

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖN DEFORMASYON UYGULANMIŞ DP600 KALİTE ÇELİKLERİN PUNTA
KAYNAK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ramazan UZUN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

ARALIK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÖN DEFORMASYON UYGULANMIŞ DP600 KALİTE ÇELİKLERİN PUNTA
KAYNAK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ramazan UZUN
(506131428)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU

ARALIK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 506131428 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ramazan UZUN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ÖN DEFORMASYON UYGULANMIŞ DP600 KALİTE ÇELİKLERİN PUNTA KAYNAK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENÖĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Sakin ZEYTİN**
Sakarya Üniversitesi

Doç.Dr. Murat BAYDOĞAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **24 Kasım 2016**
Savunma Tarihi : **21 Aralık 2016**

Eşime,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitim sürecinde ve tez çalışmalarımda gösterdiği çok büyük destek için değerli danışman hocam Prof. Dr. Hüseyin Çimenoglu'na teşekkür ederim.

Tüm çalışmalarımda ilgi ve desteklerini esirgemeyen değerli yöneticilerim Dr. Oğuz Gündüz ve Yasemin Kılıç'a,

Tez aşamasında gerçekleştirdiğim çalışmalarda katkıları bulunan değerli mesai arkadaşlarım Mustafa Erdem Levent ve Ümran Başkaya'ya,

Her zaman her durumda yanımda olan aileme, hayatı anlamlı kılan sevgili eşim Saliha Uzun'a teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2016

Ramazan UZUN
Metalurji ve Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
1. GİRİŞ.....	1
2. YENİ NESİL İLERİ YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER.....	3
2.1 Çift Fazlı Çelikler.....	4
2.2 Martenzitik Çelikler	8
2.3 Kompleks Fazlı Çelikler.....	9
2.4 Dönüşüm Etkili Plastisite Çelikleri	9
2.5 Sıcakta Şekillenebilir Çelikler.....	10
3. OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ	11
3.1 Punta Kaynağı	16
3.2 Punta Kaynak Bölgesinin Yapısal Özellikleri.....	21
3.3 Punta Kaynaklı Parçaların Mekanik Testleri.....	22
3.3.1 Kesme testi (Tensile Shear Test)	23
3.3.2 Ayırma testi (Cross Tension Test)	23
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	25
4.1 Kullanılan Malzemeler ve Uygulanan İşlemler.....	25
4.2 Punta Kaynak İşlemleri	28
4.3 Mekanik Testler.....	30
4.4 Mikroyapı ve Sertlik İncelemeleri.....	33
5. DENEYSEL SONUÇLAR.....	37
5.1 Ön Deformasyonun DP600 Çeliğinin Yapı ve Özelliklerine Etkisi	37
5.2 Punta Kaynaklı Parçaların Mikroyapı İncelemeleri ve Sertlik Ölçümleri	38
5.3 Punta Kaynaklı Parçaların Mekanik Test Sonuçları	58
5.3.1 Kesme testi (TSS) sonuçları.....	58
5.3.2 Ayırma testi (CTS) sonuçları	64
6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ	71
KAYNAKLAR	73
EKLER.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	103

KISALTMALAR

AHSS	: İleri Yüksek Mukavemetli Çelikler
DP	: Çift Fazlı Çelik
CP	: Kompleks Fazlı Çelik
TRIP	: Dönüşüm Etkili Plastisite Çelikleri
RSW	: Nokta Direnç Kaynağı
MIG	: Metal Asal Gaz Kaynağı
MAG	: Metal Aktif Gaz Kaynağı
TIG	: Gaz Tungsten Ark Kaynağı
LBW	: Lazer Demet Kaynağı
HAZ	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
TSS	: Kesme Testi
CTS	: Ayırma Testi
CAL	: Sürekli Tavlama Hattı
CGL	: Sürekli Galvanizleme Hattı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

SEMBOLLER

Q	: Isı girdisi
I	: Kaynak akımı
R	: Direnç
t	: Kaynak zamanı
F	: Elektrod Kuvveti
I_{min}	: Minimum akım
I_{max}	: Maksimum akım

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Çift fazlı çelik üretim yöntemleri ve kimyasal kompozisyonları	5
Çizelge 4.1 : DP600 çeliğine ait kimyasal bileşim (%ağırlık).....	25
Çizelge 4.2 : DP600 çeliğine ait mekanik özellikler	25
Çizelge 4.3 : Punta Kaynak Parametreleri	29
Çizelge 4.4 : Minimum ve maksimum kaynak akımı parametreleri	29
Çizelge 5.1 : Ön deformasyon sonrası galvanizli ve kaplamasız DP600 malzemelere ait mekanik test ve sertlik değerleri	37
Çizelge 5.2: Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün farklı bölgelere ait nokta EDS analiz sonuçları.....	50
Çizelge 5.3: Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün farklı bölgelere ait nokta EDS analiz sonuçları.....	51

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : İleri yüksek mukavemetli çeliklerde dayanım-uzama ilişkisi	3
Şekil 2.2 : DP600 çeliğine ait mikroyapı görüntüsü.....	4
Şekil 2.3 : Otomotiv gövde üretiminde DP600 çeliğinin kullanıldığı komponentler..	5
Şekil 2.4 : Çift fazlı çelik oluşumu faz diyagramı ve ısı çevrimi	6
Şekil 2.5 : a) soğuk haddeleme ve tavlama b) sıcak haddeleme yöntemiyle çift fazlı çelik üretimi şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.6 : Martenzitik çeliğe ait mikroyapı görüntüsü	8
Şekil 2.7 : CP800 çeliğe ait mikroyapı görüntüsü	9
Şekil 2.8 : TRIP 780 çeliğine ait mikroyapı görüntüsü	10
Şekil 2.9 : Hot stamping çeliğinin iç yapısında meydana gelen değişim	10
Şekil 3.1 : Punta kaynağı şematik gösterimi.....	12
Şekil 3.2 : Elektrik dikiş kaynağı prosesi	12
Şekil 3.3 : MIG/MAG kaynağı şematik gösterimi	13
Şekil 3.4 : TIG kaynağı şematik gösterimi	14
Şekil 3.5 : Lazer demet kaynağı prosesi	15
Şekil 3.6 : Sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirilen iki şaft	16
Şekil 3.7 : Punta kaynak prosesi.	17
Şekil 3.8 : Punta kaynak prosesinde kullanılan elektrod tipleri.....	19
Şekil 3.9 : SEP 1220 Standardı örnek kaynak aralığı diyagramı.....	19
Şekil 3.10 : Direnç kaynak prosesi aşamaları	20
Şekil 3.11 : Punta kaynak kesit görüntüsü.....	21
Şekil 3.12 : Punta kaynağa etki eden faktörlerin balık kılçığı yöntemi ile gösterimi	22
Şekil 3.13 : Kesme testi numunesi ve yük-yer değiştirme diyagramı	23
Şekil 3.14 : Ayırma testi numunesi ve yük-uzama diyagramı.....	23
Şekil 3.15 : Şematik olarak punta kaynak kırılma tipleri	24
Şekil 4.1 : Galvanizli DP600 malzemeye ait kesit görüntüsü	26
Şekil 4.2 : Çekme çubuğu teknik çizimi.....	26
Şekil 4.3 : Numunesi hazırlama işlemleri.....	26
Şekil 4.4 : 120 tonluk Zwick marka statik çekme cihazı	27
Şekil 4.5 : Testlerde kullanılan punta kaynak makinesi	28
Şekil 4.6 : Elektrod kuvveti ve akım ölçüm cihazı.....	28
Şekil 4.7 : Sıyırma testi ve minimum kaynak çapı ölçümü	29
Şekil 4.8 : Kaynak testleri için tasarlanan kalıplar	30
Şekil 4.9 : ISO 14273 standartına göre kesme testi numunesi ve ebatları.....	31
Şekil 4.10 : ISO 14272 standartına göre kesme testi numunesi ve ebatları.....	31
Şekil 4.11 : Kaynak mekanik test numuneleri; (a) kesme testi, (b) ayırma testi	32
Şekil 4.12 : Kesme ve ayırma testi düzenekleri.....	32
Şekil 4.13 : Parlatma cihazı	33

Şekil 4.14 : Optik mikroskop cihazı	34
Şekil 4.15 : Taramalı Elektron Mikroskobu Cihazı	34
Şekil 4.16 : Kaynak bölgesi sertlik taraması.....	35
Şekil 4.17 : Mikrosertlik ölçüm cihazı.....	35
Şekil 5.1 : Deneylerde kullanılan galvanizli ve kaplamasız DP600 çeliklerinin mikroyapıları.....	38
Şekil 5.2 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.....	39
Şekil 5.3 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün çekirdek bölgesi görüntüsü	40
Şekil 5.4 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün alt kritik ITAB görüntüsü	40
Şekil 5.5 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları	41
Şekil 5.6 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün üst kritik ITAB görüntüsü.....	41
Şekil 5.7 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün alt kritik ITAB görüntüsü	42
Şekil 5.8 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.....	42
Şekil 5.9 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün üst kritik ITAB görüntüsü.....	43
Şekil 5.10 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün ITAB görüntüsü	43
Şekil 5.11 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları	44
Şekil 5.12 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün alt kritik ITAB görüntüsü	44
Şekil 5.13 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesine ait EDS analizi, Zn ve Fe haritaları	45
Şekil 5.14 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün ITAB bölgesine ait EDS analizi, Zn ve Fe haritaları	46
Şekil 5.15 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün çekirdek bölgesine ait EDS analizi, Zn ve Fe haritaları	47
Şekil 5.16 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün çekirdek bölgesine ait EDS analizi, Zn ve Fe haritaları	48
Şekil 5.17 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün ITAB bölgesine ait analizi	49
Şekil 5.18 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün ITAB bölgesine ait analizi	49
Şekil 5.19 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'den noktasal analiz alınan farklı bölgeler.....	50

Şekil 5.20 :	Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'den noktasal analiz alınan farklı bölgeler ...	51
Şekil 5.21 :	Galvanizli kaynak numunelerine ait çekirdek uzunluğu-ön deformasyon grafiği.....	52
Şekil 5.22 :	Galvanizli kaynak numunelerine ait ITAB genişliği-ön deformasyon grafiği.....	52
Şekil 5.23 :	Kaplamasız kaynak numunelerine ait çekirdek uzunluğu-ön deformasyon grafiği.....	53
Şekil 5.24 :	Kaplamasız kaynak numunelerine ait ITAB genişliği-ön deformasyon grafiği.....	53
Şekil 5.25 :	Minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız kaynak numunelerine ait sertlik ölçümleri	54
Şekil 5.26 :	Minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız kaynak numunelerine ait bölgesel ortalama sertlik ölçümleri kıyaslaması.....	55
Şekil 5.27 :	Maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız kaynak numunelerine ait sertlik ölçümleri	55
Şekil 5.28 :	Maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız kaynak numunelerine ait bölgesel ortalama sertlik ölçümleri kıyaslaması.....	56
Şekil 5.29 :	Minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli kaynak numunelerine ait sertlik ölçümleri	56
Şekil 5.30 :	Minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli kaynak numunelerine ait bölgesel ortalama sertlik ölçümleri kıyaslaması.....	57
Şekil 5.31 :	Maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli kaynak numunelerine ait sertlik ölçümleri	57
Şekil 5.32 :	Maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli kaynak numunelerine ait bölgesel ortalama sertlik ölçümleri kıyaslaması.....	58
Şekil 5.33 :	Kaplamasız DP600 numunelere ait kesme testi sonuçları.....	59
Şekil 5.34 :	Kesme testi sonrası kaplamasız numunelere ait hasar görüntüleri.....	59
Şekil 5.35 :	Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi	60
Şekil 5.36 :	Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi	60
Şekil 5.37 :	Galvanizli DP600 numunelere ait kesme testi sonuçları.....	61
Şekil 5.38 :	Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi	62
Şekil 5.39 :	Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi...	63
Şekil 5.40 :	Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi kopan kısım hasar SEM incelemesi	63
Şekil 5.41 :	Kaplamasız DP600 numunelere ait ayırma testi sonuçları.....	64
Şekil 5.42 :	Ayırma testi sonrası kaplamasız numunelerin hasar görüntüleri	65
Şekil 5.43 :	Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi	65
Şekil 5.44 :	Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi	66
Şekil 5.45 :	Galvanizli DP600 numunelere ait ayırma testi sonuçları.....	67
Şekil 5.46 :	Ayırma testi sonrası galvanizli numunelerin hasar görüntüleri.....	67

Şekil 5.47 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda ($I_{\min}$) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kesme testi kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi	68
Şekil 5.48 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda ($I_{\max}$) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kesme testi kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi	68
Şekil 5.49 : Galvanizli ve kaplamasız numunelerin kesme testi sonuçlarının oranlanarak kaplama etkisinin incelenmesi	69
Şekil 5.50 : Galvanizli ve kaplamasız numunelerin ayırma testi sonuçlarının oranlanarak kaplama etkisinin incelenmesi	69

ÖN DEFORMASYON UYGULANMIŞ DP600 KALİTE ÇELİKLERİN PUNTA KAYNAK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Yeni nesil yüksek mukavemetli çelikler şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik ve araç ağırlığının azaltılmasında avantajlar sağladığı için son zamanlarda otomotiv endüstrisinde kullanımında artış görülmektedir. İleri yüksek mukavemetli çelikler (AHSS) grubunda bulunan çift fazlı DP (Dual Phase) çelikler, ferrit matris içinde dağılmış %15-20 oranında martenzit fazı ile yapısında az miktarda kalıntı östenit içerir. Üst düzey dayanım ve şekillendirilebilme performansına sahip çift fazlı çeliklerin otomotiv endüstrisinde kullanım oranı yüksektir.

Otomotiv sektöründe sürtünme kaynağı, oksii-asetilen kaynağı, eriyen elektrotla gazaltı (MIG ve MAG) kaynağı ve direnç nokta kaynağı yöntemleri kullanılmaktadır. Punta kaynak olarak bilinen direnç nokta kaynağı otomotiv endüstrisinde konvensiyonel çeliklerin ve ileri yüksek mukavemetli çeliklerin (AHSS) birleştirilmesinde en yaygın kullanımı olan kaynak yöntemidir. Punta kaynağı, iki bakır elektrod arasına yerleştirilen kaynaklanabilir malzemeleri, elektrodların uçları arasından geçiren ve elektrik akımının gücüyle birleştiren kaynak tekniğidir. Genelde sac malzemeler için çok eleverişli olduğundan, seri üretim yapan otomotiv fabrikalarında sık kullanılır.

Otomotiv gövde üretim proseslerinde parçaların pres hatlarında plastik şekil verme işleminin ardından kaynak ile parçaların birleştirilmesi işlemi yapılmaktadır. Punta kaynak işleminde kaynak akımı, kaynak zamanı, tutma zamanı ve baskı kuvveti parametreleri belirlenir. Minimum akım (I_{min}) ve maksimum akım (I_{max}) parametreleri düz sac üzerinden yapılan testler ile belirlenmektedir. Şekillendirilmiş parça üzerinde oluşan deformasyon oranına bağlı olarak mikroyapısal ve mekanik özellikler değişmektedir. Değişen özellikler sac malzemenin punta kaynak akım değerlerinde ve kaynak sonrası mekanik dayanımlarında değişimler oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, sıcak daldırma yöntemiyle galvaniz kaplanmış ve yüzeyinde kaplama bulunmayan DP600 çelik kaliteleri kullanılmıştır. %7,5 ve %15 oranlarında ön deformasyon uygulanması için yeni bir çekme çubuğu dizayn edilmiştir. Homojen deformasyon bölgesi kontrol edilmiştir. Ön deformasyon işlemi sonrası kesme (tensile shear) ve ayırma (cross tension) testleri için kaynak numuneleri hazırlanmıştır. Kusursuz bir kaynak işlemi için numune geometrilerine uygun kaynak fiktürleri dizayn edilmiştir. Kaynaklanacak malzemeler minimum ve maksimum akım miktarlarında punta kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Kaynaklanan malzemelerin mekanik dayanımları, kaynak bölgesi ve kaynak ısı tesiri altında kalan bölgesi (HAZ) mikroyapı karakteristikleri incelenmiştir. Kaplamalı ve kaplamasız malzemelere ait kaynak bölgesi iç yapısı ve hasar analizi yapılmıştır. Punta kaynak HAZ bölgesinde

yapılan sertlik taramaları ile kaynak mekanik dayanımları ilişkilendirilerek değişen ön deformasyon miktarına göre kaynak bölgesinin süneklik davranışları incelenmiştir.

Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, artan ön deformasyon miktarı ve akım miktarına bağlı olarak punta kaynak mekanik değerlerinde artış görölmüştür. Minimum akım miktarı ile kaynatılan parçalarda kaynak yüzeyi oluşup birleşme sağlanırken maksimum akım miktarı ile kaynatılan parçalarda daha fazla ısı girdisi oluşumuna bağlı olarak kaynak dayanımlarında artış görölmektedir.

INVESTIGATION OF SPOT WELDING PROPERTIES OF PRE-STRAINED DP600 STEEL GRADES

SUMMARY

Advanced high strength steels (AHSS) are sophisticated materials with carefully selected chemical compositions and multiphase microstructures. These materials have great strength combined with excellent ductility. One of AHSS is dual phase (DP) steel and usage of dual phase steel grades have been increased rapidly in the automotive industry due to high formability, good weldability and advantage of lightweight vehicles. Microstructure of DP steel consist of about 15-20% hard martensite particles dispersed in a soft ductile ferrite matrix. However, small amounts of other phases, such as bainite, pearlite, or retained austenite, may also be seen.

Resistance spot welding (RSW) is one of the major joining methods of conventional and AHSS steels in the automotive industry. Resistance spot welding is a rapid and economic procedure to join steel sheets in automotive industry. It has wider application in body car assembly, in average a vehicle has 4000 to 7000 welded points. It is significant to characterize the spot welding behavior of DP steels to be able to use these steels properly. For body-in-white applications, dual phase steels are used with either galvanized (pure zinc) or galvanized (zinc-iron alloy) coating for corrosion protection. Before welding process, body-in-white components of automobiles are deformed plastically. Due to the level of prestrain (plastic deformation), microstructure and mechanical characteristics vary locally and differ from the initial undeformed steel sheet.

The material investigated in this study, is a cold rolled galvanized and uncoated sheets of DP600 steel grade with 1.2 mm thickness. In order to determine I_{min} and I_{max} values for different prestrain conditions, chisel test coupons with 45x45mm dimensions were used. What is more, for the mechanical strength tests, shear and cross tensile test coupons with 105x45mm and 150x50mm dimensions respectively were preferred. In order to obtain these test specimens with the required dimensions for distinct prestrain levels, a new tensile test specimen is designed based upon standard A80 tensile test specimen. New designed tensile test specimens were cold deformed at 7.5% and 15% prestrain levels by applying static tension on Zwick type static tensile test machine. GOM/Argus, optical 3D forming analysis system, was used to confirm homogenous plastic deformation occurred in the middle area of the new tensile test specimen.

Spot welds were carried out by pedestal type AC spot welding machine with 250 kVA rated power at 50%. This machine is equipped with an air cylinder which has a maximum capacity of 6 bar. Chisel, shear and cross tensile test coupons are welded in accordance with SEP 1220-2 test standard procedure. As distinct from SEP 1220-2 standard, electrode caps were dressed according to the shape based on ISO 5821 standard, not to the dressing shape shown in Figure 1 of this standard. Electrode caps ISO 5821-F1-16 with 6mm face diameter made from Cu-Cr-Zr material were used

during the tests. Tip dressing was performed with air operated manual tip dresser. After tip dressing, outer cross-section of the electrode caps switched to the shape of ISO 5821-BO-16 with 6mm face diameter. Before the spot welding tests, electrode force applied by air cylinder was measured and checked with a portable instrument designed for measuring the parameters of resistance welding. During the tests, force value, welding and holding times were kept constant in order to determine the minimum and maximum current values defined in SEP 1220-2 for each type of non-prestrained and prestrained steel sheets. Minimum nugget diameter $4\sqrt{t}$ formula, where t is the sheet thickness of steel, is used to determine I_{min} value. All the chisel test coupons were destroyed by manually. After that, I current value was increased in small steps until the expulsions were observed. Just below I current value that was seen expulsions was defined as I_{max} current value.

Special molds were manufactured from kestamid material to prevent excess force on joint point and misalignment problems occurred before and after spot welding operation. Specially, in the not usage of any mold, alignment of chisel, shear and cross tensile test coupons are deformed during the welding operation. I_{min} and I_{max} current values were determined for non-prestrained and prestrained, 7.5% and 15%, conditions. For the determination of the current parameters SEP 1220-2 standard was taken as reference. It is seen that same I_{max} value is obtained for undeformed and deformed steel sheets. However, I_{min} value slightly changes depending on the prestrain levels. By the way, it is not observed any signification correlation between I_{min} and prestrain values. I_{min} value for 0% and 7.5% prestrained steel sheets may be accepted as the same. By the way, if the I_{min} value of undeformed sheet is compared with the I_{min} value of 15% prestrained sheet, 0.3kA difference can be described as a significant value. Thus, spot welds of shear and cross tensile test coupons of %15 prestrained sheets are also repeated for 7.5kA.

Optical microscope and scanning electron microscope were applied to evaluate the microstructure. Etching was performed by using 2% Nital solution. Fusion zone (FZ), HAZ and base metal (BM) are observed in cross-section of microstructure. Fusion zone is melted and solidify again during the welding procedure. The fusion zone and a part of HAZ, which is near fusion zone have fully martensitic structure. The region near fusion zone divided into two side such as grain growth and recrystallized regions. Phase transformation can be occurred in intercritical region based on temperature and cooling rate. The subcritical or tempered region, which is near the base metal, is so difficult to differ from the BM, does not demonstrate variance of microstructure. Fully martensitic microstructure was seen in fusion zone and a part of HAZ, which is near fusion zone. There is no phase transformation in the boundary of base metal and HAZ due to the lower temperature distribution. Tempering of martensite is occurred in subcritical zone. HAZ has great influence on the tensile properties of spot welded DP steel. Because rapture is occurred in the boundary of subcritical HAZ and the failure depends on HAZ softening significantly.

The hardness value of base metal is increased by pre-strain. Although the region which is near base metal (subcritical zone) has lower hardness values, the region near fusion zone has higher hardness values due to the formation of martensite near fusion zone.

Test procedures of ISO 14273 and ISO 14272 standards were followed for shear and cross tensile tests respectively. Tensile tests were carried out on electro-mechanical Zwick Z250 tensile testing machine at room temperature with the speed of 5 mm/min.

The results showed that F_{max} values obtained from shear testing is highly correlated with the prestrain values of sheet metal. With the increase in prestrain of sheet metal, strength of spot welds for both I_{min} and I_{max} current values increase significantly. These results showed that F_{max} values obtained from non-prestrained (undeformed) sheet metal are not correct or adequate for the mechanical strength calculations of body-in-white of a car and also for the crashworthiness calculations. The hardness value of base metal is increased by prior deformation. Although the region which is near base metal (subcritical heat affected zone) has lower hardness values, the region near fusion zone has higher hardness values due to the formation of martensite near fusion zone.

1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisinde egzoz emisyon değerlerinin azaltılması, araç hafifletme ve maliyet tasarrufu çalışmaları kapsamında geliştirilen yeni nesil ileri yüksek mukavemetli çelik (AHSS) malzemeler büyük bir öneme sahiptir. AHSS çelikleri sahip oldukları özel kimyasal analizleri ve çok fazlı mikroyapıları ile mükemmel dayanım ve süneklik kombinasyonları sağlamaktadır [1]. İleri yüksek mukavemetli çelikler ürün grubunda bulunan çift fazlı (DP) çelikler yüksek dayanım, mükemmel süneklik, iyi kaynak edilebilirlik ve çarpışma testlerinde yüksek enerji absorpsiyon kabiliyeti özelliklerine sahiptir [2].

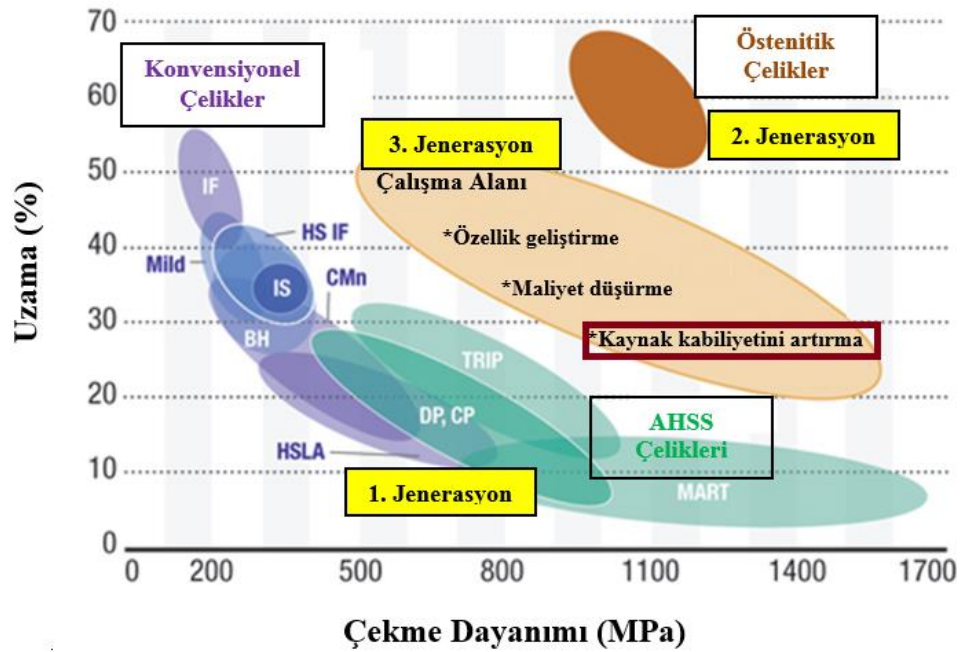
Direnç nokta kaynağı olarakta bilinen punta kaynağı hızlı, ekonomik ve güvenli olduğu için otomotiv endüstrisinde konvensiyonel çeliklerin ve ileri yüksek mukavemetli çeliklerin (AHSS) birleştirilmesinde en yaygın kullanımı olan kaynak yöntemidir [3]. Elektrik direnç kaynağı prensibi; elektrotlar arasında uygun baskı kuvveti ile sıkıştırılan iş parçalarından uygun sürede geçen uygun elektrik akımına karşı, iş parçasının gösterdiği direnç nedeni ile oluşan ısı ile birleşmenin meydana gelmesidir. Bir otomotiv gövde kısmında yaklaşık olarak 4000 ile 7000 adet arasında punta bulunmaktadır [4].

Otomotiv gövde üretim proses aşamalarında, plastik şekil verme işleminden sonra punta kaynak uygulamaları yapılmaktadır. Uygulanan şekil verme işleminin ardından form almış parça üzerinde oluşan deformasyon oranına bağlı lokal olarak mikroyapısal ve mekanik özellikler açısından form almamış durumda parçanın ilk haline göre farklılıklar görülmektedir. Değişen mekanik ve iç yapı özellikleri kaynak sonrası mekanik dayanım performanslarında değişim oluşturmaktadır. Bu çalışmada, farklı oranlarda ön deformasyon uygulanan sıcak daldırma yöntemiyle galvaniz kaplanmış ve kaplamasız DP600 çeliğinin değişen mekanik ve mikroyapısal özelliklerinin minimum ve maksimum akım değerlerinde punta kaynak yöntemi ile birleştirildiğinde kaynak mekanik dayanımı ve kaynak ısı tesiri altında kalan bölgenin (ITAB) içyapı karakteristiği üzerine olan etkisinin araştırılması hedeflenmiştir.

2. YENİ NESİL İLERİ YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER

Yakıt tasarrufu, CO₂ emisyonu, çarpışma dayanımı ve kaynak kabiliyeti gibi önemli özelliklerinden dolayı yüksek mukavemetli çeliklerin (HSS) otomotiv sektöründeki kullanımı giderek artmaktadır. Çelik sektöründeki hızlı ilerleyiş ile birlikte ileri yüksek mukavemetli çelikler (AHSS) olarak yeni nesil çelik kaliteleri geliştirilmektedir. AHSS çelik grubu geleneksel çeliklere göre özellikle ileri şekillenebilme kabiliyeti ve çarpışma dayanımının çok yüksek olması ile öne çıkmaktadır [5].

Şekil 2.1’de ileri yüksek mukavemetli çeliklerin (AHSS), konvansiyonel çeliklere kıyasla çekme mukavemeti-toplam uzama ilişkileri gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ileri yüksek mukavemetli çeliklerin çekme mukavemeti-uzama aralığı daha geniş bir bant aralığında yayılmaktadır. Yeni jenerasyon çelik gruplarında güncel çalışma konuları özelliklerin iyileştirilmesi, maliyet tasarrufu sağlanması ve kaynaklanabilirlik özelliklerinin geliştirilmesidir [3].

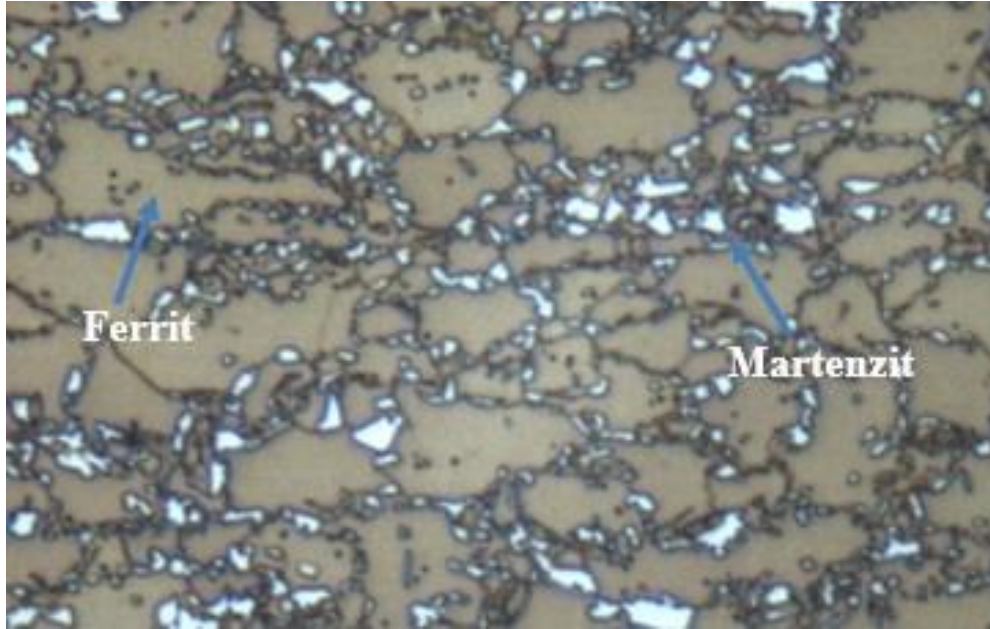


Şekil 2.1 İleri yüksek mukavemetli çeliklerde dayanım-uzama ilişkisi [3].

İleri yüksek mukavemetli çelik ailesi martenzitik çelikler (MS), çift fazlı çelikler (DP), kompleks fazlı çelikler (CP), dönüşüm etkili plastisite çelikleri (TRIP), preste şekillendirilmiş (Hot Stamping) çelikleri olarak sınıflandırılır [6].

2.1 Çift Fazlı Çelikler

İleri yüksek mukavemetli çelikler grubu içerisinde bulunan çift fazlı (DP) çelikleri yumuşak ferrit matris içerisinde adacıklar şeklinde %10-20 martenzit fazı içeren çelikler olarak tanımlanır. Yapılarında çok az miktarda olsa beynit, perlit ve kalıntı östenit fazları bulunabilir [7]. Şekil 2.2’de DP600 çeliğine ait mikroyapı görüntüsü gösterilmiştir.

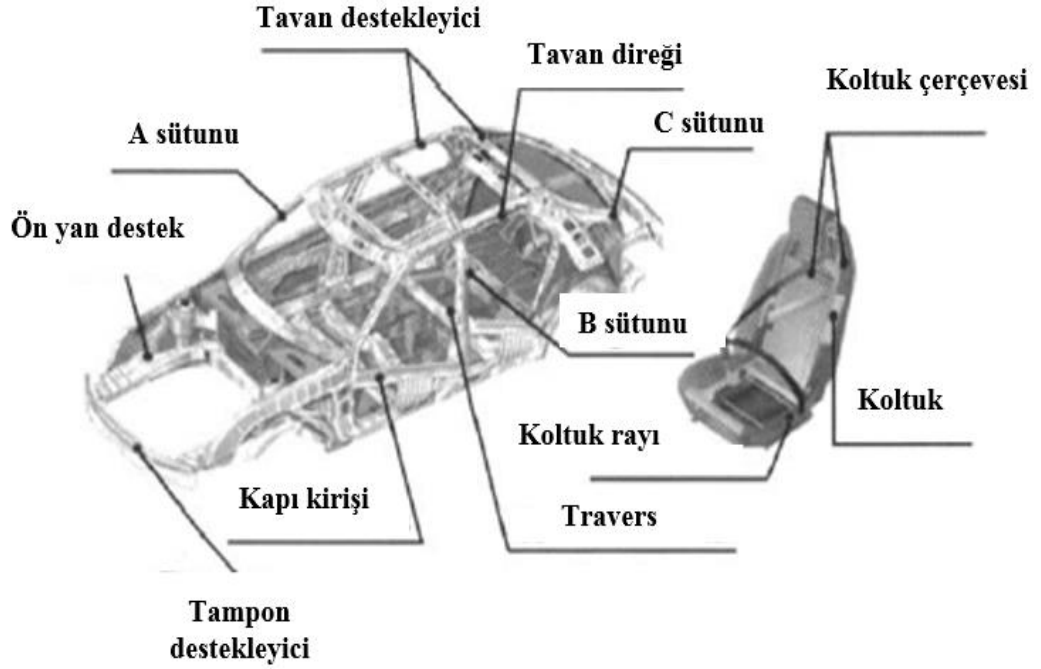


Şekil 2.2 DP600 çeliğine ait mikroyapı görüntüsü.

Çift fazlı çelikler genel karakteristik özellikleri açısından değerlendirildiğinde sürekli akma uzaması, yüksek çekme mukavemeti, yüksek pekleşme hızı, düşük akma/çekme dayanımı gibi özelliklere sahiptirler. Yüksek dayanım ve süneklik kombinasyonu özelliğine sahip olan DP çelikleri üstün şekillendirilebilme kabiliyeti ve iyi kaynak edilebilirlik özellikleri ile araç hafifliği ve yakıt tasarrufu sağlaması gibi avantajlarından dolayı otomotiv sektöründe en fazla kullanımı olan çeliklerdendir [8].

Yüksek enerji absorblama kabiliyeti ile birlikte mükemmel dayanım ve süneklik kombinasyonuna sahip olan çift fazlı çelikler koltuk çerçevesi, koltuk rayları, A-B-C yatay ve dikey destek sütun parçaları, tampon destek sacı, tavan kavis sacı gibi

bölgelerde kullanılmaktadır [9]. Şekil 2.3'te DP 600 çelik malzemesinin otomotivde hangi parçaların üretiminde kullanıldığı gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Otomotiv gövde üretiminde DP600 çeliğinin kullanıldığı bileşenler [9].

İdeal çift fazlı çelik yapısının elde edilmesinde kimyasal kompozisyon ile birlikte sıcak haddeleme, soğuk haddeleme ve tavlama üretim parametreleri çok etkilidir. Üretim yöntemlerine göre, genel olarak kullanılan kimyasal kompozisyon analizleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 : Çift fazlı çelik üretim yöntemleri ve kimyasal kompozisyonları [10].

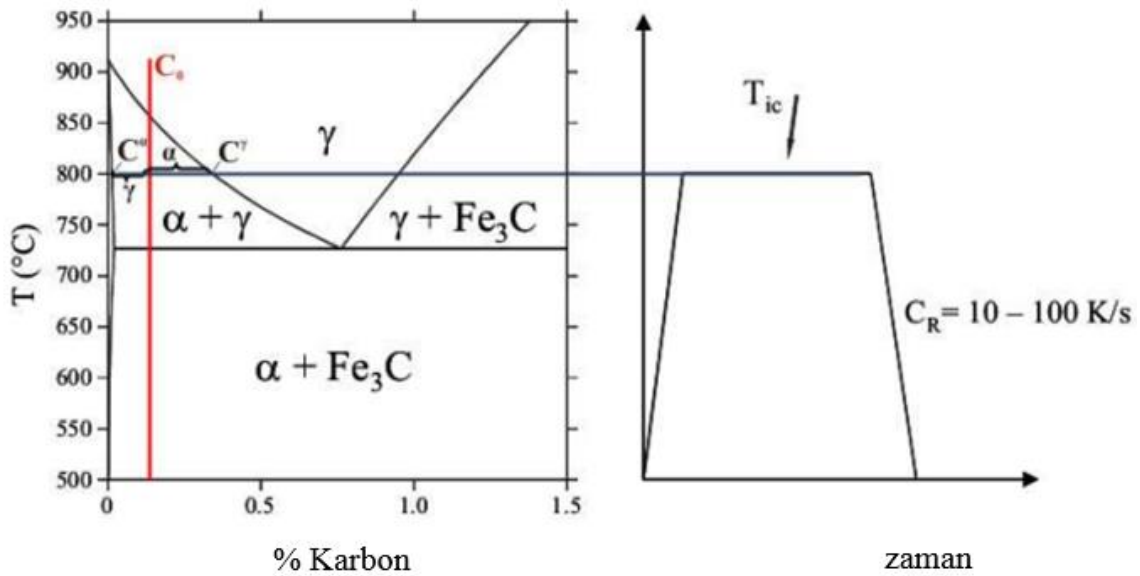
Üretim Yöntemi	Kimyasal Kompozisyon (%ağırlık)						
	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Mo	%V	%S
Sürekli tavlama, sıcak haddeleme	0,11	1,43	0,61	0,12	0,08	0,06	0,01
Sürekli tavlama, soğuk haddeleme	0,11	1,20	0,40				
Kutu tavlama	0,12	2,10	1,40				
Sıcak haddeleme üretimi	0,06	0,90	1,35	0,50	0,35		

Ticari olarak çift fazlı çeliklerin üretimi, sıcak haddeleme (hot rolling), sıcak ve soğuk haddelenmiş sürekli tavlama (continuous annealing) ve soğuk haddelenmiş sacın kutu tavlama (batch annealing) yapılmaktadır [10].

Sürekli tavlama prosesi öncesi malzeme yüzey temizleme işlemi için asitleme hattına alındıktan sonra soğuk haddelenerek istenen kalınlıkta malzeme elde edilir. Bir sonraki üretim prosesi olan sürekli tavlama (CAL) veya sürekli galvanizleme (CGL) hatlarında tavlanaarak temper hadde işleminden sonra nihai mamul elde edilir.

Sürekli tavlama metodu ile çift fazlı çeliklerin üretimi sıcak haddeleme ve yığın tavlama yöntemlerine göre çelik içyapı özelliklerinde daha homojen bir yapı göstermesi, üretim maliyetlerinin düşük olması ve verimliliğin yüksek olması nedeniyle daha çok tercih edilmektedir [16].

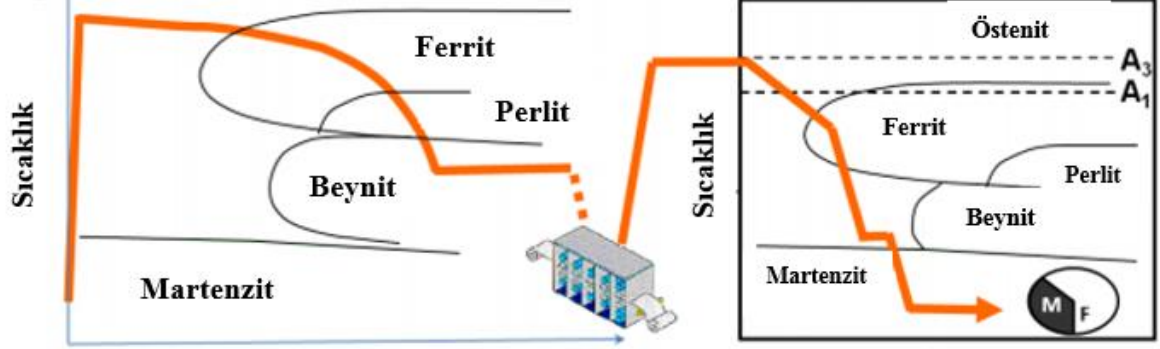
Sürekli tavlama fırınında sıcak veya soğuk haddelenmiş sac istenen çift fazlı mikroyapıyı elde etmek için $\alpha+\gamma$ bölgesinde tavlanaır ve martenzit dönüşümü sağlanacak hızda soğutulur [17]. Şekil 2.4'te kritik tavlama bölgesinde çift faz oluşumuna ait ısııl çevrim ve faz diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Çift fazlı çelik oluşumu faz diyagramı ve ısııl çevrimi [17].

Şekil 2.5'te soğuk haddeleme ve tavlama metoduyla ve sıcak haddeleme metoduyla çift fazlı çelik üretimi gösterilmiştir. Genel olarak çift fazlı çelikler, iki aşamada üretilmektedirler. Birinci aşamada kritik sıcaklıkta tavlama, A1-A3 arası, (ferrit+östenit bölgesi) ve ikinci aşamada Ferrit-Östenit bölgesinden hızlı soğutma ile östenitin tamamı martenzite dönüşür ve oluşan yapı yumuşak ferrit ile sert martenzit karışımıdır [11].

Sıcak şerit haddeleme ile çift fazlı çelik üretiminde kimyasal kompozisyonun ve üretim proses parametrelerinin dikkatli ve kontrollü bir şekilde gerçekleşmesiyle çift



Sıcak haddeleme yöntemi ile çift fazlı çelik üretimi diğer üretim yöntemleriyle

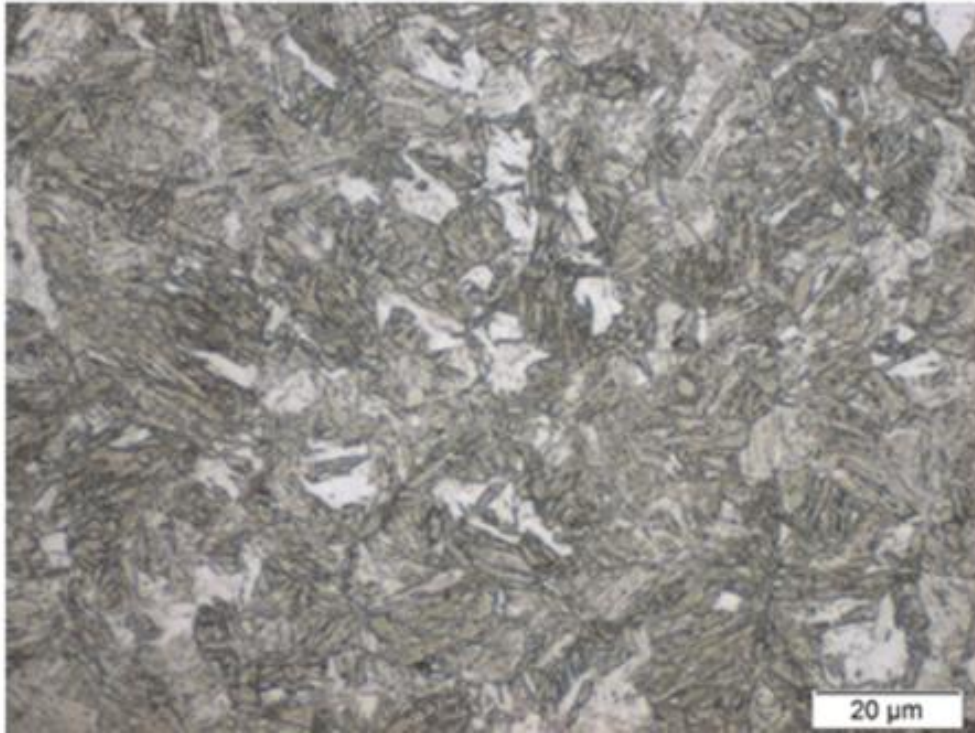
Galvanizleme, demir esaslı ürünleri atmosferik, toprakaltı ve sualtı korozyonuna karşı

prosesinde demir esaslı bir malzemenin sıvı çinko banyosu içerisine daldırılarak yüzeyinin koruyucu bir çinko tabakasıyla kaplanması sağlanır [18].

Kutu tavlama yöntemi ile çift fazlı çelik üretiminde sıcak veya soğuk haddelenmiş bobin çift fazlı içyapıyı elde etmek için $\alpha+\gamma$ bölgesinde tavllanır. Bu metodla üretimde çok az alaşımlama ile çift fazlı çelik üretiminin gerçekleşmesi avantaj sağlamaktadır. Fakat düşük verimlilik, uzun tavlama süreleri ve düşük soğuma hızlarında istenilen sertlik için kullanılan alaşım elementlerinin yüksek maliyetleri kutu tavlama ile üretilmesini sınırlandırmaktadır [19].

2.2 Martenzitik Çelikler

Martenzitik çelikler, tüm faz yapısı martenzit fazı içeren çeliklerdir. Sıcak haddeleme ve tavlama proseslerinde östenit yapı çok yüksek soğutma hızlarında soğutularak istenen iç yapı elde edilir. 1200-1900 MPa üzerinde çekme mukavemeti aralığında kullanıma sahiptir. Temperleme işlemi yapılarak malzemeye süneklik özelliği kazandırılarak şekillendirilebilme kabiliyeti artırılmaktadır. Martenzitik çelik kullanılarak üretilen otomotiv gövde parçaları daha çok yüksek çarpma yükleri gerektiren yerlerde kullanılmaktadır [20].

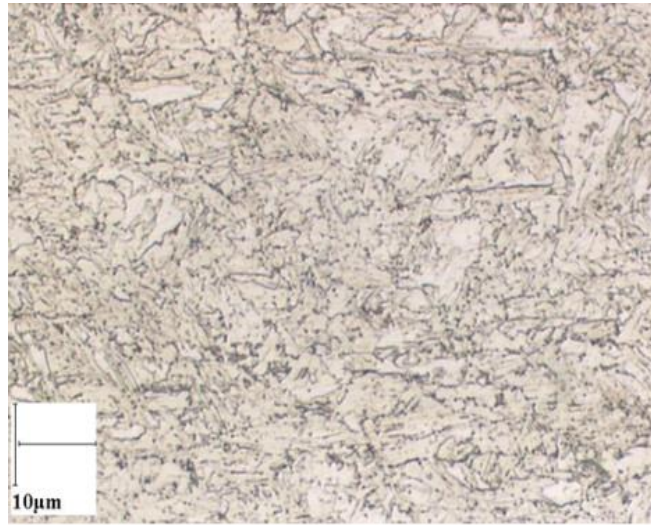


Şekil 2.6 : Martenzitik çeliğe ait mikroyapı görüntüsü [21].

Şekil 2.6’da martenzitik bir çeliğin iç yapı görüntüsü gösterilmiştir. Genel yapı martenzit matrisi içinde çok küçük miktarda ferrit veya beynit bulunabilir. Otomobilde daha çok tampon takviyesi parçalarının üretiminde kullanılır [22].

2.3 Kompleks Fazlı Çelikler

Kompleks fazlı çelikler (CP), ferrit/beynit matrisi içinde az miktarda martenzit, kalıntı östenit ve perlit bulunmaktadır. Şekil 2.7’de kompleks fazlı yapıya ait iç yapı görüntüsü gösterilmiştir. Çift fazlı çelikler ile karşılaştırıldığında aynı çekme dayanımı için akma mukavemeti değerleri daha yüksektir.

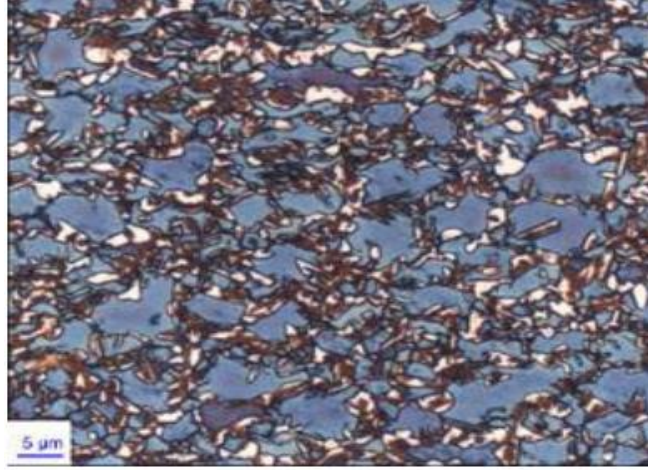


Şekil 2.7 : CP800 çeliğe ait mikroyapı görüntüsü [21].

Yüksek enerji absorpsiyon kabiliyeti, yüksek kalıntı deformasyon kapasitesi ve şekillendirme sonrası üstün kenar çatlak direnci özelliklerine sahiptir. Pencere alt en kirişi, şasi parçaları, enine kiriş, gövde destek sütunları, alt ray, tampon kirişi, çamurluk gibi komponentlerde kullanılır [22].

2.4 Dönüşüm Etkili Plastisite Çelikleri

Dönüşüm etkili plastisite (TRIP) çelikleri, ferrit fazı matrisi içinde dağılmış martenzit ve/veya beynit, %5 oranından fazla kalıntı östenit içerir. Bu çelik grubunda deformasyon ile birlikte östenit fazı martenzite dönüşerek malzemeye daha iyi form alabilme kabiliyeti kazandırır. Pencere üst en kirişi, şasi yan kolu, tavan rayı, koltuk çerçevesi, üst tavan destek sacı parçalarında kullanılır [23]. Şekil 2.8’de TRIP 780 çeliğine ait mikroyapı görüntüsü gösterilmiştir.

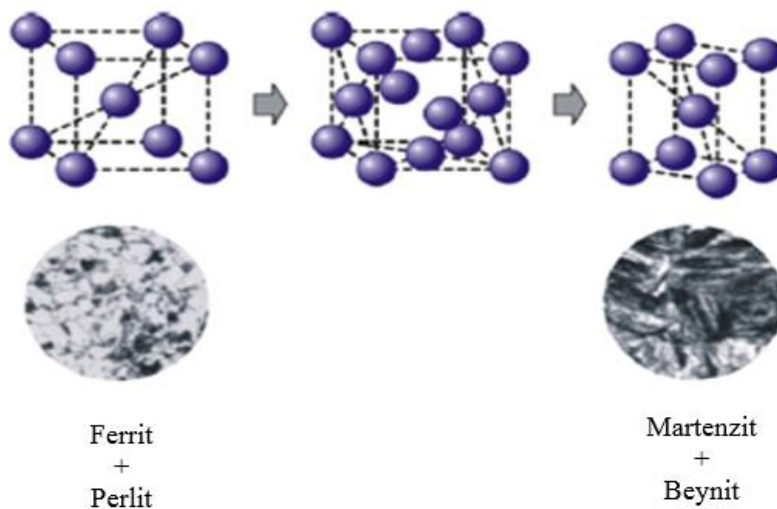


Şekil 2.8 : TRIP 780 çeliğine ait mikroyapı görüntüsü [24].

2.5 Sıcakta Şekillenebilir Çelikler

Preste şekillendirilmiş (Hot Stamping) çelikleri, borlu çeliklerdir. Üretim prosesinde malzeme fırında östenitleştirme işlemine tabi tutularak soğutma kalıp içinde gerçekleştirilir.östenitleme sıcaklığı üstüne kadar fırında ısıtılan malzeme soğutma kalıbı içinde preste şekillendirme ve ani soğutma etkisi birlikte ferritik perlitik yapı martenzit fazına dönüşmektedir. Full martenzit dönüşümü çekme mukavemetini 1500 MPa üzerine çıkarmaktadır [25].

Şekil 2.9’da hot stamping prosesinde malzeme iç yapısında ve kafes yapısında meydana gelen değişimler gösterilmiştir.



Şekil 2.9 : Hot stamping çeliğinin iç yapısında meydana gelen değişim [26].

3. OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ

Şekil 2.1’de gösterildiği gibi yeni nesil ileri yüksek mukavemetli çelik grubunda başlıca çalışma alanlarından birisi de çeliklerin kaynak özelliklerinin belirlenerek kaynak kabiliyetlerinin artırılmasıdır.

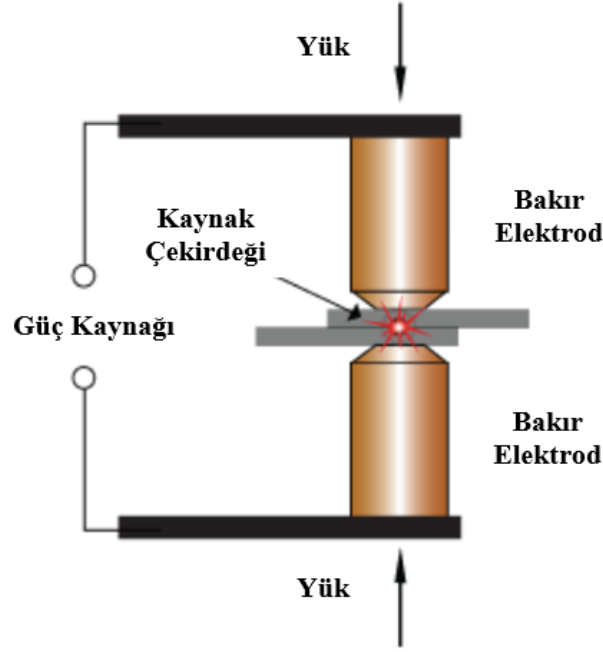
İki veya daha fazla metalin uygun sıcaklık, baskı kuvveti ve metalurjik şartların oluşturularak birleştirilmesi kaynak ile gerçekleştirilir. Üretim ve onarım işlemlerinde tüm endüstrilerde kullanılmaktadır [27].

Direnç nokta kaynağı (RSW), dikiş direnç kaynağı (RSEW), metal asal gaz kaynağı (MIG), metal aktif gaz kaynağı (MAG), gaz tungsten ark kaynağı (TIG), lazer demet kaynağı (LBW), sürtünme kaynağı otomotiv endüstrisinde yaygın kullanımı olan kaynak metotlarıdır [28].

Punta kaynağı olarak bilinen elektrik nokta direnç kaynağı otomotiv endüstrisinde en sık kullanılan birleştirme yöntemidir. Bir otomobil gövde üretiminde ortalama 4500 punta bulunmaktadır. Punta kaynak prosesinde, iki bakır elektrod arasında belirli bir baskı altında bulunan iş parçasının elektrik akımına karşı oluşturduğu direnç ile meydana gelen ısı ile birleştirme sağlanır. Punta kaynak kaynak makinelerinde AC ve DC güç kaynaklı sistemler kullanılmaktadır. Son zamanlarda daha hızlı ve parametreleri daha doğru kontrol etmeyi sağlayan servo motor sistemli kaynak makineleri tercih edilmektedir.[29].

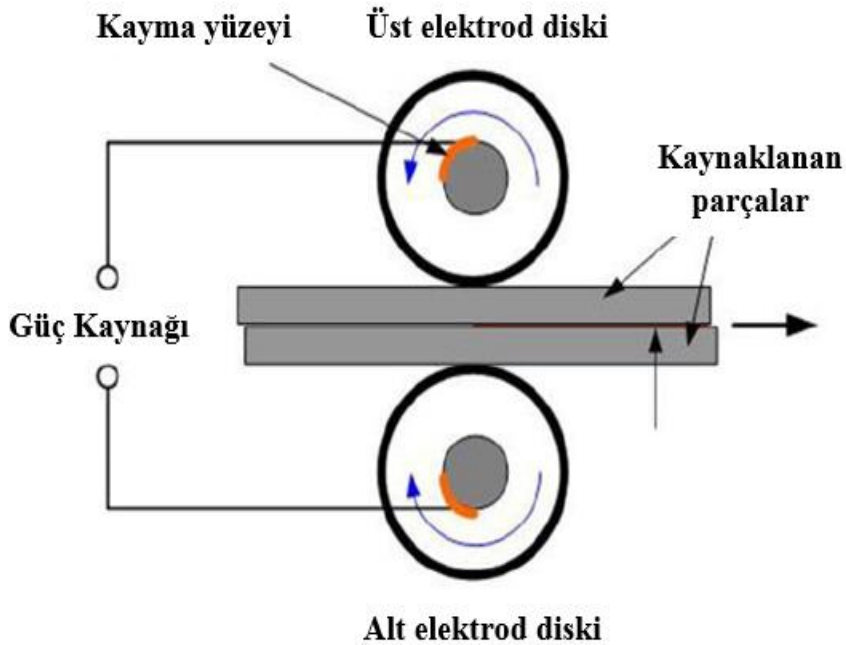
Uygun elektrodlar kullanılarak uygulamalar yapılan elektrod nokta kaynağı prosesinde kaynak sonrası oluşan ve birleşmenin olduğu bölgeye kaynak çekirdeği denir. Akım miktarı, direnç, kaynak zamanı ve soğuma kaynak kalitesi açısından önemli kaynak parametreleridir.

Malzeme kalınlığı, kimyasal bileşim ve kaplama özellikleri de kaynak çekirdeği kalitesi üzerine etkisi olan punta kaynaklanacak malzemelere ait özelliklerdir. Şekil 3.1’de punta kaynak prosesi gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Punta kaynağı şematik gösterimi [30].

Elektrik direnç kaynağı çeşitlerinden biri olan dikiş direnç kaynağı, sac parçaların temas yüzeylerinden geçen elektrik akımına gösterdiği direnç ile ergiyerek basınç altında birleştirme yöntemidir. Kaynaklanacak sac malzemeler bakır alaşımlı disk şeklinde iki elektrod arasında sıkıştırılarak gerçekleştirilir. Dikiş kaynağı prensibi Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

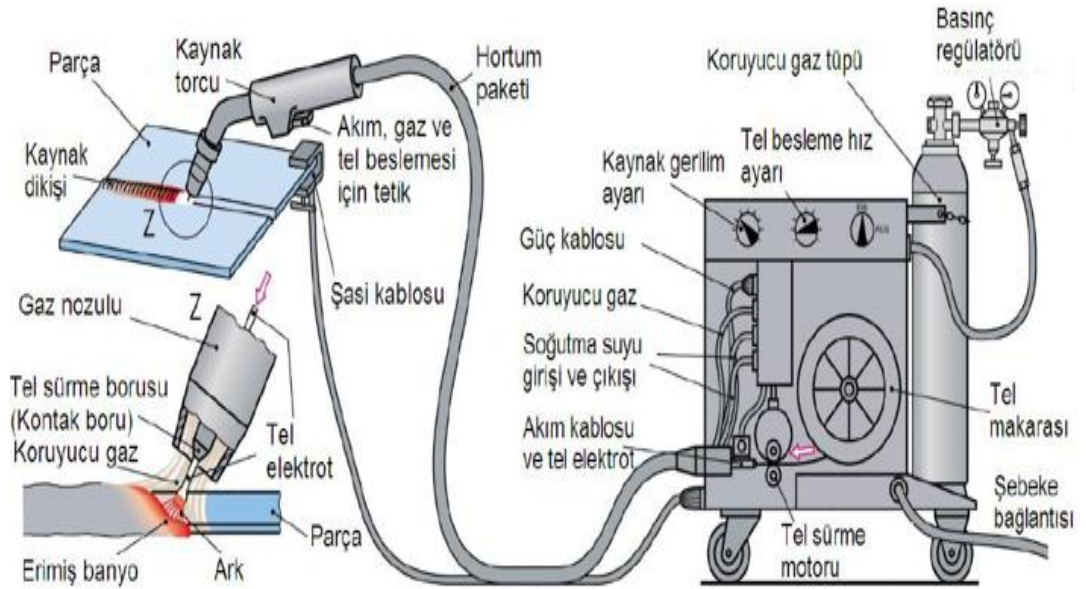


Şekil 3.2 : Elektrik dikiş kaynağı prosesi [31].

Yüksek hızlarda kaynak yapma fırsatı sağlayan dikiş kaynağı parça geometrisinden dolayı kullanımı limitlidir. Otomotivde sızdırmaz yakıt tankı imalatında kullanılır [32].

MIG ve MAG ismini alırlar. MAG kaynağı alüminyum ve paslanmaz çelik gibi malzemelerin kaynağında kullanılmaz. Daha çok alaşımsız ve az alaşımlı çeliklerin kaynağında kullanılır. MIG kaynağında inert gaz olarak argon veya helyum, MAG kaynağında ise karbondioksit gazı kullanılır [33].

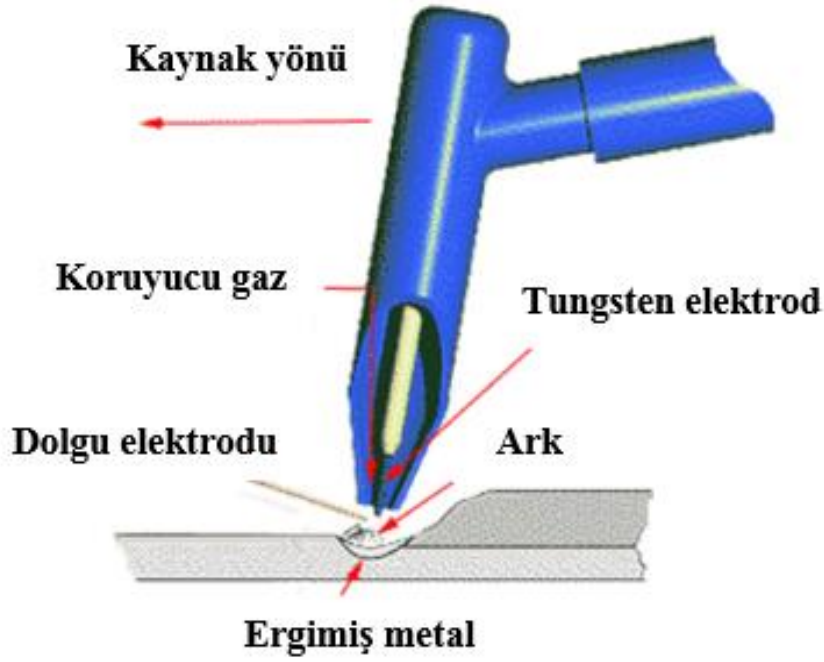
Koruyucu gaz ve çıplak tel elektrod, kaynak banyosu üzerindeki curuf örtüsünün oluşmamasını sağlar, curufun elle taşlanmasına veya temizlenmesine ihtiyaç duyulmaz.



Şekil 3.3 : MIG/MAG kaynağı şematik gösterimi [33].

Elektrik ark kaynağında çubuk elektrodların periyodik olarak değiştirilmesi gerekirken MIG/MAG kaynağında sürekli tel elektrod sayesinde daha iyi ark süresi sağlanır. Yüksek yığma hızları, curuf uzaklaştırma probleminin ortadan kalkması ve kolayca otomatikleşebilir olması diğer avantajlarıdır. Aracın karoserinin montajı yapımında, levha, kutu, kiriş gibi orta büyüklükteki imalatlarda kullanılır [32].

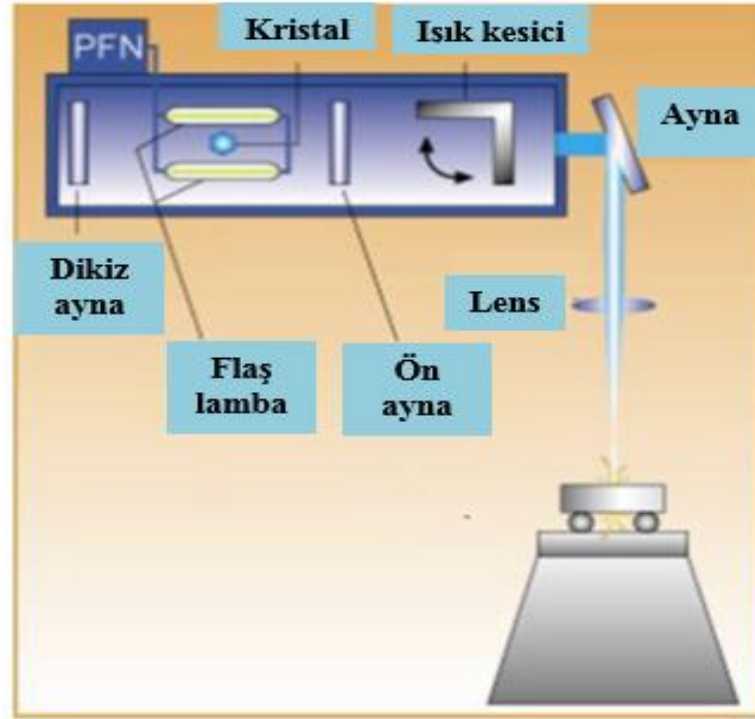
TIG kaynağında tungsten elektrod ile iş parçası arasında ark oluşturulur ve bu ark havanın tesirinden argon veya helyum gazı atmosferiyle korunur. Kaynak işlemi için ayrıca kaynak ilave metaline (kaynak teli veya çubuğu) ihtiyaç vardır. Şekil 3.4'te TIG kaynağının prensibi görülmektedir.



Şekil 3.4 : TIG kaynağı şematik gösterimi [33].

Kaynak üfleci kaynak esnasında, su veya hava ile soğutulmaktadır. Ayrıca bir otomatik kumanda cihazı vardır. Bu tertibat soğutma devresi için bir güvenlik tertibatı, koruyucu gaz için ayar ventili, akım için otomatik şalter ve yüksek frekans jeneratörünü ihtiva eder. Böylece koruyucu gaz sarfiyatı ihtiyaca göre ayarlanır, soğutma tertibatı çalışmadan ark tutuşmaz ve üfleç korunmuş olur. TIG kaynağında başlangıçta helyum, daha sonra argon gazı kullanılmıştır. Her iki gaz da, tek atomlu ve soydur. Bu sebepten diğer elementlerle birleşmezler, renksiz ve kokusuzdurlar, yanmazlar. Yüksek akım şiddetinin kullanılması gereken hallerde, helyum gazı kullanılır. Çünkü bu gaz, daha yüksek ark gerilimi verir. Bakır, magnezyum ve alaşımlarıyla, paslanmaz çeliklerin kaynağında da kullanılır. Kaynak hızının yüksek olması, ısıl distorsiyonların az olması, kaynak dikişlerinin temiz olması, kolay mekanize edilebilir olması TIG kaynağının üstünlükleridir [34].

Lazer demet kaynağı (LBW) belirli avantajlarından dolayı otomotiv endsütrisinde kullanımı oldukça fazladır. Üretim aşamasında esneklik, üretilebilirliğin artırılması, bakım maliyeti ve enerji tasarrufu sağlaması önemli özelliklerindendir. Bakır aynalardan yansıyarak kaynak noktasına ulaşan lazer demeti o noktada ısı etkisi oluşturur ve temassız bir şekilde kaynak işlemi gerçekleştirilir [35]. Şekil 3.5'te lazer demet kaynağı diyagramı gösterilmiştir.



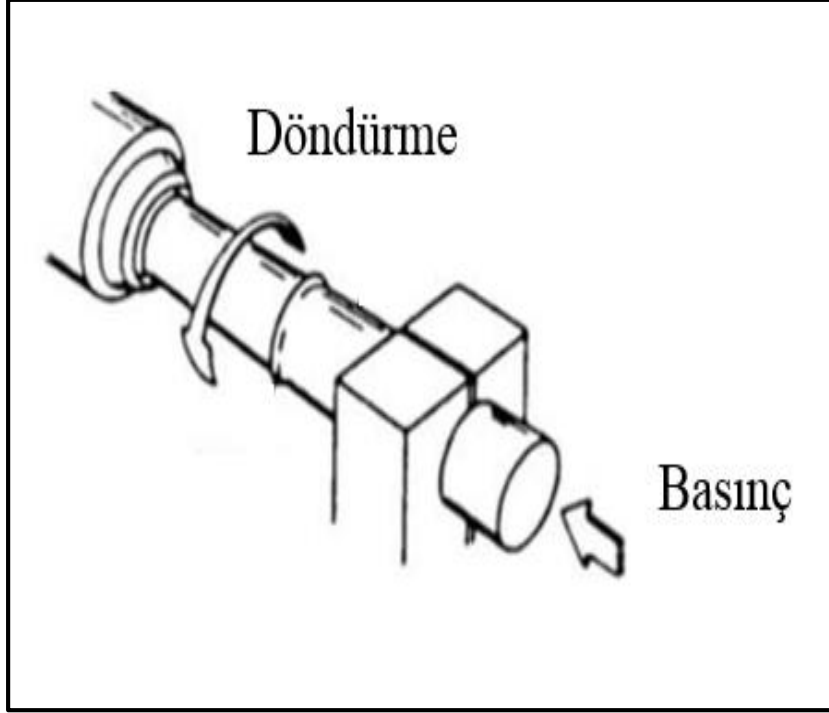
Şekil 3.5 : Lazer demet kaynağı prosesi [36].

Lazer gücü, hız ve odaklanmış nokta kaynak çapı kaynak derinliği ve genişliğini belirleyen parametrelerdir. 0.2 mm – 0.6 mm kalınlık aralığındaki metal malzemeler kolaylıkla lazer kaynağı ile birleştirilebilir. Otomotiv endüstrisi yoğunlukla 3-5 kW güç aralığında CO₂ akışı ile çalışan lazer sistemlerini kullanmaktadır [36].

Birkaç mikron mertebesindeki bölgelere odaklanabilme kabiliyeti ve 108 W/cm² 'nin üzerindeki yüksek güç yoğunluğu sebebiyle; tungsten gibi yüksek ergime sıcaklığı (3400°C) olan metaller kendiliklerinden erirler ve ısıya duyarlı civar bölgeler üzerindeki etki minimuma iner. Lazer ışını temassız olarak çalışır, yani takım ile iş parçası arasında hiçbir mekanik kontakt oluşmaz ve iş parçasının istenmeyen aşınması veya distorsiyonu önlenmiş olur. Kaynak süresi; iri taneli olma, tekrar kristalleşme ve segregasyon gibi uygun olmayan iç yapı değişmelerine engel olacak ve hızlı üretimi sağlayacak kadar kısadır. Lazer ışının üretimi; mikrop plazma kaynağındaki gibi koruyucu gazların kullanılmasını, elektron ışını ile kaynaktaki gibi vakumun sağlanmasını gerektirmez. Bu sebepten bilhassa seri imalat için, üretim hızı, otomatize edilebilme imkanı gibi üstünlükleri vardır [34].

Sürtünme kaynağı, malzemenin ergitilmeden sürtünme ısısı ile plastik deformasyon uygulanarak birleştirme yöntemidir. Sürtünme ısısının oluşması için parçalardan en az birinin hareket ettirilmesi gerekmektedir. Bir arada tutulan kaynaklanacak parçalar

sürtünme ısısı ile hareket sonucu belirli bir sıcaklığa ulaştığında basınç uygulanarak birleştirilir. Tekerlek aksı, direksiyon mili, aks kovanı, hidrolik silindirler, piston kolu, motor supabı sürtünme kaynağı ile üretilmektedir [37]. Şekil 3.6’da sürtünme kaynağı ile birleştirilen şaftlar gösterilmektedir.



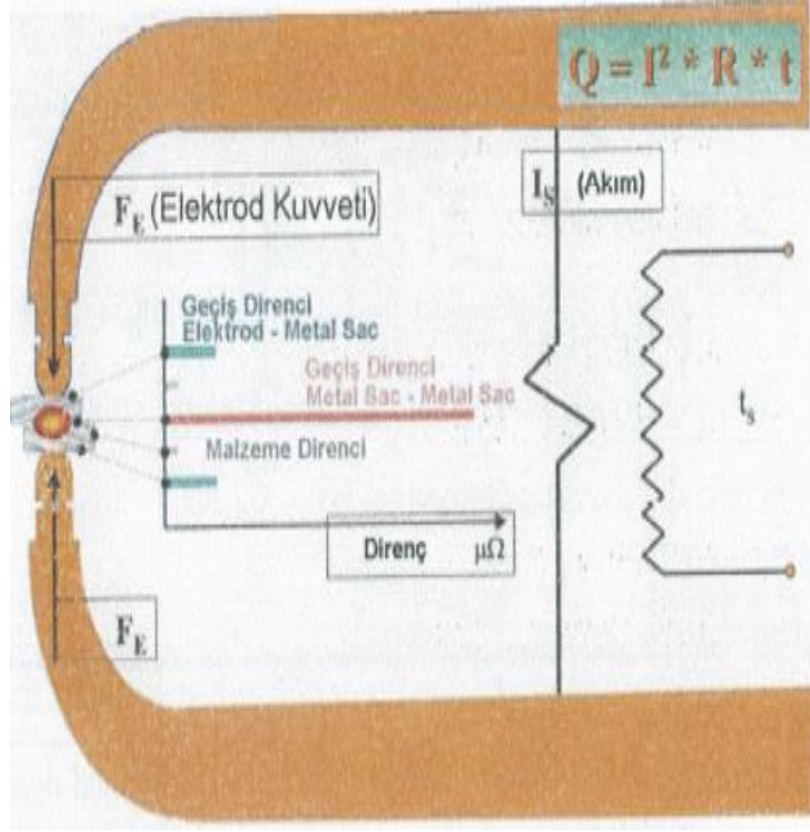
Şekil 3.6 : Sürtünme kaynağı yöntemiyle birleştirilen iki şaft [37].

Sürtünme kaynağının tatbik edileceği malzemenin mukavemeti; eksenel basınç ve dönme momentlerine karşı yeterli olmalıdır. Malzeme sürtünme kaynağına yetecek derecede, sıcak plâstik şekil değiştirme kabiliyetine sahip olmalıdır. Malzemenin içerisinde gayri safiyetlerin bulunması, atmosfer şartlarına karşı ilgisi, su alma durumu gibi faktörler sürtünme kaynağına sınırlama getirmektedir. Sürtünme kaynağında erime bölgesi dardır ve bağlantının mukavemeti yüksektir. Sürtünme süresi; malzemeye, kaynak ağızlarının hazırlanmasına ve kaynak yapılacak parçalardaki sıcaklık dağılımına bağlıdır. Bu süre, yeterli deformasyonu sağlayacak kadar olmalıdır. Alaşımsız veya yüksek alaşımlı çeliklere de, uzun sürtünme süreleri gerekir [34].

3.1 Punta Kaynağı

Punta kaynağı olarakta bilinen elektrik nokta direnç kaynağı otomotiv endüstrisinde en sık kullanılan birleştirme yöntemidir. Bir otomobil gövde üretiminde ortalama 4500

punta bulunmakatadır. Punta kaynak prosesinde, iki bakır elektrod arasında belirli bir baskı altında bulunan iş parçasının elektrik akımına karşı oluşturduğu direnç ile meydana gelen ısı ile birleştirme sağlanır [38]. Şekil 3.7’de punta kaynak prosesi gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Punta kaynak prosesi [39].

Direnç kaynaklarında ısı değerini bulmak için Joule yasası kullanılır. Elektrod kuvveti, akım, direnç, zaman punta kaynak parametreleridir. Elektrik nokta direnç kaynağında ısı oluşumu $Q = I^2 R t$ formülü ile ifade edilir. Bu formülde ısı girdisi (Q), kaynak akımı(I) , direnç(R) ve t kaynak zamanı değerleridir [40].

Kaynak akımı, kaynak oluşum sürecinde elektrik akımı ile sağlanır. Kaynak akımının artması kaynak noktasında ısı girdisini doğru orantılı olarak artırır. Önceleri AC elektrik güç kaynağı ile akım sağlanırken, özel uygulamalar için DC akım tercih edilmiştir. Son zamanlarda ise artan enerji tasarrufu nedeniyle orta frekanslı DC (MFDC) güç kaynakları kullanılmaktadır [41].

Kaynak oluşumu için gerekli olan ısı değeri, akım ve zamanın orantılı bir şekilde ayarlanmasıyla elde edilir. Artan akım değeri ile düşen kaynak zamanı ayarlaması kusursuz kaynak oluşumu açısından çok önemlidir. Aksi takdirde, çok düşük kaynak

zamanlarında çok yüksek kaynak akımı oluşumu kaynak bölgesinde çukurlaşma ve metal sıçramasına sebep olabilir [38].

Direnç, elektrik akımının akışına direnç gösteren, bu esnada Ohm kanununa göre uçları arasında gerilim düşümüne sebep olan devre elemanıdır. Elektriksel direnç, devrenin uçlarındaki gerilim değerinin üzerinden geçen elektriksel akımı bölünmesiyle bulunur. Elektrod kuvveti, yüzey direnci ile direkt bağlantıdır. Elektrod geometrisi ve parça yüzey durumu yüzey direncini ve elektrod kuvvetini etkilemektedir. Yüzey direnci ve elektrod kuvveti arasında ters bir orantı vardır [42].

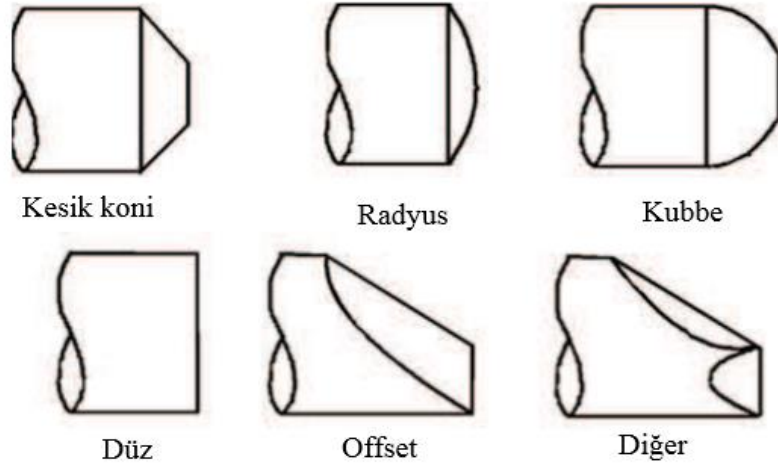
Tutma zamanı, elektrodlar arasında belirli bir baskı kuvveti sonucu akımın kesilmesinden sonra kaynağın katılaşma evresidir. Tutma zamanı çok önemli bir parametre olup soğutma zamanı ile ilişkilidir. Bu nedenle, kaynak metalindeki nihai sertlik değeri bu parametre ile direkt ilişkilidir. Tutma zamanının kısa tutulması soğutma hızını düşürür ve yumuşamaya sebep olur [43].

Elektrodun kullanım amacı kaynak akımını numuneye iletmektir. Odak noktası olduğu için basıncın kaynak yerine uygulanmasını sağlar. Yüksek dayanım, sertlik ve iletkenlik özellikleri Genel olarak CuCrZr, CuCoBe, CuBe bakır alaşımlarını içeren elektrodlar kullanım yerlerine göre farklılıklar göstermektedir.

ISO 5821:2009 punta kaynak elektrodları standardında Grup A ve Grup B olmak üzere iki tip mevcuttur. Sertlik, tavlama sıcaklığı, termal iletkenlik ve elektrik iletkenliği özelliklerine göre istenilen yerde kullanılabilir. Elektrodların geometri farklılıkları ve uygulamaları çok önemlidir.

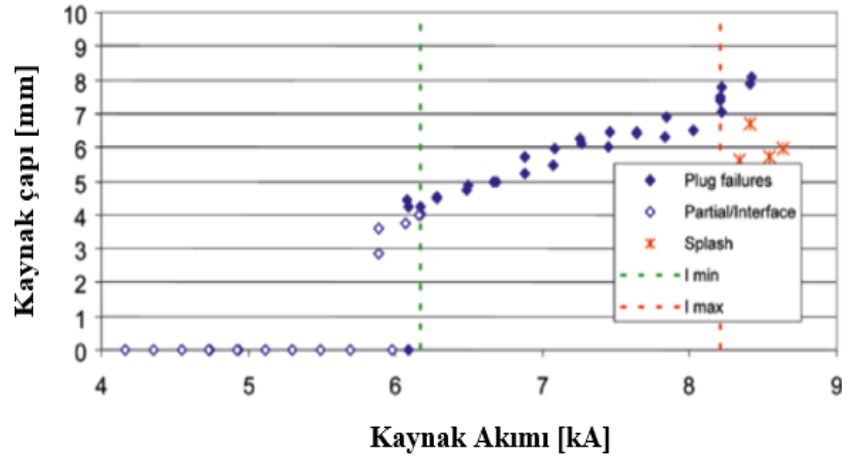
Elektrod geometrisi ve ebatları akım yoğunluk dağılımını etkileyerek kaynak çekirdek çapının hangi oranda değişeceğini belirler. Belirli bir punta kaynak sayısı sonrası elektrod ucunda aşınma, deformasyon ve mantarlaşma oluşur. Yüzeyde meydana gelen bu bozulmalardan dolayı elektrodun belirli aralıkla traşlanarak istenen forma kavuşturulması gerekir. Aksi durumda istenen elektrod başlığı temas yüzeyinde aşırı ısınmaya bağlı yumuşama, kaplama ile çelik malzeme arasında alaşımlamaya bağlı istenen kaynak kalitesi yakalanamayabilir [44].

Kesik koni, kubbe, daire ve oval şekillerde bulunan farklı geometrilere sahip punta kaynak elektrodları Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 : Punta kaynak prosesinde kullanılan elektrod tipleri [44].

Kaynak akımının punta kaynak özelliklerinin etkileyen en önemli parametredir. Çok düşük akım değerleri uygulanan malzemede kaynak çekirdeği oluşumu gerçekleşmezken, çok yüksek akım miktarlarında gerçekleştirilen kaynaklarda splash (sıçrama) etkisi meydana gelir. Akım miktarlarında meydana gelen akım farklılıkları ısı tesiri altında kalan bölgenin (ITAB) alanını ve kaynak kalitesini etkiler [45].



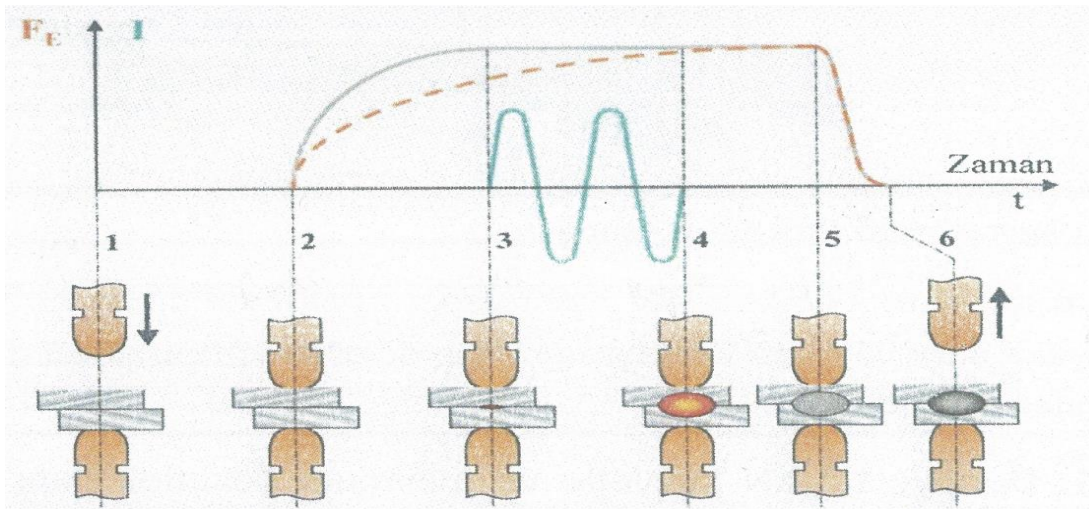
Şekil 3.9 : SEP 1220 Standardı örnek kaynak aralığı diyagramı [46].

Minimum kaynak akımı tayin edilirken $d_{wmin} \geq 4\sqrt{t}$ eşitliği kullanılır. Eşitliğe göre minimum kaynak çapı (d_{wmin}) sac kalınlığının (t) karekökünün 4 katına eşit veya büyük olmalıdır. 45 mm × 45 mm ebatlarında kuponlar kesilerek numune hazırlama işlemi yapılır. 3 kA başlangıç akımı olmak üzere 0.2 kA akım artışları ve her bir akım değerinde sıyırma testi uygulanarak kaynak çapı ölçülür. Minimum kaynak çapının elde edildiği kaynak akımı değeri minimum kaynak akımı olarak tayin edilir [46].

Maksimum kaynak akımı tayin edilirken sıçrama (splash) olduğu akım değeri baz alınır. Sıçrama etkisi ile birlikte hızlı bir şekilde sıvı fazda metal saçınımı meydana gelir. Soğumadan sonra katılaştan kaynak çekirdeğinde uygulanan tahribatlı testler sonrası görünür bir sıçrama etkisi oluşur. Sıçramanın meydana geldiği akım değerinden 0,1 kA akım azalışlarıyla splash görülmeyecek akım değerine düşülür. Ard arda 3 defa splash görülmeyen akım değerine maksimum akım denir [46].

Direnç kaynak prosesi aşamaları şekil 3.10'da gösterilmiştir. Punta direnç kaynağı oluşumu için takip edilmesi gereken işlem adımları şu şekildedir: [39]

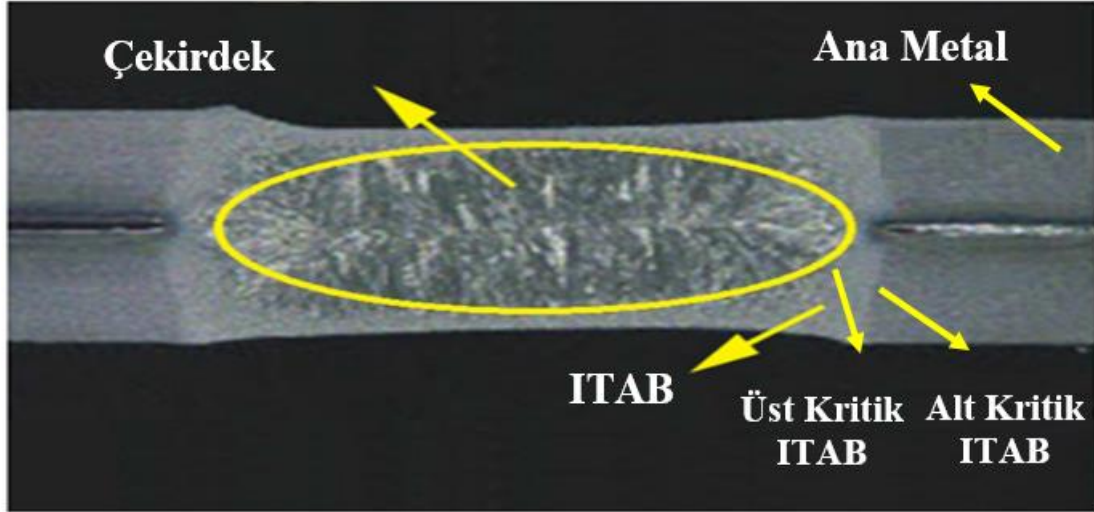
1. Aşama pensenin ağzının kapanıp saca temas ettiği süreyi kapsayan ilk yaklaşımdır.
2. Aşama olan baskı ise ağzı kapalı konuma gelen pensenin ayarlanan baskı kuvvetine ulaşması için geçirdiği süreyi kapsar.
3. Aşama rampa ise; ayarlanan kaynak akımının kademeli olarak artarak istenen değere ulaşmasıdır. Rampanın amacı, sacları yavaş yavaş ısıtarak (tavlayarak) saclar arasındaki boşluğun kapanmasını sağlamaktadır.
4. aşama kaynak ise; yeterli baskı kuvvetine ulaşan ve rampa ile ısıtılan saca kaynak akımının verilerek, kısmi olarak metal sacın eritilip sıvı hale geçişini kapsar.
5. aşama soğuma, pensenin ağzı kapalı ve baskı konumundayken erimiş metalin soğuyarak katı hale geçmesini kapsar.
6. aşama açma ise; kaynak işleminin sona ermesini takiben pensenin ağzını açıp bir sonraki kaynak için hazır konuma geçme evresidir.



Şekil 3.10 : Direnç kaynak prosesi aşamaları [39].

3.2 Punta Kaynak Bölgesinin Yapısal Özellikleri

Alt ve üst olmak üzere punta kaynaklanan iki parçaya ait kaynak kesit görüntüsü Şekil 3.11’de gösterilmiştir. İki metalin birleşme noktasına çekirdek, kaynak bölgesi ile ana metal arasında kalan kısım ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB) denmektedir [47]. ITAB bölgesinin kaynak bölgesine sınır olan kısmı üst kritik ITAB ve ana metal ile sınır olan kısmına ise alt kritik ITAB bölgesi olarak bilinir.



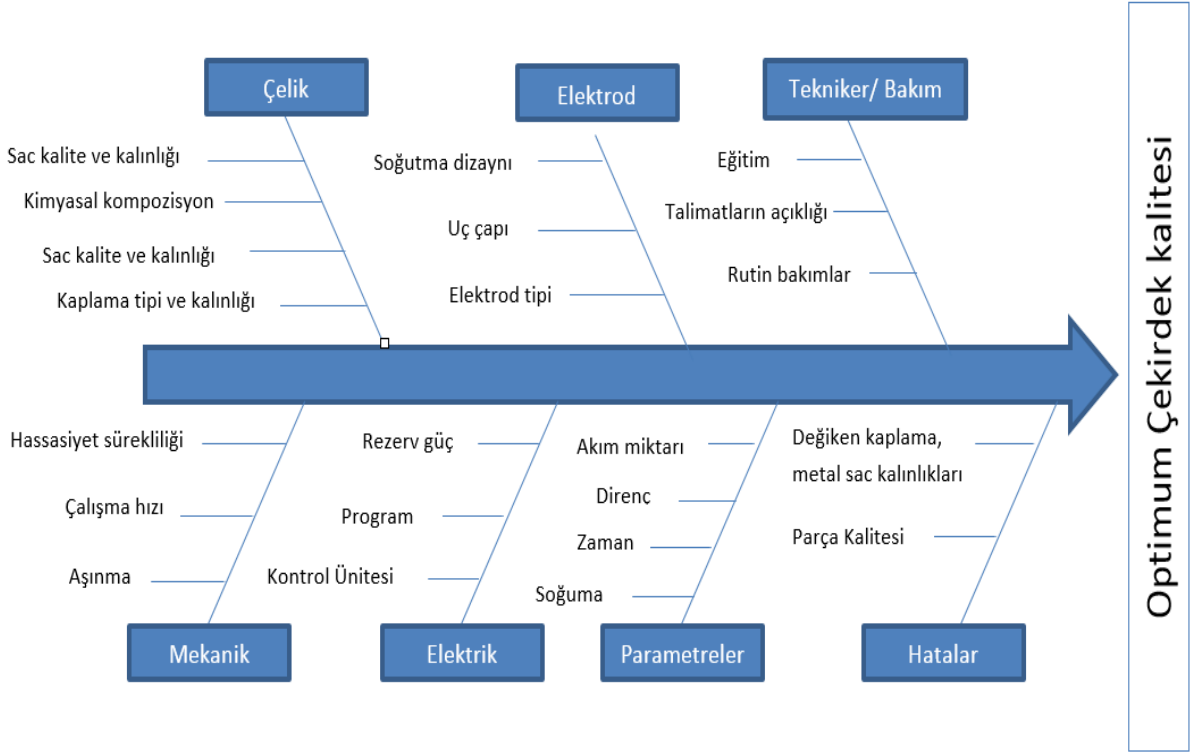
Şekil 3.11 : Punta kaynak kesit görüntüsü [47].

Kaynak çekirdek bölgesinde ve üst kritik ITAB bölgesinde çok yüksek sıcaklıklara yüksek ısıtma hızı ($2000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$) ile çıkılarak ergime meydana gelir ve aynı bölgede ani soğuma ($10^5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$) etkisi ile martenzit fazı oluşur. Alt kritik ITAB bölgesinde ise maksimum $600\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık değerlerine ulaşılmaktadır [48]. Bu sıcaklıkta herhangi bir faz değişimi olmayıp, çift fazlı çeliklerde martenzitin temperlenmesi olayı meydana gelmektedir. Alt ve üst ana metal içyapılarında ise herhangi bir değişiklik oluşmamaktadır.

Sertlik taramasında en yüksek sertlik değerleri çekirdek bölgesinde elde edilirken alt kritik ITAB bölgesinde ise temperlenmiş martenzit fazına bağlı olarak sertlikte ani düşüşler meydana gelmektedir. En düşük sertlik değerleri ise ana metalde görülmektedir [49].

Punta kaynak prosesinde çelik malzemelerin punta kaynak çekirdek kalitesi bir çok parametreye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Çelik özellikleri, kaynak makinesine bağlı değişkenler, operatör etkisi ve diğer hatalar çekirdek kalitesini önemli ölçüde etkilemektedir.

Şekil 3.12’de balık kılçığı metodu ile kaynağa etki eden faktörlerin tümü gösterilmiştir.



Şekil 3.12 : Punta kaynağa etki eden faktörlerin balık kılçığı yöntemi ile gösterimi [39].

Balık kılçığı yöntemi ile gösterilen faktörlerin herbiri kaynağa olumsuz etki etmektedir. Örneğin, punta kopması, punta deformasyonu, punta çapağı vb. Özellikle kaynak akım miktarı, direnç, zaman ve soğuma parametrelerinin doğruluğu kontrol edilerek yapılmalıdır. Aksi takdirde, kontrollü ve doğru bir punta kaynak operasyonu yapılmamış olur. Çelik yüzey durumu kirli olması elektrod başlarında mantarlaşmaya yol açarak istenen kaynak çapının oluşmamasına sebep olur. Çelik yüzey kaplama ve kalınlık özellikleri ise kaynak parametrelerini doğru belirlemek için doğru bir şekilde ölçülmelidir. Aksi takdirde, sıçrama ve çapak oluşumu gibi kusurlar oluşabilir.

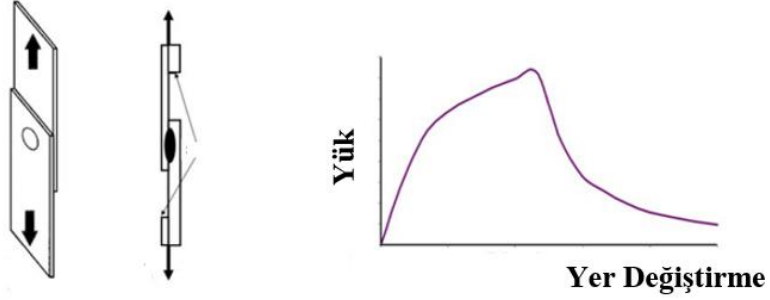
3.3 Punta Kaynaklı Parçaların Mekanik Testleri

Kaynaklanabilirlik ve dayanım testlerinde genellikle kesme testi (tensile shear test) ve ayırma testi (cross tension test) kullanılır. Bu testler ile kaynağın mekanik özelliklerini karakterize edilmektedir [47]. Kesme kuvveti ve ayırma kuvveti değerleri ama kaynak çekirdeği ve ITAB bölgesine bağlıdır [48]. Kaynak çekirdeğinin ve ITAB bölgesinin

morfolojisi kaynak dayanımı ve sünekliğini etkilemektedir. Kaynak bölgesi genişliği arttıkça kopma kuvveti artmaktadır [49].

3.3.1 Kesme testi (Tensile Shear Test)

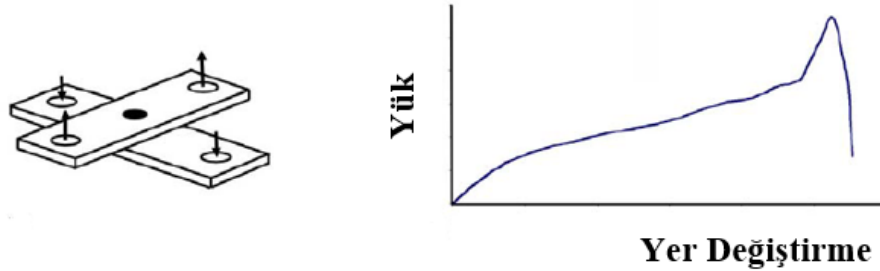
Çekme test cihazına bağlanarak gerçekleştirilen kesme testinde numunenin baş ve son kısımlarına hizalamanın sağlanması için numune ile aynı kalınlıkta sac malzeme yapıştırılır. Kesme testi numunesi ve yük diyagramı Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13 : Kesme testi numunesi ve yük-yer değiştirme diyagramı [50].

3.3.2 Ayırma testi (Cross Tension Test)

Çekme test cihazına bağlanarak gerçekleştirilen kesme testinde numunenin baş ve son kısımlarına hizalamanın sağlanması için numune ile aynı kalınlıkta sac malzeme yapıştırılır. Kesme testi numunesi ve yük diyagramı Şekil 3.14'te gösterilmiştir.

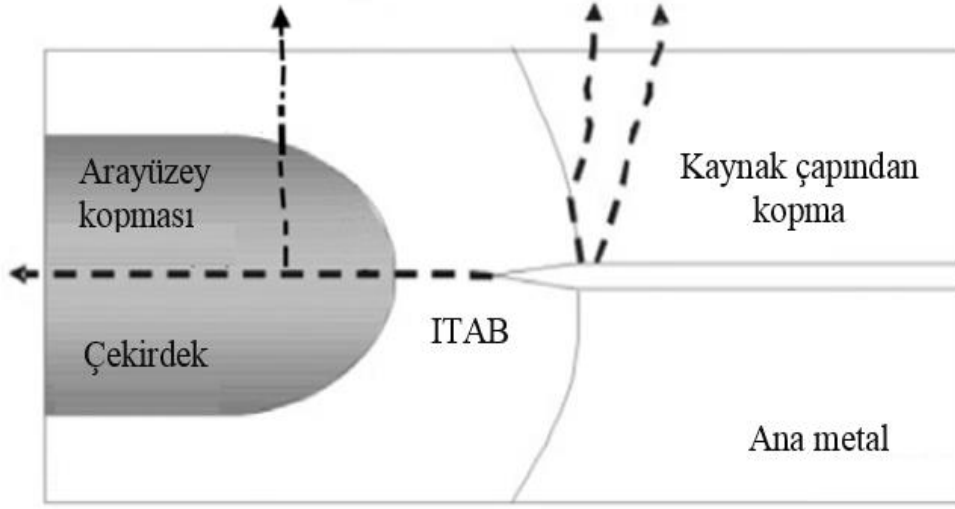


Şekil 3.14 : Ayırma testi numunesi ve yük-uzama diyagramı [50].

Punta kaynak kalitesi ve mekanik özellikleri araç çarpışma dayanımını etkilemektedir. Çarpışma testleri araç gövdesinde bulunan parçaların güvenlik açısından dayanabilecekleri yük kapasitesini belirlemek için yapılır [51].

Kesme ve ayırma testi sonrası kaynak bölgesinde arayüzey (interfacial) kopması ve kaynak bölgesinin tamamının kopması (pullout) olmak üzere 2 tip deformasyon

meydana gelmektedir [50]. Punta kaynak kırılma tipleri şematik olarak Şekil 3.15'te gösterilmiştir.



Şekil 3.15 : Şematik olarak punta kaynak kırılma tipleri [52].

Büyük kaynak noktalarında kaynak kopması meydana gelir, kaynaklanan metallerin birinde kaynak çekirdeği kalırken diğerinde delik kısmı kalır. Arayüzey kırılması ise daha çok küçük kaynak noktalarında oluşmaktadır [52].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada soğuk haddelenmiş sürekli tavllanmış ve soğuk haddelenmiş galvaniz kaplanmış durumda DP 600 çelik malzemelerin belirli bir ön deformasyon uygulaması sonrası minimum ve maksimum akım miktarlarında kaynaklandığında punta kaynak dayanımlarının ve içyapı özelliklerine bağlı süneklik özelliğinin araştırılması amaçlanmıştır. DP600 çelik malzemeleri Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları T.A.Ş. Sürekli Tavlama ve Sürekli Galvanizleme Hattı'nda üretilmiştir.

4.1 Kullanılan Malzemeler ve Uygulanan İşlemler

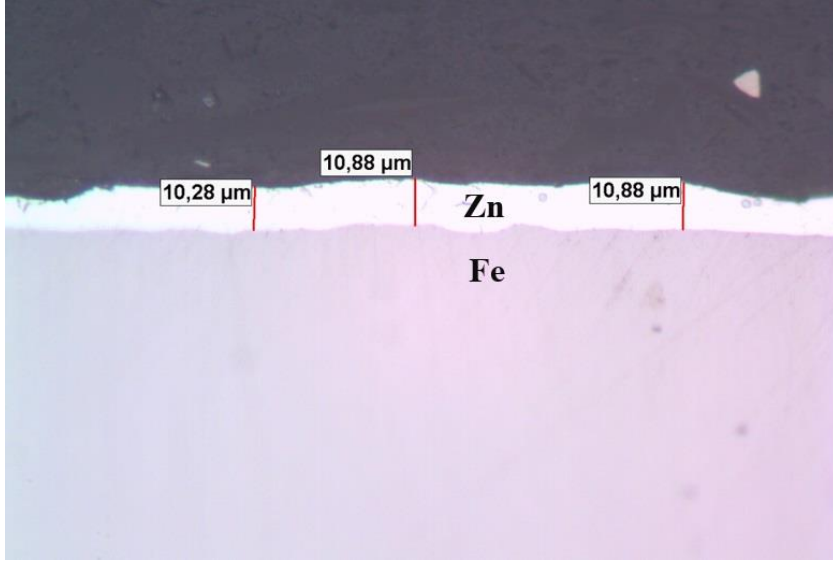
Kaplamasız ve galvaniz kaplı DP600 çelik malzemesine %0-7.5-15 oranlarında ön uzama verilerek hazırlanacak punta kaynak numunelerinin minimum ve maksimum kaynak akım miktarları belirlenerek kaynak testleri gerçekleştirilmiştir. Punta kaynak işlemi sonrası mekanik dayanım testleri, metalografi incelemeleri ve sertlik taramaları yapılmıştır. Deneylerde kullanılan DP600 çeliklerinin kimyasal kompozisyonu Çizelge 4.1'de belirtilmiştir. Galvaniz kaplı ve kaplamasız DP600 çeliğine ait mekanik test değerleri Çizelge 4.2'de belirtilmiştir. Galvanizli DP600 numuneye ait kesit kaplama tabakası Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : DP600 çeliğine ait kimyasal bileşim (%ağırlık).

Kimyasal Bileşim (%)						
C	Si	Mn	P	S	Al	V
0,17	0,80	2,20	0,08	0,015	2,0	0,2

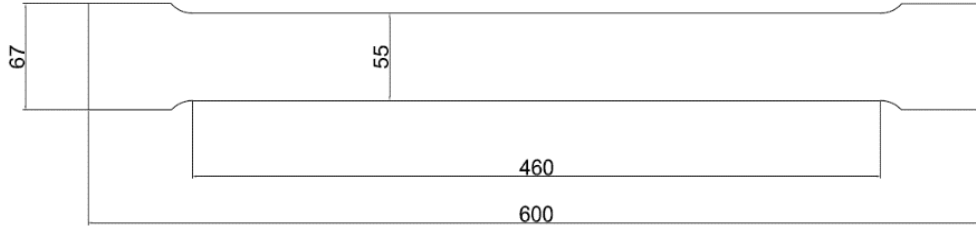
Çizelge 4.2 : DP600 çeliğine ait mekanik özellikler.

Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama	n
(N/mm ²)	(N/mm ²)	(%)	
340-420	min.600	min.20	min. 0.14



Şekil 4.1 : Galvanizli DP600 malzemeye ait kesit görüntüsü.

1,20 mm kalınlığındaki DP600 kalite çift fazlı çelik sacdan, çekme çubukları sacın haddeleme doğrultusuna paralel olacak şekilde A80 çekme çubuğu ebatları oratılı olarak büyütülerek yeni bir çekme çubuğu dizayn edilmiştir. Dizayn edilen çekme çubuğuna ait teknik çizim Şekil 4.2’de gösterilmiştir



Şekil 4.2 : Çekme çubuğu teknik çizimi.

Sürekli tavlama hattı ve sürekli galvanizleme hatlarından alınan numuneler Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Numunesi hazırlama işlemleri.

Punta kaynak dayanım testlerinin gerçekleştirileceği numuneler düz plaka şeklinde olduğu için en uygun ön deformasyon testi statik çekme cihazında çekme işlemiyle sağlanabilmektedir. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi üretim hattından alınan numuneler freze tezgahında tasarlanan çekme çubukları çıkarılmıştır. %7.5 ve %15 uzama miktarları Şekil 4.4'te gösterilen 120 tonluk Zwick marka test cihazında verilmiştir.

Homojen deformasyonun verilmesi ve daha hassas çekme işlemi için 0,0025 mm/dk düşük çekme hızlarında çekme testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.4 : 120 tonluk Zwick marka statik çekme cihazı.

Çekme cihazında bulunan ekstansometre yardımı ile ölçülen %7,5 ve %15 uzama değerleri el ile uzama ölçümü metodu ile doğrulanmıştır. Ön uzama verilen çekme çubukları kesme testi ve ayırma testi numune hazırlığı için freze tezgahında kesilerek ebatlandırılmıştır.

4.2 Punta Kaynak İşlemleri

Punta kaynak testleri Şekil 4.5'te gösterilen sabit AC 250 kVA punta kaynak makinesinde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.5 : Testlerde kullanılan punta kaynak makinesi.

Hava silindiri maksimum 6 bar olan punta kaynak cihazında testler öncesi parametrelerin belirlenmesi amacıyla elektrod kuvveti ve akım ölçümü Şekil 4.6'da gösterilen Techna TE1700 model cihaz ile doğrulanmıştır.



Şekil 4.6 : Elektrod kuvveti ve akım ölçüm cihazı.

Galvaniz kaplı ve kaplamasız 1.2 mm kalınlıkta SEP 1220-2 ve ISO 18278-2 standartları kapsamında uygun kaynak parametreleri çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Punta Kaynak Parametreleri.

Malzeme	Kuvvet (kN)	Kaynak zamanı	Tutma zamanı
Galvanizli DP600	4	16 cycle	10 cycle
Kaplamasız DP600	4	14 cycle	10 cycle

45×45 mm ebatlarında kare kuponlar kesilerek 3 kA akım değerinden başlayarak 0.2 kA artışlarla $d_{wmin} \geq 4\sqrt{t}$ eşitliği ile minimum kaynak akımı (I_{min}) belirlendi.

Şekil 4.7’ de gösterildiği gibi her bir akım artışında sıyırma testi yapılarak Mitutoyo marka kalınlık ölçüm cihazı ile çap ölçümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.7 : Sıyırma testi ve minimum kaynak çapı ölçümü.

Maksimum kaynak akımı (I_{max}) belirlenmesi için sıçramanın meydana geldiği akım değerinden 0.1 kA akım azalışlarıyla sıçramanın oluşmadığı akım değeri belirlendi.

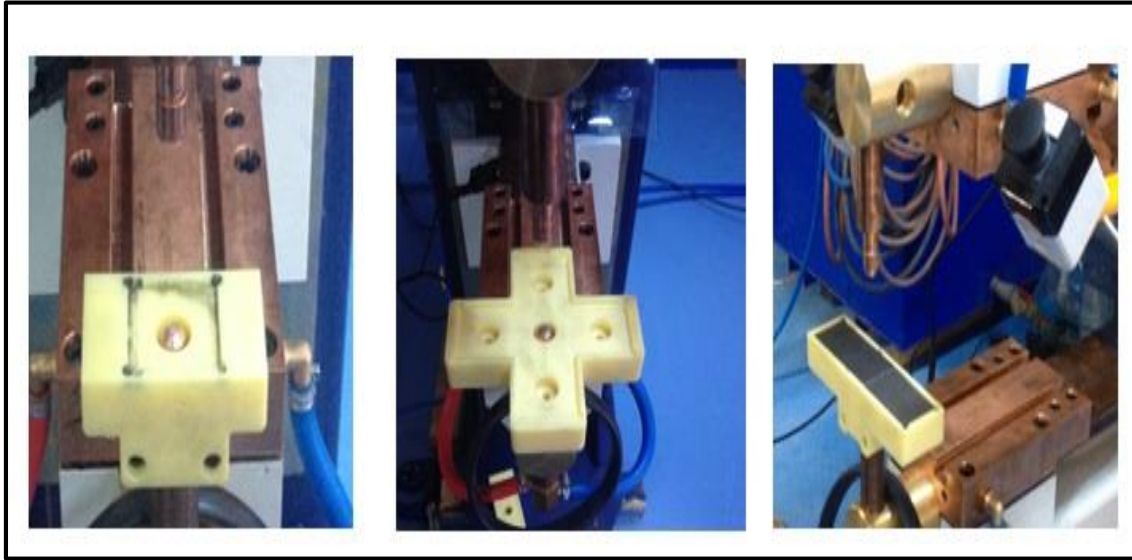
Çizelge 4.4 : Minimum ve maksimum kaynak akımı parametreleri.

Malzeme	Ön deformasyon (%)	Akım (I)	I Set (kA)
Galvanizli DP600	0	I_{min}	7,5
		I_{max}	9,4
	7.5	I_{min}	7,6
		I_{max}	9,4
	15	I_{min}	7,2
		I_{max}	9,4
Kaplamasız DP600	0	I_{min}	6,2
		I_{max}	8,9
	7.5	I_{min}	6
		I_{max}	9,2
	15	I_{min}	5,9
		I_{max}	9

ISO 5821 standardına uygun olarak F1-16 tip 6 mm çaplı Cu-Cr-Zr elektrod başlıkları kullanılmıştır.

Punta kaynak prosesin de kaynaklama esnasında iki çelik malzemeyi hizalama ve tutmak için kullanılan ekipmanlar kuvvet artışları, sıçrama oluşması, kaçak akım oluşumu ve yanlış akım değerleri elde etmek gibi birçok olumsuzluğu sebep olduğu görülmüştür. Bu problemi çözmek için test edilecek malzemelerin ebatlarına uygun bir şekilde özel test kalıpları dizayn edilmiştir.

SEP 1220-2 standardı kapsamında punta kaynak parametrelerinin belirlendiği ve dayanım testlerinin uygulanacağı kaynaklanacak malzemeler için tasarlanan kalıplar Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

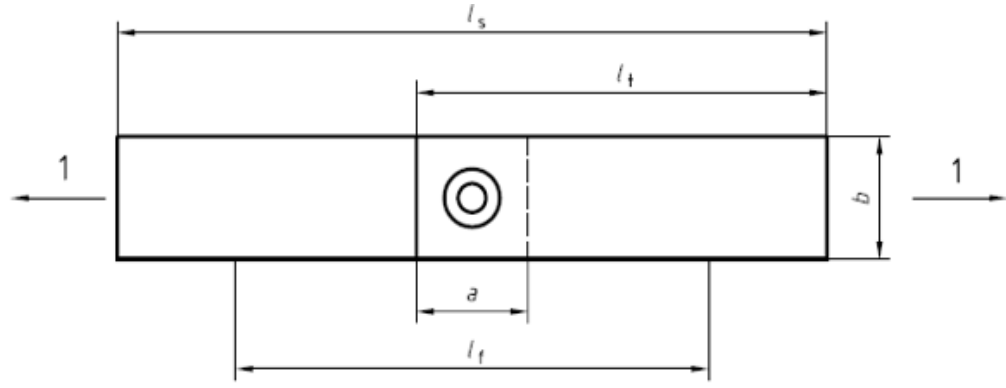


Şekil 4.8 : Kaynak testleri için tasarlanan kalıplar.

4.3 Mekanik Testler

Punta kaynaklanmış malzemelerin mekanik özellikleri kesme testi (TSS) ve ayırma testi (CTS) ile belirlenmektedir. Her iki test için numune geometrileri birbirlerinden farklıdır. Çekme testi sonrası ön deformasyon uygulanmış ve uygulanmamış numunelerden kesme testi ve ayırma testi için numune kesilmiştir.

Şekil 4.9’da kesme testi (TSS) için ISO 14273 standartına ve Şekil 4.10’da ayırma testi (CTS) için ISO 14272 standartına uygun olarak hazırlanan numune teknik çizimleri gösterilmiştir.

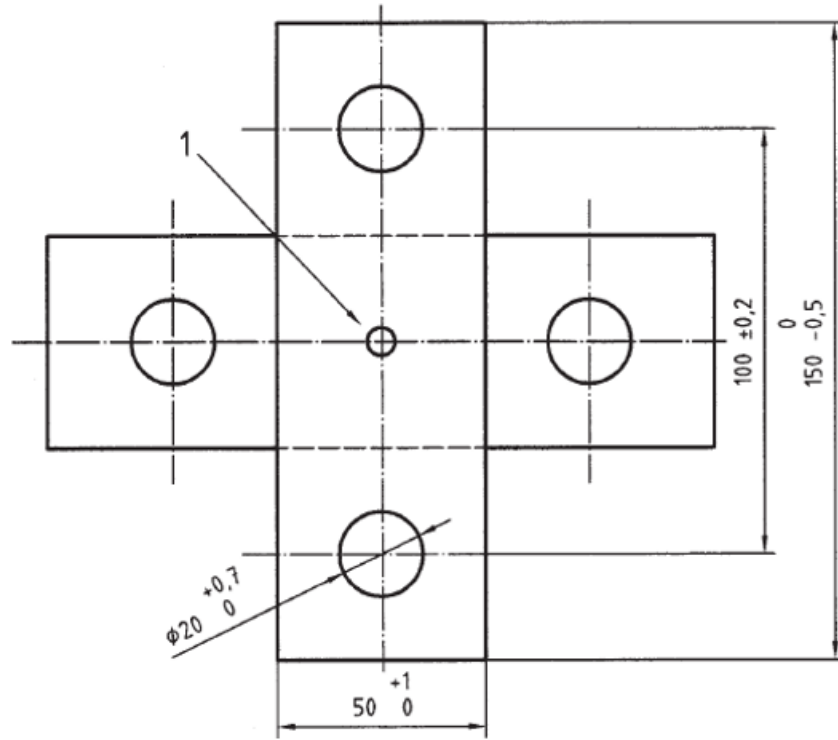


Dimensions in millimetres

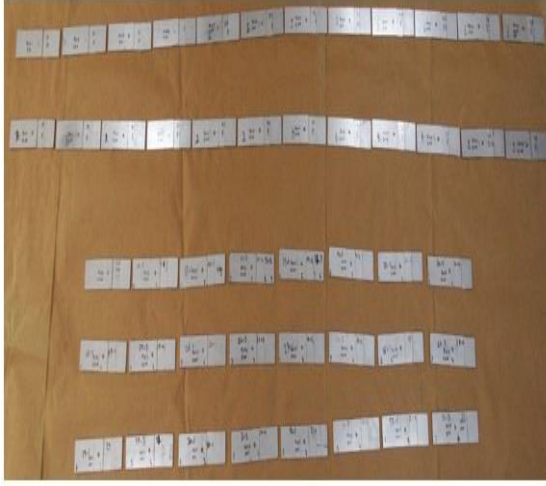
Thickness t	Overlap a	Specimen width ^a b	Specimen length l_s	Free length between clamps l_t	Length of individual test coupons l_t
$0,5 \leq t \leq 1,5$	35	45 (30)	175	95	105
$1,5 < t \leq 3$	46	60 (30)	230	105	138
$3 < t \leq 5$	60	90 (55)	260	120	160
$5 < t \leq 7,5$	80	120 (80)	300	140	190
$7,5 < t \leq 10$	100	150 (100)	320	160	210

^a Figures in parentheses will give approximately 10 % reduction in strength and these widths may be used only by agreement between the manufacturer and the purchaser.

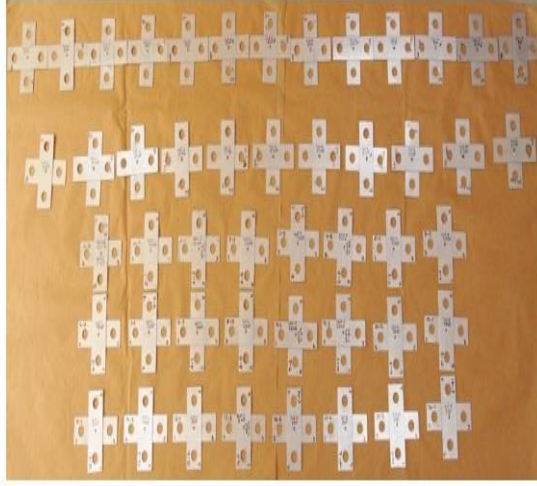
Şekil 4.9 : ISO 14273 standartına göre kesme testi numunesi ve ebatları.



Şekil 4.10 : ISO 14272 standartına göre kesme testi numunesi ve ebatları.



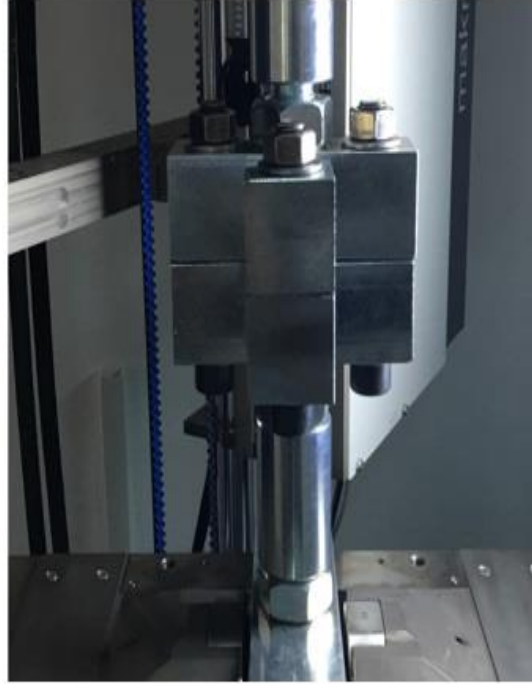
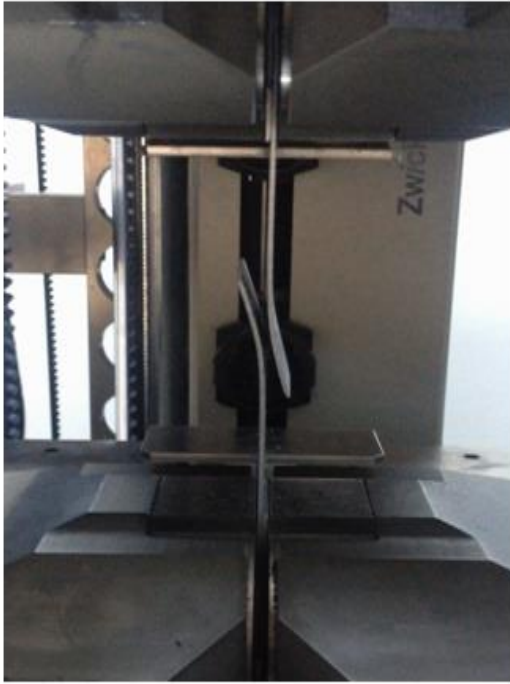
(a)



(b)

Şekil 4.11 : Kaynak mekanik test numuneleri; (a) kesme testi, (b) ayırma testi.

Kesme testi ve ayırma testi için hazırlanan numuneler Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Belirlenen punta kaynak parametrelerine uygun olarak punta kaynak mekanik testleri kesme testi (TSS) ISO 14272 ve ayırma testi (CTS) ISO 14273 standartları kapsamında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.12’de gösterilen Zwick marka statik çekme cihazında CTS testi için uygun kalıp kullanılarak mekanik dayanım testleri yapılmıştır.



Şekil 4.12 : Kesme ve ayırma testi düzenekleri.

4.4 Mikroyapı ve Sertlik İncelemeleri

Punta kaynak testleri parametrelerin belirlendikten sonra her bir deformasyon oranında minimum ve maksimum akım değerlerinde numuneler alınarak optik incelemeler yapılmıştır. Metalografik incelemeler için numuneler ASTM E3 standardına uygun bir şekilde hazırlanmıştır. Dağlayıcı olarak %2 Nital içerikli solüsyon kullanılarak ASTM E407 standardına uygun bir şekilde uygulama yapılmıştır. Mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları ile kaynak bölgesi, ısı tesiri altında kalmış bölge ve ana metal geçiş bölgelerinde bulunan fazların değişimleri ve tane yapılarında meydana gelen farklılıkların ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

45×45 mm ebatlarında olan metalografi numuneleri kesilerek mikroyapı numunelerine uygun bir boyutta hazırlanır. Bakalite alma işlemi için Struers Citopress-20 model otomatik bakalit alma cihazı kullanılır. Hazne içerisine numuneler uygun bir şekilde yerleştirilerek hazne içine karbon dolgulu elektrostatik toz bakalit konulur. Basınç, ısıtma ve soğutma süreleri ayarlanarak bakalite alma işlemi başlatılır. Zımparalama işlemi için 120, 240, 400, 800, 1200 numaralı SiC zımparalar kullanılarak zımparalama işlemi yapılır. Struers-Tegra Pol-21 aparatı ile gerçekleştirilen zımparalama işleminde zımpara yüzeyi su ile temas ettirilerek numune hazırlama işleminde herhangi bir deformasyon oluşmaması sağlanır. Parlatma işlemi için Şekil 4.13'te gösterilen Struers-Tegra Force 5 cihazına yerleştirilen 6, 3 ve 1 mikron numaralı parlatma çuhalarına özel elmas süspansiyonlar damlatılarak uygulanır.



Şekil 4.13 : Parlatma cihazı.

Numune hazırlama işlemleri tamamlanan numuneler Şekil 4.14'te gösterilen Nikon Epiphot 200 marka optik mikroskop ile incelenmiştir. ASTM E112 ve ASTM E45 standartları baz alınarak incelemeler gerçekleştirilmiştir. x25, x100, x200 ve x500 büyütmelerde içyapı görüntüsü alınmıştır.



Şekil 4.14 : Optik mikroskop cihazı.

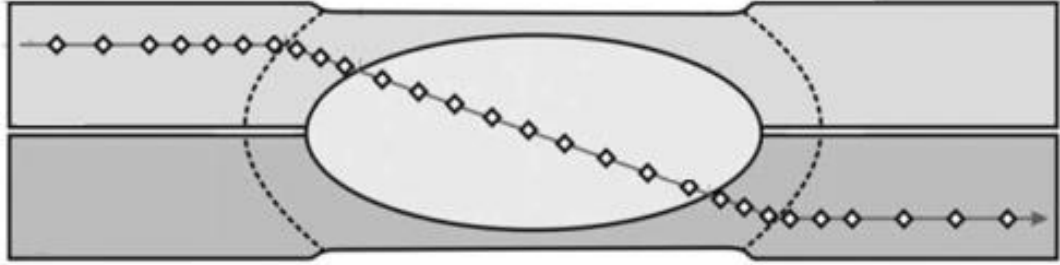
x150, x350, x1000, x1500 ve x3000 büyütmelerde gerçekleştirilen incelemeler ile faz ve tane yapısında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Kaynak çekirdek bölgesi, ITAB bölgesi ve ana metal geçiş bölgelerinde içyapıda meydana gelen iç yapıları incelemek amacıyla Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) incelemesi yapılmıştır. Metalografi hazırlık işlemleri tamamlanan numuneler %2 konsantrasyonunda Nital dağlayıcısı ile dağlanarak SEM incelemesi için uygun hale getirilmiştir. İncelemeler Şekil 4.15'de gösterilen JEOL JSM 7100F marka taramalı elektron mikroskobu ile yapılmıştır.



Şekil 4.15 : Taramalı Elektron Mikroskobu Cihazı.

Kesme testi ve ayırma testi sonrasında kaynak bölgesi ve ısı tesiri altında kalmış bölgede meydana gelen deformasyon sonrası SEM incelemeleri yapılmıştır. Galvanizli numunelerde İkincil Elektron Dedektörü (SE) kullanılarak fraktografi çalışması yapılmıştır. Kaynak sonrası galvanizli numunelerde Zn mapping incelemeleri yapılmıştır.

SEP 1220-2 ve ISO 14271:2011 punta kaynak standartlarına uygun olarak sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Kesit boyunca ana metal, kaynak bölgesi, HAZ bölgesi ve ana metal olmak üzere çapraz olarak sertlik taraması izlenmiştir. Şekil 4.16'da gösterildiği şekilde kesit alınan numuneler 100 gr yükleme altında Vickers mikrosertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.16 : Kaynak bölgesi sertlik taraması.

Vickers mikrosertlik incelemelerinde Qness Q10A+ marka otomatik sertlik cihazı ile mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 4.17 : Mikrosertlik ölçüm cihazı.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 Ön Deformasyonun DP600 Çeliğinin Yapı ve Özelliklerine Etkisi

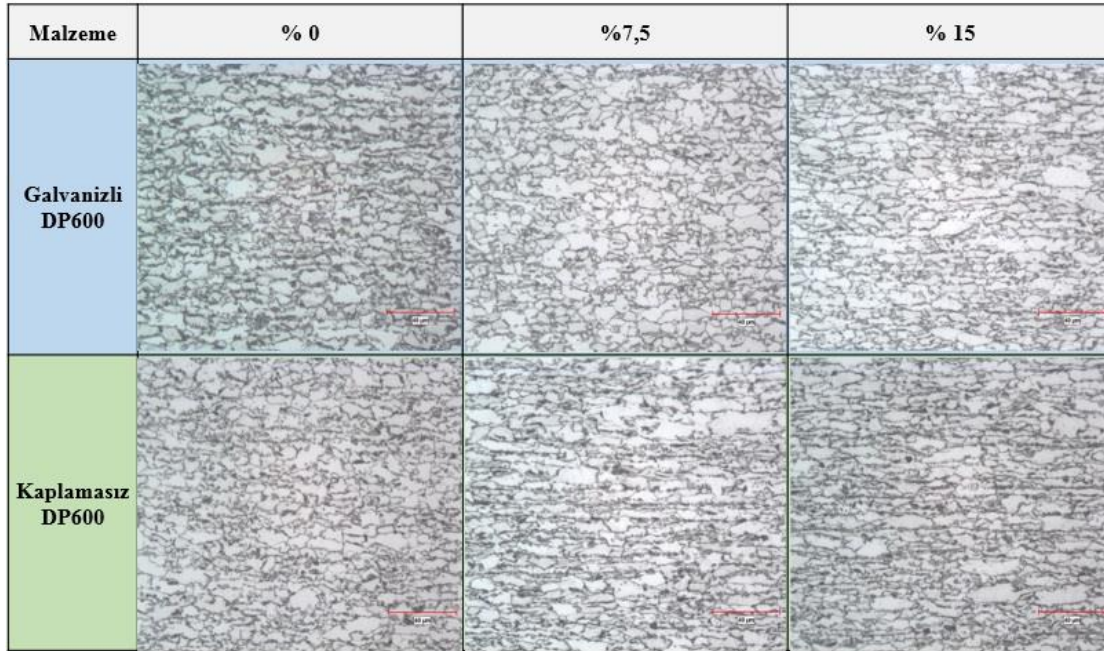
Ön deformasyon uygulanmamış ve uygulanmış malzeme özelliklerinde deformasyon etkisi ile birlikte mekanik özelliklerde ve iç yapı özelliklerinde değişiklikler görülmektedir. Ön deformasyon uygulanmamış, % 7,5 ve %15 ön uzama verilmiş galvanizli ve kaplamasız DP600 çeliğinin mekanik özellikler ve sertlik değerleri Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : Ön deformasyon sonrası galvanizli ve kaplamasız DP600 malzemelere ait mekanik test ve sertlik değerleri.

Malzeme	Ön deformasyon (%)	Sertlik (HV)	Akma Dayanımı (kg/mm ²)	Çekme Dayanımı (kg/mm ²)	Uzama (%)
Galvanizli DP600	0	191	38,3	59,8	23,9
	7,5	221	57,9	60,4	17,7
	15	232	59,8	60,6	10,4
Kaplamasız DP600	0	183	38,4	59,5	23,3
	7,5	216	57,2	60,1	16,9
	15	225	60,7	60,6	10,4

Ön deformasyon etkisi ile birlikte hem galvanizli hem de kaplamasız malzeme için mukavemet ve sertlik değerlerinde artış görülmüştür. %7,5 ön uzama verilen malzemelerde özellikle akma mukavemetinde büyük bir artış meydana gelmiştir. Mukavemet değerlerinde artış görülürken uzama değerinde azalma görülmektedir. Ön deformasyon miktarının artışına bağlı olarak malzeme mikrosertlik değeri de artış göstermektedir.

Galvanizli ve kaplamasız DP600 malzemelerine ait ön deformasyon uygulanmamış ve ön deformasyon uygulanmış durumlarda mikroyapılarda meydana gelen değişim Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Deneylerde kullanılan galvanizli ve kaplamasız DP600 çeliklerinin mikroyapıları.

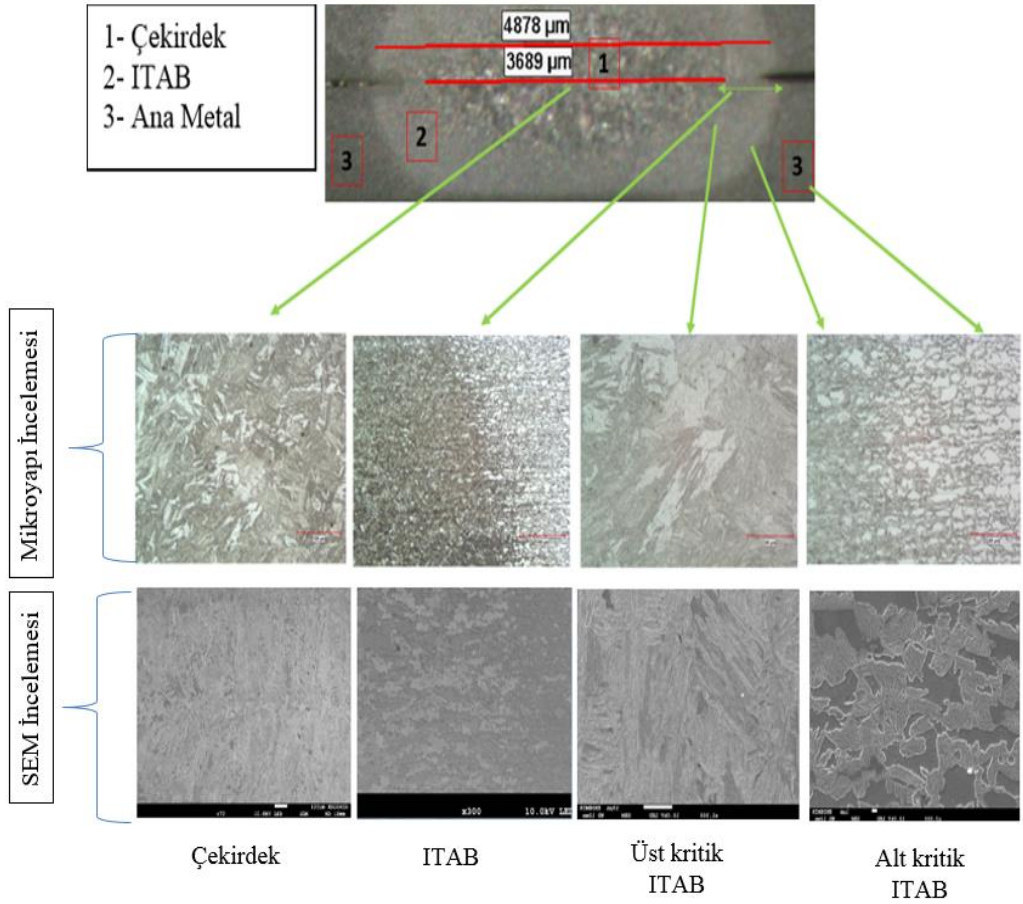
Ön deformasyon testine tabi tutulan malzemelerin iç yapıları değerlendirildiğinde artan ön uzama miktarına bağlı olarak daha fazla uzamış tane yapısı meydana gelmiştir. Kaynak testlerinden önce gerçekleştirilen ön deformasyon işleminin malzeme mekanik özellikleri, sertlik değerleri ve mikroyapı özellikleri açısından değişimleri oluşturduğu görülmüştür.

5.2 Punta Kaynaklı Parçaların Mikroyapı İncelemeleri ve Sertlik Ölçümleri

Galvanizli ve kaplamasız numuneler ile gerçekleştirilen punta kaynak testlerinde, galvanizli malzeme galvanizli malzeme ile kaplamasız malzeme kaplamasız malzeme ile kaynaklanmıştır. Ön deformasyon uygulanmamış %7,5 ve %15 ön deformasyon uygulanmış numunelerde aynı oranda ön uzama verilenler birbirleriyle kaynaklanacak şekilde punta kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir. Ön deformasyon uygulanmamış ve %7,5 ile %15 ön uzama verilmiş malzemelerin mikroyapı incelemeleri ve sertlik taramaları yapılmıştır. Her bir punta kaynak işleminden alınan numuneler uygun

metalografik işlemler uygulanarak kesit mikroyapı incelemeleri ve mikrosertlik taramaları yapılmıştır.

Şekil 5.2’de kaplamasız, ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda punta kaynak işlemi yapılmış DP600’ün mikroyapı ve SEM görüntüleri görülmektedir. Şekilde gösterilen kesit görüntüsünde punta kaynak bölgeleri tanımlanmıştır. 1 nolu bölge kaynak birleşme noktası olan kaynak çekirdeği, 2 nolu bölge ısı tesiri altında kalan bölge (ITAB), 3 nolu bölge de kaynak edilen malzemedir. Ayrıca, ITAB bölgesi 2 kısıma ayrılmaktadır. Çekirdek ile sınır olan kısım üst kritik ITAB, ana metal ile sınır olan kısımda alt kritik ITAB bölgesi olarak tanımlanmıştır. Her bir kaynak bölgesi için mikroyapı ve SEM incelemeleri yapılmıştır. Her bir kesit incelemesinde çekirdek ve kaynak bölgesi uzunlukları hesaplanmıştır.

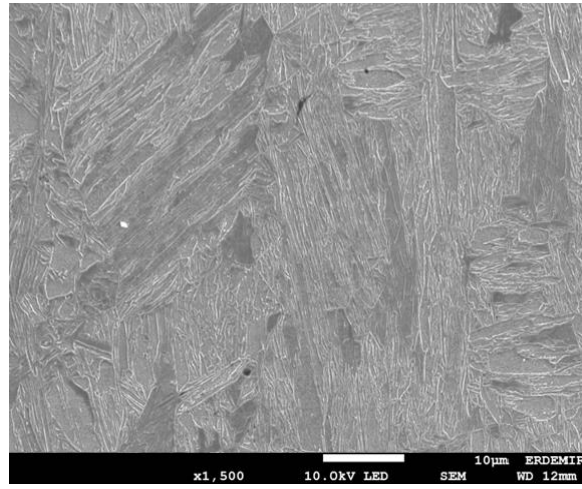


Şekil 5.2 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600’ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.

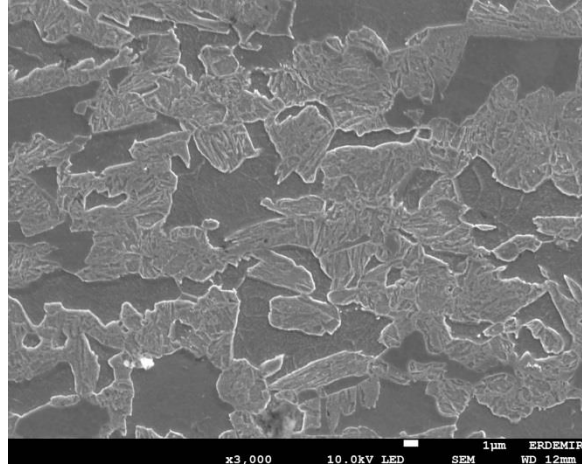
Elde edilen mikroyapı görüntüleri değerlendirildiğinde, çekirdek kısmında çok yüksek hızlarda ısınma ve aniden soğumaya bağlı olarak tamamen martenzit yapısı oluştuğu

görülmektedir. Üst Kritik ITAB olarak adlandırılan kısımda kontrolsüz hızlı ısıtma ve ani soğuma etkisi ile martenzit fazı oluşmaktadır. Kaynak çekirdeğinden uzaklaştıkça sıcaklık etkisi azalmaktadır. Alt kritik ITAB bölgesinde kaynak ısısı etkisi düşük miktarlarda olduğu için faz dönüşümü meydana gelmemiştir, fakat temperlenmiş martenzit fazının olduğu görülmüştür.

Şekil 5.3'te kaplamasız, ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda punta kaynak işlemi yapılmış DP600'ün çekirdek bölgesine ait ve Şekil 5.4'te alt kritik ITAB bölgesine ait SEM görüntüleri gösterilmiştir. Kaynak çekirdeği bölgesinde, kontrolsüz ısınma ve soğumaya bağlı olarak iğnesel martenzit yapısının olduğu gözlenmiştir.



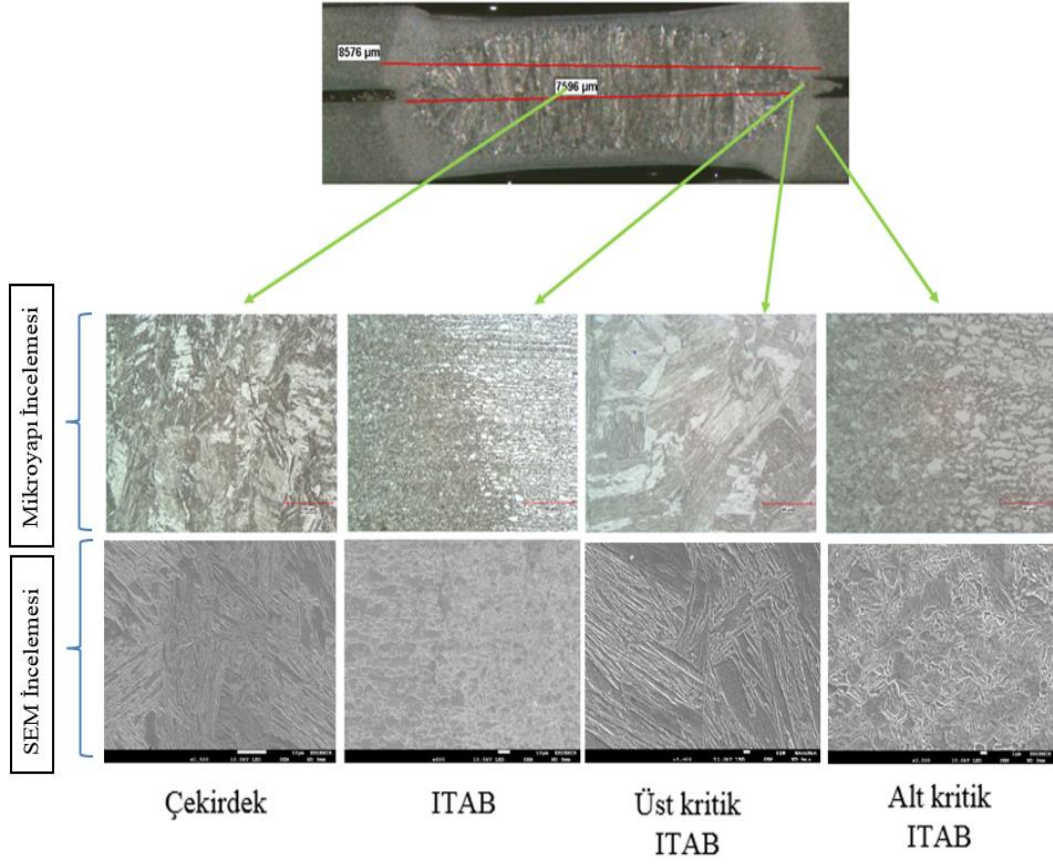
Şekil 5.3 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün çekirdek bölgesi görüntüsü.



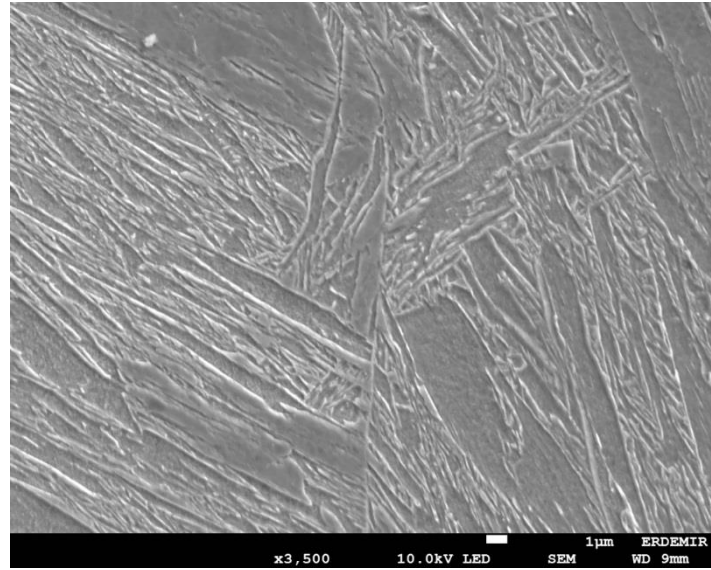
Şekil 5.4 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün alt kritik ITAB görüntüsü.

Şekil 5.4'te alt kritik ITAB bölgesinde herhangi bir faz dönüşümü meydana gelmemiştir, temperlenmiş martenzit fazı görülmektedir.

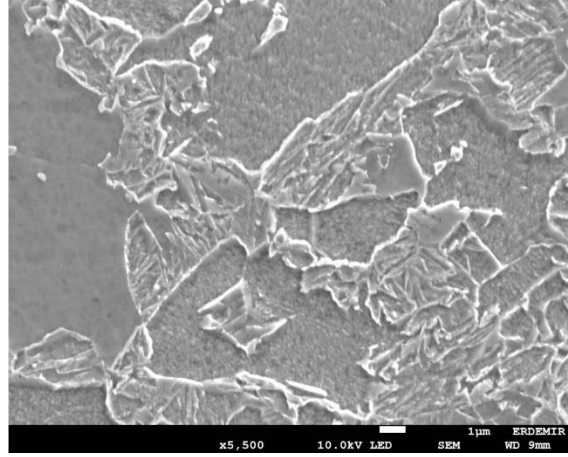
Şekil 5.5'te kaplamasız, ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda punta kaynak işlemi yapılmış DP600'ün mikroyapı ve SEM görüntüleri görülmektedir.



Şekil 5.5 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.

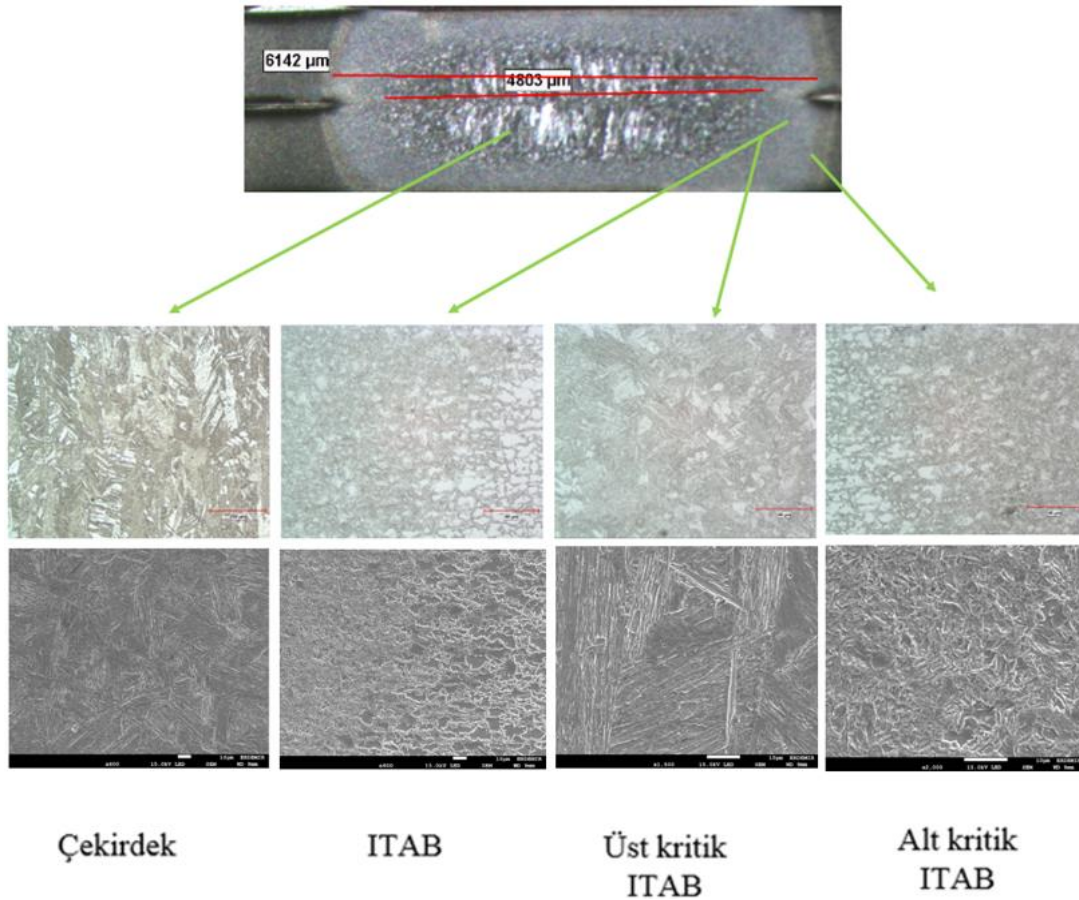


Şekil 5.6 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün üst kritik ITAB görüntüsü.



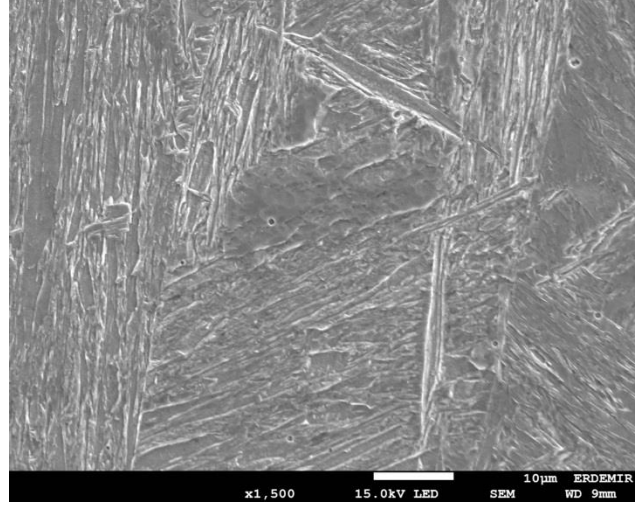
Şekil 5.7 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün alt kritik ITAB görüntüsü.

Şekil 5.6'da üst kritik ITAB ve Şekil 5.7'de alt kritik ITAB bölgelerine ait SEM görüntüleri gösterilmiştir. Üst kritik ITAB bölgesinde martenzit yapısı görülürken, alt kritik ITAB bölgesinde temperlenmiş martenzit yapısı görülmektedir.

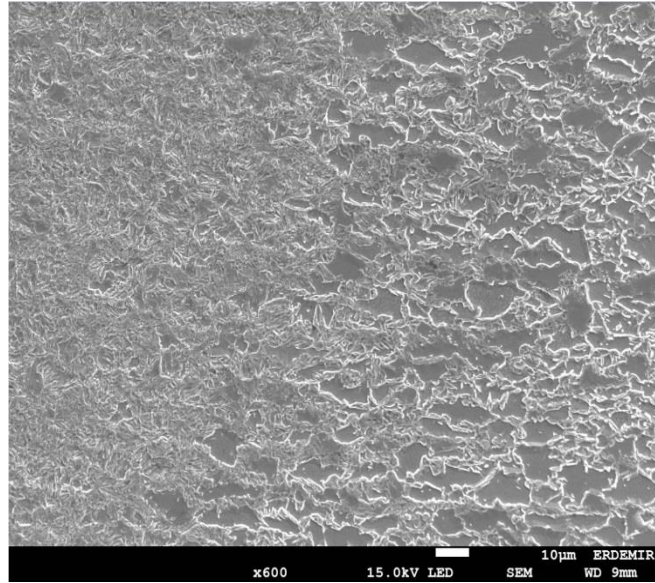


Şekil 5.8 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.

Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda punta kaynaklanmış malzemelere ait kaynak bölgesi mikroyapı ve SEM görüntüleri Şekil 5.8’de, üst kritik ITAB bölgesi Şekil 5.9’da ve kaynak bölgesinden ana metal geçiş ITAB kısmı Şekil 5.10’da gösterilmiştir.

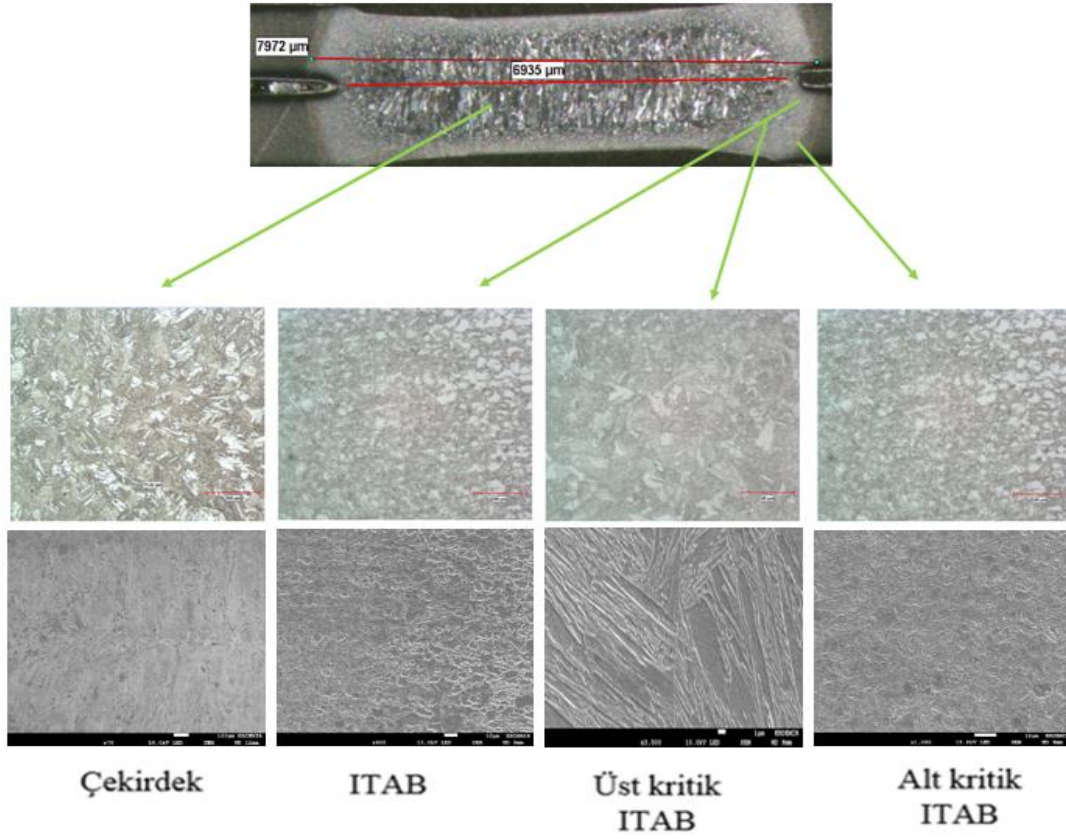


Şekil 5.9 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600’ün üst kritik ITAB görüntüsü.

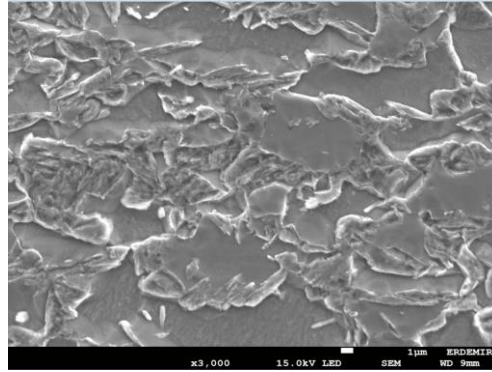


Şekil 5.10 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600’ün ITAB görüntüsü.

Şekil 5.9’da kaynak çekirdeği bölgesinde iğnesel martenzit yapısı olduğu görülmektedir. Şekil 5.10’da çekirdekten ana metale geçiş bölgesi olan ITAB kısmında alt kritik ITAB bölgesinde temperlenmiş martenzit ve ferrit fazları görülürken ana metalde çift fazlı çelik yapısı martenzit ve ferrit fazları görülmektedir.



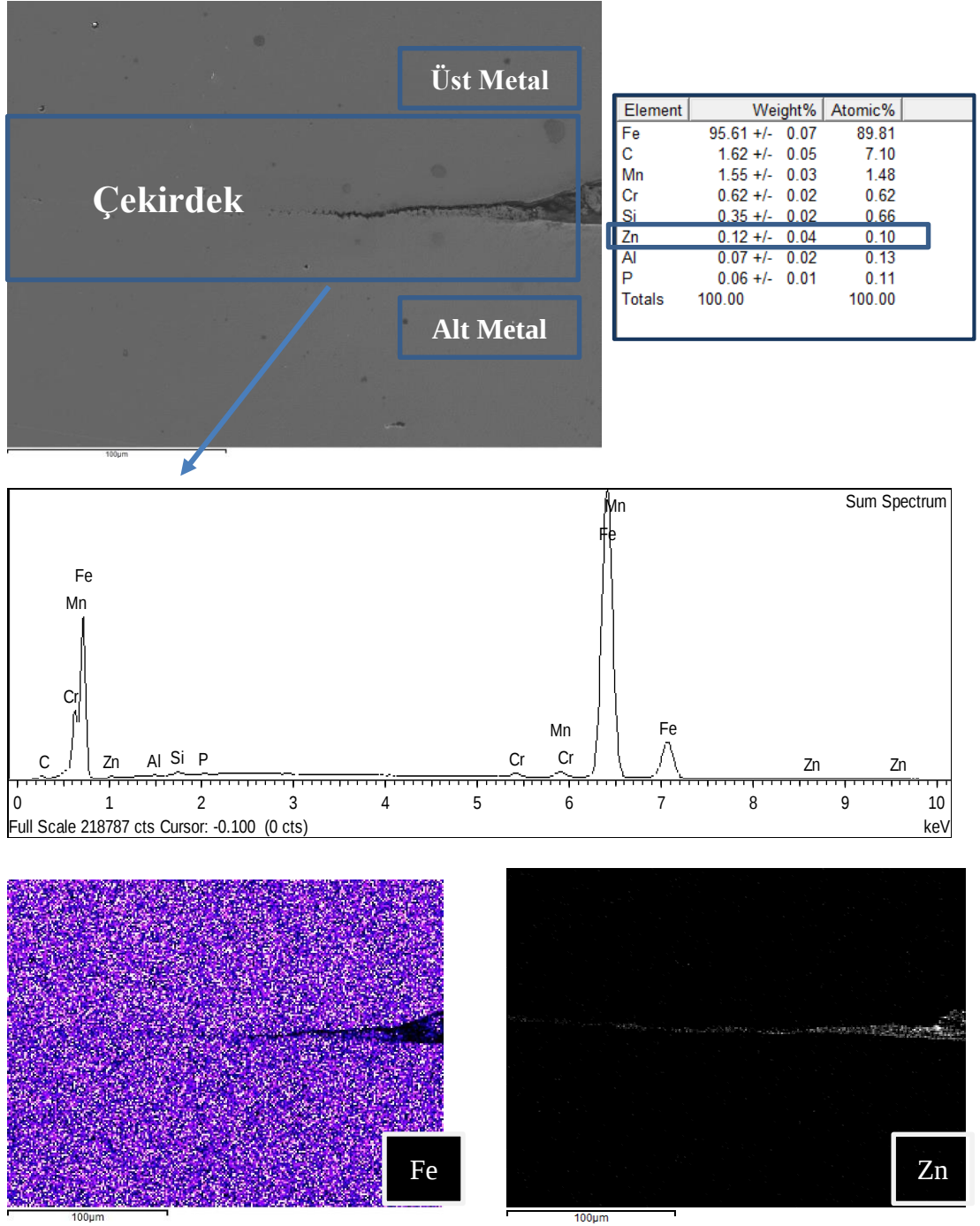
Şekil 5.11 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda ($I_{\max}$) kaynak edilmiş galvanizli DP600'un kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.



Şekil 5.12 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda ($I_{\max}$) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'un alt kritik ITAB görüntüsü.

Maksimum ve minimum akımda punta kaynaklanan numuneler karşılaştırıldığında bölgesel olarak benzer faz yapıları olduğu görülmektedir. Kaynak bölgesi genişliği açısından karşılaştırma yapıldığında maksimum akımda punta kaynaklanan malzemede artan ısı girdisine bağlı olarak çekirdek uzunluğunun daha fazla olduğu görülmüştür. %7,5 ve %15 ön uzama verilmiş, minimum ($I_{\min}$) ve maksimum akımda ($I_{\max}$) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'e ait mikroyapı incelemeleri ve SEM

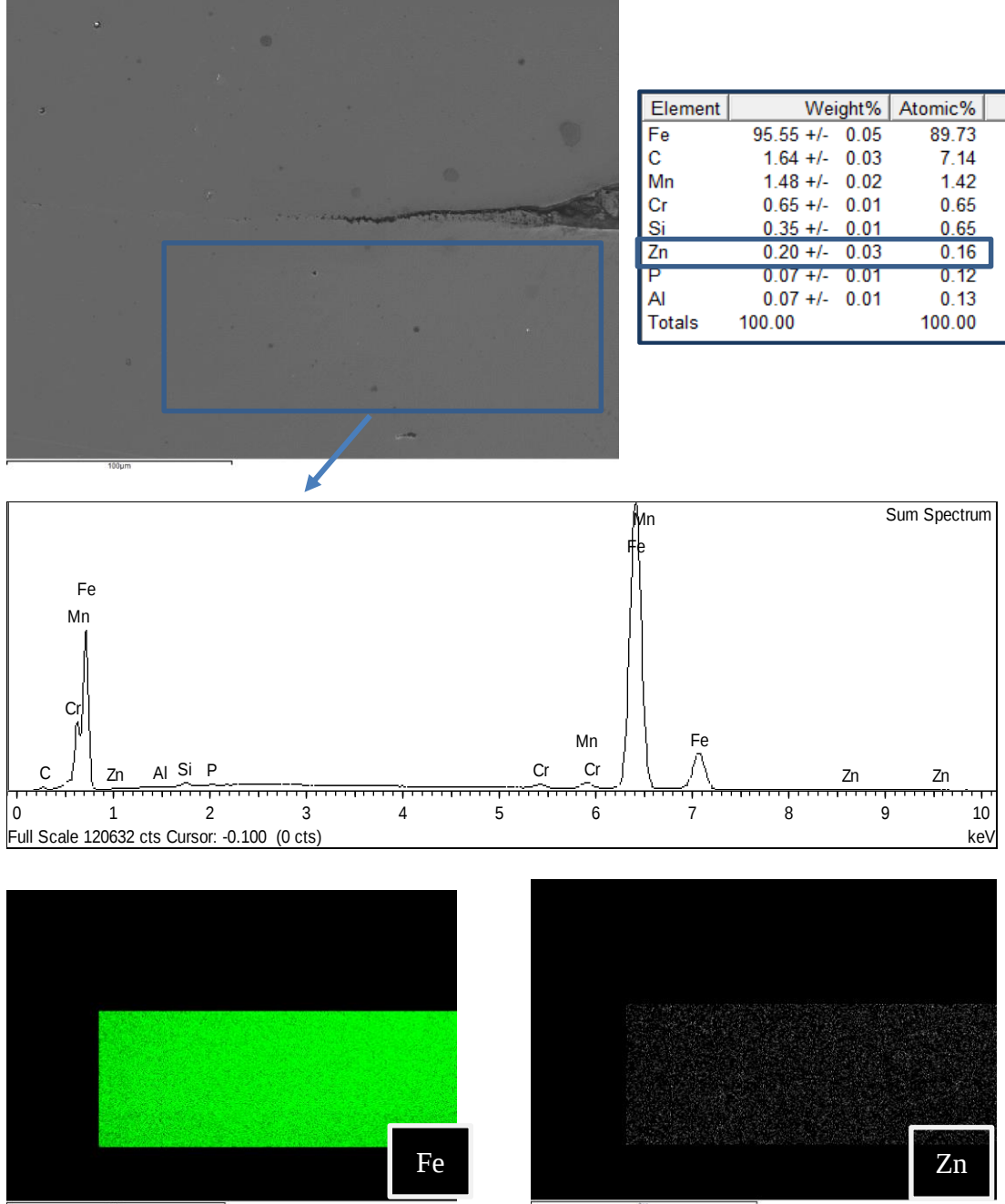
incelemeleri yapılmıştır. Bölgesel faz yapıları incelenmiştir (Bkz. Ek A). Şekil 5.13'te galvanizli kaynaklanmış numunelere yapılan kesit incelemesinde kaynak bölgesi Zn galvaniz haritaları gösterilmiştir.



Şekil 5.13 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'un kaynak bölgesine ait EDS analizi, Zn ve Fe haritaları.

Şekil 5.13'te alt metal, üst metal ve kaynak birleşme noktaları olan çekirdek gösterilmiştir. Punta kaynak prosesinde kaynak çekirdek bölgesinde hızlı bir şekilde yüksek sıcaklık değerlerine çıkmanın etkisi ile birlikte çelik yüzeyinde bulunan Zn

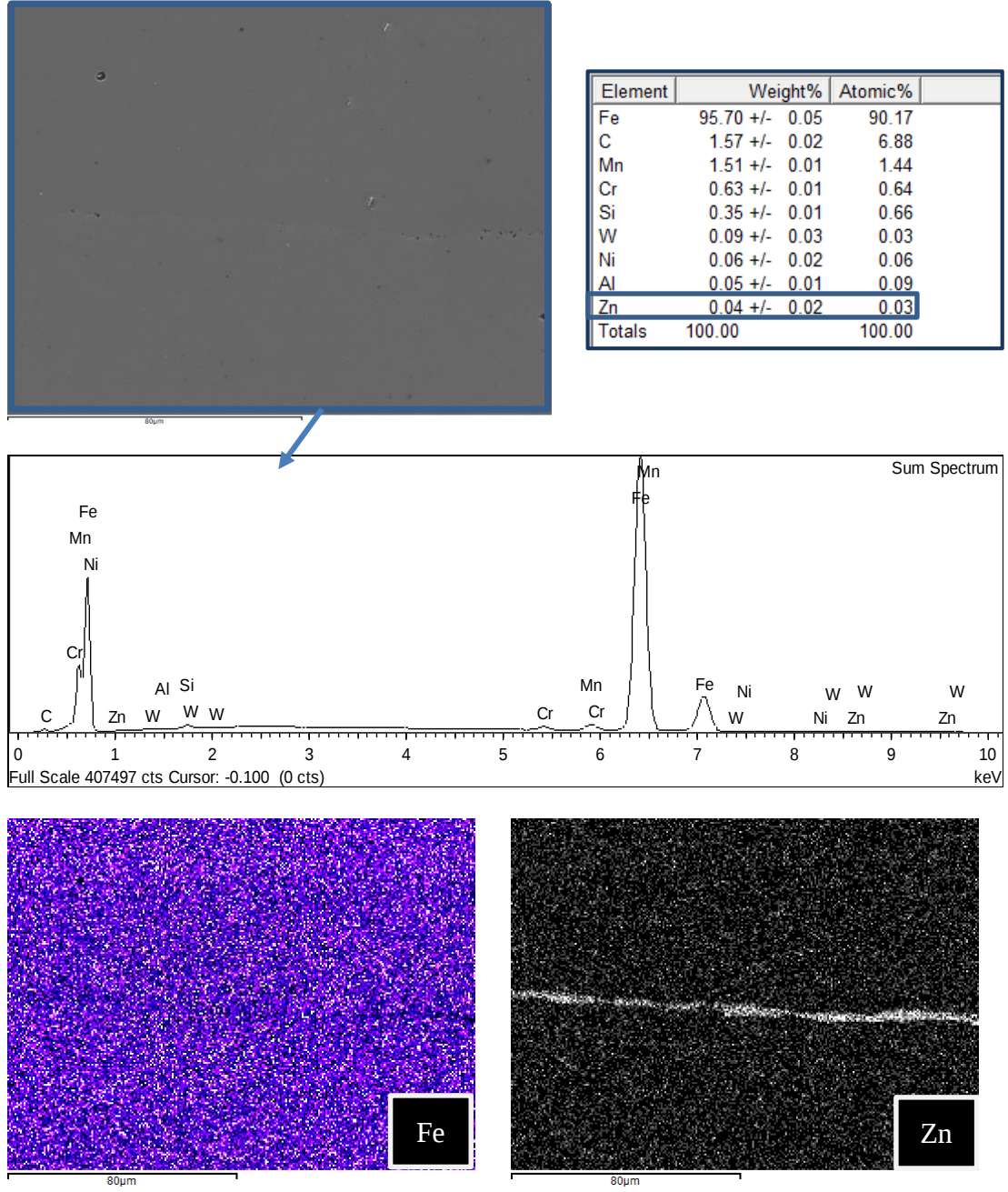
ergiyerek yüzeyden uzaklaşmaktadır. Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda punta kaynaklanmış DP600’de iki kaynak birleşim noktasında Zn yapısı görülmektedir. Şekil 5.14’te ön deformasyon uygulanmamış minimum akımda kaynaklanmış galvanizli numune ITAB bölgesi incelemesi gösterilmiştir.



Şekil 5.14 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600’ün ITAB bölgesine ait EDS analizi, Zn ve Fe haritaları.

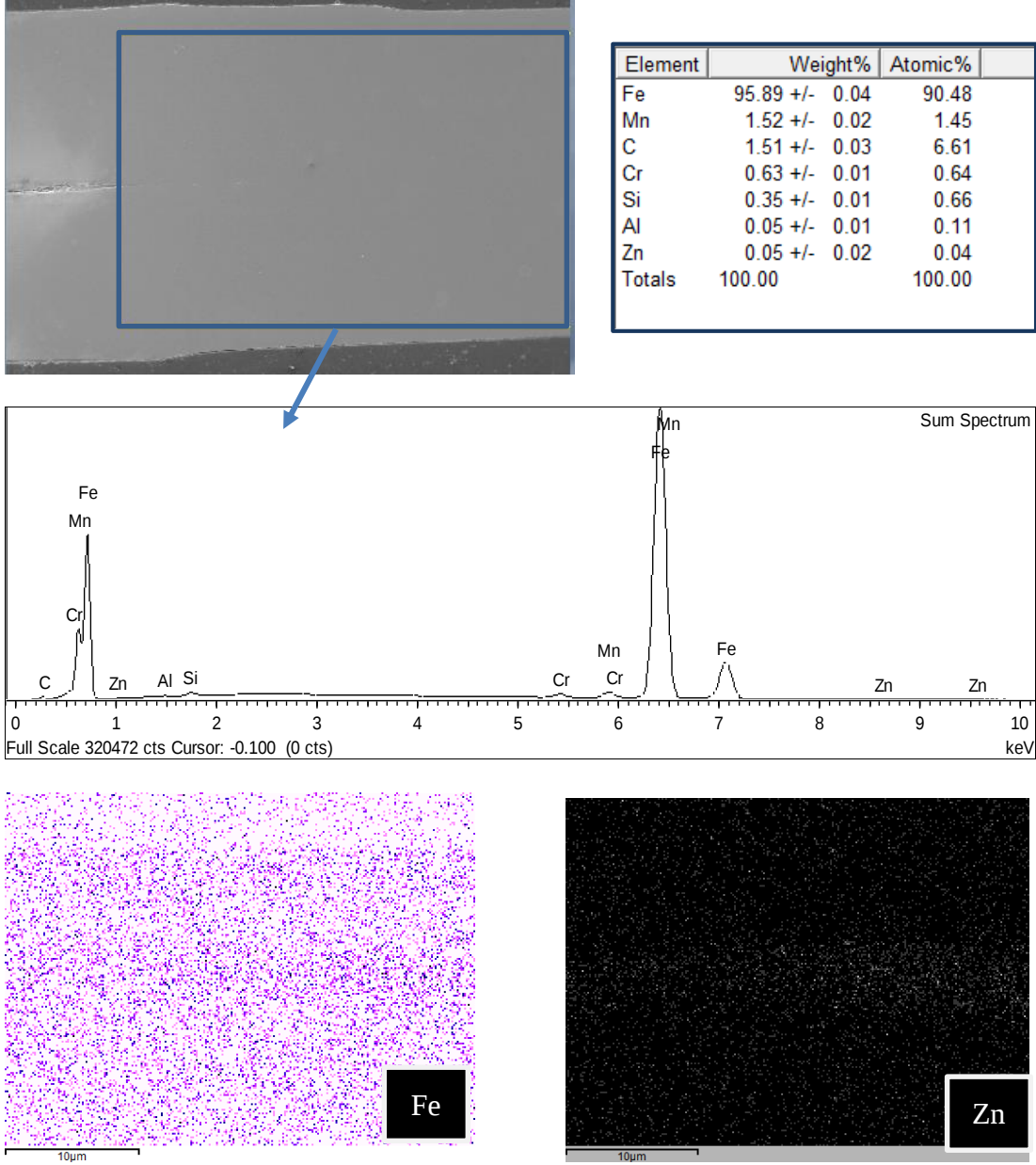
Alt ve Üst ITAB bölgelerinde yapılan SEM ve EDS incelemelerinde yüzeyde bulunan galvaniz kaplamanın ısı tesiri ile birlikte yüzeyden bir miktar uzaklaştığı görülmüştür.

Yapılan EDS analizlerin çok az miktarda Zn bulunmuştur. Şekil 5.15'te kaynak çekirdek bölgesine ait element haritaları ve EDS analiz sonuçları gösterilmiştir.



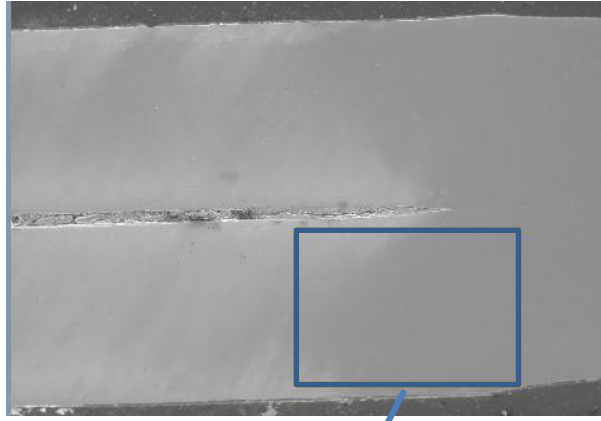
Şekil 5.15 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'un çekirdek bölgesine ait EDS analizi, Zn ve Fe haritaları.

Şekil 5.15'te kaynak çekirdek bölgesinde iki metalin birleşim hattında meydana gelen Fe-Zn bileşiği görülmektedir. Şekil 5.16'da ön deformasyon uygulanmamış maksimum akımda punta kaynaklanmış malzemeye ait SEM incelemesi ve EDS analizi gösterilmiştir.

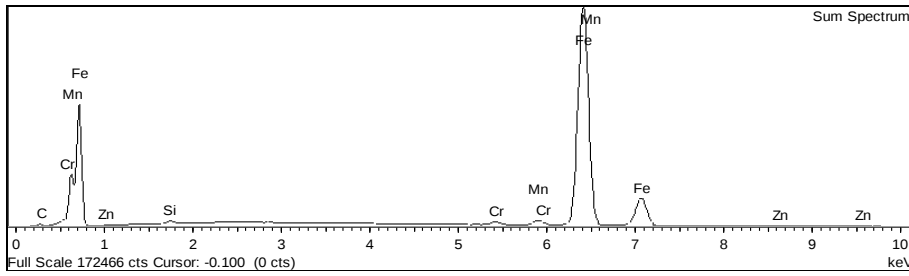


Şekil 5.16 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün çekirdek bölgesine ait EDS analizi, Zn ve Fe haritaları.

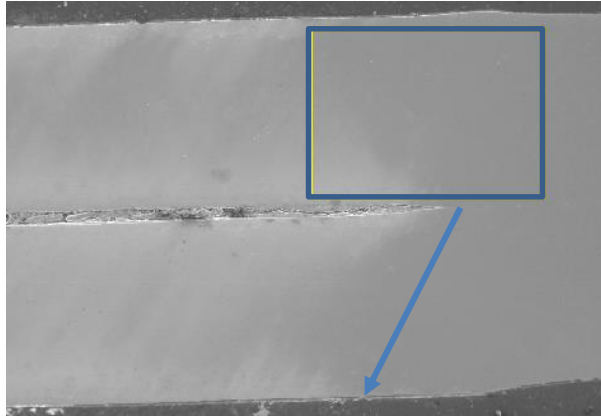
Şekil 5.16'da gösterilen maksimum akımda kaynaklanmış malzemeye ait SEM incelemesinde daha az miktarda Zn görülmüştür. Minimum akımda meydana gelen yoğun Zn içerikli EDS analizi maksimum akım ile kaynak yapılan yapıda görülmemiştir. Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'de ITAB bölgesi EDS analizleri gösterilmiştir.



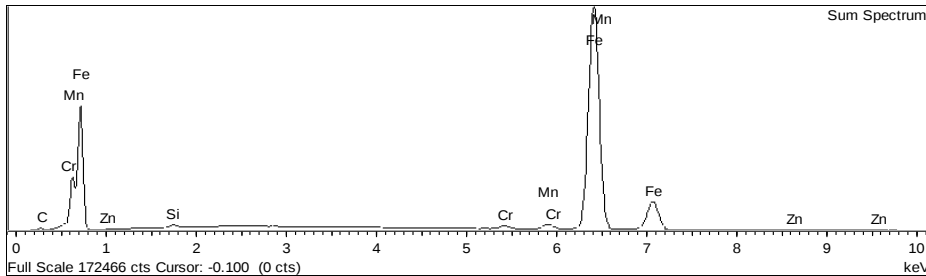
Element	Weight%	Atomic%
Fe	95.89 +/- 0.06	90.41
C	1.54 +/- 0.04	6.76
Mn	1.54 +/- 0.02	1.48
Cr	0.63 +/- 0.01	0.64
Si	0.37 +/- 0.01	0.69
Zn	0.03 +/- 0.03	0.03
Totals	100.00	100.00



Şekil 5.17 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün ITAB bölgesine ait EDS analizi.



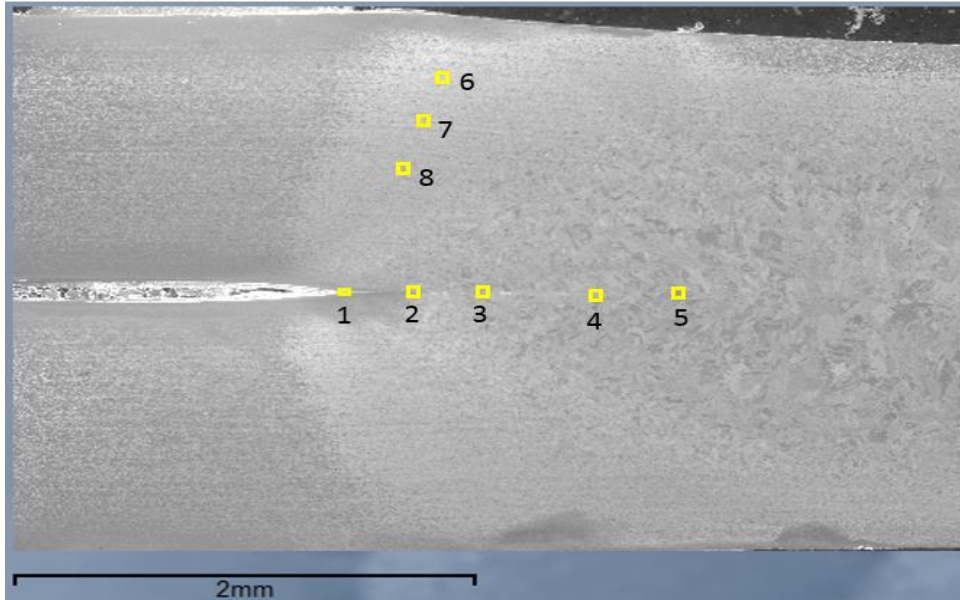
Element	Weight%	Atomic%
Fe	95.84 +/- 0.06	90.57
Mn	1.51 +/- 0.02	1.45
C	1.46 +/- 0.04	6.43
Cr	0.63 +/- 0.01	0.64
Si	0.35 +/- 0.01	0.66
Ni	0.09 +/- 0.02	0.08
Al	0.06 +/- 0.01	0.12
Zn	0.05 +/- 0.03	0.04
Totals	100.00	100.00



Şekil 5.18 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün ITAB bölgesine ait EDS analizi.

Maksimum ve minimum akım miktarlarında punta kaynaklanan ve ön deformasyon işlemine tabi tutulmamış galvanizli DP600 numunelerde yüzeyde bulunan Zn elementinin kaynak sonrası karakterizasyon çalışması yapılmıştır. Her iki akım miktarında punta kaynaklanan malzemelerin kesit tabakaları incelendiğinde, kaynak çekirdeği ve ITAB bölgelerinde Zn görülmüştür. Akım miktarına bağlı olarak yüzeyde bulunma oranı değişmektedir. %7,5 ve %15 ön uzama verilmiş, minimum ve maksimum akım miktarlarında punta kaynaklanmış galvanizli malzemelerin EDS analizleri ve Fe-Zn haritaları yapılmıştır (Bkz EK B).

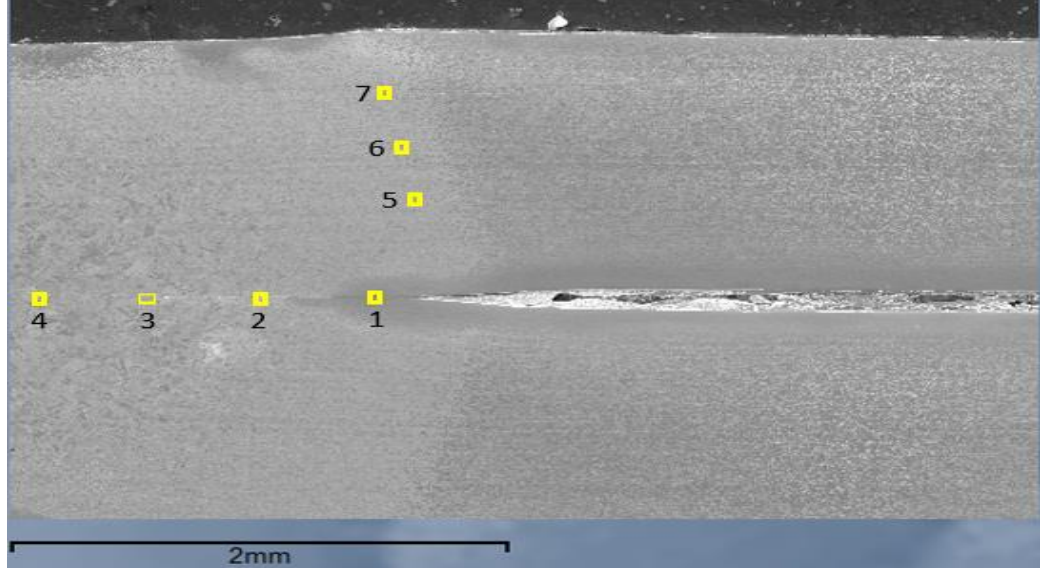
Genel analizler sonrasında kaynak çekirdeğinde noktasal analizler yapılmıştır. Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de minimum ve maksimum akımda kaynaklanmış galvanizli numunelerin analiz alınan farklı bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 5.19: Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda ($I_{\min}$) kaynak edilmiş galvanizli DP600’den noktasal analiz alınan farklı bölgeler.

Çizelge 5.2: Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda ($I_{\min}$) kaynak edilmiş galvanizli DP600’ün farklı bölgelere ait nokta EDS analiz sonuçları.

Noktasal Analiz (% ağırlık)								
Element	1 nolu	2 nolu	3 nolu	4 nolu	5 nolu	6 nolu	7 nolu	8 nolu
Fe	81,52	81,53	81,83	83,39	82,39	80,61	81,95	81,51
C	14,30	14,10	14,31	14,2	14,4	13,94	14,16	14,23
Zn	1,77	1,76	1,58	0	0	1,65	1,62	1,73
Mn	1,28	1,38	1,25	1,21	1,21	1,27	1,17	1,27
Cr	0,54	0,59	0,51	0,56	0,76	0,57	0,5	0,61
Si	0,42	0,36	0,40	0,43	0,43	0,41	0,41	0,41
Al	0,17	0,29	0,13	0,21	0,27	0,19	0,19	0,24



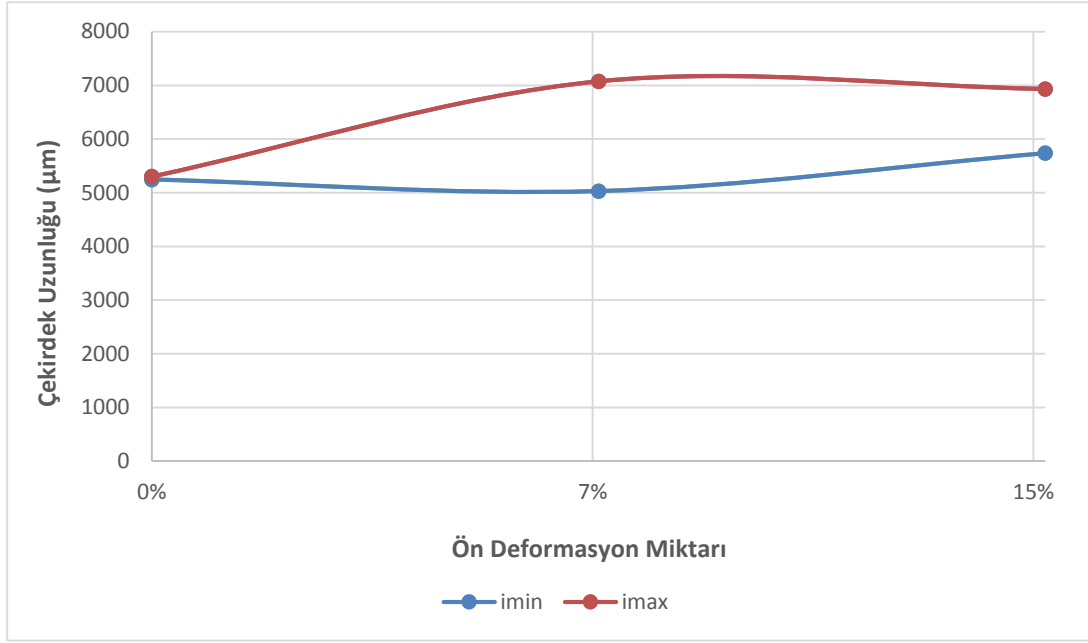
Şekil 5.20: Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'den noktasal analiz alınan farklı bölgeler.

Çizelge 5.3: Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün farklı bölgelere ait nokta EDS analiz sonuçları.

Noktasal Analiz (% ağırlık)							
Element	1 nolu	2 nolu	3 nolu	4 nolu	5 nolu	6 nolu	7 nolu
Fe	76,41	81,31	80,29	81,27	81,45	81,55	81,37
C	19,46	13,55	13,50	14,10	13,39	13,45	13,49
Zn	1,80	1,24	0,85	0	0,79	0,77	0,77
Mn	1,10	1,24	1,20	1,17	1,25	1,27	1,26
Cr	0,55	0,57	0,51	0,55	0,50	0,53	0,5
Si	0,46	0,41	0,39	0,43	0,44	0,41	0,4
Al	0,23	0,18	0,20	0,19	0,16	0,19	0,19

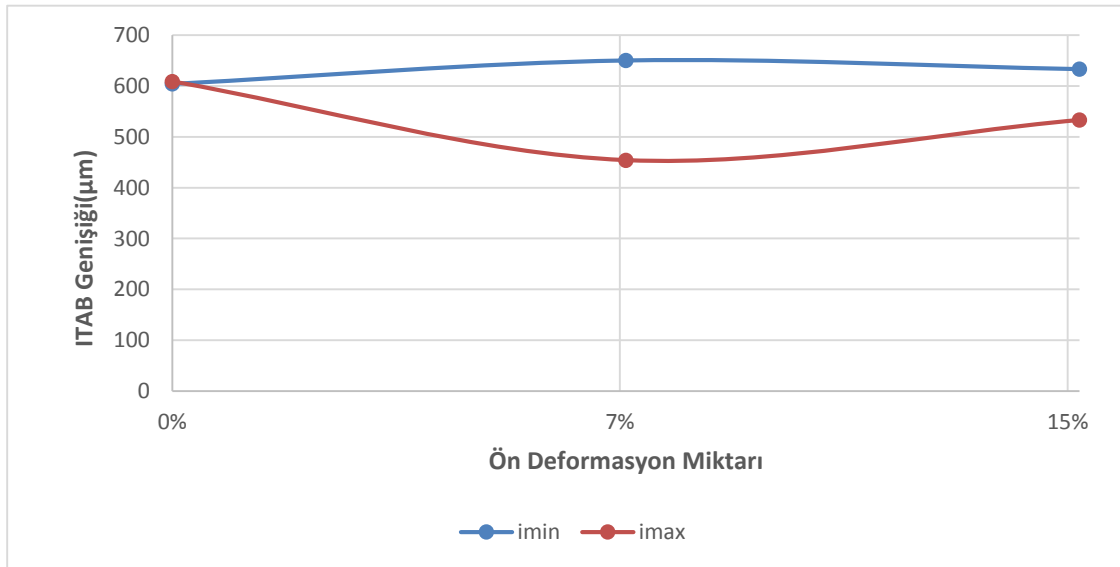
Minimum ve maksimum akımda gerçekleştirilen nokta analizlerde birleşme hattı boyunca minimum akımda herhangi bir Zn ölçülmezken maksimum akımda çok az miktarda Zn tespit edilmiştir. Kaynak çekirdeğinin alt ve üst bölgelerinde bir miktar Zn tespit edilmiştir. %15 ön uzama verilmiş, minimum ve maksimum akım miktarlarında punta kaynaklanmış galvanizli malzemeye ait nokta analizleri yapılmıştır (Bkz EK B).

Mikroyapı incelemeleri kapsamında kaynak bölgesinde bulunan kaynak çekirdeği uzunluğu ve ITAB genişliği ölçümleri yapılmıştır. Şekil 5.19'da galvanizli kaynak numunelerine ait çekirdek uzunluğu ve ön deformasyon ilişkisi, Şekil 5.20'de galvanizli kaynak numunelerine ait ITAB genişliği ve ön deformasyon miktarı etkileşimi incelenmiştir.



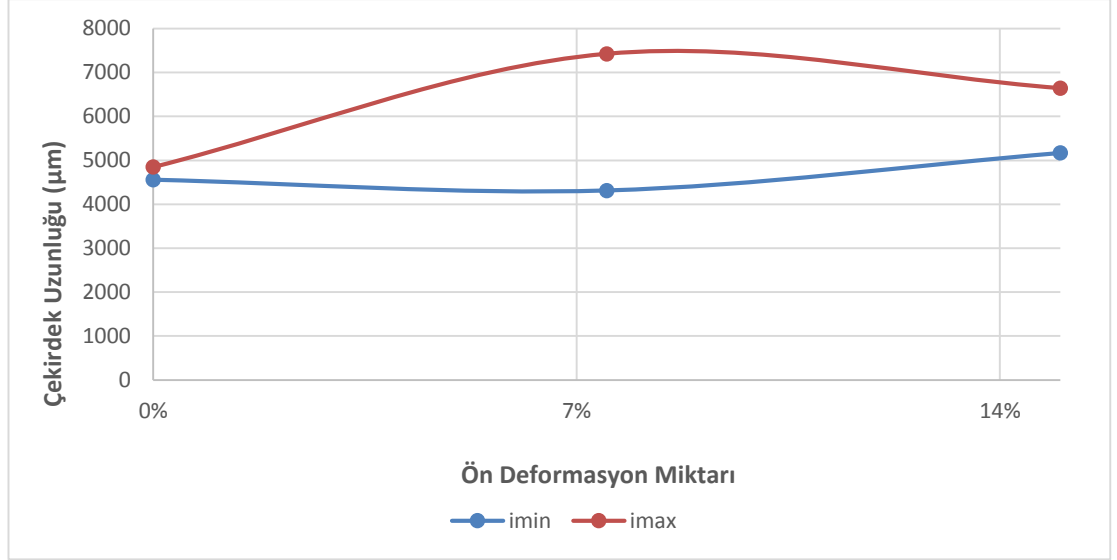
Şekil 5.21 : Galvanizli kaynak numunelerine ait çekirdek uzunluğu-ön deformasyon grafiği.

Galvanizli kaynak numuneleri çekirdek uzunluğu değerlendirildiğinde, maksimum akım miktarında punta kaynaklanan galvanizli malzemelerin çekirdek uzunluğunun daha fazla olduğu görülmüştür. Minimum ve maksimum akım miktarlarında punta kaynaklanan numunelerde artan ön deformasyon miktarına bağlı olarak artış görülmektedir.

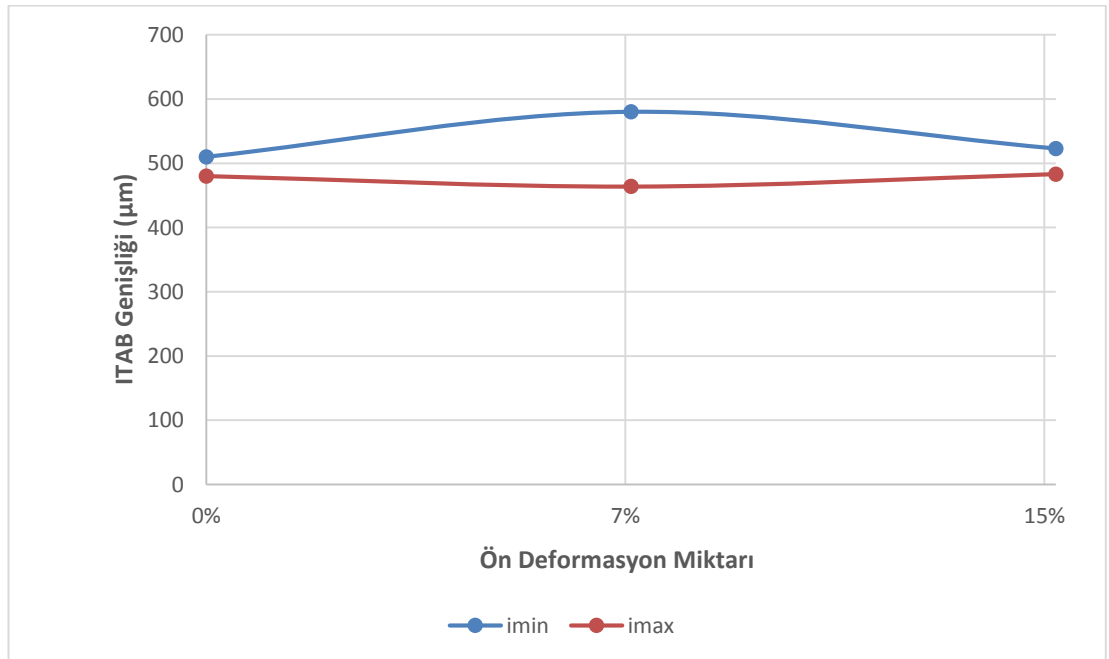


Şekil 5.22 : Galvanizli kaynak numunelerine ait ITAB genişliği-ön deformasyon grafiği.

Şekil 5.20’de minimum akım değerlerinde punta kaynaklanan galvanizli malzemeler maksimum akım değerlerinde punta kaynaklanana göre daha geniş ITAB bölgelerine sahiptir. Şekil 5.21’de kaplamasız kaynak numunelerine ait çekirdek uzunluğu ve ön deformasyon ilişkisi, Şekil 5.22’de kaplamasız kaynak numunelerine ait ITAB genişliği ve ön deformasyon miktarı etkileşimi incelenmiştir.



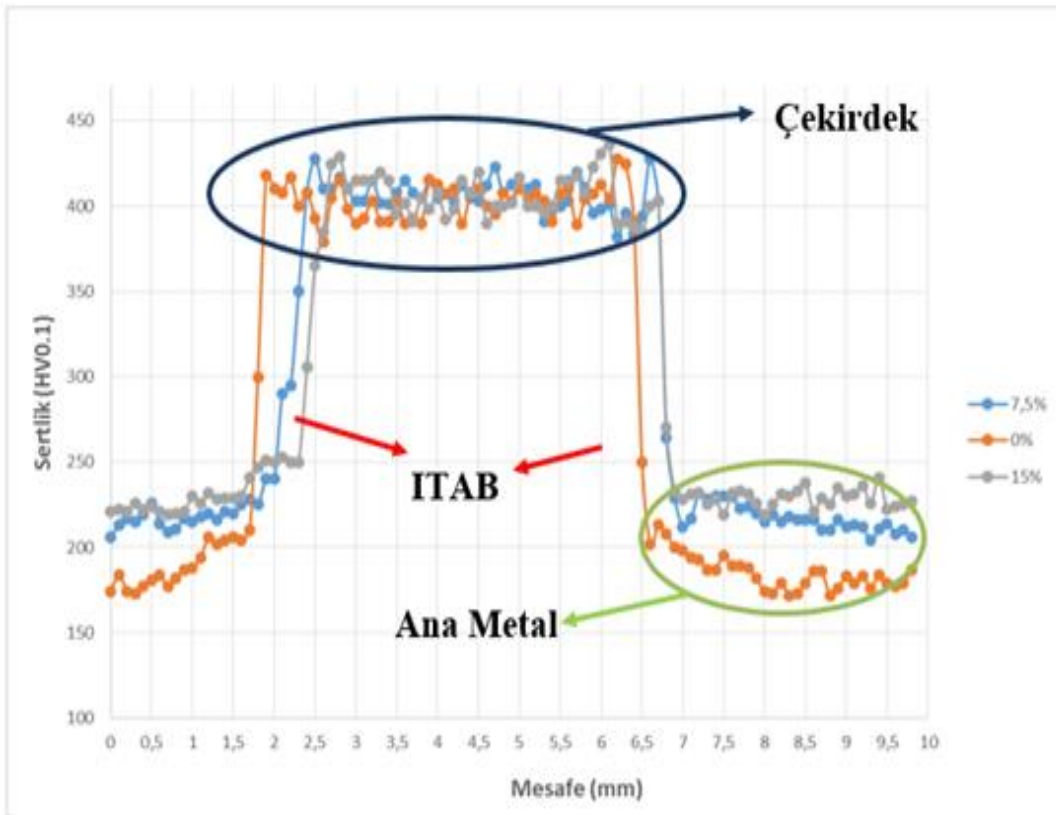
Şekil 5.23 : Kaplamasız kaynak numunelerine ait çekirdek uzunluğu-ön deformasyon grafiği.



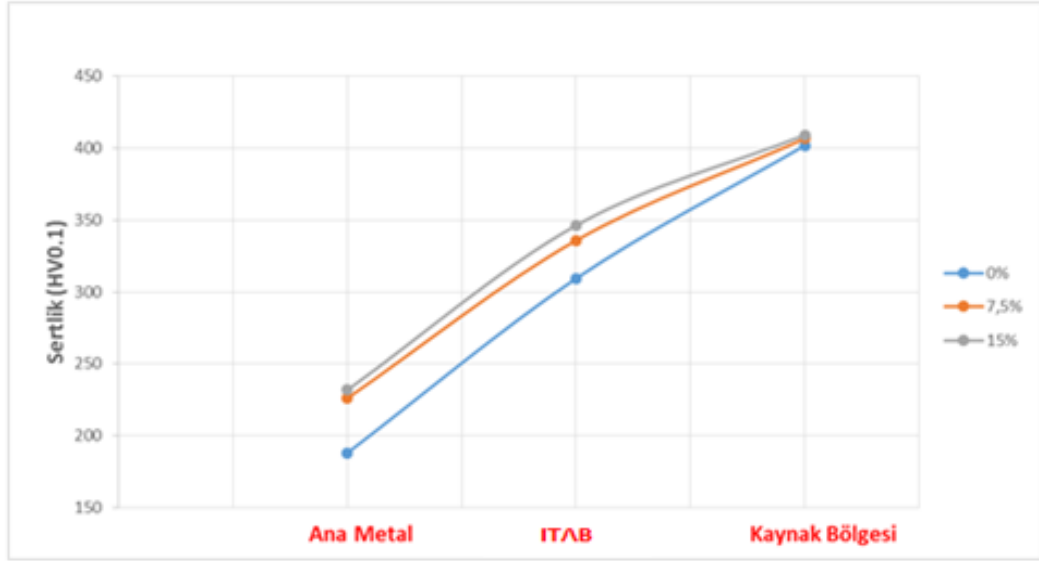
Şekil 5.24 : Kaplamasız kaynak numunelerine ait ITAB genişliği-ön deformasyon grafiği.

Kaplamasız kaynak numunelerinde gerçekleştirilen kesit incelemelerinde, maksimum akım miktarlarında kaynaklanan malzemelerde daha uzun kaynak çekirdeği elde edilirken, minimum akım miktarlarında kaynaklanan malzemelerde daha geniş ITAB bölgesi olduğu görülmüştür. Minimum akım miktarlarında kaplamasız ve galvanizli malzemeler için artan ön deformasyon miktarına bağlı olarak kaynak çekirdeği mesafesinde belirli bir miktarda artış görülürken ITAB genişliğinde azalma meydana gelmektedir. Maksimum akım miktarlarında kaplamasız ve galvanizli malzemeler için artan ön deformasyon miktarına bağlı olarak kaynak çekirdeği mesafesinde artış görülürken ITAB genişliği bir miktar azalmaktadır.

Galvaniz kaplı ve kaplamasız numunelerde kesit alınarak mikrosertlik incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.23'te minimum akımda punta kaynaklanmış kaplamasız DP600 kaynak numunelerine ait sertlik kıyaslaması gösterilmiştir. Kıyaslama ön deformasyon miktarına bağlı olarak değişimi göstermektedir. Şekilde, kaynak bölgesinde çekirdek, ITAB ve ana metal olmak üzere 3 bölge gösterilmiştir. Şekil 5.24'te minimum akımda punta kaynaklanmış kaplamasız DP600'e ait bölgesel olarak ortalama sertlik değişimleri gösterilmiştir.

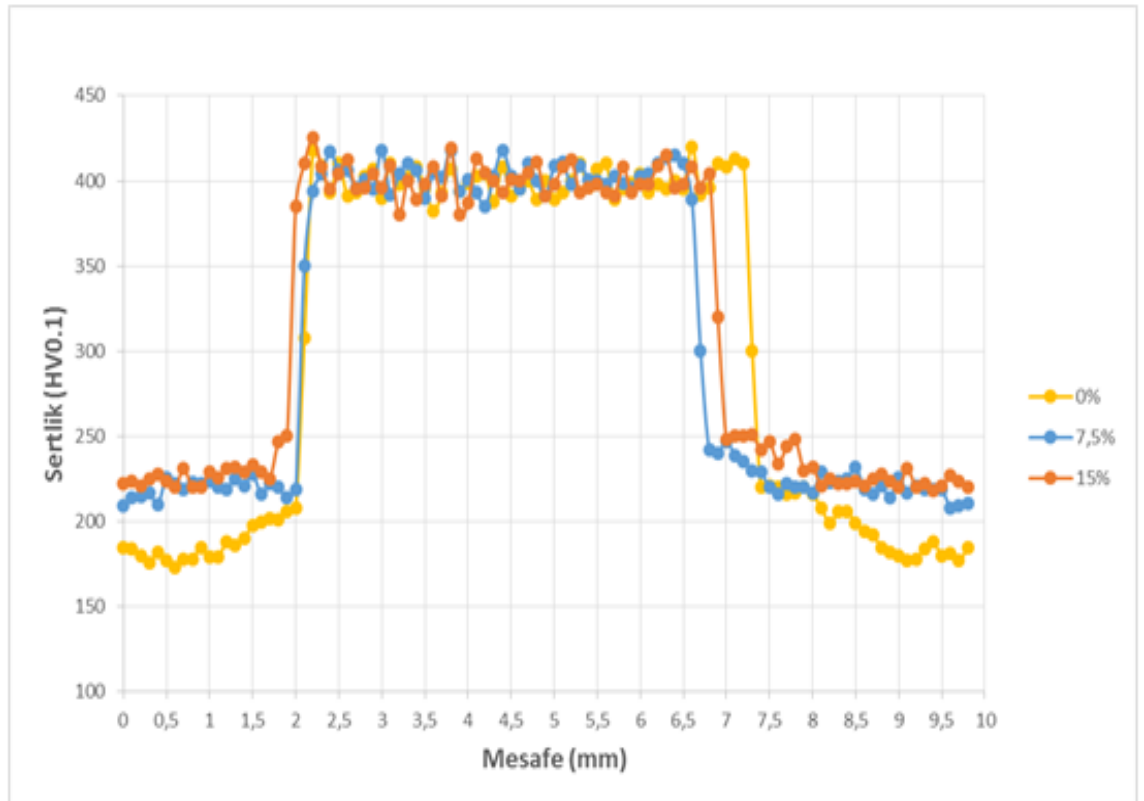


Şekil 5.25 : Minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız kaynak numunelerine ait sertlik ölçümleri.

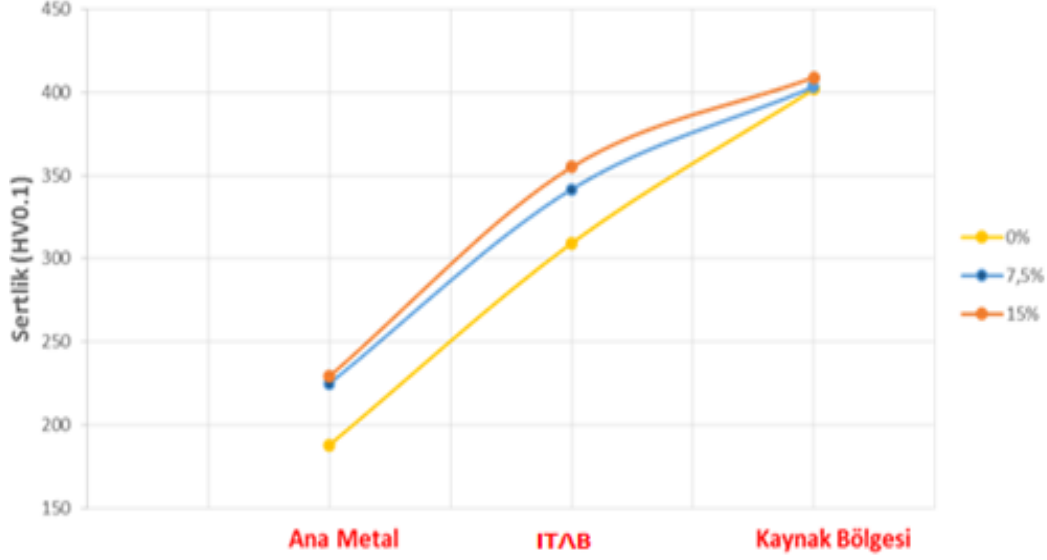


Şekil 5.26 : Minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız kaynak numunelerine ait bölgesel ortalama sertlik ölçümleri kıyaslaması.

Şekil 5.25’de minimum akımda punta kaynaklanmış kaplamasız DP600 kaynak numunelerine ait sertlik kıyaslaması ve Şekil 5.26’da bölgesel olarak sertlik bölgesinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir.

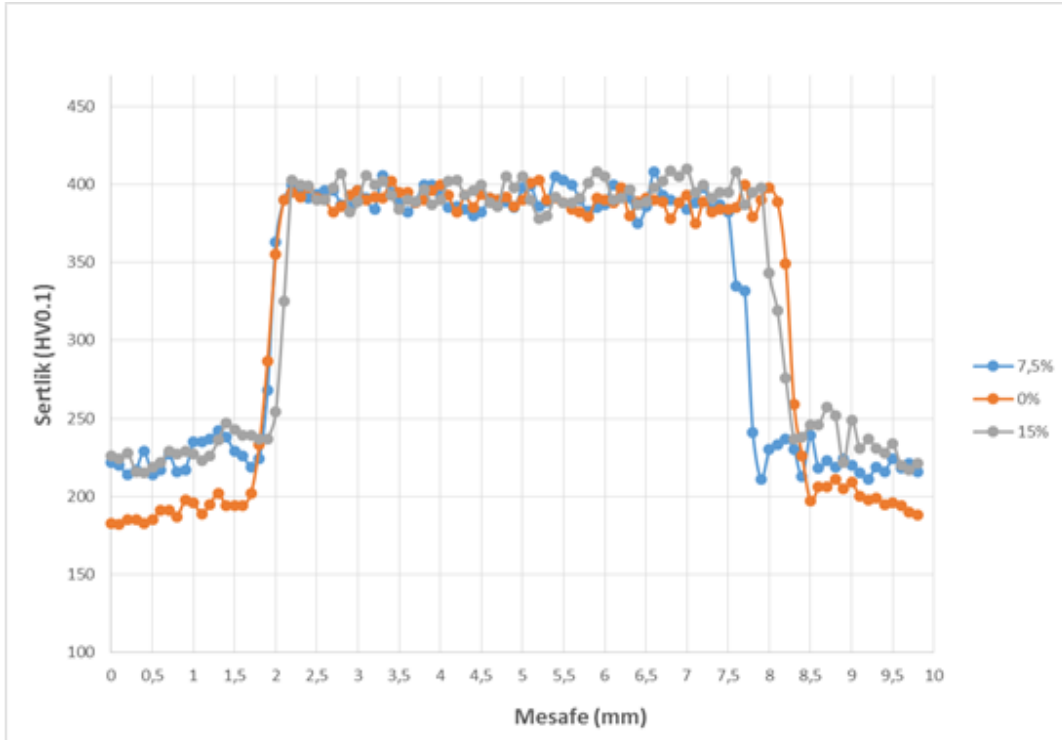


Şekil 5.27 : Maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız kaynak numunelerine ait sertlik ölçümleri.

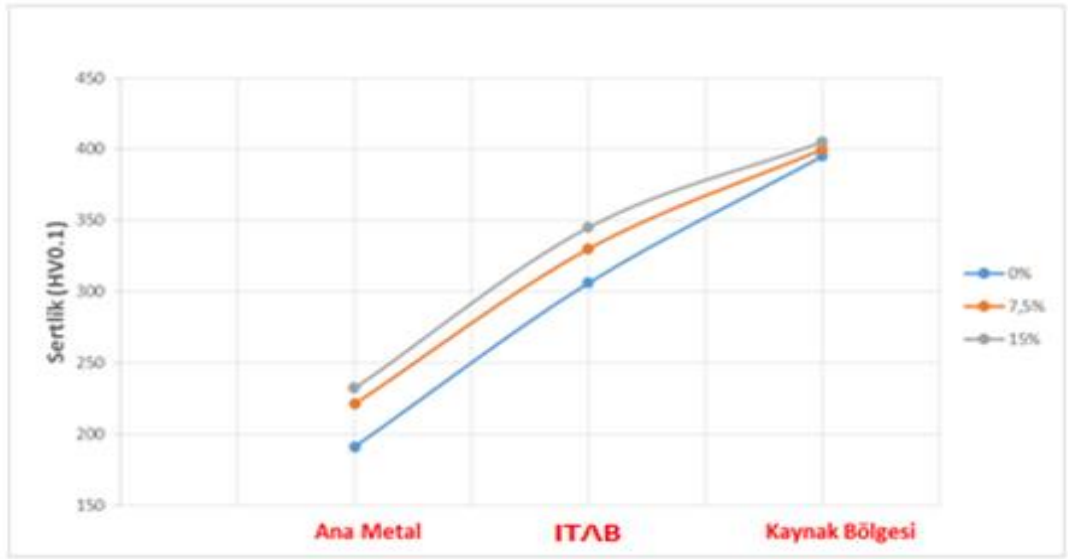


Şekil 5.28 : Maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız kaynak numunelerine ait bölgesel ortalama sertlik ölçümleri kıyaslaması.

Şekil 5.27’de minimum akımda punta kaynaklanmış galvanizli DP600 kaynak numunelerine ait sertlik kıyaslaması ve Şekil 5.28’de bölgesel olarak sertlik bölgesinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir.

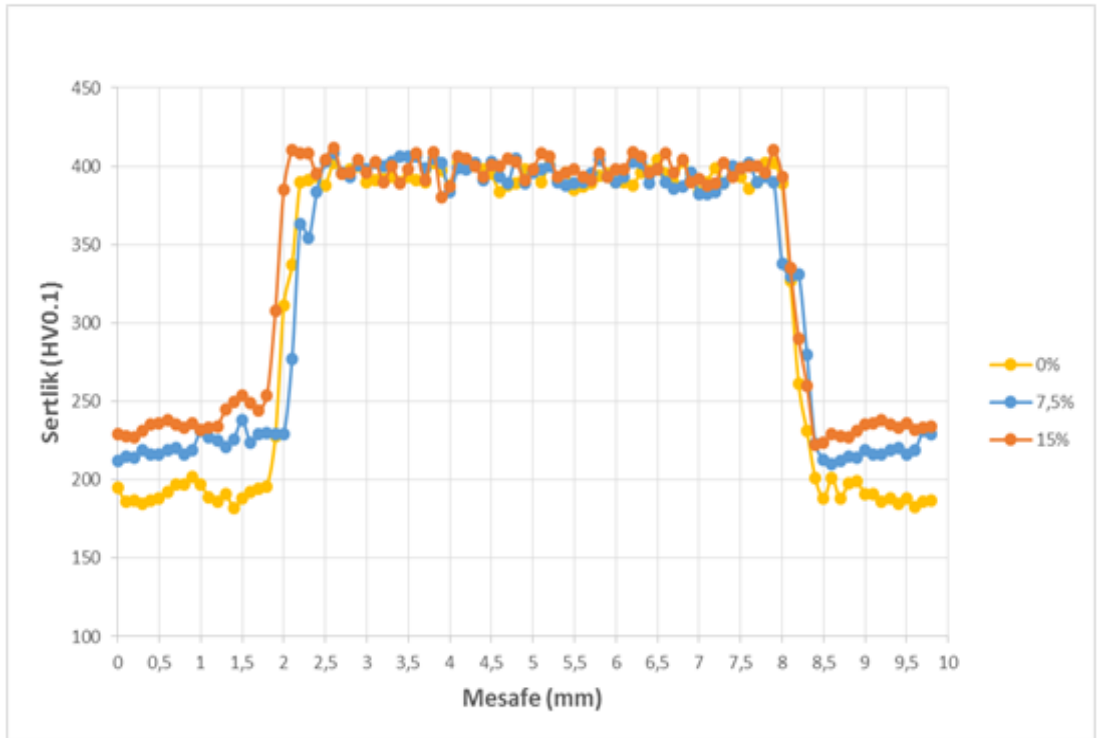


Şekil 5.29 : Minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli kaynak numunelerine ait sertlik ölçümleri.

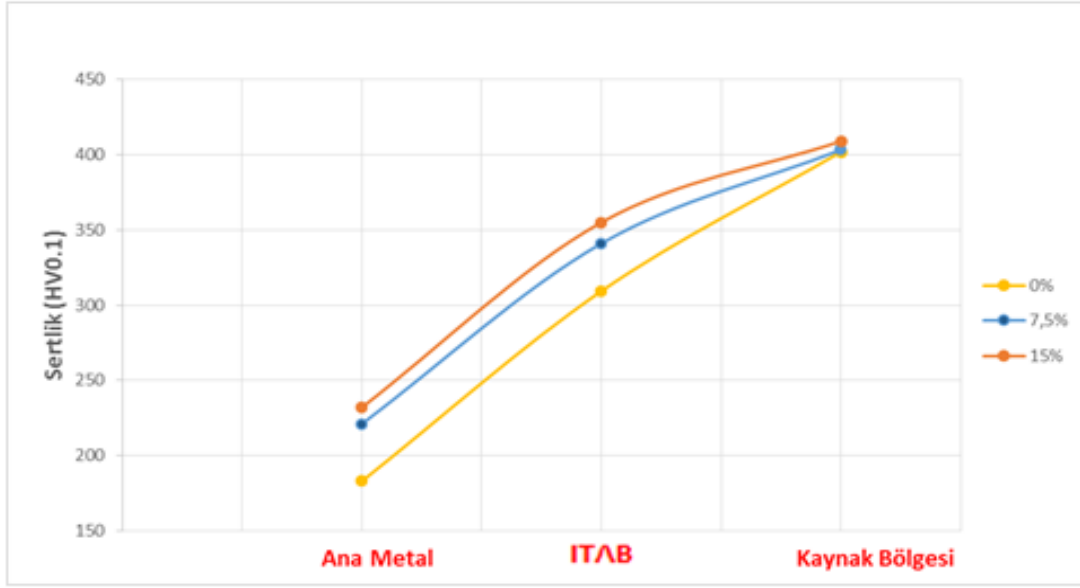


Şekil 5.30 : Minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli kaynak numunelerine ait bölgesel ortalama sertlik ölçümleri kıyaslaması.

Şekil 5.30'da minimum akımda punta kaynaklanmış galvanizli DP600 kaynak numunelerine ait sertlik kıyaslaması ve Şekil 5.31'da bölgesel olarak sertlik bölgesinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir.



Şekil 5.31 : Maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli kaynak numunelerine ait sertlik ölçümleri.



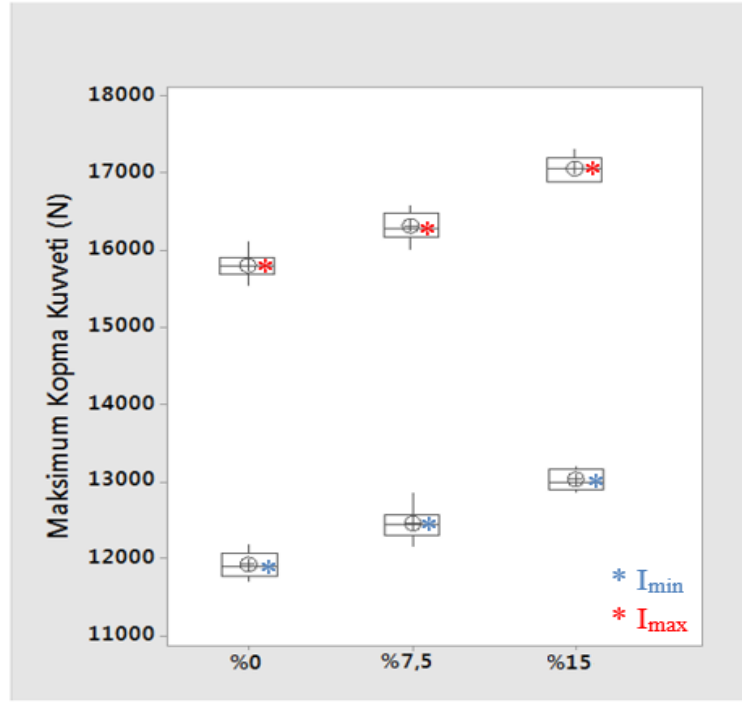
Şekil 5.32 : Maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli kaynak numunelerine ait bölgesel ortalama sertlik ölçümleri kıyaslaması.

Minimum ve maksimum akımda punta kaynaklanmış kaplamasız ve galvanizli DP600 malzemelerin kaynak bölgelerine ait mikrosertlik sonuçları değerlendirildiğinde en yüksek sertlik değerinin çekirdek bölgesinde meydana geldiği görülmüştür. Bu bölgede malzeme içyapısı tamamen martenzit olduğu için sertlik değerleri çok yüksektir. ITAB bölgesi açısından değerlendirildiğinde üst kritik ITAB bölgesinden alt kritik ITAB bölgesine geçiş kısmında sertlik değerlerinde ani düşmeler meydana gelmektedir. Bu düşüşün sebebi üst kritik ITAB bölgesinde bulunan martenzit fazından alt kritik ITAB bölgesinde bulunan temperlenmiş martenzit faz yapılarına geçişten kaynaklanmaktadır. Ön deformasyon miktarına bağlı olarak ana metal ve ITAB bölgelerinde sertlik değerlerinde artış görülürken kaynak bölgesinde ortalama sertlik değerleri birbirine yakındır.

5.3 Punta Kaynaklı Parçaların Mekanik Test Sonuçları

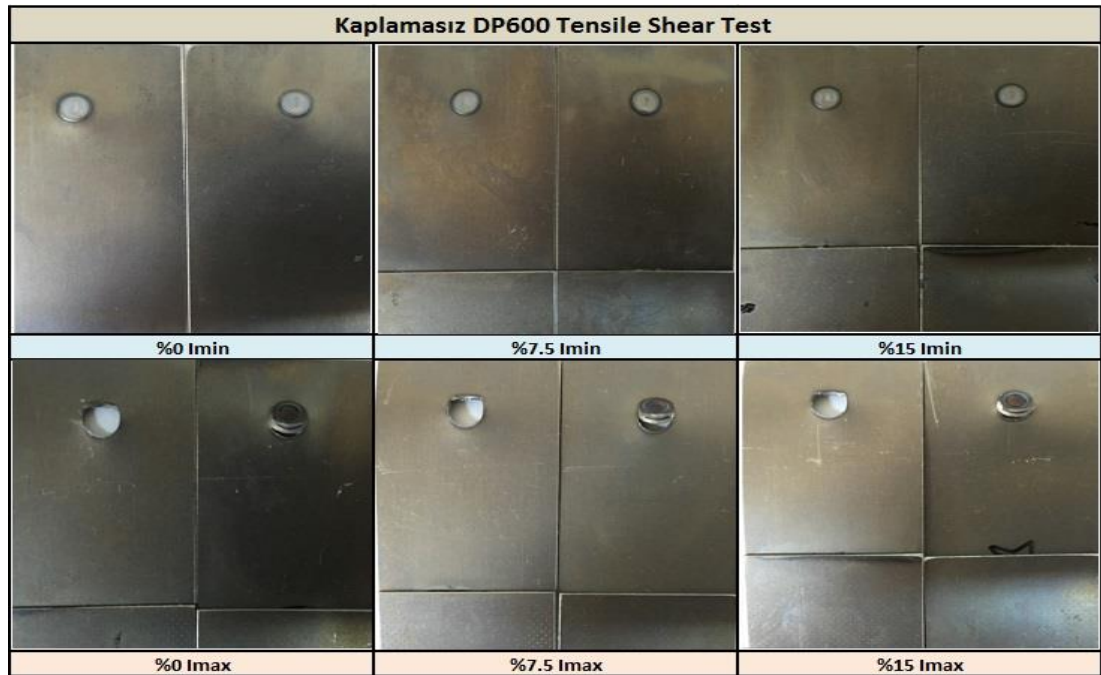
5.3.1 Kesme testi (TSS) sonuçları

Minimum ve maksimum akım değerlerinde farklı miktarlarda ön uzama verilmiş kaynak yapılan kaplamasız DP600 numunelerine ait kesme testi sonuçlarının maksimum kopma kuvvetleri Şekil 5.31’de gösterilmiştir. Elde edilen maksimum kopma kuvvetleri standart sapma değerleri ile birlikte tablo halinde verilmiştir (Bkz EK C).

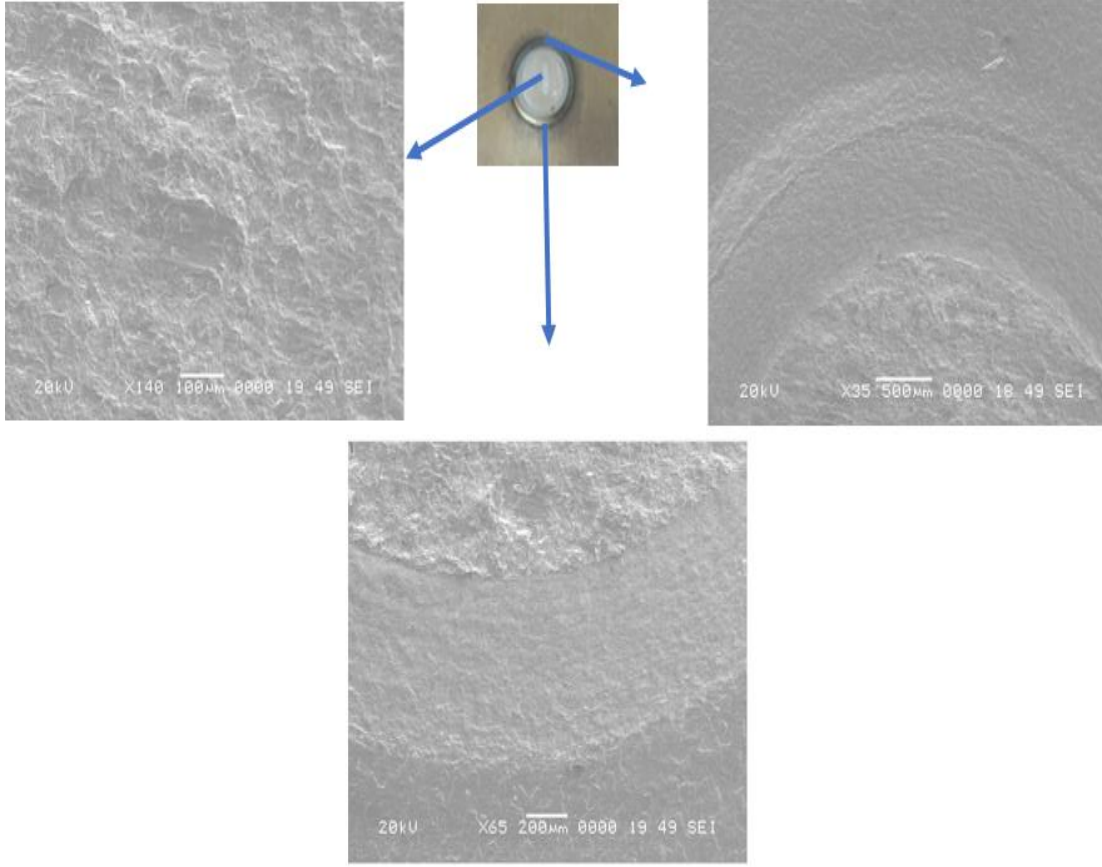


Şekil 5.33 : Kaplamasız DP600 numunelere ait kesme testi sonuçları.

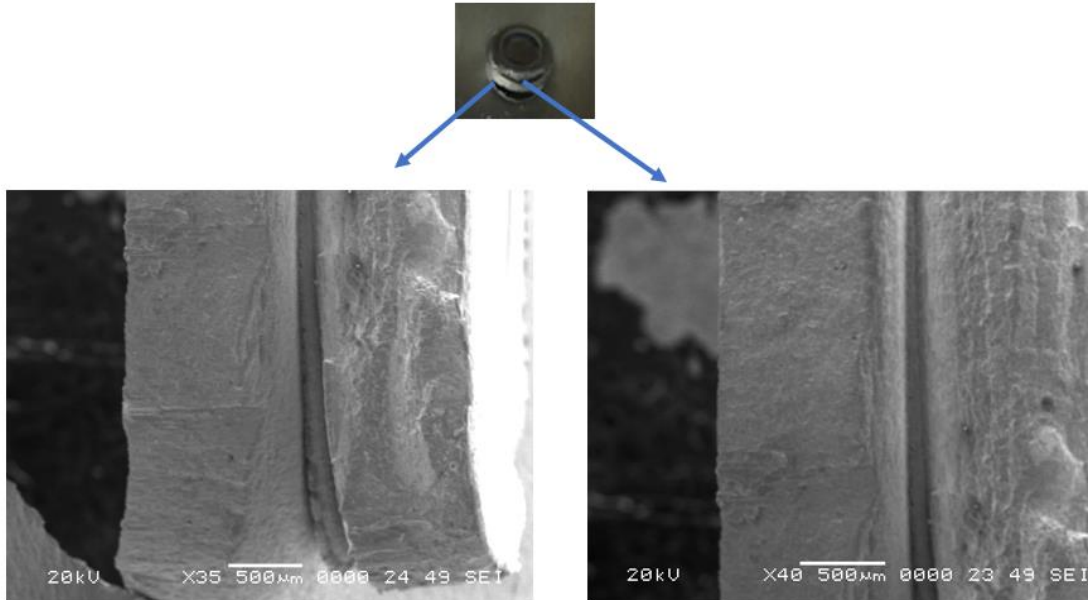
Minimum ve maksimum akım değerlerinde punta kaynaklanan DP600 çeliklerde artan ön deformasyon oranına bağlı olarak kopma kuvvetlerinde artış görülmüştür. Şekil 5.32’de kesme testi sonrası hasar görüntüleri, Şekil 5.33’de minimum akımda punta kaynaklanmış ve Şekil 5.34’de maksimum akımda punta kaynaklanmış kaplamasız numunelere ait hasarlı bölgelerin SEM incelemeleri gösterilmiştir.



Şekil 5.34 : Kesme testi sonrası kaplamasız numunelere ait hasar görüntüleri.



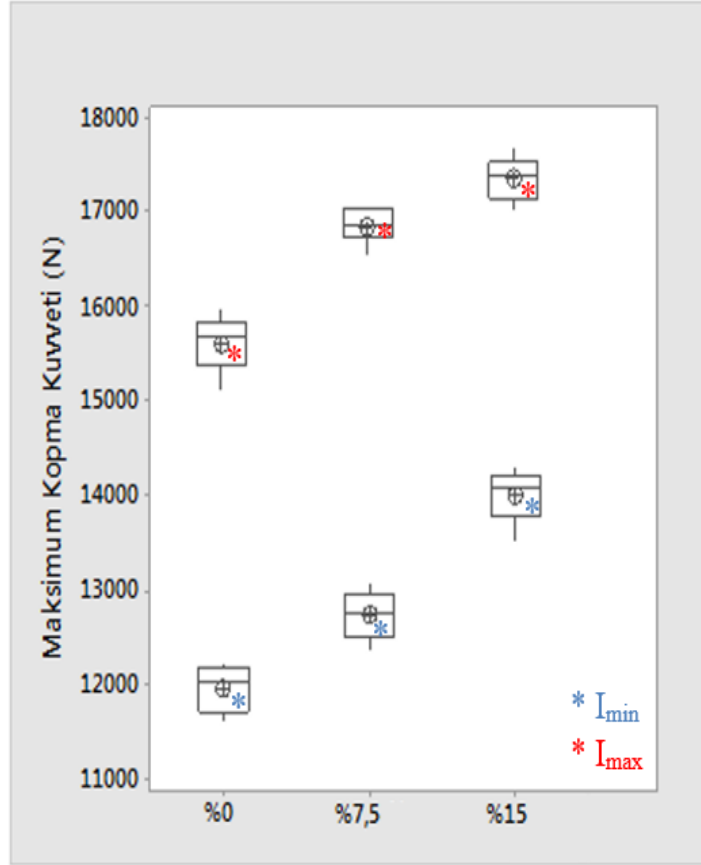
Şekil 5.35 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



Şekil 5.36 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.

Şekil 6.5'te gösterilen kesme sonrası kaynak bölgesi deformasyonu incelendiğinde, galvanizli numunelerde görülen deformasyon görüntülerine benzer şekilde minimum akım miktarında kaynatılan malzemenin kopma kaynak arayüzeyinde meydana gelmiştir.

Maksimum akımda kaynaklanan malzemede ise kesme testi sonrası kopma kaynak çekirdeği bir metalde kalacak şekilde kaynak çapından gerçekleşmiştir.

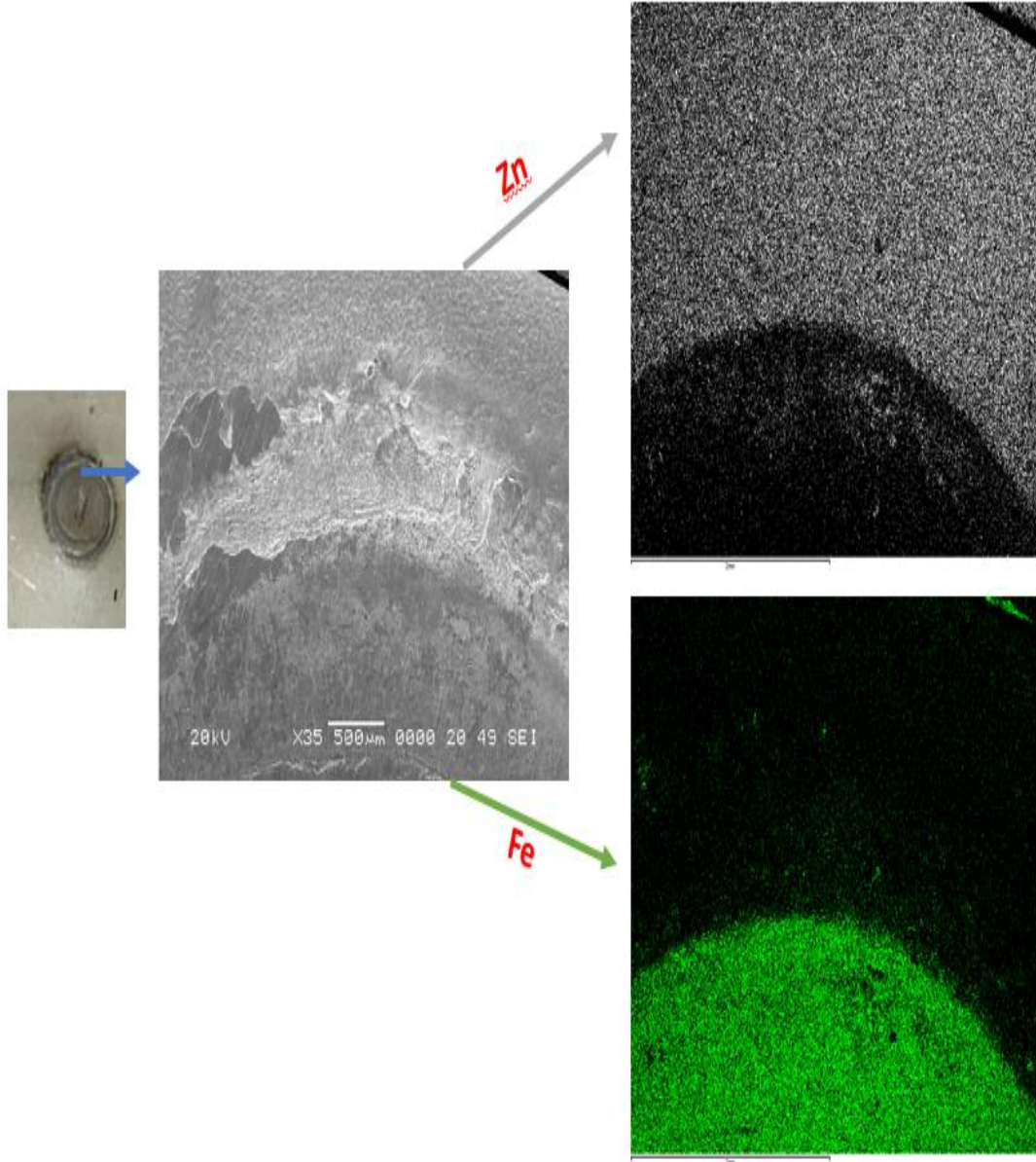


Şekil 5.37 : Galvanizli DP600 numunelere ait kesme testi sonuçları.

Kaplamasız DP600 numunelere ait kesme testlerinden sonra elde edilen hasar incelemelerinde minimum akımda kaynaklanan malzeme de arayüzeyden kopma meydana gelirken, maksimum akımda kaynaklanan malzemede ise kaynak çapından hasarlanma meydana gelmiştir.

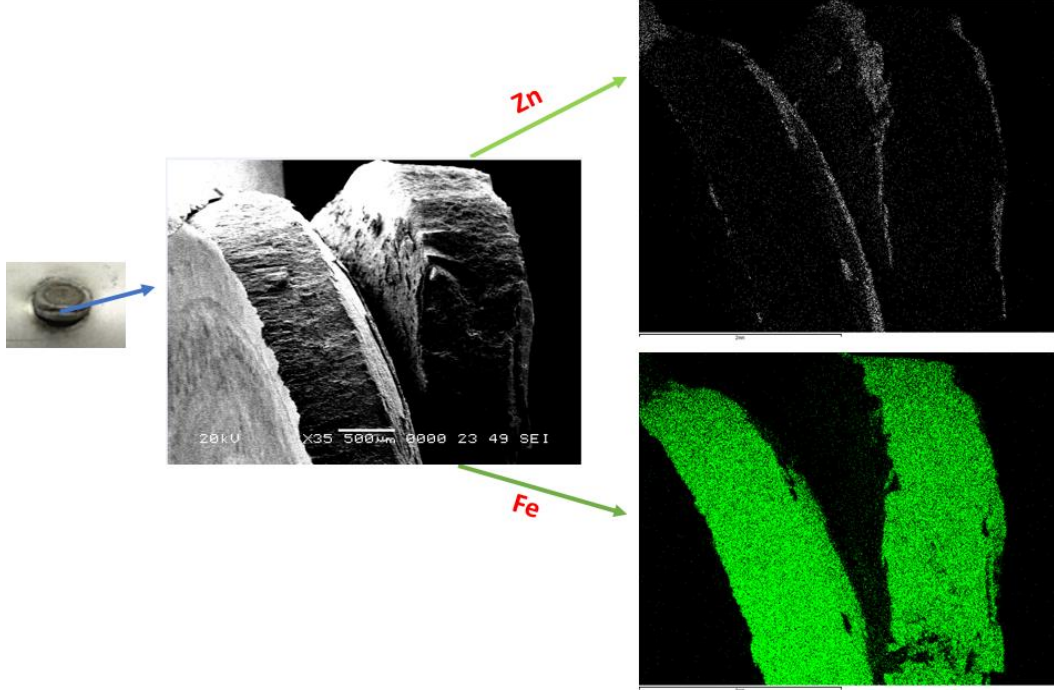
Minimum akım değerlerinde kaynak yapılan numunelerin kesme kuvvetleri maksimum akım değerlerinde kaynak yapılan numunelere göre düşüktür. Artan deformasyon oranına bağlı olarak kopma kuvvetlerinde meydana gelen artış görülmüştür.

Şekil 5.36’da minimum akımda, Şekil 5.37 ve Şekil 5.38’de maksimum akımda punta kaynaklanmış malzemenin kesme testi sonrası hasar bölgelerinde SEM incelemeleri ve Fe-Zn haritaları gösterilmiştir.

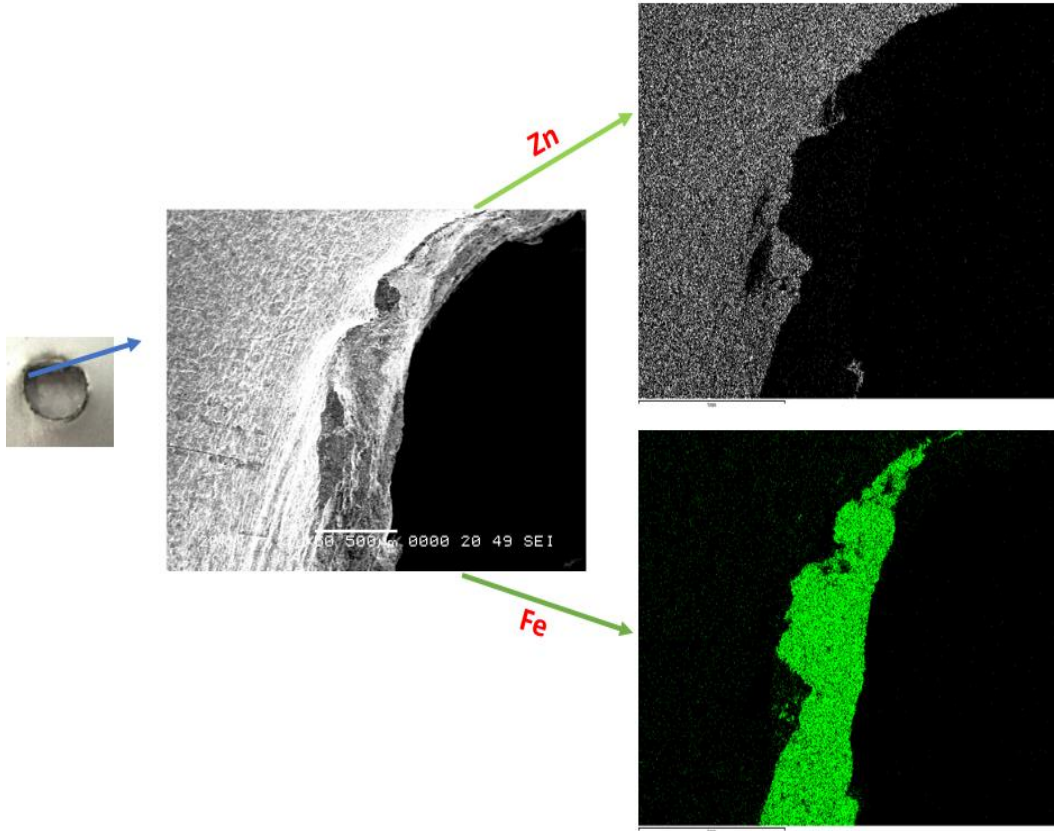


Şekil 5.38 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600’ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.

Minimum akım değerinde punta kaynaklanan galvanizli DP600 malzemeye ait hasar SEM incelemesinde iki metalin kesme testi sonrası kaynak arayüzeyinden ayrıldığı görülmüştür. Herhangi bir çapak oluşumu meydana gelmemiştir. Fe-Zn haritaları incelendiğinde kaynak bölgesinde çok az miktarda Zn bulunduğu ve ana metale doğru Zn miktarının arttığı görülmüştür.



Şekil 5.39 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.

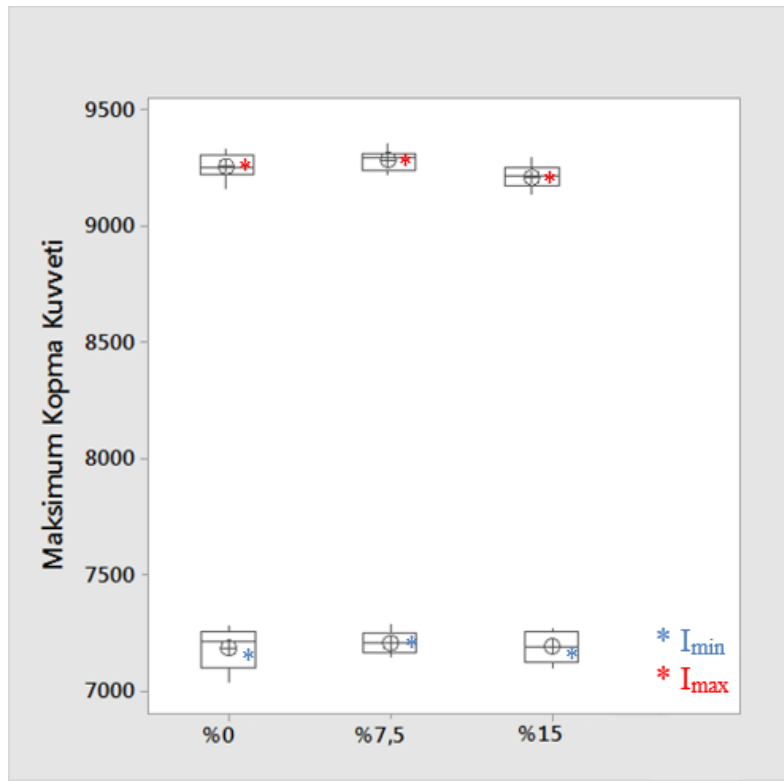


Şekil 5.40 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi kopan kısım hasar SEM incelemesi.

Minimum akım miktarında kaynatılan malzeme de kesme testi sonrası kopma kaynak arayüzeyinde meydana gelirken, maksimum akımda punta kaynaklanan malzemede ise deformasyon sonrası kopma kaynak çekirdeği altlık malzemesinde kalacak şekilde kaynak çapından kopma gerçekleşmiştir.

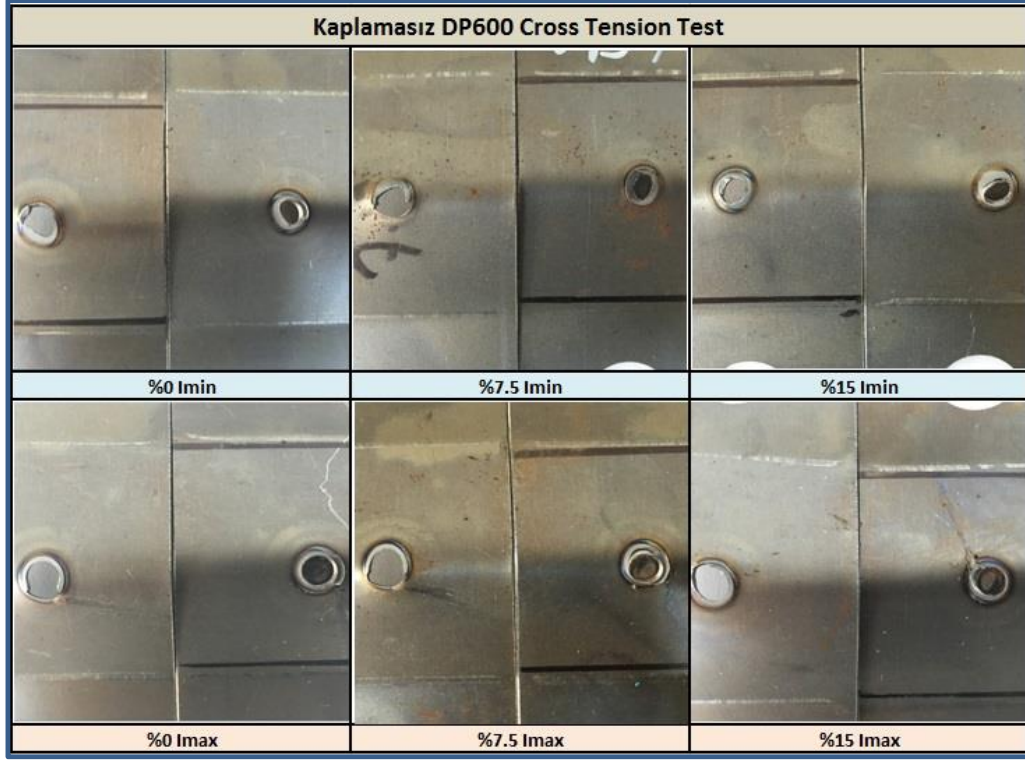
5.3.2 Ayırma testi (CTS) sonuçları

Minimum ve maksimum akım değerlerinde kaynak yapılan kaplamasız DP600 numunelerine ait ayırma testi sonuçları Şekil 5.39’da gösterilmiştir. Değişen ön deformasyon ve akım miktarına göre elde edilen tüm ayırma testi sonuçları standart sapma değerleriyle birlikte verilmiştir (Bkz EK C).

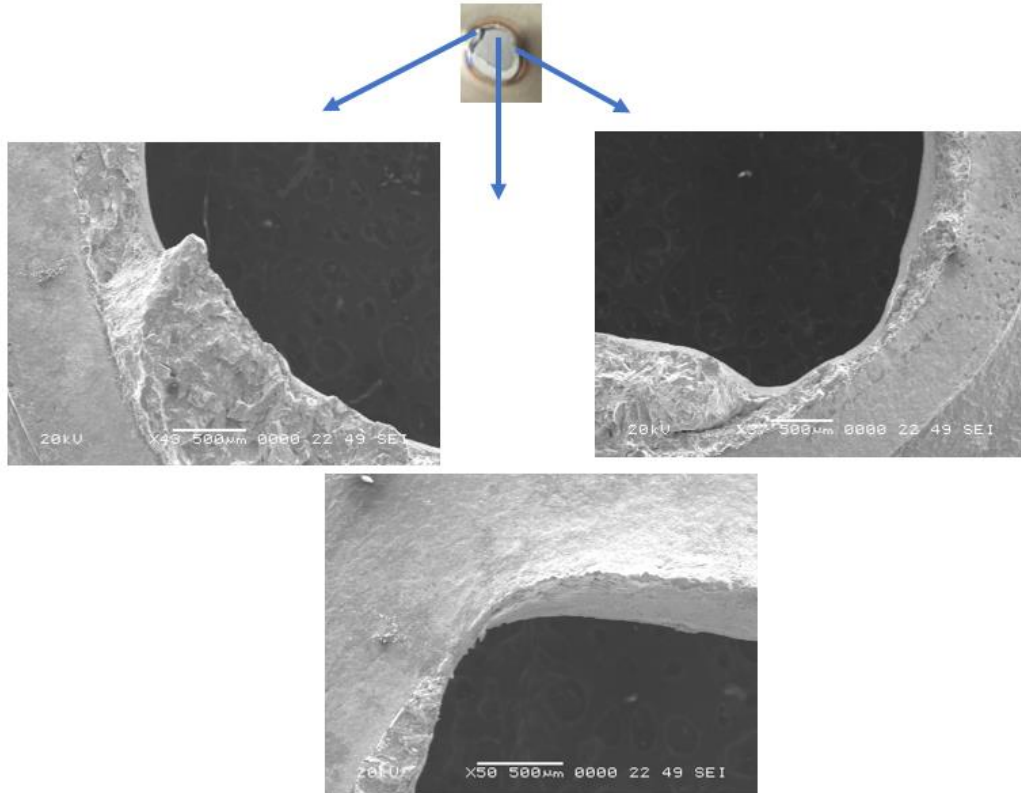


Şekil 5.41 : Kaplamasız DP600 numunelere ait ayırma testi sonuçları.

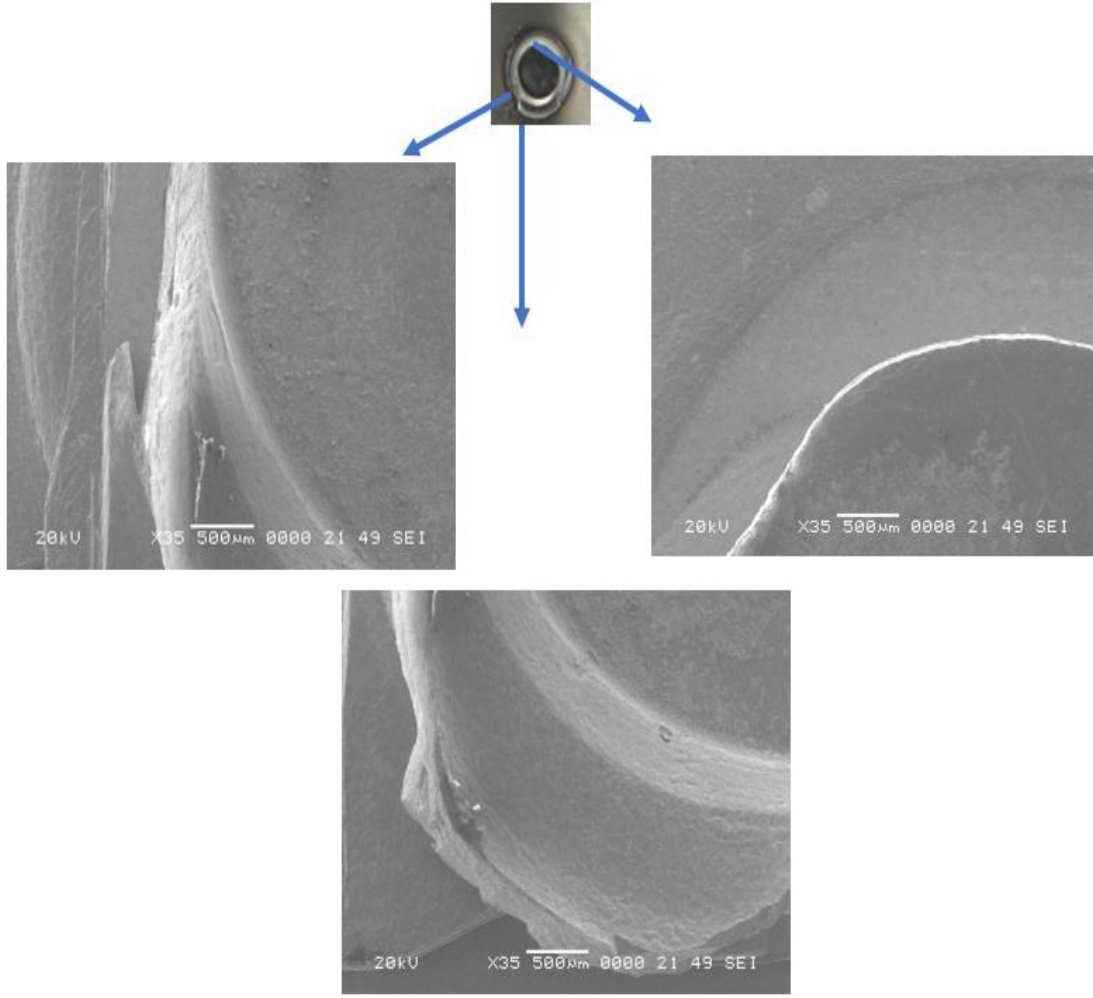
Maksimum akımda punta kaynaklanan malzemeler minimum akımda punta kaynaklananlara göre maksimum kopma kuvveti değerleri daha yüksektir. Hem minimum akımda hem de maksimum akımda ön deformasyonun ayırma testi sonuçlarını etkilemediği görülmüştür. Şekil 5.40’da kaplamasız DP600 numunelerine ait ayırma testi sonrası hasar görüntüleri, Şekil 5.41’de minimum ve Şekil 5.42’de maksimum akımda punta kaynaklanan kaplamasız DP600’e ait hasar SEM incelemeleri gösterilmiştir.



Şekil 5.42 : Ayırma testi sonrası kaplamasız numunelerin hasar görüntüleri.



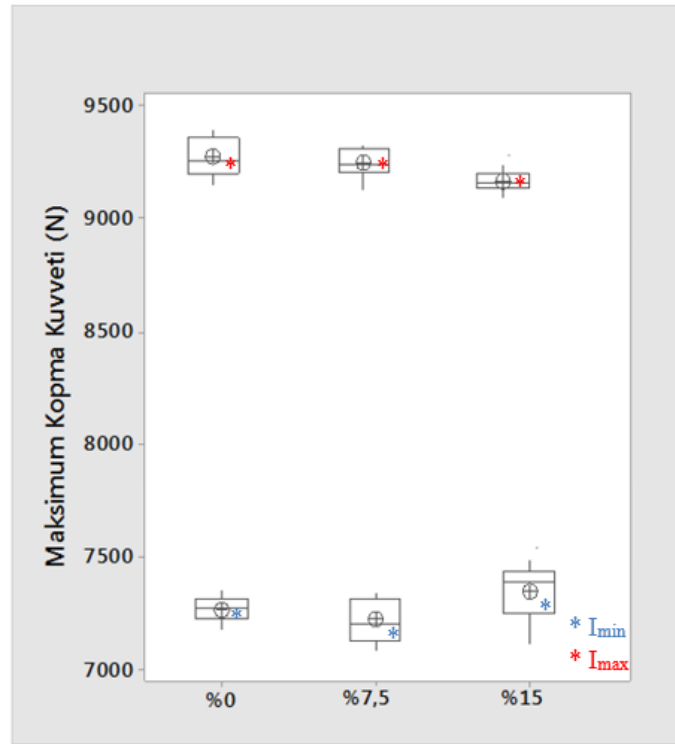
Şekil 5.43 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



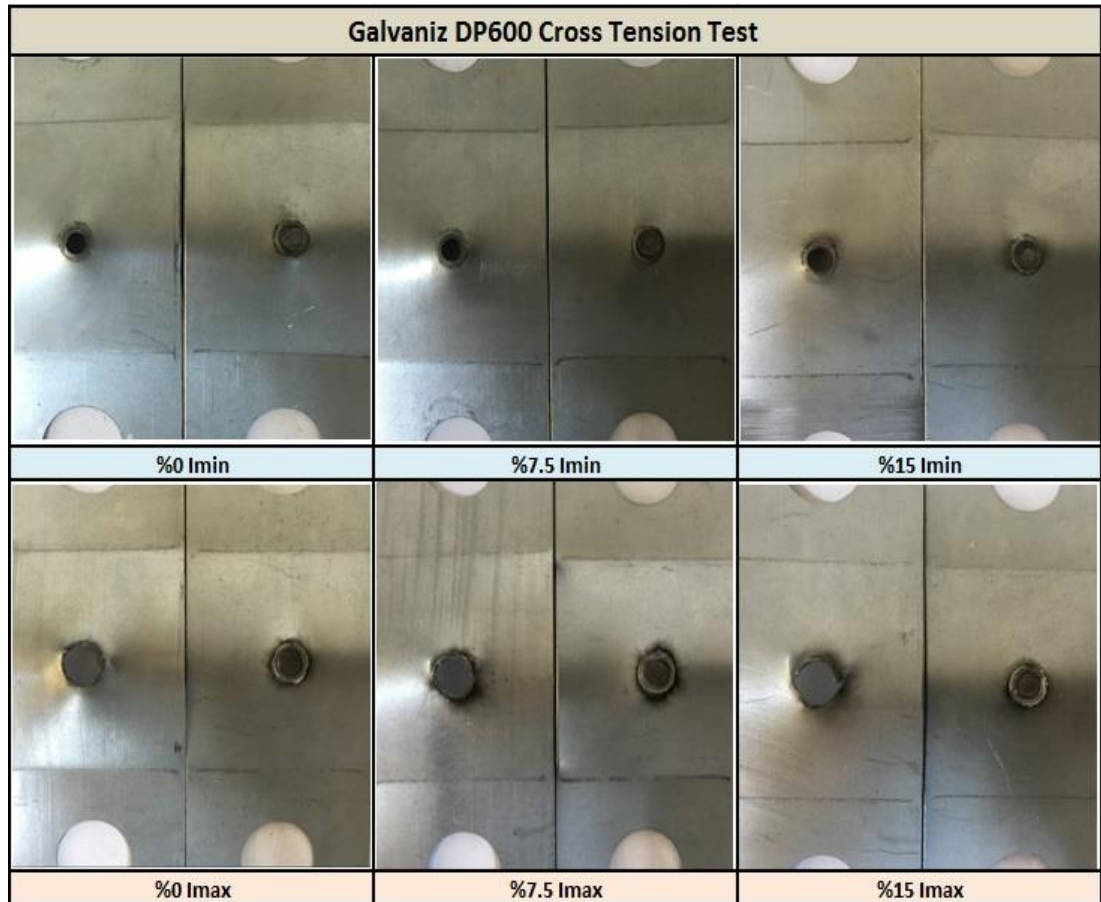
Şekil 5.44 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.

Kaplamasız malzemelerin ayırma testi sonrası deformasyon bölgelerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, minimum akım değerlerinde punta kaynaklanan numunelerde ayırma testi sonrası kaynak çekirdeğinden kısmi kopma şeklinde deformasyon gerçekleşmektedir. Maksimum akımda punta kaynaklanan malzemede daha geniş kaynak çapından deformasyon gerçekleşmektedir.

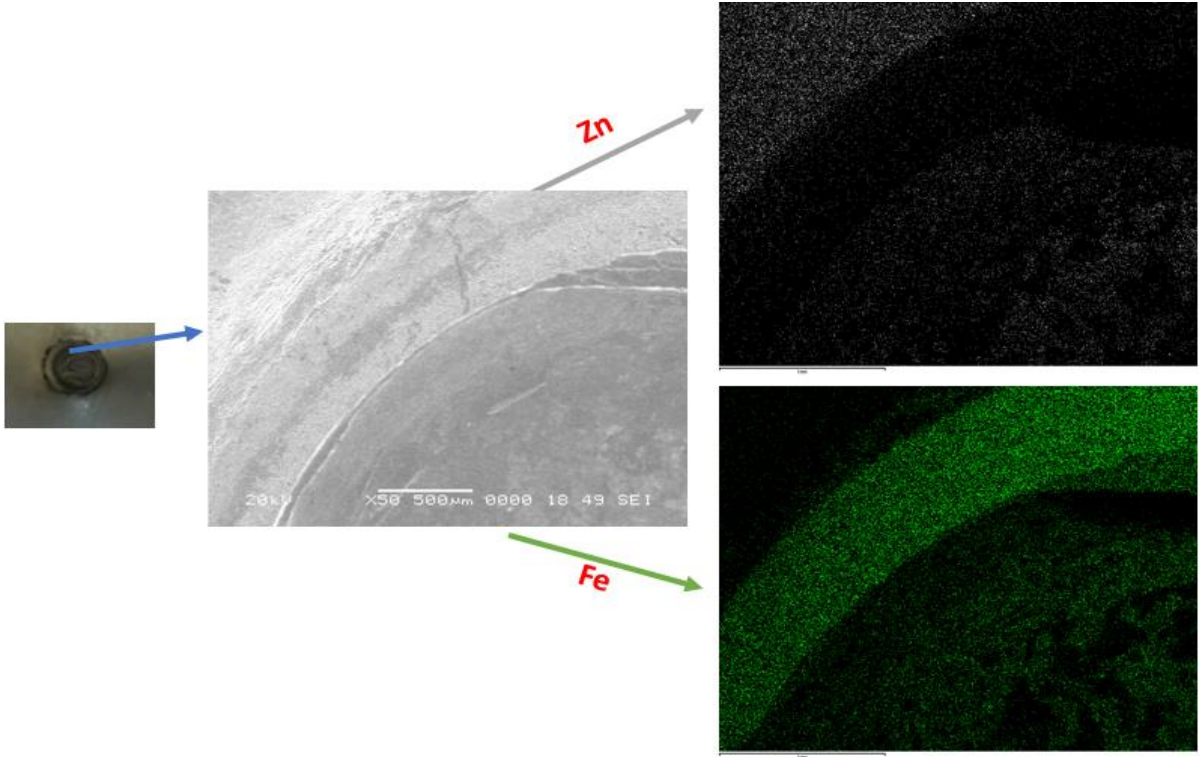
Şekil 5.43'te galvanizli DP600 kaynak numunelerinin ayırma testi sonuçları gösterilmiştir. Şekil 5.44'te kesme testi sonrası hasar görüntüleri, Şekil 5.45'te minimum ve Şekil 5.46'da maksimum akım değerlerinde punta kaynaklanan galvanizli malzemelerin ayırma testi sonrası deformasyon bölgelerinin SEM incelenmeleri gösterilmiştir.



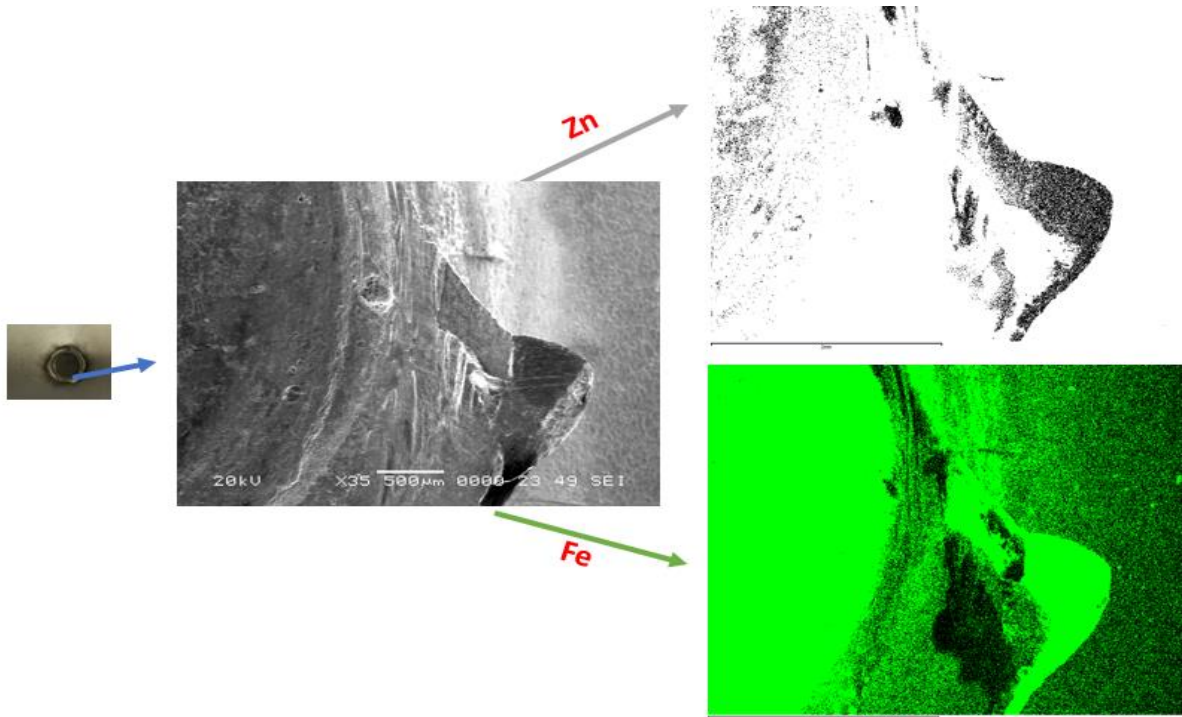
Şekil 5.45 : Galvanizli DP600 numunelere ait ayırma testi sonuçları.



Şekil 5.46 : Ayırma testi sonrası galvanizli numunelerin hasar görüntüleri.

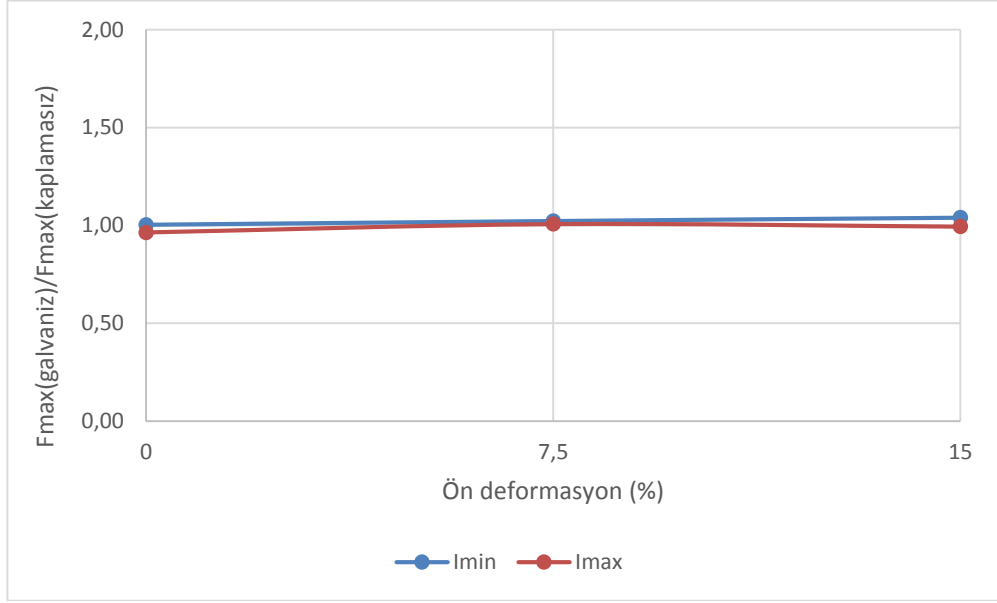


Şekil 5.47 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kesme testi kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.

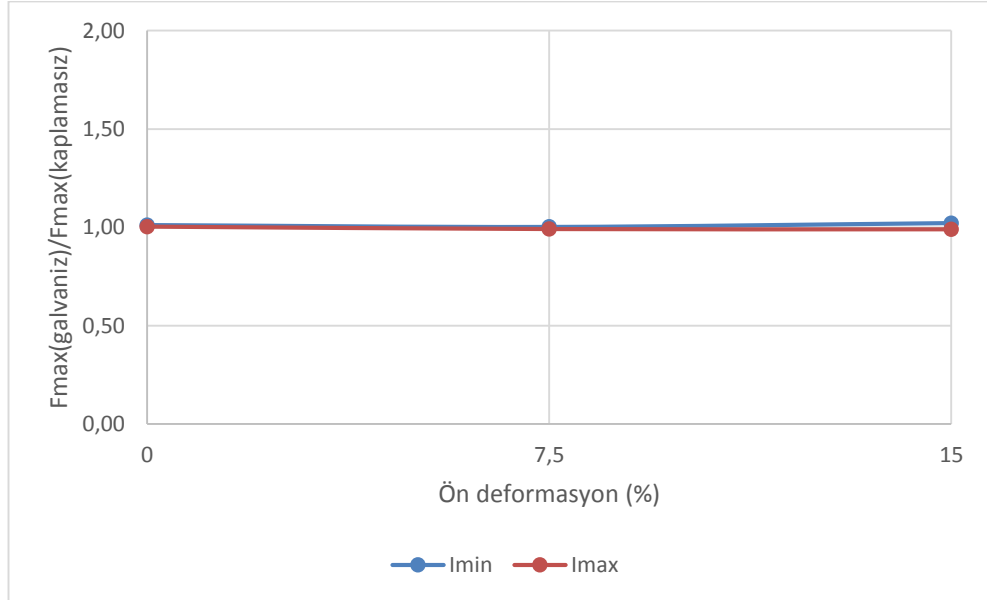


Şekil 5.48 : Ön deformasyon uygulanmamış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kesme testi kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.

Minimum ve maksimum akım miktarları ayırma testi sonrası kopma kuvvetleri kıyaslandığında, maksimum akım miktarında kaynatılan galvaniz kaplı malzemelerin minimum akımda kaynatılanlara göre daha yüksek kopma kuvveti değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Galvanizli ve kaplamasız numunelerin kesme testi sonuçlarına ait ortalama değerlerin oranlamasına ait grafik Şekil 5.47’de, ayırma testi sonuçlarına ait ortalama değerlerin oranlanması sonuçları Şekil 5.48’de gösterilmiştir.



Şekil 5.49 : Galvanizli ve kaplamasız numunelerin kesme testi sonuçlarının oranlanarak kaplama etkisinin incelenmesi.



Şekil 5.50 : Galvanizli ve kaplamasız numunelerin ayırma testi sonuçlarının oranlanarak kaplama etkisinin incelenmesi.

Kaynak mekanik dayanımına Zn'nin etkisini görmek için yapılan hesaplama işlemlerinde her bir durum için yaklaşık 1 değeri elde edilmektedir. Bu durum galvanizli DP600 malzemenin kaplamasız DP600'e göre mekanik dayanım değerleri üzerinde Zn'nin baskın bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Yapılan tez çalışmasında, galvanizli ve kaplamasız DP600 çeliklerinin punta kaynak akım değerinin, altlık malzemeye uygulanan ön deformasyonun ve kaynak bölgesi içyapısının kaynak dayanım değerleri üzerine etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Bu kapsamda yürütülen deneysel çalışmalarda, ön deformasyon uygulanmamış, %7,5 ve %15 ön deformasyon uygulanmış durumlarda minimum ve maksimum akım değerlerinde punta kaynaklanarak yapısal karakterizasyon incelemeleri ve mekanik testler yapılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda;

- Galvanizli ve kaplamasız DP600 çeliklerinde ön deformasyonun etkisi ile birlikte altlık malzemelerinin mukavemet değerlerinde artış, süneklik değerlerinde azalma görülmüştür.
- Minimum ve maksimum akım değerlerinde punta kaynaklanan malzemelerin içyapıları değerlendirildiğinde, kaynak çekirdek bölgesi ve üst kritik ITAB bölgesinde martenzitik faz yapısı mevcut. Alt kritik ITAB bölgesinde kaynak ısı dağılımına bağlı olarak faz dönüşümü meydana gelmemektedir ve temperlenmiş martenzit fazı tespit edilmiştir.
- Punta kaynaklı malzemelerin sertlik taramaları değerlendirildiğinde, kaynak çekirdek bölgesi martenzit fazı oluşumuna bağlı olarak en sert bölgedir. Çekirdekten alt kritik ITAB bölgesine geçişte sertlikte düşüş meydana gelmektedir. Maksimum akım değerlerinde punta kaynaklanan kaplamasız ve galvanizli malzemelerin ana metal ve ITAB mikrosertlik değerleri minimum akımda kaynaklananlara göre yüksektir. Aynı akım miktarında punta kaynaklanan malzemeler için artan ön deformasyon miktarı ana metal ve ITAB bölgelerinin sertlik değerlerini artırmaktadır.
- Kaynak dayanım değerleri değerlendirildiğinde artan ön deformasyon miktarına bağlı olarak galvanizli ve kaplamasız numunelerin minimum ve maksimum akım değerlerinde punta kaynaklandığı durumlarda kesme kuvveti değerlerinde artış

görülmüştür. Ayırma testi sonuçlarının ön deformasyon miktarından bağımsız olduğu tespit edilmiştir.

- Maksimum akımda kaynaklanan malzemelerin kesme ve ayırma dayanım değerleri minimum akımda kaynaklanan malzemelere göre daha yüksektir.
- Kesme testi sonuçları ve ayırma testi sonuçları değerlendirildiğinde galvanizli yüzeyde bulunan Zn'nin mekanik dayanım değerleri açısından baskın bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] World Auto Steel, Advanced High Strength Steels Application Guidelines, Version 5.0, May 2014
- [2] **Granbom, Y., 2010.** Structure and mechanical properties of dual phase steels, Doctoral thesis, 24-25
- [3] **Meza, S., Moya, L., Guerra-Mata, M., Colas, R., Mani, A., 2007.** Influence of Sb on the resistance spot welding of galvanized steels, Galvatech '07 Proceedings, Osaka, Japan, 272.
- [4] **Tumuluru, M., 2006.** Resistance spot welding of coated high strength dual-phase steels, Welding Journal, 31-37
- [5] ULSAB-AVC, Body Structure Materials, Technical Transfer Dispatch no.6, May, 2001
- [6] **Anderson, D., 2008.** Application and repairability of advanced high strength steels, America Iron and Steel Institute
- [7] **Speich, G.R., 2005.** Dual-Phase Steels, ASM Handbook, Vol.1, USA, 697
- [8] **Waterschoot, T., Verbeken, K., De Cooman, B.C., 2006.** Tempering kinetics of the martensitic phase in DP steels, ISIJ International, Vol 46, NO.1, 138-146
- [9] **URL-1** < <http://www.ssab.com/Global/DOMEXDOCOL/Brochures/> > Erişim 20.06.2016
- [10] **Ulu, S., 2009.** Çift fazlı çelikler, Teknik Not. Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, Cilt:6, No:3, 100-113
- [11] **Zhu, X., Wang, L., 2003.** Effect of continuous annealing parameters on the mechanical properties of cold rolled Si-Mn DP steel, Special Steel, 684-688.
- [12] **Prodromos, P., 2006.** Mechanical properties of dual-phase steel, Doctorate Thesis, Technischen Universität Müncheneingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen
- [13] **Sarwar, M., Ahmad, E., Qureshi, K.A., Mazoor, T., 2007.** Influence of epitaxial ferrite on tensile properties of dual phase steel, Materials and Design, 335-340
- [14] **Coldren, A.P., Tither, G., 1997.** Development of a Mn-Si-Cr-Mo as-rolled dual-phase steel, journal of metals, vol. 40, 6-9
- [15] **Tataru, A., Potemkin, V., Lukin, A., Dolgov, A., Korpalla, G., 2015.** Experimental studies of the formation of dual phase structure with cooling on the run-out table at NLMK 2000 continuous hot rolling mill

- [16] **Avtar, R., Jha B.K., Dwivedi, V.S., Patnaik, B.B., Banerjee, B., Srinivasan, S., 1986.** An as hot rolled approach to production of molybdenum and chromium microalloyed dual phase steels, Transactions, ISIJ, Vol.26, 822-828
- [17] **Chang, C., 2010.** Correlation between the microstructure of dual phase steel and industrial tube bending performance, Electronic Theses and Dissertations, 178
- [18] **Elkoca, O., 2006.** Çelik yüzeylerin kaplanması ,Erdemir Bilim ve Teknoloji Serisi, 163
- [19] **Yu, E., Wang, M., 1992.** Formability evaluation of batch annealing DP steel, Angang Technology, 201(3), 37-42
- [20] **Mohrbacher, H., 2014.** Martensitic automotive steel sheet – Fundamentals and Metallurgical Optimization Strategies, Belgium
- [21] **URL-2** <<http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types>> Erişim 04.09.2016
- [22] **Bhattacharya, D., 2006.** Developments in advance high strength steels, Research and Develeopment Center, Mittal Steel, USA
- [23] **Mark, A., Wang, X., Essadiqi, E., Embury, J., Boyd, J., 2013.** Development and characterization of model TRIP steel microstructure
- [24] **TRIP (Transformation induced plasticity) Steel, ArcelorMittal, 2016**
- [25] **Tamarelli, M., 2011.** The evolving use of advanced high-strength steels for automotive applicaations, 28
- [26] **Karbasian, H., Tekkaya, A., 2010.** A review on hot stamping, Journal of Materials Processing Technology, 2103–2118
- [27] **Hayashi, H., 1995.** Development of high strength steel sheets and practical application to auto body parts, Journal of Materials and Manufacturing, Society of Automotive Engineers, 104 (5), 560-569
- [28] **Durand, B., 2001.** Magnetic pulse welding process to decrease vehicle weight and increase fuel efficiency, Research and Data for Status Report, 95-02-0055, 271-274
- [29] **Buchanan, G., 2003.** Resistance Welding Manual”, RWMA, Fourth Edition, Bridgeport, NJ. U.S.
- [30] **URL-3** <<http://www.vista-industrial.com/spot-welding.php>> Erişim 04.09.2016
- [31] **Devarasiddappa, D., 2014.** Automotive applications of welding technology- A study, International journal of modern engineering Research (IJMER), Sept, ISSN: 2249–6645, Vol 4
- [32] **Groover, M., 2010.** Fundamentals of modern manufacturing, 4.Edition, 103
- [34] **ANIK, S., 1991.** Kaynak Tekniği El Kitabı, Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü, 85
- [35] **Kiyokazu, M., Yukinobu, I., Naoya, N., Namigata, M., Sakamoto, H., 1994.** Development of a laser welding process for blanking sheet metal, Nissan Technical Report, no. 35, 121–126

- [36] **Jack, A., Frank, J., Manley, R., Nelson, D., 1993.** Fusion welding P/M components for automotive applications, Proc. SAE International Congress, Detroit
- [37] **Dawes, C., Thomas, D., 1996.** Friction stir process welds aluminum alloys, Welding Journal, 41-45.
- [38] **Buchanan, G., 2003.** Resistance Welding Manual”, RWMA, Fourth Edition, Bridgeport, NJ. U.S.
- [39] **Kanlı, M., 2013.** Punta kaynağı, Tofas Akademi, V.1.0.3
- [40] **Zhang, H., Senkara, J., 2006.** Resistance welding: fundamentals and application, 1st Edition, Taylor & Francis Group, 105
- [41] **Cerjanec, W., Grzadzinski, G., 2005.** A comparative study of single-phase AC and multiphase DC resistance spot welding, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 127, 583-589
- [42] **Babu, S., Santella, M., Feng, Z., Riemer, B., Cohron, J., 2001.** Empirical model of effects of pressure and temperature on electrical contact resistance of metal, Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 6, No. 3, 126-132
- [43] **Svensson, L., 2004.** Prediction of hardness of spot welds in steel, Welding in the World, Vol. 48, no. 11-12, 31-35
- [44] **URL-5** <<http://www.swantec.com/technology/resistance-welding/>> Erişim 04.05.2016
- [45] **Anderson O., 2013.** Process planning of resistance spot welding, KTH Industrial Engineering and Management, 8
- [46] SEP 1220, Testing and Documentation Guideline for the Joinability of thin sheet of steel- Part 2: Resistance Spot Welding, 5, 2011
- [47] **URL6**<http://www.mdpi.com/metals/metals0501704/article_deploy/html/images/metals> Erişim 04.09.2016
- [48] **Gould, J.E., Khurana, S.P., Li, T., 2004.** Calculations of cooling rates for a range of automotive welding processes, and their relationship to the hardenability of advanced high strength steels, AWS Sheet Metal Welding Conference XI, Livonia MI, paper 7.1.
- [49] **Ghosh, P., Gupta, P., Ramavtar, K., Jha, B., 1991.** Weldability of intercritical annealed dual-phase steel with the resistance spot welding process, Welding Research Supplement
- [50] **Hernandez, V., 2010.** Effects of martensite tempering on haz-softening and tensile properties of resistance spot welded dual-phase steels, Doctorol Theses, 15
- [51] **Armaki, H., Bhat, S., Kelley, S., Sadagopan, S., 2016.** Quasi-static spot weld strength of advanced high strength sheet steels
- [52] **ANSI/AWS/SAE/D8.9–97,** Recommended practices for test methods for evaluating the resistance spot welding behaviour of automotive steel, 18, 1997

- [53] **Marashi, P., Pounvari, M., Amirabdollahian, S., Abedi, A., Goodarzi, M., 2007.** Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steels, *Materials Science and Engineering*, 175-180
- [54] **Khan, M., Kuntz, M., Zhou, Y., 2008.** Effects of weld microstructure on static and impact performance of resistance spot welded joints in advanced high strength steels”, *Sci.Technol. Weld. Joining*, vol. 13, no. 1, 49-59

EKLER

EK A: Kaynak Bölgesinin Mikroyapı Fotoğrafları

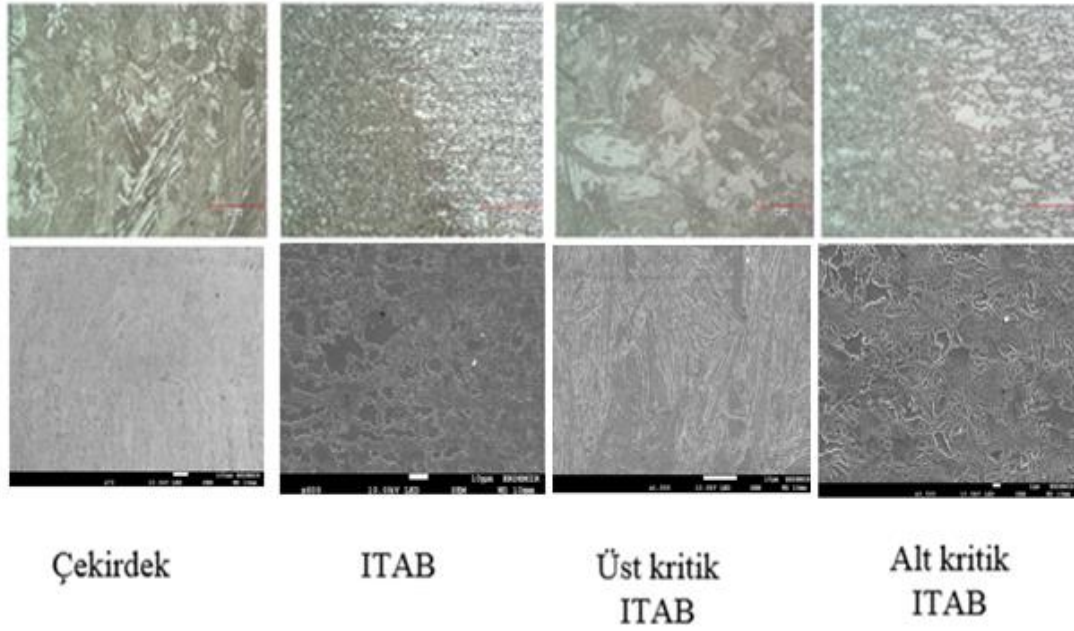
EK B: Kaynak Bölgesi SEM İncelemeleri ve EDS Analizleri

EK C: Kaynak Bölgesinin Sertlik Ölçümleri

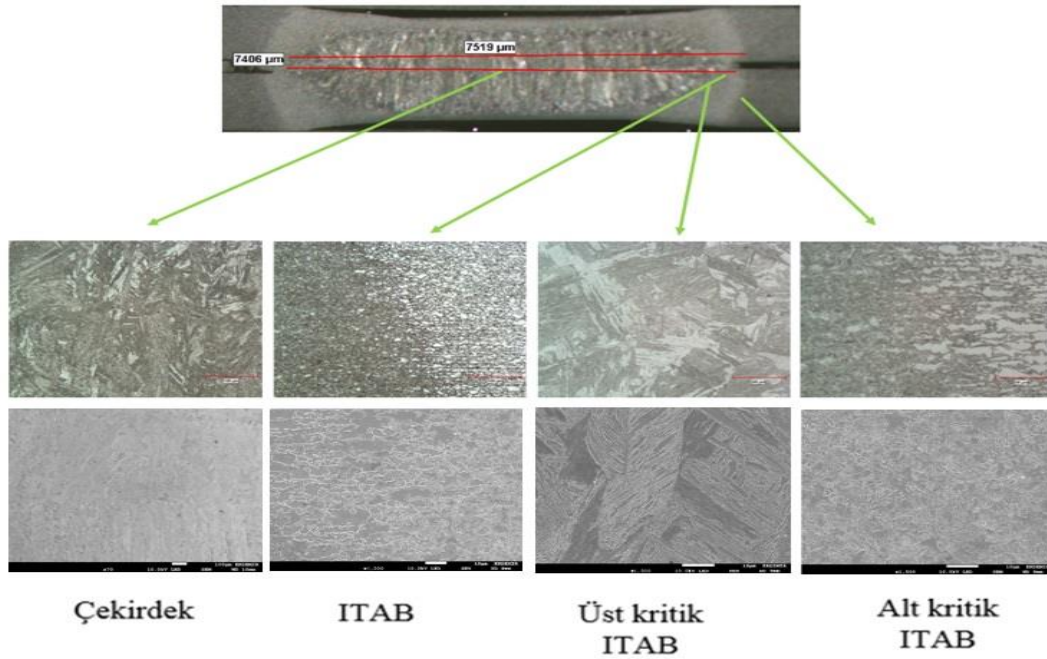
EK D: Mekanik Test Sonuçları

EK E: Hasar Bölgesi SEM İncelemeleri

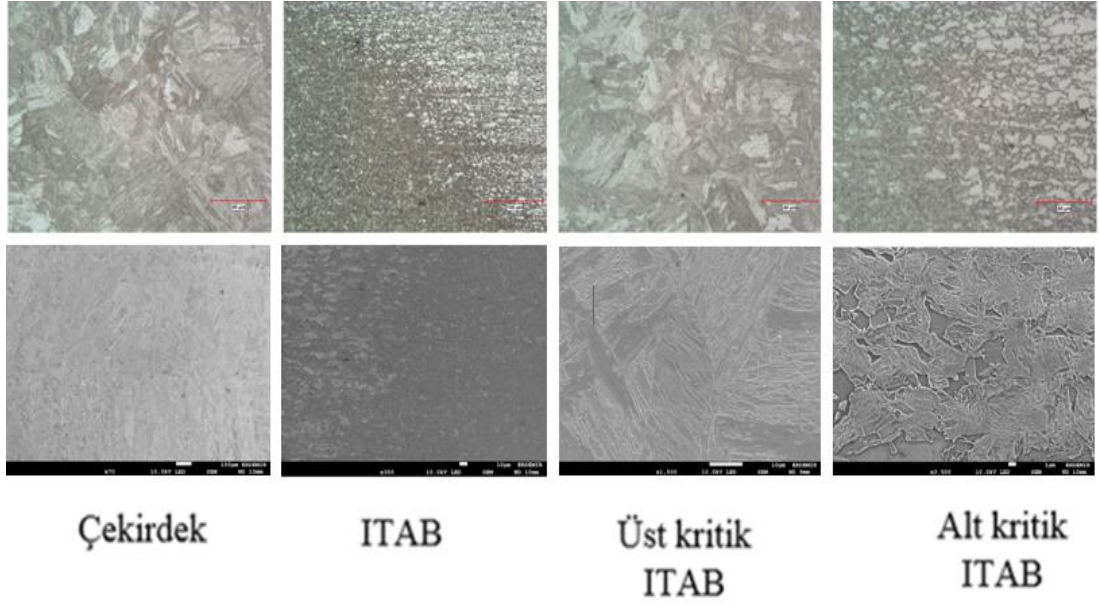
EK A: Kaynak Bölgesinin Mikroyapı Fotoğrafları



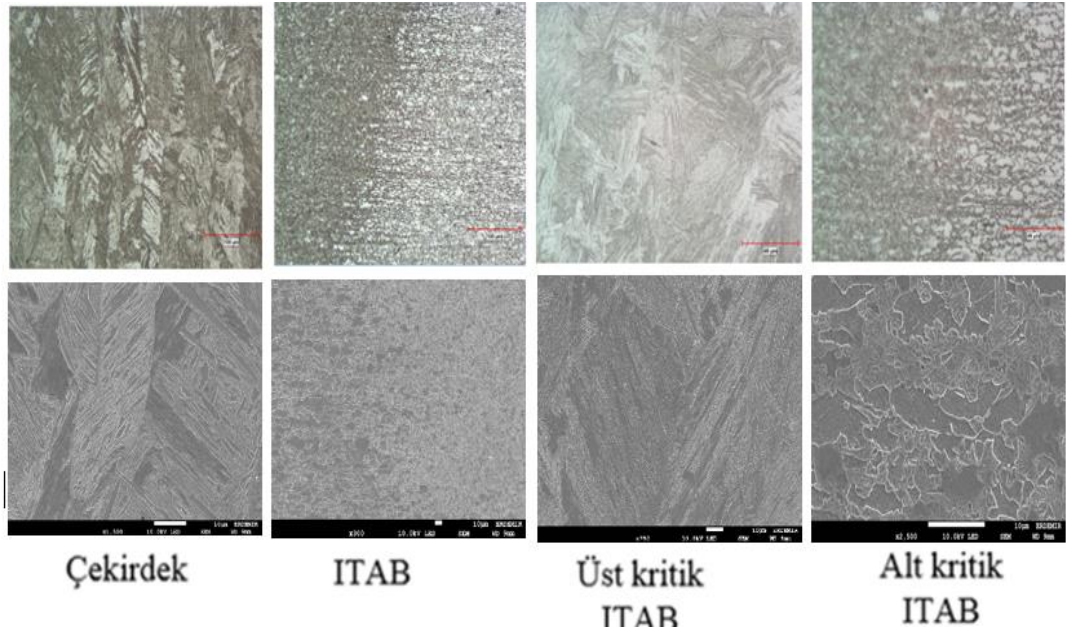
Şekil A.1 : %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imin) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.



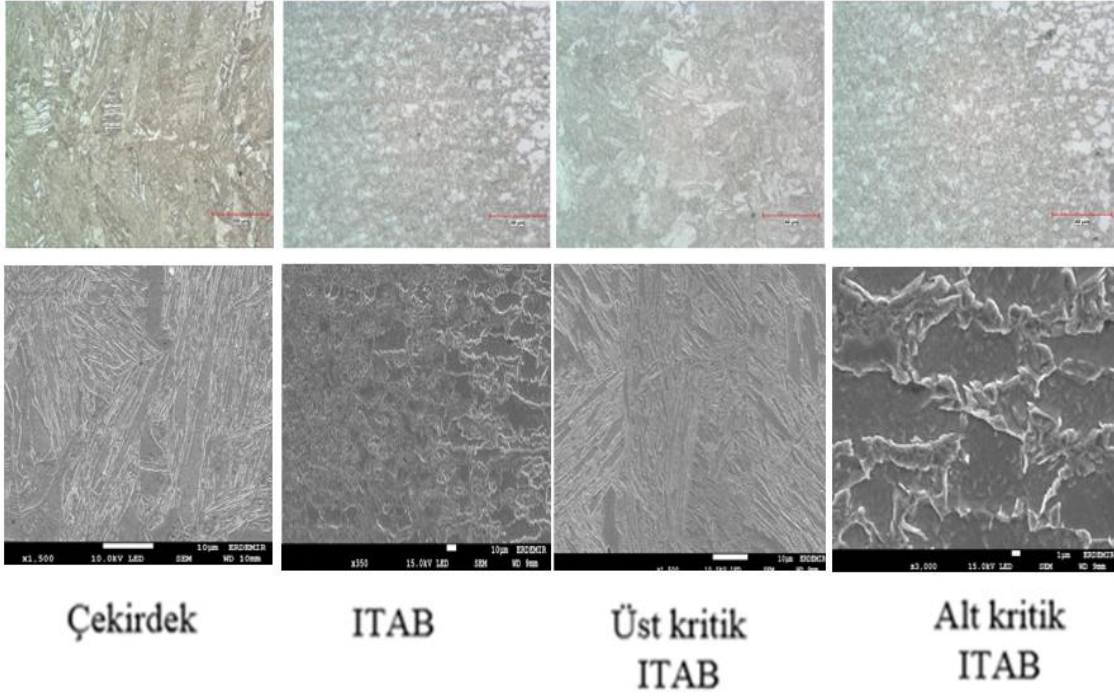
Şekil A.2 : %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imax) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.



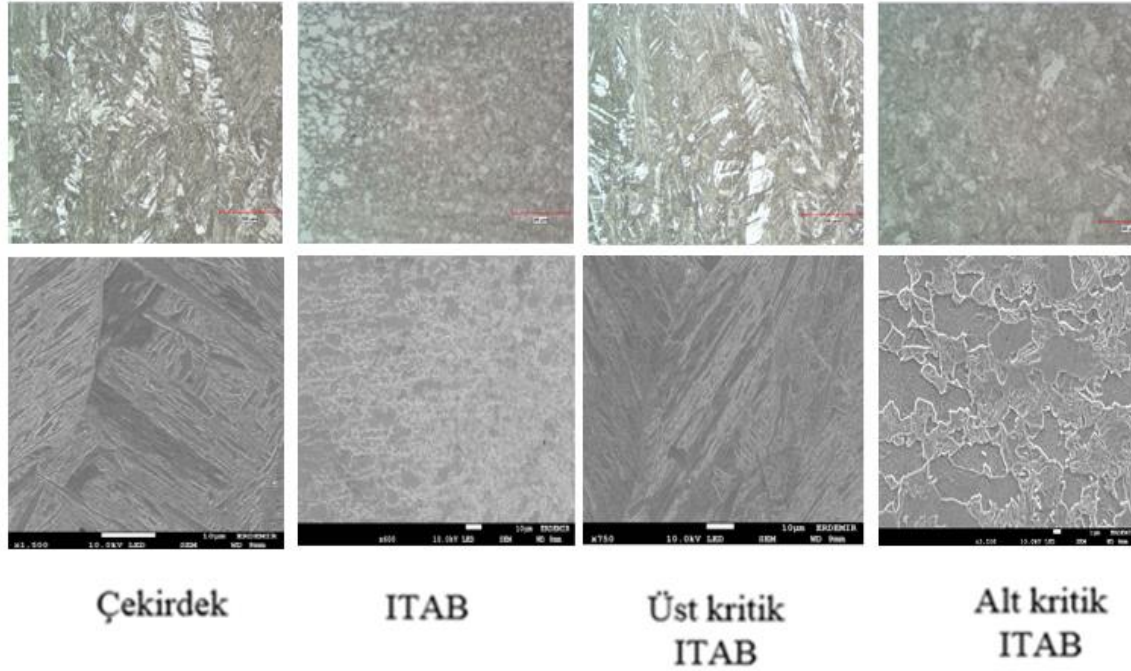
Şekil A.3 : %15 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imin) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.



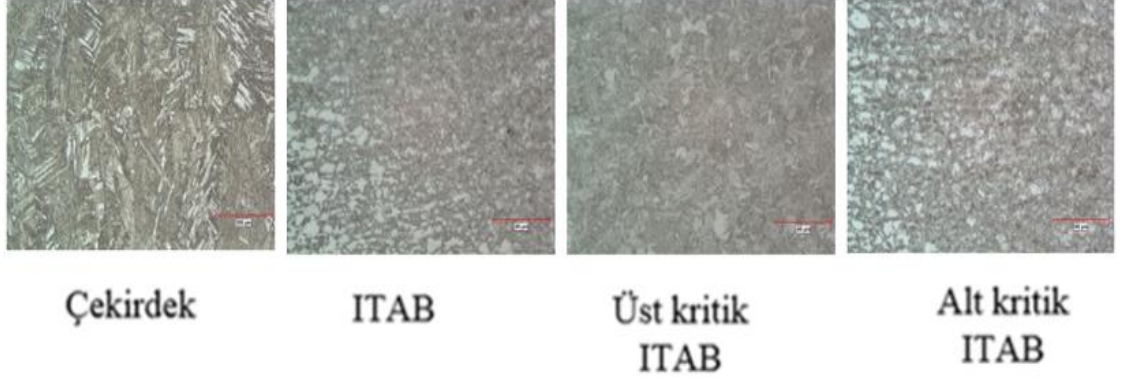
Şekil A.4 : %15 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imax) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.



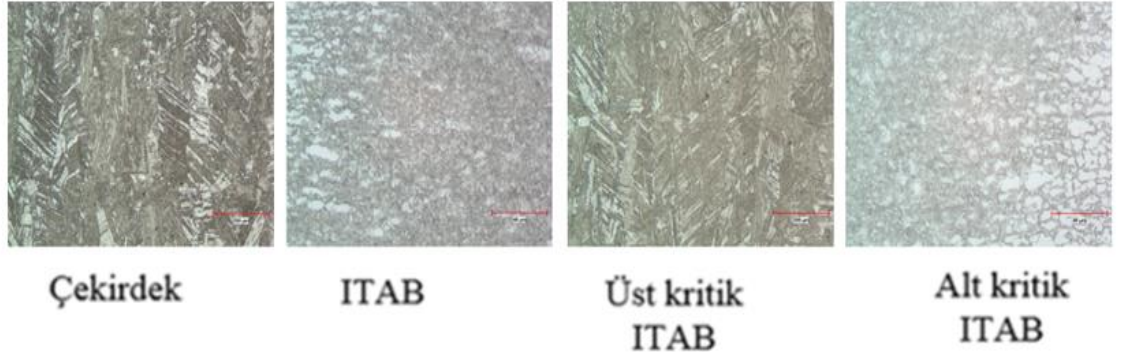
Şekil A.5 : %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.



Şekil A.6 : %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.

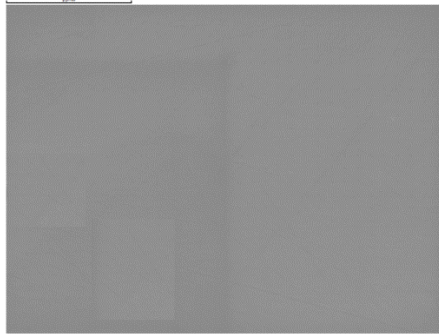


Şekil A.7 : %15 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.

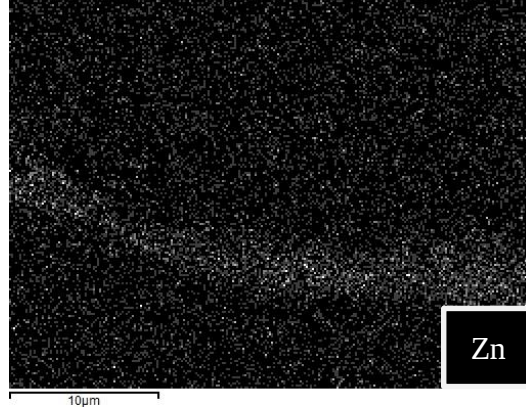
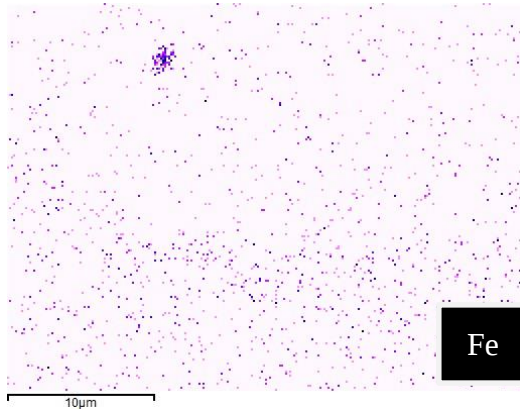
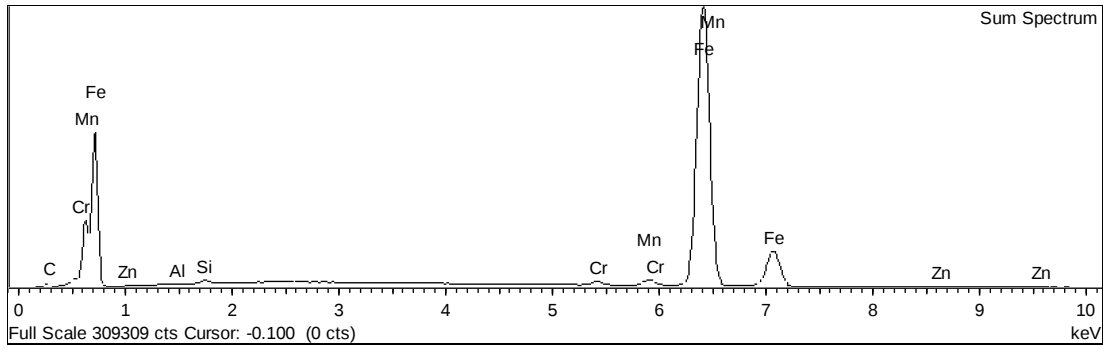


Şekil A.8 : %15 ön deformasyon uygulanmış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait mikroyapı fotoğrafları.

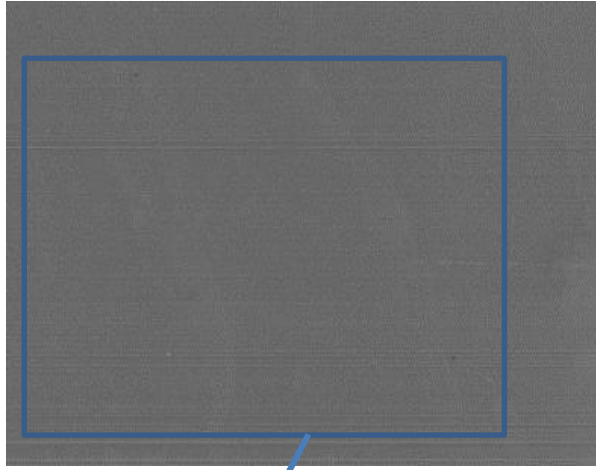
EK B : Kaynak Bölgesi SEM İncelemeleri ve EDS Analizleri



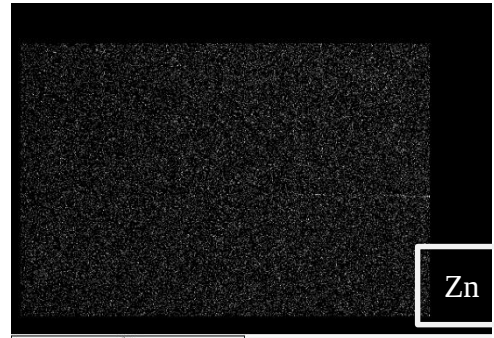
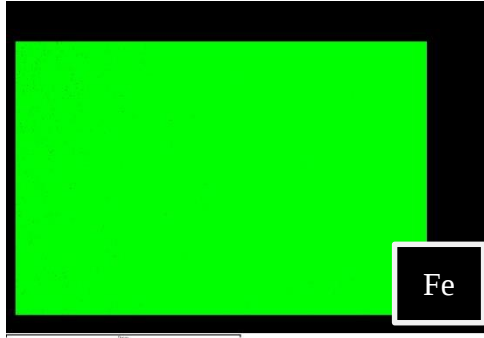
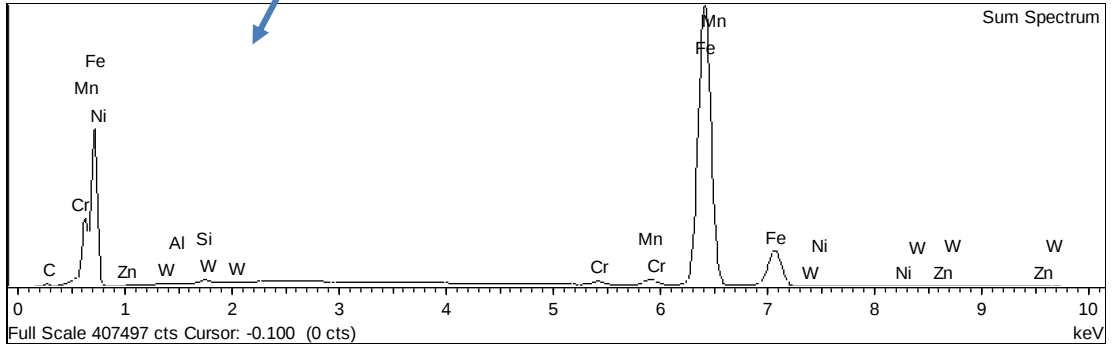
Element	Weight%	Atomic%
Fe	95.41 +/- 0.04	88.91
C	1.88 +/- 0.03	8.13
Mn	1.51 +/- 0.02	1.43
Cr	0.63 +/- 0.01	0.63
Si	0.35 +/- 0.01	0.65
Zn	0.17 +/- 0.02	0.14
Al	0.06 +/- 0.01	0.11
Totals	100.00	100.00



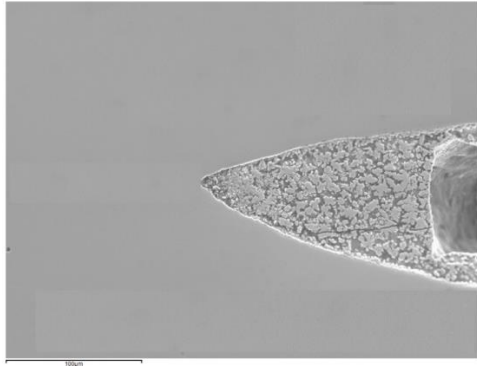
Şekil B1 : %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün çekirdek bölgesine ait EDS analizi, Zn ve Fe haritaları.



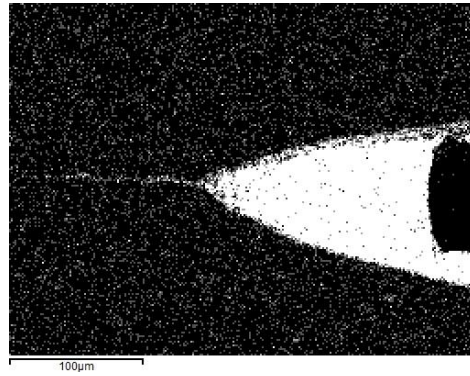
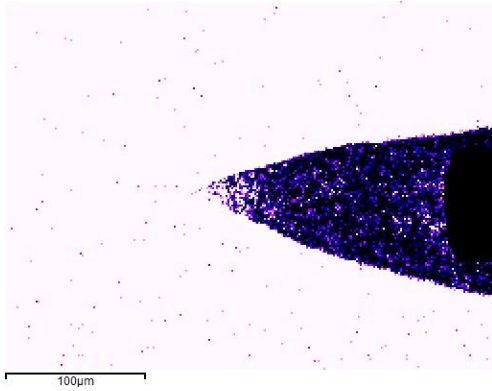
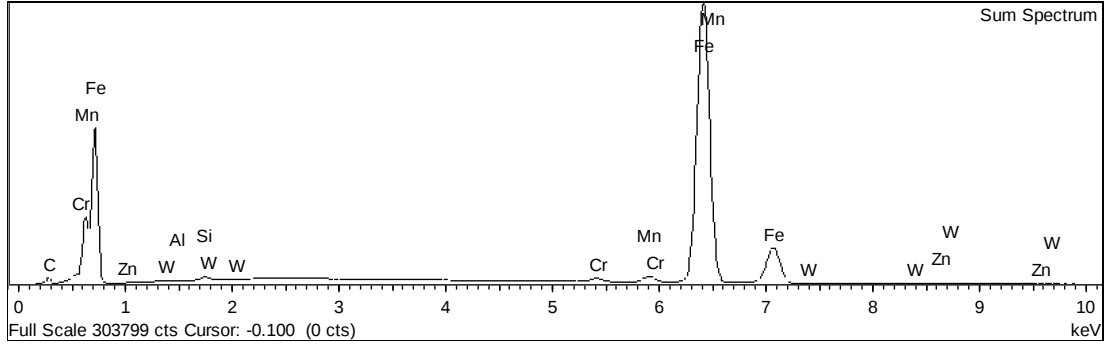
Element	Weight%	Atomic%
Fe	95.70 +/- 0.05	90.17
C	1.57 +/- 0.02	6.88
Mn	1.51 +/- 0.01	1.44
Cr	0.63 +/- 0.01	0.64
Si	0.35 +/- 0.01	0.66
W	0.09 +/- 0.03	0.03
Ni	0.06 +/- 0.02	0.06
Al	0.05 +/- 0.01	0.09
Zn	0.04 +/- 0.02	0.03
Totals	100.00	100.00



Şekil B.2: %7,5 ön uzama verilmiş ve maksimum akımda ($I_{\max}$) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün çekirdek bölgesine ait EDS analizi, Zn ve Fe haritaları.



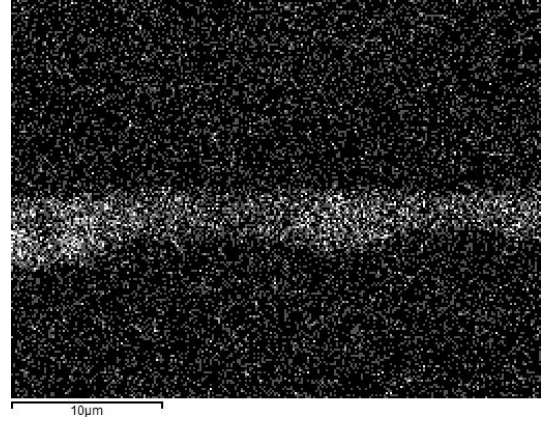
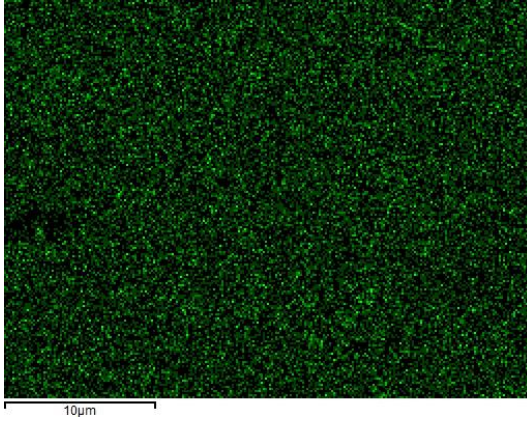
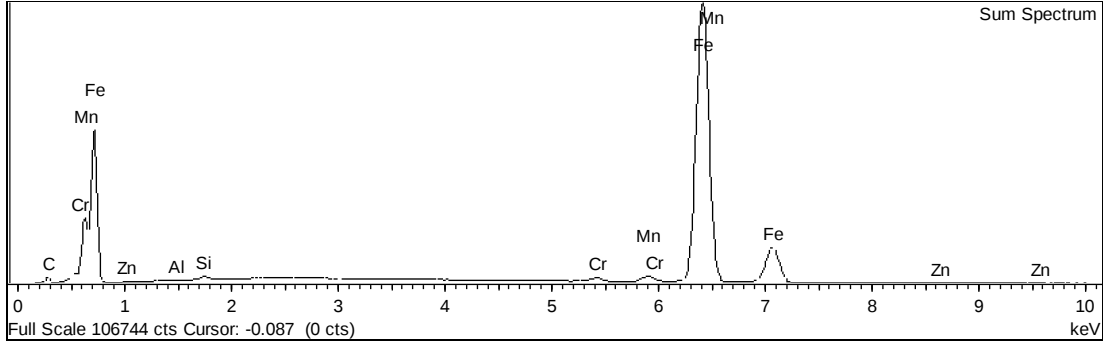
Element	Weight%	Atomic%
Fe	94.76 +/- 0.05	86.37
C	2.55 +/- 0.03	10.82
Mn	1.51 +/- 0.02	1.40
Cr	0.62 +/- 0.01	0.60
Si	0.34 +/- 0.01	0.62
W	0.10 +/- 0.03	0.03
Al	0.06 +/- 0.01	0.12
Zn	0.05 +/- 0.02	0.04
Totals	100.00	100.00



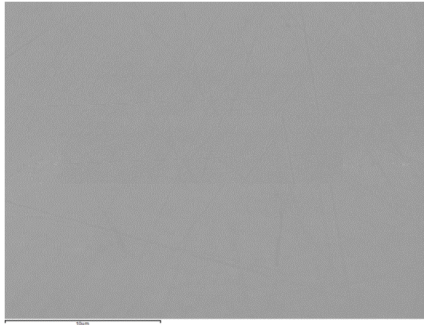
Şekil B.3 : %15 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesine ait EDS analizi, Zn ve Fe haritaları.



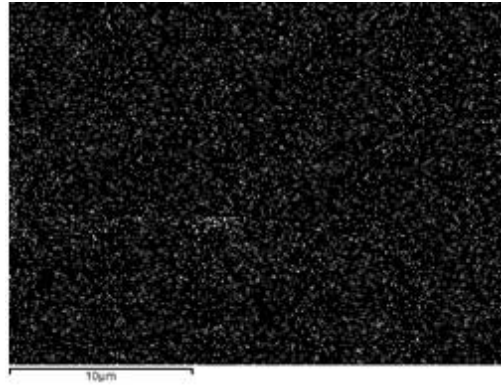
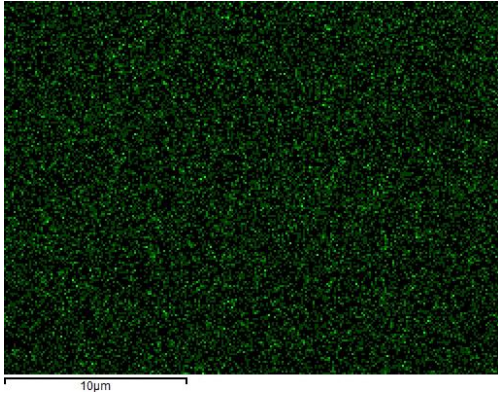
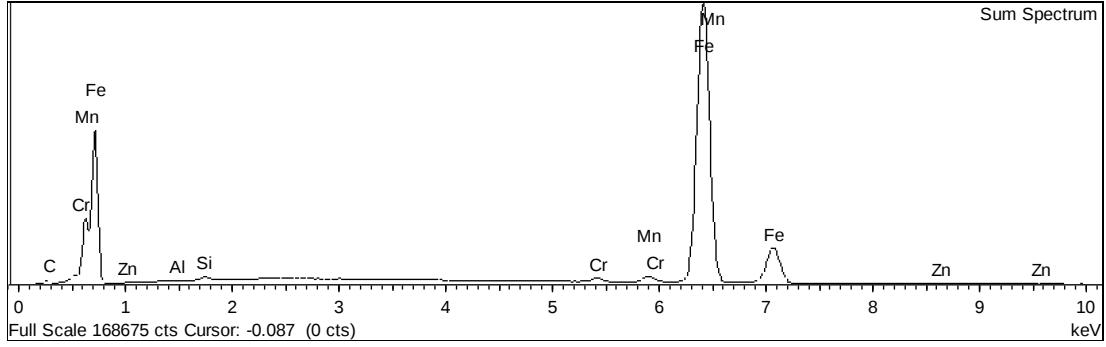
Element	Weight%	Atomic%
Fe	94.65 +/- 0.08	86.13
C	2.59 +/- 0.05	10.96
Mn	1.50 +/- 0.03	1.39
Cr	0.62 +/- 0.02	0.61
Si	0.33 +/- 0.02	0.59
Zn	0.24 +/- 0.04	0.19
Al	0.07 +/- 0.02	0.14
Totals	100.00	100.00



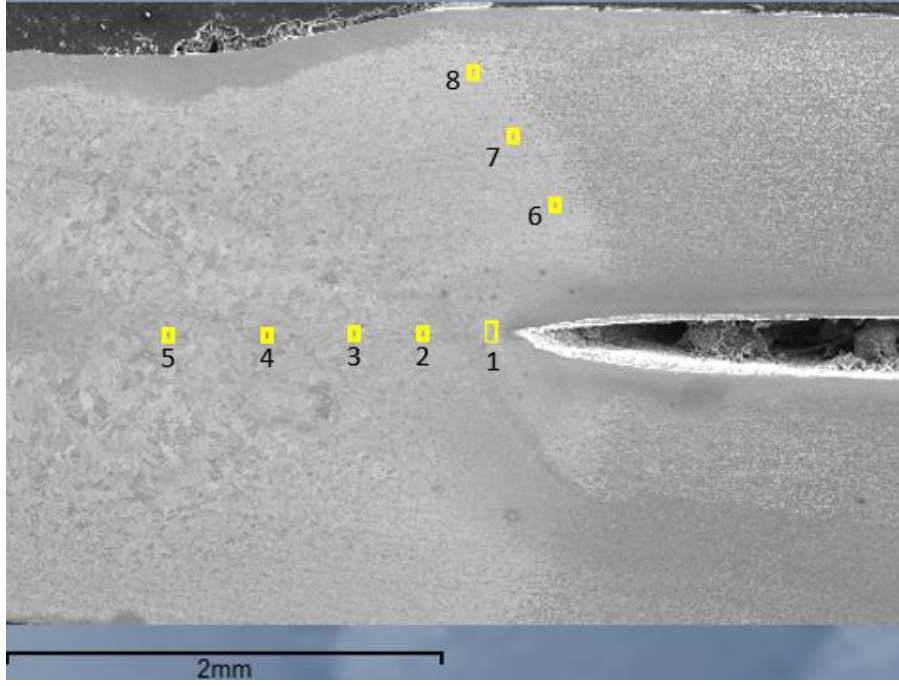
Şekil B.4 : %15 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak çekirdeğine ait EDS analizi, Zn ve Fe haritaları.



Element	Weight%	Atomic%
Fe	95.57 +/- 0.06	89.35
C	1.77 +/- 0.04	7.71
Mn	1.51 +/- 0.02	1.44
Cr	0.64 +/- 0.01	0.64
Si	0.36 +/- 0.01	0.66
Zn	0.08 +/- 0.03	0.07
Al	0.07 +/- 0.01	0.13
Totals	100.00	100.00



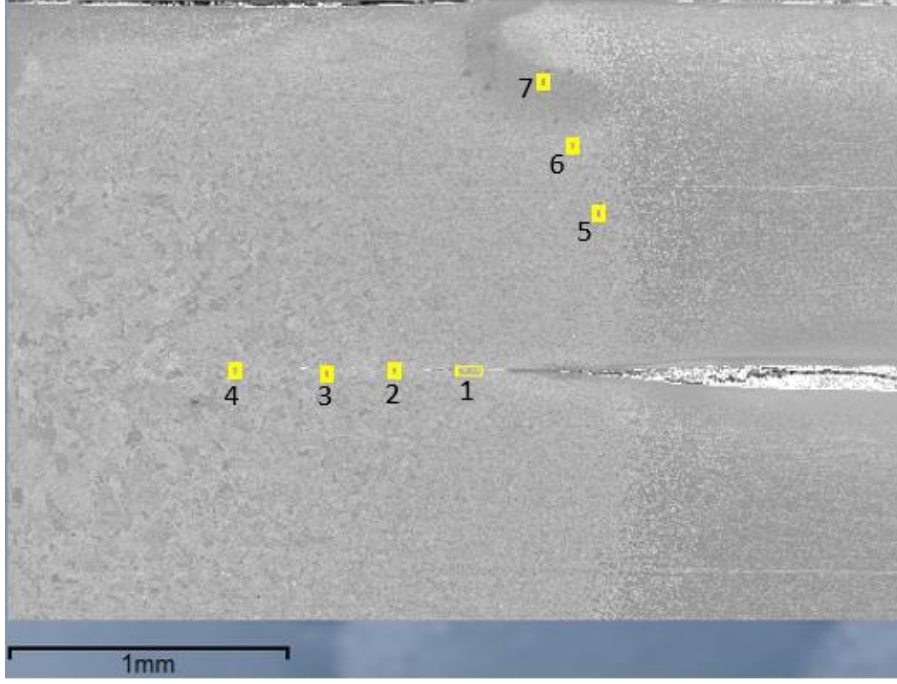
Şekil B.5 : %15 ön deformasyon uygulanmış ve maksimum akımda ($I_{\max}$) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesine ait EDS analizi, Zn ve Fe haritaları.



Şekil B.6 : %15 Ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'den noktasal analiz alınan farklı bölgeler.

Çizelge B.1: %15 Ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün farklı bölgelere ait nokta EDS analiz sonuçları.

Noktasal Analiz (% ağırlık)								
Element	1 nolu	2 nolu	3 nolu	4 nolu	5 nolu	6 nolu	7 nolu	8 nolu
Fe	81,31	81,15	81,45	81,55	81,71	81,84	81,92	80,5
C	13,55	13,55	13,39	13,45	14,10	12,62	12,52	12,35
Zn	1,25	0,85	0,79	0,77	0	1,43	1,34	1,37
Mn	1,24	1,21	1,25	1,27	1,21	1,10	1,18	1,21
Cr	0,57	0,55	0,50	0,53	0,52	0,50	0,47	0,5
Si	0,41	0,40	0,44	0,41	0,42	0,44	0,45	0,44
Al	0,18	0,17	0,16	0,19	0,18	0,27	0,23	0,21

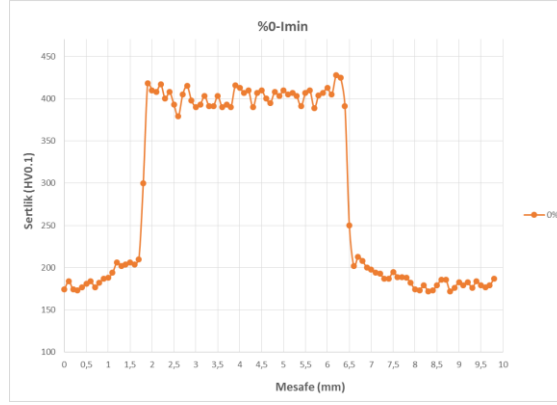


Şekil B.7 : %15 Ön deformasyon uygulanmış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600’den noktasal analiz alınan farklı bölgeler.

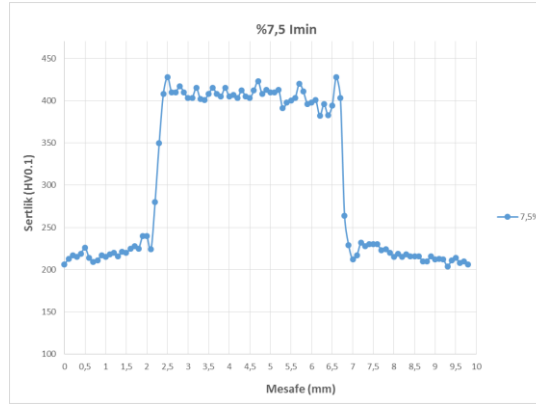
Çizelge B.2: %15 Ön deformasyon uygulanmış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600’ün farklı bölgelere ait nokta EDS analiz sonuçları.

Noktasal Analiz (% ağırlık)								
Element	1 nolu	2 nolu	3 nolu	4 nolu	5 nolu	6 nolu	7 nolu	8 nolu
Fe	89,71	88,4	87,69	88,44	88,69	78,57	82,06	84,16
C	6,68	6,79	9,50	7,31	6,91	16,29	12,38	11,48
Zn	1,29	1,27	0,97	0,81	0	0,98	1,54	1,28
Mn	1,43	1,41	1,04	1,06	1,21	1,00	1,08	1,12
Cr	0,55	0,56	0,49	0,50	0,55	0,46	0,42	0,41
Si	0,34	0,34	0,48	0,44	0,44	0,48	0,44	0,42
Al	0,16	0,15	0,30	0,30	0,25	0,30	0,28	0,26

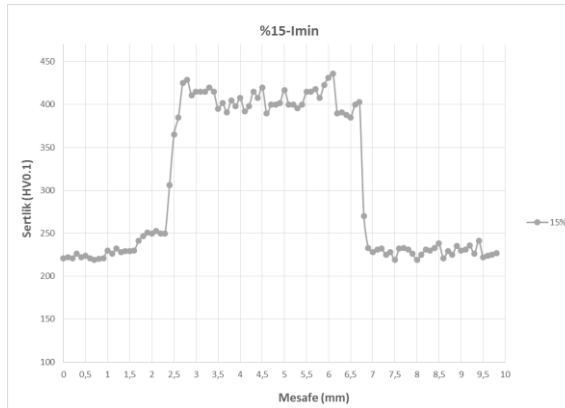
EK C : Kaynak Bölgesinin Sertlik Ölçümleri



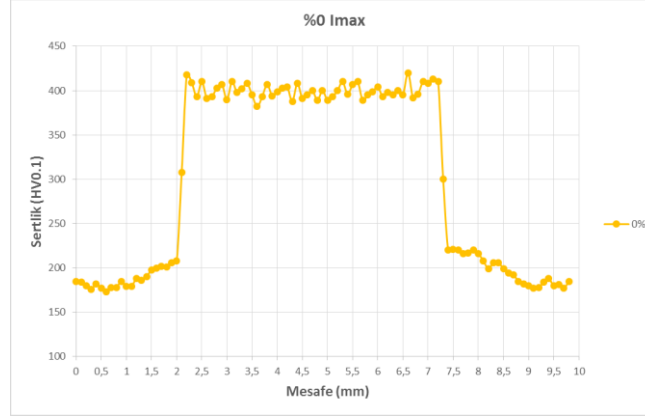
Şekil C.1 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait sertlik taraması.



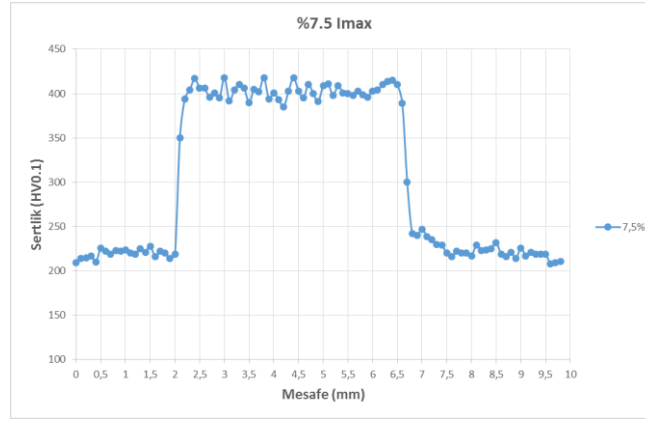
Şekil C.2 : %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait sertlik taraması.



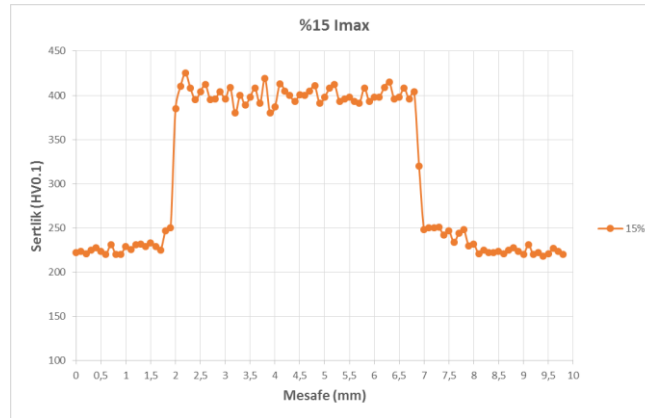
Şekil C.3 : %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait sertlik taraması.



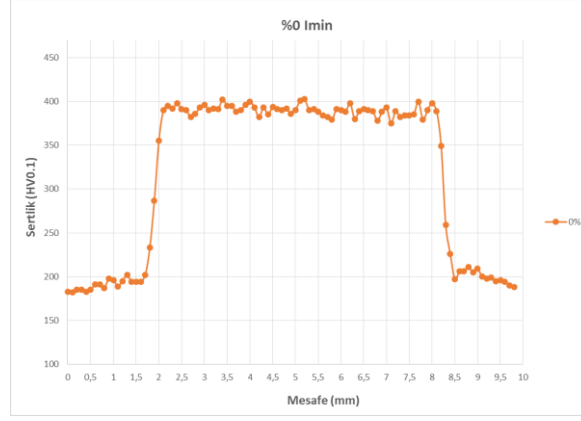
Şekil C.4 : %0 ön deformasyon uygulanmış ve maksimum akımda ($I_{\max}$) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait sertlik taraması.



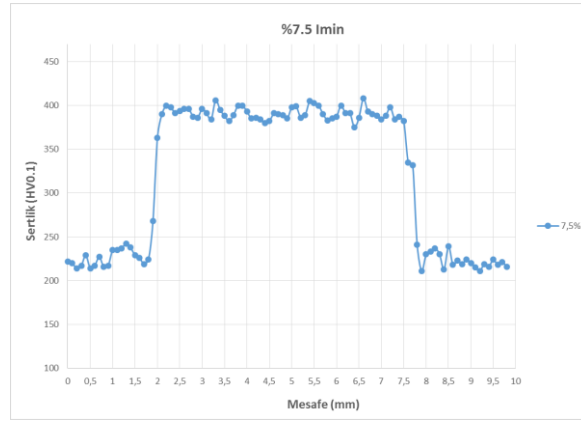
Şekil C.5 : %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve maksimum akımda ($I_{\max}$) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait sertlik taraması.



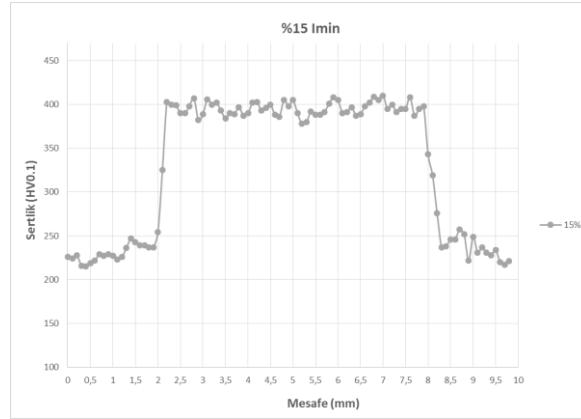
Şekil C.6 : %15 ön deformasyon uygulanmış ve maksimum akımda ($I_{\max}$) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait sertlik taraması.



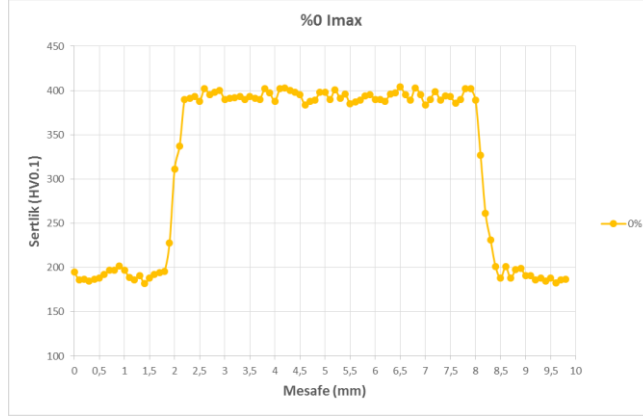
Şekil C.7 : Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait sertlik taraması.



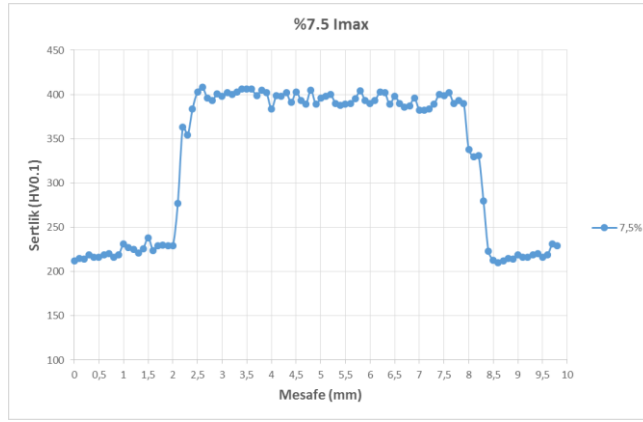
Şekil C.8 : %7,5 ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait sertlik taraması.



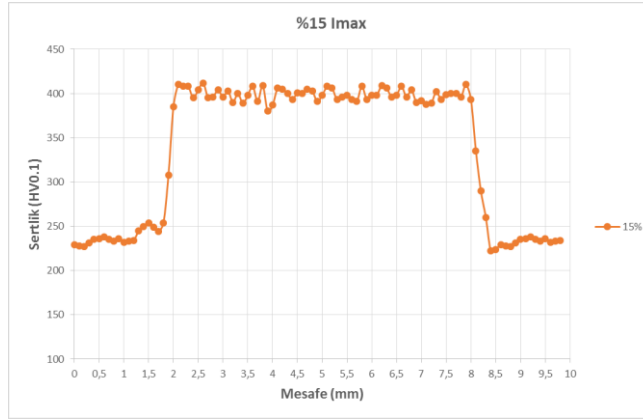
Şekil C.9: %15 ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait sertlik taraması.



Şekil C.10: Ön deformasyon uygulanmamış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait sertlik taraması.



Şekil C.11: %7,5 Ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait sertlik taraması.



Şekil C.12: %15 Ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş kaplamasız DP600'ün kaynak bölgesine ait sertlik taraması.

EK D : Mekanik Test Sonuçları

Çizelge D.1 : Galvanizli numunelere ait ayırma testi sonuçları.

Ön deformasyon	Imin-Fmax (N)			Imax-Fmax (N)		
	0%	7,5%	15%	0%	7,5%	15%
1	7231	7345	7203	9240	9271	8845
2	7188	7129	7340	9379	9183	8917
3	7276	7092	7391	9185	9244	8976
4	7232	7203	7413	9421	9310	8893
5	7349	7332	7405	9395	9221	8915
6	7326	7134	7488	9289	9112	8879
7	7293	7289	7308	9358	9228	8885
8	7226	7295	7459	9286	9310	8903
9	7308	7197	7118	9229	9195	8976
Ortalama	7271	7226	7346	9310	9230	8910

Çizelge D.2 : Kaplamasız numunelere ait ayırma testi sonuçları.

Ön deformasyon	Imin-Fmax (N)			Imax-Fmax (N)		
	0%	7,5%	15%	0%	7,5%	15%
1	7251	7223	7110	9361	9343	9090
2	7100	7146	7145	9187	9340	9146
3	7212	7267	7192	9278	9245	9216
4	7115	7200	7226	9326	9261	9157
5	7269	7165	7269	9276	9274	9169
6	7043	7288	7241	9252	9316	9202
7	7228	7230	7274	9258	9338	9111
8	7195	7171	7184	9246	9302	9175
9	7284	7109	7099	9340	9380	9245
Ortalama	7190	7210	7195	9280	9310	9170

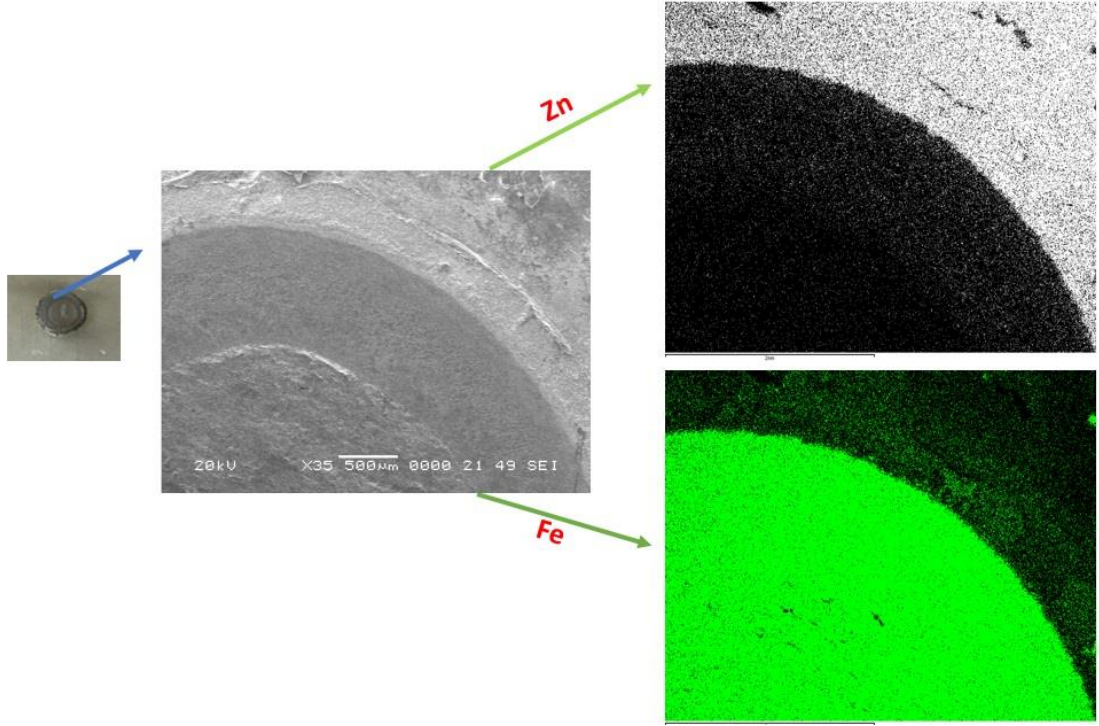
Çizelge D.3 : Galvanizli numunelere ait kesme testi sonuçları.

Ön deformasyon	Imin-Fmax (N)			Imax-Fmax (N)		
	0%	7,5%	15%	0%	7,5%	15%
1	12044	13030	14103	15535	16760	16795
2	12218	12364	14010	15604	16477	16964
3	12200	12904	13750	15356	16586	17239
4	11652	12585	13527	15457	16760	17271
5	11780	12770	13810	15693	16475	17120
6	11626	13073	14304	14844	16647	17175
7	12195	12797	14215	14884	16270	17427
8	12045	12441	14100	15326	16439	16742
9	11970	12722	14199	15420	16775	17080
Ortalama	11969	12742	14002	15346	16577	17090

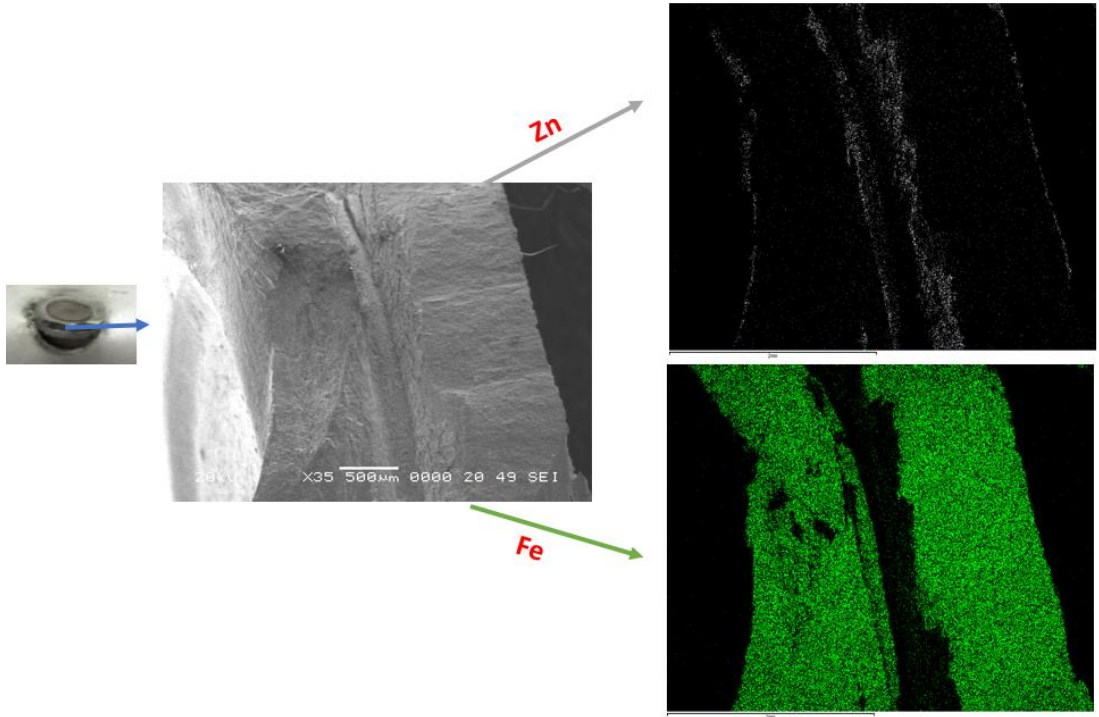
Çizelge D.4 : Kaplamasız numunelere ait kesme testi sonuçları.

Ön deformasyon	Imin-Fmax (N)			Imax-Fmax (N)		
	0%	7,5%	15%	0%	7,5%	15%
1	11908	12164	12876	15830	16138	17014
2	12197	12470	12917	15934	16345	16997
3	11921	12395	12867	15655	16585	17342
4	11715	12323	13147	16036	16710	16999
5	12072	12437	13175	15995	16642	17183
6	11773	12595	12999	16230	16358	17287
7	12113	12567	13116	15871	16236	17433
8	11795	12868	13204	15941	16399	17115
9	11906	12304	12956	15798	16505	17252
Ortalama	11932	12460	13028	15921	16456	17191

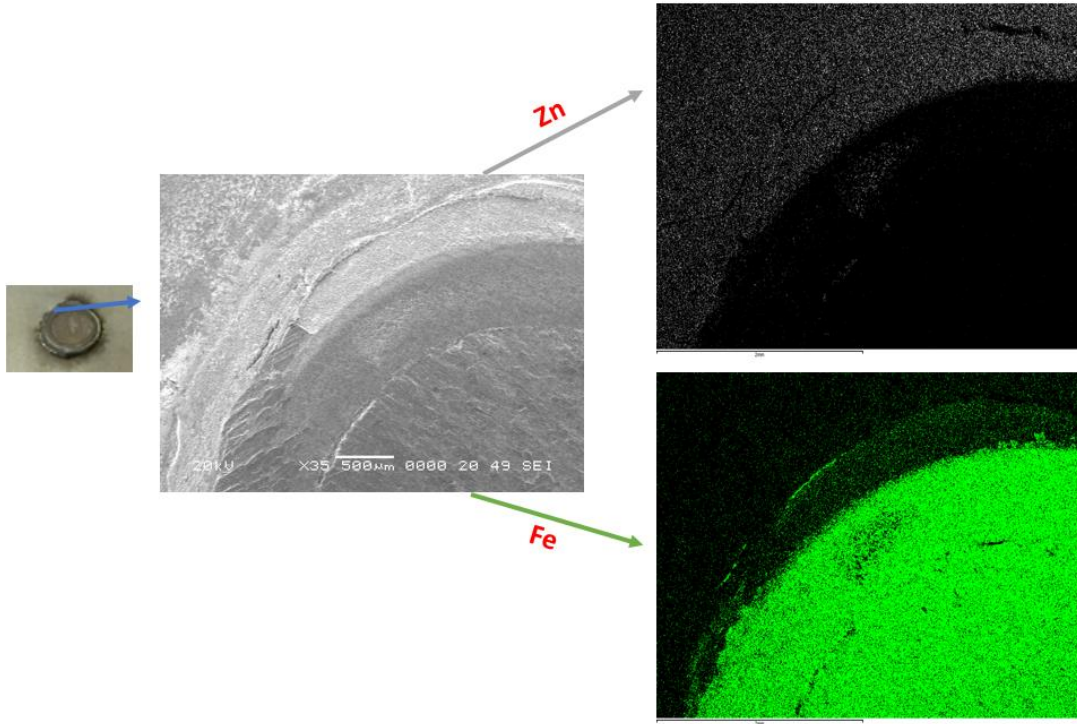
EK E : Hasar Bölgesi SEM İncelemeleri



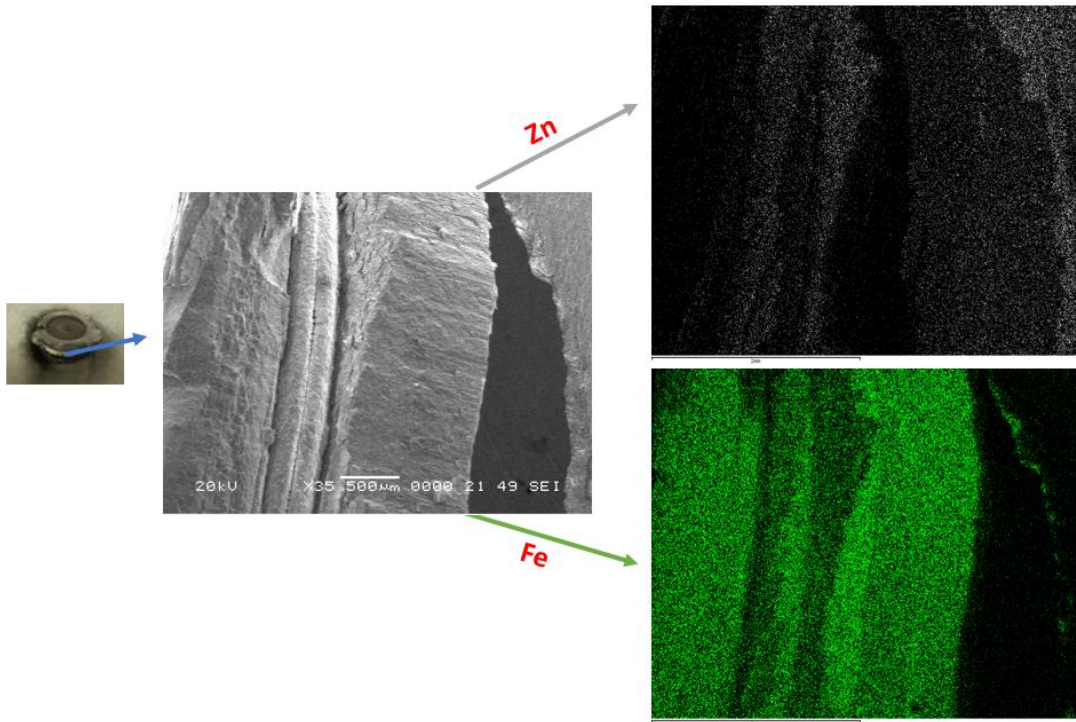
Şekil E.1: %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imin) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



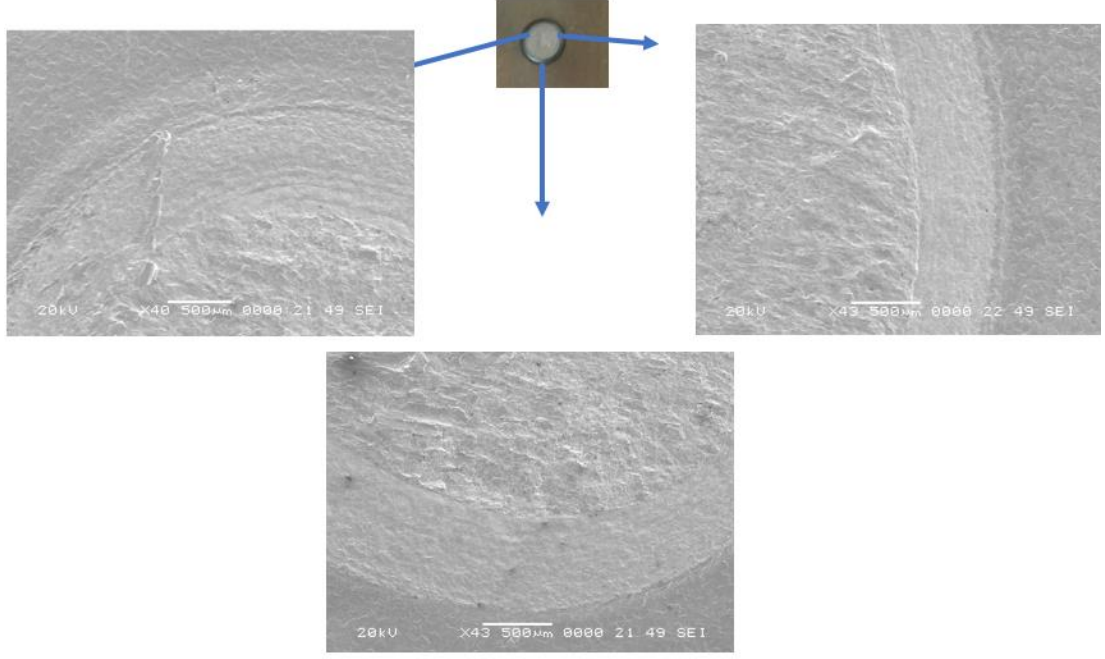
Şekil E.2: %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imax) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



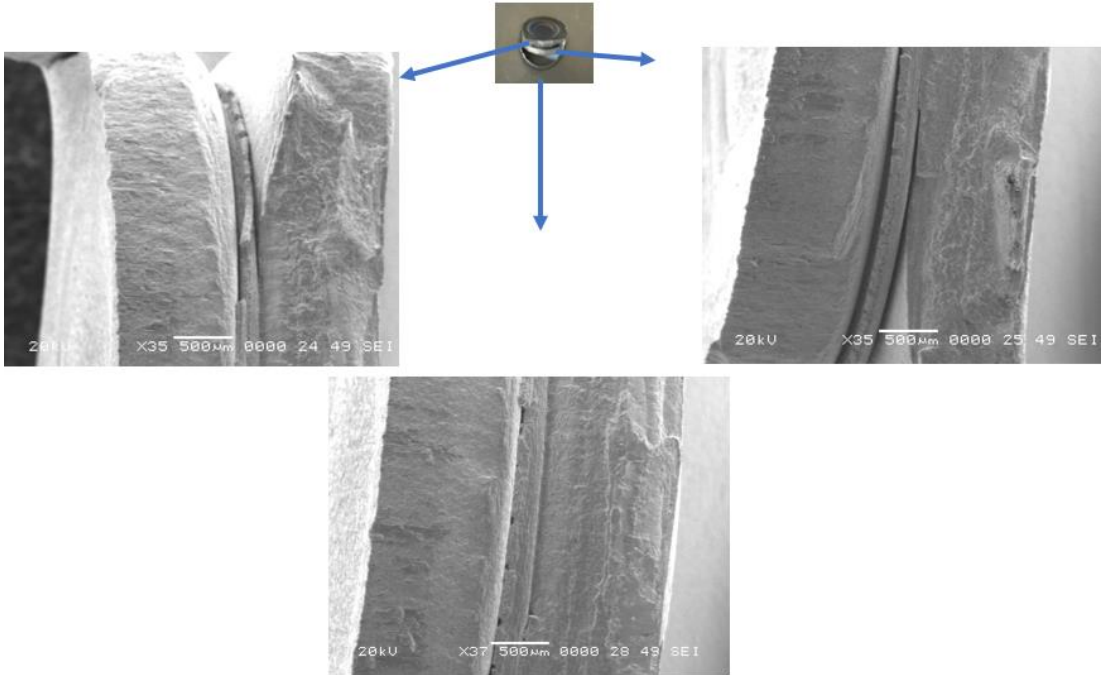
Şekil E.3: %15 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imin) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



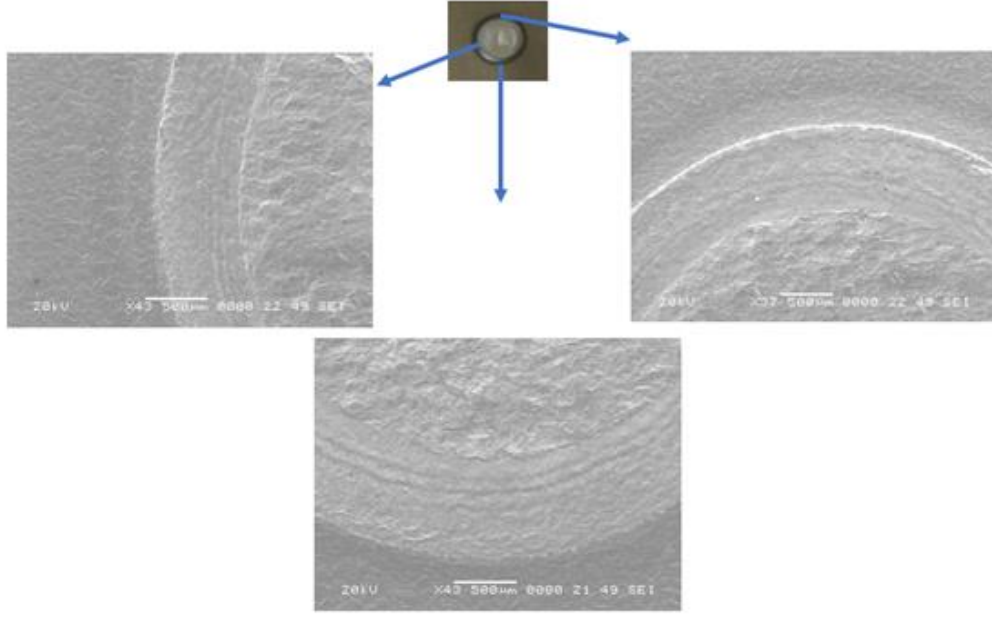
Şekil E.4: %15 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imax) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



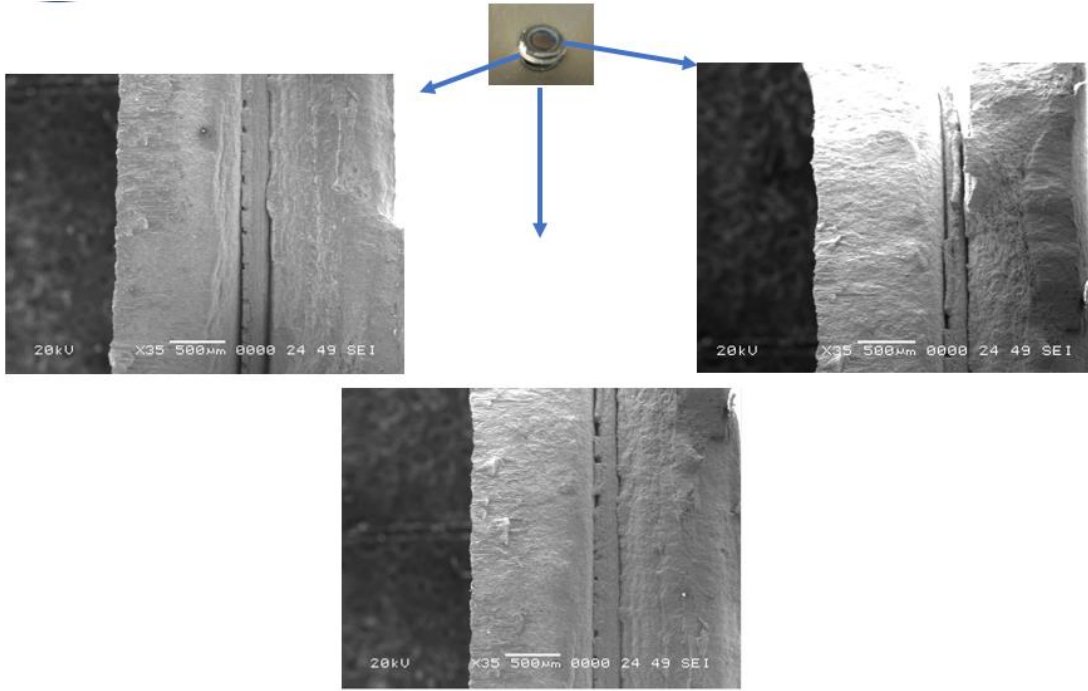
Şekil E.5: %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



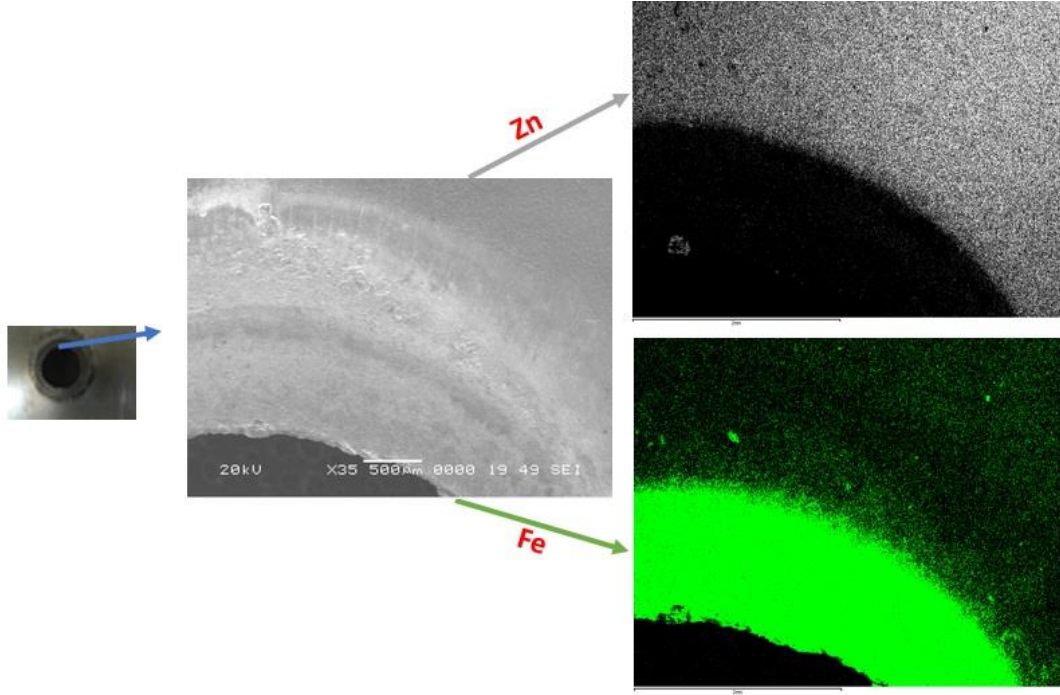
Şekil E.6: %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



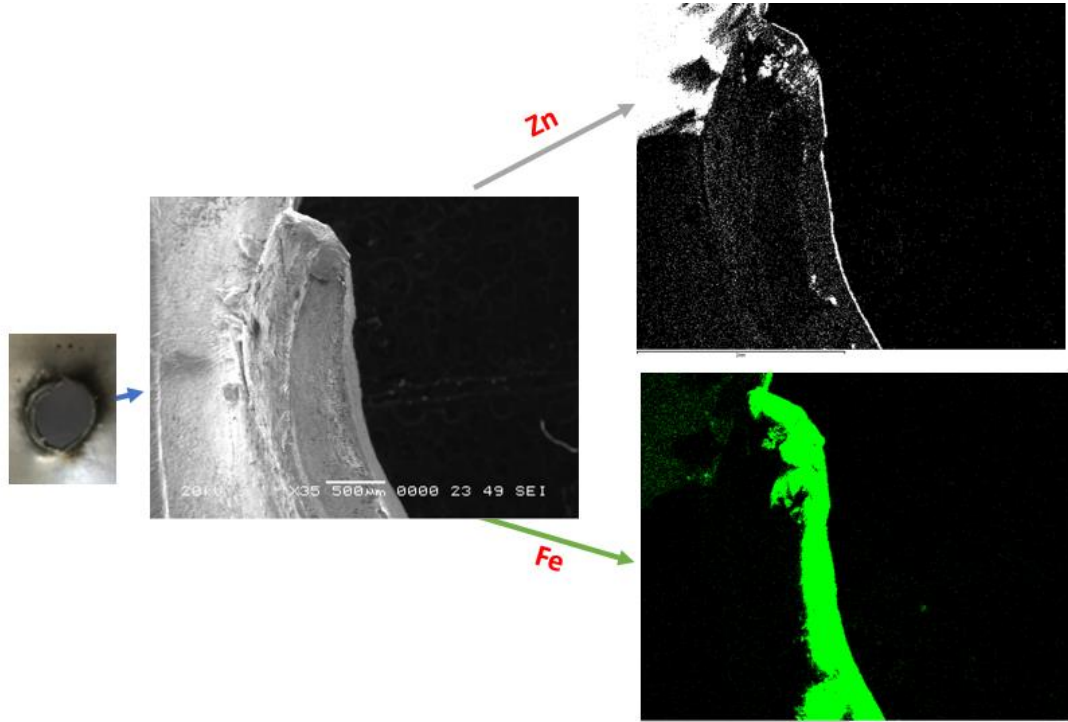
Şekil E.7: %15 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imin) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



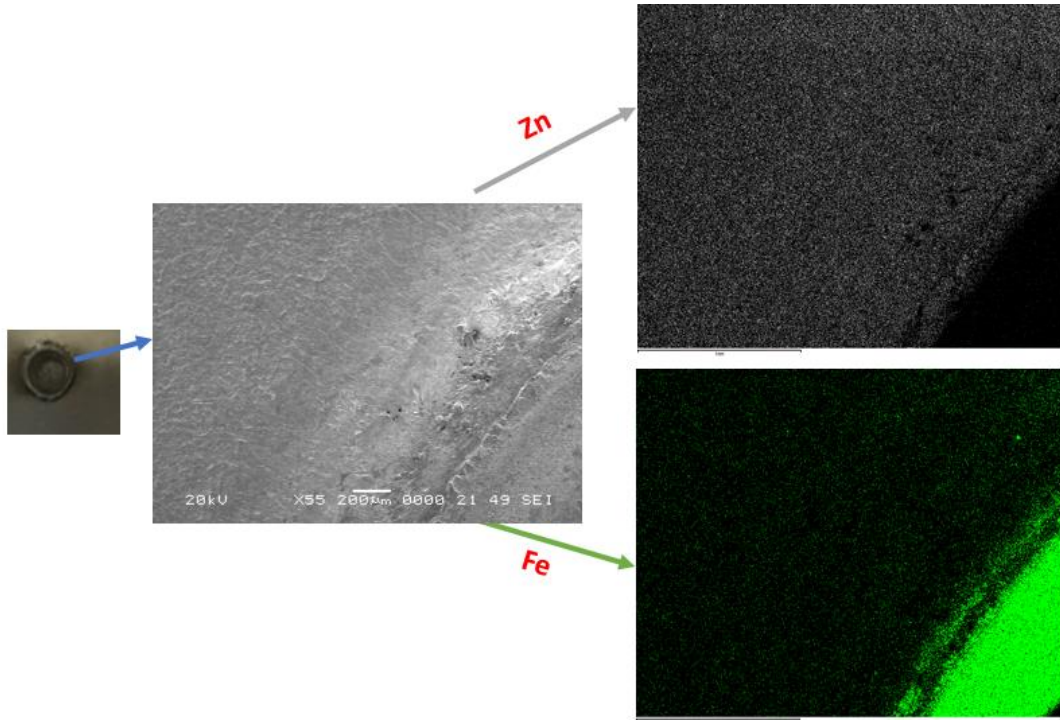
Şekil E.8: %15 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imin) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



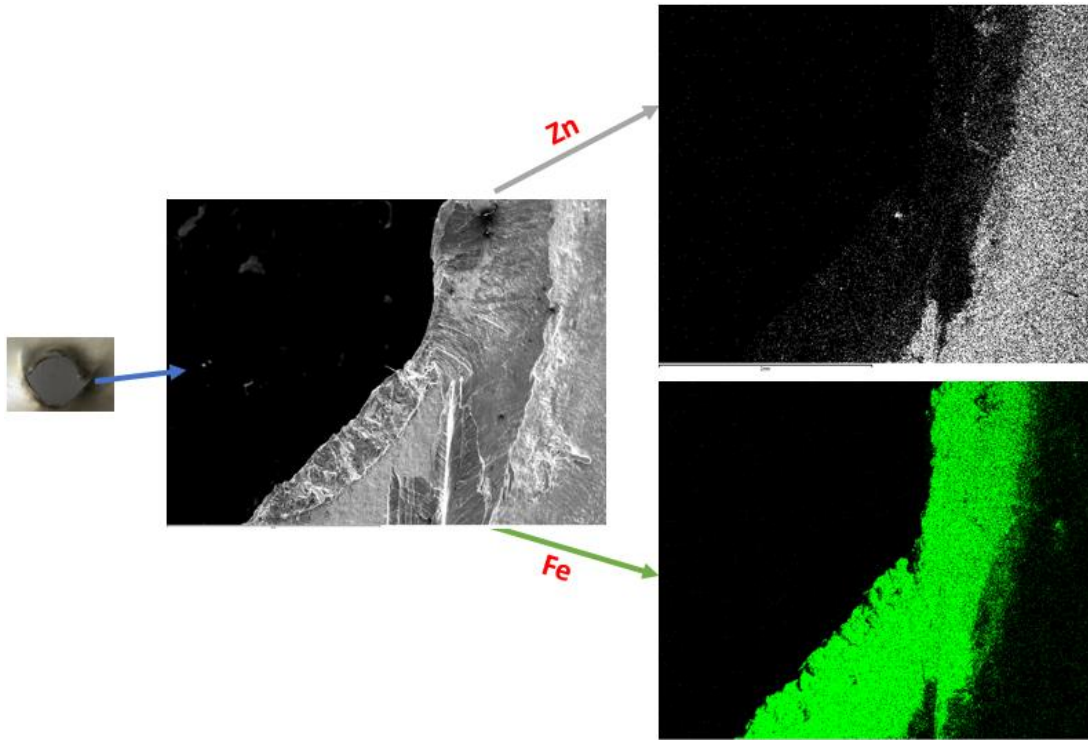
Şekil E.9: %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imin) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



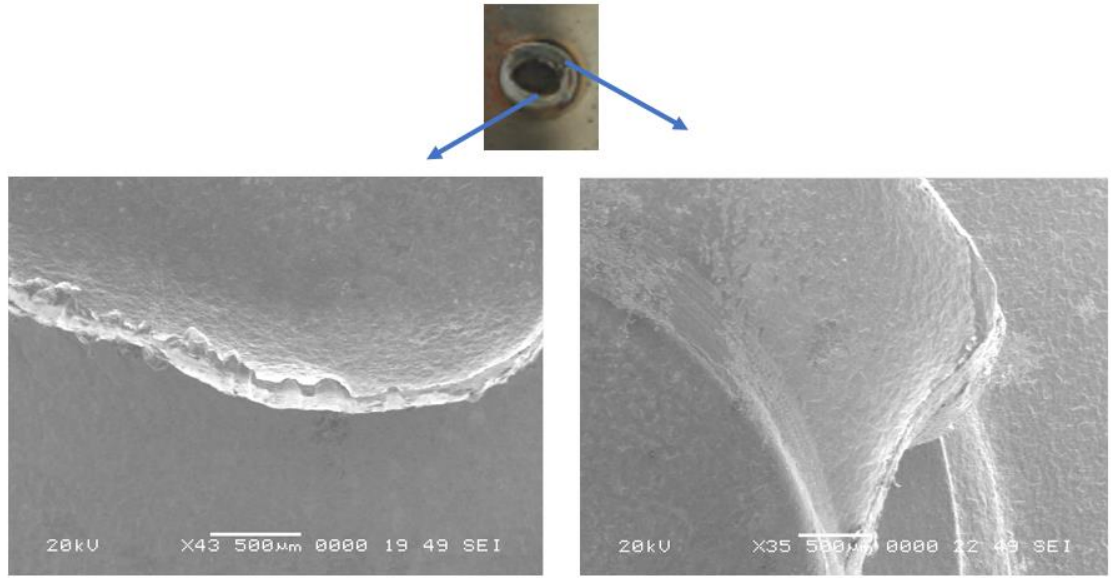
Şekil E.10: %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve maksimum akımda (Imax) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



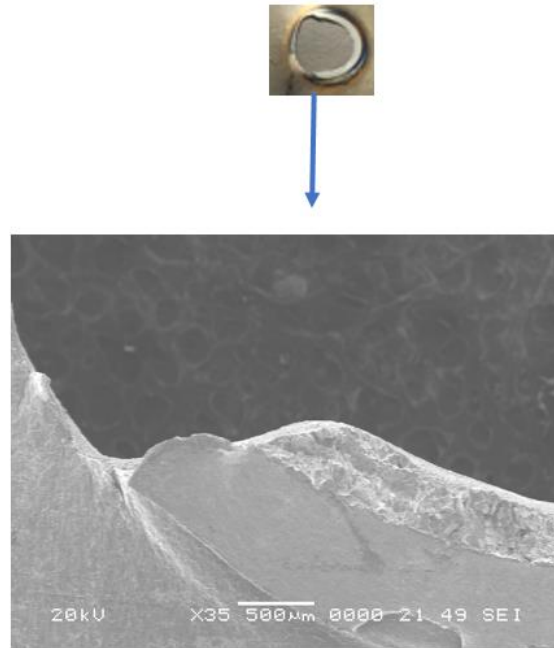
Şekil E.11: %15 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imin) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



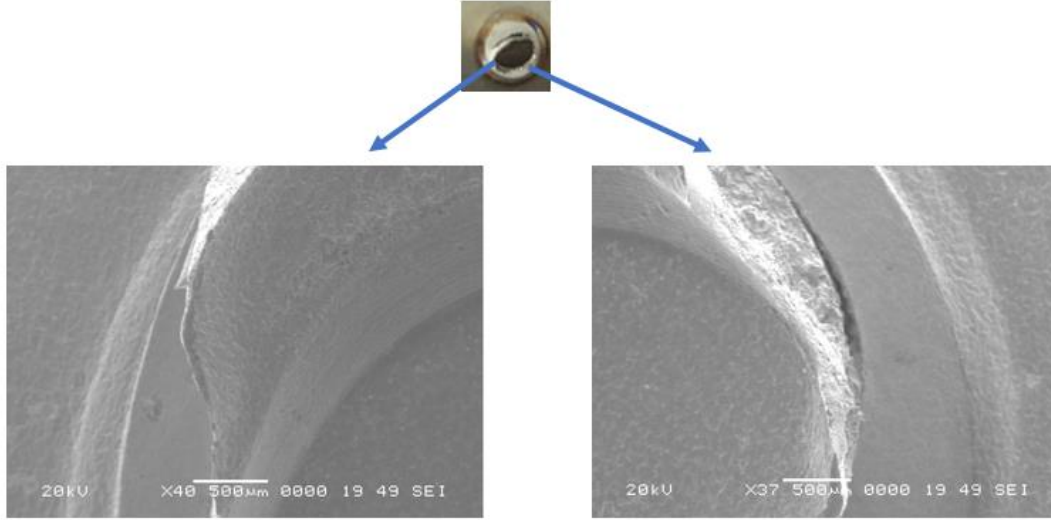
Şekil E.12: %15 ön deformasyon uygulanmış ve maksimum akımda (Imax) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



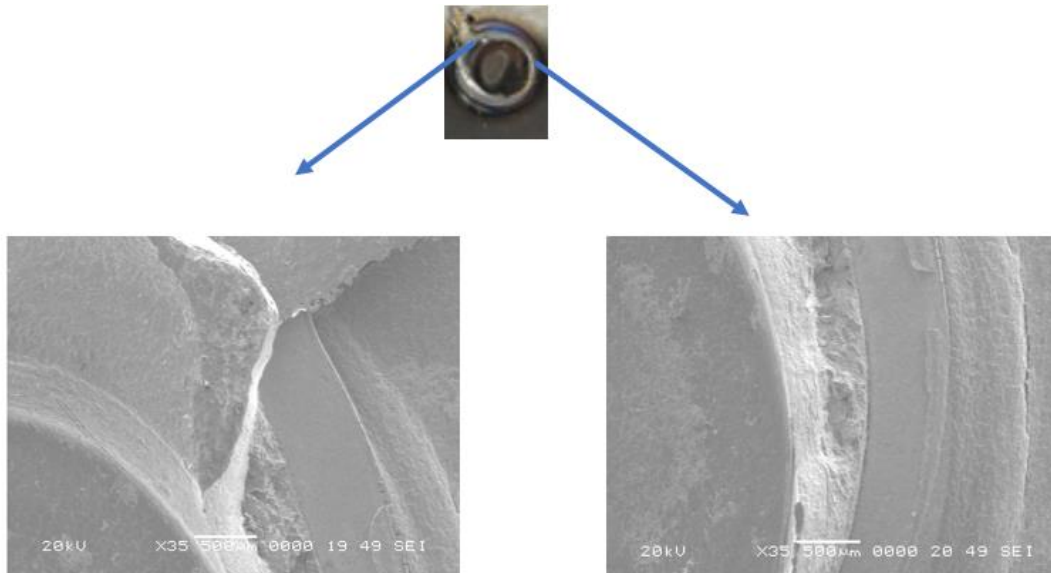
Şekil E.13: %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imin) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



Şekil E.14: %7,5 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (Imin) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



Şekil E.15: %15 ön deformasyon uygulanmış ve minimum akımda (I_{min}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.



Şekil E.16: %15 ön deformasyon uygulanmış ve maksimum akımda (I_{max}) kaynak edilmiş galvanizli DP600'ün kaynak bölgesi hasar SEM incelemesi.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ramazan UZUN
Doğum Tarihi ve Yeri : 03.04.1990 KDZ. Ereğli/ZONGULDAK
E-posta : ramazanuzun.erd@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2013, Yıldız Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji
Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği