları Şekil 10'da verilmiştir. Kaynak bölgesi mikrosertlik dağılımları her iki çelik tarafında yer alan farklı mikroyapılara sahip kaynak bölgelerini net olarak teyit etmiştir. Kaynak bölgesinde en yüksek sertlik değerleri daha yüksek TM sertliğine sahip TBF çeliği tarafındaki ITAB'da gözlenmiştir. ITAB'da meydana gelen bu yüksek sertlik değerleri bu bölgede ortaya çıkan tanesal martenzitik ve beynitik yapıardan kaynaklanmaktadır. ITAB kendi

içerisinde değerlendirildiğinde, İTITAB sertliği KTITAB sertliğinden biraz daha yüksektir. Her iki bölgenin tanesal martenzitik ve beynitik iç yapılara sahip olmasına rağmen küçük tane yapısına sahip İTITAB'daki sertlik artışının KTITAB'a göre daha fazla olması Hall-Petch [24,25] bağıntısına atfedilebilir. Nitekim, EB'in de genel itibarıyla martenzitik iç yapıya sahip olmasına istinaden EB-KTITAB-İTITAB sertlik değerlerinin tane büyüklükleri ile paralellik içerisinde olduğu görülmektedir. Ancak, TBF çeliği tarafında ITAB'dan TM'ye geçiş olduğu çok dar bir geçiş bölgesinde (GB) ise sertlik değerleri TM'nin de önemli ölçüde altına inmiştir. Bu sertlik kaybı ITAB ve TM sertliklerine nazaran sırasıyla kabaca %40 ve %15 civarındadır. Bu önemli sertlik düşüşü tane büyüklüğünden değil temel malzeme iç yapısındaki sert fazların (martenzit ve



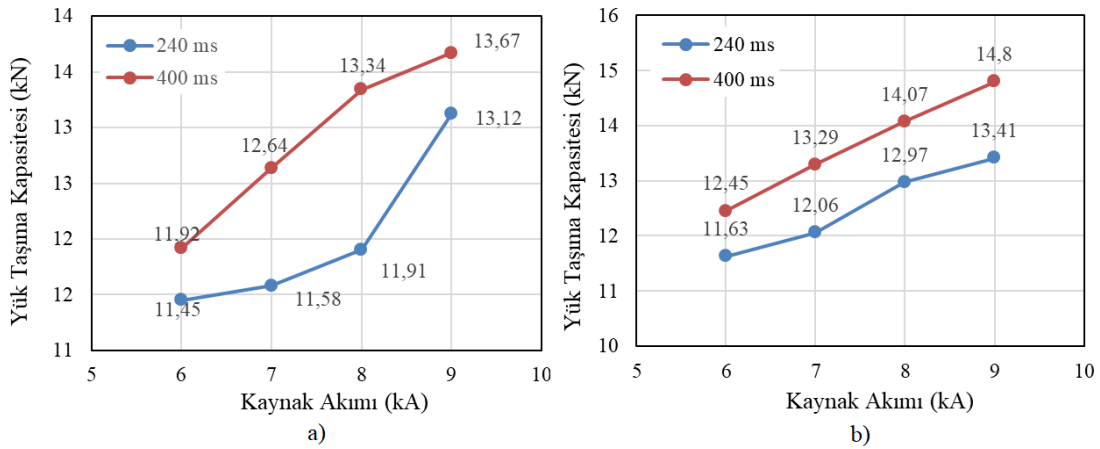
Şekil 10. Kaplamasız (a) ve kaplamalı (b) TBF kombinasyonundaki kaynaklı numunelerin kaynak bölgesi sertlik dağılımları. (TM: Temel Malzeme; GB: Geçiş Bölgesi; İTITAB: İnce Taneli Isı Tesiri Altındaki Bölge; KTITAB: Kaba Taneli Isı Tesiri Altındaki Bölge; EB: Erime Bölgesi; KEB: Kısmi Erime Bölgesi)

(Hardness distributions in the welding region of the welded samples in ungalvanized (a) and galvanized (b) TBF combination)
(TM: Base Metal; GB: Transition Zone; İTITAB: Fine Grained Heat Affected Zone; KTITAB: Coarse Grained Heat Affected Zone; EB: Fusion Zone; KEB: Partial Fusion Zone)

beynit) kaynak ısıl çevriminde önemli ölçüde temperlemesiyle ortadan kalkması ile ilişkilidir. Bu çok dar olan bölgenin yeri tam olarak ITAB'daki temperlenen bölgenin bitiminde TM'ye geçişte olduğu tespit edilmiştir. Sertlik ölçümlerinde bu GB'nin TM ile neredeyse iç içe geçmiş olduğu görülmüştür. Bu dar bölgedeki sertlik düşüşünün tespiti için oldukça hassas bir şekilde sertlik ölçülmesine (özel bir çaba sarf edilmesine) ihtiyaç olduğunu da vurgulamak gerekir. Kaynak bölgesinin DP600 çeliği tarafında ise sertlik değerleri çok daha düşük değerlerde kalmıştır. Bu da, DP600 çeliğinin TM sertliğinin düşük olmasına dolayısıyla çeliğin kimyasal kompozisyonuna bağlanabilir. Sertlik ölçümleri, DP600 çeliği tarafında oluşan kısmi erime bölgesini de (KEB) teyit eder niteliktedir. Genel itibarıyla, kaba tane yapısına istinaden KEB'de sertlik değerleri nispeten daha düşük kalmıştır. DP600 çeliği tarafında KEB-KTITAB-İTITAB'daki sertlik değişimleri TBF çeliği tarafına göre daha düşük miktarda gerçekleşmiştir. Bu da, DP600 çeliğinin kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak sertleşme yeteneği ile ilişkilidir. Diğer taraftan, DP600 çeliği tarafındaki kaynak bölgesinin hiçbir bölgesinde sertlik değeri TM sertlik değerinin altına düşmemiştir. Yani, DP600 çeliği tarafındaki kaynak bölgesinde TBF çeliği tarafındaki gibi bir önemli bir sertlik düşüşü bölgesine rastlanmamıştır. TBF çeliğinin kaplamalı ve kaplamasız olması durumuna bakıldığında ise, TBF çeliğinin kaplamalı olması durumunda farklı kaynak parametrelerine sahip numuneler arasındaki sertlik değişimleri nispeten daha fazla olmuştur. Bunun da, TBF çeliğindeki galvaniz tabakasının elektrik direnç punta kaynağındaki elektrik direncini değiştirmesi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Kaplamasız TBF çeliği grubundaki kaynaklı numunelerde, kaynak parametrelerinin kaynak bölgesi sertlik değerlerine etkisi nispeten düşük düzeyde kalmıştır. Orta düzeyde ısı girdisine (7 kA - 400 ms) sahip kaynaklı numunede kaynak bölgesi sertlik değerleri nispeten daha düşük değerlerde kalırken, düşük ısı girdisine sahip (6 kA - 240 ms) sahip kaynaklı numunede ise kaynak bölgesi sertlik değerleri nispeten daha yüksek değerlerdedir.

Kaplamalı TBF çeliği grubundaki kaynaklı numunelerde ise, kaynak parametrelerinin kaynak bölgesi sertlik değerlerine etkisi nispeten daha belirgindir.

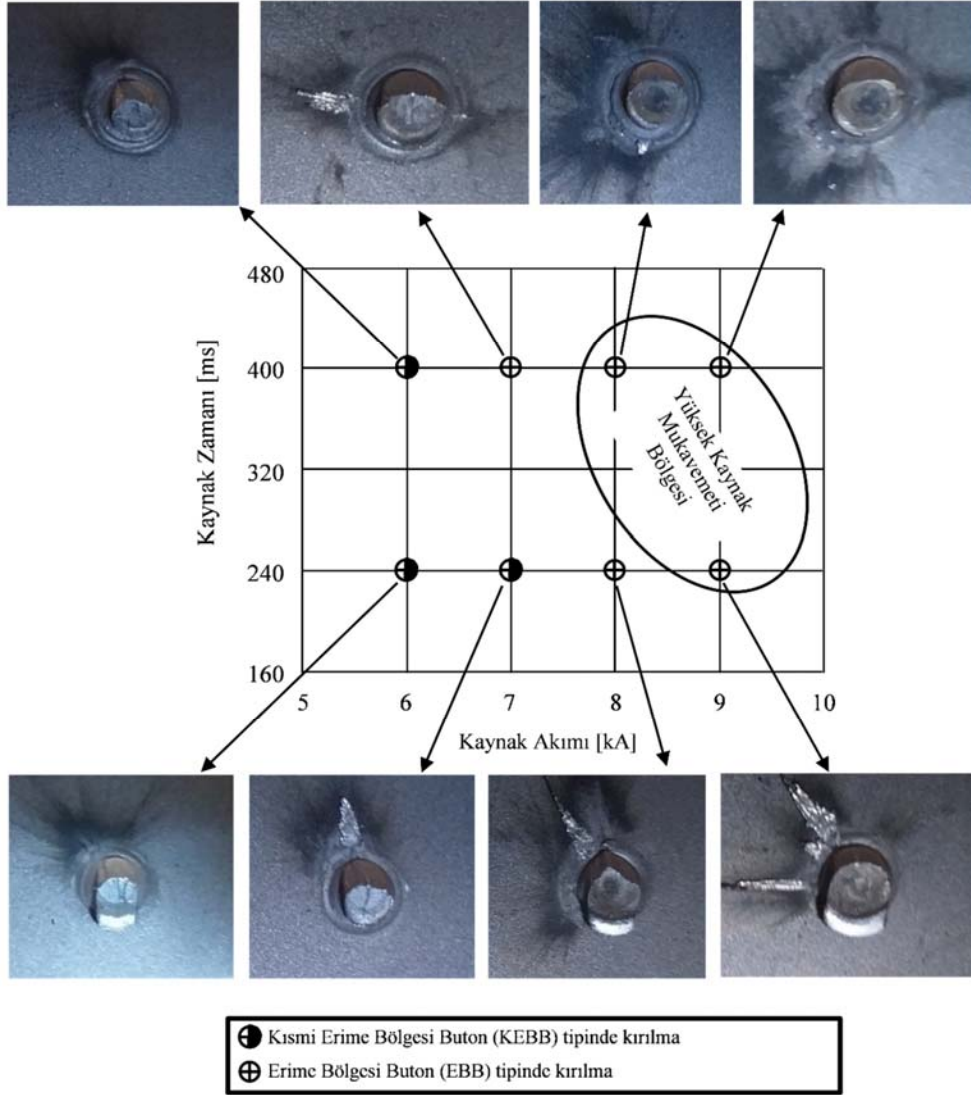
Farklı kaynak akımı ve kaynak zamanı ile üretilen tüm kaynaklı numunelerin çekme testleri sonucundaki yük taşıma kapasiteleri Şekil 11'de verilmiştir. Her iki deney grubunda kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ile kaynak mukavemeti artmıştır. Kaplamalı TBF grubundaki kaynaklı numunelerin yük taşıma kapasitelerinin artışı neredeyse doğrusal bir artış sergilemiştir (Şekil 11b). Her iki gruba ait kaynaklı numunelerin yük taşıma kapasiteleri çekirdek çapı ile yaklaşık olarak bir uyum içerisinde olduğu söylenebilir. Yüksek kaynak akımlarında çekirdek çapı artışı ile erime bölgesi etrafındaki yük taşıyıcı çevresel kesit arttığından kaynak mukavemeti de orantılı bir şekilde artmıştır. Aynı kaynak akım değerinde kaynak zamanı artışı kaynak mukavemetini daha yüksek değerlere ötelemiştir. Bu anlamda, uygulamada 400 ms kaynak zamanı ile çalışmak kaynak mukavemeti açısından daha uygun olduğu söylenebilir. Deneysel çalışmada 9 kA kaynak akımında ve 400 ms kaynak zamanında kaplamasız TBF grubunda en yüksek kaynak mukavemeti 13,67 kN iken, kaplamalı TBF grubunda ise en yüksek kaynak mukavemeti 14,8 kN'dur. Maksimum kaynak mukavemeti kaplamalı TBF grubunda kaplamasız TBF grubuna nazaran %8,25 daha fazladır. Bu parametrelere sahip kaynaklı numunelerin çökme miktarları sırasıyla %27,45 ve %31,71'tir. (Şekil 9). Bu çökme değerleri otomotiv ana sanayi standartları içerisinde kalmaktadır. Her iki kaynak zamanında, kaplamasız TBF grubundaki kaynaklı numunelerde kaynak akımının 6 kA'den 9 kA'ye artırılmasıyla kaynak mukavemetindeki artış %15 civarındadır. Kaplamalı TBF grubundaki kaynaklı numunelerde ise kaynak akımının 6 kA'den 9 kA'ye artırılmasıyla kaynak mukavemetindeki artış 240 ms kaynak zamanında %15 civarında iken 400 ms kaynak zamanında bu artış %20'ye yaklaşmaktadır. Şekil 11'deki eğrilerin gidişatına bakıldığında, her iki grup için de kaynak akımı veya kaynak zamanı bir kademe daha artırılarak daha



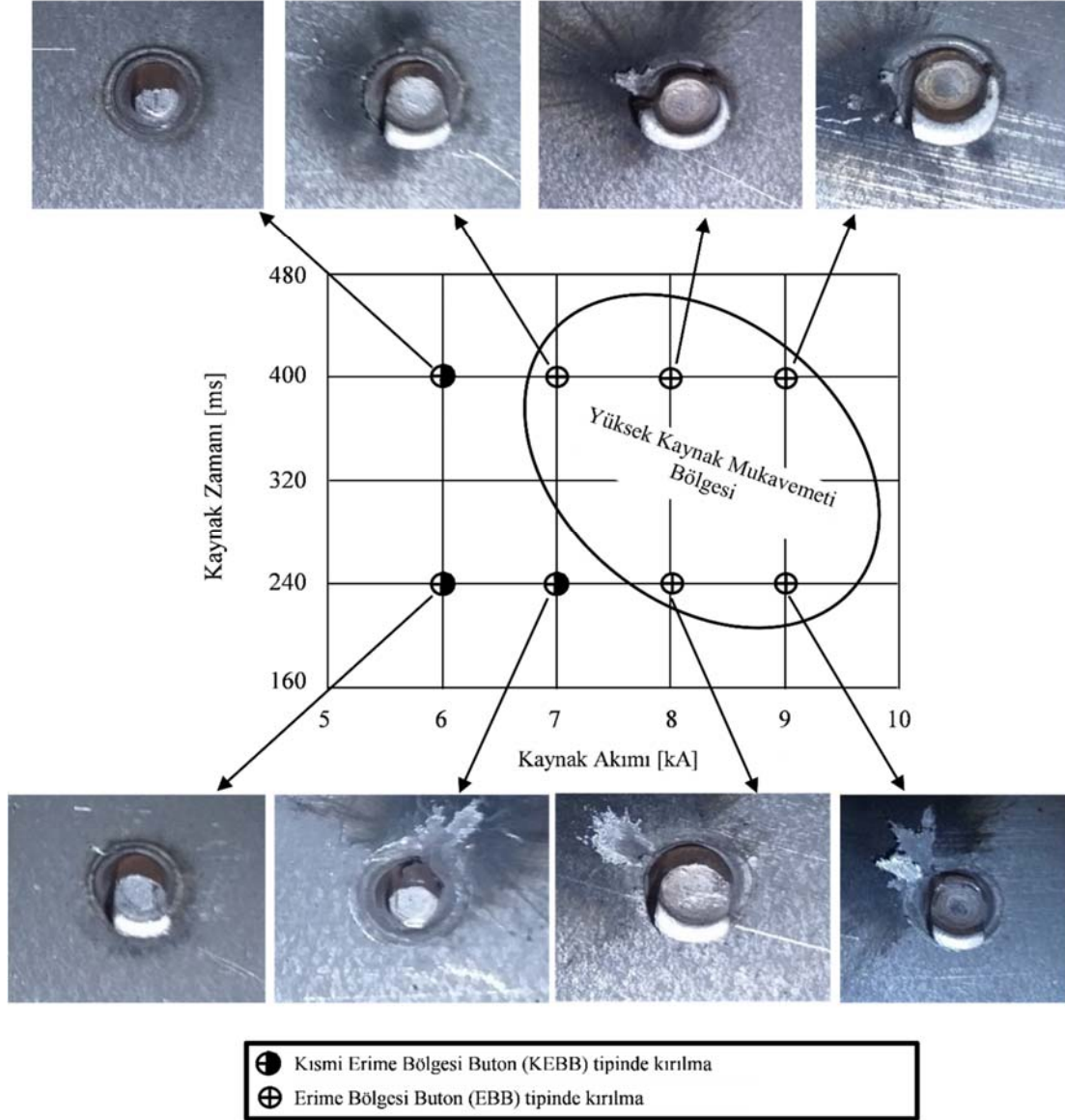
Şekil 11. Kaplamasız (a) ve kaplamalı (b) TBF kombinasyonundaki kaynaklı numunelerin yük taşıma kapasitelerinin kaynak akımı ve kaynak zamanı ile değişimi (Change of the load-bearing capacities of welded samples in ungalvanized (a) and galvanized (b) TBF combination with welding current and welding time)

yüksek mukavemete sahip kaynak bağlantılarının elde edilebilme olasılığı mevcut olsa da uygulamada aşırı sıçratma (expulsion) problemi ve çökme miktarının da otomotiv sanayi kriterlerinin dışında kalma tehlikesi ortaya çıkacaktır. Çökme değerleri açısından bu tehlike, TBF çelik sacının kaplamalı olması durumunda ise daha belirgindir. Bu çalışma kapsamında elektrik direnç punta kaynağı ile birleştirilmiş aynı kalınlıktaki TBF-DP600 kaynaklı bağlantı kombinasyonunda TBF çelik sacının kaplamalı olup olmamasından bağımsız olarak daha düşük mukavemete sahip olan DP600 çeliğinin kaynak mukavemetini belirleyici rolü üstlendiği görülmektedir. Bu husus, TBF çeliğinin kaplama tabakasının kaynaktaki negatif etki potansiyelini (SMK esaslı yüzeysel mikroçatlak oluşumları) devre dışı bırakmıştır. Bu hususta her iki çeliğinde aynı kalınlıkta olması önemli bir hal almıştır. DP600 çeliğinin kalınlığının artması durumunda ise kaynak mukavemetini TBF çeliğinin

belirleme olasılığı artacaktır ki bu durumda daha yüksek kaynak mukavemeti elde edilebilecektir. Ancak, bu durumda TBF çeliğinde kaplama tabakasının negatif etkisinin de ortaya çıkma olasılığını hesaba katmak gerekecektir. Elektrik direnç punta kaynağı uygulanmış her iki numune grubunda çekme testi sonucundaki tüm kırılmalar daha düşük mukavemete sahip DP600 çelik sacı tarafında meydana gelmiştir: Çekirdek her daim TBF çelik sacı tarafında kalmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi daha düşük mukavemete sahip DP600 çelik sacı kaynak mukavemetinde belirleyici rolü üstlenmiştir. Düşük ısı girdisi sağlayan kaynak parametrelerine (240 ms kaynak zamanında 6 kA - 7 kA kaynak akımlarında ve 400 ms kaynak zamanında 6 kA kaynak akımında) sahip kaynaklı bağlantılarda DP600 çelik sacı tarafında meydana gelen kırılmalar EB'in hemen bitimi (EB-ITAB sınırında) ile EB'in bir kısmını içine alan Kısmi Erime Bölgesi Butonu (KEBB) tipi şeklindedir (Şekil 12 ve



Şekil 12. Kaplamasız TBF kombinasyonundaki kaynaklı numunelerin kaynak akımı ve kaynak zamanına bağlı olarak çekme testi sonucundaki kırılma tipleri (Fracture types of the welded samples subjected to the tensile tests in ungalvanized TBF combination depending on the welding current and welding time)



Şekil 13. Kaplamalı TBF kombinasyonundaki kaynaklı numunelerin kaynak akımı ve kaynak zamanına bağlı olarak çekme testi sonucundaki kırılma tipleri
(Fracture types of the welded samples subjected to the tensile tests in galvanized TBF combination depending on the welding current and welding time)

Şekil 13). Yani, düşük ısı girdisinde kırılmalar buton tipinde olsa da daha düşük kaynak mukavemetine götüren kısmi ara yüzey kırılmaları da içermektedir. Kırılmalar EB içerisinde de bir miktar kaymaktadır. Bu kaymanın sınırı EB içerisindeki her iki metalin sınır bölgesine kadardır. Yüksek ısı girdisine sahip diğer tüm numunelerde ise Erime Bölgesi Butonu (EBB) tipinde kırılmalar ortaya çıkmıştır ki böylece nispeten daha yüksek kaynak mukavemeti değerleri elde edilmiştir (Şekil 12 ve Şekil 13). Yani yüksek ısı girdisine götüren kaynak parametrelerinde kırılmalar tamamen EB ile ITAB arasındaki sınıra ulaşmaktadır. EB’de oluşan gevrek kaba dendiritik martenzit fazları (neredeyse %100 oranına yakın) ile EB’in hemen bitişiğindeki ITAB’daki tanesnel şeklindeki

martenzit-beynit fazları arasında meydana gelen sınır bölge kırılmaya oldukça elverişli bir bölgedir. Nitekim, bu numunelerde kırılmalar esas itibarıyla doğrudan ITAB içerisinden ziyade bu sınır bölgesinde meydana gelmiştir. Kaplamalı TBF grubunda ise kaynak parametrelerine bağlı olarak yüksek kaynak mukavemeti bölgesi nispeten daha düşük parametre değerlerine doğru genişlemiştir (Şekil 13).

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, elektrik direnç punta kaynağıyla birleştirilen TBF (kaplamalı ve kaplamasız) ve DP600 çelik saclarında kaynak parametrelerinin mikroyapı ve mekanik özellikleri

üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Elektrik direnç punta kaynağı ile birleştirilmiş farklı kompozisyondaki ve yapıdaki TBF ve DP600 çelikleri EB’de birbirine tamamen karışmamaktadır. TBF çeliği EB’de daha geniş bir alana sahip olmaktadır. Kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı EB’de her iki metalin birbirine karışma oranını arttırmış ve ITAB’ı genişletmiştir.
- Elektrik direnç punta kaynağı ile birleştirilmiş kaplamasız TBF çeliklerinin kaynak bölgesinde atmosferik koşullarda korozyon hızla başlarken kaplamalı TBF çeliklerinin kaynak bölgesinde ise aynı koşullarda herhangi bir korozyon izine rastlanmamıştır. Ancak, TBF çeliğinin kaplama tabakası elektrik direnç punta kaynak prosesinde yüksek ısı girdisi sağlayan kaynak parametrelerinde (7 kA - 400 ms ve 9 kA - 400 ms) ITAB’da SMK esaslı yüzeyden başlayan mikroçatlak oluşumları ortaya çıkmaktadır.
- Her iki çelik tarafındaki ITAB 3 farklı bölgeye ayrılabilir: 1) Kaba taneli ITAB, 2) İnce taneli ITAB, 3) Temperlenen bölge. TBF çeliği DP600 çeliği ile kıyaslandığında kaynak esnasındaki ısıdan daha fazla etkilenmiştir. Isı girdisi artışı ITAB tane yapısını kabalaştırmaktadır.
- Tüm kaynaklı numunelerin çekirdek çapları kaynak akımı ve kaynak zamanı ile belirgin bir şekilde artmıştır. TBF çeliğinin kaplamalı olması yüksek kaynak akımlarında çekirdek çapını az miktarda arttırmıştır. 9 kA kaynak akımı ve 400 ms kaynak zamanında maksimum çekirdek çapı kaplamasız TBF çeliği kombinasyonunda 8,11 mm iken kaplamalı TBF çeliği kombinasyonunda 8,27 mm’dir.
- Tüm kaynaklı numunelerin çökme değerleri kaynak akımı ile artmıştır. Düşük kaynak akımlarında kaynak zamanının çökme üzerinde herhangi bir etkisi gözlenmemişken, yüksek kaynak akımlarında kaynak zamanı ile çökme miktarı artmıştır. TBF çeliğinin kaplamalı olması durumunda çökme daha fazla olmuştur. 9 kA kaynak akımı ve 400 ms kaynak zamanında maksimum çökme kaplamasız TBF çeliği kombinasyonunda %27,45 iken kaplamalı TBF çeliği kombinasyonunda %31,71’dir.
- Kaynak bölgesinde en yüksek sertlik değerleri TBF çeliği tarafındaki ITAB’da elde edilmiştir. DP600 çeliği tarafında sertlik değerleri çok daha düşüktür. Genel itibarıyla ince taneli ITAB sertliği kaba taneli ITAB sertliğinden daha yüksektir. TBF çeliği tarafında ITAB temel malzeme arasında çok dar bir geçiş bölgesinde sertlik değerleri önemli ölçüde düşmüştür. DP600 çeliği tarafında ise bu türden bir geçiş bölgesine rastlanmamıştır.
- Kaynak parametrelerinin kaynak bölgesi sertlikleri üzerindeki etkisi TBF çeliğinin kaplamalı olması durumunda daha fazla olmuştur.
- Kaynaklı numunelerde kaynak akımı ve kaynak zamanı artışı ile kaynak mukavemeti artmıştır. Genel itibarıyla kaplamalı TBF çeliği kombinasyonundaki kaynaklı bağlantıların yük taşıma kapasitesi daha yüksektir. 9 kA kaynak akımı ve 400 ms kaynak zamanında kaynaklı bağlantıların maksimum yük taşıma kapasitesi kaplamasız

TBF çeliği kombinasyonunda 13,67 kN iken kaplamalı TBF çeliği kombinasyonunda ise 14,8 kN’dur.

- Elektrik direnç punta kaynağı ile birleştirilmiş aynı kalınlıktaki TBF-DP600 kaynaklı bağlantıların kaynak mukavemetini DP600 çeliği belirlemiştir.
- Düşük ısı girdisi sağlayan kaynak parametrelerine (240 ms kaynak zamanında 6 kA - 7 kA kaynak akımlarında ve 400 ms kaynak zamanında 6 kA kaynak akımında) sahip kaynaklı bağlantılarda kırılmalar KEBB tipinde iken yüksek ısı girdisi sağlayan kaynak parametrelerine sahip kaynaklı bağlantılarda ise kırılmalar EBB tipindedir. KEBB tipindeki kırılmalar düşük kaynak mukavemetine sahip iken EEB tipindeki kırılmalar daha yüksek kaynak mukavemetine sahip olmuşlardır.
- Yüksek kaynak mukavemeti bölgesi olarak belirlenen bölge TBF çeliğinin kaplamalı olması durumunda nispeten daha geniştir: Daha düşük kaynak parametrelerinde de nispeten yüksek kaynak mukavemeti elde edilebilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmaya Ar-Ge projesi kapsamında destek veren ve finanse eden Beyçelik Gestamp Otomotiv Sanayi A.Ş.’ne yazarlar olarak teşekkürlerimizi sunmaktayız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Xie Z., Shang C., Wang X., Wang X., Han G., Misra R., Recent progress in third-generation low alloy steels developed under M³ microstructure control, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 27, 1-9, 2020.
2. McGuire N., Automotive industry lightens up, Tribology & Lubrication Technology; Park Ridge, 73 (11), 30-34, 36-38, 40-41, 2017.
3. Chebolu A., Automotive Lightweighting: A Brief Outline, In: Singh A., Sharma N., Agarwal R., Agarwal A. (eds) Advanced Combustion Techniques and Engine Technologies for the Automotive Sector. Energy, Environment, and Sustainability. Springer, Singapore, 2020. doi:10.1007/978-981-15-0368-9_12.
4. Kulkarni S., Edwards D.J., Parn E.A., Chapman C., Aigbavboa C.O., Cornish R., Evaluation of vehicle lightweighting to reduce greenhouse gas emissions with focus on magnesium substitution, Journal of Engineering, Design and Technology, 2018. doi:10.1108/JEDT-03-2018-0042.
5. Pervaiz M., Panthapulakkal S., Birat K.C., Sain M., Tjong J., Emerging trends in automotive lightweighting through novel composite materials, Materials Sciences and Applications, 7, 26-38, 2016.
6. Aydın H., Tutar M., Davut K., Bayram A. Effect of welding current on microstructure and mechanical properties of 15% deformed TWIP steel joined with electrical resistance spot welding, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (2), 803-817, 2020.
7. Ozturk Yilmaz I., Bilici A.Y., Aydın H., Microstructure and mechanical properties of dissimilar resistance spot

- welded DP1000-QP1180 steel sheets, Journal of Central South University, 26 (1), 25-42, 2019.
8. Aydın H., Tutar M., Bayram A., Strain effect on the microstructure, mechanical properties and fracture characteristics of a TWIP steel sheet, Transactions of the Indian Institute of Metals, 71 (7), 1669-1680, 2018.
 9. Tutar M., Aydın H., Bayram A., Effect of weld current on the microstructure and mechanical properties of a resistance spot-welded TWIP steel sheet, Metals, 7, 519, 2017.
 10. Murata T., Hamamoto S., Utsumi Y., Yamano T., Futamura Dr. Y., Kimura T. Characteristics of 1180MPa Grade Cold-rolled Steel Sheets with Excellent Formability. Kobelco Technology Review, 35, 45-49, 2017.
 11. Ebner S., Suppan C., Schnitzer R., Hofer C., Microstructure and mechanical properties of a low C steel subjected to bainitic or quenching and partitioning heat treatments, Materials Science and Engineering: A, 735 (26), 1-9, 2018.
 12. Nam N.D., Dong T.P., Nam T.T., Hai N.H., Khanh P.M., Influence of the Deformation on the Microstructure and Mechanical Properties of TBF Steel, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 37 (8), 595-600, 2020.
 13. Gibbs P.K., Strain Path Effect on Austenite Transformation and Ductility in TBF 1180 Steel, Theses and Dissertations, 7127, 2019.
 14. Sugimoto K.-I., Sato S.-H., Kobayashi J., Srivastava A.K., Effects of Cr and Mo on Mechanical Properties of Hot-Forged Medium Carbon TRIP-Aided Bainitic Ferrite Steels, Metals, 9, 1066, 2019.
 15. Kimura T., Formability of TRIP Type Bainitic Ferrite Steel Sheet, Kobelco Technology Review, 30, 85-89, 2011.
 16. Doruk E., Pakdil M., Çam G., Durgun İ., Kumru U.C., Otomotiv Sektöründe Direnç Nokta Kaynağı Uygulamaları, Mühendis ve Makina, 57 (673), 48-53, 2016.
 17. Doruk E., Pakdil M., Çam G., Durgun İ., Kumru U.C., Otomotiv Sektöründe Direnç Nokta Kaynağı: Tofaş Uygulamaları, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Kaynak Teknolojisi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi, Ankara, 29-37, 2015.
 18. AWS D8.9M., Test Methods for Evaluating the Resistance Spot Welding Behavior of Automotive Sheet Steel Materials, An American National Standard, 2012.
 19. Smithells C.J., Brandes E.A., Brook G.B., Metals Reference Book, 7th Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992.
 20. Wilzer J., Ludtke F., Weber S., Theisen W., The influence of heat treatment and resulting microstructures on the thermophysical properties of martensitic steels, Journal of Materials Science, 48 (24), 8483-8492, 2013.
 21. Frei J., Rethmeier M., Susceptibility of electrolytically galvanized dual-phase steel sheets to liquid metal embrittlement during resistance spot welding, Welding in the World, 62, 1031-1037, 2018.
 22. Bhattacharya D., Liquid metal embrittlement during resistance spot welding of Zn-coated high-strength steels, Materials Science and Technology, 34, 1809-1829, 2018.
 23. Barthelmie J., Schram A., Wesling V., Liquid metal embrittlement in resistance spot welding and hot tensile tests of surface-refined TWIP steels, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 118, 012002, 2016.
 24. Hall E.O., The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results, Proceedings of the Physical Society of London, 64 (9), 747-753, 1951.
 25. Petch N.J., The Cleavage Strength of Polycrystals, Journal of the Iron and Steel Institute London, 173, 25-28, 1953.