T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KAYNAK AKIM ŞİDDETİNİN KAYNAK ELEKTROT ÖMRÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erhan Halit ÇEBİ

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Salim ASLANLAR

Temmuz 2021

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KAYNAK AKIM ŞİDDETİNİN KAYNAK ELEKTROT ÖMRÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erhan Halit ÇEBİ

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 28/07/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof. Dr. Salim ASLANLAR	BAŞARILI
Üye: Prof. Dr. Uğur ÖZSARAÇ	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğretim Üyesi Volkan ONAR	BAŞARILI

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Erhan Halit ÇEBİ

23/06/2021

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Salim ASLANLAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Afyon Kocatepe Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Şükrü TALAŞ'a, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Prof. Dr. Uğur ÖZSARAÇ'a, tez çalışmam sırasında bana her türlü imkanı sunan YILDIZ KALIP A.Ş. Yönetim Kurulu Başkanı Sn. Cemil YILDIZ ve Genel Müdür Yardımcısı Sn. Ensar YILDIRIM'a, çalışmamda yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Ar-Ge şefi Dr. Mert ONAN, Y. Müh. Oğuzmert ŞAHİN ve Y.Müh. R. Önder TEMİZ'e teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışma esnasında manevi desteklerini esirgemeyen babam Yılmaz ÇEBİ, annem Gülüşan ÇEBİ ve eşim Nesrin ÇEBİ'ye sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR ..... **i**
İÇİNDEKİLER ..... **ii**
KISALTMALAR ..... **iv**
SİMGELER ..... **v**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **vi**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **vii**
ÖZET ..... **ix**
SUMMARY ..... **x**

BÖLÜM 1.
GİRİŞ **1**

BÖLÜM 2.
OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDEKİ ÇELİKLER **6**
2.1. Otomotiv Sektöründe AHSS Çelik Türleri 6
2.1.1. Martenzitik çelikler 7
2.1.2. Çift fazlı (DP) çelikler 7
2.1.3. Yüksek manganlı çelikler (TWIP) 8
2.1.4. Karmaşık fazlı (Complex phase) çelikler 9
2.1.5. TRIP çelikleri (TRIP-Transformation induced plasticity) 9
2.1.6. Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler (HSLA) 9
2.2. HSLA Çelikleri 10
2.2.1. HSLA çeliklerinin otomotivde kullanımı 10
2.2.2. HSLA çeliklerinin mekanik özellikleri 13
2.2.3. HSLA çeliklerin avantaj ve dezavantajları 16
2.3. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kaynak Yöntemleri 17
2.3.1. Direnç nokta kaynağı 17
2.3.2. Direnç nokta kaynağı çalışma prensibi 18
2.3.3. Çift fazlı çeliklerin direnç nokta kaynağı kullanılarak birleştirilmesi 19
2.3.4. Direnç nokta kaynağı parametreleri 19
2.3.4.1. Kaynak akımı 20
2.3.4.2. Kaynak süresi 21
2.3.4.3. Kaynak kuvveti 21
2.3.5. Direnç nokta kaynağında kullanılan elektrot türleri 22

2.3.6. Çift fazlı çeliklerde direnç nokta kaynağı sonrası çökmenin oluşumu 23
2.3.7. Direnç nokta kaynağı birleşiminin mikroyapısal incelemesi 26

BÖLÜM 3.
MATERYAL VE METOD 27
3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler 27
3.2. Direnç Nokta Kaynak Parametreleri 28
3.3. Kaynakların Mikroyapısal Karakterizasyon ve Fiziksel Özellik Tayini 29

BÖLÜM 4.
DENEYSEL SONUÇLAR 31
4.1. Giriş 31
4.2. Punta Elektrot ve Kaynak Bölgesi Boyutsal Ölçümleri 32
4.3. Elektron Mikroskop Analizleri 43
4.4. Mikroyapı ve Mikrosertlik Analizleri (Hv) 56

BÖLÜM 5.
SONUÇ VE ÖNERİLER 63

KAYNAKLAR 65

KISALTMALAR

AHSS	: Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelik
BH	: Fırında Sertleştirilmiş Çelik
BIW	: Otomotiv Araç Gövdesi
CP	: Karmaşık Fazlı Çelik
DP	: Çift Fazlı Çelik
EDS	: Elementel Analizi
EDX	: Enerji Dağılımlı X-ray Analizi
FCAW	: Özlü Ark Kaynağı
FZ	: Füzyon Bölgesi
GTAW	: Tungsten Ark Kaynağı
HAZ	: Isıdan Etkilenen Bölge
HSLA	: Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı Çelik
HSS	: Yüksek Mukavemetli Çelik
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
MART	: Martenzitik Çelik
RSW	: Nokta Direnç Kaynağı
SAW	: Toz Altı Ark Kaynağı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SMAW	: Korumalı Metal Ark Kaynağı
TiC	: Titanyum Karbür
TiCN	: Titanyum Karbonitrür
TiN	: Titanyum Nitrür
TRIP	: Transformasyon Yoluyla Plastisite Kazanan Çelik
TUAM	: Teknoloji ve Uygulama Araştırma Merkezi
TWIP	: İkizlenme Yoluyla Plastisite Kazanan Çelik

SİMGELER

A	: Amper
AC	: Alternatif Akım
DC	: Doğru Akım
DR	: Çökme Direnci
E	: Elastiste Modülü
HV	: Vickers Sertlik Değeri
I	: Akım
kA	: Kilo Amper
kN	: Kilo Newton
kVA	: Kilo Volt Amper
MPa	: Mega Pascal
ms	: Milisaniye
N	: Newton
R	: Direnç
t	: Zaman
TS	: Çekme Mukavemeti
UTS	: Nihai Çekme Mukavemeti
wt-%	: Ağırlıkca Yüzde Değeri
YS	: Akma Mukavemeti
γ	: Östenit
ρ	: Yoğunluk
σ	: Gerilme

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1: Sac kalınlığına bağlı minumum istenen çekirdek çapı [19]..... 24
Tablo 3.1: Kaynak deneyleri esnasında kullanılan parametreler. 29
Tablo 4.1: G tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) Sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) Sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları..... 32
Tablo 4.2: B tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları..... 37
Tablo 4.3: F tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları..... 40
Tablo 4.4: 10 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri..... 45
Tablo 4.5: 11 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri..... 46
Tablo 4.6: 12 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri..... 47
Tablo 4.7: 13 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri..... 49
Tablo 4.8: 14 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri..... 50
Tablo 4.9: 15 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri..... 51
Tablo 4.10: 16 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri..... 53
Tablo 4.11: 17 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri..... 54
Tablo 4.12: 18 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri..... 55
Tablo 4.13: Direnç nokta kaynağı yapılmış numunelere ait mikrosertlik (HV) ölçüm sonuçları. 61
Tablo 4.14: Zaman, akım, elektrot ölçü tablosu. 62

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 : İki ayrı martenzitik çeliğin ve yumuşak çeliğin gerinim-gerilme grafiği... 7
Şekil 2.2 : DP çeliğine ait mikroyapı örneği. 8
Şekil 2.3 : TRIP çeliğine ait mikroyapısı örneği. 9
Şekil 2.4 : Çeşitli kalitelerde soğuk haddelenmiş, sıcak daldırma galvanizli HSS ve AHSS'nin mühendislik gerinim-gerilme eğrileri arasındaki bir karşılaştırma. 14
Şekil 2.5 : HSS ve AHSS sınıflarının (HSLA 300, DP 600, TRIP 800, CP 1000) gerçek gerinim-gerilme eğrileri. 14
Şekil 2.6 : Çeşitli soğuk haddelenmiş, sıcak daldırma galvanizli HSS ve AHSS (BH 180, HSLA 220, IF 260, DP 600, TRIP 700, CP 1000) sınıflarının tipik mukavemet kaliteleri. 15
Şekil 2.7 : Aynı HSS ve AHSS kalitelerinin sünekliği arasındaki bir karşılaştırma.. 16
Şekil 2.8 : HSS, AHSS ve yumuşak çeliğin şekillendirilebilirliği. 16
Şekil 2.9 : (a) Direnç nokta kaynağı şematik gösterimi [8], (b) Kaynak zamanı parametreleri [9]. 18
Şekil 2.9 (devam): (a) Direnç nokta kaynağı şematik gösterimi [8], (b) Kaynak zamanı parametreleri [9]. 19
Şekil 2.10 : Farklı geometrilere sahip elektrot türleri. 23
Şekil 2.11 : Direnç Nokta Kaynağında penetrasyon oluşumu [32, 33, 34]. 25
Şekil 2.12 : Direnç Nokta Kaynağında çökmenin oluşumu [26]. 25
Şekil 2.13 : Üç adet sacın birbirine kaynaklandığı yapının mikroyapısı. Tanelerin, kaynak çekirdeğinden dışarıya doğru soğutma doğrultusunda yönlenmesi [40]. 26
Şekil 3.1 : Rulo olarak temin edilen sac malzemeye ait test sertifikası. 27
Şekil 3.2 : Tercih edilen farklı tip elektrotlar. Tip G, F ve B 28
Şekil 3.3 : (a) Kaynak çekirdek çapının çapı, (b) Kaynak çekirdeğinin merkez çapı 30
Şekil 4.1 : G tipi elektrot uç formu ile yapılan 10 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. 33
Şekil 4.1 (devam): G tipi elektrot uç formu ile yapılan 10 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. 34
Şekil 4.2 : G tipi elektrot uç formu ile yapılan 11 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. 34
Şekil 4.2 (devamı): G tipi elektrot uç formu ile yapılan 11 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. 35

Şekil 4.3 : G tipi elektrot uç formu ile yapılan 12 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. 35
Şekil 4.3 (devamı): G tipi elektrot uç formu ile yapılan 12 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. 36
Şekil 4.4 : B tipi elektrot uç formu ile yapılan 13 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ölçümü. 37
Şekil 4.5 : B tipi elektrot uç formu ile yapılan 14 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. 38
Şekil 4.6 : B tipi elektrot uç formu ile yapılan 15 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. 39
Şekil 4.7 : F tipi elektrot uç formu ile yapılan 16 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. 41
Şekil 4.8 : F tipi elektrot uç formu ile yapılan 17 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. 42
Şekil 4.9 : F tipi elektrot uç formu ile yapılan 18 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü. 43
Şekil 4.10 : 10 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları. 45
Şekil 4.11 : 11 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları. 46
Şekil 4.12 : 12 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları. 47
Şekil 4.13 : 13 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları. 49
Şekil 4.14 : 14 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları. 50
Şekil 4.15 : 15 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları. 51
Şekil 4.16 : 16 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları. 53
Şekil 4.17 : 17 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları. 54
Şekil 4.18 : 18 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları. 55
Şekil 4.19 : a) 16 b) 17 ve c) 18 nolu numuneye ait x50, x200 büyütmede mikrosertlik ölçümü yapılan kesit mikroyapısı. 57
Şekil 4.20 : a) 13, b) 14 ve c) 15 nolu numuneye ait x50, x200 büyütmede mikrosertlik ölçümü yapılan kesit mikroyapısı. 59
Şekil 4.21 : a) 10, b) 11 c) 12 nolu numuneye ait (a) x50, (b) x200 büyütmede mikrosertlik ölçümü yapılan kesit mikroyapısı. 60

KAYNAK AKIM ŞİDDETİNİN KAYNAK ELEKTROT ÖMRÜNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Otomotiv sektöründe geçmişten beri yeterli mukavemet ve uzama değerlerine sahip yüksek mukavemetli çelikler (HSS) tercih edilmektedir. Otomobillerde yapısal parçalar yüksek çarpma direnci gerektirir, belirli parçalarda bu durum malzeme kırılma tokluğuna ve sac kalınlığına bağlıdır. BIW (metal parçaların birbirine kaynatılarak gövdeyi oluşturmuş hali) araçlardaki en ağır ve en büyük yapıdır. Orta büyüklükte bir binek otomobilin toplam ağırlığının yaklaşık %20 ila 30'unu oluşturur. BIW kütlesini yüksek mukavemet kullanarak azaltmak, önemli ölçüde ağırlık tasarrufu ve gelişmiş çarpışma direnci sağlayabilir. Bu tür uygulamaların örnekleri, darbe kirişleri, B-Pillar takviyeleri ve tampon çubuklardır. HSS, düşük karbonlu çeliklerin mukavemet ve ağırlık oranını iyileştirmek için geliştirilmiştir. Mikro alaşımlama, eritme uygulaması, ısıl işlem veya bunların bir kombinasyonu ile daha yüksek mukavemetler elde edilir. HSS için bu limitler, 255-550 MPa akma mukavemet aralığındadır. Araç ağırlığındaki azalma ise, bir aracın yakıt ekonomisine katkıda bulunmaktadır. Fakat kullanılan çeliklerin kaynaklanması esnasında tercih edilen elektrotların ömrüne dair çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışma da fabrika koşullarında çinko kaplamalı HSLA sac malzemenin nokta kaynağı ile birleştirilmesi 300 kez atılarak yapılmıştır. Kaynak prosesi esnasında değişken akım şiddeti altında ve sabit sürelerde denenerek en uygun koşullarda üretimin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Kaynak denemeleri sonrası elektrodun boyutsal ölçümleri (elektrot boyunda kısalma) incelenerek, elektrotların ömürleri hakkında bilgi edinilmiştir. Sac malzemedeki kaynak çapının boyutsal ölçümü, mikroyapısal incelemeler ve kesitten alınan mikrosertlik yardımıyla kaynak sertliği ile çökme hakkında bilgi edinilmiştir. HX340LAD+Z malzemesinde meydana gelen sıçrantıların tespiti SEM-EDS ve EDX çalışmaları ile ortaya çıkarılmıştır. Boyutsal ölçümler sonucunda kaynak bölgesi ve elektrot yüzeyinin F tipi elektrot ucu ile yapılan deneylerde G tipi elektrot ucu ile yapılan deneylere göre daha iyi sonuç verdiği açıkça görülmektedir. Çekirdek iç ve dış çap farkının artması ısı girdisinin arttığını göstermektedir. SEM-EDS ve EDX çalışmaları ile çok ciddi oranda çinko birikiminin veya yüzeylere transferinin gerçekleştiğini işaret etmektedir. F tipi elektrot ile yapılan denemelerde elementel dağılım genel olarak homojen olmakla beraber yüzeydeki gözeneklerin içerisinde çinkonun bulunması yüzeyde çinko buharının oluşması ve buharlaşma ile beraber gözeneklerde hapsolması neticesinde, yoğunlaştığı ve biriktiği düşünülmektedir. G tipi elektrodun mikrosertlik üzerine etkisi oldukca belirgindir. Sertlik değerleri elektrot tipine göre G, B ve F sırasıyla ortalama olarak artmaktadır. Deneyler ve analizler neticesinde belli bir süre sonunda hangi elektrodun daha verimli olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Direnç Nokta Kaynağı, HSLA, Kaynak Akım Şiddeti, Elektrot Ömrü.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WELDING CURRENT INTENSITY ON WELDING ELECTRODE LIFE

SUMMARY

HSLA Steels as a term refers to high strength low alloy steels. Steels in HSS class are preferred due to their high strength.

High Strength Low Alloy Grades. HSLA steels have small amounts of alloying elements such as phosphorus, manganese or silicon added to low carbon (0.02 - 0.13% C) steels to achieve high strength levels. In these steels, higher strength is obtained by rapid cooling to form a very fine ferrite grain size. The solid solution is strengthened with phosphorus, nitrogen, silicon and manganese. Formation of carbides or carbonitrides occurs with vanadium, nickel, and titanium. These steels have better mechanical properties, corrosion resistance and weldability than mild steels [1].

HSS has been developed to improve the strength / weight ratio of low carbon steels. Higher strengths are obtained by micro alloying, melting application, heat treatment or a combination of these. HSS covers a wide variety of properties and strength levels. For HSS, these limits are in the yield strength range of 255-550 MPa.

Using HSS instead of mild steel in an automotive body structure can reduce its weight by about 40% without sacrificing performance. Overall, a 10% reduction in weight can increase a vehicle's fuel economy by about 8% [1].

HSS and AHSS are more difficult to bend than plain carbon steels due to their higher yield strength and lower ductility. This requires more strength, greater bending radius, more mold cavity, and more springback. It may be necessary to remove cutting burrs in the bending area and to straighten corners. Whenever possible, the bending axis should be perpendicular to the direction of rolling. If the bending axis must be parallel to the rolling direction, it may be necessary to use cross rolled material depending on the severity of the bending. Due to the high ratio of yield strength to elastic modulus of HSS and AHSS, a greater amount of springback occurs in the shaped part compared to soft steel.

Structural parts in automobiles require high impact resistance, in certain parts this condition depends on the material fracture toughness and sheet thickness. Most of the structural components in current production are made of steel sheets with a tensile strength of 270 to 540 MPa. A major problem in using higher strength steels for automotive applications is the increased springback of formed parts. For a constant elastic modulus, springback increases with an increase in the yield strength of sheet metal. BIW (body-in-white is the stage in automobile manufacturing where the frame of a car body is assembled, i.e. before painting.) is the heaviest and largest structure in vehicles. It accounts for about 20 to 30% of the total weight of a medium-sized passenger car. Reducing the white body mass using high strength can provide significant weight savings and improved crash resistance. Examples of such applications are impact beams, B-Pillar stiffeners and bumper bars.

The quality of the pressed parts is critical to avoid problems in assembly and final product performance. Quality problems; Formability problems such as excessive compression or splitting, wrinkling caused by excessive stress, and dimensional accuracy problems caused by spring-back caused by elastic recovery. It has been found that controlling metal flow into the mold cavity is crucial for both part quality and dimensional accuracy. Various alternative mold processes are being evaluated for HSS. These focus primarily on better process control and various ways of inducing shape-adjusted tension in pressing. These processes include programmable pot rim to change the force-strike trajectory, draining rods to increase the confining force as the press approaches the sub-base, and flexible coupler technology for local control of the binder area. Adjusting the binding force in the process can provide better quality and improved part consistency.

Resistance spot welding, which is mentioned in the literature as Resistance Spot Welding (RSW), is applied by joining metals by applying pressure. In the method, current is passed through the bonding area for a long time. With the resistance of the welded materials to the current, heating occurs and melting and therefore the weld pool are formed. The weld pool formation is almost stopped by the application of current and pressure is applied and the combination process is completed with cooling under this pressure. The heat generated by time between metal plates is a product of the total resistance, square density of the current and the duration of the welding. Several parameters describe the resistance spot welding process, while the time and available force describe the welding process. The surfaces of sheet metal and the size, shape and thickness of the electrodes greatly affect the weld quality. It is possible to achieve the preferred core diameter by repositioning the welding time perfectly against the current density.

In this study, zinc coated HSLA sheet metal material was joined by spot welding 300 times under factory conditions. During the welding process, it was ensured that production was carried out under the most suitable conditions by testing under variable current intensity and at fixed times. After the welding trials, the dimensional measurements of the electrode (shortening of the electrode length) were examined and information about the life of the electrodes was obtained. With the help of dimensional measurement of the weld diameter in sheet material, microstructural studies and microhardness taken from the cross-section, information about weld hardness and collapse was obtained. Detection of spatter in HX340LAD + Z material was revealed by SEM imaging and EDS studies. As a result of experiments and analysis, it was determined which electrode was more efficient after a certain period of time.

First of all, the HX340 LAD + Z coded sheet materials, which are the basis of the study, were supplied from ERDEMİR A.Ş. in the form of zinc-coated rolls, and the slicing was carried out to YILDIZ KALIP A.Ş. It was carried out in-house. Test certificate of the product obtained from ERDEMİR A.Ş. By choosing HSLA steel as the material, the effect of zinc coating on spot welding has also been investigated.

The sample was cut in the laser cutting device to make the cut product dimensions of 1500 x 900 x 60 mm ready for spot welding. The areas of the sheet plates to be spot welded are divided into sections and made ready for welding. Three different electrode tip forms with a fixed diameter of 16 mm, which are mostly used in the automotive industry and in our factory, have been selected and spot welding has been started.

The parameters used during spot welding of the sheets with the above features are the current (A) provided that the electrode tip form and the welding current application

time are constant (ms). Before proceeding to the application experiments, preliminary tests were made on the sheet according to the spot resistance welding electrode tip types, and the parameters that could occur without spatter and adhesion were determined. Experimental studies were grouped and applications were carried out at different currents according to the electrode type. Application values / ranges of preferred parameters were found during spot welding. Experiments were carried out on a 120 kVA spot resistance welding machine from Mactera.

After cutting sheet metal samples containing three hundred electrode tips and 300th spot welding, the laboratories of the Technology and Application Research Center (Afyon Kocatepe University) and Afyon Kocatepe University, Faculty of Technology, Metallurgy and Materials Engineering Department are primarily abrasive. It was cut with cut stone and then polished with bakelite. For the polishing process, starting from 220G and using sandpaper up to 1200G, the surfaces were sanded and then it was brought to a mirror brightness by using 1 μm Alumina powder. After the polishing process, the microstructure was revealed by etching with 1% Nital. N-point source cross-sectional images were carefully taken using Olympus brand optical microscopes and then sent with devices in TUAM and Technology Faculty Research Laboratories for Microhardness measurement. While microstructure imaging was performed with SEM-LEO 1430 VP, additionally, element analysis was performed with OXFORD EDX device. Microhardness measurements of the sheet material taken from the welding interruption, the load applied in SHIMADZU HMV-2 device is 50 g, the time the load is applied is 10 seconds. As a result of microhardness measurements made in triplicate, evaluation was made on the average value. By making dimensional measurements of the sheet material and the electrode, information was obtained about the collapse in the sheet material and the wear on the electrode. In Figure 2.3, a visual about how dimensional measurements are made is presented.

Although there are no serious changes in the welding electrode before and after welding, it is seen that the F type electrode is exposed to the most shape change when the change in size or decrease in the amount of increase is observed. Due to the shape of the G type electrode, rather than having a more flat protrusion and having a more balanced pressing surface as in the B type electrode, the narrowness of the area that facilitates deformation and reduces the core thickness compared to others, can play an important role in the shape change. Further wear or decrease in size of lower electrodes is associated with increased heat input.

Unlike the F and G type electrodes, the high amount of corrosion may be that the electrode is completely zinc coated, allowing the formation of CuZn compound and more easily exposed to mass erosion. Although no investigation has been made in this regard, the absence of Copper on B type electrode surfaces and the presence of only Zinc in very high amounts indicates this direction. It is seen that Copper is encountered for G Type electrode, but due to the low amount of this amount, it is seen that a serious Copper transfer does not occur. Low Copper transfer, when considered in the other two electrode profiles, is a very important factor in reducing electrode wear. Although the elemental distribution is generally homogeneous, it is thought that it condenses and accumulates as a result of the presence of Zinc in the pores on the surface and the formation of zinc vapor on the surface and entrapment in the vaporization pores.

As a result of the physical and microstructural examinations of the welding area and electrode surface, the following conclusions have been reached. In the experiments with F type electrode tip, it is clearly seen that it gives better results compared to the

experiments made with the G type electrode tip, which gives good results. Accordingly, it is subject to deformation after a while due to heat accumulation. Weight loss may occur from the electrode material as a result of alloying with Zinc occurring at the welding of steels. The effect of G type electrode on microhardness is quite obvious. The hardness values of the electrode type G, B and F increase on average, respectively.

Keywords: Resistance Spot Welding, HSLA, Welding Current, Electrode Life.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

HSLA Çelikleri terim olarak yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (High Strength Low Alloy) çelikleri ifade etmektedir. HSS sınıfında yer alan çelikler, yüksek mukavemeti nedeniyle tercih edilirler.

Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı HSLA çelikleri, yüksek mukavemet seviyelerine ulaşmak için düşük karbonlu (% 0,02 - 0,13 C) çeliklere eklenen fosfor, manganez veya silisyum gibi az miktarda alaşım elementine sahiptir. Bu çeliklerde, çok ince bir ferrit tane boyutu oluşturmak için hızlı soğutma ile daha yüksek mukavemet elde edilir. Fosfor, nitrojen, silisyum ve manganez ile katı çözelti güçlendirilir. Vanadyum, nikel ve titanyum ile karbürlerin veya karbonitrürlerin oluşumu gerçekleşir. Bu çelikler, yumuşak çeliklerden daha iyi mekanik özelliklere, korozyon direncine ve kaynaklanabilirliğe sahiptir.

HSS, düşük karbonlu çeliklerin mukavemet / ağırlık oranını iyileştirmek için geliştirilmiştir. Mikro alaşımlama, eritme uygulaması, ısıl işlem veya bunların bir kombinasyonu ile daha yüksek mukavemetler elde edilir. HSS, çok çeşitli özellikleri ve mukavemet seviyelerini kapsar. HSS için bu limitler, 255-550 MPa akma mukavemet aralığındadır.

Bir otomotiv gövde yapısında yumuşak çelik yerine HSS kullanmak, performansından ödün vermeden ağırlığını yaklaşık %40 azaltabilir. Genel olarak, ağırlıkta %10'luk bir azalma, bir aracın yakıt ekonomisini yaklaşık %8 artırabilir [1].

HSS ve AHSS'nin bükülmesi, daha yüksek akma mukavemetleri ve daha düşük sünekliklerinden dolayı düz karbonlu çeliklere göre daha zordur. Bu, daha fazla güç, daha büyük bükülme yarıçapı, daha fazla kalıp boşluğu ve daha fazla geri esneme payı gerektirir. Bükülme alanındaki kesme çapaklarının giderilmesi ve köşelerin düzleştirilmesi gerekli olabilir. Mümkün olduğunda, bükülme ekseni yuvarlanma yönüne dik olmalıdır. Bükme ekseninin haddeleme yönüne paralel olması gerekiyorsa,

bükülmenin şiddetine bağlı olarak çapraz haddelenmiş malzeme kullanmak gerekli olabilir. HSS ve AHSS'nin akma mukavemetinin elastik modülüne yüksek oranından dolayı, şekillendirilen kısımda yumuşak çeliğe kıyasla daha büyük miktarda geri esneme oluşur.

Otomobillerde yapısal parçalar yüksek çarpma direnci gerektirir, belirli parçalarda bu durum malzeme kırılma tokluğuna ve sac kalınlığına bağlıdır. Mevcut üretimdeki yapısal bileşenlerin çoğu, 270 ila 540 MPa çekme mukavemetine sahip çelik saclardan yapılmıştır. Otomotiv uygulamaları için daha yüksek mukavemetli çeliklerin kullanılmasındaki önemli bir sorun, şekillendirilmiş parçaların geri yaylanma artışıdır. Sabit bir elastik modül için, sac metalin akma mukavemetindeki artış ile birlikte geri yaylanma artar. BIW (body-in-white, otomobil imalatında bir araba gövdesinin çerçevesinin birleştirildiği, yani boyamadan önceki aşamadır.), araçlardaki en ağır ve en büyük yapıdır. Orta büyüklükte bir binek otomobilin toplam ağırlığının yaklaşık %20 ila 30'unu oluşturur. BIW kütlesini yüksek mukavemet kullanarak azaltmak, önemli ölçüde ağırlık tasarrufu ve gelişmiş çarpışma direnci sağlayabilir. Bu tür uygulamaların örnekleri, darbe kirişleri, B-Pillar takviyeleri ve tampon çubuklardır.

Preslenmiş parçaların kalitesi, montajda ve nihai ürün performansında sorun yaşanmaması için kritiktir. Kalite sorunları; aşırı gerilimin neden olduğu aşırı sıkıştırma veya ayrılma, kırışma gibi şekillendirilebilirlik sorunlarından ve elastik toparlanmanın neden olduğu geri yaylanmadan kaynaklanan boyutsal doğruluk sorunlarından kaynaklanabilir. Kalıp boşluğuna metal akışını kontrol etmenin hem parça kalitesi hem de boyutsal doğruluk için çok önemli olduğu bulunmuştur. HSS için çeşitli alternatif kalıp işlemleri değerlendirilmektedir. Bunlar, öncelikle daha iyi işlem kontrolüne ve preslemede şekil ayarlı gerilmeyi tetiklemenin çeşitli yollarına odaklanır. Bu prosesler arasında, kuvvet-vuruş yörüngesini değiştirmek için programlanabilir pot çemberi, pres alt tabana yaklaşırken sınırlama kuvvetini arttırmak için süzdürme çubukları ve bağlayıcı alanın yerel kontrolü için esnek bağlayıcı teknolojisi bulunmaktadır. Proseste bağlayıcı kuvvetin ayarlanması, daha iyi kalite ve iyileştirilmiş parça tutarlılığı sağlayabilir.

Resistance Spot Welding (RSW) olarak literatüre geçen direnç punta kaynağı, metallerin basınç uygulanarak birleştirilmesi şeklinde uygulanır. Yöntemde birleştirme bölgesinden uzun süre akım geçirilir. Akıma, kaynak yapılan malzemelerin direnç göstermesi ile

ısınma söz konusu olur ve ergitme, dolayısıyla kaynak havuzu oluşur. Kaynak havuzu oluşumunu takriben akım uygulaması kesilerek basınç uygulanır ve bu basınç altında soğuma ile birleştirme işlemi tamamlanır. Metal levhalar arasında zamana göre oluşan ısı, toplam direncin, akım kare yoğunluğunun ve kaynak süresinin bir ürünüdür. Birkaç parametre direnç punta kaynağı işlemini açıklarken, zaman ve mevcut kuvvet ise kaynak işlemini açıklar. Sac metalin yüzeyleri ve elektrotların boyutu, şekli ve kalınlığı kaynak kalitesini büyük ölçüde etkiler. Kaynak süresinin akım yoğunluğuna karşı mükemmel bir şekilde yeniden konumlandırılmasıyla tercih edilen çekirdek çapını sağlamak mümkündür.

Bu çalışma da fabrika koşullarında çinko kaplamalı HSLA sac malzemenin nokta kaynağı ile birleştirilmesi 300 kez atılarak yapılmıştır. Kaynak prosesi esnasında değişken akım şiddeti altında ve sabit sürelerde denenerek en uygun koşullarda üretimin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Kaynak denemeleri sonrası elektrodun boyutsal ölçümleri (elektrot boyunda kısalma) incelenerek, elektrotların ömürleri hakkında bilgi edinilmiştir. Sac malzemedeki kaynak çapının boyutsal ölçümü, mikroyapısal incelemeler ve kesitten alınan mikrosertlik yardımıyla kaynak sertliği ile çökme hakkında bilgi edinilmiştir. HX340LAD+Z malzemesinde meydana gelen sıçrantıların tespiti SEM görüntüleme ve EDS çalışmaları ile ortaya çıkarılmıştır. Deneyler ve analizler neticesinde belli bir süre sonunda hangi elektrodun daha verimli olduğu belirlenmiştir.

İlk olarak, çalışmaya esas olan HX340 LAD+Z kodlu sac malzemelerin ERDEMİR A.Ş.'den temini çinko kaplı rulo halinde yapılmış olup, dilimlenmesi, 1500x640xR mm boyutlarında olacak şekilde YILDIZ KALIP A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilmiştir. ERDEMİR A.Ş.'den temin edilen ürünün test sertifikası alınmıştır. Malzeme olarak HSLA çeliği tercih edilerek çinko kaplamanın nokta kaynağına etkisi de incelenmiştir.

1500 x 900 x 60 mm Kesilen ürün boyutları nokta kaynağı için hazır hale getirilmek üzere, lazer kesim cihazında numune kesimi gerçekleştirilmiştir. Sac plakaların nokta kaynağı yapılacak alanları, bölmelere ayrılarak kaynak işlemi için hazır hale getirilmiştir. Otomotiv sektöründe ve fabrikamızda en çok kullanılan 16 mm sabit çaplı üç farklı elektrot uç formu seçilerek nokta kaynağına geçilmiştir.

Yukarıda özellikleri verilen sacların nokta kaynağı esnasında kullanılan parametreler elektrot uç formu ve kaynak akım uygulama süresi sabit olmak kaydıyla (ms) akım (A)

dır. Uygulama deneylerine geçmeden önce, nokta direnç kaynağı elektrot uç türlerine göre sac üzerinde ön denemeler yapılmış olup sıçrantı ve yapışma olmadan gerçekleşebildiği parametreler belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar gruplandırılmış ve elektrot tipine göre farklı akımlarda uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Nokta kaynağı esnasında tercih edilen parametrelerin uygulama değerleri/aralıkları bulunmuştur. Mactera marka, 120 kVA nokta direnç kaynağı makinasında deneyler gerçekleştirilmiştir.

Üç yüz adet kaynak yapılan elektrot uçları ve 300. Nokta kaynağının içeren sac numunelerin kesilmesinin ardından, Teknoloji ve Uygulama Araştırma Merkezi (Afyon Kocatepe Üniversitesi) ve Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında nokta kaynağının tam ortasında olacak şekilde öncelikle aşındırıcı kesme taşı ile kesilmiş ve daha sonra bakalite alınarak parlatılmıştır. Parlatma işlemi için 220G den başlanmış ve 1200G'ye kadar zımpara kullanılarak yüzeyler zımparalanmış ve daha sonra 1 μm alümina tozu kullanarak ayna parlaklığına getirilmiştir. Parlatma işleminin ardından %1'lik Nital ile dağlayarak mikroyapının ortaya çıkması sağlanmıştır. Nokta kaynağı kesit görüntüleri özellikle Olympus marka optik mikroskop kullanılarak optik resimleri çekilmiş ve daha sonra TUAM'da bulunan cihazlarla ve Teknoloji Fakültesi Araştırma Laboratuvarlarında Mikrosertlik ölçümü yapılmak üzere gönderilmiştir. Mikroyapı görüntüleme SEM-LEO 1430 VP ile yapılırken ek olarak OXFORD EDX cihazı ile element analiz yapılmıştır. Sac malzemenin kaynak kesintinden alınan mikrosertlik ölçümleri, SHIMADZU HMV-2 cihazında uygulanan yük 50 gr, yükün uygulandığı süre 10 sn'dir. Üç tekrarlı yapılan mikrosertlik ölçümleri neticesinde ortalama değer üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Sac malzemenin ve elektrota ait boyutsal ölçümler yapılarak sac malzemedeki çökme ve elektrottaki aşınma hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Şekil 2.3'de boyutsal ölçümlerin nasıl yapıldığı hakkında bir görsel sunulmuştur.

Kaynak öncesi ve sonrasında kaynak elektrodunda ciddi değişimler görülmemekle beraber, boyutlarındaki değişim veya azalma-artma miktarlarına bakıldığında, F tipi elektrodun en fazla şekilsel değişime maruz kaldığı görülmektedir. G tipi elektrodun şekli gereği, daha çok düz bir çıkıntıya sahip olması ve B tipi elektrot da olduğu gibi daha dengeli bir basma yüzeyi oluşumu yerine deformasyonu kolaylaştırıcı ve çekirdek kalınlığını azaltan alanın diğerlerine göre darlığı, şekil değişiminde önemli bir rol

oynayabilmektedir. Alt elektrotların daha fazla aşınması veya boylarının azalması, artan ısı girdisi ile ilişkilidir.

F ve G tipi elektrotların aksine, aşınma miktarının yüksek olması elektrodun tamamıyla çinko kaplanması ile CuZn bileşiğinin oluşumuna müsaade etmesi ve kütlesel aşınmaya daha kolay maruz kalması olabilir. Bu konuda, inceleme yapılmamış olmasına rağmen, B tipi elektrot yüzeylerde bakırın görülmemesi ve sadece çinkonun çok yüksek miktarlarda görülmesi bu yöne işaret etmektedir. G Tipi elektrot için bakıra rastlandığı görülmekte ancak bu miktarın düşük olması nedeniyle, ciddi bir bakır transferinin gerçekleşmediği görülmektedir. Düşük bakır transferi, diğer iki eletrod profili de dikkate alındığında, elektrot aşınmasının azaltılmasında oldukça önemli bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Elementel dağılım genel olarak homojen olmakla beraber yüzeydeki gözeneklerin içerisinde çinkonun bulunması yüzeyde çinko buharının oluşması ve buharlaşma ile beraber gözeneklerde hapsolması neticesinde, yoğunlaştığı ve biriktiği düşünülmektedir.

Kaynak bölgesindeki ve elektrot yüzeyine ait fiziksel ve mikroyapısal incelemeler neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır. F tipi eletrod uç yapılan denemelerde ise, iyi sonuç veren G tipi elektrot ucu ile yapılan deneylere göre, daha iyi sonuç verdiği açıkça görülmektedir. Nokta direnç kaynak elektrotları oldukça yüksek sıcaklıklara dayanmakta ve kaynak sırasında uygulanan baskı kuvvetinden dolayı ise, uygulanan baskı kuvvetinin veya nokta kaynaklarının sıklığına göre de ısı birikmesi nedeniyle de bir süre sonra deformasyona maruz kalmaktadır. Çeliklerin kaynağında ortaya çıkan çinko ile alaşımlandırma sonucu elektrot malzemesinden ağırlık kaybı ortaya çıkabilmektedir. G tipi elektrodun mikrosertlik üzerine etkisi oldukça belirgindir. Sertlik değerleri elektrot tipine göre G, B ve F sırasıyla ortalama olarak artmaktadır.

BÖLÜM 2. OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDEKİ ÇELİKLER

Otomotiv sektörüne yön veren üreticilerinin son zamanlarda tercih ettiği malzemeler dikkate alındığında magnezyum ve alüminyum gibi demir esaslı malzemelerin dışında hafif metallerin ve plastik esaslı malzemelerin de karoser üzerinde çok farklı bölgelerde kullanıldığı görülmektedir. Otomotiv sektörünün önemli kabul ettiği kriterlerin başında olan ekonomik araç üretiminin sonucu olarak otomobillerin hafiflemesi giderek daha büyük öneme sahip olmuştur. Otomobillerdeki hafiflik daha fazla önem arz ettikçe yakıttan da tasarruf sağlanmıştır.

Otomotiv sektöründe yolcu ve yaya güvenliği göz önüne alınarak malzemeler geliştirilmiş, ihtiyaca ve koşula bağlı seçimler ve iyileştirmeler yapılarak sektörde uygulamaya konmuştur. Kullanılan malzemeler içerisinde de en önemli yeri alan çelik malzemeler olmuştur.

2.1. Otomotiv Sektöründe AHSS Çelik Türleri

Otomobil çelikleri literatürde çok farklı şekillerde sınıflandırılmıştır. Çelikler içerdikleri karbon veya alaşım miktarı, üretim yöntemleri, boyutsal formları, mikroyapısal özellikleri, uygulanan termomekanik ve ısıl işlemleri ve benzeri işlemlere göre sınıflandırılabilmektedirler.

Literatürde AHSS türü yani geliştirilmiş yüksek mukavemetli çelikler için yapılan sınıflandırma aşağıda sunulmuştur;

- Martenzitik Çelikler (MART)
- Çift Fazlı Çelikler (DP)
- Yüksek Manganlı Çelikler (TWIP).
- Karmaşık Fazlı (Complex Phase) Çelikler

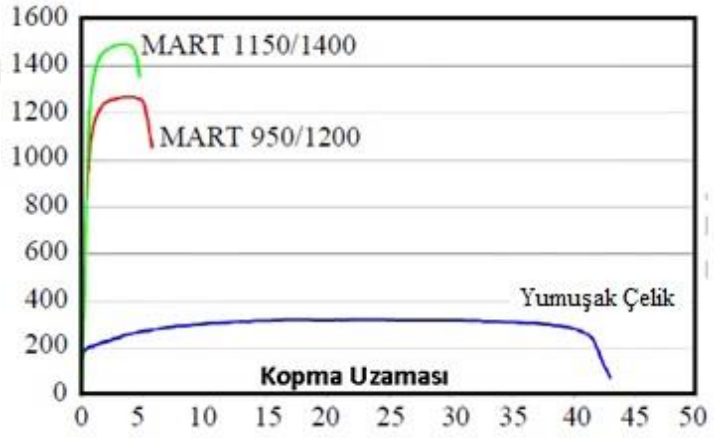
- TRIP Çelikleri (TRIP-Transformation Induced Plasticity)
- Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımlı Çelikler (HSLA)

2.1.1. Martenzitik çelikler

Martenzitik çelikler MART olarak belirtilen ve nihai üründe en yüksek mukavemet değerlerini (1500 MPa) sağlayan çeliklerdir. MART çeliklerinin mukavemeti ve sertliği içeriğindeki karbon miktarı ile doğru orantılı olarak artar. Bunun dışında da MART çeliklerinde manganez, krom, nikel, molibden, bor ve vanadyum gibi çeşitli alaşım elementleri de kullanılmaktadır.

Yüksek mukavemet değerlerine sahip bu çeliklerde sünekliği iyileştirmek ve yeterli şekillendirilebilirliği sağlayabilmek için temperleme işlemi yapılır.

Şekil 2.1'de yumuşak çelikler ile iki ayrı martenzitik çeliğin Gerinim-Gerilme eğrisinde durumları gösterilmiştir [2].



Şekil 2.1 : İki ayrı martenzitik çeliğin ve yumuşak çeliğin gerinim-gerilme grafiği.

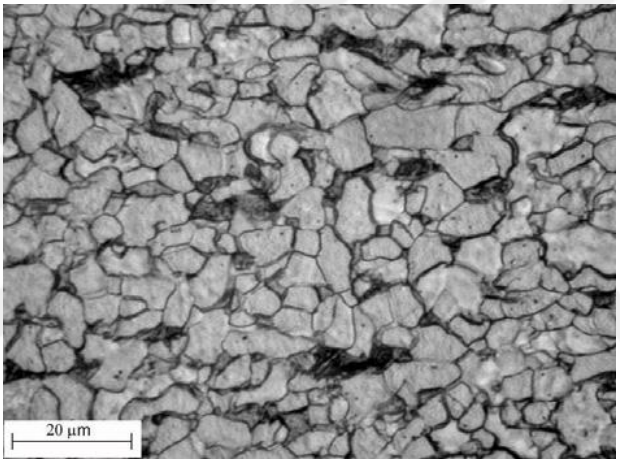
2.1.2. Çift fazlı (DP) çelikler

Çift fazlı bu çeliklerin mikroyapısı yumuşak ferrit matriks ile %10-40 oranında sert martenzit veya martenzit-östenitten oluşmaktadır. Bu yapı sayesinde mukavemet değerleri 500-1200 MPa değerlerine ulaşabilir.

DP çelikleri klasik yüksek mukavemetli çeliklere kıyasla aşağıdaki özelliklere sahiptirler:

- DP çelik mikroyapısının mukavemeti martenzit miktarı ile kontrol edilebilir,
- DP çelikleri akma noktası uzaması göstermez,
- DP çelikleri düşük UTS / YS oranına sahiptir
- Düşük karbon içeriği bulunan sınıfların mükemmel bir direnç sergilediği görülmüştür.

Şekil 2.2'de DP çeliğine ait mikroyapı gösterilmektedir [2].



Şekil 2.2 : DP çeliğine ait mikroyapı örneği.

2.1.3. Yüksek manganlı çelikler (TWIP)

TWIP çeliği, yüksek mangan içeren östenit fazında bir çeliktir. TWIP çelikleri, diğer yüksek mukavemetli çeliklerin aksine deformasyon mekanizmasını kayma dislokasyonunun yanında ikizlenme de içerirler. TWIP çeliğinin yüksek mukavemeti (>800 MPa), ikizlenme mekanizması sayesinde meydana gelmektedir [3].

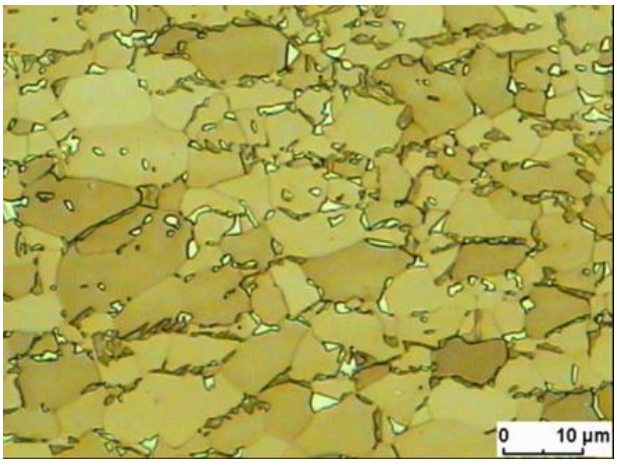
Ayrıca yüksek pekleşme değerlerinden dolayı boyun verme olayı daha geç meydana gelmekte, bunun sonucunda yüksek miktarda (>%40) uzama değerleri elde edilmektedir. Bununla birlikte TWIP çeliklerinin dezavantajı ise yüksek miktarda geri esnemeleridir [3].

2.1.4. Karmaşık fazlı (Complex phase) çelikler

Karmaşık fazlı çelikler CP olarak anılmakta ve mukavemet değerleri 600-1180 MPa aralığında olmaktadır. Bu çeliklerde, ferrit ve martenzitin yanı sıra bazı durumlarda beynit ve kalıntı östenit de bulunmaktadır. Bunların dışında tanecik boyutunu küçültmek için titanyum veya niyobyum alaşımları da içerebilirler. Kimyasal bileşim ve mikroyapıları itibari ile TRIP çeliklerine benzerlik gösteren bu çelikler yüksek sünekliğe ve delik flanşlama kabiliyetine sahiptirler [2].

2.1.5. TRIP çelikleri (TRIP-Transformation induced plasticity)

TRIP çelikleri Şekil 2.3'te görüldüğü gibi ferrit sınırlarına gömülmüş kalıntı östenit içeren bir mikroyapıya sahiptir. TRIP çeliklerinde bulunan bu kalıntı östenit fazı hem deformasyon sırasında çeliği sertleştirir martenzite dönüşür hem de yüksek bir lokal sertlik sağlar gerinimin erken birikmesini engelleyerek yüksek süneklik sağlar. TRIP'ler DP'lere göre daha sünektirler ve yine bu sayede darbe emilimleri daha yüksektir. TRIP çeliklerinde beynit ve martenzit fazı da belirli miktarlarda bulunmaktadır. Çok fazlı yapı sayesinde bu çeliklerin mekanik özellikleri iyidir [2].



Şekil 2.3 : TRIP çeliğine ait mikroyapısı örneği.

2.1.6. Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çelikler (HSLA)

Yüksek mukavemetli ve düşük alaşımlı olan mikro alaşımlı çelikler (HSLA), diğer yapı çeliklerine göre daha iyi mukavemet ve tokluk değerine sahiptirler. Karbon miktarı düşük kalitede olan mikro alaşımlı çeliklerin mukavemet değerlerini artıran etmenlerse

yapısında bulunan mikro alaşımı sağlayan katkı elementleridir. Bu mikro alaşımlı çelikler uygulanan ısıl işlemler neticesinde akma sınırı 500 N/mm² değerini yakalarken, tane boyut büyümesini ve sertliğini koruyabilmesi amacıyla mikroyapıya Nb, V, Ti elementleri eklenebilmektedir.

2.2. HSLA Çelikleri

HSLA Çelikleri terim olarak yüksek mukavemetli düşük alaşımlı (High Strength Low Alloy) çelikleri ifade etmektedir. HSS sınıfında yer alan çelikler, yüksek mukavemeti nedeniyle tercih edilirler.

Yüksek mukavemetli düşük alaşımlı HSLA çelikleri, yüksek mukavemet seviyelerine ulaşmak için düşük karbonlu (% 0,02 - 0,13 C) çeliklere eklenen fosfor, manganez veya silisyum gibi az miktarda alaşım elementine sahiptir. Bu çeliklerde, çok ince bir ferrit tane boyutu oluşturmak için hızlı soğutma ile daha yüksek mukavemet elde edilir. Fosfor, nitrojen, silisyum ve manganez ile katı çözelti güçlendirilir. Vanadyum, nikel ve titanyum ile karbürlerin veya karbonitrürlerin oluşumu gerçekleşir. Bu çelikler, yumuşak çeliklerden daha iyi mekanik özelliklere, korozyon direncine ve kaynaklanabilirliğe sahiptir [1].

HSLA çelikleri, sıcak haddelenmiş ürünler ve soğuk haddelenmiş sac olarak üretilmektedir. Bu çelikler, ısıl işlem uygulanmadan 485 MPa'ya kadar akma mukavemetine ulaşabilir. Bu çelik sınıfı düşük şekillendirilebilirliğe sahiptir ve derin çekilmiş parçalar için kullanılır [1].

2.2.1. HSLA çeliklerinin otomotivde kullanımı

Dış Panel : Denklem 2.1 de görüleceği üzere dış gövde panellerinde ağırlığı azaltmak, panel sertliğini artırmak ve çökme direncini (DR, Dent Resistance) artırmak için yüksek mukavemetli çelikler kullanılır. Çoğu dış panel 260 ila 340 MPa gerilme mukavemetine sahip çelik saclardan yapılmıştır. Bu, BH ve HSLA kalitelerini içerebilir. BH çelikleri genellikle kapılar, davlumbazlar, çamurluklar, güverte kapakları ve kamyon dorseleri yapmak için kullanılır. Bu tür uygulamalarda göçme direnci önemlidir.

Çökme direnci akma mukavemeti (YS) ve sac kalınlığındaki artışla aşağıdaki bağıntıya uygun olarak artar:

$$DR = K(YS)(t^m) \quad (2.1)$$

Burada m:1-3 arasında, K ise panelin şekline bağlı olarak bir sabittir.

HSS'de, mukavemetteki artış, kalınlığın azalması nedeniyle göçük direncindeki azalmayı telafi edebilir. Panel sertliği için durum böyle değildir. Panel sertliği denklem 2.2 de belirtildiği üzere, elastisite modülü (E) ve sac kalınlığındaki (t) artışla artar.

$$PS = K(E)(t^m) \quad (2.2)$$

Ağırlık tasarrufu için sac kalınlığının azaltılması, panel sertliğini düşürür ve bu da yüzey sapmasına neden olur. Kalınlık azalmasının panel sertliği üzerindeki olumsuz etkisi nedeniyle, aşağı doğru ölçme miktarı üzerinde sınırlar oluşturulmuştur. Dış paneller eğilme ve burkulmaya maruz kaldığından sertlik bu uygulama için mukavemetten daha önemlidir. Bu gibi durumlarda, yumuşak çelik yerine HSS ve AHSS'nin geçmesi gerçekleştirilemez.

ULSAC programı, BH 210, BH 260 ve DP 600 sınıfları kullanılarak yaklaşık %10'luk bir kütle azaltma elde edilebileceğini göstermiştir. Yapısal performanslar korunurken ve maliyet artışı olmadan kütlesel azalma sağlanmıştır.

İç Panel: İç paneller karmaşık şekillere sahiptir ve derin çekme ile oluşturulur. Bu uygulama için kullanılan yüksek mukavemetli çeliklerin çekme mukavemeti 260 ila 390 MPa arasındadır. Bu, BH ve HSLA kalitelerini içerebilir. Bununla birlikte, HSS'nin sınırlı biçimlendirilebilirliği nedeniyle karmaşık iç paneller, geleneksel biçimlendirme yöntemleri kullanılarak başarılı bir şekilde oluşturulamaz.

Şaşi Bileşenleri: Otomobillerde yapısal parçalar yüksek çarpma direnci gerektirir, belirli parçalarda bu durum malzeme kırılma tokluğuna ve sac kalınlığına bağlıdır. Mevcut üretimdeki yapısal bileşenlerin çoğu, 270 ila 540 MPa çekme mukavemetine sahip çelik saclardan yapılmıştır. Bu, daha kalın BH, HSLA vb. sınıfları içerebilir. Daha yüksek mukavemetli çeliklerin kullanımı bileşen kalınlığını azaltarak ağırlığı azaltma fırsatı sunar. Otomotiv uygulamaları için daha yüksek mukavemetli çeliklerin kullanılmasındaki önemli bir sorun, şekillendirilmiş parçaların geri yaylanmasındaki artıştır. Sabit bir elastik modül için, sac metalin akma mukavemetindeki artışla geri yaylanma artar. BIW (body-in-white, otomobil imalatında bir araba gövdesinin çerçevesinin birleştirildiği, yani boyamadan önceki aşamadır.), araçlardaki en ağır ve en büyük yapıdır. Orta büyüklükte

bir binek otomobilin toplam ağırlığının yaklaşık %20 ila 30'unu oluşturur. BIW kütlesini yüksek mukavemet kullanarak azaltmak, önemli ölçüde ağırlık tasarrufu ve gelişmiş çarpışma direnci sağlayabilir. Bu tür uygulamaların örnekleri, darbe kirişleri, B-Pillar takviyeleri ve tampon çubuklardır. BIW gövdedeki HSS ve AHSS içeriğinin, bu materyallerin daha fazlası ticari olarak temin edilebilir hale geldikçe ve yeni tasarımlar ve üretim yöntemleri uygulandıkça %50'nin üzerine çıkabileceği tahmin edilmektedir.

DP çeliklerinin uygulamaları arasında koltuk parçaları, tamponlar, kapı kirişleri, çerçeve bileşenleri, raylar ve sütunlar bulunur. Çarpışma direncini artıran tipik otomobil parçaları ön raylar, orta sütunlar, arka ve yan elemanlardır. Gövde yapılarına birçok DP çelik parça eklenerek yan darbe direnci geliştirilmiş ve ağırlık azalımı sağlanmıştır. Birkaç süspansiyon parçasında da TRIP çeliği kullanılarak %13 ağırlık azalımı sağlanmıştır.

Takım Tasarımı: HSS ve AHSS, özellikle kanal veya profil parçaları için parça bozulmalarına yol açabilecek esnemeye direnmek için daha sert bir kalıp gerektirir. Takım geometrisi, geri yaylanmanın nihai değerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Örneğin saf bükmede, daha büyük yarıçaplarda azalan bükülme kuvvetleri nedeniyle kalıp yarıçapındaki artışla geri yaylanma azalır. Bükmede, bükülme momenti eğriliğin yarıçapı ile ters orantılıdır, böylece geri yaylanma, eğriliğin yarıçapındaki bir artışla azalır. Bu, basit kuralların türetilebildiği, oldukça yumuşak yarıçaplar (yani, $R / t > 5$) için geçerlidir.

Delme yarıçapları oldukça keskin, HSS için yaklaşık 1t ve AHSS için 1t'den büyük olmalıdır. Birçok deney ve simülasyon, yan duvar kıvrılmasının yaklaşık olarak 2'ye eşit R / t yaklaşık olarak 2'ye eşit olduğunda neredeyse sıfıra gittiğini göstermektedir [1].

Metal şeritlerin bir dizi esnetme-bükme testinde, DP'deki kıvrılma, numune yüksek gerilim altında küçük bir yarıçap ($r / t < 1.5$) üzerinden çekildiğinde kaldırılmıştır. [4]. Küçük yarıçap, malzemeyi sabitlemek ve geri esnemeyi azaltmak için yüksek gerilime izin vermektedir.

Kalıp Prosesi: Preslenmiş parçaların kalitesi, montajda ve nihai ürün performansında sorun yaşanmaması için kritiktir. Kalite sorunları; aşırı gerilimin neden olduğu aşırı sıkıştırma veya ayrılma, kırışma gibi şekillendirilebilirlik sorunlarından ve elastik toparlanmanın neden olduğu geri yaylanmadan kaynaklanan boyutsal doğruluk sorunlarından kaynaklanabilir. Kalıp boşluğuna metal akışını kontrol etmenin hem parça

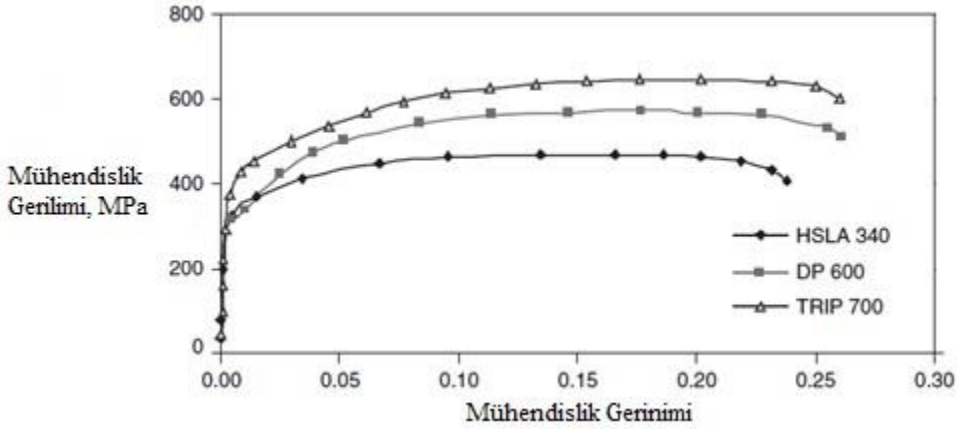
kalitesi hem de boyutsal doğruluk için çok önemli olduğu bulunmuştur. HSS için çeşitli alternatif kalıp işlemleri değerlendirilmektedir. Bunlar, öncelikle daha iyi işlem kontrolüne ve preslemede şekil ayarlı gerilmeyi tetiklemenin çeşitli yollarına odaklanır. Bu prosesler arasında, kuvvet-vuruş yörüngesini değiştirmek için programlanabilir pot çemberi, pres alt tabana yaklaşırken sınırlama kuvvetini arttırmak için süzdürme çubukları ve bağlayıcı alanın yerel kontrolü için esnek bağlayıcı teknolojisi bulunmaktadır. Proseste bağlayıcı kuvvetin ayarlanması, daha iyi kalite ve iyileştirilmiş parça tutarlılığı sağlayabilir. Mekanik presler, şekillendirme sırasında pot çemberi kuvvetinin daha fazla kontrolünü sağlamak için hidrolik çok silindirli yastık sistemleri ile yenilenmektedir [5].

Takım Aşınması: Proses kontrolünü sürdürmek ve pot üzerindeki bükülmeleri en aza indirmek için HSS ve AHSS'yi preslemek için yüksek pot basıncı gereklidir. Küçük yarıçaplı özellikler için yerel temas yükleri çok yüksek olabilir. Pot üzerindeki daha yüksek sıkıştırma kuvvetleri, daha iyi kalıp malzemesi, yüzey işlemleri ve yağlayıcılar gerektirecektir. Takımlar, kırılmayı önlemek için yeterli sertliğe ve uzun ömürlü çalışma ve üretim güvenilirliği için iyi aşınma direncine sahip olmalıdır. Kalıp yüzeylerinin tribolojik özelliklerini iyileştirmek için sert malzeme kaplamaları ve nitrürleme kullanılmıştır. Sert malzeme kaplamalarındaki yeni gelişmeler, kimyasal buhar biriktirme, fiziksel buhar biriktirme ve plazma destekli kimyasal buhar biriktirme kaplamalarındaki ilerlemeleri içerir. Yüksek mukavemetli malzemelerin preslenmesi sırasında aşınmayı azaltmak için yeni bir kimyasal buhar biriktirme kaplaması geliştirilmiştir. Ayrı ayrı titanyum karbür (TiC), titanyum karbonitrür (TiCN) ve titanyum nitrür (TiN) kaplama katmanlarının seçici kombinasyonlarını kullanır [6].

2.2.2. HSLA çeliklerinin mekanik özellikleri

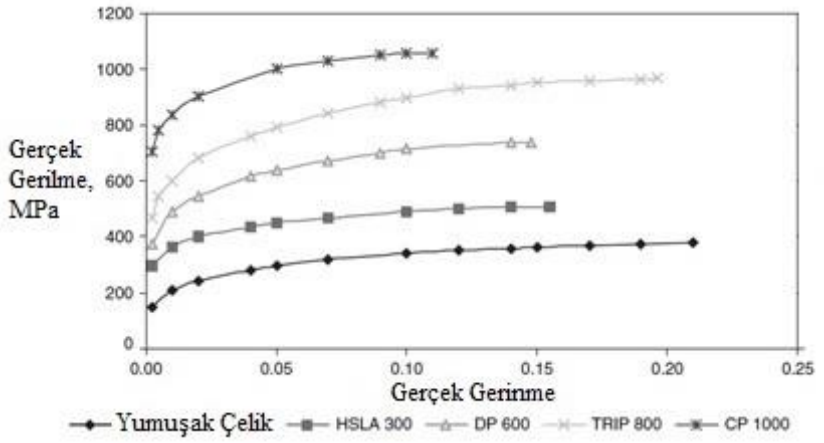
HSLA çelikler, esas olarak düşük-karbonlu çeliklerdir (%0.03 - 0.1 C) , Mn Nb, Ti ve V gibi alaşım elementleri içerirler ancak alaşım miktarı, sadece %0.1 civarındadır. Bunun için mikroalaşım olarak da isimlendirilmektedirler. Yapılarındaki ultra ince ferrit tane boyutunu üretmek için kontrollü koşullar altında sıcak haddelenmiştir. HSLA çelikleri, 275-550 MPa akma mukavemeti ve 415-690 MPa çekme mukavemeti değerlerine sahiptirler.

Çeşitli kalitelerde soğuk haddelenmiş, sıcak daldırma galvanizli HSS ve AHSS'nin (HSLA 340, DP 600, TRIP 700) tipik mühendislik gerinim-gerilme eğrileri arasındaki bir karşılaştırma Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



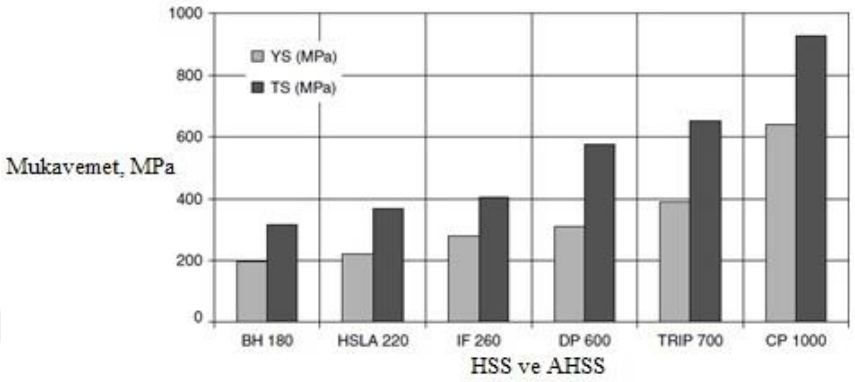
Şekil 2.4 : Çeşitli kalitelerde soğuk haddelenmiş, sıcak daldırma galvanizli HSS ve AHSS'nin mühendislik gerinim-gerilme eğrileri arasındaki bir karşılaştırma.

Yumuşak çeliğe kıyasla bu malzemelerin çekme mukavemetlerinde önemli bir artış olduğunu göstermektedir. Malzemeler aynı zamanda yüksek tokluklarından kaynaklanan enerji soğurma kabiliyetleri sayesinde üstün çarpışma performansı gösterirler. Çeşitli HSS ve AHSS sınıflarının (HSLA 300, DP 600, TRIP 800, CP 1000) gerçek gerilme-gerinim eğrileri Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Referans için yumuşak çelik dahil edilmiştir.



Şekil 2.5 : HSS ve AHSS sınıflarının (HSLA 300, DP 600, TRIP 800, CP 1000) gerçek gerinim-gerilme eğrileri.

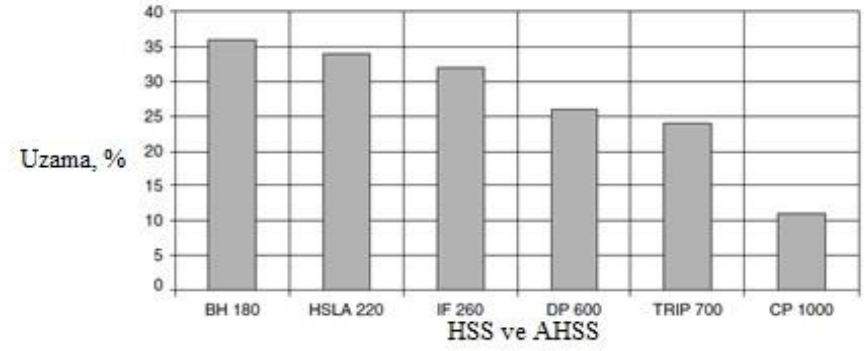
Çeşitli soğuk haddelenmiş, sıcak daldırma galvanizli HSS ve AHSS (BH 180, HSLA 220, IF 260, DP 600, TRIP 700, CP 1000) sınıflarının tipik mukavemet kaliteleri arasındaki bir karşılaştırma Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6 : Çeşitli soğuk haddelenmiş, sıcak daldırma galvanizli HSS ve AHSS (BH 180, HSLA 220, IF 260, DP 600, TRIP 700, CP 1000) sınıflarının tipik mukavemet kaliteleri.

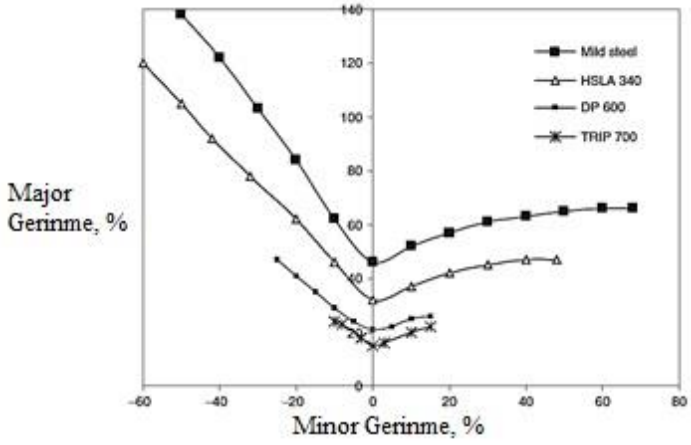
Aynı HSS ve AHSS kalitelerinin sünekliği arasındaki bir karşılaştırma Şekil 2.7''de gösterilmektedir. HSS ve AHSS'nin bükülmesi, daha yüksek akma mukavemetleri ve daha düşük süneklilikliklerinden dolayı düz karbonlu çeliklere göre daha zordur. Bu, daha fazla güç, daha büyük bükülme yarıçapı, daha fazla kalıp boşluğu ve daha fazla geri esneme payı gerektirir. Bükülme alanındaki kesme çapaklarının giderilmesi ve köşelerin düzleştirilmesi gerekli olabilir. Mümkün olduğunda, bükülme ekseni yuvarlanma yönüne dik olmalıdır. Bükme ekseninin haddeleme yönüne paralel olması gerekiyorsa, bükülmenin şiddetine bağlı olarak çapraz haddelenmiş malzeme kullanmak gerekli olabilir.

Geri esneme parçanın biçimlendirilmesi ve boşaltılmasından sonra kalıbın şeklinden parça şeklindeki boyuttaki değişimdir. Bir bölümün açısal değişimini (genel olarak geri esneme olarak adlandırılır) veya kıvrılmasını içerebilir. Genel olarak geri esneme, akma mukavemetinin elastik modülüne oranına bağlıdır. Daha yüksek bir akma mukavemeti veya daha düşük bir modül, belirli bir kesit kalınlığı ve takım tercihine göre geri esnemeyi arttırır. HSS ve AHSS'nin akma mukavemetinin elastik modülüne yüksek oranından dolayı, şekillendirilen kısımda yumuşak çeliğe kıyasla daha büyük miktarda geri esneme oluşur.



Şekil 2.7 : Aynı HSS ve AHSS kalitelerinin sünekliği arasındaki bir karşılaştırma.

Çelik sacın şekillendirme sınırları, doğrusal bir gerinim yolu ile oluşturulduğunda çeliğin sınır gerilimlerini gösteren bir şekillendirme-sınır diyagramı ile açıklanmaktadır. Şekillendirme-sınır diyagramı ile belirlenen çeşitli HSS, AHSS ve yumuşak çeliğin (referans için) şekillendirilebilirliği Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Şekil, şekillendirilebilirliğin mukavemetteki artışla genel düşüş eğilimini izlediğini göstermektedir [1].



Şekil 2.8 : HSS, AHSS ve yumuşak çeliğin şekillendirilebilirliği.

2.2.3. HSLA çeliklerin avantaj ve dezavantajları

Araçlardaki HSS ve AHSS içeriğinin, daha kaliteli ve daha fazla çeşitle ticari olarak temin edilmesi, yeni tasarım ve üretim yöntemlerinin gelişmesi ile artacağı beklenmektedir. Otomotiv uygulamalarında HSS ve AHSS kullanmanın başlıca avantajları arasında araç ağırlığını azaltma potansiyeli, artan çekme mukavemeti, geliştirilmiş yorgunluk ve darbe mukavemetleri ve ağırlık azalmasından kaynaklanan azaltılmış malzeme ve nakliye

maliyeti bulunmaktadır. HSS ve AHSS kullanmanın başlıca dezavantajları arasında kalınlığın azalması nedeniyle sertliğin azalması, akış gücünün artması nedeniyle artan geri yaylanma ve düşük süneklik nedeniyle sınırlı şekillendirilebilirlik yer alır. Malzemelerin yüksek mukavemeti nedeniyle çekme kalıbı yüzeylerinde artan takım aşınması da dezavantaja dahildir. Bununla birlikte, takım malzemelerinin iyileştirilmesi ve şekillendirme araçlarının yüzeyine koruyucu kaplamalar uygulanarak takım aşınması azaltılabilir. Diğer sorunlar olarak bu tür malzemelerin kaynaklanabilirliği ve boyanabilirliğini içerir [1].

2.3. Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kaynak Yöntemleri

Otomotiv imalat endüstrilerinde özlü ark kaynağı (FCAW), tozaltı ark kaynağı (SAW), tungsten ark kaynağı (GTAW), korumalı metal ark kaynağı (SMAW) ve direnç punta kaynağı (RSW) gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Bu yöntemler içerisinde direnç punta kaynağı tekrarlanabilirlik, ucuz ekipman, kolay kontrol edilebilirlik özellikleri ile yaygın kullanılan bir yöntemdir. Ayrıca metodun titanyum alaşımları, magnezyum alaşımları, alüminyum alaşımları, demir ve çelik esaslı malzeme gruplarında uygulanabilirliği, farklı malzemeleri bağlantı kabiliyeti yöntemi öne çıkaran hususlardır.

2.3.1. Direnç nokta kaynağı

Resistance Spot Welding (RSW) olarak literatüre geçen direnç punta kaynağı, metallerin basınç uygulanarak birleştirilmesi şeklinde uygulanır. Yöntemde birleştirme bölgesinden uzun süre akım geçirilir. Akıma, kaynak yapılan malzemelerin direnç göstermesi ile ısınma söz konusu olur ve ergitme, dolayısıyla kaynak havuzu oluşur. Kaynak havuzu oluşumunu takriben akım uygulaması kesilerek basınç uygulanır ve bu basınç altında soğuma ile birleştirme işlemi tamamlanır. Metal levhalar arasında zamana göre oluşan ısı, toplam direncin, akımın kare yoğunluğunun ve kaynak süresinin bir ürünüdür. Formülün [7] gösterdiği gibi, bazı faktörlerin üretilen ısı üzerinde etkisi vardır; aşağıdaki gibi verilir;

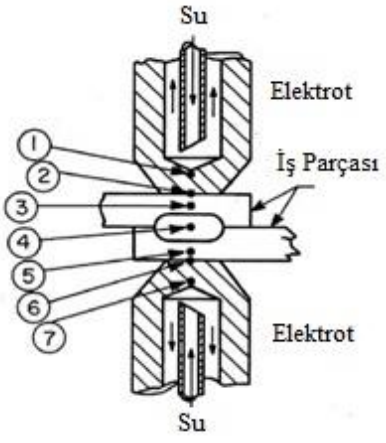
$$Q = I^2Rt \tag{2.3}$$

Direnç nokta kaynağı çalışma prensibi Joule ısıtma yasasına dayanmaktadır. Buna dayanarak denklem 2.3 de görüleceği üzere $Q = I^2Rt$ eşitliğinden faydalanılır. "Q" ısıyı, "I" akımı, "R" malzeme arayüz direncini, "t" ise zamanı ifade etmektedir.

2.3.2. Direnç nokta kaynağı çalışma prensibi

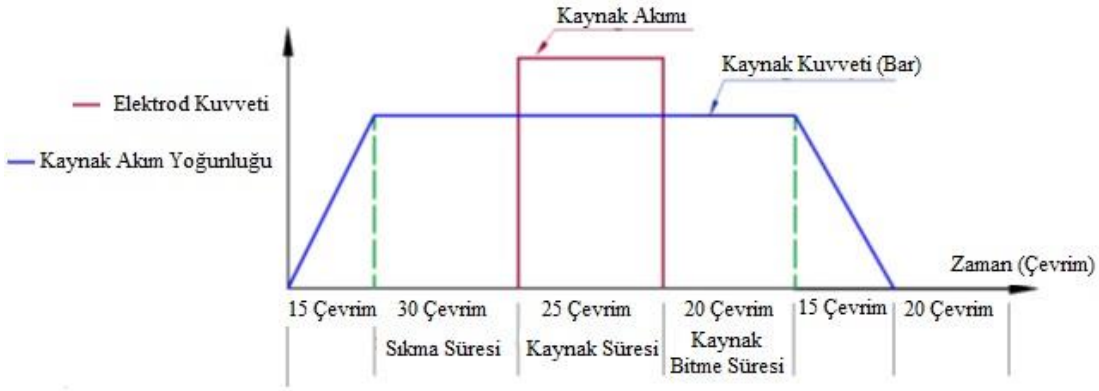
Uygulanabilir levha kalınlığı 0.5-3.0 mm aralığında olup, kaynak akımını istenilen lokal bölgeye uygulamak ve plakaları aynı anda birbirine kenetlemek için bakır alaşımlı iki elektrot Şekil 2.9'da 3 ve 5 numaralı elemanlar kullanılır. Elektrotların tuttuğu temas bölgesinden (Şekil 2.9'da 2 ve 6 numaralar) kısa sürede (yaklaşık olarak 10-100 ms) yüksek akım değerine maruz bırakılmaktadır. Bu esnada malzemenin akıma karşı direnç göstermesi aşırı ısınma meydana getirir bu sayede kaynak havuzu oluşturulur. Kaynak havuzu oluşumu ile akım kesilir ve elektrot baskı kuvveti ile ergiyen bölgeye basınç uygulanır. Malzemelerin kaynak havuzunun soğuyarak katılaşması ile birleştirme işlemi tamamlanır.

Şekil 2.9'da gösterildiği gibi iş parçası (3 ve 5 numaralar) elektrotlar (1 ve 7 numaralar) tarafından birlikte mekanik olarak itilir. İş parçasına kontak yüzeyler üzerinden (2 ve 6 numaralar) akım uygulanır. Elektrot soğutması, su vasıtası ile sistemde yapılmıştır.



(a)

Şekil 2.9 : (a) Direnç nokta kaynağı şematik gösterimi [8], (b) Kaynak zamanı parametreleri [9].



(b)

Şekil 2.9 (devam): (a) Direnç nokta kaynağı şematik gösterimi [8], (b) Kaynak zamanı parametreleri [9].

2.3.3. Çift fazlı çeliklerin direnç nokta kaynağı kullanılarak birleştirilmesi

Direnç punta kaynağı, metali tatmin edici bir sıcaklığa ısıtmak ve kaynak çekirdeğini oluşturmak için akım lokalize temas alanından geçirilirken, iki veya daha fazla örtüşen metalin preslenmesini içeren bir birleştirme tekniğidir [10].

Bununla birlikte, DP çeliğinin direnç noktası kaynak kabiliyeti, çok fazlı yapı özellikleri ve DP çeliğindeki nispeten daha yüksek alaşım seviyesi nedeniyle tipik HSLA çeliğine kıyasla daha dardır [11].

Punta kaynağının gerilme performansının yüksek oranda kaynak çekirdeğinin geometrik özelliklerine bağlı olduğu bilinmektedir [12, 13].

Bununla birlikte, füzyon bölgesinde (FZ-fusion zone) ve / veya ısıdan etkilenen bölgede (HAZ-heat affected zone) ortaya çıkan faz dönüşümleri, direnç noktası kaynaklı çift fazlı (RSW-DP) çeliğin gerilme özellikleri üzerinde büyük etkiye sahiptir [14].

2.3.4. Direnç nokta kaynağı parametreleri

Birkaç parametre direnç punta kaynağı işlemini açıklarken, zaman ve mevcut kuvvet ise kaynak işlemini açıklar.

Sac metalin yüzeyleri ve elektrotların boyutu, şekli ve kalınlığı kaynak kalitesini büyük ölçüde etkiler.

Kaynak süresinin akım yoğunluğuna karşı mükemmel bir şekilde yeniden konumlandırılmasıyla tercih edilen çekirdek çapını sağlamak mümkündür. Parametre değerleri, denklem 2.4 de görüleceği üzere en az $4\sqrt{t}$ çekirdek çapına izin verecek şekilde seçilmiştir. Burada t, direnç nokta kaynağından sonra elde edilebilecek sac kalınlığını ifade eder.

$$4\sqrt{t} \tag{2.4}$$

Nokta kaynağı parametreleri önemlidir, çünkü parametrelerin herhangi birinde küçük bir değişiklik bile kalan parametreleri etkiler. Kaynak kalitesini belirlerler. Kaynak süresinin kısa olması durumunda çekirdek çapı azalır. Bunun tersine, erimiş metal miktarı artar, bu da erimiş metalin fışkırmasına neden olur ve bu da kaynak bağlantı mukavemetinin azalmasına neden olur [3]. Bu sebeple deneysel metod ile en uygun parametrelerin incelenerek bulunması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır.

Özetle kaynak parametreleri için; akım, elektrot kuvveti, elektrot çapı, elektrot malzemesi, kaynaklanacak malzeme, süre gösterilebilir.

2.3.4.1. Kaynak akımı

Tüm kaynak parametreleri arasında kaynak akımı çok önemli bir parametredir. Kaynak akımı arttığında kaynak çekirdek boyutu hızla artar; ancak, yüksek akım elektrotu bozar ve atılmalara neden olur [15].

Kaynak akımı, teknik olarak ısı üretimi ve AC gücünün yoğunluğu ile bağlantılıdır. Tek fazlı AC, üretimde yaygın olarak tercih edilir. DC gücü ise daha yüksek akım yoğunlukları sağladığı için metalleri ve alaşımları kaynaklamak için kullanılır. [16] Bir DC sistemi AHSS kaynağında, güç gereksinimini azaltır ve direnç nokta kaynağını verimli hale getirir [17].

Aslanlar [3] tarafından direnç nokta kaynağında, kaynak akımını iki faktörün kontrol ettiğini ileri sürülmüştür; Maksimum kaynak akımını belirleyen trafo kademe anahtarı ayarı ve kaynak için mevcut akımın değerlendirilmesine yardımcı olan akım kontrol yüzdesidir. Düşük yüzdeli kaynaklar için akımlar genellikle tavsiye edilmez çünkü kaynak kalitesini düşürebilirler.

2.3.4.2. Kaynak süresi

Teknik olarak, bir RSW işleminin Şekil 2.9'da belirtilen dört süresi vardır. Sıkma, kaynak, tutma ve son bırakmayı içerir. Kaynak süresi, malzemenin türüne, kalitesine ve verimliliğine bağlıdır. Sıkıştırma aralıklarında metal levhalar elektrotlar yardımı ile konumlandırılır ve kenetlenir. Elektrot kuvveti gerekli seviyeye ulaşır ulaşmaz, akım uygulanarak kaynak işlemine başlanır. Olduğunda erimeye ve birleşmeye yol açar [9]. Burada sıkıştırma süresi, elektrot kuvveti ile bir iş parçası üzerindeki ilk uygulaması arasındaki süreyi ifade eder.

Kaynak akımı, elektrot kuvvetinin gerekli seviyeye ulaşması sağlanana kadar ertelenmelidir; bu nedenle kaynak işleminin süresi / süresi hesaplanır ve tüm zamanlama fonksiyonlarında olduğu gibi hat gerilimi çevrimlerinde ayarlanır. Uzun bir süre devam ederse, erimiş metal miktarı artar, bu da metalin yüzeyi bir mikroskopla gözlendiğinde açık olan, tepeler ve çukurlar oluşturan kaynaşmış metalin fışkırmasıyla sonuçlanır; böylece kristal yapı değişir. Elektrotların bağlantısı aniden kesilirse, temas yüzeyini koyulaştıran ısı dağılımı meydana gelir. Bir kaynak işlemi sona erdiğinde, kaynak elektrotlar kullanılarak soğutulur. Tutma süresi, elektrot için önemlidir çünkü kaynak havuzunu katılaştırır; ancak, ısıyı bir kaynak noktasına yaydığı için süre çok uzun olmamalıdır. Örneğin, uzun süreli elektrotu tutma yalnızca galvanizli karbon çeliği kaynak yapıldığında önerilir [3, 7].

2.3.4.3. Kaynak kuvveti

Elektrot kuvvetinin arkasındaki temel amaç, metal levhaları bir araya getirerek birleştirmektir. Elektrot kuvvetine ihtiyacı vardır; aksi takdirde kaynak kalitesi önemli olamaz. Ek olarak, artan elektrot kuvveti ısı enerjisini azaltır, bu da daha yüksek elektrot kuvveti gerektireceği anlamına gelir. Daha yüksek kaynak akımı, levhalar ve elektrotlar arasında sıçramaya neden olur. Elektrotların tabakalara yapışmasına neden olur. Elektrot kuvveti 700kg / cm2'dir ve bu yeterli olan hedef değerdir [3, 7,18].

Elektrot kuvveti yüksek olduğunda, düşük dirence ve gelişmiş ara yüz temasına yol açar, bu da kaynak sırasında daha az ısı oluşumuyla sonuçlanır. Arttırılmış kaynak süresi veya akım girişi [19] yoluyla telafi edilmelidir. Ayrıca, aşırı bir elektrodun kuvveti daha yüksek iş parçası girintisine neden olur [16].

Diğer bir sorun da kaynak işlemi sırasında temas yüzeyinin artmasıdır. Benzer koşulları sürdürmek için; yavaş yavaş elektrot kuvveti artırılmalıdır. "Mantar gibi" elektrotlar nedeniyle elektrot kuvvetini değiştirmek zor olduğundan; bu nedenle ortalama değer seçilir [3, 7]. Çok düşük kaynak kuvveti durumunda, yüksek temas direnci nedeniyle kaynak akımı uygulandığında, sonuçta anında ısı oluşumuyla sonuçlanan [20] anında dışarı atılmasına neden olur.

Yüksek sıkıştırma kuvveti olduğunda, geniş temas alanı düşük temas direncine ve akım yoğunluğuna yol açar, bu da ısı oluşumunu azaltır ve kaynak çekirdek boyutunu sınırlar. Çok yüksek basınç durumunda tabaka malzemesi yumuşar [21].

Yüksek girintiye ihtiyaç duyulmadığında veya tabaka malzemesinin deformasyonu gerçekleştiğinde konsantrasyon noktalarında baskı oluşturabilir. Artan elektrot kuvveti nihayetinde temas direncini azaltır. Temas direnci, belirli bir basınçtan sonra tekdüze hale gelir [21].

Elektrot kuvveti artırılırsa ısı enerjisi azalır; bu nedenle, bir kaynak bağlantısındaki yüksek basınç, elektrot uçları ile temas noktasının bulunduğu parçaların yüzeyi arasındaki direnci azaltır [3,7]. Yüksek elektrot kuvvetinin yüksek kaynak akımına eşlik etmesi gerektiği anlamına gelir. Uçlar üzerindeki çok düşük basınç nedeniyle büyük olasılıkla kaynak sıçramasına neden olur. Aynı zamanda çok yüksek kaynak akımı olduğunda da olur [22]. Basınç çok yüksek olduğunda, düşük nokta kaynağına neden olur. Bu, artan basıncın ısıyı ve elektrik akımını geniş bir alana aktarması, ancak kaynak alanını ve penetrasyonu azaltacağı anlamına gelir [23].

2.3.5. Direnç nokta kaynağında kullanılan elektrot türleri

Elektrot boyut ve şekline bağlı olarak kaynak sonucu etkilenmektedir. Farklı geometrilere sahip elektrot türleri Şekil 2.10'da verilirken kontak bölgesi ve açısının değişimine bağlı kaynak sonucu değişmektedir. Elektrot çapı, sac kalınlığına uygun olarak seçilir [24] Kaynak esnasında meydana gelen temas, kaynak akımını ve temas basıncını etkiler. Elektrotta oluşan degregasyon olmaması için doğru elektrot seçimi önemlidir. Degregasyon sonucu aşınan elektrot ucu düz bir yüzey görünümüne sahip olur. Kaynak devam ettirilmesi halinde konkav bir yüzey görünümüne sebep olur. Elektrot geometrisi ISO standartlarınca belirlenerek ISO 5821:2009 detaylı bilgi aktarılmıştır [25].



Şekil 2.10 : Farklı geometrilere sahip elektrot türleri.

Elektrodun, sertlik ve elektriksel iletkenliği kaynak esnasında en önemli parametrelerdir. Doğru malzeme seçimi ISO 5182:2008 standardı gereği bakır alaşımı olduğu belirtilmiştir. Daha dirençli nikel, kobalt, berilyum alaşımlar, yüksek mukavemetli çeliklerde tercih edilir [26].

Direnç nokta kaynağında, denklem 2.5 de görüleceği üzere sac malzemenin kalınlığına (t) bağlı olarak oluşan çekirdek çapı ($N_{çap}$) hesaplanabilir [22]. Basit olarak 1 mm kalınlığında iki sacın birleştirilmesi sonucu 5 mm çekirdek çapı oluşur. Aşağıdaki formüle göre hesap yapılmaktadır [27].

$$N_{çap} = 5t^{0,5} \tag{2.5}$$

Elektrot çapını arttırdığımızda elektrot ile sac metal arasındaki temas yüzey alanı artmaktadır. Kaynak bölgesinde ara yüzey incelendiğinde akım yoğunluğu düşmektedir. Benzer olarak elektrot malzemesinin alaşım miktarı ve elektrodun kaplanan malzemesi, elektrik iletkenliğini düşürebilmektedir. Bahsedilen etkiler beraber düşünüldüğünde çekirdek çapı boyutundaki azalmayı arttırır. Elde edilen çekirdek çapının başarısı kaynak kalitesini netice olarak elektrot ömrünü etkilemektedir. Elektrotta meydana gelen ve ömrünü etkileyen yumuşama, çap büyümesi, oyuklanma, rekristalizasyon temel sorunların başında gelmektedir [28].

2.3.6. Çift fazlı çeliklerde direnç nokta kaynağı sonrası çökmenin oluşumu

Penetrasyon derinliği bir nevi nüfuziyet, kalınlık yönü boyunca erimiş alan genişliği olarak tanımlanabilir. Küçük penetrasyon yetersiz ısıtmaya ve soğuk kaynağa işaret edebilir. Genel olarak, büyük bir penetrasyon istenir. Bununla birlikte, ısınma miktarı

penetrasyonu belirlediğinden, büyük penetrasyon malzemelerin yumuşamasına ve elektrotlar tarafından olası büyük girintilere neden olur. Genel olarak, nüfuz etme gereksinimleri gevşektir, ancak çok büyük bir deformasyon oluşturmayacaksa büyük penetrasyon kabul edilecektir [29].

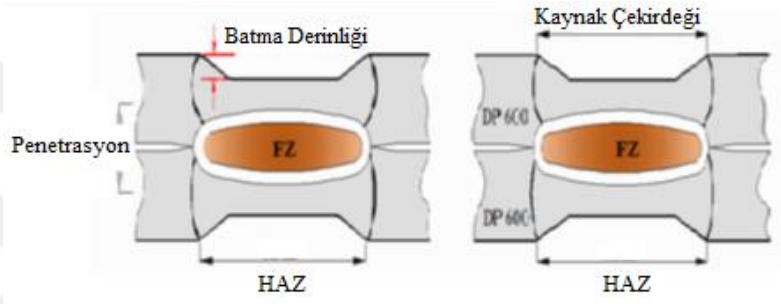
Daha önce de belirttiğimiz gibi, kaynak kabiliyetinin en önemli faktörü elektrodun kullanım ömrüdür, bu da ayarlanan sınırlar içinde oluşturulabilecek kaynak sayısı anlamına gelir. Çekirdek çapları (DN) etkisi, çekirdek yüksekliği (HN) elektrot girintisi ve çekirdek boyut oranları (HN/ND) da ölçülebilmektedir. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.11 ile yerleştirilerek ve elde edilen sonuçlar kullanılarak, çekme kayma mukavemeti ve mikrosertlik üzerindeki darbe ve çekirdek boyutu etkisinin numune boyutu araştırılmıştır [7, 30]. Çekirdeğin çapı, DN veya çekirdek yüksekliği, HN, kaynak merkezindeki kayma gerilimi üzerindeki etkisini basitleştirmek için yeterli değildir. Böylece çekirdek oranı HN / DN bu nedenle ayarlanabilir [30, 31]. Sac kalınlık aralıkları ve çeşitli uygulamalar için en küçük çekirdek çapına sahip bir tablo örneği Tablo 2.1'de açıklanmıştır.

Tablo 2.1: Sac kalınlığına bağlı minumum istenen çekirdek çapı [19].

Sac kalınlığı	Minimum çekirdek çapı [mm]	
[mm]	Kategori A & B	Kategori C
≥ 0,50 < 0,60	2,5	2,2
≥ 0,60 < 0,70	2,8	2,4
≥ 0,70 < 0,85	3,0	2,7
≥ 0,85 < 1,10	3,5	3,0
≥ 1,10 < 1,25	3,9	3,3
≥ 1,25 < 1,50	4,1	3,5
≥ 1,50 < 1,60	4,3	3,7
≥ 1,60 < 1,75	4,4	3,8
≥ 1,75 ≤ 1,80	4,7	4,0
> 1,80 ≤ 2,00	5,0	4,2
> 2,00 ≤ 2,25	5,3	4,5
> 2,25 ≤ 2,50	5,5	4,8
> 2,50 ≤ 3,00	6,0	5,2



Şekil 2.11 : Direnç Nokta Kaynağında penetrasyon oluşumu [32, 33, 34].



Şekil 2.12 : Direnç Nokta Kaynağında çökmenin oluşumu [26].

Punta kaynaklarının mekanik özelliklerini oluşturan ve etkileyen elektrot girintisinin Şekil 2.12'de görüldüğü üzere girinti derinliği elektrot / levha ara yüzünün sıcaklığına ve elektrot basıncına bağlıdır. Isı girdisi arttığında elektrot / tabaka ara yüzünün sıcaklığı artar, bu da elektrodun basıncı altında levha yüzeyinde meydana gelebilecek plastik deformasyon derecesini artırır [35]. Girinti derinliğini en az seviyede tutmak için kaynak parametrelerini ve elektrot geometrisini kontrol etmek gerekir. FZ ve HAZ'ın sertliği ve malzeme özellikleri: kaynak ısıl döngü etkileşimi, ana malzemenin ilk mikroyapısı ve kimyasal bileşim FZ ve HAZ'ın Sertlik ve malzeme özelliklerini kontrol eder. HAZ boyutu: FZ'den çevreye ısı transferi HAZ'ın boyutunu belirler. Birçok araştırmacı, HAZ boyutunun nokta kaynaklı bağlantıların sünekliği üzerinde bir etki yapabileceğinden bahsetmiştir [13]. Ana malzemenin mikroyapısı, kimyasal bileşimi ve kaynak termal çevriminin etkileşimi, FZ ve HAZ'ın sertliğini ve malzeme özelliklerini kontrol eder.

2.3.7. Direnç nokta kaynağı birleşiminin mikroyapısal incelemesi

Direnç nokta kaynağı sayesinde, kaynak metalinin ve ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) metalurjik ve mekanik özelliklerinde birçok değişiklik meydana gelir. Bu değişikliklerin incelenmesi, kaynaklı bağlantıların sağlamlığı, güvenliği ve korunması için önemlidir [36]. Metalin kaynak sonrası mikroyapısı, kaynak işlemi öncesi metalin mikroyapısından farklıdır ve bu malzemelerin şekillendirilebilirliğini ve mukavemetini belirlemede kilit noktadır [37].

Kaynak çekirdeğini etkileyen faktörlerin başında ısıdan etkilenen bölge (HAZ) gelmektedir. Kaynak sonrası malzemenin sıcaklığı yükselirken ergime sonrası katılaşma ile faz dönüşümü gerçekleşir. Kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak iki tip soğuma faz sıralaması mevcuttur [38, 39].

1. Sıvı-delta ferrit, östenit, martenzit ve/veya beynit.
2. Sıvı, östenit, martenzit ve/veya beynit.

Kimyasal bileşim ve soğutma hızı, sonuçtaki mikroyapısal bileşimi, bunun beynitik, martenzitik veya her ikisinin bir karışımı olup olmayacağını belirler. Düşük soğutma oranlarında ve/veya daha düşük alaşımlama seviyelerinde, elde edilen mikroyapı tipik olarak beynitik olacaktır. Artan alaşım seviyelerinde ve yeterince yüksek soğutma oranlarında, ortaya çıkan mikroyapı çoğunlukla martenzitik olacaktır. Kaynak çekirdeğinin kaynak sonrası mikroyapısal kompozisyonuna rağmen, esas olarak katılaşması ve Şekil 2.13'de gösterildiği gibi soğutma boyunca sıcaklık değişimi ile belirlenen, tanelerin ve boyutunun kaynak üzerinde önemli bir etkisi vardır.



Şekil 2.13 : Üç adet sacın birbirine kaynaklandığı yapının mikroyapısı. Tanelerin, kaynak çekirdeğinden dışarıya doğru soğutma doğrultusunda yönlenmesi [40].

BÖLÜM 3. MATERYAL VE METOD

Bu bölümde, bu çalışma sırasında kullanılan malzemelerin ve test tekniklerinin içerikleri verilmiştir. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi sırasında, kullanılan cihazların ve prosedürlerin açıklamaları yapılmıştır.

3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemeler

İlk olarak, çalışmaya esas olan ERDEMİR 1634 kodlu sac malzemelerin ERDEMIR A.Ş.'den temini çinko kaplı rulo halinde yapılmış olup, dilimlenmesi, 1500x640xR mm boyutlarında olacak şekilde YILDIZ KALIP A.Ş. bünyesinde gerçekleştirilmiştir. ERDEMİR A.Ş.'den temin edilen ürünün test sertifikası Şekil 3.1.'de sunulmuştur. Malzeme olarak HX340 LAD+Z çeliği tercih edilerek çinko kaplamanın nokta kaynağına etkisi de incelenmiştir.

EREĞLİ DEMİR VE ÇELİK FABRİKALARI T.A.Ş.

ÇIKARTILMIŞ SERMAYE: 3.500.000.000 TL
ÜRETİM YERİ :

TEST SERTIFIKASI
EN 10204 : 2004 TYPE 2.2

TARİH : 04.11.2020
SERTİFİKA NO : 0129167Y
SAYFA NO : 1

MÜŞTERİ ADI : ERDEMIR ÇELIK SERVIS MERKEZI SAN.TIC.A.Ş.
SİPARİŞ NO : 8222784003
EBAT, mm : 1.500 x 1286 x R
STANDART ve KALİTESİ : EN 10346-2015 HX340LAD+Z (ERDEMİR 1634)
ÜRÜN TİPİ ve AÇIKLAMASI : GZRB: ÇINKO KAPLI B YüZEY GALVANIZE RULO

KAPLAMA AĞIRLIĞI : 100.00/(GR/M2)
YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ : 1.10/1.70

ÜRÜN BİLGİLERİ					MEKANİK ÖZELLİKLER														KİMYASAL BİLEŞİM, POTA ANALİZİ %										
ETİKET NO	AĞIRLIK (kg)	DÖKÜM NO	BOBİN veya LEVHA NO	DİLİM veya LEVHA ADET	ÇEKME TESTİ				KAT LAMA	AĞ veya BH DEĞ.	r DEĞ	A/C veya n DEĞ.	SERTLİK	DARBE TESTİ, joule ÇÖMÜ :					YÜK. SIC. °c AKMA N/MM2	C %	MN %	P %	S %	SI %	AL %	V %	NB %	TI %		
					NUM. YER.	AKMA N/MM2	ÇEKME N/MM2	% UZ. A5						1	2	3	ORT.	SIC. °C											
3800120397	7930	13472	20135142200		BE	396.2	471.7	27										+ 00		0.074	0.623	0.018	0.006	0.010	0.043	0.035	0.040		

Şekil 3.1 : Rulo olarak temin edilen sac malzemeye ait test sertifikası.

1500 x 900 x 60 mm Kesilen ürün boyutları nokta kaynağı için hazır hale getirilmek üzere, lazer kesim cihazında numune kesimi gerçekleştirilmiştir. Sac plakaların nokta kaynağı yapılacak alanları, bölmelere ayrılarak kaynak işlemi için hazır hale getirilmiştir.

3.2. Direnç Nokta Kaynak Parametreleri

1500 x 900 x 60 mm Kesilen ürün boyutları nokta kaynağı için hazır hale getirilmek üzere, lazer kesim cihazında numune kesimi gerçekleştirilmiştir. Sac plakaların nokta kaynağı yapılacak alanları, bölmelere ayrılarak kaynak işlemi için hazır hale getirilmiştir. Otomotiv sektöründe ve fabrikamızda en çok kullanılan sabit çaplı üç farklı elektrot uç formu seçilerek nokta kaynağına geçilmiştir. Şekil 3.2'de ALBAKSAN'dan temin edilip kullanılan elektrot türlerine (G, F ve B) dair görseller paylaşılmıştır. G uç formu dış panel sayılan bagaj kapağının puntalanmasında tercih edilir. Bu sebeple genellikle baskı kuvvetinin yüksek olması istenir. B formu motor traversi hattında kaynağın daha az belirgin olması gereken ve sıcaklığa dayanım istenen yerlerde kullanılır. Bu sebeple nokta kaynak görünüşünün düzgün olması istenir. Aynı şekilde F elektrot motor traversi hattında fakat ekonomik olduğu için B elektrota muadil olarak tercih edilir.



Şekil 3.2 : Tercih edilen farklı tip elektrotlar. Tip G, F ve B

Yukarıda özellikleri verilen sacların nokta kaynağı esnasında kullanılan parametreler elektrot uç formu ve kaynak akım uygulama süresi sabit olmak kaydıyla (ms) akım (A) dır. Uygulama deneylerine geçmeden önce, nokta direnç kaynağı elektrot uç türlerine göre sac üzerinde ön denemeler yapılmış olup sıçrantı ve yapışma olmadan gerçekleşebildiği parametreler belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar gruplandırılmış ve elektrot tipine göre farklı akımlarda uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Nokta kaynağı esnasında tercih edilen parametrelerin uygulama değerleri / aralıkları Tablo 3.1'de verilmiştir. Mactera marka, 120 kVA nokta direnç kaynağı makinasında deneyler gerçekleştirilmiştir. Fabrika koşullarında üretim parametreleri denenerek mevcut koşullardaki üretimin karakterizasyonu ve fiziksel özelliklerinin tayini sağlanmıştır.

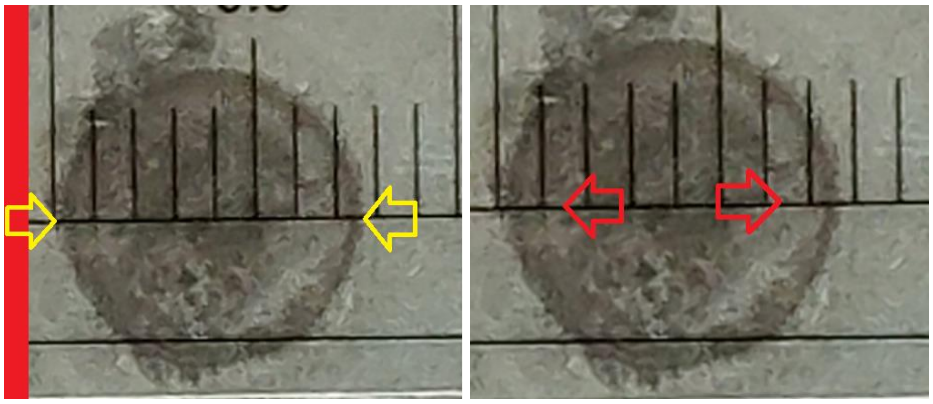
Tablo 3.1: Kaynak deneyleri esnasında kullanılan parametreler.

Elektrot Türü	Test No	Zaman (ms)	Elektrot Baskı Kuvveti (kN)	Akım (kA)
G	10	300 ms	3,5 kN	6,5 kA
G	11	300 ms	3,5 kN	7 kA
G	12	300 ms	3,5 kN	7,5 kA
B	13	300 ms	3,5 kN	7,2 kA
B	14	300 ms	3,5 kN	7,7 kA
B	15	300 ms	3,5 kN	8,2 kA
F	16	300 ms	3,5 kN	6 kA
F	17	300 ms	3,5 kN	6,5 kA
F	18	300 ms	3,5 kN	7 kA

3.3. Kaynakların Mikroyapısal Karakterizasyon ve Fiziksel Özellik Tayini

300 adet kaynak yapılan elektrot uçları ve 300. nokta kaynağının içeren sac numunelerin kesilmesinin ardından, Teknoloji ve Uygulama Araştırma Merkezi (Afyon Kocatepe Üniversitesi) ve Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında nokta kaynağının tam ortasında olacak şekilde öncelikle aşındırıcı kesme taşı ile kesilmiş ve daha sonra bakalite alınarak parlatılmıştır. Parlatma işlemi için 220G den başlanmış ve 1200G'ye kadar zımpara kullanılarak yüzeyler zımparalanmış ve daha sonra 1 mikrometrelik alümina tozu kullanarak ayna parlaklığına getirilmiştir. Parlatma işleminin ardından %1'lik Nital ile dağlayarak mikroyapının ortaya çıkması sağlanmıştır. Nokta kaynağı kesit görüntüleri özellikle Olympus marka optik mikroskop kullanılarak optik resimleri çekilmiş ve daha sonra TUAM'da bulunan cihazlarla SEM-EDS ve EDX analizleri ve Mikrosertlik ölçümü yapılmıştır. Mikroyapı görüntüleme SEM-LEO 1430 VP ile yapılırken ek olarak OXFORD EDX cihazı ile element analiz yapılmıştır. Sac malzemenin kaynak kesintinden alınan mikrosertlik ölçümleri, SHIMADZU HMV-2 cihazında uygulanan yük 50 gr, yükün uygulandığı süre 10 sn'dir. Üç tekrarlı yapılan mikrosertlik ölçümleri neticesinde ortalama değer üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Sac malzemenin ve elektrota ait boyutsal ölçümler yapılarak sac malzemedeki çökme ve elektrottaki aşınma hakkında

bilgi sahibi olunmuştur. Şekil 3.3'de boyutsal ölçümlerin nasıl yapıldığı hakkında bir görsel sunulmuştur.



Şekil 3.3 : (a) Kaynak çekirdek çapının çapı, (b) Kaynak çekirdeğinin merkez çapı

BÖLÜM 4. DENEYSEL SONUÇLAR

4.1. Giriş

Bu bölümde, GZR1634 çinko kaplanmış çelik sacın nokta kaynak direnç performansına ait sonuçları ve tartışmayı içermektedir. Nokta direnç kaynak parametresi olarak, kaynak akımı seçilmiş olup, kaynak akım aralığı sıçrantısız kaynak performansına göre belirlenmiştir. Gerek boyutsal ölçümler ve gerekse mikroskobik görüntüler aynı koşullarda yapılmış olup, mikroyapısal inceleme optik ve elektron mikroskop görüntülerini içermektedir. Kaynak elektrotlarının yüksek sıcaklıkta özellikle elektrot malzemesi olan bakır içerisinde bulunan alaşım elementlerinin yüksek sıcaklıkta çalışması sonucunda bir kısmını gerek sac metali ile teması ile kaybetmesi veya yüzeyde kaynak sırasında oluşan oksit vb. tabaka oluşumuna kaybetmesi yumuşamaya neden olabilir.

Nokta direnç kaynak elektrotları oldukça yüksek sıcaklıklara dayanmakta ve kaynak sırasında uygulanan baskı kuvvetinden dolayı ise, uygulanan baskı kuvvetinin veya nokta kaynaklarının sıklığına göre de ısı birikmesi nedeniyle de bir süre sonra deformasyona maruz kalmaktadır. Deformasyon daha ileri aşamada meydana gelmekle birlikte öncelikle, akımın elektrotlardan sac malzemelerin üzerinden iletilmesi aşamasında, sac malzemelerin yüzeyinde bulunan değişik kimyasalların ve kaplamaların etkisiyle istemeyen elektrik akımını zorlaştıran bir tabaka ila kaplanmaktadır. Bu tabaka, elektriksel iletkenliği zorlaştırması nedeniyle istenememekte ve en önemlisi ise ısı transferini zorlaştırarak elektrodun uç profil kısmının hizmet ömrü süresinde zamanla yumuşamasına ve hasar görmesine sebep olmaktadır. Kaplanmış çeliklerin kaynağında ortaya çıkan çinko ile alaşımlandırma sonucu elektrot malzemesinden ağırlık kaybı ortaya çıkabilmektedir. Bu çalışmada ise, nokta direnç kaynak elektrotlarının yumuşaması nedeniyle ölçümlerin sonucunun çok düşük çıktığı tespit edilmiştir.

4.2. Punta Elektrot ve Kaynak Bölgesi Boyutsal Ölçümleri

Verilen parametre aralıklarında yapılan nokta direnç kaynaklarına ait nokta kaynak çekirdeği ve elektrot uç profillerinin görünümü Şekil 4.1- 4.9 arasında verilmiştir. Şekil 4.1-4.3 arasında verilen Şekiller, G tipi elektrot uç türüne ait olup Şekil 4.1'den 4.3'e doğru akım artmaktadır. Optik makroyapılar genellikle nokta direnç kaynaklarına ait çekirdek yapılarının oldukça düzenli olduğu ve en-genişlik oranlarının 1 civarında olduğunu işaret etmektedir.

Tablo 4.1: G tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) Sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) Sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları.

Numune	Plaka			Elektrot		
No	En	Genişlik	Ortalama	En	Genişlik	Ortalama
a) 10	9	9	9	10,3	11,2	10,75
a) 11	9,4	9,1	9,25	11	11	11
a) 12	9,1	9,2	9,15	10,2	10,3	10,25
b) 10	6,8	7,2	7	8,1	8,2	8,15
b) 11	6,7	7,1	6,9	9	8,2	8,6
a) 12	7	7,1	7,05	8,1	8,2	8,15

Dikkat edilirse ilk elektrot uç tipinde (G-tipi) düz baskı alanı mevcut olup, elektrot baskı noktalarının daha net olarak Şekil 4.1-4.3'de düzenli olarak ortaya çıktığı görülmektedir. G tipi elektrot uç formunun daha düzgün bir baskı yaratmak için dizayn edildiği ve baskı kuvvetinin homojen dağılıma müsaade ettiği görülmektedir. Akım arttıkça, Şekil 4.3 gibi, çekirdek derinliği daha belirgin olmaktadır. Artan akım şiddeti ile beraber, ısı girdisi de artmakta ve ısı girdisinin artmasının Şekil 4.1-4.3'te görüldüğü gibi çekirdek çapını kısmen artırdığı Tablo 4.1'de görülmektedir. Artan ısı girdisinin, metalik malzemelerde elastisite modülünün ve akma noktasının düşmesine sebep olduğu ve plastikliği artırdığı bilinmektedir. Bu nedenle, artan akımla beraber çekirdek derinliği ve nokta direnç kaynak çekirdeğinin dış çapı arttmıştır. Elektrot basma yüzeyi boyutlarında ciddi bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Şekil 4.1-4.3'de verilen makro resimlerde, elektrot baskı

yüzeylerinde aşınma izlerinin ve oluşumunun ortaya çıktığı görülmektedir. Bu yapılar genellikle, sac malzemeye madde transferi ile ve/veya yukarıda belirtildiği gibi bir mekanizma ile oksitlenme veya tabakalaşma ile oluştuğu düşünülmektedir. Diğer bir mekanizma ise, tekrarlı yüklerde fretting (sürtünme) etkisi ile, deformasyon yorulması etkisi ile, çukurcuk ile başlayan aşınma davranışıdır. Bu aşınma mekanizmasında tekrarlı bir şekilde, akma noktasının altında çalışan metalik yapılarda en bariz şekilde, yorulma meydana gelmekte ve bu yorulmanın etkisi ile öncelikle oyuklanma aşınması meydana gelmektedir. Yorulma dayanım sınırlarının olmadığı malzemelerde bu hasarlar daha kolay bir şekilde meydana gelir ve bunu takiben yüksek sıcaklıkla beraber oksitlenmenin çatlak ucuna ilerlemesi ile çatlağın yayılıp koparma ile sonlanması ile sonuçlanır. Kopan bu parçanın hemen altında ki yüzeyin oksitlenerek tabaka oluşturması ve akabinde, diğer çatlaklarla birleşmesi kaçınılmazdır.

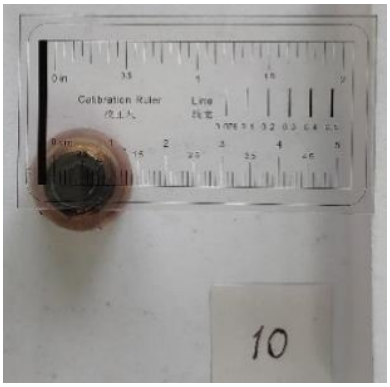


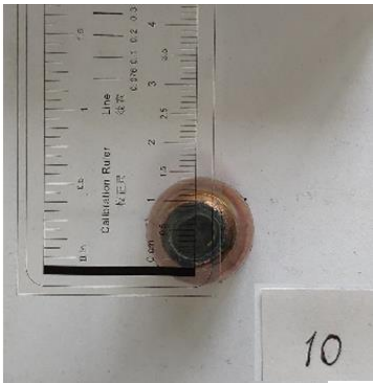
a



b c

Şekil 4.1 : G tipi elektrot uç formu ile yapılan 10 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.



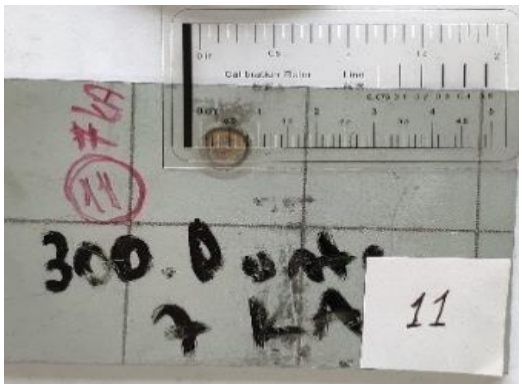


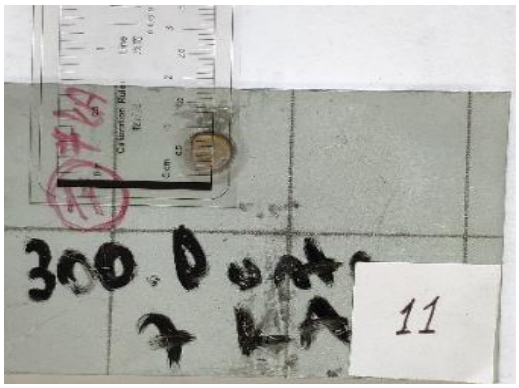
d e

Şekil 4.1 (devam): G tipi elektrot uç formu ile yapılan 10 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü, elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.



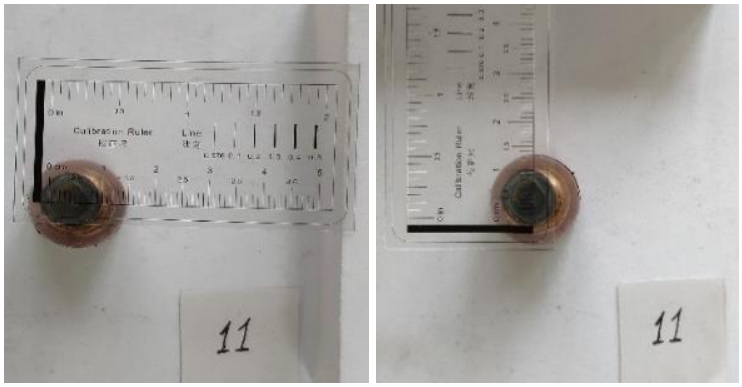
a





b c

Şekil 4.2 : G tipi elektrot uç formu ile yapılan 11 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.

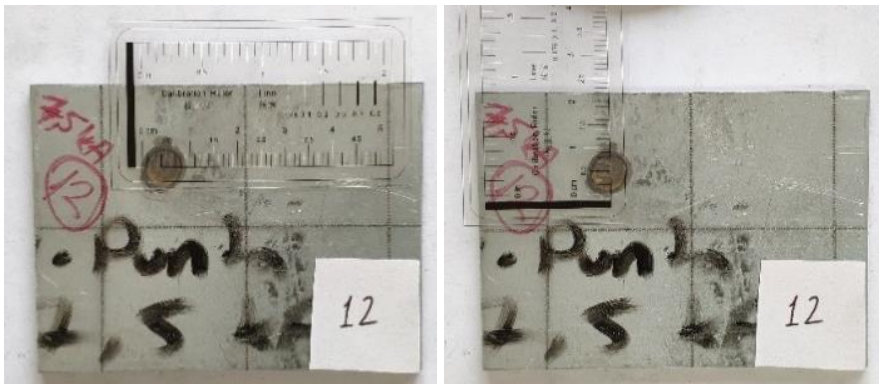


d e

Şekil 4.2 (devamı): G tipi elektrot uç formu ile yapılan 11 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.

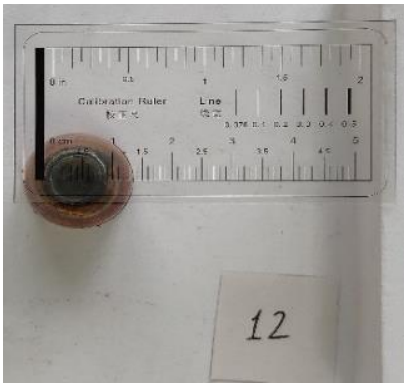


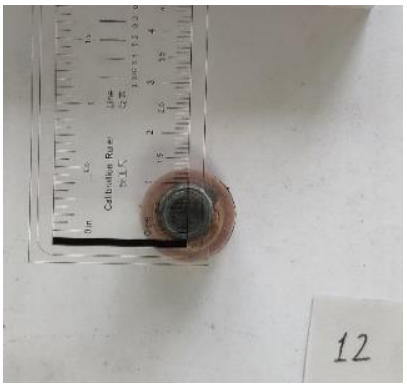
a



b c

Şekil 4.3 : G tipi elektrot uç formu ile yapılan 12 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.





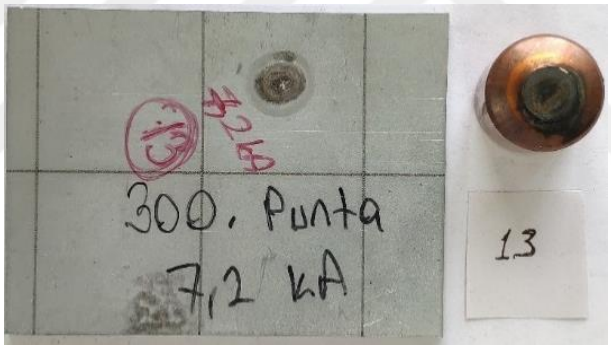
d e

Şekil 4.3 (devamı): G tipi elektrot uç formu ile yapılan 12 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.

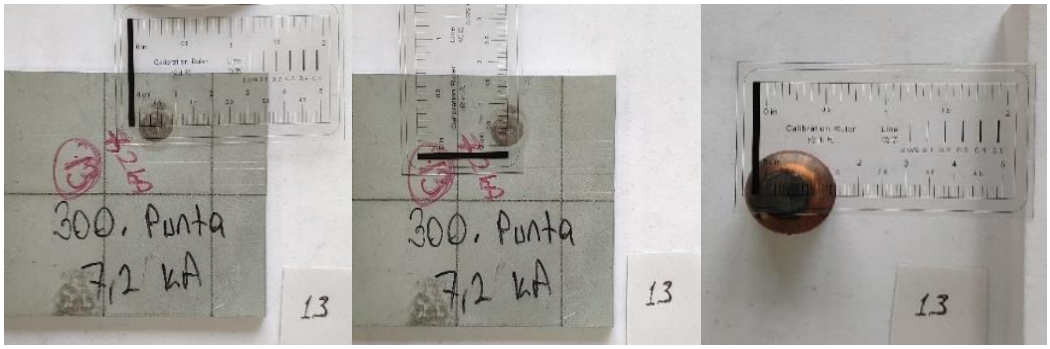
B tipi elektrot ucu ile yapılan kaynaklara ait çekirdek, elektrot ve boyut ölçüm görüntüleri Şekil 4.4-4.6 arasında verilmiştir. Nokta direnç kaynak akımı, 4.4-4.6'a doğru artmaktadır. Ayrıca, Tablo 4.2'de boyut ölçüm sonuçları ve ortalamaları detaylı bir şekilde sunulmuştur. Boyut ölçümleri, Şekil 4.1-4.3 arasındaki resimlerde verilen numunelere göre en-genişlik oranları dikkate alındığında 1, yani en genişlik oranının birbirne yakın değerine bu seride yaklaşmadığı görülmektedir. Bu serinin diğer özelliği ise, elektrot uç en-genişlik değerlerinin 1'e çok yakın olduğu ve homojen bir deformasyon veya aşınma gösterdiği düşünülmektedir. Elektrotlar kaynak işlemi sonrası temizlenmemesine rağmen, Şekil 4.1-4.3'te görüldüğü gibi çinko oksit izi ile elektrot çalışma alanının etrafında bulunurken, Şekil 4.4-4.6'da verilen görüntülerde bu izin bulunmadığı görülmektedir. İlginçtir ki, bakır elektrotlarında G tipi elektrot serisinde görülen aşınma mekanizması bu seride de görülmektedir. Tekrarlı yorulma ile ortaya çıkan bu durum, elektrot yüzeyinin oksitlenmesi ile beraber–çukurcuk oluşumu ve takiben oksitlenme ile son bulan malzeme kaybına yol açmaktadır. Bu seride de, elektrodun boyutsal kararlılığı korunmuş olmakla beraber, elektrot baskı yüzeyinin aşınması, orta noktalara yoğunlaşmıştır. Nokta direnç kaynak çekirdeklerinin makro görüntülerinde bu oluşum rahatlıkla görülmektedir. Çekirdek dış çap ölçümlerinde, en genişlik oranının birden az olduğu görülmektedir (Tablo 4.2). Isı girdisinin etkisinden daha çok, basma ekseninin farklı olması yani kaçık olması dışında, diğer etmenlerde örneğin, yüzeydeki oksit tabakasının kalınlığındaki farklılık bulunması yani homojen olmaması ve/veya yüzey aşınmasının homojen olmaması da etkili olabilmektedir.

Tablo 4.2: B tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları.

Numune No	Plaka			Elektrot		
	En	Genişlik	Ortalama	En	Genişlik	Ortalama
a) 13	9	7,3	8,15	9,1	9.1	9,1
a) 14	8,7	8,2	8,45	10,9	10,9	10,9
a) 15	8,1	9	8,55	9,7	9,3	9,5
b) 13	7,1	5,6	6,35	8	8	8
b) 14	6,8	5,8	6,3	7,8	7,3	7,55
b) 15	5,9	6,9	6,4	7,9	6,4	7,15



a



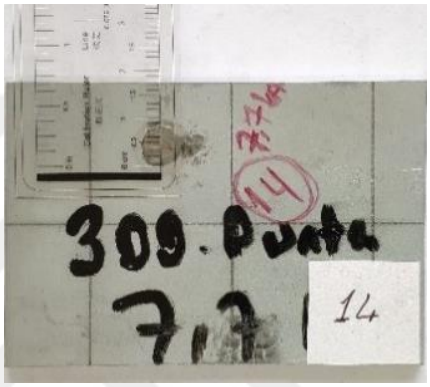
b c d

Şekil 4.4 : B tipi elektrot uç formu ile yapılan 13 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ölçümü.



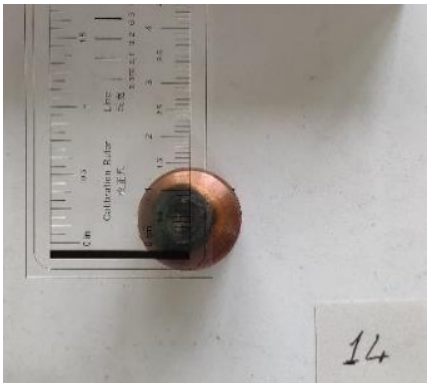
a





b c





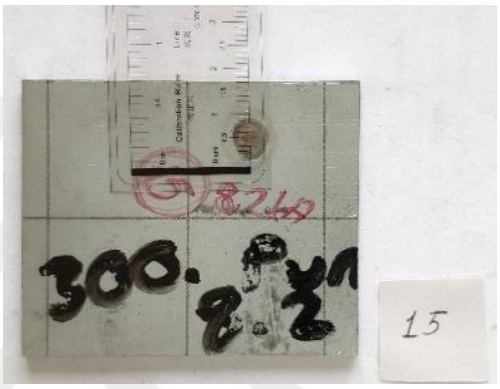
d e

Şekil 4.5 : B tipi elektrot uç formu ile yapılan 14 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.



a





b c





d e

Şekil 4.6 : B tipi elektrot uç formu ile yapılan 15 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.

Bu çalışmada en son seri olan, F tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ait çekirdek ve elektrot uç özelliklerine ait resimler Şekil 4.7-4.9 arasında sunulmuştur. Tablo 4.3'te ise, F tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm

sonuçları verilmiştir. Bu seride ölçüm sonuçları oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Boyutsal ölçümlerin ortalamaları özellikle yüksek akım kullanılarak yapılan numunelerde en-genişlik oranı 1'e oldukça yakın bulunmaktadır. Özellikle B tipi uç formuna sahip elektrotlarla yapılan kaynaklarda, Tablo 4.2 ve Şekil 4.4-4.6, en-genişlik oranları en-genişlik değerlerinin eşit olduğu 1'den çok farklı değerler vermiştir. Bu seride ise, yine, iyi sonuç veren G tipi elektrot ucu ile yapılan deneylere göre, daha iyi sonuç verdiği (F tipi elektrot) açıkça görülmektedir. Bu elektrot türü ile yapılan kaynakların ITAB alanının daha dar olduğu da görülmektedir. Özellikle Tablo 4.3'de verilen, çekirdek dış çap ve çekirdek çap ölçümleri arasındaki fark 1.2 mm dir. Artan ısı girdisi ile beraber bu fark daha da açılmıştır. G ve B tipi elektrotlarda en düşük ısı girdisi ile en yüksek ısı girdisi arasındaki dış çap farkı sırasıyla 2.1 ve 2.2 mm olmakta iken, bu seride, en düşük ısı girdisinde, fark 1.2 mm ve en yüksek ısı girdisinde ise 1.8 mm olmuştur. Bu elektrot uç serisinin Şekil 3.1'de verildiği formda olduğu düşünülürse, bu durumda, daha iyi bir boyutsal kararlılık sağladığı görülmektedir. Diğer elektrot uç tiplerinde tartışılan, baskı yüzeyindeki aşınmanın bu elektrot tipinde çok az olduğu veya olmadığı görülmektedir. Dairesel bir iz oluşumu bu serideki elektrodun baskı yüzeyinde oluşmuş olup, bu izin boyutsal kararlılığını sağlaması muhtemeldir. Diğer elektrotlardan farklı olarak, nokta direnç kaynak çekirdeğinin daha derin bir izlenim vermesi, dayanım ve görsel verimliliğin daha iyi olduğunu düşündürmektedir.

Tablo 4.3: F tipi elektrot uç formu ile yapılan kaynaklara ve elektrotların boyutsal ölçüm sonuçları, a) sac plakada oluşan kaynak çekirdek dış çapı (ITAB dahil) ve kaynakta kullanılan elektrodun baskı yüzeyinin en dış çap ölçüm sonuçları ve b) sac plakada oluşan kaynak çekirdek merkez çapı ve kaynakta kullanılan elektrodun etkin baskı yüzey çapı boyutsal ölçüm sonuçları.

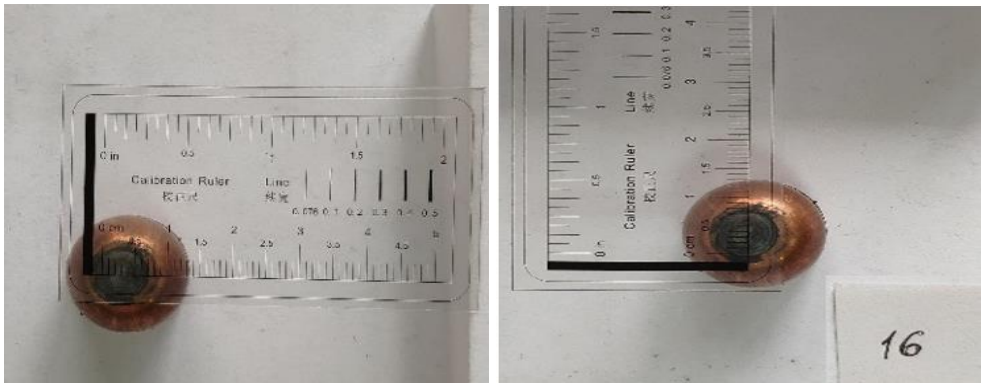
Numune	Plaka			Elektrot		
No	En	Genişlik	Ortalama	En	Genişlik	Ortalama
a) 16	6,7	7,1	6,9	8,2	7,3	7,75
a) 17	7	7	7	9,1	7,8	8,45
a) 18	7,2	7	7,1	7,9	8,2	8,05
b) 16	5,5	5,5	5,5	6,1	6	6,05
b) 17	6	5,8	5,9	6,9	5,7	6,3
b) 18	5,4	5,1	5,25	5,9	6,1	6



a



b c

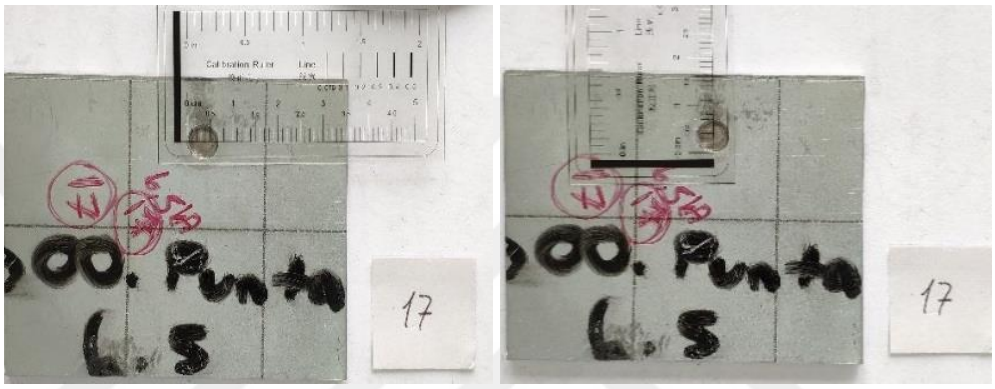


d e

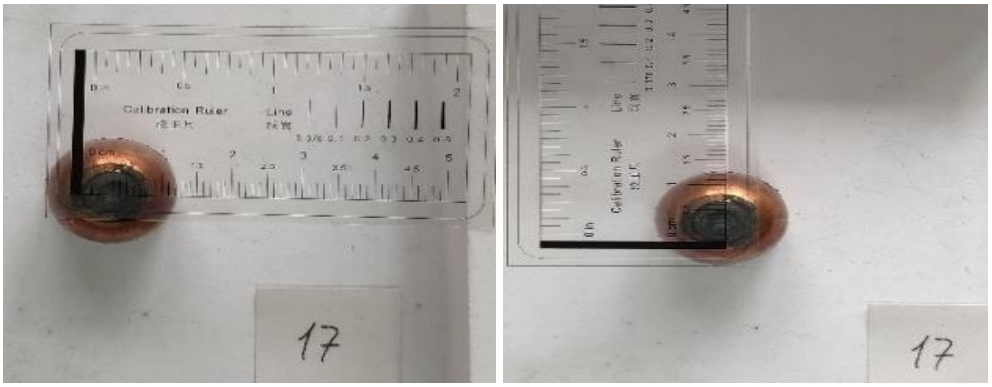
Şekil 4.7 : F tipi elektrot uç formu ile yapılan 16 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.



a



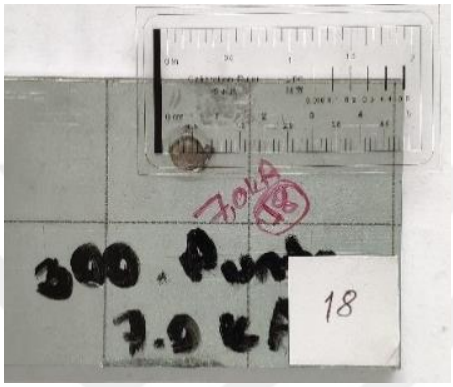
b c



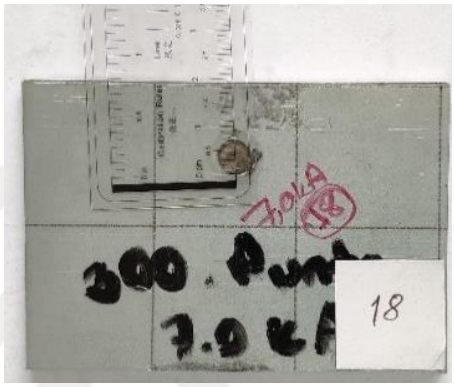
d e

Şekil 4.8 : F tipi elektrot uç formu ile yapılan 17 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.





b



c



d



e

Şekil 4.9 : F tipi elektrot uç formu ile yapılan 18 nolu numuneye ait a) kaynak bölgesi ve kullanılan elektrodun görseli, kaynak çekirdeğinin (b) yatay ve (c) dikey ölçümü ve elektrodun (d) yatay ve (e) dikey ölçümü.

4.3. Elektron Mikroskop Analizleri

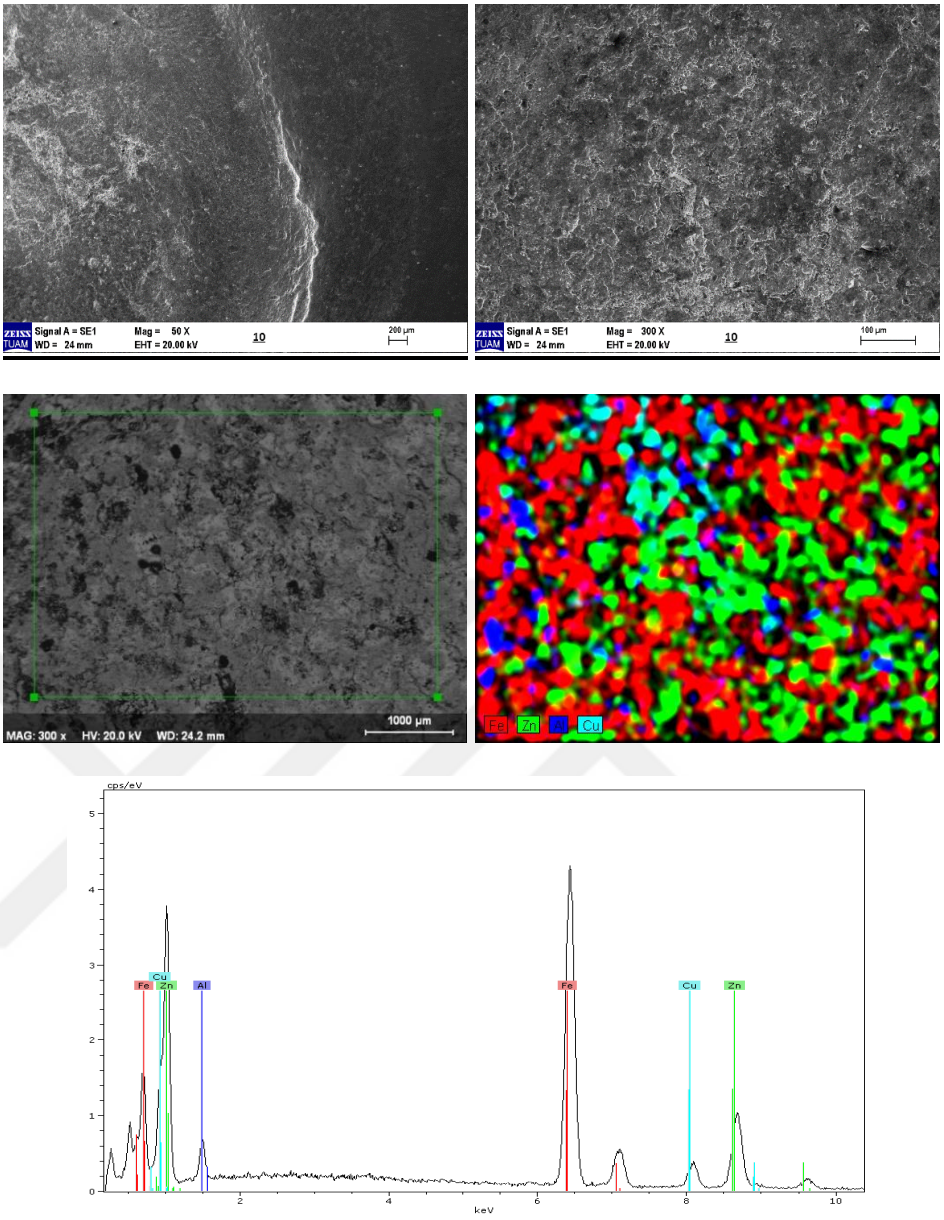
10, 11 ve 12 numaralı parçanın kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri yanında yüzeyden alınan EDX sonuçlarını Şekil 4.10-Şekil 4.12 arasında verilmiştir. Şekillerde verilen resimlerde, nokta direnç kaynak çekirdek derinliği rahatlıkla görülebilmektedir.

ITAB bölgesinin ise, yaklaşık olarak çekirdek kenarından 1.2 mm civarında dışına olduğu görülmektedir. Nokta kaynak çekirdekleri üzerinde görülen elementel değişime göre ise, çinko ve bakır transferinin gerçekleştiği görülmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda madde transferi, temel olarak buharlaşma (çinko için geçerli olmaktadır) ve yüzeye adhesif olarak yapışma ile gerçekleşmektedir. Yüzeye yapışma ile madde transferi nedeniyle ortaya çıkan aşınma elektrot yüzeylerinde, bir önceki bölümde verilen şekillerde görülmektedir.

Elementel transferler, çinko buharlaşmasının elektrot yüzeyine toparlanması veya termodinamik olarak buhar fazının hacminin artması ile beraber soğuması ve en yakın yüzeye yoğuşarak yapışmasını içermektedir. Bu çalışmada Şekil 4.10-Şekil 4.12 arasında, bütün yüzeylerde çinko birikmesi söz konusu olup, bakır transfer az da olsa bulunmaktadır. Tekrarlı yüklerle çok sıcak yüzeylere olan yapışmanın izole edilmiş bakır parçaları vasıtasıyla meydana geldiği düşünülmektedir. Bakır, ısı kapasitesi düşük ve ısı transfer katsayısı yüksek olduğu için ısıtılması zor olan bir elementtir; bu özellik gereği elektrot olarak kullanıldığında çok kolay bir şekilde soğutulmakta ancak oldukça yumuşak bir element olduğundan dolayı deformasyona düşük kuvvetler altında dahi müsaade etmektedir. İyi tanımlanmamış yorulma sınırı göstermedikleri için kopma kolaylaşmakta ve her ısıl çevrimde lokal deformasyon gösteren bölgeler yüksek akım yoğunluğu ve ısıl yoğunlukla beraber kopmaktadır. Bu iki transfer farkı bu ve diğer serilerde etkin bir mekanizma olarak karşımıza çıkmaktadır.

Şekil 4.10 ve 4.11'de verilen EDX analiz değerlerinin incelenmesi sonucunda, çinko ve bakır rastgele dağıldığı ve özellikle alüminyum elementinin de bulunduğu görülmektedir. Bazı kaplamalarda çinko ile beraber alüminyumda bulunabilmektedir. Alüminyum dolayısıyla kaplamadan gelmekte ve çinko ile beraber buharlaşıp yüzeye yapışmaktadır.

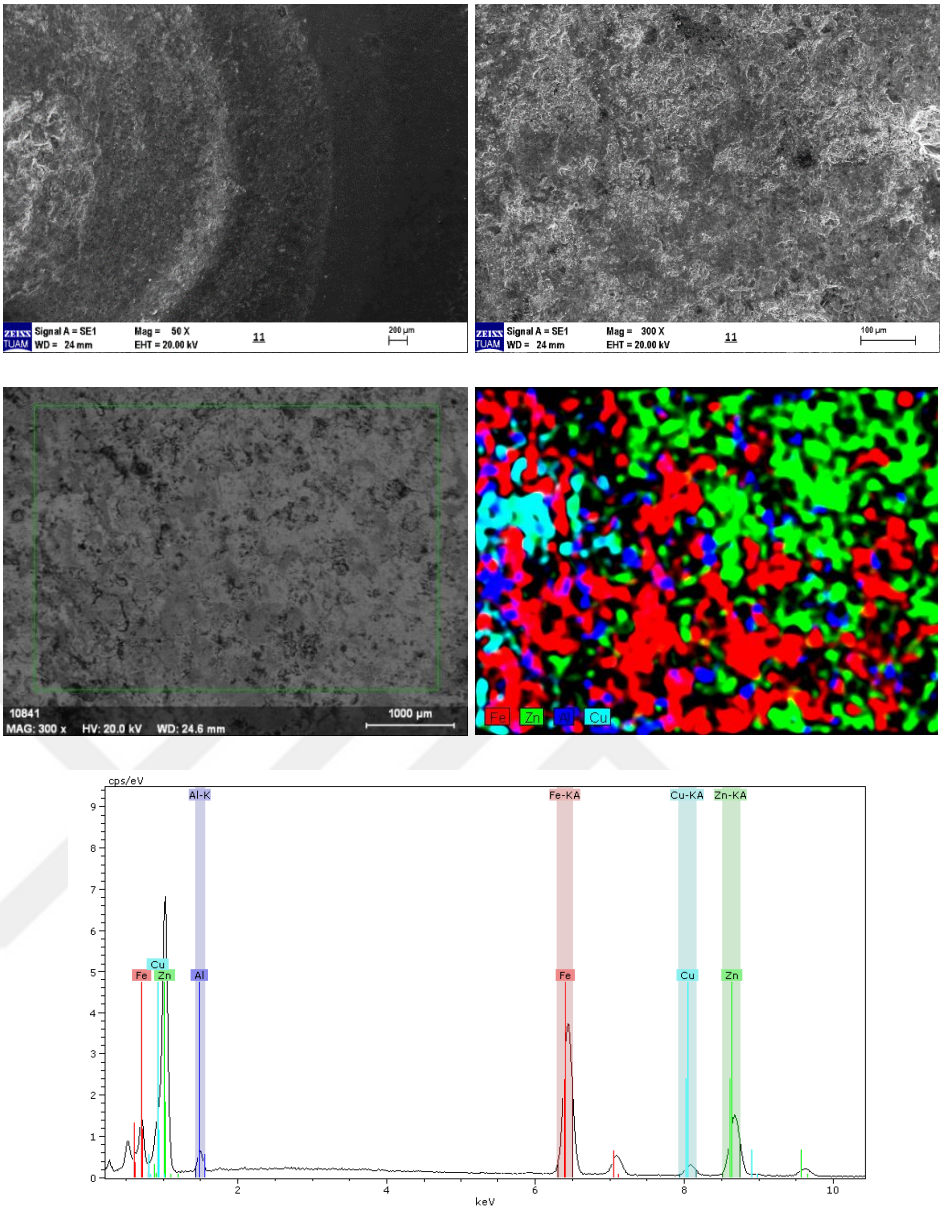
Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12'de aşağıda görüleceği üzere SEM görüntüleri ve EDX analiz değerleri birlikte grup olarak sunulmuştur. Ayrıca elementler ve elementlerin ağırlıkça atomik yüzde değerleri Tablo 4.4, 4.5 ve 4.6 olarak sunulan şekil gruplarının en alt kısmında bulunmaktadır.



Şekil 4.10 : 10 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları.

Tablo 4.4: 10 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

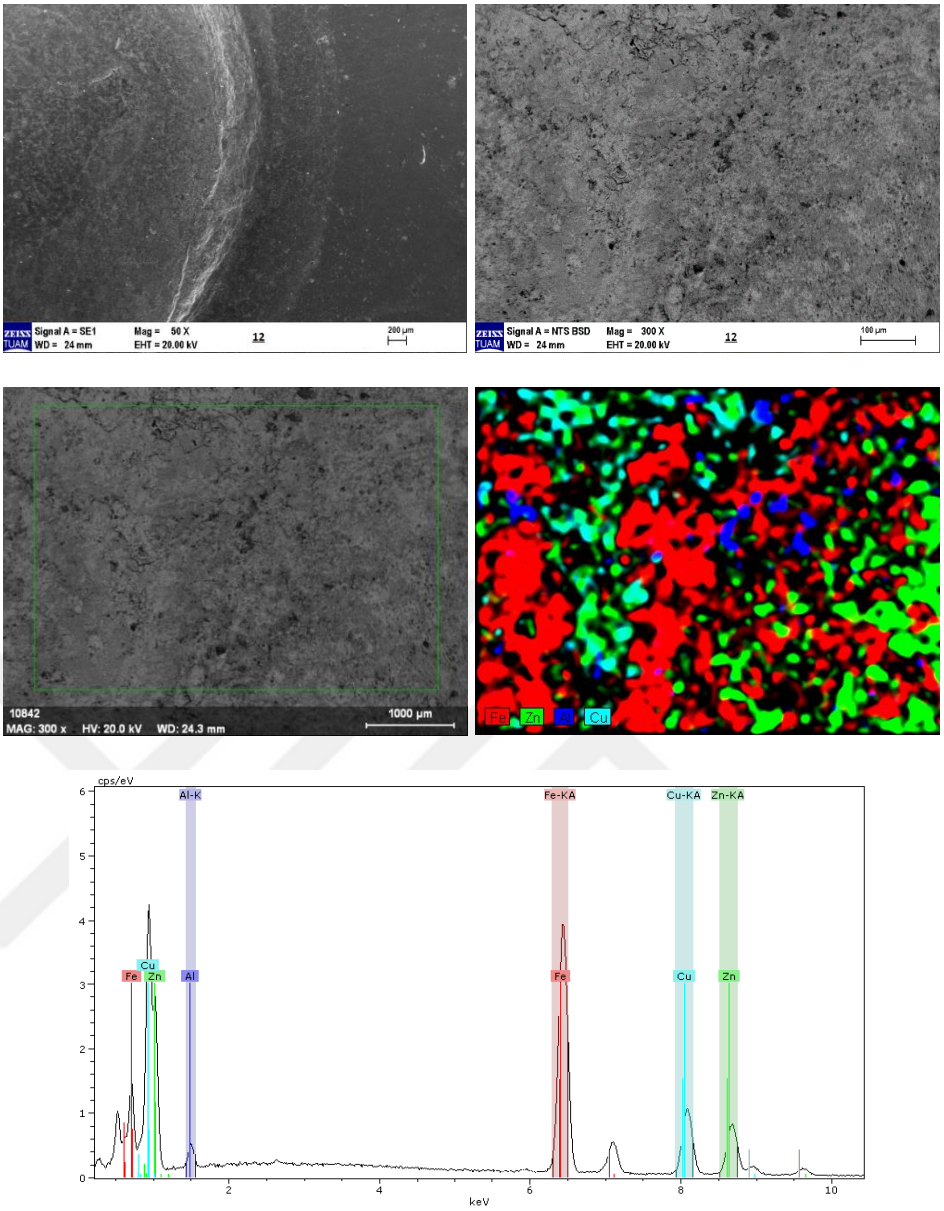
Element	Seri	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Alüminyum	K serisi	2802	2,65	3,11	6,60
Demir	K serisi	42082	48,63	57,12	58,44
Bakır	K serisi	3517	7,22	8,48	7,62
Çinko	K serisi	10850	26,63	31,28	27,34
Toplam: 85,1 %					



Şekil 4.11 : 11 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları.

Tablo 4.5: 11 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

Element	Seri	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Alüminyum	K serisi	685	2,18	2,56	5,55
Demir	K serisi	10606	39,56	46,52	48,73
Bakır	K serisi	797	5,22	6,14	5,65
Çinko	K serisi	4808	38,08	44,78	40,07
Toplam: 85,0 %					



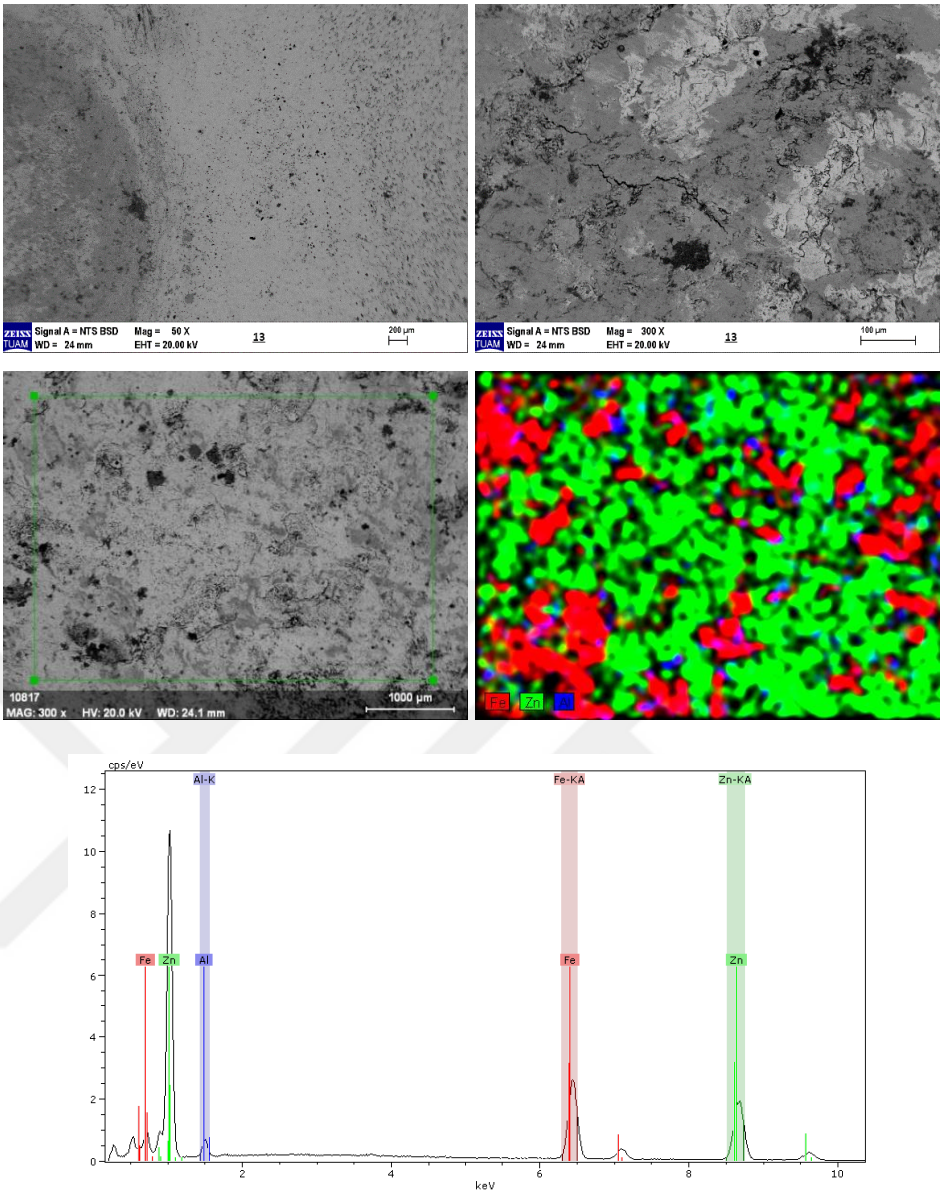
Şekil 4.12 : 12 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları.

Tablo 4.6: 12 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

Element	Seri	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Alüminyum	K serisi	1467	1,55	1,78	3,86
Demir	K serisi	33691	41,71	47,83	50,25
Bakır	K serisi	9981	22,74	26,07	24,07
Çinko	K serisi	7803	21,20	24,32	21,82
Toplam: 87,2 %					

Yukarıda ifade edilen, bakır taşınımını desteklemek amacıyla, artan akım ile birlikte Şekil 4.13'te verilen sonuçlara göre bakır oranının daha yüksek bir oranda transfer edildiği görülmektedir. Hızlı bir şekilde buharlaşan ve bozunma sıcaklığı düşük olan CuO'in ayrışması ile beraber, artan sıcaklıkta termodinamik olarak daha kararsız olan CuO, ayrıştığında Cu serbest kalmakta ve temiz bir yüzey olan demir yüzeyine yapışmayı kolaylaştırmaktadır.

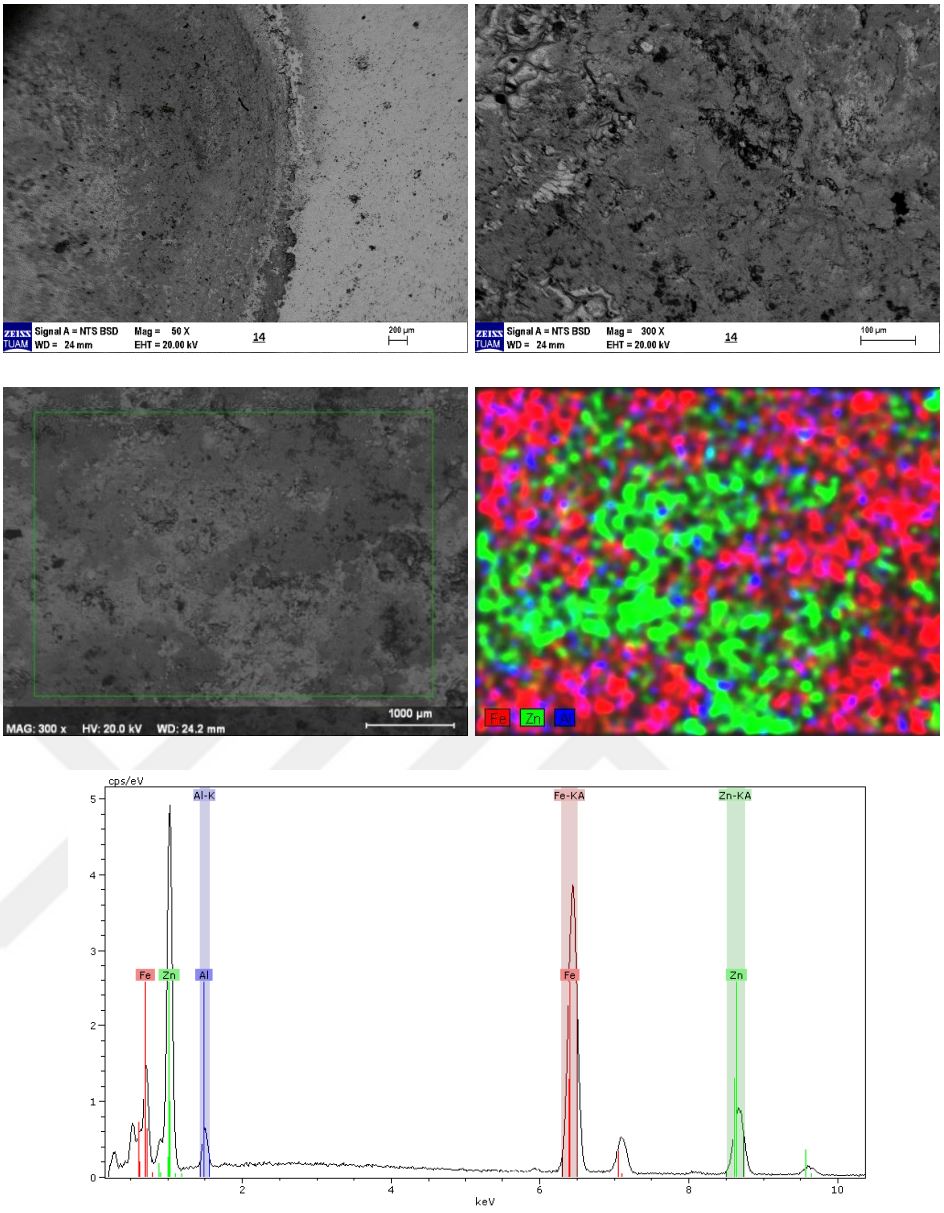
B tipi elektrotlarla yapılan nokta kaynak görüntüleri ve analizleri Şekil 4.13-4.15 arasında, elementler ve elementlerin ağırlıkça atomik yüzde değerleri Tablo 4.7, 4.8 ve 4.9 olarak sunulan şekil gruplarının en alt kısmında verilmiştir. Analizler, çok ciddi oranda çinko birikiminin veya yüzeylere transferinin gerçekleştiğini işaret etmektedir. Bakır transferinin olmaması, muhtemelen, elektrot yüzeyinde oluşan oksit tabakasının kalınlığı veya temiz yüzey oluşturma zorluğu ile ilgili olabilir. Çinko elementinin buharlaşması neticesinde, daha fazla çinko bakır yüzeyine yapışabilmekte ve nokta kaynak çekirdeği ile bariyer oluşturup bakır transferini engellemekte faydalı olabilmektedir. Bu nedenle bu seride, bakır transferi gerçekleşmemiş ve çinko miktarı çok yüksek seviyelerde görülmüştür. Bu serideki gerek çekirdek ve gerekse elektrot yüzeylerinin daha fazla aşınmaya maruz kalmasıdır. Şekil 4.15 'den de görüldüğü gibi, F ve G tipi elektrotların aksine, aşınma miktarının yüksek olması elektrodun tamamıyla çinko kaplanması ile CuZn bileşiğinin oluşumuna müsaade etmesi ve kütlesel aşınmaya daha kolay maruz kalması olabilir. Bu konuda, inceleme yapılmamış olmasına rağmen, yüzeylerde bakırın görülmemesi ve sadece çinkonun çok yüksek miktarlarda görülmesi bu yöne işaret etmektedir.



Şekil 4.13 : 13 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları.

Tablo 4.7: 13 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

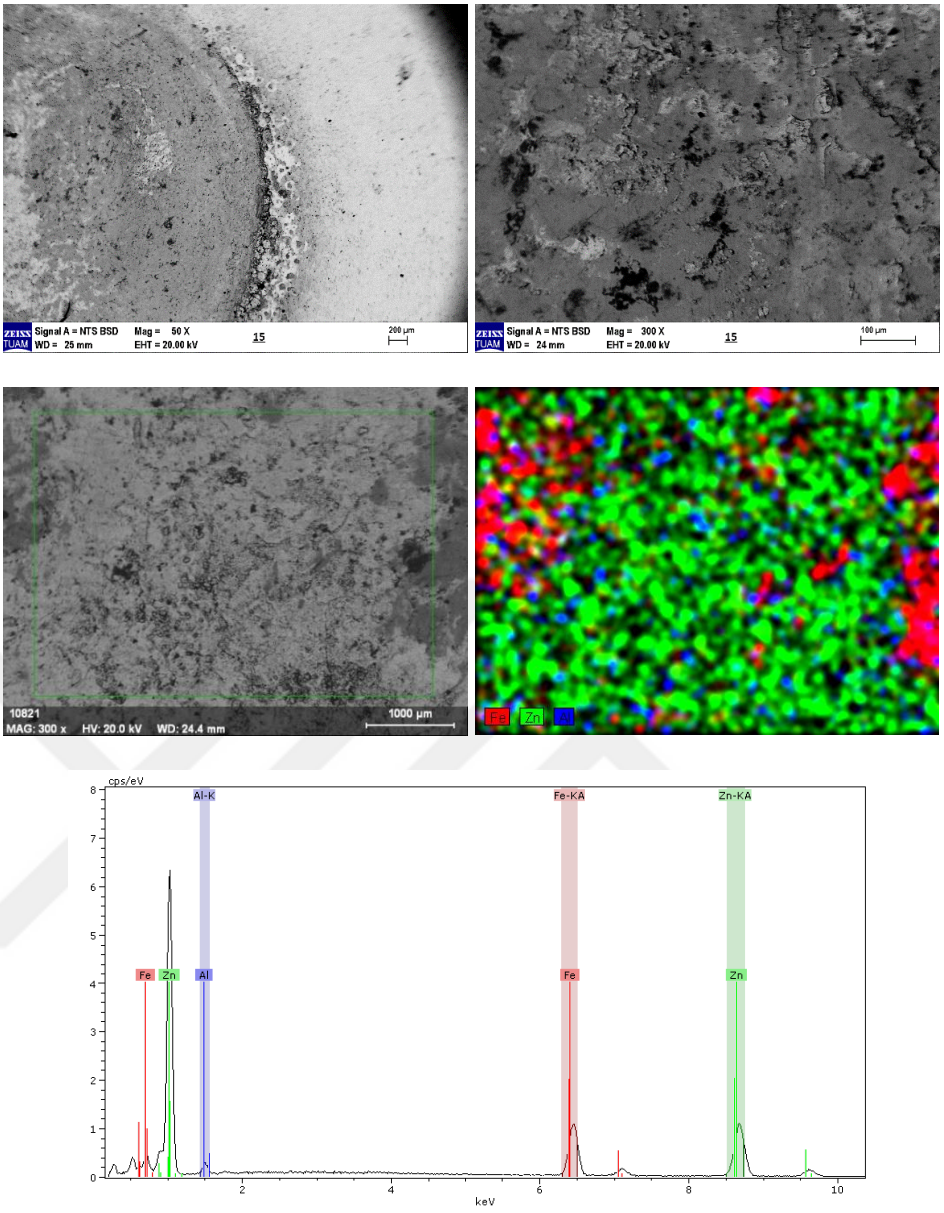
Element	Seri	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Alüminyum	K serisi	2022	2,61	3,09	6,79
Deir	K serisi	19724	29,81	35,29	37,42
Çinko	K serisi	16600	52,04	61,61	55,79
Toplam: 84,5 %					



Şekil 4.14 : 14 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları.

Tablo 4.8: 14 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

Element	Seri	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Alüminyum	K serisi	2004	2,95	3,37	7,02
Demir	K serisi	29076	59,21	67,76	68,17
Çinko	K serisi	7403	25,23	28,87	24,81
Toplam: 87,4 %					



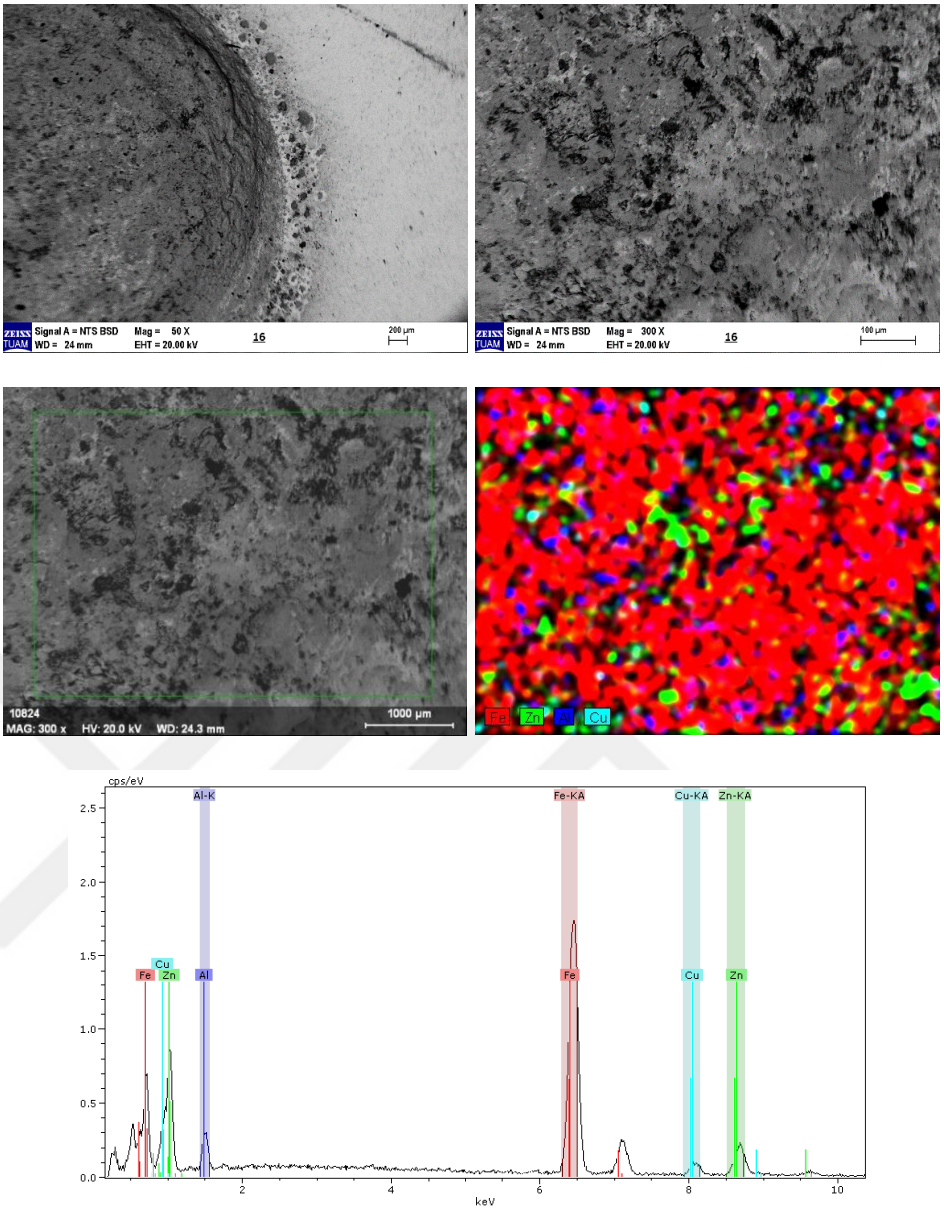
Şekil 4.15 : 15 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları.

Tablo 4.9: 15 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

Element	Seri	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Alüminyum	K serisi	1285	2,42	2,68	5,98
Demir	K serisi	12154	24,12	26,62	28,77
Çinko	K serisi	13461	64,05	70,70	65,25
Toplam: 90,6 %					

Şekil 4.16, 4.17 ve 4.18'de F tipi elektrotlarla yapılan deney numunelerin elektron mikroskop SEM görüntüleri ve kimyasal analizi ve elementler ve elementlerin ağırlıkça atomik yüzde değerleri Tablo 4.10, 4.11 ve 4.12 olarak sunulan şekil gruplarının en alt kısmında verilmiştir. Yüzey kimyasal analizinde ise, bakır ve çinko oranlarının yüzeyde düştüğü görülmektedir. Elementel bilgiler yine şekil gruplarının altında ağırlıkça yüzdesel olacak şekilde sunulmuştur. Elementel dağılım genel olarak homojen olmakla beraber yüzeydeki gözeneklerin içerisinde çinkonun bulunması yüzeyde çinko buharının oluşması ve buharlaşma ile beraber gözeneklerde hapsolması neticesinde, yoğunlaştığı ve biriktiği düşünülmektedir. Bu elektrot türü yüzeyindeki aşınmanın az olmasının nedeni, elektrot bileşiminin veya şeklinin yorulma ve oksidasyonla ortaya çıkan hasarlara daha az maruz kalmasına yol açtığı veya oluşan bu gözeneklerin daha çok çinko bileşiği veya oksitlerle kaplanması ile beraber bakır transferine engel olması muhtemeldir. Diğer bir önemi mekanizma ise, en son numunede ortaya çıkan bakır ve çinkonun bakır elementleri ile beraber bulunması (Şekil 4.16- Şekil 4.18'deki elementel haritalama resmi) CuZn bileşiğinin oluştuğuna dair kanıt olarak sunulabilir. Diğer numunelerde, örneğin Şekil 4.10, 4.11 ve 4.12'de bakır ayrı olarak tespit edilmiştir.

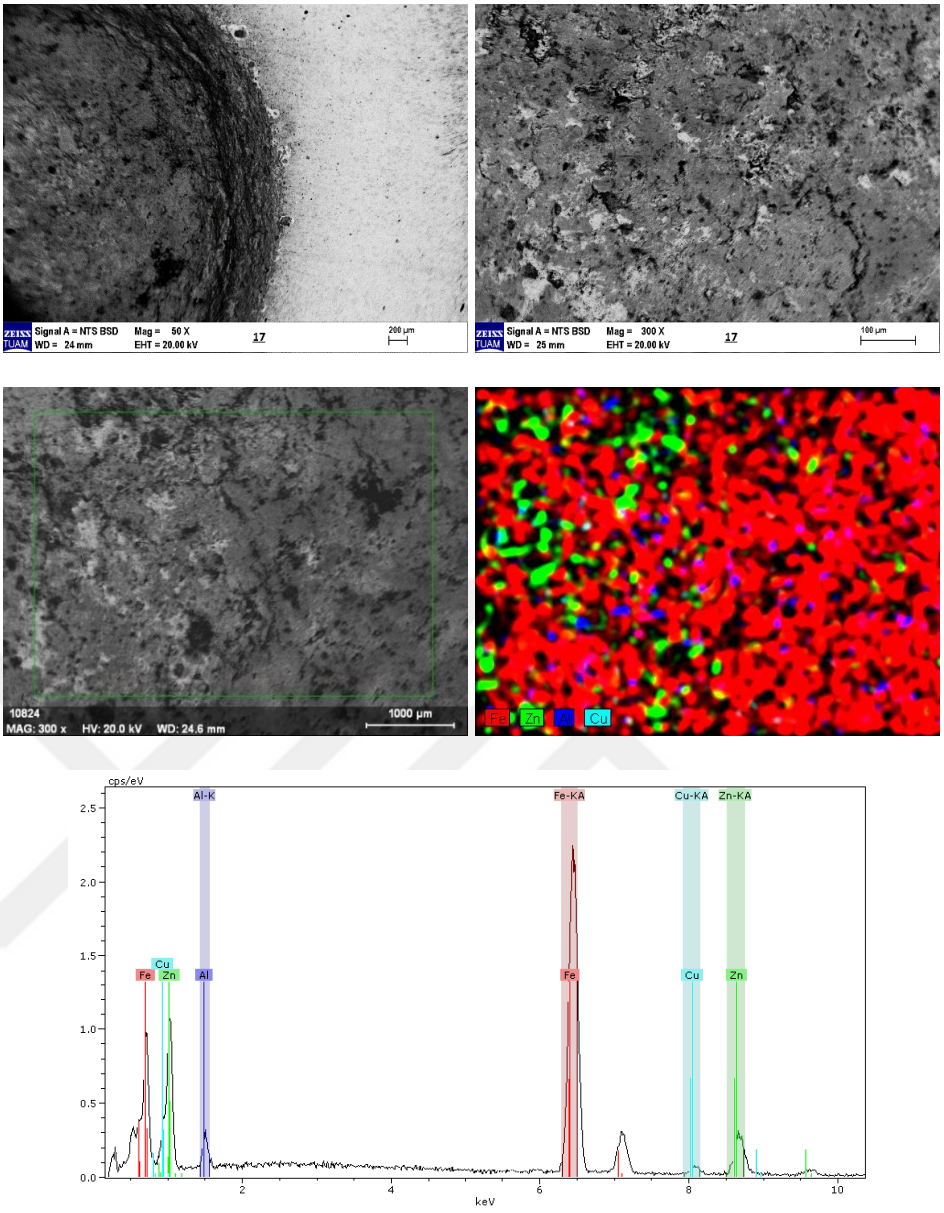
Sadece Şekil 4.18'de, bakıra rastlandığı görülmekte ancak bu miktarın düşük olması nedeniyle, ciddi bir bakır transferinin gerçekleşmediği görülmektedir. Düşük bakır transferi, diğer iki eletrot profili de dikkate alındığında, elektrot aşınmasının azaltılmasında oldukça önemli bir etken olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle, Şekil 4.9-4.11 arasında verilen resimlerde de görüldüğü gibi, temiz bir yüzey görüntüsü vermesi nedeniyle bu elektrodun daha fizibil bir elektrot olduğu düşünülmektedir. Elektrot şeklinin buharlaşan çinko ile teması azaltması deney numunesi yüzeyine ve elektrot yüzeyine transferini azaltması tercih edilmesi gereken bir özelliktir.



Şekil 4.16 : 16 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları.

Tablo 4.10: 16 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

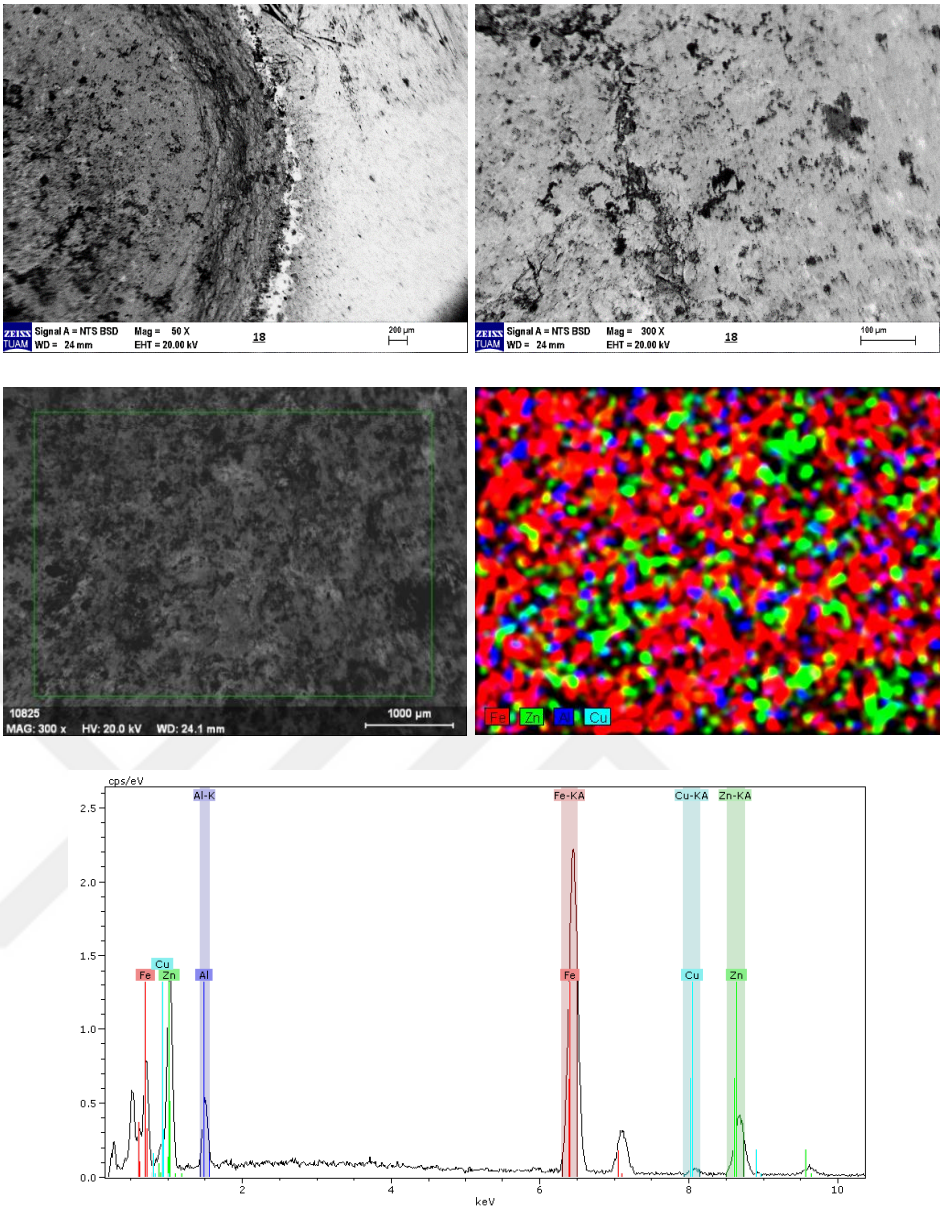
Element	Seri	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Alüminyum	K serisi	1889	3,21	3,74	7,69
Demir	K serisi	26740	61,54	71,68	71,28
Bakır	K serisi	1252	5,08	5,92	5,17
Çinko	K serisi	3351	16,03	18,67	15,85
Toplam: 85,8 %					



Şekil 4.17 : 17 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları.

Tablo 4.11: 17 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

Element	Seri	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Alüminyum	K serisi	773	2,35	2,71	5,63
Demir	K serisi	16010	63,46	73,10	73,49
Bakır	K serisi	504	3,55	4,09	3,61
Çinko	K serisi	2097	17,46	20,11	17,27
Toplam: 86,8 %					



Şekil 4.18 : 18 nolu numuneye ait sırasıyla kaynak çekirdeği ve elektrota ait SEM görüntüleri, SEM-EDS ve EDX sonuçları.

Tablo 4.12: 18 nolu numuneye ait elementlerin ağırlıkça ve atomik yüzdeleri.

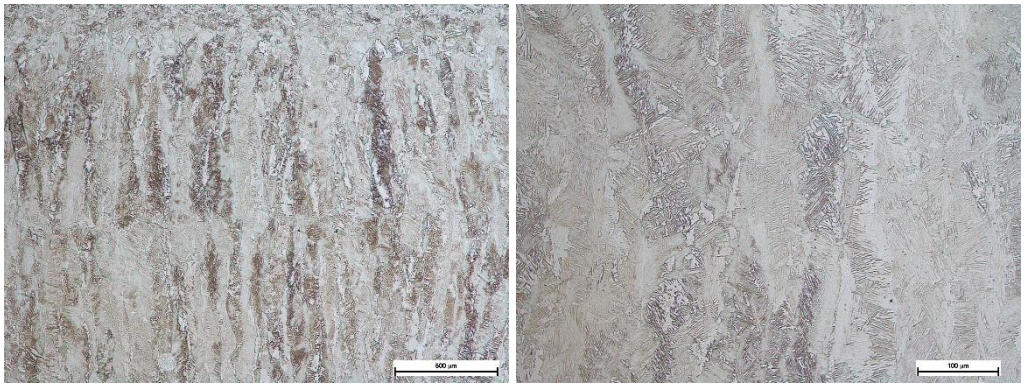
Element	Seri	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Alüminyum	K serisi	1305	4,01	4,69	9,64
Demir	K serisi	13555	56,50	66,10	65,58
Bakır	K serisi	178	1,35	1,58	1,38
Çinko	K serisi	2582	23,61	27,62	23,40
Toplam: 85,5 %					

4.4. Mikroyapı ve Mikrosertlik Analizleri (Hv)

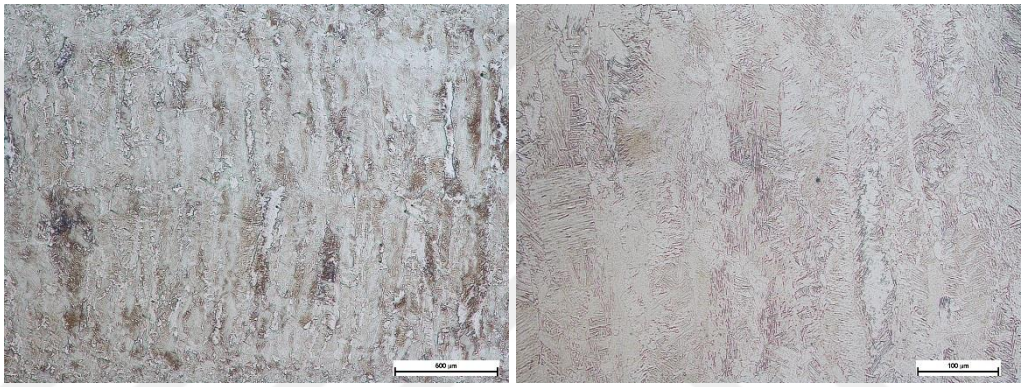
Elektrot formunun ve kaynak akımının parametre olarak çalışıldığı ve sonuç olarak elde edilen mikroyapıların resimleri Şekil 4.19-4.21'de verilmiştir. Her seri içerisinde, kaynak akımının artırılması genel olarak nokta kaynağında ısı girdisinin artmasına sebep olacaktır. Bu artışın en önemli çıktısı ise tahmin edileceği üzere, mikroyapısal değişimlerdir. Mikroyapısal değişimler tane içi morfolojisi ve tane şekli değişimi olarak kendisini gösterecektir. Isı girdisinin düşük olduğu durumlarda, tane içi morfolojinin iğnemsi veya Widmanstaten türü tane sınırından tane içine ilerleyen biçimde bir mikroyapısal değişimi tetiklemesi gerekmektedir. Buna karşın ısı girdisi arttıkça düşen soğuma hızı nedeniyle, tane içi morfolojiin kabalaşacağı düşünülmektedir. Faz dönüşümü gösteren çeliklerde, özellikle kaynak mikroyapılarında, kolonsal tane ile başlayan katılaşma yüksek soğuma hızının tecrübe edildiği durumlarda, tane sınırlarından tane içine doğru ilerleyen yapılar ortaya çıkar. Şekil 4.19'da görüldüğü gibi, birbirine paralel olarak sıralanmış tane yapısı ile kaynak bölgesinin kolonsal yapısı yanında ince tane içi morfolojisi, yukarıda tarif edildiği gibi, ince yapılarla bezenmiş olup, artan kaynak ısı girdisi ile beraber, ince yapıların kabalaşarak kolonsal bloklar yani irileşmiş ferritik bloklar haline gelmiştir. Düşük karbonlu çelik alaşım sistemlerinde, düşen karbon oranının etkisiyle, otokatalitik dönüşüm gösterir ve iğnemsi başlayan sistemler uzunlamasına büyümeyi tanenin diğer kenarına ulaşıncaya kadar sürdürür. Yüksek karbon veya alaşım oranı ise bu ilerlemeyi yavaşlatır ve iğnemsi yerine enine büyüme ile ferrit plakaları kabalaşırlar. Bu durumda, tane sınırları daha belirgin bir şekilde açığa çıkacaktır. Şekil 4.19'da 50 kat ve 200 kat büyütme oranları ile mikrosertlik ölçümü sonrası elde edilen kesit mikroyapılarına ait görseller sunulmuştur.

Birinci seri (Şekil 4.19) mikroyapılarda irileşme (recovery) görülmüştü; bu etki aslında ısı girdisi ile belirlenen bir çıktı olup ince mikroyapı görünüşü Şekil 4.20'de görülmektedir. Ancak, bu serideki mikroyapıda, toparlanma/irileşme (recovery) çok az miktarda olup, soğuma hızının kaynak işlemi boyunca yüksek olduğu ve tane yapısının ise daha küçük ve ince olduğu görülmektedir.

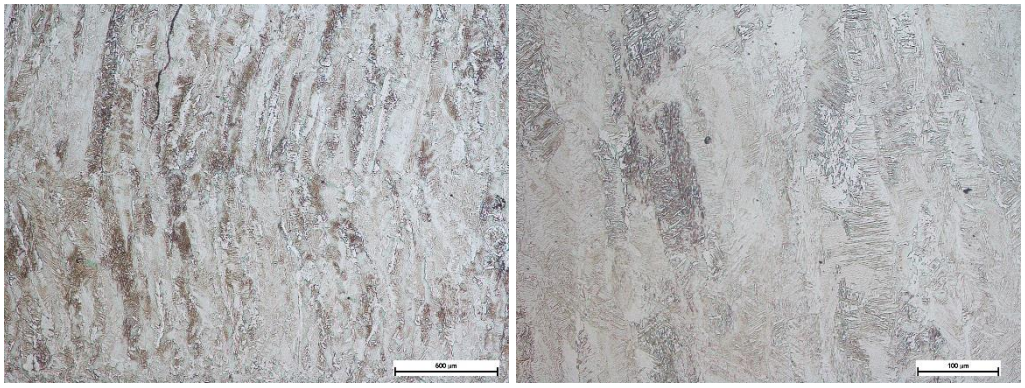
x50 **x200**



(a)



(b)

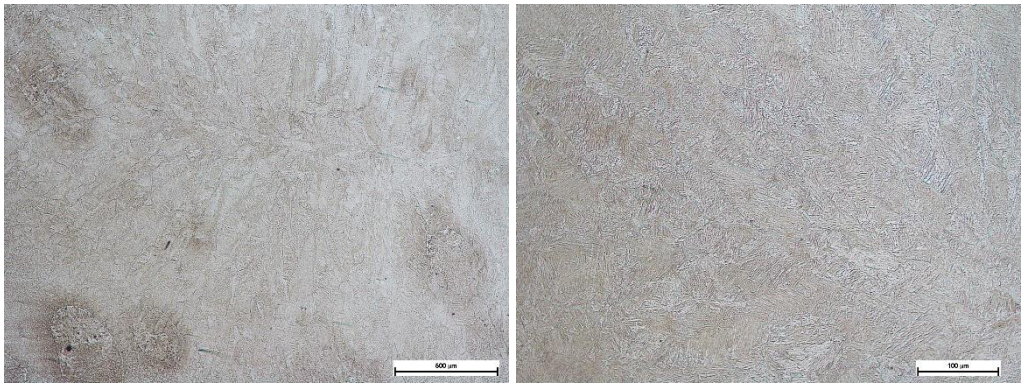


(c)

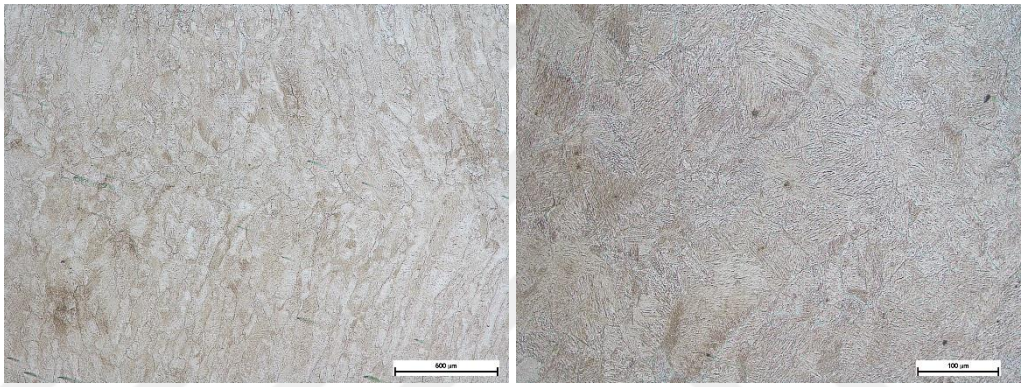
Şekil 4.19 : a) 16 b) 17 ve c) 18 nolu numuneye ait x50, x200 büyütmede mikrosertlik ölçümü yapılan kesit mikroyapısı.

Tane içi morfolojisi bir önceki seriye göre daha ince olması iki türlü işlemin sonucu olabilir. Nokta kaynaklarında, ergime olmadığı farz edilmektedir. Ergime olmayan ancak, çok yüksek sıcaklıklara çıkan sistemlerde, tane oluşumu delta ferrit-gama ferrit ve alfa ferriti silsilesi sürecinde soğuma sırasında takip ederek sağlanır. Tane oluşumu her ne kadar yüzey enerjisi ile alakalı olsada, bu durumda, tane sınırlarının alanı ile de ilgilidir. Tane sınırlarının yüzey alanının artması ile beraber yani tane boyutlarının küçülmesi ile beraber (yüksek soğuma hızı yeterli olacaktır) yan yana ferrit plakalarının görülmesi ve akabinde daha ince bir görünüş elde edilmesi bu serinin özelliğidir. Bir önceki serideki kolonsal yapının (kısmen ergidiğini veya Fe-C faz diyagramının Delta+Sıvı bölgesine girdiğine işaret etmektedir) yerine daha eş kenarlı tanelerin görünmesi, bu tane yapısının sacın orijinal östenit tanelerinin yapısını koruduğunu ve bir önceki seriye göre daha düşük sıcaklıklarda oluşumun gerçekleştiğini göstermektedir. Şekillerde (Şekil 4.20) ortak bir eksen etrafında yayılan tanelerin daha çok ergimenin etkisiyle değil, plastik deformasyonun faz dönüşümlerine olan etkisi ile ortaya çıktığı düşünülmektedir. Faz dönüşümleri, özellikle katı-katı faz dönüşümleri, plastik deformasyonun östenitik yapıda iken oluşması, dışarıdan uygulanan bir gerilim, östenitin akma mukavemetini aştığında, prensip olarak, östenitin beynite dönüşümünün mekanik stabilizasyon olarak bilinen bir işlemle geciktirilmesi mümkün kılar. Kayma esaslı (Displacive) dönüşümler, kayma ara yüzlerinin ilerlemesi ile meydana gelir ve bu, dislokasyonlar veya tane sınırları gibi kusurlarla karşılaşıldığında engellenebilir veya sabit hale getirilebilir. Bu tür kusurlar, kayma ile oluşan dislokasyonların geçişi engellendiğinde pekleşmeye (work hardening) yol açan etkiler gibi, ara yüzün östenite geçişine engel olan bir işlev görür. Östenitin plastik olarak deforme edilmesiyle dislokasyonların yoğunluğu arttırılırsa, dislokasyonlar ferrit plakaların büyümesini sınırlar; Beynitin veya ferrit yan plakalarının son fraksiyonu, deforme olmuş östenitte, şekillendirilmemiş östenite göre daha küçük hale gelebilir.

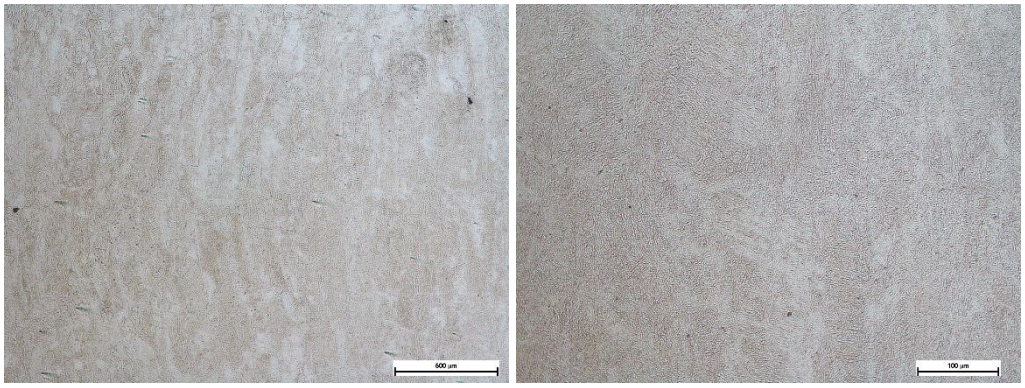
x50 **x200**



(a)



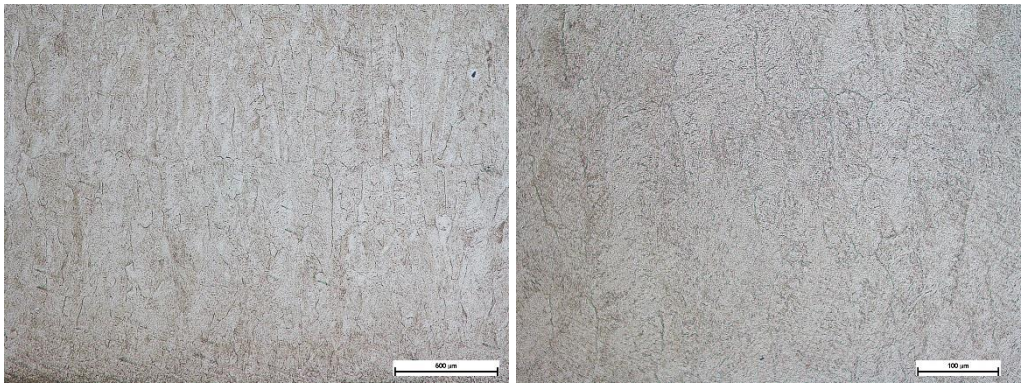
(b)



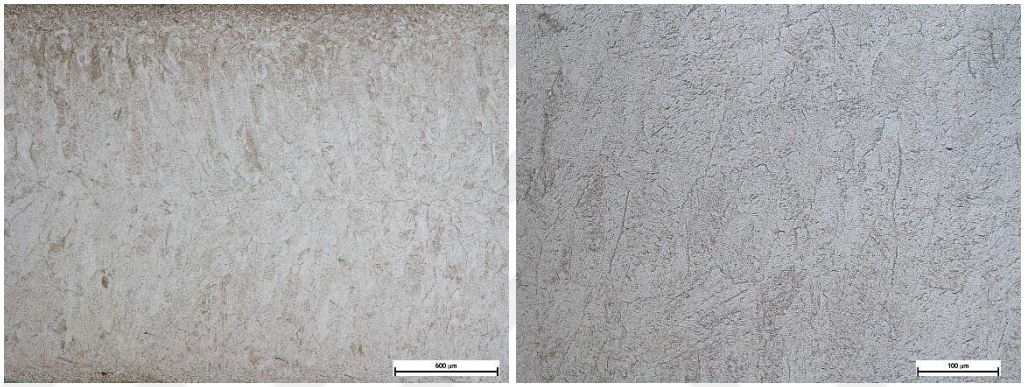
(c)

Şekil 4.20 : a) 13, b) 14 ve c) 15 nolu numuneye ait x50, x200 büyütmede mikrosertlik ölçümü yapılan kesit mikroyapısı.

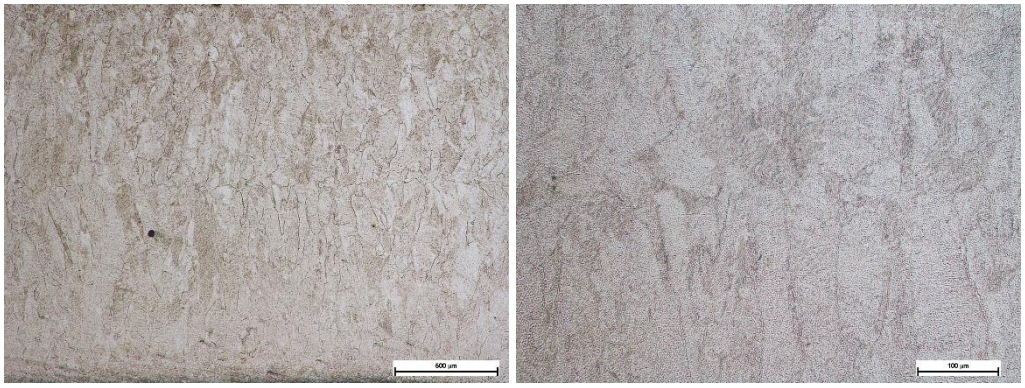
x50 **x200**



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.21 : a) 10, b) 11 c) 12 nolu numuneye ait (a) x50, (b) x200 büyütmede mikrosertlik ölçümü yapılan kesit mikroyapısı.

Sertlik ölçümleri Tablo 4.13 ve 4.14'te verilmiştir. Genel olarak, F tipi elektrodun mikrosertlik üzerine etkisi oldukça belirgindir. Sertlik değerleri ortalama olarak artmaktadır. Sistematik olarak artan mikrosertlik değerlerinin temel parametresi değişken

tane boyutu olup, ikincisi ile ortaya çıkan tane içi morfolojisidir.Tane boyutunun ve tane içi morfolojisinin sertlik artışında sorumlu olması, Hall Petch denklemine göre işlemektedir. Bu denkleme göre artan akma mukavemet değeri küçük tanelerin plastik deformasyonla ortaya çıkan dislokasyonların hareketine karşı göstermiş olduğu dirençle telafuz edilmektedir. Tane boyutunun küçük olması, dislokasyonların ortalama taşınma mesafelerini azaltmakta ve tane sınırlarına dayanıp dislokasyon çakışmalarına sebep olmaktadır. Arapsaçı modu veya (Dislocation tangle) dislokasyon ağının fazlalaşması sertliğin artmasına sebep olur. Ayrıca artan deformasyon miktarı da tane küçülmesinin yanında, kalıntı gerilmelerin ısı girdisi ile ilişkilerini kontrol edecektir. Düşük ısı girdisi ile beraber, soğuma hızı artar ve daha fazla kalıntı gerilim ortaya çıkmaktadır. Bu seride yüksek sıcaklıklarda mikrosertlik artmıştır ki burada ki mekanizmanın kalıntı gerilimden daha çok dislokasyon kilitlenmesi olması ihtimali daha fazladır.

Tablo 4.13: Direnç nokta kaynağı yapılmış numunelere ait mikrosertlik (HV) ölçüm sonuçları.

Numune	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ortalama Sertlik (HV)
G Tipi - 10	231,9	244,8	291,7	256,13
G Tipi - 11	243	249,8	244,2	245,67
G Tipi - 12	263	267,9	252	260,97
B Tipi - 13	296,8	355,9	267,2	306,63
B Tipi - 14	311,3	303	346,4	320,23
B Tipi - 15	308,2	301,1	289,4	299,57
F Tipi - 16	365	361,4	353,5	359,97
F Tipi - 17	347,4	406,1	377,1	376,87
F Tipi - 18	400,7	360,7	366,4	375,93

Elektot ölçülerindeki değişim Tablo 4.14'de verilmiştir. Kaynak öncesi ve sonrasında kaynak elektrodunda ciddi değişimler görülmemekle beraber, boyutlarındaki değişim veya azalma artma miktarlarına bakıldığında, F tipi elektrodunu tabloya göre en fazla şekilsel değişime maruz kaldığı görülmektedir. G tipi elektrodun şekli gereği, daha çok düz bir çıkıntıya sahip olması ve B tipi elektrot da olduğu gibi daha dengeli bir basma yüzeyi oluşumu yerine deformasyonu kolaylaştırıcı ve çekirdek kalınlığını azaltan alanın diğerlerine göre darlığı, şekil değişiminde önemli bir rol oynayabilmektedir. Alt

elektrotların daha fazla aşınması veya boylarının azalması, artan ısı girdisi ile beraber çok azda olsa şekilsel bir düzenleme olarak yorumlanmalıdır.

Tablo 4.14: Zaman, akım, elektrot ölçü tablosu.

HX340 LAD+Z	Test No	Zaman (ms)	Akım (A)	Referans alt elektrot	Referans üst elektrot	Kaynak sonrası alt elektrot	Kaynak sonrası üst elektrot	Alt elektrot boyutsal azalma miktarı	Üst elektrot boyutsal azalma miktarı
Elektrot Tipi G	10	300	6,5 kA	21,86	22,02	21,71	22,03	0,15	-0,01
	11	300	7 kA	21,96	22,08	21,88	22,09	0,08	-0,01
	12	300	7,5 kA	21,88	21,86	21,77	21,85	0,11	0,01
Elektrot Tipi B	13	300	7,2 kA	22,02	21,95	21,96	21,93	0,06	0,02
	14	300	7,7 kA	21,92	21,95	21,88	21,95	0,04	0,00
	15	300	8,2 kA	21,95	21,92	21,94	21,96	0,01	-0,04
Elektrot Tipi F	16	300	6 kA	22,32	22,2	22,13	22,16	0,19	0,04
	17	300	6,5 kA	22,29	22,26	21,96	22,12	0,33	0,14
	18	300	7 kA	22,26	22,19	22,22	22,12	0,04	0,07

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yüksek mekanik özelliklere sahip HX340LAD+Z malzemesi Nokta direnç kaynağı teknikleriyle başarıyla kaynaklanmıştır. Kaynak bölgesindeki ve elektrot yüzeyine ait fiziksel ve mikroyapısal incelemeler neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır.

1. Boyutsal ölçüm sonuçlarına göre G tipi elektrot uç formunun daha düzgün bir baskı yaratmak için dizayn edildiği ve baskı kuvvetinin homojen dağılıma müsade ettiği görülmektedir. Artan akım şiddeti ile beraber, ısı girdiside artmakta ve ısı girdisinin artmasıyla çekirdek çapını kısmen artırdığı görülmektedir. B tipi elektrot ucu ile yapılan plaka denemelerinde en-genişlik oranları dikkate alındığında 1 yani en genişlik oranının birbirne yakın değerine bu seride yaklaşmadığı görülmektedir. B tipi elektrot ucuna bakıldığında ise homojen bir deformasyon veya aşınma gösterdiği düşünülmektedir. F tipi elektrot uc ile yapılan kaynak ölçüm sonuçları oldukça iyi sonuçlar vermiştir. Boyutsal ölçümlerin ortalamaları özellikle yüksek akım kullanılarak yapılan numunelerde en-genişlik oranı 1'e oldukça yakın bulunmaktadır. G ve B tipi elektrotlarda en düşük ısı girdisi ile en yüksek ısı girdisi arasındaki dış çap farkı sırasıyla 2.1 ve 2.2 mm olmakta iken, bu seride en düşük ısı girdisinde fark 1.2 mm ve en yüksek ısı girdisinde ise fark 1.8 mm olmuştur. Bu durumda daha iyi bir boyutsal kararlılık sağladığı görülmektedir.

2. Çekirdek iç ve dış çap farkının artması ısı girdisinin arttığını göstermektedir.

3. F tipi eletrot ucuyla yapılan denemelerde, boyutsal ölçümlerde iyi sonuç veren G tipi elektrot ucu ile yapılan deneylere göre daha iyi sonuç verdiği açıkca görülmektedir. B tipi elektrot boyutsal sonuçlarda en düşük performansı göstermiştir.

4. Nokta direnç kaynak elektrotları oldukça yüksek sıcaklıklara dayanmakta ve kaynak sırasında uygulanan baskı kuvvetinden dolayı ise, uygulanan baskı kuvvetinin veya nokta kaynaklarının sıklığına göre de ısı birikmesi nedeniyle de bir süre sonra deformasyona maruz kalmaktadır.

5. SEM ve üzerinden yapılan EDX sonucuna göre nokta kaynak çekirdekleri üzerinde görülen elementel değişimi, çinko ve bakır transferinin gerçekleştiği görülmektedir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda madde transferi, temel olarak buharlaşma ve yüzeye adhesif olarak yapışma ile gerçekleşmektedir. G tipi elektrot ile yapılan denemelerde çinko ve bakır rastgele dağıldığı ve özellikle alumünyum elementinin de bulunduğu görülmektedir. Bazı kaplamalarda çinko ile beraber alüminyumda bulunabilmektedir. Alüminyum dolayısıyla kaplamadan gelmekte ve çinko ile beraber buharlaşıp yüzeye yapışmaktadır. B tipi elektrot ile yapılan denemelerde bakır oranının daha yüksek bir oranda transfer edildiği görülmektedir. Hızlı bir şekilde buharlaşan ve bozunma sıcaklığı düşük olan CuO'in ayrışması ile beraber, artan sıcaklıkta termodinamik olarak daha kararsız olan CuO, ayrıştığında Cu serbest kalmakta ve temiz bir yüzey olan demir yüzeyine yapışmayı kolaylaştırmaktadır. Analizler çok ciddi oranda çinko birikiminin veya yüzeylere transferinin gerçekleştiğini işaret etmektedir. F tipi elektrot ile yapılan denemelerde elementel dağılım genel olarak homojen olmakla beraber yüzeydeki gözeneklerin içerisinde çinkonun bulunması yüzeyde çinko buharının oluşması ve buharlaşma ile beraber gözeneklerde hapsolması neticesinde, yoğunlaştığı ve biriktiği düşünülmektedir. Bu elektrot türü yüzeyindeki aşınmanın az olmasının nedeni, elektrot bileşiminin veya şeklinin yorulma ve oksidasyonla ortaya çıkan hasarlara daha az maruz kalmasına yol açtığı veya oluşan bu gözeneklerin daha çok çinko bileşiği veya oksitlerle kaplanması ile beraber bakır transferine engel olması muhtemeldir.

6. Çeliklerin kaynağında ortaya çıkan çinko ile alaşımlandırma sonucu elektrot malzemesinden ağırlık kaybı ortaya çıkabilmektedir.

7. G tipi elektrodun mikrosertlik üzerine etkisi oldukca belirgindir. Sertlik değerleri elektrot tipine göre G, B ve F sırasıyla ortalama olarak artmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] Semiatin, S. L. (Ed.). (2006). ASM Handbook, ***Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming (Vol. 14). ASM international***.

[2] Kuzıak, R., (2008). ‘’Advanced High Strength Steels for Automotive Industry’’, ***Instytut Metalurgii Belaza***, ul. Karola Miarki 12-14, 44-100 Gliwice, Poland.

[3] http://makinatek.com.tr/uncategorized/161-otomotiv-endustrisinde-twip-celiklerin-gelecegi/

[4] Konieczny, A.A., Shi, M.F., ve Du, C., “An Experimental Study of Springback for Dual Phase Steel and Conventional High Strength Steel,” SAE 2001-01-3106, ***Society of Automotive Engineers***, 2001

[5] Demeri, M.Y., Hsu, C.-W. ve Ulsoy, A.G., Application of Real Time Process Control in Sheet Metal Forming, New Developments in Sheet Metal Forming, K. Siegert, Ed., ***Institute for Metal Forming Technology***, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, May 23, 2000, p 213–228

[6] Escher, C. ve Henke, T., Tool Materials for Processing of High Strength Steel Sheets, New Developments in Sheet Metal Forming, K. Siegert, Ed., ***Institute for Metal Forming Technology Proceedings***, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2004, p 103–122

[7] Zhou, M., Zhang, H. ve Hu, S., "Relationships between quality and attributes of spot welds," ***Welding Journal-New York***-, 82 (1): 72 (2003).

[8] Raut, M. ve Achwal, V. "Optimization of spot welding process parameters for maximum tensile strength," ***International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research***, 3 (1): 507-517 (2014).

[9] Sun, X. ve Dong, P., "Analysis of aluminum resistance spot welding processes using coupled finite element procedures," ***Welding Journal-New York***-, 79: 215 (2000).

[10] Donders, S. Brughmans, M. Hermans, L. Liefooghe, C., Van, H. ve Desmet, W., "The robustness of dynamic vehicle performance to spot weld failures," ***Finite Elements in Analysis and Design***, 42 (1): 670-682 (2006).

[11] Zhou, Y. Gorman, P. Tan, W. ve Ely, K., "Weldability of thin sheet metals during small-scale resistance spot welding using an alternating-current power supply," ***Journal of Electronic Materials,*** 29 (1): 1090-1099 (2000).

[12] Khan, M. I., "Spot Welding of Advanced High Strength Steels (AHSS)," ***University of Waterloo,*** Canada, 55-60 (2007).

[13] Hofman, K. Soter, M., Orsette, C., Villaire, S. ve Prokator, M., "AC or DC for resistance welding dual-phase 600?," ***Welding Journal,*** 84 (1): 46-48 (2005).

[14] Nayak, S., Zhou, Y. V. Hernandez, B. ve Biro, E., "Resistance spot welding of dual-phase steels: heat affected zone softening and tensile properties," **in *Proceedings of the 9th International Conference on Trends in Welding Research, Chicago, Illinois, United States,*** 641-649 (2012).

[15] Jung, G. "Spot Weldability of TRIP Steel with High Carbon, High Aluminium Content," ***Pohang University of Science and Technology, Pohang***, South Korea, 67-70 (2011).

[16] Senkara, J. ve Zhang, H. "Resistance Welding Fundamentals and Applications," ***ed: CRC Press Taylor & Francis Group,*** France, Paris, 23-27 (2006).

[17] Browne, D., Chandler, H., Evans, J. James, P., Wen,J. ve Newton, C., "Computer simulation of resistance spot welding in aluminum: Part II," ***Welding Journal-Including Welding Research Supplement,*** 74 (1): 417 (1995).

[18] Kearns, W. H., "AWS welding handbook,welding processes resistance and solid state welding and other joining processes", ***Amer Welding Society, Aman***, 1220-1230 (1980).

[19] Sarwar, M., Ahmad, E., Qureshi, K. ve Manzoor, T. "Influence of epitaxial ferrite on tensile properties of dual phase steel," ***Materials & Design,*** 28 (1): 335-340 (2007).

[20] Dong, S. and Zhou, Y., "Effects of TiC composite coating on electrode degradation in microresistance welding of nickel-plated steel," ***Metallurgical and Materials Transactions A***, 34 (1): 1501-1511 (2003).

[21] Yang, D., Brown, E. Matlock, D. ve Krauss, G., "Ferrite recrystallization and austenite formation in cold-rolled intercritically annealed steel," ***Metallurgical Transactions A,*** 16 (1): 1385-1392 (1985).

[22] Matlock, D. K., Krauss, G., Ramos, L. and Huppi, G. S., "A correlation of processing variables with deformation behavior of dual-phase steels," ***Structure and Properties of Dual-Phase Steels,*** 1 (1): 62-90 (1979).

[23] Erdogan, M. "The effect of new ferrite content on the tensile fracture behaviour of dual phase steels," ***Journal of Materials Science,*** 37 (1): 3623-3630 (2002).

[24] Sobhani, S., ve M. Pouranvari. "Duplex Stainless Steel/Martensitic Steel Dissimilar Resistance Spot Welding: Microstructure-Properties Relationships." ***Welding Journal,*** 1(4): 1-16 (2019).

[25] Kobayashi, Takaya, ve Yasuko Mihara. "Numerical simulation of nugget formation in spot welding." ***In SIMULIA Community Conference,*** Japan, 1-8 (2014).

[26] Anık, S., Ogur, A. ve Aslanlar, S. "The effect of welding current on tensileshear strength of galvanized chromate micro-alloyed steel sheets applied to electrical resistance spot welding," ***In Welding Technology 2nd National Congress,*** Ankara, Turkey, 12-17 (1999).

[27] Pouranvari, M. ve Marashi, S., "Critical sheet thickness for weld nugget growth during resistance spot welding of three-steel sheets," ***Science and Technology of Welding and Joining,*** 16 (1): 162-165 (2011).

[28] Pouranvari, M., Asgari, H., Mosavizadch, S., Marashi, P., ve Goodarzi, M., "Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds," ***Science and Technology of Welding and Joining,*** 12 (1): 217-225 (2007).

[29] De, A., "Spot welding", ***Science and Technology of Welding and Joining,*** 13(3): 213-214 (2008).

[30] Winnicki, M., Małachowska, A., Korzeniowski, M. Jasiorski, M. And Baszczuk, A. "Aluminium to steel resistance spot welding with cold sprayed interlayer," ***Surface Engineering***, 34 (3): 235-242 (2018).

[31] Porter, D. and Easterling, K., "Phase transformation in materials," ***Chapman & Hall, Boundary Row,*** London, 291-308 (1992).

[32] Rodelas, J. M. *"Friction Stir Processing of Nickel-base Alloys*", ***The Ohio State University,*** Ohio, USA, 78-81 (2012).

[33] Ma, C., Chen, D., Bhole, S., Boudreau, G., Lee, A. ve Biro, E. "Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel," ***Materials Science and Engineering: A***, 485 (1): 334-346 (2008).

[34] Shi, G. ve Westgate, S. "Resistance spot welding of high strength steels," ***International Journal for the Joining of Materials,*** 16 (1): 9-14 (2004).

[35] Clarke, A., Speer, J., Miller, M., Hackenberg, D., Edmonds, D., "Carbon partitioning to austenite from martensite or bainite during the quench and partition (Q&P) process: A critical assessment," ***Acta Materialia,*** 56 (1):16-22 (2008).

[36] Lee, J. L., Hon, M. H. ve Cheng G. H., "The intermediate transformation of Mn-Mo-Nb steel during continuous cooling," ***Journal of Materials Science***, 22 (1): 2767-2777 (1987).

[37] Gould, J., Khurana, S. ve Li, T., "Predictions of microstructures when welding automotive advanced high-strength steels," ***Welding Journal-New York-,*** 85 (1): 111 (2006).

[38] Aydin, H., "The mechanical properties of dissimilar resistance spot-welded DP600–DP1000 steel joints for automotive applications," ***Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering,*** 229 (1): 599-610 (2015).

[39] Hernandez, B., Kuntz, V., Khan, M. ve Zhou, Y., "Influence of microstructure and weld size on the mechanical behaviour of dissimilar AHSS resistance spot welds," ***Science and Technology of Welding and Joining,*** 13 (1): 769-776 (2008).

[40] Fadaei, A., Mahmoudi, A. and Borzuie, A., "Experimental study of the nugget diameter effect on tensile-shear strength in AISI 1008 spot welding specimens," ***J Mech Res Appl***, 4 (1): 1-7 (2012)

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

1. Mert Onan, **E. Halit Çebi**, Abdulmecit Güldas, Cansel Kaygısız, "The Effect of Punch Shear Angle on Shear Force During The Blankıng/Piercing Process using Die", 4th International Conferenceon Engineering Technology and Applied Sciences (ICETAS 2019), 24-28 April 2019, Kiev-Ukranie.

2. **E. Halit Çebi**, Yavuz Keleş, Mert Onan, Hüseyin Uzun "Comparision of Mechanical Properties of Dissimilar DP450/DC04 Remote Laser And Resistance Spot Weld Joints", 8. Int. Met. Congress, 31 May - 3 Haz 2018, Ohrid-Makedonya.

3. **E. Halit Çebi**, Yavuz Keleş, Mert Onan, Hüseyin Uzun "The Mechanical Properties And Characteristics Of DP450-DC04 Steel Joints Combined with Remote Laser and Resistance Spot Welding Techniques", IMSMATEC 18, 10-12 Nisan 18, İzmir-Türkiye

4. Ensar Yıldırım, **Halit Çebi**, Murat Şen, Erkan Serdar Yılmaz, ''Robot Kontrollü İndüksiyon Sertleştirme Parametrelerinin Sac Metal Kalıp Yüzey Sertliğine Etkilerinin Taguchi Metodu İle İncelenmesi', PAJES, Vol 23, No 1, 2017.

5. Murat Şen, Ensar Yıldırım, **Halit Çebi**, Cemil Özdemir, 'Çift Fazlı Çeliklerden Üretilen Otomotiv Sac Parçalarının Dizaynında Geri Esnemeyi Optimize Edebilmek İçin Sac Kalınlığına Bağlı Olarak Büküm Radyüslerinin Belirlenmesi'', Makine Teknolojileri, Vol 12, No 2, 2015.

6. Mesut Özer, Hasan Kaya, Mehmet Uçar, **Halit Çebi**, ''Çift Fazlı Çeliklerin Nokta Direnç Kaynağı ile Birleştirilmesinde Kaynak Süresinin Belirlenmesi'', MMT 2015, 13-14 Kasım 2015, Kocaeli-Türkiye.

7. **E. Halit Çebi**, "Kontrol Fikstürü İle Gerçekleştirilen Sac Parça Ölçme, Kontrol Sistemi Ve Yöntemi (Üç Boyutlu Parçaların Özel Fikstürler Üzerinde Radyo Frekansı Kullanarak Ölçümü Ve Kontrol Yöntemi)" , Turk Patent, PT2015-01048, 2018, Türkiye.