

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN YÜKSEK DAYANIMLI
ÇELİKLERİN DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI (RSW) İLE BİRLEŞTİRİLİP
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE KABUL KRİTERLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus Emre ANTİKA

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Zafer TATLI

Temmuz 2017

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

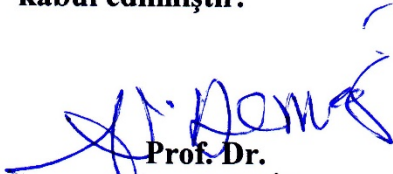
**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN YÜKSEK DAYANIMLI
ÇELİKLERİN DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI (RSW) İLE BİRLEŞTİRİLİP
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE KABUL KRİTERLERİNİN İNCELENMESİ**

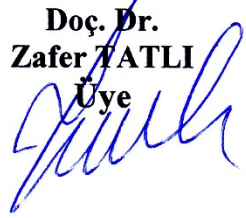
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yunus Emre ANTİKA

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 27.07.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


**Prof. Dr.
Adem DEMİR
Jüri Başkanı**


**Doç. Dr.
Zafer TATLI
Üye**


**Yrd. Doç. Dr.
Serkan APAY
Üye**

BEYAN

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

Yunus Emre ANTİKA

27.07.2017

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım değerli danışman hocam Doç. Dr. Zafer TATLI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği ve Makine Mühendisliği Bölümü yetkililerine teşekkür ederim.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına (Proje No: 2017-50-01-002) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI	2
2.1. Direnç Kaynağı ve Prensibi	2
2.2. Direnç Nokta Kaynağı ve Prensibi	3
2.2.1. Kaynak donanımı	4
2.2.2. Direnç kaynak makinelerindeki kontrol düzenleri	5
2.2.3. Direnç kaynağı makinesi teçhizatı	6
2.2.4. Sekonder devre karakteristikleri	7
2.3. Kaynak Çevrimi	7
2.4. Direkt ve Seri Kaynak	9
2.5. Uygulama Alanları	10
2.6. Avantajları ve Sınırlamalar	10
2.7. Kaynak Çekirdeğinin Oluşumu	11
2.8. Direnç Nokta Kaynağının Parametreleri	12
2.8.1. Kaynak akımı	12
2.8.2. Kaynak süresi	13

2.8.3. Elektrot malzemesi ve boyutlar	15
2.8.4. Elektrot kuvveti	16
2.8.5. Kaynak noktası sıklığı	18
2.8.6. Elektrot ve iş parçasının temas durumları	19
2.9. Kaynak Programları	20
2.10. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesinde Kullanılan Testler	21
2.10.1. Soyma testi	21
2.10.2. Keski testi	22
2.10.3. Çekme testi	23
2.11. Otomotiv Sanayisinde Direnç Nokta Kaynağı	24
2.11.1. Otomotiv ürünleri	24

BÖLÜM 3.

GELİŞMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER (AHSS)	26
3.1. Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelik (AHSS) Türleri	26
3.2. Kompleks Fazlı (CP) çelikler	28
3.3. Ferritik Beynitik (FB) Çelikler	29
3.4. Sıcak Şekillendirilmiş (HF) Çelikler	30
3.5. İkizlemeye Dayalı Plastisite (TWIP) Çelikleri	31
3.6. Dönüşüme Dayalı Plastisite (TRIP) Çelikleri	32
3.7. Çift Fazlı (DP) Çelikler	33
3.8. Martenzitik (MS veya MART) Çelikler	35

BÖLÜM 4.

MATERYAL VE YÖNTEM	37
4.1. Deney Malzemelerinin Kimyasal Kompozisyonu	37
4.2. Deneylerde Kullanılan Kaynak Makinesi ve Elektrotlar	38
4.3. Deneylerde Kullanılan Çekme Cihazı	40
4.3.1. Çekme makaslama testi	40
4.3.2. Mekanize soyma testi	41
4.3.3. Manuel soyma testi	42
4.4. Direnç Nokta Kaynağı Kabul Kriterleri	43

4.4.1. Görünür kriterler	43
4.4.1.1. Süreksizlikler	43
4.4.1.2. Plakalararası ayrılma	43
4.4.1.3. Yüzey girintisi	44
4.4.2. Radyografik kriterler	45
4.4.3. Metalografik kriterler	45
4.4.3.1. Çekirdekdeki süreksizlikler	46
4.4.3.2. Nüfuziyet	47
4.4.4. Kaynak çapı	49
4.5. Metalografik İnceleme	50
4.5.1. Mikro sertlik	52
 BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARI	53
5.1. Kaynak İşlemi için Yapılan Ön Hazırlık	53
5.2. Kaynak İşlemi	54
5.2.1. Çekme makaslama testi sonuçları	55
5.2.2. Mekanize soyma testi sonuçları	58
5.2.3. Manuel soyma testi sonuçları	62
5.3. Kabul Kriterleri Kapsamında Yapılan İnceleme Sonuçları	66
5.4. Metalografik İnceleme Sonuçları	69
5.4.1. Optik mikroskop sonuçları	69
5.4.2. SEM sonuçları	76
5.4.3. Mikro sertlik testi sonuçları	83
 BÖLÜM 6.	
GENEL SONUÇLAR	90
 KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	95

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AHSS	: Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelik
C	: Santigrat
dk	: Dakika
DNK	: Direnç Nokta Kaynağı
DP	: Çift Fazlı
EM	: Esas Metal
GPa	: Giga Paskal
Hz	: Hertz
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
kA	: Kilo Amper
kN	: Kilo Newton
kVA	: Kilovolt Amper
mm	: Milimetre
MPa	: Mega Paskal
MS	: Martenzitik
N	: Newton
p	: periyot
RSW	: Direnç Nokta Kaynağı
TL	: Türk Lirası
TRIP	: Dönüşüme Dayalı Plastisite
v	: Volt

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Direnç Nokta Kaynağı	4
Şekil 2.2. Direnç nokta kaynağı çevriminin aşamaları	8
Şekil 2.3. TS EN 25822 standardına göre elektrot uç tipleri	16
Şekil 2.4. Soyma testinin uygulanışı	22
Şekil 2.5. Keski testinin uygulanışı	23
Şekil 3.1. AHSS'lerin toplam çelik pazarındaki payı	26
Şekil 3.2. AHSS ve sektörde kullanılan diğer çeliklerin mukavemet grafiği	27
Şekil 3.3. AHSS'lerin soğuma modeli ve mikro yapıları.	27
Şekil 3.4. CP çeliğinden üretilmiş koltuk flanşı	28
Şekil 3.5. CP çeliğinin mikroyapı görüntüsü	28
Şekil 3.6. FB çeliğinden üretilmiş jant	30
Şekil 3.7. FB çeliğinin mikroyapı görüntüsü	30
Şekil 3.8. TWIP çeliğinin mikroyapı görüntüsü	32
Şekil 3.9. TRIP çeliğinden üretilmiş tampon sacı	33
Şekil 3.10. TRIP çeliğinin mikroyapı görüntüsü	33
Şekil 3.11. DP çeliğinden üretilmiş B direği	34
Şekil 3.12. DP çeliğinin mikroyapı görüntüsü	34
Şekil 3.13. MS çeliğinden üretilmiş tampon takviyesi	36
Şekil 3.14. MS çeliğinin mikroyapı görüntüsü	36
Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan kaynak makinesi	38
Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan elektrotlar	39
Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan çekme cihazı	40
Şekil 4.4. Çekme makaslama numunesinin kaynak şekli ve ölçüleri	40
Şekil 4.5. Mekanize ve manuel test numunesinin kaynak şekli ve ölçüleri	41
Şekil 4.6. Mekanize ve manuel test numunesinin test için uygun şekli ve ölçüsü .	41
Şekil 4.7. Standartta belirtilen manuel soyma test ekipmanı	42
Şekil 4.8. Üretimi yapılan manuel soyma test ekipmanı	42

Şekil 4.9. Plakalar arası ayrılma	44
Şekil 4.10. Yüzey girintisi	44
Şekil 4.11. Kaynak ve kaynak dışı bölge	45
Şekil 4.12. İstenmeyen süreksizlikler	46
Şekil 4.13. Minimum nüfuziyet kriteri	47
Şekil 4.14. Kaynak çapı ölçümü	49
Şekil 4.15. Kesilen, kaba zımparalanan ve bakalite alınan numuneler	50
Şekil 4.16. Nikon SMZ 800 marka stereo mikroskop	51
Şekil 4.17. Nikon Eclipse L150A marka optik mikroskop	51
Şekil 4.18. JEOL JSM-6060LV marka SEM ve EDS cihazı	51
Şekil 4.19. Wolpert Wilson marka sertlik ölçüm cihazı	52
Şekil 5.1. Kaynak işlemi esnasında kullanılan kalıplar	54
Şekil 5.2. 8 kA ve 15p'de kaynaklanan numune çifti örnekleri	55
Şekil 5.3. 6 kA ve 15p'de TRIP800 ve DP600'ün çekme makaslama testi	55
Şekil 5.4. 10 kA ve 25p'da ki kaynakların çekme makaslama testi sonrası	56
Şekil 5.5. 6-8-10kA'de ve 25p yapılan kaynakların çekme makaslama dayanımı	56
Şekil 5.6. 6-8-10kA'de ve 20p yapılan kaynakların çekme makaslama dayanımı	57
Şekil 5.7. 6-8-10kA'de ve 15p yapılan kaynakların çekme makaslama dayanımı	57
Şekil 5.8. Mekanize soyma testinin uygulanışı	58
Şekil 5.9. 10 kA ve 25p'da ki kaynakların mekanize soyma testi sonrası	59
Şekil 5.10. 6-8-10kA'de ve 25p yapılan kaynakların mekanize soyma dayanımı	59
Şekil 5.11. 6-8-10kA'de ve 20p yapılan kaynakların mekanize soyma dayanımı	60
Şekil 5.12. 6-8-10kA'de ve 15p yapılan kaynakların mekanize soyma dayanımı	60
Şekil 5.13. Manuel soyma testinin uygulanışı	62
Şekil 5.14. Soyulma testi öncesi ve sonrası kaynak boyutları	63
Şekil 5.15. Kabul kriterlerinde ihtiyaç duyulan ölçüler ve makro görüntüler	66
Şekil 5.16. Esas metallerin mikroyapı görüntüsü	69
Şekil 5.17. MS1500 ile MS1500'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	70
Şekil 5.18. MS1500 ile TRIP800'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	71
Şekil 5.19. MS1500 ile DP1000'in 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	71
Şekil 5.20. MS1500 ile DP600'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	72
Şekil 5.21. TRIP800 ile TRIP800'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	72

Şekil 5.22. TRIP800 ile DP1000'in 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	73
Şekil 5.23. TRIP800 ile DP600'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	73
Şekil 5.24. DP1000 ile DP1000'in 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	74
Şekil 5.25. DP1000 ile DP600'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	74
Şekil 5.26. DP600 ile DP600'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	75
Şekil 5.27. Esas metallerin mikroyapı görüntüsü	76
Şekil 5.28. MS1500 ile MS1500'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	77
Şekil 5.29. MS1500 ile TRIP800'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	78
Şekil 5.30. MS1500 ile DP1000'in 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	78
Şekil 5.31. MS1500 ile DP600'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	79
Şekil 5.32. TRIP800 ile TRIP800'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü ...	79
Şekil 5.33. TRIP800 ile DP1000'in 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	80
Şekil 5.34. TRIP800 ile DP600'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	80
Şekil 5.35. DP1000 ile DP1000'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	81
Şekil 5.36. DP1000 ile DP600'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	81
Şekil 5.37. DP600 ile DP600'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü	82
Şekil 5.38. Sertlik ölçüm yönü ve bölgeleri	83
Şekil 5.39. MS1500 ile MS1500'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri	84
Şekil 5.40. MS1500 ile TRIP800'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri	84
Şekil 5.41. MS1500 ile DP1000'in 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri	85
Şekil 5.42. MS1500 ile DP600'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri	85
Şekil 5.43. TRIP800 ile TRIP800'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri	86
Şekil 5.44. TRIP800 ile DP1000'in 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri	86
Şekil 5.45. TRIP800 ile DP600'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri	87
Şekil 5.46. DP1000 ile DP1000'in 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri	87
Şekil 5.47. DP1000 ile DP600'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri	88
Şekil 5.48. DP600 ile DP600'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri	88

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonu	37
Tablo 4.2. 700 MPa üzeri çelikler için tavsiye edilen kaynak parametreleri	39
Tablo 4.3. Nüfuziyetsizliğe sebep olan problemler ve muhtemel sebepleri	48
Tablo 5.1. Numune çiftlerinin AHSS türü ve kalınlıkları	53
Tablo 5.2. Sabit olarak ayarlanan çevrim adımları	54

ÖZET

Anahtar kelimeler: AHSS, MS1500, TRIP800, DP1000, DP600, Martenzitik çelik, TRIP çelik, Çift Fazlı çelik, RSW, Direnç Nokta Kaynağı, Kabul Kriterleri, Otomotiv, Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler, Mikroyapı ve mekanik özellikler

Bu çalışmada Otomotiv sektöründe kullanılan Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelik (AHSS) türlerinden en yaygın olarak kullanılan dört farklı çeliğin yine bu sektörde genelde tercih edilen kaynak yöntemlerinden olan Direnç Nokta Kaynağı ile kaynatılıp bir takım mekanik özelliklerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca yapılan kaynakların AWS 8.1M standartında belirtilen kabul kriterlerine göre incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak sektördeki firmalardan farklı kalınlıklarda temin edilen çelik türleri öncelikle kendi türleri ile akabinde de birbirleri ile farklı kombinasyonlarda kaynatılmıştır. Bu işlemden sonra TS EN ISO 14273'e göre çekme makaslama, TS EN ISO 14270'e göre mekanize soyma ve TS EN ISO 10447'e göre manuel soyma testleri uygulanmış ve sonuçları grafik ve tablolar yardımıyla yorumlanmaya çalışılmıştır. Aynı zamanda AWS 8.1M standartında tanımlanan kabul kriterlerine göre'de kaynak çapları, yüzey girintisi, plakalar arası açıklık gibi birtakım kriterler incelenmiştir. Bunlara ilaveten esas metalin, ITAB'nin, çekirdeğin mikro yapıları ve sertlik değerleri incelenmiştir.

THE INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND ACCEPTANCE CRITERIONS OF HIGH STRENGTH STEEL USED IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY WITH A JOINING THE RESISTANCE SPOT WELDING (RSW)

SUMMARY

Keywords: AHSS, MS1500, TRIP800, DP1000, DP600, Martensitic steel, TRIP steel, Dual Phase steel, RSW, Resistance Spot Welding, Acceptance Criteria, Automotive, Advanced High Strength Steel, Microstructure and mechanical properties

In this study, it was aimed to investigate some mechanical properties of three different types of steel used in the automotive industry, most commonly used for advanced high strength steel (AHSS) types, by welding with resistance spot welding, which is one of the welding methods widely used in this sector. It is also intended to examine the welds in accordance with the acceptance criteria set out in the AWS 8.1M standard. For this purpose, steel types supplied in different thicknesses from the companies in the sector were first welded in their own types and then in different combinations with each other. After this process, tensile shear according to TS EN ISO 14273, manual peeling according to TS EN ISO 14270 and manual peeling tests according to TS EN ISO 10447 were applied and the results were interpreted with the aid of graphics and tables. At the same time, according to the acceptance criteria defined in the AWS 8.1M standard, some criteria such as nugget diameters, surface indentation, sheet separation were examined. In addition, the microstructure and hardness values of the base metal, HAZ, the weld nugget have been examined.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Son zamanlarda otomobil endüstrisindeki gereksinimler artmıştır. Bu gereksinimleri, emniyet, yakıt verimliliği, çevreci olma, üretilebilirlik, dayanıklılık ve kalite gibi başlıklar altında toplayabiliriz. Otomotiv endüstrisinin bu ihtiyaçlarını karşılamak adına otomobilin her bir parçası için en uygun malzemelerin geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Ancak üretim kavramı salt olarak malzemelerin seçimiyle tamamlanamamaktadır. Bu noktada malzemelerin daha üretim aşamasındaki özellikleri, uygulanan işlemler, şekillendirilme, birleştirilme yöntemleri, birleştirme sonrası işlemler, kalite kontrolü, üretim olgusunu oluşturan ana öğelerdir. Günümüzdeki gelişmiş teknoloji sayesinde yüksek kaliteli ve seri üretim yapmak mümkündür. Teknolojinin gelişimiyle ortaya çıkan robotik üretim hatları sayesinde neredeyse el değmeden üretim yapılmaktadır. Son derece rekabetçi olan otomotiv endüstrisinde maliyet çok önemlidir. Bu durumu da göz önüne aldığında araçların hafifletilmesi ve dayanıklılığının artırılması gibi iki temel başlık ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada hafiflik ve dayanıklılığın sağlanması amacıyla otomobillerde tercih edilen Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikleri (AHSS), bu çelik gurubundan Çift Fazlı (DP), Dönüşüme Dayalı Plastisite (TRIP) ve Martenzitik (MS) çeliklerinin Direnç nokta kaynağı (DNK) ile kaynatılması, yapılan birleştirme işleminin mekanik özellikleri ve ulusal/uluslararası standartlara göre bu kaynakların kabul kriterleri incelenecektir. Altı bölüm olarak hazırlanan bu çalışmada; Birinci bölüm çalışmanın giriş bölümü olmak üzere ikinci bölümde Direnç Nokta Kaynağı tanımı, önemine değinilmiştir. Üçüncü bölümde Gelişmiş yüksek mukavemetli çelikler (AHSS), bu gruba üye olan ve deneylerde kullanılan DP, TRIP ve MS çeliklerinin birtakım özellikleri tanımlanmıştır. Dördüncü bölümde kullanılan materyel ve yöntem değerlendirilmiş, beşinci bölümde ise yapılan deneysel çalışmalar ile sonuçları ve son bölüm olan altıncı bölümde ise yapılan deneylerin sonuçları irdelenmiştir.

BÖLÜM 2. DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI

2.1. Direnç Kaynağı ve Prensibi

1877’de Amerika Birleşik Devletlerin’de tesadüfen keşfedilen direnç nokta kaynağı seri imalata uygun ve oldukça tercih edilen bir kaynak yöntemidir. Kaynak işlemi, bir butona ya da pedala basarak makineyi devreye sokan ve çıkaran operatörler tarafından hızla yapılır. Bu nedenle diğer yöntemlere kıyasla kaynak başına düşen işçilik masrafı bu yöntemde oldukça düşüktür. Ancak makine teçhizatın maliyetleri açısından karşılaştırıldığında daha pahalıdır. Bu kaynak yönteminde, yardımcı malzeme kullanılmadığından, hafiflik, yüksek kaynak dayanımı, estetiklik, özel beceriye ihtiyaç duyulmaması ve kaynak hızının oldukça yüksek oluşu gibi sağladığı artı nedenlerle, şimdilerde otomotiv başta olmak üzere birçok sektörde büyük ölçüde kullanılmaktadır [1,2]. Direnç Nokta Kaynağı, kaynatılacak plakalarından geçen akıma karşı, kaynatılacak plakaların gösterdiği dirençten elde edilen ısı ve kaynak bölgesine uygulanan baskı kuvveti ile gerçekleştirilen bir yöntemidir. Isı, ara yüzeyde Joule kanununa göre oluşur (Denklemler 2.1).

$$Q = K \cdot I^2 \cdot R \cdot T \quad (2.1)$$

Burada, Q oluşan ısı, K ısı sabiti, I kaynak akımı, R akımın geçtiği devredeki elektrik dirençlerinin toplam değeri ve T ise akımın devrede kalma zamanıdır [1]. İfadede yer alan direnç değeri düşük olduğundan, gereken kaynak ısını üretebilmek için yüksek şiddette akım gerekmektedir. Gereken akım transformatörlerden sağlanır. Baskı kuvveti, aynı zamanda kaynak akımını da ileten elektrotlar vasıtasıyla uygulanır.

Direnç kaynağı yöntemleri üç gruba ayrılmaktadır [1,2];

1. Nokta kaynak
 - a. Kabartılı nokta kaynak
 - b. Normal nokta kaynak
2. Dikiş kaynak
 - a. Aralıklı dikiş kaynak
 - b. Sürekli dikiş kaynak
3. Alın kaynak
 - a. Yakma alın kaynak
 - b. Basıncı alın kaynak
 - Ön ısıtmalı yakma alın kaynak
 - Ön ısıtmasız yakma alın kaynak

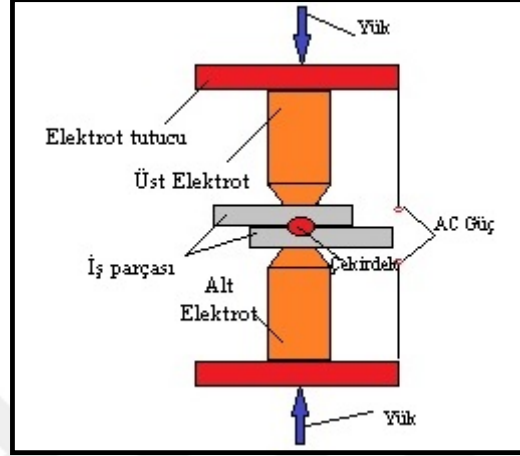
Kullanılan tüm direnç kaynak yöntemleri, ideal akım miktarı ve kaynak süresi kombinasyonuna ihtiyaç duyar. Akımın sürekliliği, tercih edilen yöntemeye uygun olarak şekillendirilmiş elektrotların uyguladığı baskı kuvveti sayesinde gerçekleşir.

Kaynak işlemi, sınırı belirli katı metalin erimesi için gereken ısıyı sağlamak ve bu metalin baskı altında tekrar katılaşması ve soğutulmasıyla gerçekleşir. İş parçasının ısıtılma ve soğutulma hızına bağlı olarak oluşan ısı kayıplarının mümkün olduğunca düşük seviyelere ulaşması için bu hızların yüksek olması istenir [1,3].

2.2. Direnç Nokta Kaynağı ve Prensibi

Direnç nokta kaynağı, elektrotların uyguladığı kuvvet sayesinde bir arada tutulan kaynatılacak plakalardan, geçen akıma karşı kaynatılacak plakaların ortaya koyduğu dirençten sağlanan ısı ile parçaların bölgesel olarak ertirilip basınç yardımı ile birleştirilmesine dayanan bir yöntemdir [3].

Akım konsantrasyonu bölgesinde temas eden yüzeyler akımın kısa süreli pulsu ile ısıtılarak kaynak metalinde erimiş çekirdek meydana getirir. Akım kesildiğinde, kaynak bölgesi hızlı bir şekilde soğuyup katılaşır ancak elektrot kuvvet uygulanmaya devam eder. Kısa sürede sonlandırılan her kaynaktan sonra elektrotlar geri çekilir [1].



Şekil 2.1. Direnç Nokta Kaynağı

Kaynak dikişinin boyut ve şekli elektrot uçlarının boyut ve şekliyle sınırlıdır. İç yüzeylerde kaynak çekirdeği oluşur fakat tamamen dış yüzeylere doğru genişlemez (Şekil 2.1.). Düzgün bir nokta kaynağındaki çekirdeğin kesiti oval şekilde, üstten görünüşü ise elektrot ucu şeklinin aynı olup (çoğunlukla yuvarlak), yaklaşık olarak aynı boyuttadır [4]. Elektrot gücüne dayanabilecek yeterli esas metal olmasını ve kaynak sırasında yerel distorsiyonun kaynaktan metal sıçramasına neden olmamasını sağlamak için, noktalar iş parçasının kenarından yeterli uzaklıkta olmalıdır. Ayrıca, komşu nokta kaynakları arasındaki aralık, akım şöntlenmesini önleyecek değerde olmalıdır [1,4].

2.2.1. Kaynak donanımı

Az karbonlu çeliğin kaynağında kullanılan direnç nokta kaynağı makinesi, 220 ya da 440 v'luk trafolardan çekilen ve 2 ila 20 V'a düşürülen tek veya üç fazlı 50 (ya da 60) periyotluk alternatif akım, her kaynak sırasında direkt olarak elektrotları beslemektedir [1].

Direnç nokta kaynağı makineleri genellikle aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır;

1. Elektrik devresi: Kaynak transformatörü, kademe butonu ve sekonder devreden oluşmaktadır. Sekonder devre, kaynak akımını kaynatılacak plakalarına yönelten elektrotları içermektedir.
2. Kontrol teçhizatı: Akımın geçmesi için gerekli olan süreyi başlatır ve zamanlar. Ayrıca kaynak akımını ayarlamasını yapan transformatör, kademe anahtarının yerine ya da ek olarak ta kullanılabilir. Kontroller, başlatma, otomatik ayarlama ve kaynak kuvveti ve akımının kesilmesi dahil olmak üzere, makinenin çevrimini sıralayabilir, zamanlayabilir ve ayarlayabilir.
3. Mekanik sistem: Tezgah, fıkstürler ve kaynatılacak plakaları tutan, kenetleyen ve kaynak kuvvetini uygulayan diğer ekipmanlardan oluşmaktadır [4],

2.2.2. Direnç kaynak makinelerindeki kontrol düzenleri

Direnç kaynağı makinelerinde kontrolörler üç fonksiyonu yerine getirir: (1) akımın kaynak transformatörüne akışını başlatma ve durdurma, (2) akımın şiddetini kontrol etme ve (3) kaynak makinesinin mekanik operasyonlarını sıralayıp zamanlama ve kontrol etme. Kontrolörler üç gruba ayrılır: kaynak anahtarları, zamanlama, sıra kontrolörleri ve akım kontrol, ayarlayıcıları [5].

Kaynak anahtarları elektrik güç devresini başlatmak ve kesmek için kullanılan cihazlardır. Kaynak anahtarı, kademe anahtarının en üst pozisyonunda elektrik güç hattından makineye maksimum girişi karşılamaya yetecek kadar fazla olmalıdır. Direnç kaynak makinelerinde mekanik, manyetik ve elektronik olmak üzere üç tür anahtar kullanılmaktadır. Kaynak makinesinden geçen akımın süresi kaynak zamanlayıcısı ile kontrol edilmektedir.

Kaynak makinesinin tüm çalışma devri, bir sıra kontrolü ya da zamanlayıcısı tarafından zamanlanır ve kontrol edilir. Kaynak transformatörünün primer devresindeki kademe anahtarı, kaynak akımının ayarlanmasında trafo sarım oranını değiştirmek için kullanılmaktadır. Orta seviyede bir ayarlama gerektiğinde ya da kaynak akımının ince tertibatı için elektronik ısı kontrolü kullanılmaktadır.

Artan akım kontrolü, kaynak akımını düşük bir değerden açmak ve tam değerine varıncaya kadarki gelişme hızını kontrol etmek için, azalan akım kontrolü ise, kaynak akımının değerini, kaynak çevriminin sonunda, en üst değerden düşük bir değere indirmek için kullanılmaktadır [5].

Elektronik akım regülatörleri, hat gerilim değişimlerini veya kaynak makinesinin kollarının arasına manyetik malzemeler girmesinden dolayı meydana gelen empedans değişikliklerini karşılayarak, baskın hallerde sabit kaynak akımı sağlamak için kullanılmaktadır. Gerilim regülatörleri, basit kaynak operasyonlarında normalde regüle edilmemiş akımın $\pm\%20$ değişimine neden olacak durumlarda, kaynak akımını ayarlanmış değerinin $\pm\%2$ 'si gibi bir aralıkta tutmak üzere tasarlanmıştır. Bu cihazların cevap süresi yaklaşık 3 periyot olduğundan, ısının değişimi için zaman kazandırması açısından, kaynak akımının 6 periyot olması tavsiye edilmektedir [4].

2.2.3. Direnç kaynağı makinesi teçhizatı

Direnç kaynak makinesinde kullanılan transformatör, primer bobindeki yüksek gerilimli, düşük akım şiddetindeki alternatif akımı, sekonder bobindeki düşük gerilimli, yüksek şiddetli akıma çevirme prensibine göre çalışır. Primer sargı, güç kaynağına bağlı olup, tüm bobinde izole edilmiş şerit bakırdan meydana gelmektedir. Sekonder sargı, yüksek akımları üzerinden geçirdiği için büyük kesite sahiptir. Düşük kapasiteli teçhizat hariç, sekonder sargı kapalı devrede dolaşan su yardımı ile soğutulmaktadır [1].

Direnç kaynak makinelerinin kapasitesi belli bir iş çevrimi için kVA ile ifade edilmektedir. Standart olarak, direnç kaynak transformatörlerinin kapasiteleri %50'lik iş çevrimine göre tanımlanmaktadır. Bu iş çevrimi kapasitesi, ısı kapasite olup, belli bir sıcaklığı artmadan, transformatörün belirlenmiş bir zaman periyodunun (çoğunlukla 1 dk.) belli bir yüzdesini sağlayabileceği güç miktarını belli eder. %50 iş çevrimi için, 100 kVA kapasiteli bir kaynak makinesi, her dakikanın 30 saniyesi için, transformatör ekipmanları tasarlandıkları sıcaklıkların üstüne çıkmadan, 100 kVA sağlarlar [1].

Bir kaynak transformatörünün kVA kapasitesi, sekonder açık devre geriliminin sekonder akımla (kaynak akımı) çarpımının 1000'e bölümünden elde edilir. Kademe ayarı primer sargıdaki etkili sarım adedini ve böylece sekonder gerilim ve akımı belirlememizi sağlar. Kademe anahtarları akım geçişi esnasında çalıştırılmamalıdır çünkü kontaklar arasında oluşan ark temas yüzeylerinde hasar oluşmasına sebebiyet verir [4].

2.2.4. Sekonder devre karakteristikleri

Sekonder devre, kaynak akımını transformatörden elektrotlara ve bu sayede iş parçasına iletimi sağlar. Sekonder devre veya sekonder çevrimin boyutları, büyük bir ölçüde kaynak makinesinin çıkış performansını belirlenmesinde etkin rol oynar.

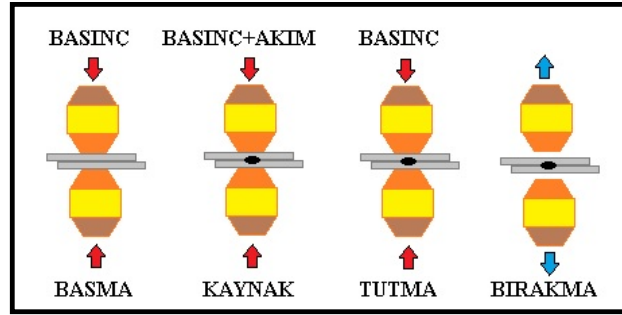
Sekonder çevrim, yaklaşık olarak, kollar arasındaki mesafe ile kol uzunluğunun çarpımına eşittir. Sekonder devrenin elemanlarında düşük elektrik iletkenliğine sahip malzemeler tercih edilmektedir. İletkenler büyük kesitli olmalı ancak gereğinden uzun olması istenmez. Kol uzunluğu ve kollar arası mesafe gerekenden büyük olması durumunda iş parçasının tutulabilmesi azalmaktadır.

Makinenin kolları arasına giren manyetik malzeme, boyut ve kalınlığına bağlı olarak sekonder akımın düşmesine sebebiyet verir [4].

2.3. Kaynak Çevrimi

Piyasada kullanılan bütün direnç kaynak yöntemlerinde, ideal bir akım şiddeti ve kaynak süresi kombinasyonunu sağlamak gerekir [6]. Isıtma ve soğutma hızlarının, zaman kazancı sağlamak bakımından oldukça hızlı olması istenir.

Nokta kaynağı genel olarak dört adımdan meydana gelmektedir ve bunlar, basma, kaynak, tutma ve bırakma süreleridir [1].



Şekil 2.2. Direnç nokta kaynağı çevriminin aşamaları

Bu sürelerle bağlı olarak direnç nokta kaynağı çevriminin aşamaları Şekil 2.2.'de gösterilmiştir;

1. Basma süresi: Elektrot kuvvetinin uygulanmaya başladığı an ile akımının devreye girdiği an arasında kalan süredir. Bu aralık, solenoidin valf vasıtasıyla üst elektrotu iş parçasına yanaştırması ve elektrot kuvvetinin uygulaması için zaman sağlar. Bu zaman, parçaların yakın temasını sağlamaya yetecek kadar olmalıdır.
2. Kaynak süresi: Kaynak akımının devrede kaldığı süredir. İnce taneli yapı çeliklerinin birçoğunda, normal olarak uygulanandan biraz daha uzun kaynak süresi seçilmesinin kaynak kabiliyeti eğrisini genişlettiği ve böylece kabul edilebilir kaynak akım sınırlarını arttırdığı bilinmektedir [6].
3. Tutma süresi- Kaynak akımının kesilmesinden sonra, iş parçası katılaşana kadar elektrot kuvvetinin etkisinin devam ettiği zaman aralığıdır. Bazı ince taneli yapı malzemelerinde tutma süresi hassastır 25 ile 50 arasındaki periyot sayılarında, bu malzemeler soyuma testlerinde ara yüzeyde yırtılma eğilimi görülmüştür.
4. Bırakma süresi: Tutma zamanının bitiminden bir sonraki çevrimdeki basma zamanının başlangıcına kadar geçen, elektrotların iş parçasıyla temasta olmadığı zaman aralığıdır.

3 mm'den daha kalın sacların kaynağı için gerekli olan yüksek kaynak akımları ve uzun kaynak süreleri, elektrotların aşınmasına neden olabilir. Isı, kaynatılacak plakalarına oranla elektrotlardan daha hızlı uzaklaşmaktadır.

Bu yüzden, soğuma zamanı sırasında, kaynak akımı kesikken, kaynatılacak plakalar ısının çok azını kaybederken, elektrotlar çoğunu uzaklaştırır. Her biri diğerini soğuma periyoduyla takip eden bir seri puls ile elektrot sıcaklığı güvenli bir seviyede kalarak, kaynatılacak plakaların kaynak sıcaklığına getirilmesi uygundur [1].

Bir kaynak çevrimine ilave edilebilecek diğer iki unsur dövme ve sonradan tavlama. Her ikisi de, sertleştirilebilir karbon ve alaşım çeliklerinde çoğunlukla tanecikleri inceltmek amacıyla kullanılmakta ancak az karbonlu çelikte pek kullanılmamaktadır. Kaynaktan sonra, temperleme akımının uygulanmasından önce, kaynağın soğumasını sağlayan kısa bir gecikme ya da akım kesme periyodu bulunur [2,3]. Akımın düşük bir değerde olduğu sonradan tavlama işlemini bir tutma süresi takip etmektedir. Sonradan tavlama boyunca elektrot kuvveti artırılabilir. Bu artan kuvvet dövme kuvveti adını alır ve sonradan tavlama ve tutma süreleri boyunca uygulanır.

Yukarıda bahsedilen çevrimlere ek olarak ön tavlama sonrası kaynak da uygulanmaktadır. Plakalara, kaynak akımından önce, kaynak akımından daha düşük bir şiddette bir ön tavlama akımı uygulanması ile işlem gerçekleştirilir. Böylece kaynak bölgesi kaynak sıcaklığının altında bir sıcaklığa ulaşır. Bu işlem yüksek mukavemetli, dolayısıyla yüksek elektrot kuvveti gerektiren plakaların daha düşük elektrot kuvvetinde kaynak yapılabilmesini sağlar. Ayrıca bu işlem kaynak akımı sonrası soğuma hızlarını düşürmede oldukça etkilidir [1,4,5].

2.4. Direkt ve Seri Kaynak

Direnç nokta kaynağında sekonder devredeki elektrot ve kaynatılacak plakaların düzeni kaynağın direkt ya da seri olarak tanımlanmasını sağlar. Çekirdekte etkili bir akım şöntlenmesine neden oluşturmayacak kadar sekonder akımın tamamı oluşan kaynak çekirdeği veya çekirdeklerinden geçerse, kaynak direkt olarak tanımlanır. Sekonder akımın bir kısmının kaynak çekirdeğini atlamasına izin veren bir atlama yolu mevcut ise kaynak seri olarak tanımlanır. Sekonder devrenin iki metalin direkt ve seri kaynağı için bazı düzenlemeleri aşağıda anlatılmaktadır. Bu düzenlemeler üç veya daha fazla metalin kaynağında da uygulanabilir [4].

2.5. Uygulama Alanları

Direnç nokta kaynağı, tasarımların bindirme bağlantılarına müsaade ettiği durumlarda ve sızdırmazlığın talep edilmediği durumlarda, 3 mm'ye kadar sacların montajında yoğun olarak kullanılmaktadır. Yapılan işlem, bakım için sökmenin gerekmediği durumlarda, perçin ya da vida gibi bağlantı elemanlarına tercihen kullanılmaktadır. Montaj için ayrı bir bağlayıcı gerekmediği için diğer yöntemlere nazaran direnç nokta kaynağı oldukça hızlı ve ekonomiktir.

Bu metot genel çerçevede otomobil, kabin, petek, mobilya ve benzeri ürünlerin, karbon oranı düşük sac parçalarının birleştirilmesinde kullanılır. Paslanmaz çelik, alüminyum bakır ve bunların alaşımları da direnç nokta kaynağı yapılabilir. Bu yöntemin en yaygın uygulama alanı, aynı kimyasal bileşime ve kalınlığa sahip sacların birleştirilmesi olmasına karşılık, bu işlem ikiden fazla metal sacın birleştirilmesinde, kalınlığı veya bileşimi (ya da her ikisi) ayrı metallerin kaynağında ve başka bir metalle kaplanmış çeliğin birleştirilmesinde de tercih edilmektedir [4].

2.6. Avantajları ve Sınırlamalar

Nokta kaynağının başlıca avantajları, otomasyona uygunluğu ve hızlı sonuç alınabilir bir yöntem olması ve çok fazla deneyim gerektirmiyor olması gibi sıralanabilir. Montaj hatlarında diğer üretim operasyonlarıyla entegre edilebilir. Akım, zamanlama ve elektrot kuvvetinin otomasyonu sayesinde yüksek üretim hızlarında kaliteli kaynaklar yapılabilir [7].

Bahsedilen avantajlarının yanında bu yöntemin bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Bakım onarım işlemleri için sökme veya tamir çok zordur. Bindirme bağlantısı, ark kaynağıyla yapılan bağlantıyla karşılaştırıldığında, montajda zorlukları ve maliyetleri beraberinde getirir. Ekipman maliyetleri birçok ark kaynağı metodundan daha pahalıdır [4].

Az zaman ve oldukça yüksek akım gereksinimleri, özellikle tek fazlı nokta kaynak Makinelerinde, yüksek güç talepleri meydana getirmektedir. Çelikte 5 ilâ 20 V'ta 5000 ilâ 20000 A'e ihtiyaç duyan bir direnç nokta kaynağı, yüksek miktarda kVA ihtiyaç duymaktadır. Çeliğe nazaran daha iletken olan malzemelerin direnç nokta kaynağında bu talep daha da yüksektir [4].

Plakalar arasında meydana gelen çekirdeğin etrafındaki çentikten ötürü kaynaklar düşük yorulma ve gerilme dayanımına sahiptir. Kaynak bağlantısından sacın sahip olduğu dayanımının tamamı beklenmez, çünkü ergime süresiz ve yükleme de bindirme tipi konstrüksiyondan dolayı asimetriktir [1,4].

2.7. Kaynak Çekirdeğinin Oluşumu

Kaynağın meydana gelişindeki ana prensip Joule yasasıdır. Bu yasadaki R , kaynak akımı bir elektrottan öbürüne geçerken karşılaştığı elektrik dirençlerinin tamamının toplanması ile elde edilir. Bu dirençler, elektrot ile plaka arası temastan dolayı oluşan direnç, elektrot direnci, plaka direnci ve plakalar arası temas direncidir. Uygulanan akıma karşı sistemde meydana gelen dirençleri, kullanılan malzemelerin dirençleri, temas dirençleri olarak tanımlamak mümkündür [1,4].

Malzeme dirençleri, kaynatılacak malzemenin özellikleri, elektrot çapı, plaka kalınlığı gibi faktörlere bağlı olarak akım yolunun büyüklüğüne, akımı güzergâhındaki sıcaklık değerine ve elektrotların sahip oldukları öz dirençlerine dayanır.

Alaşım elementleri malzemenin özgül direncini, saflığına oranla oldukça artırır. Artan bu direnç, yüksek sıcaklıklarda gözle görünür şekilde azalma gösterir. Yüksek sıcaklıklarda alaşımlı ile saf malzemenin özgül direnci arasındaki fark oldukça azalır. Özgül direnci yükseltmek için, soğuk şekil verme ve su verme işlemleri uygulanabildiği gibi düşürmek içinde tavlama veya temperleme işlemleri uygulanarak ilk değerine kadar indirilebilir [3,4].

Gerçekte, plakaların temas çapı elektrot çapına eşit olmamakla birlikte, iki plaka için kaynak işlemi başında toplam malzeme direnci Denklem 2.2 ile ifade edilebilir [1].

$$2R_m = \frac{8.s.p}{\pi.d.b.} \quad (2.2)$$

Burada, R_m malzeme direncini, s plaka kalınlığı (mm), p malzemenin özgül direnci ($\text{mm}^2.\text{ohm/m}$), d akım yolu çapı (elektrot çapı) (mm) ve b kesik koninin taban çapıdır (mm).

Kaynak akımı öncesi uygulanan elektrot kuvveti arttıkça, temas yüzeylerindeki oksit filmlerinin parçalanması, temas noktalarının sayısı ve alanlarının artması nedeniyle temas direnci azalır. Isı, bölgelerin her birinde o bölgenin göstermiş olduğu direnciyle orantılı bir şekilde meydana gelmektedir. Bu dirençlerden en büyük değere sahip olanı, plakalar arası temas direnci olduğundan, ilk başta en yüksek ısı burada meydana gelir. Bu kısımda sıcaklığın artması bölgenin öz direncini de arttıracığından, ısı üretim hızı diğer bölgelere oranla daha yüksektir[1].

Bu nedenden, erime ilk önce plakalar arasındaki temas yüzeyinde başlar ve plaka içine doğru yönelir. Kullanılan elektrotların ısı iletkenliğini yüksek, elektrik direncinin düşük olması ve soğutmanın su yardımıyla yapılması nedeniyle, elektrotlarla plakalar arasında kalan temas yerinde herhangi bir ergime oluşmaz [6]. Bahsedilen bu esasa dayanarak oluşan kaynak çekirdeklerinin, kaynaklanan sac kalınlığına bağlı olarak boyutları değişmektedir.

2.8. Direnç Nokta Kaynağının Parametreleri

2.8.1. Kaynak akımı

Kaynak akımı, transformatör sekonder sargısı, sargıyı kollara bağlamada kullanılan esnek bantlar, kollar, elektrotlar ve iş parçasından oluşan sekonder devreden geçer. Isının bir kısmı elektrotlardan ve kaynatılacak plakalardan iletim, taşınım ve ışıyım yoluyla kaybolur. Bu kayıpların büyüklüğü genelde bilinmemektedir [8].

Çeliğin ısı iletimi, bakırın yaklaşık olarak %12'sidir. Bu yüzden, çeliğin bakır esaslı elektrotlarla yapılan kaynağında, yeterli kaynak akımı kullanıldığında, kaynatılacak plakaların ara yüzeyinde oluşan ısı, kaynak bölgesinden, elektrot uçlarında meydana gelen ısıнын su soğutmalı elektrotlara iletilmesine oranla, daha yavaş uzaklaşmaktadır. Bu nedenle, önce kaynatılacak plakaların ara yüzeyi erime sıcaklığına ulaşmakta ve kaynak bu ara yüzeyde oluşmaktadır [4,7]. Akım yoğunluğu artınca, elektrot temas yüzeylerini birkaç yüz dereceden fazla ısınmasına gerek kalmadan kaynak oluşturmak için, kaynak süresi azaltılabilir. Kullanılacak kaynak akımı için bir de üst sınır vardır. Seçilen kaynak akımı çok yüksek ise, elektrotlar arasında kalan plakanın tamamı, kaynak bölgesinin ergime sıcaklığına ulaşması sonucunda, plastik deformasyon bölgesine kadar ısınmış olur ve elektrotlar derinlemesine metale gömülür. Elektrotların yüzeyleri aşırı ısınabilir ya da yanabilir. Bu durum özellikle de, akım sıçramaya neden olacak kadar yüksek olması durumunda gerçekleşmektedir. Üst sınırın üzerindeki değerlerde, kaynak bölgesindeki erimiş metal, plakalar arasından dışarı doğru sıçrar. Bu sıçrama, kaynak dikişinde dayanıklılığın düşmesine sebebiyet verir. Elektrotlar ile plakalar arasında oluşan temas yüzeylerinde ergime olur ve bu da elektrotların plakalara yapışıp tahrip olmasına neden olur. Bunun sonucunda elektrotların ömrü azalır. Belli bir elektrot için, düşük kalitede kaynaklara neden olan, bir veya daha fazla iş parçasında sıcak metalin yapıştığı ya da sıçradığı, akımın bir üst sınırı vardır. Maksimum nokta dayanımı, sıçramanın meydana geldiği değerin biraz daha altındaki akım yoğunluğunda kaynakla elde edilir. Bu akım, imalatı yaparken bu sınır göz önünde bulundurularak ayarlanmalıdır [1,4].

2.8.2. Kaynak süresi

Direnç nokta kaynağı sırasında plakalar ve elektrotlardaki ısı dağılımı oldukça önemlidir. Isı (enerji) formülü toplam direncin sabit kalması şartıyla, devrenin herhangi bir kısmında meydana gelen ısıнын hem kaynak süresi (akımın geçtiği süre) hem de kaynak akımının karesi ile doğru orantılı olduğunu belirtmektedir. Isı transferi zamanın bir fonksiyonu olmasından ötürü, ideal çekirdeğin gelişmesi için gereken süre, akım istenildiği kadar yükseltilsin, belirli miktarda azaltılabilir.

Temas yüzeylerinde ısı oluşumu çok hızlı olduğunda, özellikle elektrot temas yüzeylerinde, oyuklar ve sıçramalar meydana gelir. Kaynak akımı ve basınç artırılarak kaynak süresinin belli bir kısım azaltılması mümkündür. Akımdaki yükselmeden dolayı oluşan sıçramayı önlemek için yüksek basınç ihtiyacı vardır. İdealden daha kısa kaynak süresi ve daha yüksek akım şiddeti ya da daha uzun kaynak süresi ve düşük akım şiddeti seçilerek te aynı nokta çapını sağlamak mümkündür. Bunlardan birincisi kısa süreli kaynak, ikincisi ise uzun süreli kaynak olarak tanımlanır [1].

Sağladığı büyük faydalar yüzünden, kısa süreli kaynak tekniği çok gelişmiş olup genellikle kullanılmaktadır. Önceleri, çok ince plakalar için bile birkaç saniye olan kaynak süresi, kontrol organları ve akım devrelerindeki büyük gelişmelerden sonra birkaç periyoda kadar indirilmiştir.

Kaynak zamanı azaldıkça ısı kayıpları da azaldığından işlemin ısı veriminde artış gözlenmektedir. Az karbonlu alaşımsız çeliklerin kaynağında, kısa süreli kaynak için gerekli kaynak süresi Denklem 2.3 ile belirlenebilir [1,4].

$$T = 8 \cdot s \quad (2.3)$$

Yukarıdaki bağıntıda, T (periyod) kaynak süresi, s (mm) plaka kalınlığıdır. 50 Hz frekanslı bir şebekede 1 periyod 1/50 saniyedir. Kısa süreli kaynakta işlemin hızlı olması sebebiyle yalnızca kaynak bölgesi ergime sıcaklığına kadar çıkar ve plakaların yüzeylerinde aşırı ısınma olmaksızın kaynak işlemi biter. Bu nedenle, elektrotların temas yüzeyleri bozulmaz.

Uzun süreli kaynakta ise, plakaların diğer bölgelerinde sıcaklık oldukça artar. Bunun sonucunda, plakaların dış yüzeyleri yumuşar ve elektrotların plaka içine gömülmesi ile derin izler bırakır [1,7].

Kısa süreli kaynak, ısının çok sınırlı bir bölgede yoğunlaşmasını gerektiren özel tasarımların kaynağında ve alüminyum benzeri ısı iletkenliği çok yüksek olan malzeme gruplarının kaynağında kullanılmaktadır.

Kaynak süresi, kaynak işleminde akımın kesilmesinin ardından kaynak bölgesinin soğuma hızını da etkilemektedir. Uzun süreli kaynakta, kaynak bölgesine komşu bölgelerin sıcaklığı arttığından, sıcaklık farkı, dolayısıyla da kaynak sonrası soğuma hızı oldukça düşer. Bu nedenle, %0,3 karbon içeren çeliklerde sertleşmeyi önlemek için uzun süreli kaynak kullanılır. Diğer yandan, elektrotlar tarafından sıkıştırılması zor olan parçalar için ise uzun süreli kaynak tercih edilmektedir [1,4].

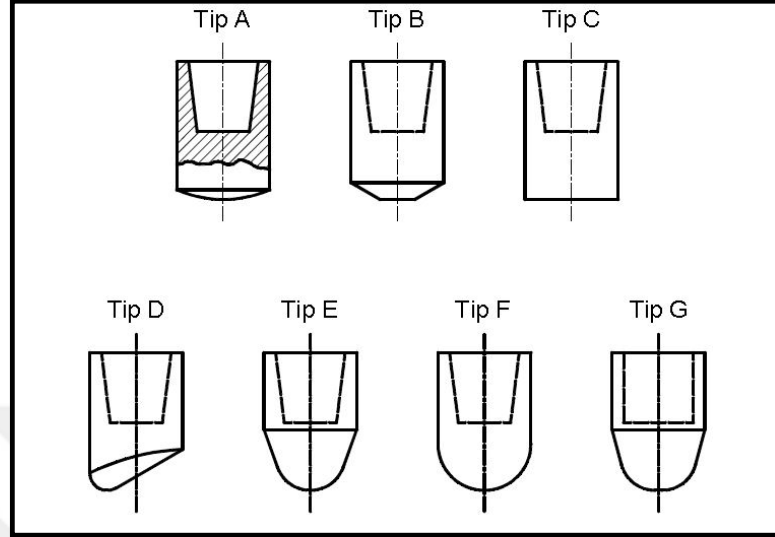
2.8.3. Elektrot malzemesi ve boyutları

Saf bakır bu işler için kullanılacak en iyi iletkenidir. Bakır elektrotlar, üstün mekanik özelliklerinin yanında, ihtiyaç duyulan elektrik iletkenliğine sahip olduğundan benzer malzemeler üretilene kadar, direnç nokta kaynağı elektrotu olarak yaygın bir şekilde tercih edilmiştir.

Akım şiddeti, elektrot kuvveti, kaynak hızı gibi üstün özelliklerin kullanıldığı yöntemlerin gelişmesi, saf bakırın elektrot malzemesi olarak kullanımını engellemiştir. Statik ve dinamik basma kuvvetlerine karşı düşük mukavemet ve düşük yumuşama sıcaklığına sahip soğuk çekilmiş bakır, istenmeyen özelliklerini ortadan kaldırmak için daha iyi fiziksel ve mekanik özelliklerine sahip bir seri bakır alaşımı geliştirilmesini tetiklemiştir. Genellikle, alaşımın sertliğinin artması, elektriksel ve ısıl direncin artmasına neden olur [1,8].

Bu yüzden, yapılacak uygulama için belirlenen elektrot alaşımının seçimi, onun mekanik özelliğine bağlı olarak değişkenlik kazanan elektriksel ve ısıl özelliklerin de göz önünde bulundurulması ile gerçekleştirilebilir. Örnek olarak, alüminyum kaynağında tercih edilen elektrotların, yüksek basma dayanımı yerine yüksek oranda iletkenliğe haiz olması istenir. Belirtilen duruma karşılık olarak, paslanmaz çeliğin kaynağında kullanılan elektrotlarda ise maksimum basma dayanımı elde etmek için iletkenlik değerinden az da olsa fedakârlık etmek gerekir.

Elektrotların şekil ve boyutları, kaynak yapılacak kaynatılacak plakaların cinsine, şekil ve boyutlarına göre saptanır (Şekil 2.3.).



Şekil 2.3. TS EN 25822 standardına göre elektrot uç tipleri [9].

Standart elektrotlar içinde en çok tercih edilen, kesik koni uçlu (Tip A ve B) ve küresel (Tip E ve F) olanlardır. Küresel uçlu elektrotlar tercih edildiğinde, elektrot temas yüzeyinin iş parçası yüzeylerine paralel olarak, hassas bir biçimde ayarlanması beklenir. Bu sebepten, küresel uçlu elektrot, üst elektrotun dairesel hareket yaparak iş parçasına yaklaştığı kaynak makinelerinde rahatlıkla kullanılabilen bir elektrottur. Bu elektrot mükemmel bir sıkıştırma ve iş parçası yüzeylerinde kaynak sonrası daha iyi bir görünüm sağlar. Soğuma hızları daha yüksek olduğundan dolayı alüminyum ve alaşımlarının kaynağında tercih edilir [1,9].

2.8.4. Elektrot kuvveti

Elektrot kuvveti veya kaynak kuvveti, kaynak çevrimi tamamlanana kadar elektrotlar tarafından kaynatılacak plakalara etki eden değerdir. Genellikle statik bir değer kabul edilerek ölçülen ve tanımlanan elektrot kuvveti, işlem sırasında dinamik kuvvettir ve kaynak işlemini gerçekleştiren makinenin hareketli parçalarının ataletinden ve sürtünmesinden etkilenir [5].

Nokta direnç kaynağı ile kaynatılacak plakalar kaynak bölgesinden akım geçişini sağlayacak biçimde sıkı montaj edilmelidir. Elektrotun baskı kuvvetinin artması iş metalinin temas direncini azaltacağı ve kaynak akımı sayesinde kaynatılacak plakaların kaynak bölgesi yüzeyleri arasında meydana gelen toplam ısıyı azaltacağı için, elektrot kuvveti çok yüksek seçilmemelidir [1]. Bununla birlikte, yüksek elektrot kuvveti, plakaların istenmeyen şekilde çarpılmasına neden olur. Malzeme ve plaka kalınlığına (s : mm) bağlı olarak elektrot kuvvetinin (P : kN) belirlenmesinde alaşımsız çelikler için Denklem 2.4, yüksek alaşımlı çelikler için Denklem 2.5 ve Alüminyum alaşımları için Denklem 2.6 kullanılır.

$$\text{Alaşımsız çelikler için } P = 2 \cdot s \quad (2.4)$$

$$\text{Yüksek alaşımlı çelikler için } P = 3,5 \cdot s \quad (2.5)$$

$$\text{Alüminyum alaşımları için } P = 2,5 \cdot s \quad (2.6)$$

Elektrot kuvveti, cihazın kaynak akımı ile uyumlu olmalı ve tekrar oluşmasına yetecek kadar uzun kaynak zamanının kullanımını sağlamalıdır. Ayrıca, kaynatılacak plakalar kaynak alanında çok fazla elektrot kuvvetine maruz kalmadan oldukça yakın temasta olmalıdır. Kaynatılacak plakalar, kaynak bölgesindeki temas çok yakın olmayacak şekilde deforme olmuşsa, deformasyonu yenebilmek için çok yüksek kuvvet gerekebilir. Özellikle pres parçaların, şekilli kaynatılacak plakaların veya iş metalinin kalın kesitlerinin nokta kaynağında, kaynak dayanımı ve kalitesindeki farklılıklar, kaynatılacak plakaların uygun bir şekilde bir araya getirmek için gereken elektrot kuvvetindeki farklılıklardan ortaya çıkmaktadır. Bu, özellikle de ince taneli yapı çeliklerinin kaynağında geçerlidir. Bu malzemelerin yüksek dayanımından kaynaklanan, oldukça yüksek geri yaylanmaya sahiptirler ve bu yüzden az karbonlu çeliğe oranla daha yüksek elektrot kuvveti gerektirirler. Bazen, kaynatılacak plakaları bir arada tutabilmek için normalde tercih edilenden daha uzun bir sıkıştırma süresi gerekmektedir. Ayrıca, geri yaylanma olasılığından dolayı, tutma süresi kaynak metalinin katılaşmasına imkan tanıyacak kadar uzun olmalıdır. Bu yüzden, özellikle, akma dayanımları 700 MPa'nın üzerindeki ince taneli yapı çeliklerinin bazıları gibi, kısmen kabul edilebilir kaynak akımı sınırına sahip alaşımlarda, elektrot kuvvetinde değişiklik yaparken oldukça dikkat edilmelidir [1].

Kaynak kuvveti, kaynak sırasında üç safhada da önemli bir rol üstlenmektedir. Basıncın sağlandığı safhada, elektrot kuvveti olarak, plakalar arasında oluşan temas direncinin ideal bir değerde, buna karşılık elektrot plaka temas direncinin düşük bir değerde kalmasına sebep teşkil etmektedir. Bununla birlikte plakaların, elektrotların altında belli bir bölgeye temas etmesini sağlayarak kaynak yerinin belirlenmesine olanak sağlar. Elektrot baskı kuvveti olarak tanımlanan kaynak kuvveti, kaynak işlemi sırasında, plakalar arasından sıçramaya çalışan sıvılaştırmış metali katı haldeki metal çukurunun içerisinde basınç altında tutarak, bu sıçramaya engel olmaktadır. Bekleme safhasında ise, kaynak bölgesinin sıcak ve sıvı halden soğuk ve katı hale dönüşmesi sırasında, iç gerilmeler nedeniyle ortaya çıkabilecek boşluk, çatlak gibi kusurların oluşumunu basma kuvveti yoluyla elemine etmektedir [1,4].

2.8.5. Kaynak noktası sıklığı

İlk kaynaktan sonraki ikincil nokta direnç kaynağı, kaynak akımının, ikincil kaynaktan ilk kaynağa atlamasına sebep olacak kadar yakın yani, ikinci kaynak ile ilk kaynak arasında yeterince mesafe bulunmaz ise şönt akımı (atlama) meydana gelir. Kaynak akımı iki yolun direnciyle ters orantılı olarak geçer. Akım bölünmesi, ikinci kaynak noktasında, esas metal direncinin ara yüzey direncine oranına doğrusal bir şekilde bağlıdır [1,7]. İkinci ve bunu takip eden kaynaklar yapıldığında, elektrotlar arasındaki metal bölünmüş devre olur; akımın bir bölümü metalden bir önceki kaynağa doğru hareket ederken, kalanı ikinci kaynak noktasındaki elektrot uçları arasındaki metalden geçer. İlk nokta kaynağına olan mesafe yeterince uzaksa, metalden direkt olarak geçenle karşılaştırdığında ilk nokta kaynağı boyunca olan yolun direnci yüksektir ve şöntlenme etkisi göz ardı edilebilir. İlk nokta kaynağına olan mesafe az ise akımın önemli bir kısmı ilk nokta kaynağına atlar. Bu atlama (kısa devre) sonucunda, çekirdek çapı ideal çapa ulaşamaz. Bunu önlemek için, d_n nokta çapı olmak üzere, nokta merkezleri arasındaki uzaklık $3d_n$ 'den büyük olmalıdır.

Elektrot uçları arasındaki malzemenin sıcaklığı artınca o noktadaki direnç artar ve böylece şöntlenme etkisine katılır. Yüksek elektrik direncine sahip metaller şöntlenme etkisinden daha az etkilenirler [1,5].

Az karbonlu çelik parçaların kaynağında minimum aralık, metalin kalınlığı, erimiş bölgenin çapı ve kaynak bölgesindeki yüzeylerin temizliğine doğrudan bağlıdır. Daha yüksek akım ve elektrot kuvveti, daha kısa kaynak süresi ve hızlı takip ile kaynaklar, önemli bir atlama olmadan, çeşitli tablolarla tavsiye edilen kaynak aralığından daha düşük bir değerle yapılabilir. Kaynaklar plakanın kenarına ya da flanşa çok yakın yapılırsa, elektrot basıncı ve ısıya dayanabilecek esas metal hacmi yetersiz olur. Bu, kaynaktan sıcak metalin uzaklaştırılmasına neden olacak şekilde, kenar boyunca etkili kuvvette düşüşe ve eşit olmayan ısınmaya neden olur. Nokta kaynakları dikey flanşa veya yan duvara çok yakın yapıldığında, elektrot ve iş parçası arasında arklanma meydana gelebilir ya da kıvılcımlanma açısından dolayı kaynak bölgesindeki yüzeylerde zayıf bir çökme oturma meydana gelebilir. Metal kalınlığından dolayı büyük çaplı elektrotlar ihtiyaç duyulduğunda eksantrik veya ofset uçlar tercih edilebilir. İki metal plaka arasındaki temas eden minimum bindirme, bir dereceye kadar elektrot çapı ve erimiş bölgenin çapını etkileyen metal kalınlığına bağlıdır [1,4].

2.8.6. Elektrot ve iş parçasının temas durumları

Kaynak kalitesi ve kabiliyetini etkileyen bir diğer faktör elektrotların ve kaynatılacak plakaların birbiriyle temas etme durumudur. Elektrotlar, iş metalinde kaynağın yapılacağı bölgeye dik, dolayısıyla birbirine paralel olmalıdır. Ancak iyi bir kaynak için bu koşul yeterli olmaz. Birbirine paralel olan alt ve üst elektrotun aynı ekseninde olması gerekir [1,2].

Birbirine paralel ancak aynı ekseninde bulunmayan alttaki ve üstteki elektrotlarla yapılan kaynaklarda dairesel bir bölge yerine çift dairenin kesişimi şeklinde bir alan görülür. Çünkü kaynak, prensibi gereği basıncın etki olduğu bölgelerde meydana gelmektedir [1].

Yukarıda belirtilen durumların yanı sıra bindirme ve kenar mesafelerinin de kaynak kalitesinde oldukça önemi vardır. İyi bir kaynak elde edebilmek için nokta kaynağının kenarlara uzaklığı en az çekirdek çapının yarısı kadar olmalıdır [13].

2.9. Kaynak Programları

Az karbonlu çelik, zaman, akım ve elektrot kuvvetinin geniş sınırlarında tatmin edici bir biçimde nokta kaynağı yapmak mümkündür. Makine kapasitesinden dolayı bu değişkenlerden herhangi birindeki sınırlamalar diğerlerinde çeşitli uygun ayarlamalar yapılarak telafi edilebilmektedir [1].

Daha önce denenmemiş direnç nokta kaynağı uygulamaları için en ideal koşulların belirlenmesinde faydalanılan adımların sırası aşağıda verilmiştir.

1. Elektrot kuvvetinin ilk seçimi: Bu, kaynak edilecek parça ve kullanılacak elektrotlar için seçilir. Elektrot kuvvetinin seçimini doğrulamak veya düzeltmek için yapılan deneme kaynaklarının akım, kaynak süresi ve tutma süresi ilk değerlerinin seçilmesinde rehber olarak da kullanılmaktadır.
2. Kaynak süresi ve tutma süresinin belirlenmesi: Belli sayıdaki kaynak süresi ve tutma süresi kombinasyonlarının her biri için çeşitli akım seviyelerinde yapılan deneme kaynaklarının değerlendirilmesi ile belirlenebilmektedir. Basma süresi kaynak denemelerinde kritik değildir ve çoğunlukla geniş sınırlardaki deney şartlarına imkan sağlayacak kadar uzun olacak uygun bir değerde sabit tutulur.
3. Elektrot kuvvetinin seçimi: Kaynak zamanı ve tutma süresinin belirlenmiş kombinasyonlarından yararlanarak ve geniş bir kuvvet sınırını kapsayacak sayıdaki elektrot kuvveti değerlerini kullanıp, farklı akım seviyelerinde kaynaklar yapılır.
4. Kaynak akımının seçimi: Belirlenmiş kaynak süresi, tutma süresi ve elektrot kuvveti kullanılarak, geniş bir akım sınırını kapsayacak akım seviyelerinde deneme kaynakları yapılır.
5. Şartların seçiminin doğrulanması: 1. ve 4. adımlarda belirlenen kaynak şartlarında, bu seçimleri doğrulamak ve kaynak kalitesi ve proses kontrolünde kullanımının güvenilirliği ile ilgili referans verisi oluşturmak için, deneme kaynakları yapılır. 1. ve 4. adımlardakine oranla tamamlanmış bir değerlendirme bu adımda gerçekleştirilebilmektedir [1,4].

1. ve 4. adımlardaki tatmin edici kaynak için olağan kriterler, penetrasyon, uygulamaya uygun çekirdek çapı ve dalma derinliğinin yanı sıra, gözeneklilik, çatlak, aşırı sıçrama gibi büyük kusurların olmamasıdır.

Beşinci adımdaki deneme çalışmalarının sonuçları eğer tatmin edici değilse, deney sonuçlarının gösterdiği şekilde kaynak değişkenleri değiştirilerek, prosedür tekrar edilir. Teçhizat, elektrot malzemesi ve elektrot tasarımındaki değişiklikler bu aşamada yapılabilir ve prosedür, ya da kısaltılmış versiyonu, kabul edilebilir sonuçlar elde edilene kadar tekrar edilir [1].

Bu beş adım, sadece, her kaynak değişkeni için ideal değerler belirlemekle kalmaz, tatmin edici değerlerin sınırlarını ve her değişkenin kritikliğini de belirler [1]. Bir direnç nokta kaynağı programının yapılmasında takip edilen basamakların sırası, teçhizat veya işin farklı durumları, benzer tip işlerle deneyimin artırılması ve müşteri ya da uygulanabilir şartnamelerin gerektirdiklerine bağlı olarak, farklılık gösterebilmektedir. Kaynak şartlarının başlangıçta ya da üretim sırasında ayarlanması gerektiğinde, ayarlama, çoğunlukla uygun ve etkili olan kaynak süresi, tutma süresi ya da akım üzerinde yapılabilir [4,8].

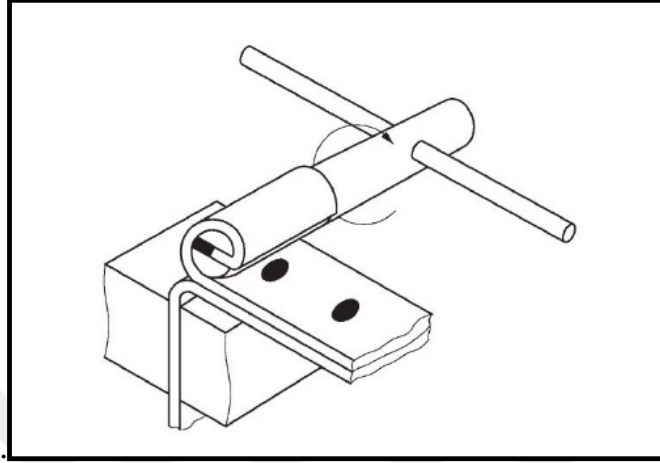
2.10. Mekanik Özelliklerin Belirlenmesinde Kullanılan Testler

Direnç nokta kaynaklarının mekanik özelliklerinin ölçülmesinde kullanılan testler, soyma, keski, gerilme, burulma, darbe ve yorulma testleridir. Bunların içinde pratikte yaygın olarak kullanılanlar, soyma, keski ve çekme testleridir [4,5].

2.10.1. Soyma testi

Soyma testi, nokta kaynakları için genellikle kullanılan mekanik testtir. Bu test, tüm otomotiv şartlarında, kaynak edilebilirliğin tayininde kullanılmaktadır. Bu testin genellikle kabul edilmesinin çeşitli nedenleri vardır: (1) Performans kolaylığı, (2) düşük maliyet ve (3) atölyede kalite kontrol testi olarak kullanılabilirliği [1,10].

Test, çekirdekte ideal çapın sağlanıp sağlanmadığının tespit edilmesinde kullanılmasına rağmen kaynak çekirdeğinin mukavemetine ya da kullanım alanında göstereceği performansına bağlı sınırlı nicel veriler belirlenebilmektedir (Şekil 2.4.).

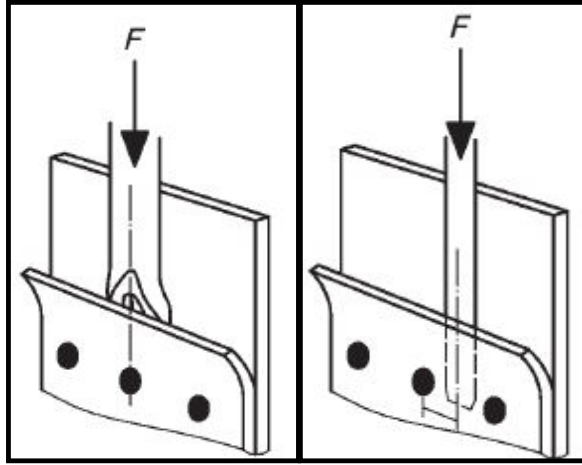


Şekil 2.4. Soyma testinin uygulanışı [29].

2.10.2. Keski testi

Keski testi, plakaların arasına nokta kaynağının yanına keski yardımıyla yük uygulanması dışında soyma testine benzemektedir (Şekil 2.5.). Keski kullanımı çekirdeğin çevresinden yırtma tipi bir yükleme oluşturur. Çalışmalar, bu yırtma şeklindeki yüklemenin kaynak için en düşük dayanım değeriyle sonuçlandığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, keski testinin en zorlu şartlarda denenmiş test şartı olduğu düşünülmektedir [10].

İmalat sırasındaki kaynak, keski testi sonucuyla belirlenenlerden daha sağlıklı olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca, soyma veya keski testi kullanılarak elde edilmiş kaynak kabiliyet grafiklerindeki eğriyi karşılaştıran sınırlı çalışma, keski testi ile belirlenen çekirdek ölçülerinin, %10 daha ufak bir eğriyle sonuçlanacak şekilde olduğunu belirlemiştir [1].



Şekil 2.5. Keski testinin uygulanaşı [29].

2.10.3. Çekme testi

Nokta direnç kaynağında çekme özelliklerini tespit etmek için çok fazla çekme testi numune tasarımları kullanılmıştır. Genelde, bu numunelerin kullanıldığı testler iki gruba ayrılabilir: olası gerilmeleri ölçmek için tasarlanan ve makaslama mukavemetlerini ölçmek için tasarlanan olarak. Olası gerilmelerin ölçülmesi için tasarlananlar, çapraz çekme testi, U çekme testi, üçgen direkt çekme testi ve yapıştırılmış blok testi. Makaslama geriliminin ölçülmesi için tasarlanmış testler, çekme-makaslama testi, daraltılmış kesitli çekme-makaslama testi ve iki kaynaklı çekme-makaslama testi [11].

Test parçasında nokta direnç kaynağı etrafında oluşan gerilim durumu, bir bakıma, test parçasının bir yükü taşıma kabiliyetini belirtir. Basitleştirmek adına, bir nokta direnç kaynağındaki yük taşıma kabiliyeti gerilim yerine kuvvet skalası ile ölçülebilen nokta direnç kaynağı mukavemeti ile tanımlanmıştır. Keski ve soyma test parçaları en düşük mukavemete sahiptirler. Olası yükleri kaldırmak üzere tasarlanmış test parçaları daha mukavim, makaslama test parçalarıysa en yüksek mukavemete sahiptirler [1].

Test parçası tasarımının yanında, nokta direnç kaynak mukavemetini etkileyen diğer etmenler, plaka boyutu, çekirdeğin boyutu, ana metalin mukavemeti, kaynak zamanı, nokta dağılımı, kaplaması ve test işlemleridir [11].

2.11. Otomotiv Sanayisinde Direnç Nokta Kaynağı

Direnç nokta kaynağı, en yaygın olarak kullanılan kaynak metotlarından biridir. Bu kaynak metodu, seri imalat yapılan işlerde ve özellikle otomotiv sanayiinde kaporta ve sac kısmı montajında en çok kullanılan kaynak türüdür [12]. Prensibinin basitliği ve uygulanmasının kolaylığı açısından seri imalat için tercih edilir.

2.11.1. Otomotiv ürünleri

Araç imalatı hakkında yaygın olarak sacların farklı kaynak yöntemleri ile birleştirilebilirliği bilinmektedir. Belirli bir ürüne uygulanan spesifik kaynak yönteminin seçilmesi, ürünün tasarımı ile hizmet talebinin tipine ve ekonomikliğe dayanır.

Otomobil sanayisinde çeşitli türde saclar kaynaklanmaktadır. Ancak az karbona sahip soğuk haddelenen çelik sac ve sıcak haddelenmiş plaka yaygın olarak tercih edilmektedir. Birleştirilecek metaller, demir veya demir dışı olsun, seçilecek kaynak yöntemini belirlemede etken olur. Yüksek korozyon dayanımı elde etme eğilimi bu amaçla kaplanan çeliklerin kullanımını artmasını sağlamıştır. Şimdilerde, yeni araçların gövdesi galvaniz kaplı sacdan üretilmektedir. Korozyon mukavemeti yüksek oluşu ve boya kaplamalarının tercih edilmesi, kaynak yöntemi seçiminde önemli etkisi olup, üretim yöntemlerinde ve teçhizatı yeni düzenlemeleri kaçınılmaz hale getiriyor [1,12].

Ürün tasarımı, önemli ölçüde hangi kaynak prosesinin kullanılacağını açıkça belirler. Bağlantıya erişilebilirlik, montaj operasyonlarının sırası ve bitmiş parçanın görüntüsü bir kaynak yönteminin seçiminde göz önünde bulundurulmalıdır.

Herhangi bir parçanın tasarlanan görevi, ürün tasarımı, alt parçalar için metal seçimi ve mamulün imalatında tercih edilecek birleştirme metoduyla doğrudan ilgilidir. Birçok durumda, birden fazla metot uygulanabilir olup bir seçim yapılmalıdır [1].

Otomotiv parçalarının kaynak bağlantılarından beklenen özellikler aşağıdaki şekilde gruplandırılabilir:

1. Yapısal karakteristikler
 - a. Yorulma mukavemeti
 - b. Mekanik mukavemet
 - c. Burulma veya eğme ya da ikisinde de rijitlik
2. Korozyon mukavemeti
3. Sızdırmazlık karakteristikler
4. Görüntü karakteristikleri

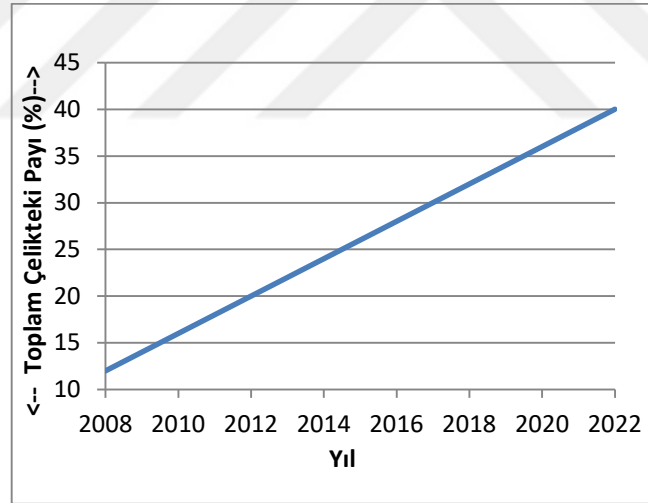
Otomobil endüstrisinin ihtiyaç duyduğu yüksek miktardaki üretim sayıları nedeniyle özel teçhizatalara ve yüksek nitelikte otomasyona yönelmeyi gerektirmiştir. Gövde bileşenlerinde, çok başlıklı kaynak makinaları ile aynı anda veya robotik teknoloji ile kısa süre içerisinde yüzlerce kaynak yapılmaktadır. Örneğin, robot tabancası ile saniyede 2,5 nokta, taşınabilir nokta kaynak tabancası ile ise saniyede 4 nokta hızında kaynak yapılabilmekte. Buna dayanarak diyebiliriz ki, bir otomobil gövdesi için saatte ortalama 800 nokta kaynağı yapılmaktadır [1].

Dikkat çekilen bu değer imalat sayısı temel alınıp imalatı tercih edilecek kaynak yöntemini ekonomikliği göz önüne alarak belirlenmelidir. Çok fazla sayıdaki imalat için, her parçadaki bir TL'lik kazanç senelik üretim dikkate alındığında yüksek miktarda kar getirebilir [1,10,11].

BÖLÜM 3. GELİŞMİŞ YÜKSEK MUKAVEMETLİ ÇELİKLER (AHSS)

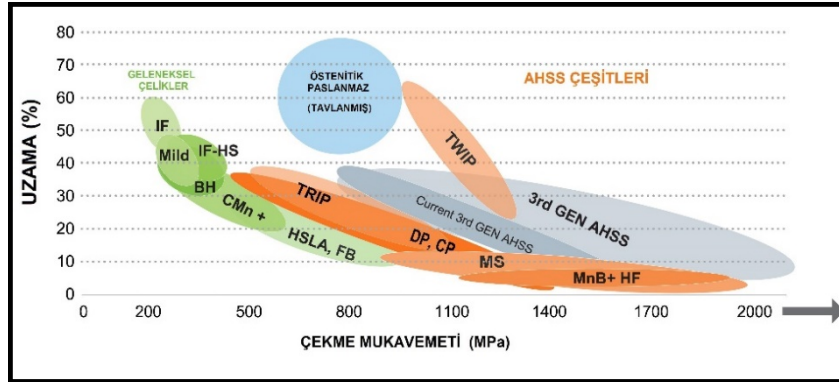
3.1. Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelik (AHSS) Türleri

Gelişmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler (AHSS), titizlikle seçilmiş kimyasal bileşimler ve çok aşamalı ısıtma ve soğutma süreçlerinden kaynaklanan çok fazlı mikro yapılar barındıran malzemelerdir. Benzersiz bir şekilde hafiftir ve güvenlik düzenlemeleri, emisyon azaltımı, sağlam performans ve uygun maliyetler için günümüzdeki araçların zorluklarını karşılamak üzere otomotiv endüstrisinde hızla artan bir şekilde kullanılmaktadır (Şekil 3.1.).

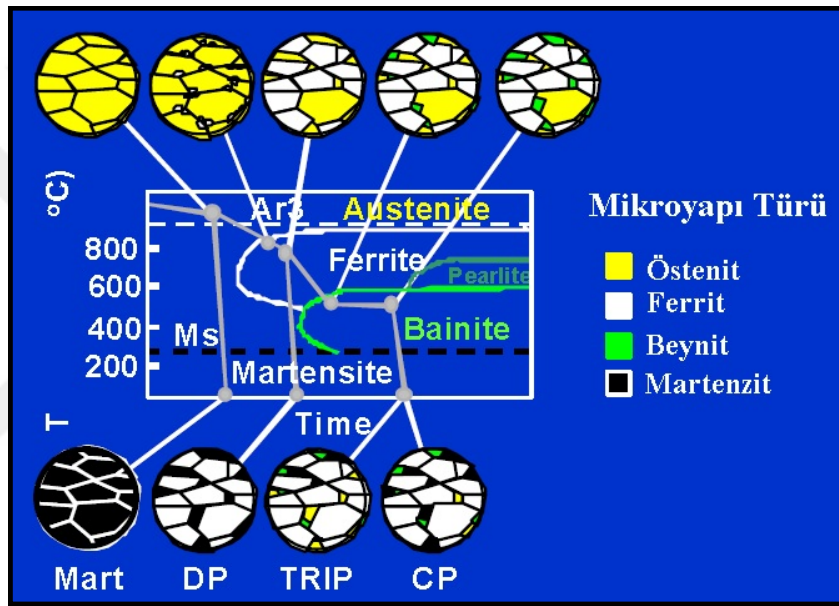


Şekil 3.1. AHSS'lerin toplam çelik pazarındaki payı [13].

Bir takım mukavemet, süneklik, tokluk ve yorulma özelliklerini sağlamak için çeşitli güçlendirme mekanizmaları kullanılır. Süneklik ve çekme mukavemetlerini Şekil 3.2.'den görebilmekteyiz. AHSS yapılarını Şekil 3.3.'de belirtilen şematik gösterimden tanımlayabiliriz [13].



Şekil 3.2. AHSS ve sektörde kullanılan diğer çeliklerin mukavemet grafiği [13].



Şekil 3.3. AHSS'lerin soğuma modeli ve mikro yapıları [8].

AHSS kapsamındaki çelikler aşağıdaki gibi tanımlanabilir [13].

1. Kompleks Fazlı (CP) Çelikler
2. Ferritik-Beynitik (FB) Çelikler
3. Sıcak Şekillendirilmiş (HF) Çelikler
4. İkizlemeye Dayalı Plastisite (TWIP) Çelikleri
5. Dönüşüme Dayalı Plastisite (TRIP) Çelikleri
6. Çift Fazlı (DP) Çelikler
7. Martenzitik (MS veya MART) Çelikler

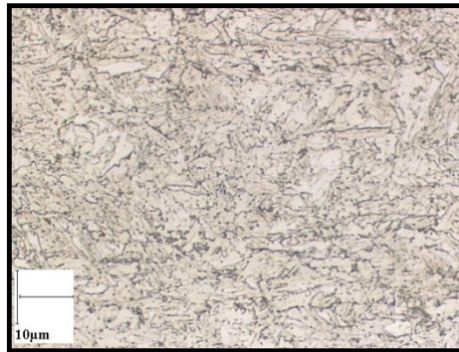
Bunlar daha düşük maliyetlerle, daha verimli birleştirme potansiyeline ve mevcut çelik sınıflarına kıyasla gelişmiş süneklik kombinasyonlarına sahip çeliklerdir. Bu sınıflar istenilen özelliklerin elde edilmesi için benzersiz alaşımları ve mikro yapılar içermektedir [14]. 550 MPa'dan yüksek dayanıma sahip çelikler genellikle AHSS olarak adlandırılır. Bu çeliklere, bazen, 780 MPa'yi aşan gerilme mukavemetleri için "ultra yüksek dayanımlı çelikler" denir. Çekme mukavemeti en az 1000 MPa olan AHSS'ye genellikle "GigaPascal çelik" (1000 MPa = 1GPa) denir [13,14].

3.2. Kompleks Fazlı (CP) çelikler

CP çeliklerinin mikroyapısı, ferrit / beynit matrisinin yanında az miktarda martenzit, kalıntı östenit ve perlit içerir (Şekil 3.5.). İnce taneli yapıya sahip olan bu çeliklerde tane inceltme işlemi için Ti veya Nb gibi mikro alaşım elementlerinin yeniden kristalleşme veya çökelti serleşmesi sağlaması ile oluşur [13,14].



Şekil 3.4. CP çeliğinden üretilmiş koltuk flanşı [13].



Şekil 3.5. CP çeliğinin mikroyapı görüntüsü [13].

CP çelikleri, 800 MPa ve daha yüksek gerilme mukavemetlerinde belirgin olarak yüksek akma mukavemetleri gösterirler. Aynı zamanda yüksek enerji absorblama, yüksek deformasyon kabiliyetine ve iyi bir süneklığe sahiptir.

CP çeliklerinin üretim kaliteleri ve otomobillerdeki uygulama alanları [13];

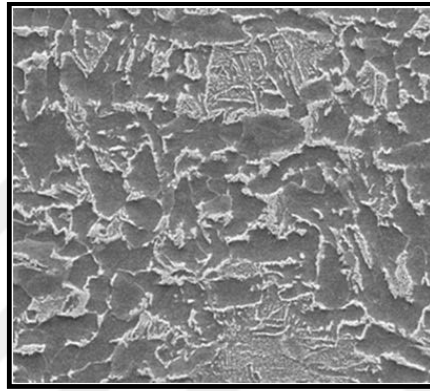
CP 500/800	Çerçeve rayları
CP 600/900	Tünel sertleştiriciler
CP 680/780	Çerçeve rayları, şasi bileşenleri, enine kirişler
CP 750/900	Direk tipi takviyeler, tünel sertleştirici
CP 800/1000	Arka süspansiyon dirsekleri, çamurluk kirişi
CP 850/1180	Çamurluk kirişi, Koltuk flanşı (Şekil 3.4.).
CP1000/1200	Arka çerçeve ray takviyeleri,
CP1050/1470	Salıncak paneli, tampon kirişleri

3.3. Ferritik Beynitik (FB) Çelikler

FB çelikleri, yüksek miktarda süneklilik özelliğine ihtiyaç duyulan parçaların gereksinimlerini karşılamak için kullanılır. FB çeliklerinin mikro yapısında ferrit ve beynit vardır (Şekil 3.7.). Hem tanecik arıtımı hem de beynit ile ikinci faz sayesinde dayanıklılık elde edilir [13,14]. Aynı mukavemet seviyesine sahip AHSS çeliklerine kıyasla, FB çeliklerinin de daha yüksek bir mukavemet ve yüksek toplam yüzde uzama değerine sahiptir. Kaynaklara bilirlüklerinin iyi olması nedeniyle de tercih edilirler. Bu çelikler hem iyi kaza performansları hem de iyi yorulma özellikleri sayesinde otomobillerde jantlarında dahi kullanım alanı bulmaktadırlar (Şekil 3.6.) [16].



Şekil 3.6. FB çeliğinden üretilmiş jant [13].



Şekil 3.7. FB çeliğinin mikroyapı görüntüsü [13].

FB çeliklerinin üretim kaliteleri ve otomobillerdeki uygulama alanları [13,16];

FB 330/450 Jant, fren pedal kolu, koltuk çapraz elemanı, süspansiyon kolu

FB 450/600 Alt kontrol kolu, jant, tampon kirişi, şasi parçaları, arka büküm kirişi.

3.4. Sıcak Şekillendirilmiş (HF) Çelikler

Basınçlı sertleştirme uygulamalarının yaygınlaşması geri dönüşüm sorunları olmayan karmaşık şekillerdeki parçaların ve optimize edilmiş parça geometrilerinin imali için umut verici bir hal almıştır. Bor esaslı sıcak şekillendirme çelikleri (%0.001-0.005 bor) 1990'lardan bu yana kullanılmaktadır. İstenilen mekanik özelliklerin elde edilmesi için şekillendirme işlemi sırasında 850°C'lik sıcaklığa ulaşılır ve ardından 50°C/s'den daha yüksek bir soğutulur.

Şu anda iki tip preste sertleştirme veya sıcak şekillendirme uygulaması mevcuttur [13,16].

1. Doğrudan Sıcak Şekillendirme
2. Dolaylı Sıcak Şekillendirme

Doğrudan Sıcak Şekillendirme esnasında, şekillendirme yüksek sıcaklıktaki östenitik aralıkta bekletilip ve ardından soğutulması ile yapılır. Dolaylı Sıcak Şekillendirmede ise oda sıcaklığında parçanın nihai şekli verilir ve daha sonra yüksek sıcaklıktaki östenitik aralıkta bekletilip ve ardından soğutulması ile yapılır [17].

HF çeliğinin son mikroyapısı martenzite benzerdir. Soğutmadan sonraki gerilme-gerinim eğrileri martenzitik (MS) çeliklere benzer [13,17].

HF çeliklerinin üretim kaliteleri ve otomobillerdeki uygulama alanları [13];

HF 340/480 koltuk bileşenleri

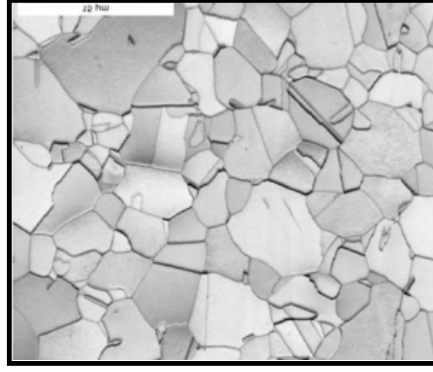
HF 1050/1500 koltuk bileşenleri, parça tutucular

HF 1200/1900 iç gövde elemanları

3.5. İkizlemeye Dayalı Plastisite (TWIP) Çelikleri

TWIP çelikleri yüksek mangan içeriğine (%17-24) sahiptir, bu da çeliğin oda sıcaklığında tamamen östenitik olmasını sağlar. Deformasyon, ikizlerinin oluşumuyla gerçekleşir. Bu deformasyon şekli bahsi geçen çeliğin bu isimle adlandırılmasını sağlar.

İkizleme, mikroyapıdaki tanelerin daha ince hale gelmesiyle anlık sertleşme hızını artırır. Ortaya çıkan ikiz sınırlar tane sınırları gibi davranır ve çeliği güçlendirir (Şekil 3.8.). TWIP çelikleri son derece yüksek mukavemeti ve son derece yüksek şekillendirilebilirlik kabiliyeti sayesinde kolayca birleştirirler. Gerilme mukavemeti 1000 MPa'dan yüksektir [13,18].



Şekil 3.8. TWIP çeliğinin mikroyapı görüntüsü [13].

TWIP çeliklerinin üretim kaliteleri ve otomobillerdeki uygulama alanları [13,19];

TWIP 500/900 A direği, çamurluk, ön yan koruma parçaları

TWIP 500/980 Jant, ön ve arka tampon kirişleri, B direği, jant kenarı

TWIP 600/900 Döşeme traversi, çamurluk

TWIP 750/1000 Kapı darbe kirişi

TWIP 950/1200 Kapı darbe kirişi

3.6. Dönüşüme Dayalı Plastisite (TRIP) Çelikleri

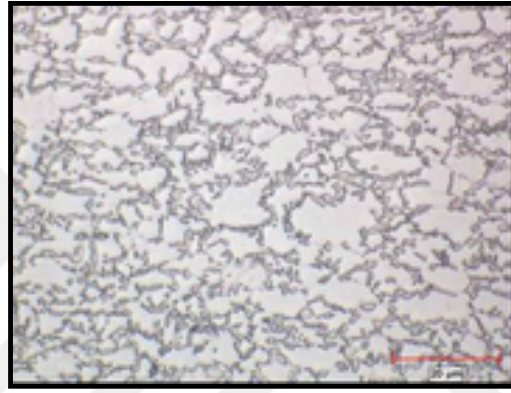
TRIP çelikleri mikro yapısında yumuşak ferrit matrisi içerisinde, kalıntı östenit ve beynit bulundurduğundan üç fazlı bir yapıya sahiptir. Bu sayede üstün mekanik özellikler kazanmakta. TRIP çeliği öteki çeliklere nispetle daha karmaşık mikro yapıya içerir (Şekil 3.10.) [20,21].

İhtiyaçlara karşılaması için geliştirilen TRIP çeliğinin mekanik özellikleri mikroyapıdaki boyutu, şekli ve dağılımı gibi özelliklerin değiştirilmesi ile sağlanabilmektedir. Çift fazlı çelikler TRIP çeliklerinin de yorulma dayanımları yüksektir. TRIP çelikleri yüksek silisyum ve karbon içeriği sayesinde nihai mikroyapıda önemli kalıntı östenit oluşumunu sağlar [13].

TRIP çelikleri, kompleks parçalarının imalatı için mükemmel şekil verilebilirlik sağlar ayrıca kaza sırasında açığa çıkan enerjiyi absorblama sayesinde emebileceğinden oldukça yaygın olarak kullanılır (Şekil 3.9.) [13].



Şekil 3.9. TRIP çeliğinden üretilmiş tampon sacı [13].



Şekil 3.10. TRIP çeliğinin mikroyapı görüntüsü [13].

TRIP çeliklerinin üretim kaliteleri ve otomobillerdeki uygulama alanları [13,20,21];

TRIP 350/600 Çerçeve rayları, ray takviyeleri

TRIP 400/700 Yan ray, kilitleme kutusu

TRIP 450/800 Gösterge tablosu, tavan rayları

TRIP 600/980 B sütun üstü, motor beşiği, ön ve arka raylar, koltuk çerçevesi

3.7. Çift Fazlı (DP) Çelikler

Çift Fazlı çeliklerin mikro yapısındaki ferrit miktarı sayesinde kolay şekil şekillendirilebilirlik sağlarken ikincil faz olarak martenzitin varlığı ile de mukavemetinin yüksek olması sağlanmaktadır [13,22]. Yüksek seviyede üniform ve toplam uzama gösterirler. Bu nedenle koruyucu kısımlarda tercih edilirler (Şekil 3.11.) [13,23].

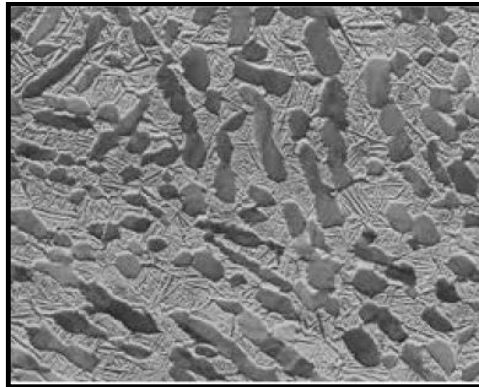
Karbon miktarı çok yüksek olmadığı için kaynak kabiliyetleri oldukça iyidir. Mikroyapıdaki mangan, hızlı soğutmada martenzitin oluşmasını sağlar (Şekil 3.12.). Silisyum, ise katı eriyik sertleşmesi sağlaması için ilave edilir. Niyobyum, titanyum, vanadyum, benzeri mikro alarım amacıyla tercih edilen elementler, tane boyutu kontrolünü ve çökelme sertleşmesi sağlamak amacıyla ilave edilebilmektedir [13].

Tek tek veya kombinasyon halinde eklenen mangan, krom, molibden, vanadyum ve nikel, sertleştirilebilirliğin artırılmasına yardımcı olur.

Bu ilaveler, yalnızca benzersiz mekanik özellikler üretmek için değil aynı zamanda genel olarak iyi direnç nokta kaynak kabiliyetini sağlamak için de dengeli bir şekilde dengelenmiştir [8,13].



Şekil 3.11. DP çeliğinden üretilmiş B direği [13].



Şekil 3.12. DP çeliğinin mikroyapı görüntüsü [13].

DP çeliklerinin üretim kaliteleri ve otomobillerdeki uygulama alanları [13,21];

DP 210/440	Arka şok takviye
DP 300/500	Dış dış, dış kapı, dış gövde, paket tepsisi, taban paneli
DP 350/600	Zemin paneli, davlumbaz dış, gövde tarafı dış, zemin takviyeleri
DP 500/800	Gövde tarafı iç, panel içi, arka raylar, arka şok takviye
DP 600/980	B direkleri, taban paneli tüneli, ön alt çerçeve paket tepsisi,
DP 700/1000	Tavan parmaklığı, arka raylar
DP 750/980	Çamurluk
DP 800/1180	Üst b sütun
DP 1150/1270	Dış gövde

3.8. Martenzitik (MS veya MART) Çelikler

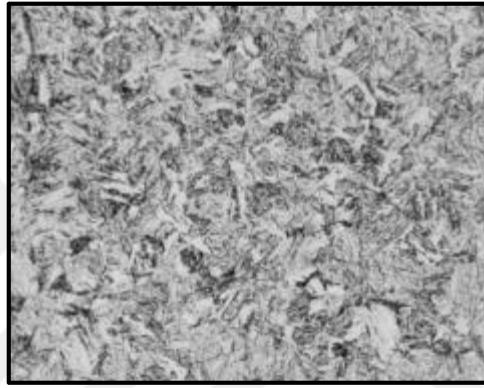
Bu çelikler yüksek oranda martenzite sahip olduğundan oldukça yüksek mukavemete sahiptirler. Martenzitik çeliklerde, sıcak haddeleme veya tavlama esnasında var olan östenit, tavlama hattının soğutma bölümünde hızlı soğutma sırasında neredeyse tamamen martenzite dönüştürülür [13,17].

Martenzitik çelik mikroyapı, Şekil 3.14.'de gösterildiği gibi bir miktar beynit ve ferrit olmasına rağmen martenzitin matrisi oluşturduğu görülmekte [13,24,25]. Martenzitik çelikler, 1500 MPa kadar olan en yüksek çekme mukavemetini sağlar ve bu nedenle direk etkiye maruz kalan bölgelerde de tercih edilir (Şekil 3.13.).

Martenzitik çelikler genellikle sünekliği arttırmak için hızlı soğutma sonrası tavlamaya tabi tutulurlar ve son derece yüksek mukavemetlerde bile kayda değer şekil verilebilirlik sağlayabilirler [13,24]. Sertleştirilebilirliği arttırmak için mangan, silisyum, krom, molibden, bor, vanadyum ve nikel çeşitli kombinasyonlarda kullanılır [13,26].



Şekil 3.13. MS çeliğinden üretilmiş tampon takviyesi [13].



Şekil 3.14. MS çeliğinin mikroyapı görüntüsü [13].

MS çeliklerinin üretim kaliteleri ve otomobillerdeki uygulama alanları [13];

MS 950/1200 Çapraz elemanlar, yan itici kirişler, tampon kirişleri ve takviyeleri

MS1150/1400 Salıncak dış, yan saldırı kirişleri, tampon ve tampon takviyeleri

MS1250/1500 Yan saldırı kirişleri, tampon kirişleri, tampon takviyeleri

BÖLÜM 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada DP 600, DP 1000, TRIP 800 ve MS 1500 kullanılmıştır. Bu çelikler öncelikle aynı türler sonrasında da birbirleri ile aralarında farklı kombinasyonlarda kaynatılmıştır. Çelik sac lar ulusal ve uluslararası standartlara göre çekme makaslama, mekanize soyma ve manuel soyma testleri için testlerin standartında belirtilen ebatlarda kesilmiştir. Daha sonra yüzeyleri temizlenen bu parçalar değişik kaynak akımlarında ve sabit kaynak akım sürelerinde direnç nokta kaynağı yapılmıştır. Kaynaklı numuneler daha sonra çekme makaslama, mekanize ve manuel soyma testlerine tabi tutulmuştur. Bunun yanında kaynak bölgesi sertlik değerleri ve mikro yapıları incelenmiştir. Bu çalışmanın asıl amacı direnç nokta kaynaklı çeliklerin ulusal ve uluslararası standartlara göre kabul kriterlerini incelemektir. Otomobillerde yeni yeni destek ve koruma barı olarak kullanılmaya başlayan MS1500 çeliğinin çekme mukavemetinin 1500 MPa olmasına rağmen oldukça iyi şekillendirme kapasitesine sahip olması nedeniyle bu çeliğinde mekanik özelliklerinin tanımlanarak otomotiv sektörüne kaynaklık edecek bir dokümanın oluşması amaçlanmıştır.

4.1. Deney Malzemelerinin Kimyasal Kompozisyonu

Bu çalışmada otomotiv sektöründe kullanılan dört farklı çekme mukavemetine sahip AHSS türü kullanılmıştır. Kullanılan bu malzemelerin kimyasal içerikleri Tablo 4.1.'de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal kompozisyonu

	Al	Si	P	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	C	Mo	W	Pb
DP 600	0.228	0.421	0.184	0.311	0.139	1.237	91.658	0.159	0.545	0.122	-	1.960	2.166
DP 1000	0.159	0.513	0.222	0.225	0.073	1.183	89.536	0.293	0.973	0.167	0.496	0.123	5.267
TRIP 800	0.179	3.032	0.239	0.137	0.105	0.885	89.029	0.166	0.363	0.195	0.117	1.505	3.186
MS 1500	0.237	0.463	0.118	0.216	0.155	1.159	91.489	0.336	0.169	0.215	0.187	0.950	3.731

4.2. Deneylerde Kullanılan Kaynak Makinesi ve Elektrotlar

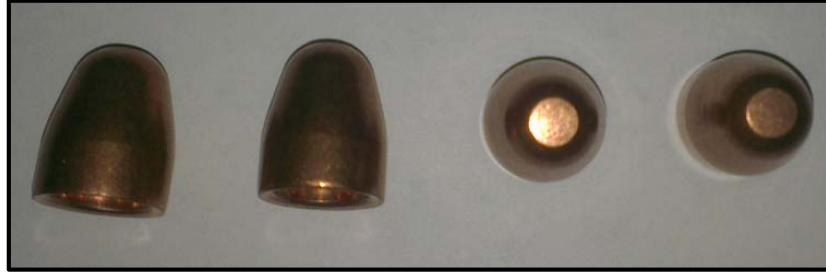
Deneyler için 120 kVA, pnömatik, mikro işlemci kontrollü ve su soğutmalı, sabit tip Direnç nokta kaynak makinesi kullanıldı (Şekil 4.1.). Bu makinedeki mikro işlemci sayesinde dijital panelden aşağıda belirtilen çevrimin adımları periyot (1 periyot 0.02s) prensibine göre yapılabildiğinden kaynak sırasında bu çevrim otomatik olarak gerçekleşebilmektedir. Bu çevrim adımlarındaki kaynak süresi Tablo 4.2.'den parça kalınlığına göre yaklaşık olarak seçilmiştir.

T1 zamanı	(yaklaşma),	pistonun kaynak yapılacak parçaya yaklaşma zamanı
T2 zamanı	(sıkıştırma),	pistonun kaynak yapılacak parçayı sıkıştırma zamanı
T3 zamanı	(kaynak),	kaynağın devrede kalma zamanı
T4 zamanı	(bekleme),	pistonun kaynak sonrası parça üzerinde bekleme zamanı
T5 zamanı	(uzaklaşma),	pistonun kaynak yapılacak parçadan uzaklaşma zamanı



Şekil 4.1. Deneylerde kullanılan kaynak makinesi [27].

Direnç Nokta Kaynağının uygulanmasında kullanılan elektrotlar (Şekil 4.2.) CRM 16X® markasına sahip olup (CuCrZr) Bakır-Krom-Zirkonyum alaşımından oluşmaktadır (Şekil 4.2.). Bu alaşım DIN 44759 Sınıf 2>43 Siemens elektrik iletkenliğine sahiptir. Yaklaşık olarak >160HB (Brinell) ve 85HRB(Rockwell B) sertlik değerlerine sahip olup maksimum çekme dayanımı 590 Mpa'dır [27]. Piyasadan temin edilen bu elektrotların temas yüzeylerinin çapı standart 6 mm olduğundan sac kalınlığına uygun olarak standartlarda belirtilen temas yüzey çapları torna tezgahında işlenmiştir.



Şekil 4.2. Deneylerde kullanılan elektrotlar

Tablo 4.2. 700 MPa üzeri çelikler için tavsiye edilen kaynak parametreleri [12,13].

Plaka Kalınlık	Elektrot Uç Çapı	Kaplamalı Malzeme İçin Yaklaşık Akım	Kaplamasız Malzeme İçin Yaklaşık Akım	Kaplamalı Malzeme İçin Kaynak Süresi	Kaplamasız Malzeme İçin Kaynak Süresi	İki Kaynak Arası Minimum Mesafe	Çekdek İdeal Çapı
mm [in]	mm [in]	amper	amper	periyot	periyot	mm [in]	mm [in]
0,51 [0,020]	4,76 [0,187]	7 500	5 500	12	8	9,5 [0,37]	4,6 [0,18]
0,64 [0,025]	4,76 [0,187]	8 500	6 500	13	10	15,9 [0,63]	4,6 [0,18]
0,76 [0,030]	6,35 [0,250]	9 500	7 500	14	11	15,9 [0,63]	5,1 [0,20]
0,89 [0,035]	6,35 [0,250]	10 500	8 500	15	11	19,0 [0,75]	6,4 [0,25]
1,02 [0,040]	6,35 [0,250]	11 500	8 500	16	12	19,0 [0,75]	6,4 [0,25]
1,14 [0,045]	6,35 [0,250]	12 000	10 000	17	13	20,3 [0,94]	6,4 [0,25]
1,27 [0,050]	7,94 [0,313]	12 500	10 500	19	14	20,3 [0,94]	7,9 [0,31]
1,40 [0,055]	7,94 [0,313]	13 000	11 000	20	16	27,0 [1,06]	7,9 [0,31]
1,52 [0,060]	7,94 [0,313]	14 000	12 000	22	17	27,0 [1,06]	7,9 [0,31]
1,78 [0,070]	7,94 [0,313]	15 000	13 000	26	19	30,0 [1,18]	7,9 [0,31]
2,03 [0,080]	7,94 [0,313]	16 000	14 000	30	21	34,9 [1,37]	7,9 [0,31]
2,29 [0,090]	9,52 [0,375]	17 000	14 000	37	24	39,7 [1,56]	9,5 [0,37]
2,67 [0,105]	9,52 [0,375]	18 500	15 500	42	28	42,7 [1,68]	9,5 [0,37]
3,05 [0,120]	9,52 [0,375]	20 000	17 000	50	31	46,0 [1,81]	9,5 [0,37]

4.3. Deneylerde Kullanılan Çekme Cihazı

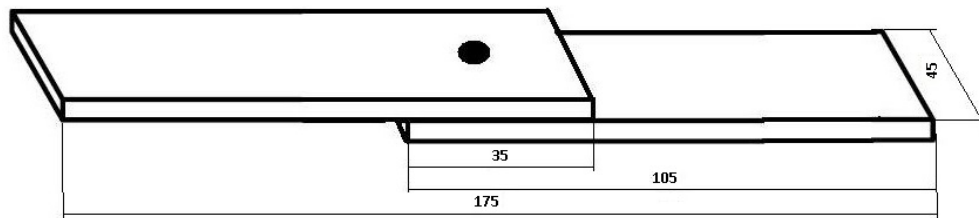
Çekme cihazı maksimum 50 kN kapasiteli, SHIMADZU markasına sahiptir (Şekil 4.3.). Veriler, cihaza entegre olan bilgisayardaki TRAPEZIUMX® adlı program sayesinde okunabilmektedir. Deneylerin tamamı oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 4.3. Deneylerde kullanılan çekme cihazı

4.3.1. Çekme makaslama testi

Çekme makaslama testinde kullanılan numuneler TS EN ISO 14273 standardına uygun olarak 45x105 mm ebatlarında kesilmiş ve yine aynı standartta belirtildiği üzere Şekil 4.4.'deki gibi kaynatılmıştır [11].

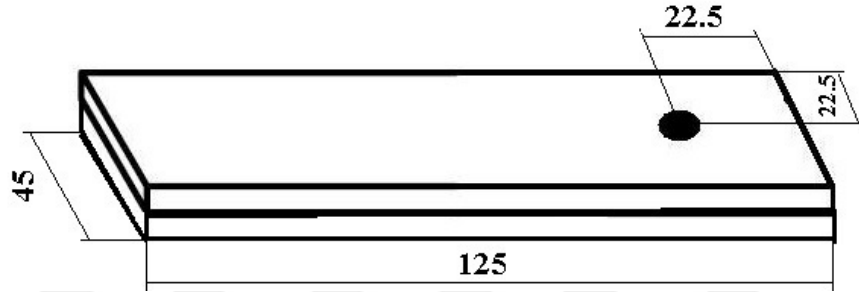


Şekil 4.4. Çekme makaslama numunesinin kaynak şekli ve ölçüleri

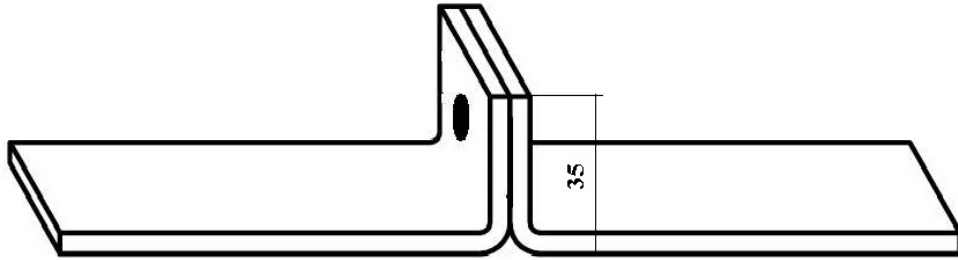
4.3.2. Mekanize soyma testi

Mekanize soyma testinde kullanılan numuneler TS EN ISO 14270 standardına uygun olarak 45x125 mm ebatlarında kesilmiş standartta belirtildiği üzere üst üste konularak kaynatılmıştır (Şekil 4.5.) [10].

Sonrasında Şekil 4.6.'da ki şekle getirilerek mekanize soyma testi uygulanmıştır. Bu test yöntemindeki amaç yapılan kaynakların soyulmaya karşı maksimum dayanım değerlerini elde etmektir.



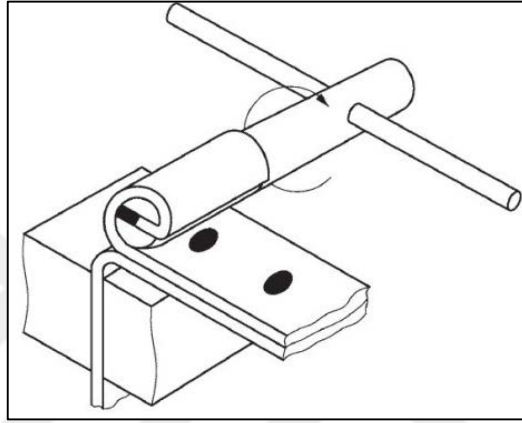
Şekil 4.5. Mekanize ve manuel test numunesinin kaynak şekli ve ölçüleri



Şekil 4.6. Mekanize ve manuel test numunesinin test için uygun şekli ve ölçüsü

4.3.3. Manuel soyma testi

Manuel soyma testinde kullanılan numuneler TS EN ISO 10447 standardında belirtilen Şekil 4.7.'da ki resme benzer olarak torna ve freze tezgahında işlenerek üretilmiştir (Şekil 4.8.). Manuel soyma testi için levhalar 45x125 mm ebatlarında kesilmiş ve TS EN ISO 14270 standartında belirtildiği üzere Şekil 4.5.'de ki gibi üst üste konularak kaynatılmıştır. Akabinde Şekil 4.6.'da ki getirilmiştir.



Şekil 4.7. Standartta belirtilen manuel soyma test ekipmanı [29]



Şekil 4.8. Üretimi yapılan manuel soyma test ekipmanı

4.4. Direnç Nokta Kaynağı Kabul Kriterleri

Kabul kriterleri, yapılan kaynakların hangi sebeplerle uygun olup olamayacağını tanımlar. Otomotiv sektöründeki firmaların çoğu kendine has birtakım kriterler belirlese de yapılan kaynakların uluslararası standartlara göre incelenmesi ve bu kriterlere göre test edilmesi uygun olacağı düşünülmektedir [12].

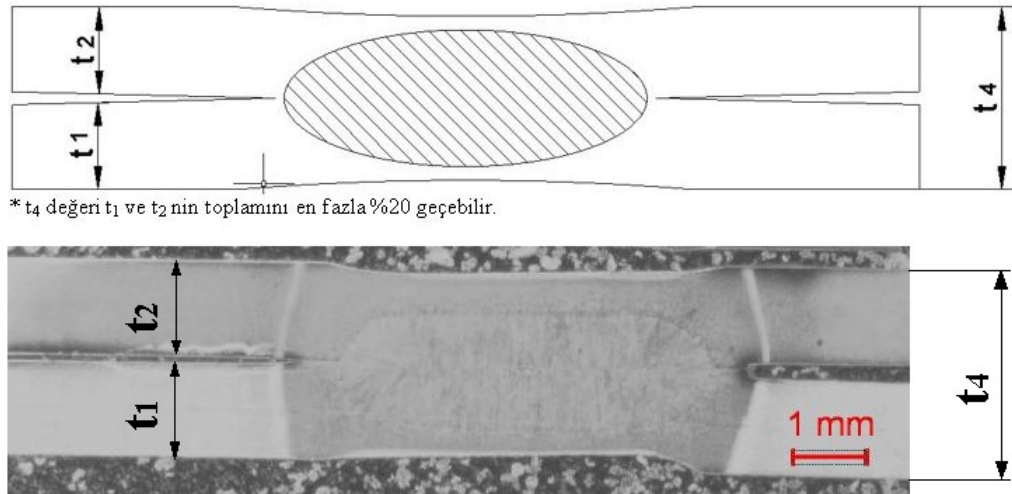
4.4.1. Görünür kriterler

4.4.1.1. Kaynak yüzeyindeki süreksizlikler

Kaynak yapılacak parçalar öncelikle bu kriteri sağlamalı ve kaynak sonrasında da bu özelliklerini yitirmemeli. Kaynatılacak parçalar kesildikten sonra yüzeylerinde çentik, kabarma, çapak veya kaynak sonrasında aşırı ısınma ya da baskıdan oluşan aşırı yüzey girintileri ve oyuk gibi süreksizlikler bulundurmamalı. Bu tip süreksizlikler bulunan parçalar diğer kriterlerine bakılmaksızın reddedilmeli. Kaynak işlemine başlamadan önce elektrotların temas yüzeyleri kontrol edilmeli ve pürüzlü ya da aşınmış elektrotlar eğe veya elektrot frezesi ile düzeltilmeli [12].

4.4.1.2. Plakalar arası ayrılma

Kaynak yapılan plakaların toplam kalınlığının %20'ini aşmayan ayrılmalar kabul edilir (Şekil 4.9.) [12]. Bu ayrılmalar elektrot kuvvetinin aşırı fazla seçilmesi veya kaynatılan malzemenin ani ısı girdisine karşı gösterdiği tepkiden kaynaklanır. Bu durumlardan kaçınmak için uygun parametreler seçilmeli ve malzeme iyi tanınarak önlem alınmalı [12].

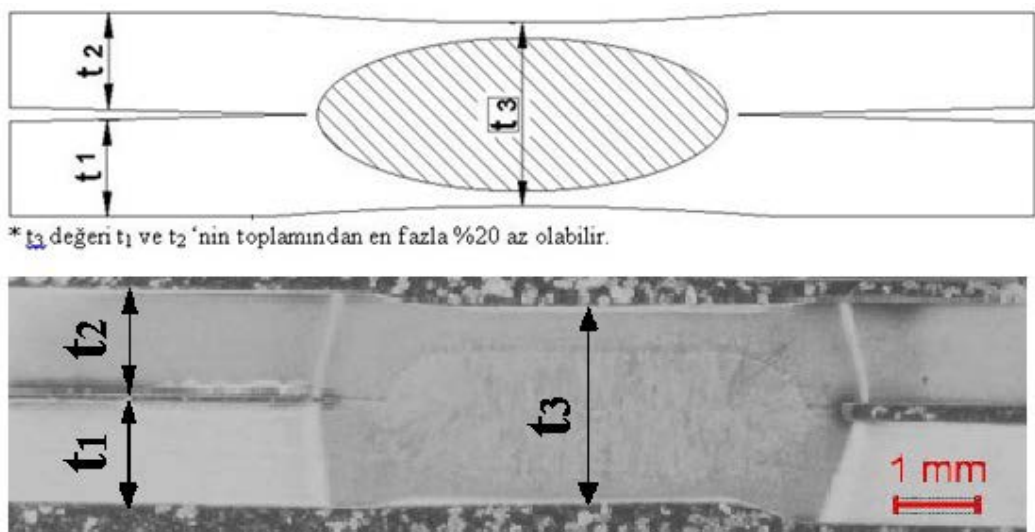


Şekil 4.9. Plakalar arası ayrılma

4.4.1.3. Yüzey girintisi

Kaynatılan parçada elektrotun temas ettiği yüzeyde bir miktar girinti meydana gelir (Şekil 4.10.). Uygun parametreler seçilerek bu girintinin, plakaların toplam kalınlığının %20'sini aşmayacak şekilde dikkatle kaynaklar yapılmalı aksi halde yapılan kaynaklar reddedilir [12].

Yüzey girintisinin fazla olmasının temel sebepleri, elektrot baskı kuvvenin fazla seçilmesi, kaynak akım ve süresinin fazla seçilmesi olarak tanımlanmıştır [12].

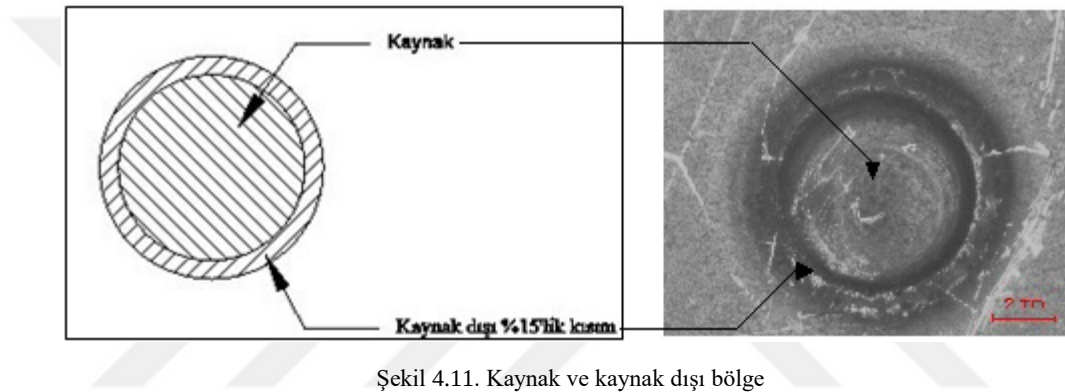


Şekil 4.10. Yüzey girintisi

4.4.2. Radyografik kriterler

Kaynak çapı boyut bakımından tutarlı ve genellikle daire şeklinde olmalıdır. Kaynaklarda meydana gelen gözenek veya yetersiz ergime, kaynak çapının %15'inden daha büyük boyuta sahip olmamalı (Şekil 4.11.). Ayrıca kaynak yarıçapının %15'i kadar kaynağın dışında kalan bölge için de aynı oran geçerlidir [12].

Kaynaktaki gözenek ve yetersiz ergime bölgelerindeki kümeleşme kaynak çapının %15'ini aşmamalıdır [12].



Şekil 4.11. Kaynak ve kaynak dışı bölge

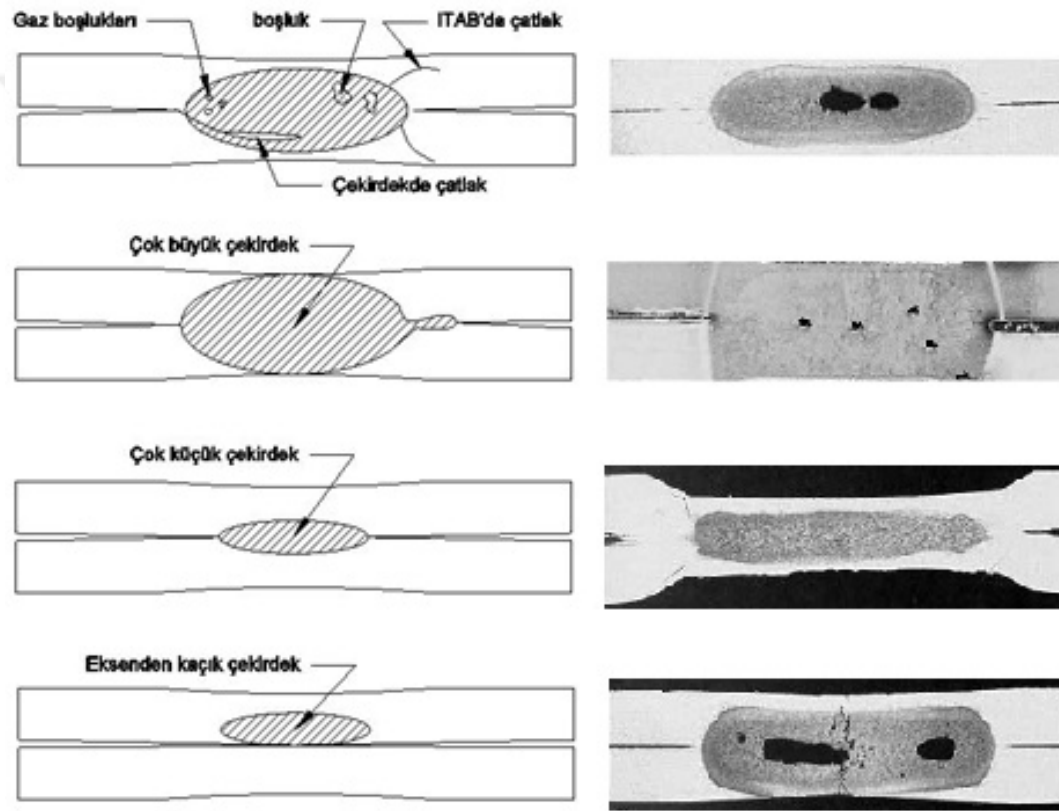
4.4.3. Metalografik kriterler

Kaynatılan numuneler, metalografik muayene için enine kesit alınarak kesilmelidir. Bu işlemten sonra zımparalama ve parlatma safhalarından geçirildikten sonra dağlanacak ve optik mikroskopta 50-100X büyütmeyle mikro yapıları incelenecektir [12].

4.4.3.1. Çekirdekteki süreksizlikler

Çekirdek bölgesi aşırı süreksizlik (inklüzyon, porozite, çatlak ve yetersiz erime) örnekleri içermediği sürece metalografik incelemede kabul edilir (Şekil 4.12.).

Çekirdek yarıçapının %15'inden fazla olan veya kümeleşen süreksizlikler kabul edilmez. Ayrıca çekirdek yarıçapının %15'i kadar çekirdeğin dışında kalan bölge için de aynı oran geçerlidir [12].

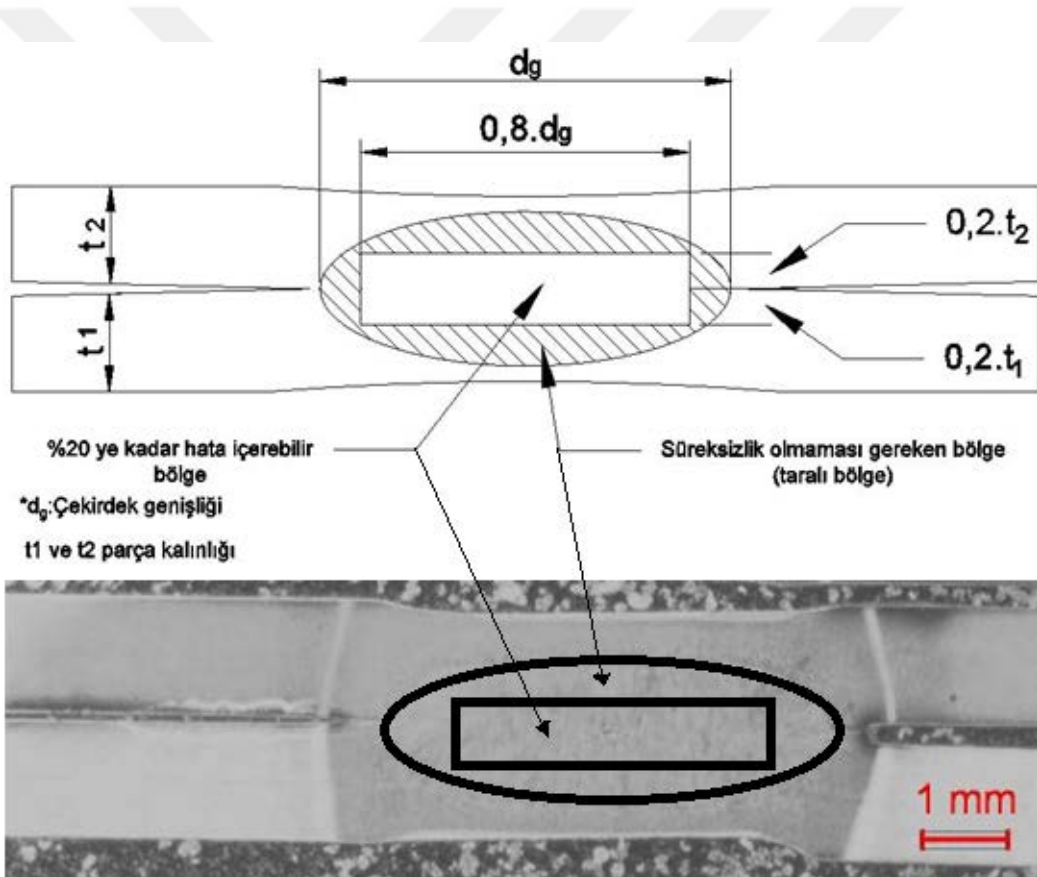


Şekil 4.12. İstenmeyen süreksizlikler

4.4.3.2. Nüfuziyet

Çekirdek genişliğinin %80'i ve kullanılan plakaların her birinin kalınlığının en az %20'sine kadar olan bölge içerisinde meydana gelebilecek ve bu bölgenin %20'sini aşmayacak süreksizlikler kabul edilir (Şekil 4.13.) [12].

Kabul edilen bu kaynak minimum nüfuziyet şartlarını yerine getirmiş olur, maksimum nüfuziyet için bu bölgenin mümkün olduğunca daraltılması gerekir. Ancak bu alan dışında meydana gelebilecek hatalar kesinlikle reddedilir [12]. Nüfuziyetsizliğe sebep olan problemler ve sebepleri Tablo 4.3.'de belirtilmiştir.

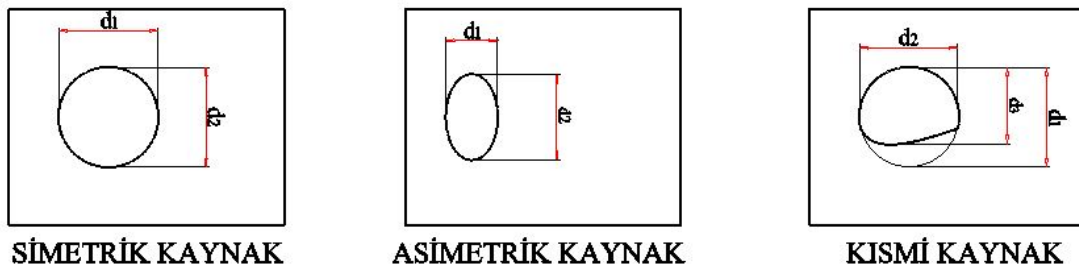


Tablo 4.3. Nüfuziyetsizliğe sebep olan problemler ve muhtemel sebepleri [30].

Karşılaşılan problem	Muhtemel sebepleri
Ara yüzeyde sıçramalar	Plakaların ara yüzeyleri kirli (toz, pas, yağ vb.)
	Sıkıştırma kuvveti az
	Kaynak akımı yüksek
	Kaynak süresi uzun
	Yetersiz Donanım
Yüzeyde sıçramalar ve elektrot yapışması	Elektrot temas yüzeyi paralel değil
	Sıkıştırma zamanı yetersiz
	Kaynak akımı yüksek
	Kaynak süresi uzun
	Plakaların ara yüzeyleri kirli (toz, pas, yağ vb.)
Elektrotların deforme olması	Elektrot temas yüzeyleri aşınmış veya kirli
	Soğutma yetersiz
	Elektrot malzemesinin alaşımı uygun değil
	Kaynak akımı yüksek
	Kaynak süresi uzun
Aşırı yüzey girintisi	Sıkıştırma kuvveti fazla
	Soğutma yetersiz
	Elektrot temas yüzeyleri aşınmış veya dar
	Kaynak süresi uzun
	Sıkıştırma kuvveti fazla
Çekirdek çok küçük veya oluşmuyor	Kaynak akımı yüksek
	Elektrot temas yüzeyleri çok dar
	Kaynak süresi kısa
	Sıkıştırma kuvveti fazla
	Kaynak akımı çok düşük
Çekirdekte çatlaklar oluşuyor	Kaynaklar birbirine çok yakın
	Bekleme süresi kısa
	Sıkıştırma kuvveti az
	Soğutma fazla
	Elektrotlar birbirini karşılamıyor
Kaynak çekirdeği kaymış	Sıkıştırma kuvveti az
	Kaynak akımı çok düşük
	Sıkıştırma kuvveti az
	Kaynak süresi kısa
	Kaynak gerçekleşmiyor

4.4.4. Kaynak çapı

Kaynak çapının ölçümü, çekme makaslama, çapraz çekme, mekanize soyma, manuel soyma vb kaynak test yöntemleri sonrası kaynağın çapının belirlenerek kabul sınırlarına göre değerlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır (Şekil 4.14.). Bu kritere göre test esnasındaki kopma sonucu oluşan kaynak çapı test uygulanmamış kaynak çapından farklı olabilir [12].



Şekil 4.14. Kaynak çapı ölçümü

Simetrik ve asimetrik kaynakların çapları Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanır [11].

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (4.1)$$

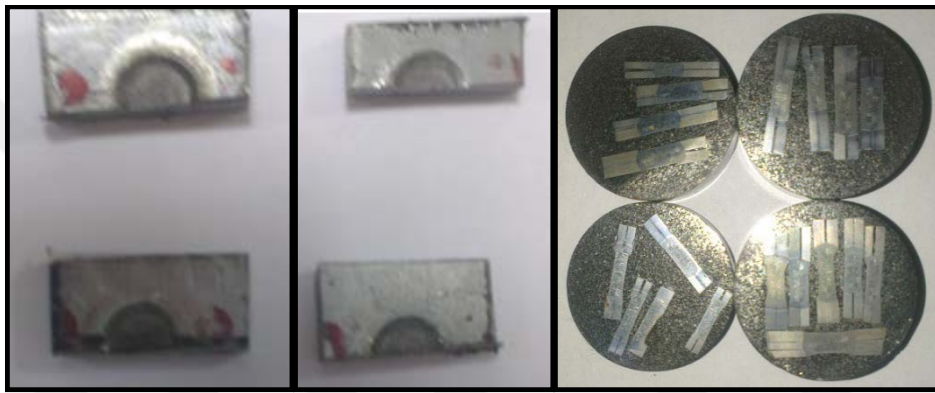
Kısmi kaynağın çapı Denklem 4.2 kullanılarak hesaplanır [11].

$$d = \frac{\left(\frac{d_1 + d_2}{2} + \frac{d_2 + d_3}{2}\right)}{2} \quad (4.2)$$

Denklemlerdeki d kaynak son çapı, d₁ kaynağın birincil çapı d₂ kaynağın ikincil çapı ve d₃ kısmi kaynağın parça çapını ifade etmektedir [11].

4.5. Metalografik İnceleme

Metalografik inceleme için öncelikle kaynak bölgesinin enine kaynak kesitleri çıkarılarak bakalite alınmıştır (Şekil 4.15.). Enine kesitler çıkarılırken kesme işlemi kaynağın tam merkezinden değil 1-2 mm merkezden kaçık olarak kesilmiştir. Çünkü kesme sırasında oluşan ısıdan dolayı çekirdek bölgesindeki yapıda değişimler meydana gelebileceği düşünülmüştür. Kesildikten sonra kaba su zımparası ile bu 1-2 mm'lik kısım alınarak bakalite alma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.15. Kesilen, kaba zımparalanan ve bakalite alınan numuneler

Bakalite alındıktan sonra, 60 ile 2500 numara arasında değişen zımpara kâğıtları kullanılarak zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Akabinde yüzeyleri parlatma keçesinde 0,1 mikron elmas solüsyon kullanılarak parlatılmıştır. Parlatma sonrası numunelerini %3 nital ve alkol karışımı dağlayıcı ile 2 saniye dağlanmıştır. Bu işlemler bittikten sonra stereo mikroskop (SM) (Şekil 4.16.), optik mikroskop (OM) (Şekil 4.17.) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) (Şekil 4.18.) incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Nikon SMZ 800 marka stereo mikroskop ile makro incelemeler, Nikon Eclipse L150A marka optik mikroskop ile mikro incelemeler gerçekleştirilmiş ve görüntülemeleri bu cihazlara bağlı bilgisayarda bulunan Clemex Vision Lite görüntüleme programı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.16. Nikon SMZ 800 marka stereo mikroskop



Şekil 4.17. Nikon Eclipse L150A marka optik mikroskop

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) için, JEOL JSM-6060LV marka mikroskop kullanılmıştır (Şekil 4.33.).



Şekil 4.18. JEOL JSM-6060LV marka SEM ve EDS cihazı

4.5.1. Mikro sertlik

Bakalite alınan kaynak kesitlerinin metalografik incelemeleri yapıldıktan sonra sertlik değerleri için, Wolpert Wilson marka cihazda Vickers sertlik ölçüm yöntemi kullanılmıştır (Şekil 4.19.).



Şekil 4.19. Wolpert Wilson marka sertlik ölçüm cihazı [27].

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMA VE SONUÇLARI

5.1. Kaynak İşlemi için Yapılan Ön Hazırlık

Kesilen parçaların kenarlarda oluşan çapaklar zımpara ile giderilmiştir. Bu işlemden sonra yüzeydeki oksit, yağ ve toz gibi kaynağı olumsuz etkileyecek formlardan temizlemek amacıyla yüzeyler öncelikle mirlon ile sonrasında C_3H_6O aseton çözeltisi içerisinde bekletilip, silindikten sonra kurutularak temizlenmiştir. Kaynatılacak parçalar kendi aralarında Tablo 5.1.'de ki kodlar ve eşleştirmeye göre ayrılıp ardından kaynakları gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.1. Numune çiftlerinin AHSS türü ve kalınlıkları

Numune Kodları	Numune Çiftinin AHSS Türü		Numune Çiftinin Kalınlıkları	
	1. plaka	2. plaka	1. plaka	2. plaka
1-1	MS 1500	MS 1500	1,5mm	1,5mm
1-2	MS 1500	TRIP 800	1,5mm	1,5mm
1-3	MS 1500	DP 1000	1,5mm	1,2mm
1-4	MS 1500	DP 600	1,5mm	1mm
2-2	TRIP 800	TRIP 800	1,5mm	1,5mm
2-3	TRIP 800	DP 1000	1,5mm	1,2mm
2-4	TRIP 800	DP 600	1,5mm	1mm
3-3	DP 1000	DP 1000	1,2mm	1,2mm
3-4	DP 1000	DP 600	1,2mm	1mm
4-4	DP 600	DP 600	1mm	1mm

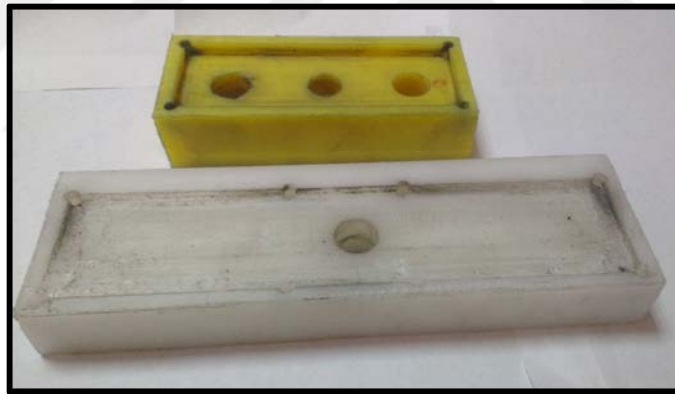
5.2. Kaynak İşlemi

Kaynak işlemine, öncelikle kaynak makinesinin mikro işlemci sayesinde otomatik olarak devreye sokacağı çevrim adımlarının değerlerini ayarlayıp ardından başlanmıştır (Tablo 5.2.). Kaynak işlemi sırasında parça yüzeylerinin elektrot temas yüzeyleri ile tam örtüşmesi için önceden kestamitten hazırlanan kalıplar kullanılmıştır (Şekil 5.1.).

Tablo 5.2. Sabit olarak ayarlanan çevrim adımları

Yaklaşma Zamanı (periyot)	Sıkıştırma Zamanı (periyot))	Kaynak Zamanı (periyot)	Bekleme Zamanı (periyot)	Uzaklaşma Zamanı (periyot)	Soğutma Suyu (l/dk)	Sıkıştırma kuvveti (kN)
25	25	*	25	25	0,20	4

*: Parça kalınlığına göre Tablo 4.4.'den belirlenecektir

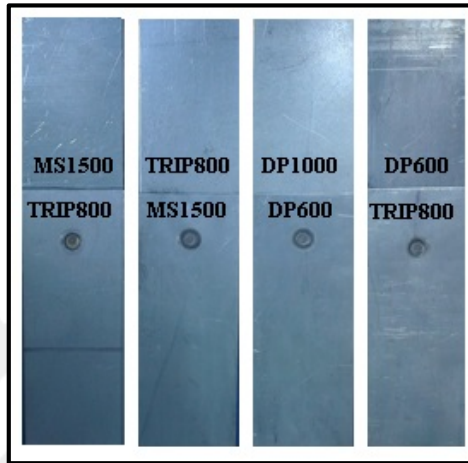


Şekil 5.1. Kaynak işlemi esnasında kullanılan kalıplar

Kaynak işleminde değişken parametrelerden olan kaynak zamanı ve kaynak süresi Tablo 4.4.'den yaklaşık olarak seçilmiş ve sac kalınlığına göre 6kA ile 10kA kaynak akımı ve 15 ile 25 periyot arasında değişkenlik gösteren değerler kullanılmıştır. Diğer değişken parametre olan kaynak akımı ise yine standartlara uygun olarak 6 ile 10 kA arasında değişkenlik göstermiştir. Yapılan ön testlerde de bu aralıkların dışında ya düşük yapışma ya da sıçramalar ve yanmalar meydana geldiği görülmüştür. Farklı olan numune çiftleri için ince olan plakaya göre periyot ve kaynak akımı seçilmiştir.

5.2.1. Çekme makaslama testi sonuçları

Kaynatılan numune çiftleri test işlemi için hazırlanmıştır (Şekil 5.2.). Kaynak işlemi sonrasında gerekli hazırlıklar yapılarak çekme makaslama testi 10 mm/dk hız ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.3.). Bu test yöntemindeki amaç yapılan kaynakların çekme makaslama gerilimleri altında maksimum dayanım değerlerini elde etmektir.



Şekil 5.2. 8 kA ve 15p'de kaynaklanan numune çifti örnekleri

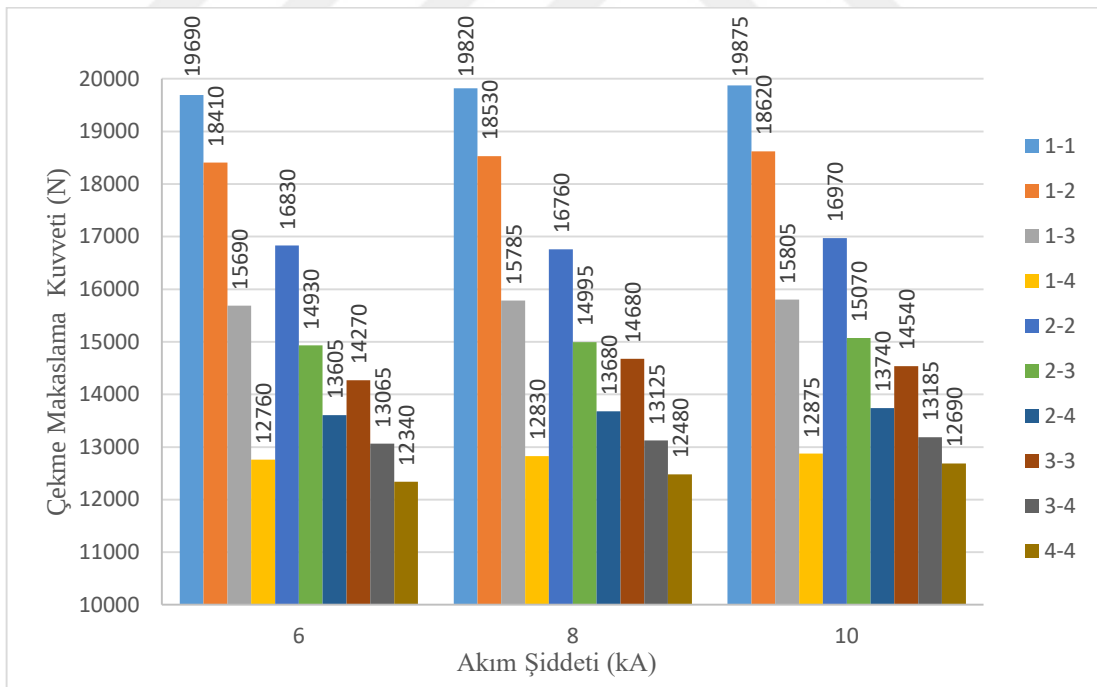


Şekil 5.3. 6 kA ve 15p'de TRIP800 ve DP600'ün çekme makaslama testi

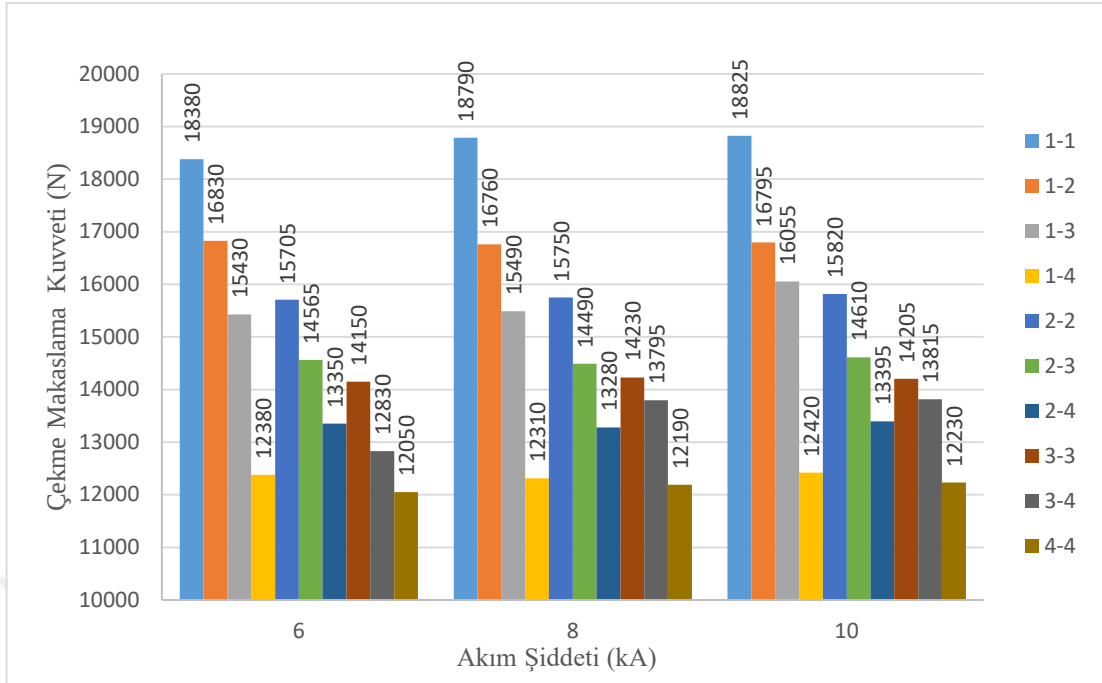


Şekil 5.4. 10 kA ve 25p'da ki kaynakların çekme makaslama testi sonrası

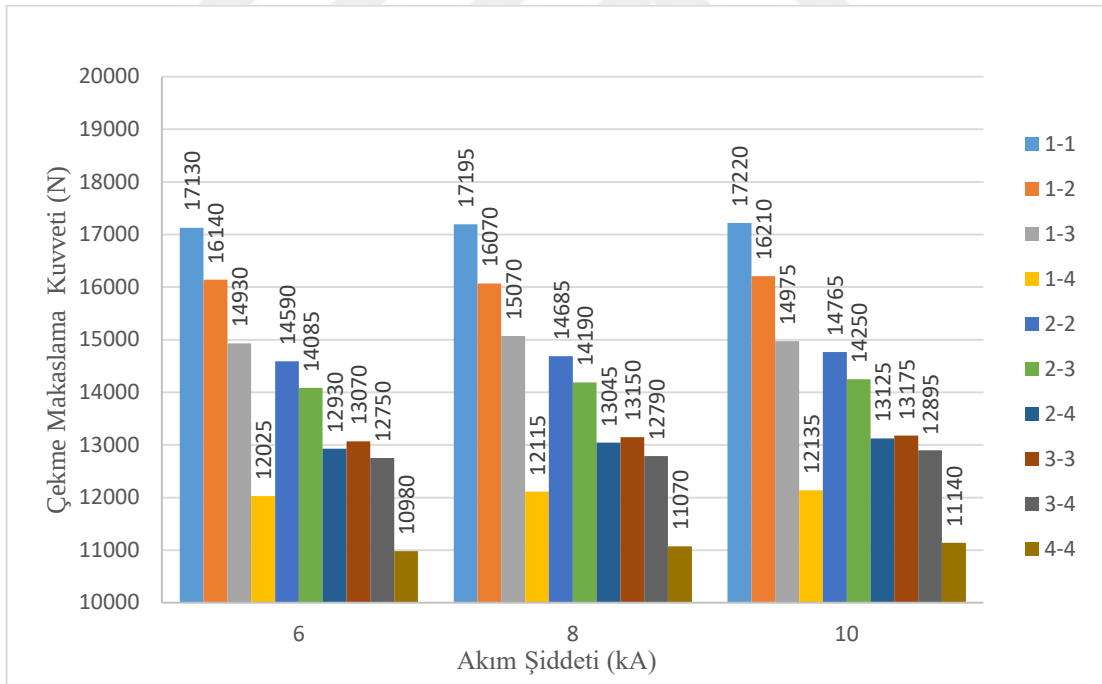
Kaynatılan numune çiftleri çekme makaslama sonrası görüntüleri Şekil 5.4.'de verilmiştir. Deneyden elde edilen maksimum dayanım değerleri 25 periyot için Şekil 5.5.'de, 20 periyot için Şekil 5.6.'da, ve 15 periyot için Şekil 5.7.'de grafikler yardımıyla gösterilmiştir.



Şekil 5.5. 6-8-10kA'de ve 25p yapılan kaynakların çekme makaslama dayanımı



Şekil 5.6. 6-8-10kA'de ve 20p yapılan kaynakların çekme makaslama dayanımı



Şekil 5.7. 6-8-10kA'de ve 15p yapılan kaynakların çekme makaslama dayanımı

Kaynatılan malzemelerin çekme makaslama dayanımları grafikten incelendiğinde genel olarak sonuçların artan kaynak akımı ve kaynak süresine bağlı olarak arttığı görülmüştür. Ancak doğru orantılı olarak artan bu değerler sıçrama ve elektrot yapışmasıyla sonuçlanan 12 ve 14kA’lık kaynak akımlarına ve 30-40 periyot kaynak sürelerine çıkıldığında düşüş gösterdiği de tespit edildiğinden optimum değerler olarak kabul ettiğimiz bu değerlere göre kaynak akımı ve kaynak süresine bağlı olarak dayanımı artıyor denmektedir. Burada ki artışın sebebinin ani ısı girdisine ve hızlı soğumaya bağlı olarak oluşan yapı oranlarıyla alakalı olduğunu düşünülmektedir.

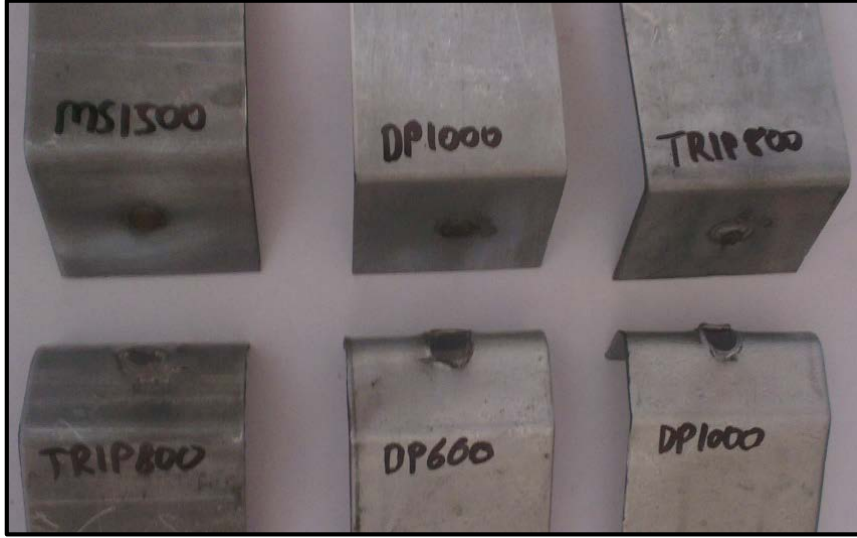
Diğer bir husus ise kaynak işlemi sırasında akım ve kaynak süresi arttıkça yüzey girintisi artmakta ve buna bağlı olarak çekirdek kesitinde daralma meydana gelmektedir. Belki bir miktar çekirdeğin çapı artmakta ancak yüksekliği daralmakta olduğundan ve dayanımın’da bu kesite bağlı olmasından dolayı bu hususta da optimum değerın üzerine çıkılması durumunda dayanımın düştüğü gözlemlenmiştir.

5.2.2. Mekanize soyma testi sonuçları

Mekanize soyma testi 10 mm/dk hız ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.8.).

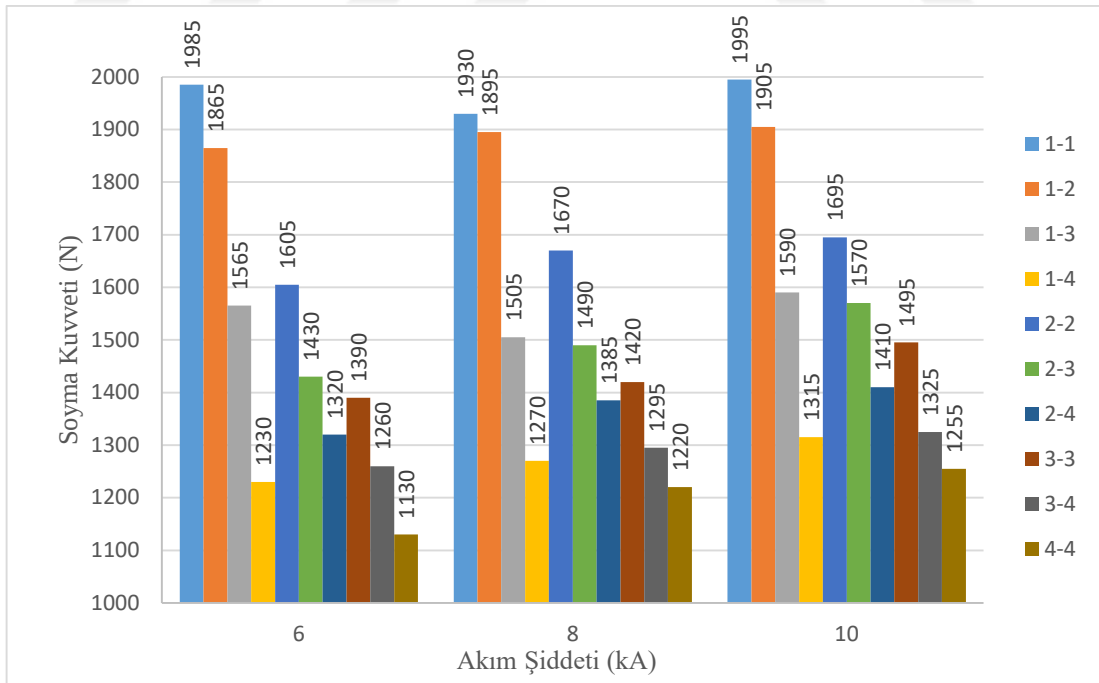


Şekil 5.8. Mekanize soyma testinin uygulması

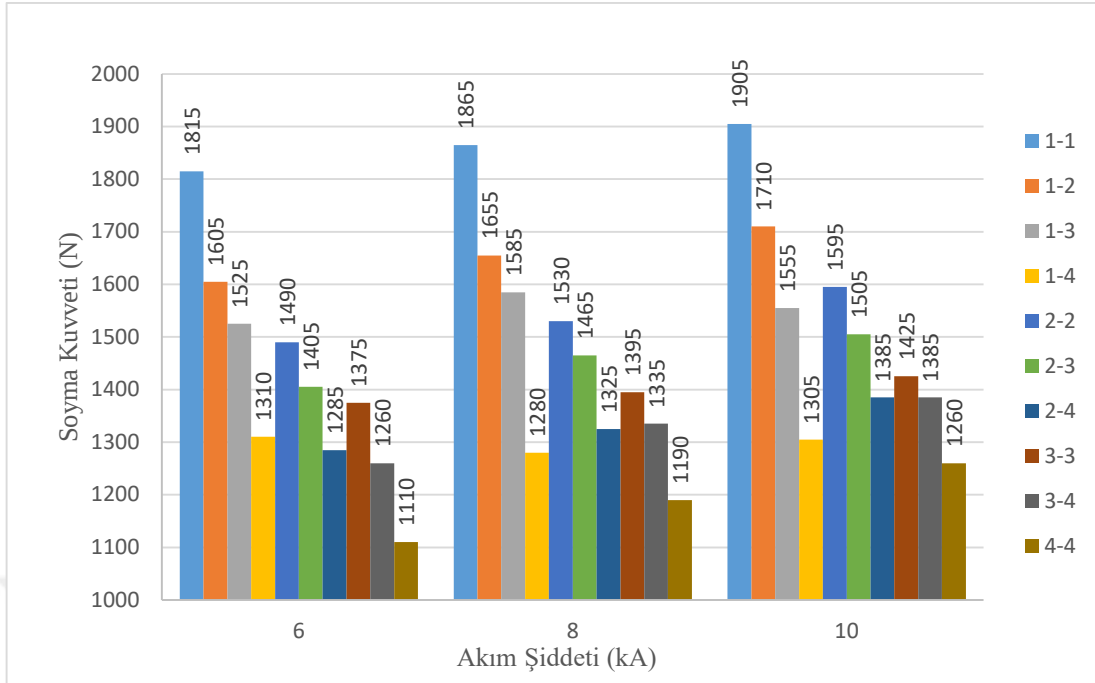


Şekil 5.9. 10 kA ve 25p'da ki kaynakların mekanize soyma testi sonrası

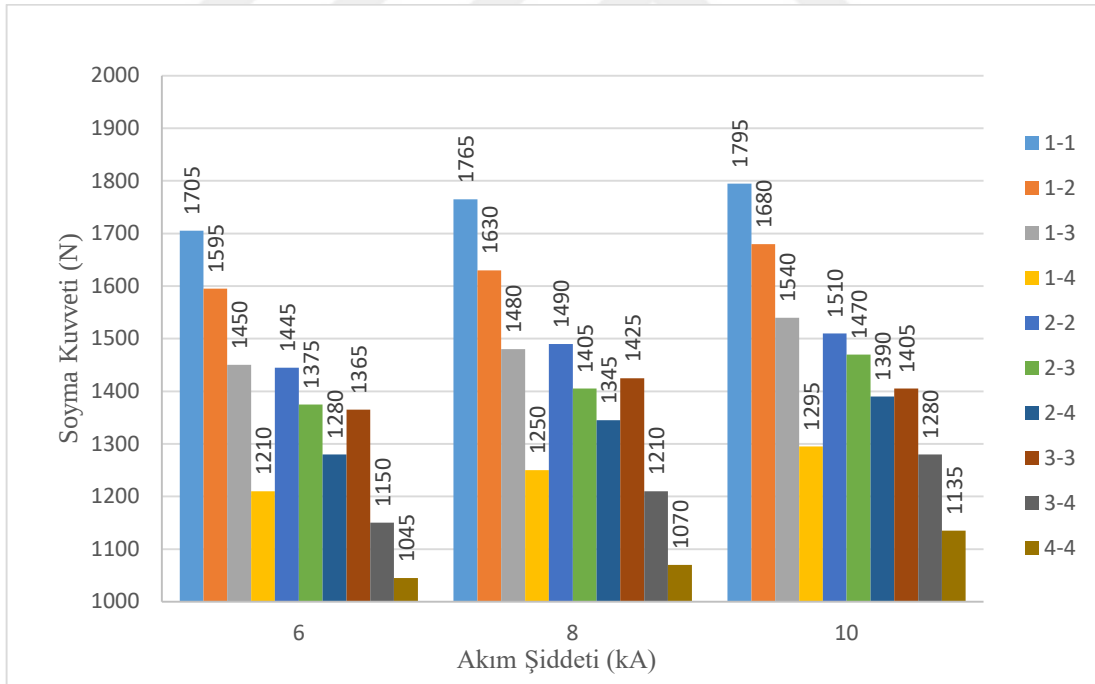
Kaynatılan numune çiftlerinin mekanize soyma deneyi sonrası görüntüleri Şekil 5.9.'da verilmiştir. Deneyden elde edilen maksimum dayanım değerleri 25 periyot için Şekil 5.10.'da, 20 periyot için Şekil 5.11.'de, ve 15 periyot için Şekil 5.12.'de grafikler yardımıyla tanımlanmıştır.



Şekil 5.10. 6-8-10kA'de ve 25p yapılan kaynakların mekanize soyma dayanımı



Şekil 5.11. 6-8-10kA'de ve 20p yapılan kaynakların mekanize soyma dayanımı



Şekil 5.12. 6-8-10kA'de ve 15p yapılan kaynakların mekanize soyma dayanımı

Kaynatılan malzemelerin mekanize soyma dayanımları, grafiklerden incelendiğinde burada da çekme makaslama olduğu gibi genel olarak artan kaynak akımı ve kaynak süresine bağlı olarak dayanımın arttığı görülmüştür.

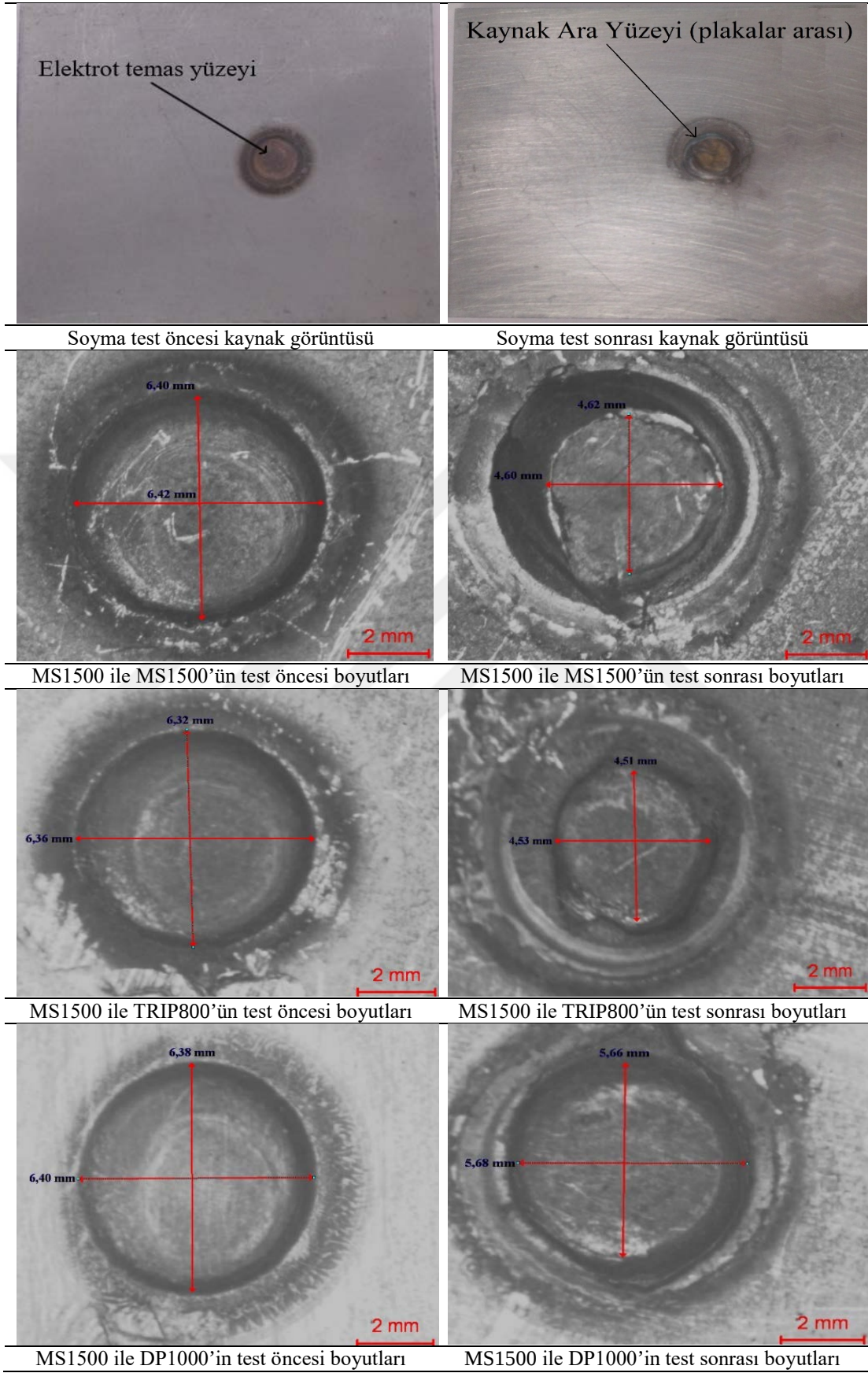
10 kA kaynak akımı ve 25 p kaynak süresinde kaynatılan levhalardan kendi türü (MS ile MS, TRIP ile TRIP ve DP ile DP) ile kaynatılanlar, hem çekme makaslama testinde (Şekil 5.5.) hem de manuel soyma testinde (Şekil 5.10.) en iyi dayanımların elde edildiğini göstermiştir. Örneğin 10 kA kaynak akımı ve 25 p kaynak süresinde kaynatılan MS1500 ile MS1500'ün çekme makaslama testi sonucu 19875 N'luk dayanıma sahip iken parametreler değişmeksizin yapılan MS1500 ile DP600'ün çekme makaslama testi sonucunun 12875 N'luk dayanıma sahip olduğu görülmüştür (Şekil 5.5.). Yine aynı parametreler ile kaynatılan MS1500 ile MS1500 mekanize soyma testi sonucu 1995 N'luk dayanıma sahip iken parametreler değişmeksizin yapılan MS1500 ile DP600'ün mekanize soyma testi sonucunun 1315 N'luk dayanıma sahip olduğu görülmüştür (Şekil 5.10.). Ayrıca yukarıda belirtilen parametrelerde kaynatılan plakaların kaynak bölgelerinin sertlik değeri ölçümünde MS1500 ile MS1500'ün çekirdeğinde ölçülen en yüksek değer 475 vikers iken MS1500 ile DP600'ün çekirdeğinde ölçülen en yüksek değer 453 vikers olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar ışığında farklı dayanımlara sahip (1500 MPa ve 600MPa) çeliklerin birbiri ile kaynatılması sonucunda kaynağın dayanımının düşük dayanıma ve ince kesite sahip (600 MPa) çeliğin özelliklerini taşıdığı ve bu sonucunda tasarım ve imalat süreçlerinde dikkate alınması gerektiği düşünülmüştür.

5.2.3. Manuel soyma testi sonuçları

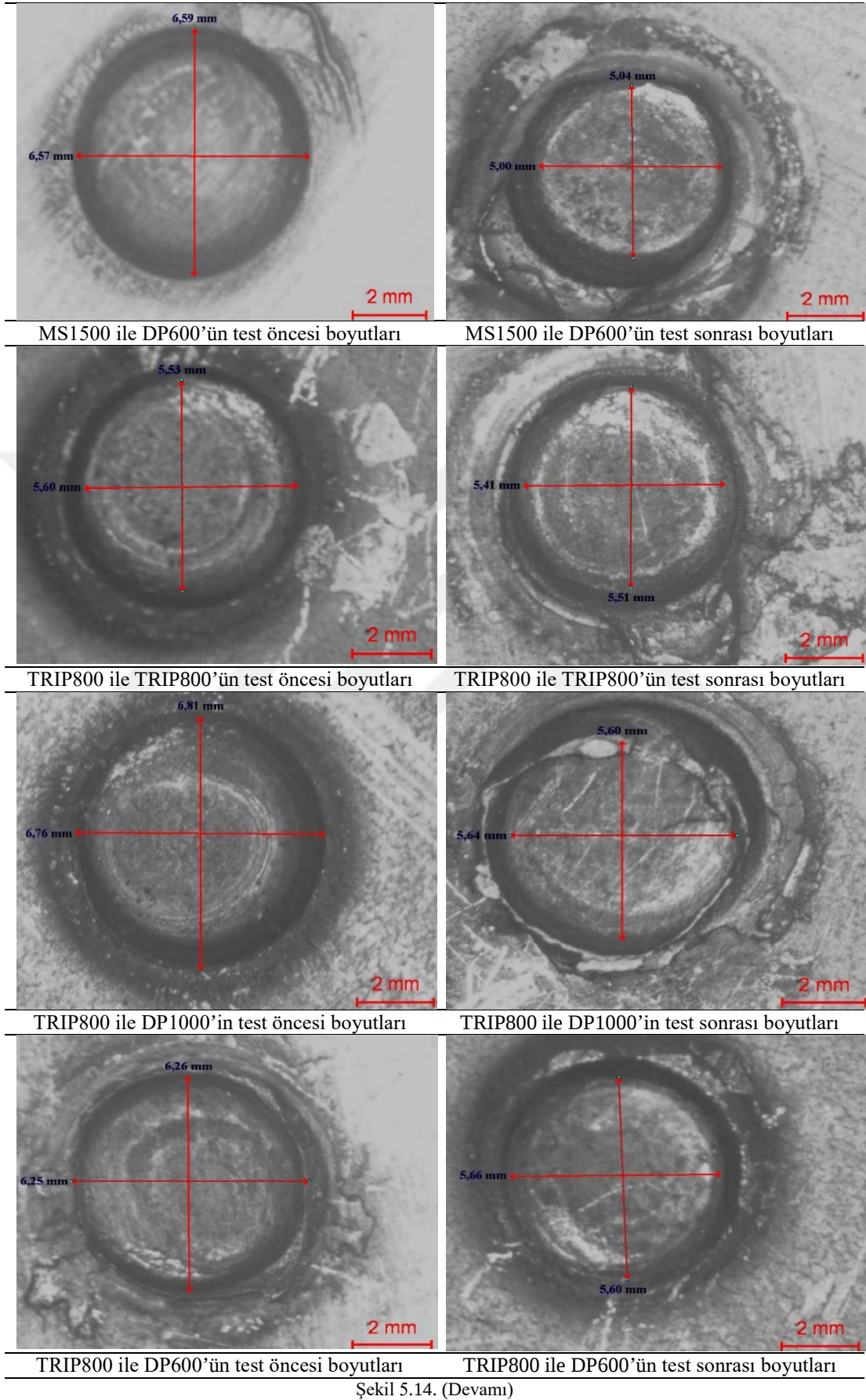
Bu test yönteminde yapılan kaynakların kopma tipleri incelenmiş (Şekil 5.13.) ve kaynak çapları ölçülmüştür (Şekil 5.14.). Bu bölümde verilen kaynak resimleri 10 kA kaynak akımı ve 25 periyot ile yapılan kaynaklara aittir.



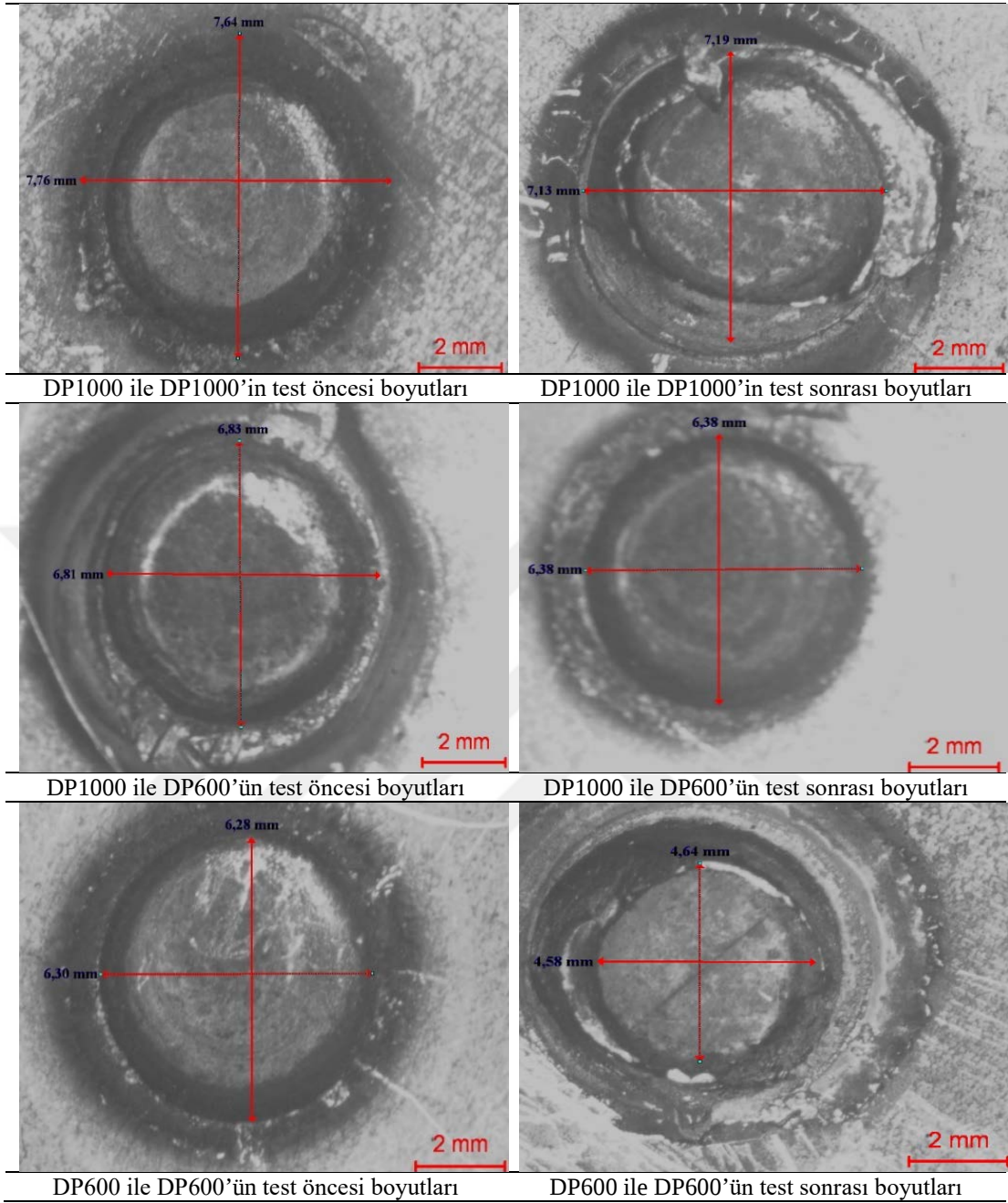
Şekil 5.13. Manuel soyma testinin uygulanışı



Şekil 5.14. Soyulma testi öncesi ve sonrası kaynak boyutları



Şekil 5.14. (Devamı)



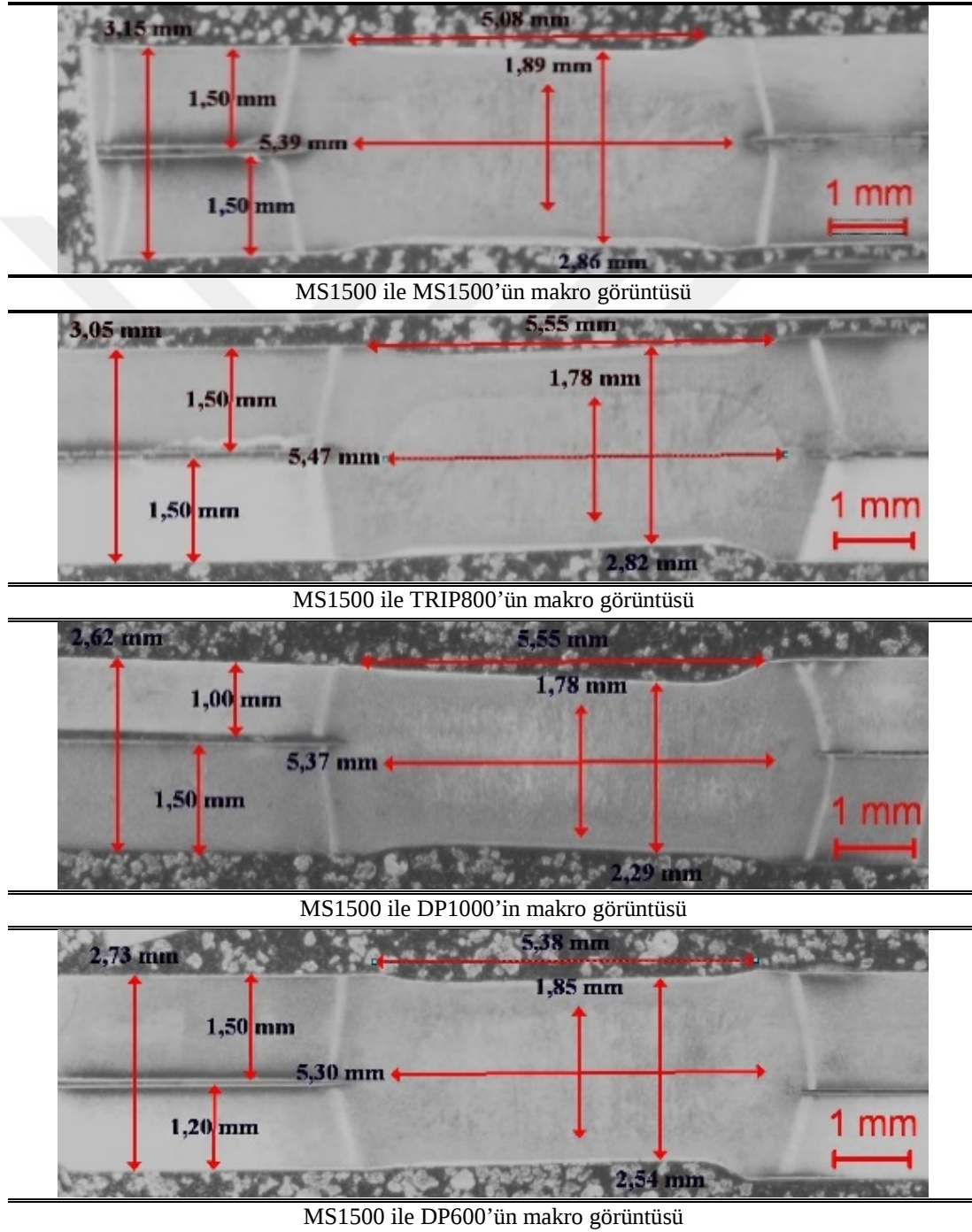
Şekil 5.14. (Devamı)

Kaynak çapları incelendiğinde soyma testi sonrası kopan kaynakların çaplarının test öncesi çaplarına göre %24 çap farklılıkları olduğu görülmüştür (Şekil 5.14.). Mikro yapıları incelendiğinde herhangi bir nüfuziyetsizlik belirtisi ile karşılaşılmamıştır.

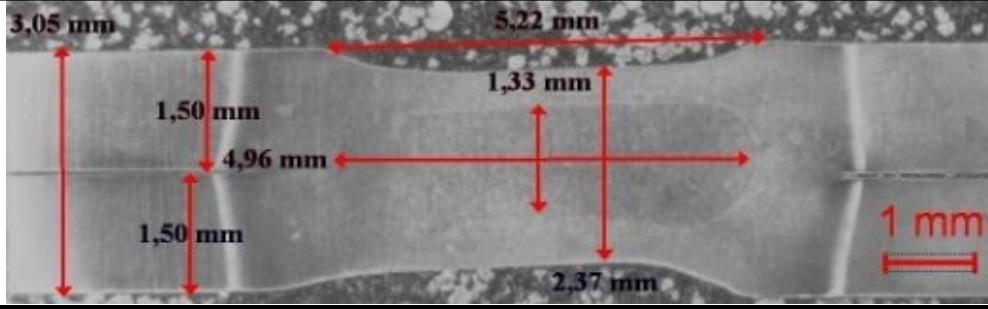
Kaynakların kopma tiplerine bakıldığında tamamında ideal olan düğmelenme tipi kopma meydana geldiği görülmüştür. Bu durumda, kaynakların ideal olduğunun bir başka göstergesi olduğu düşünülmektedir.

5.3. Kabul Kriterleri Kapsamında Yapılan İnceleme Sonuçları

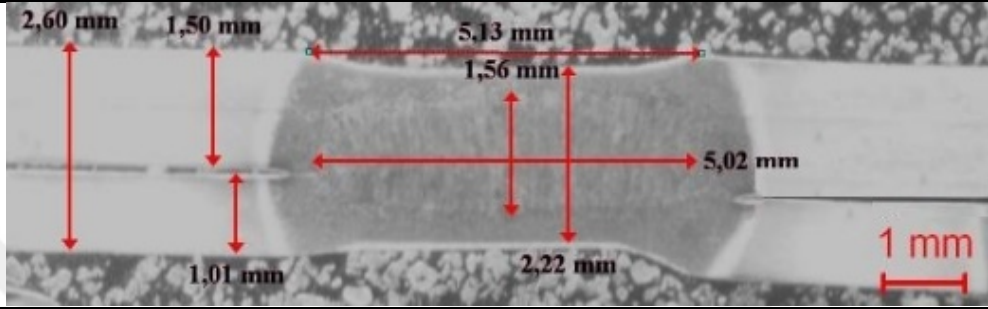
Bölüm 4.4.'de belirtilen kabul kriterlerine göre yapılan incelemeler Şekil 5.15.'de yer almaktadır. Bu bölümde incelen makro yapılar 10 kA kaynak akımı ve 25 periyot kaynak süresi ile yapılan kaynaklara aittir.



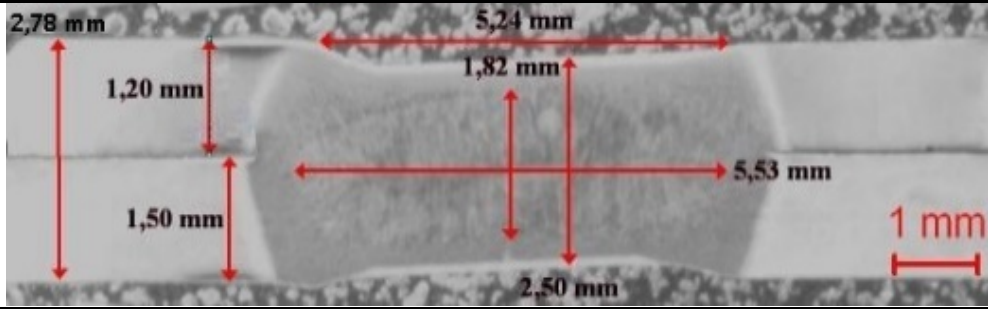
Şekil 5.15. Kabul kriterlerinde ihtiyaç duyulan ölçüler ve makro görüntüler



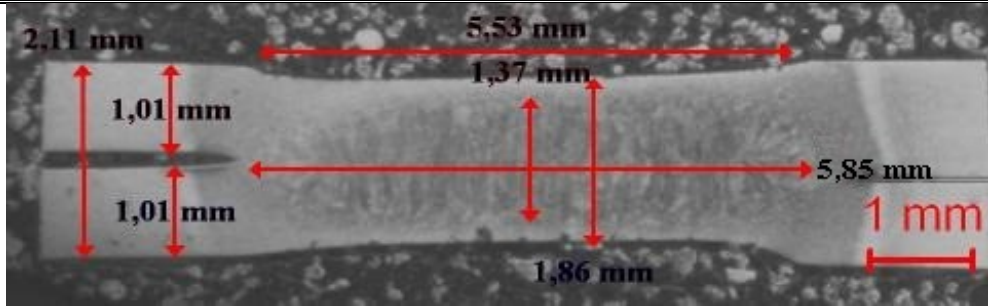
TRIP800 ile TRIP800'ün makro görüntüsü



TRIP800 ile DP1000'in makro görüntüsü

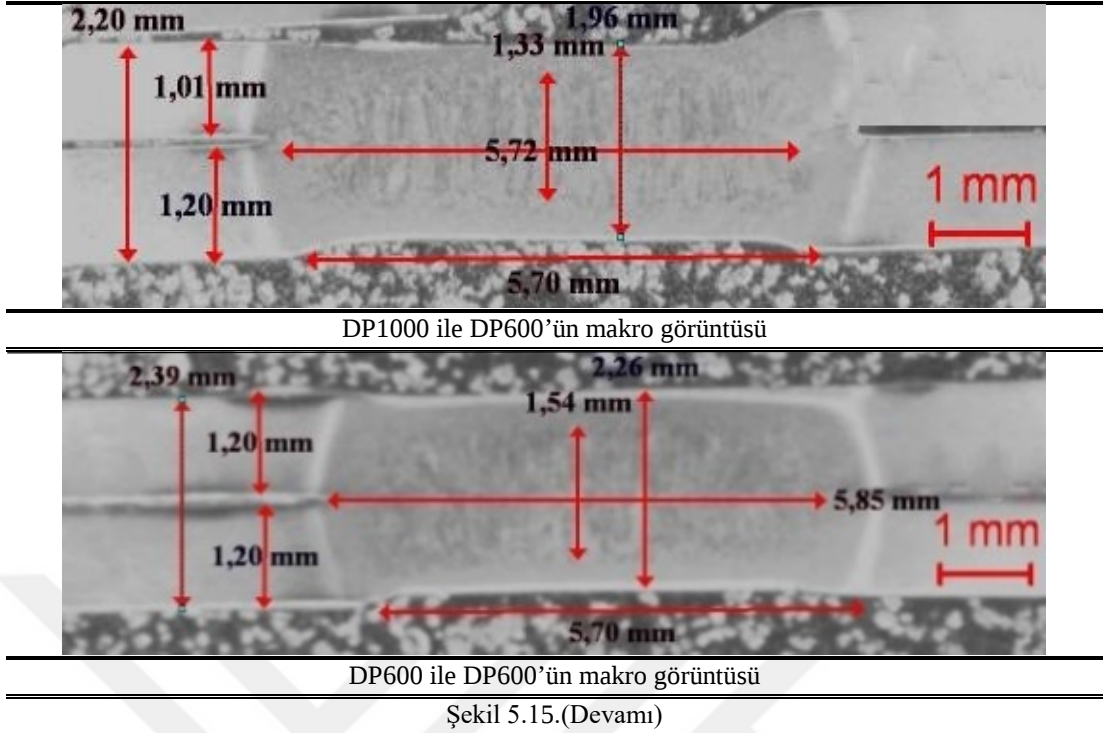


TRIP800 ile DP600'ün makro görüntüsü



DP1000 ile DP1000'in makro görüntüsü

Şekil 5.15.(Devamı)



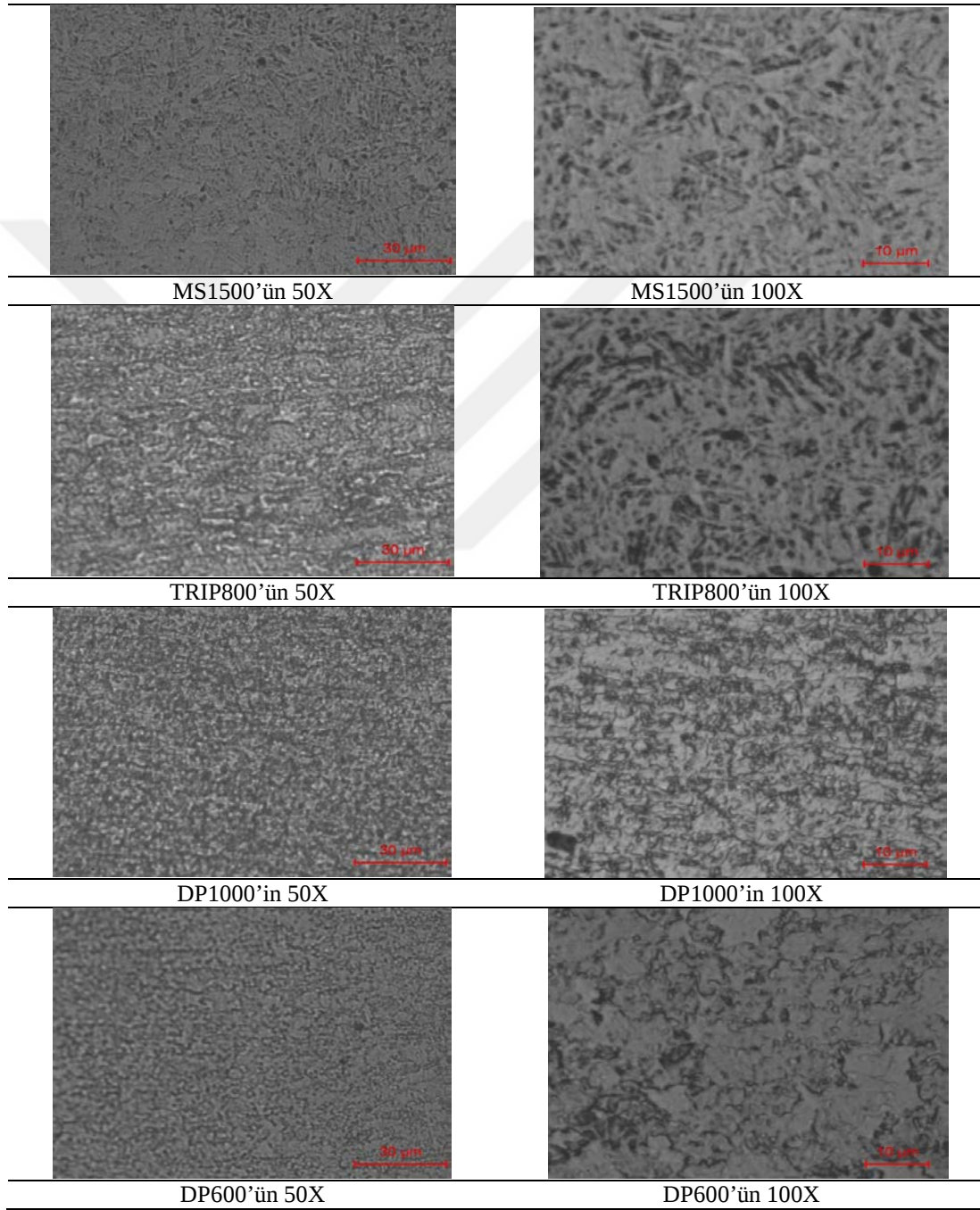
Kabul kriterleri kapsamında incelediğimiz kaynakların tamamının kabul sınırları içerisinde kaldığını görülmüştür. Ancak bu kriterlerin değerlendirilmesinin laboratuvar ortamında yavaş ve özenle yapılan kaynaklarda değil otomobil endüstrisinde hızlı ve tamamen otomasyon kriterlerine bağlı faaliyet gösteren firmalarda yapılan kaynakların incelenmesiyle daha verimli sonuçların ortaya çıkacağını düşünülmektedir.

Kabul kriterlerini genel anlamda incelediğimizde bu kriterlerin yerine getirilebilmesi için öncelikle malzemenin iyi tanınması akabinde de parametrelerin uygun seçilmesinin ön plana çıkmakta olduğunu düşünülmektedir.

5.4. Metalografik İnceleme Sonuçları

5.4.1. Optik mikroskop sonuçları

Esas Metal, ITAB ve Çekirdek mikro yapıları aşağıdaki resimler ile yorumlanmıştır.

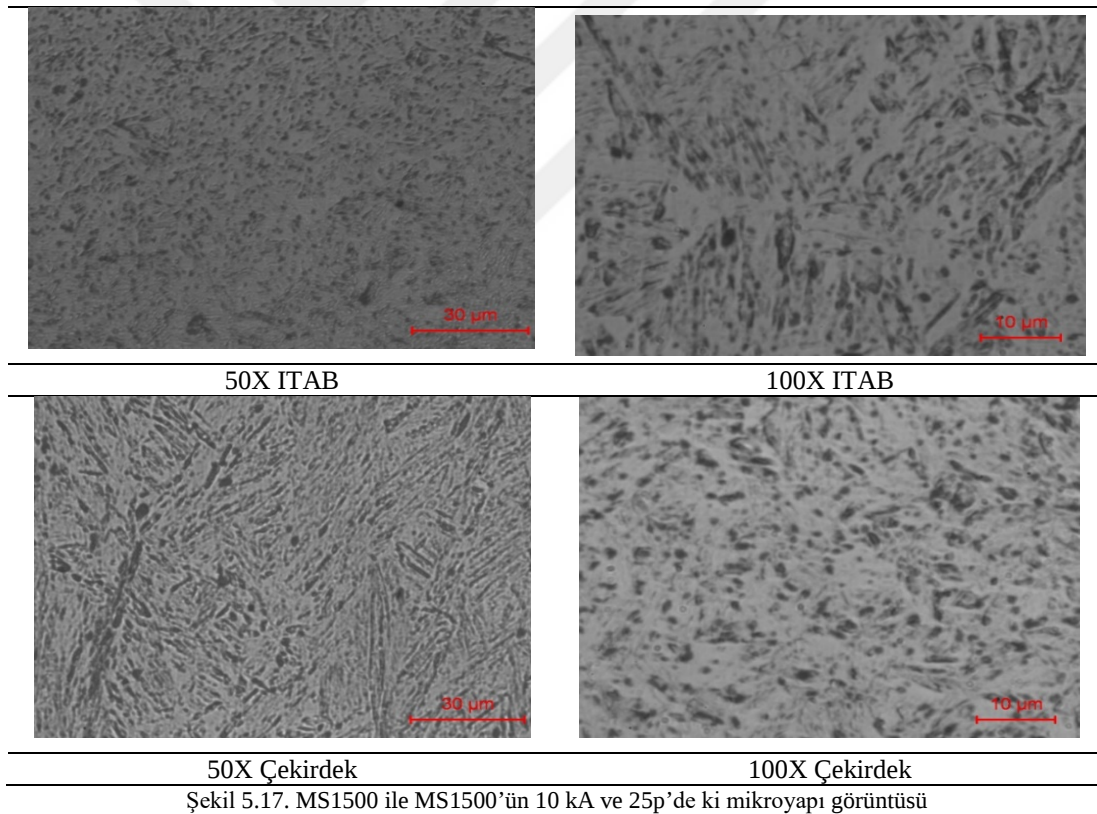


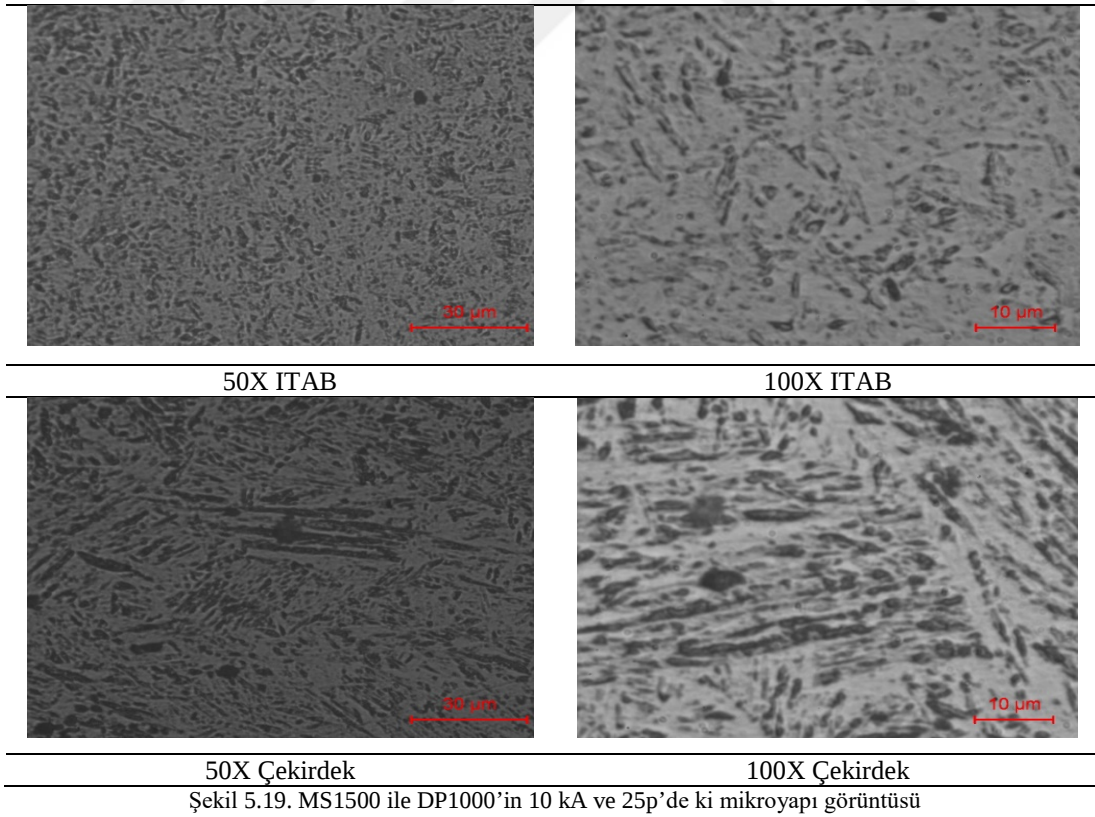
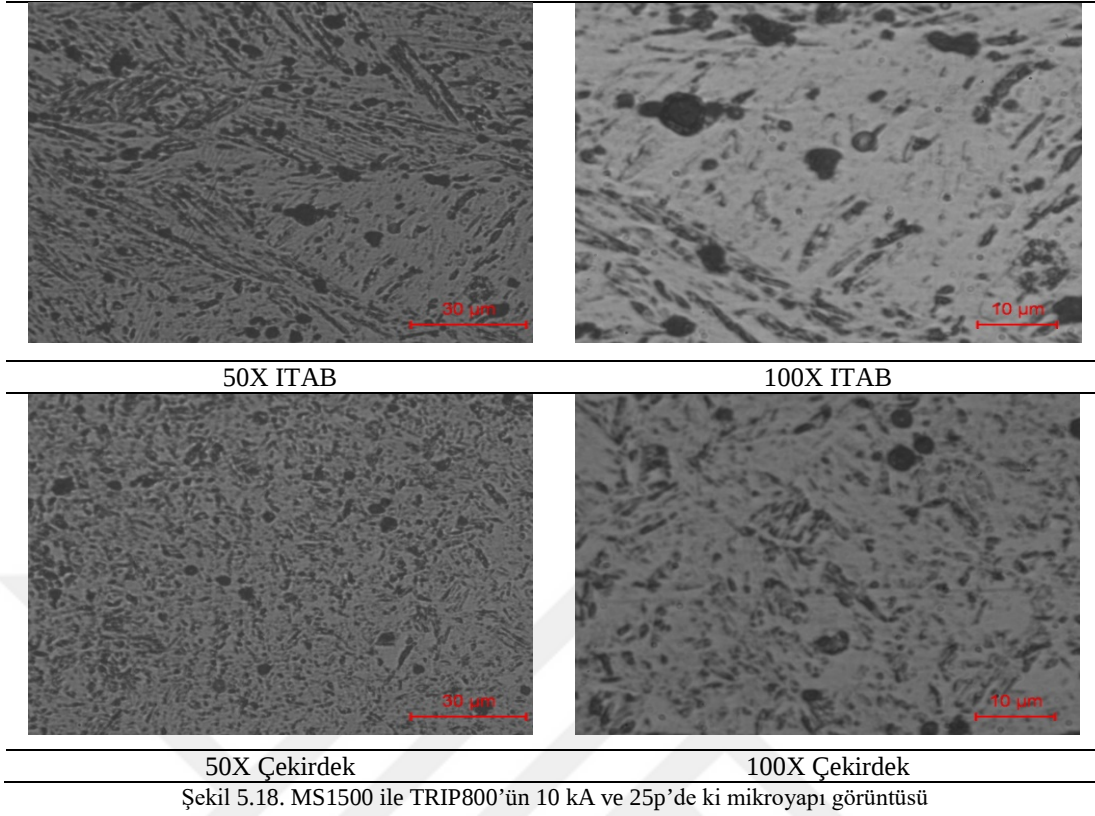
Şekil 5.16. Esas metallerin mikroyapı görüntüsü

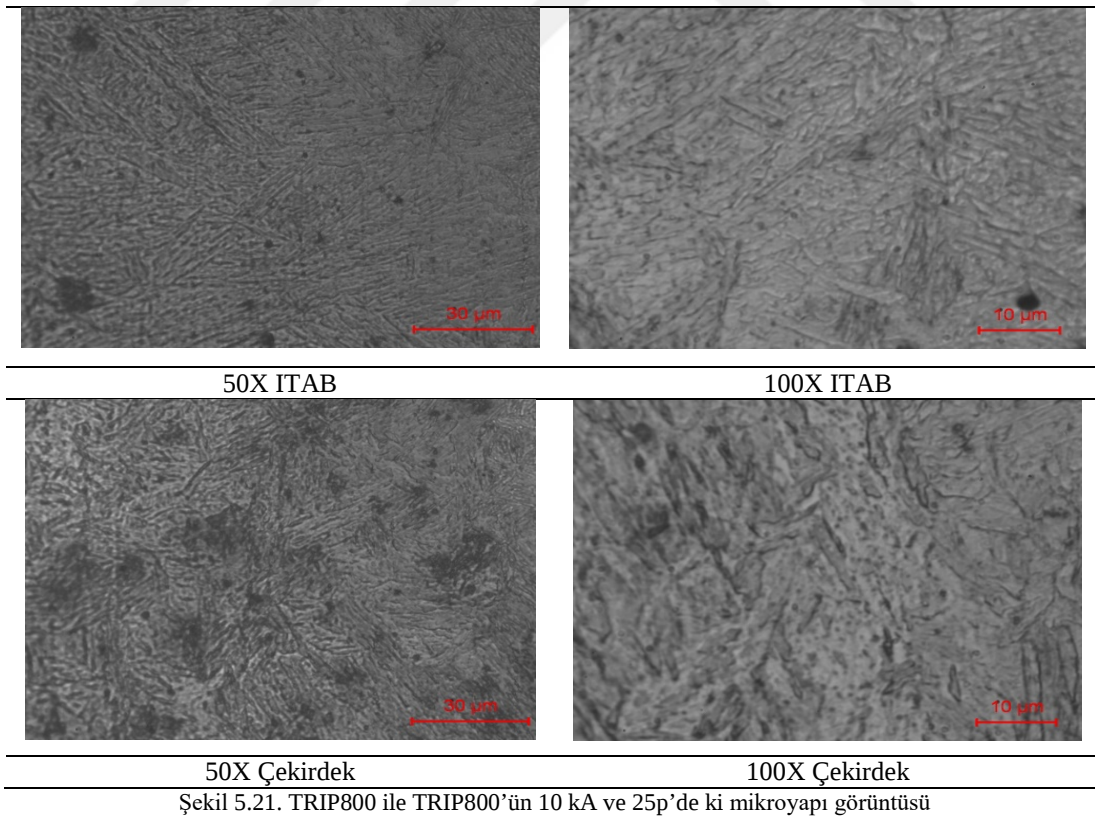
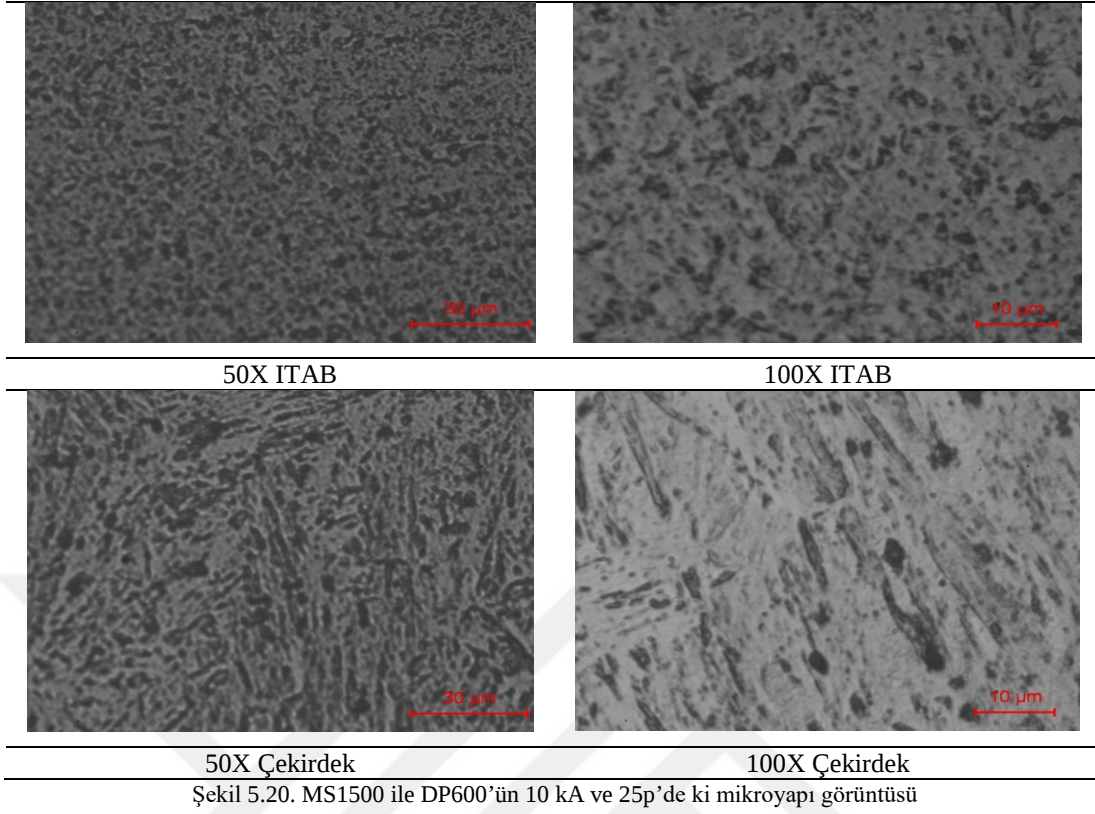
Yapılan kaynakların mikro yapıları incelendiğinde esas metale göre ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve çekirdek bölgelerinde değişiklikler olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.16. - Şekil 5.26.).

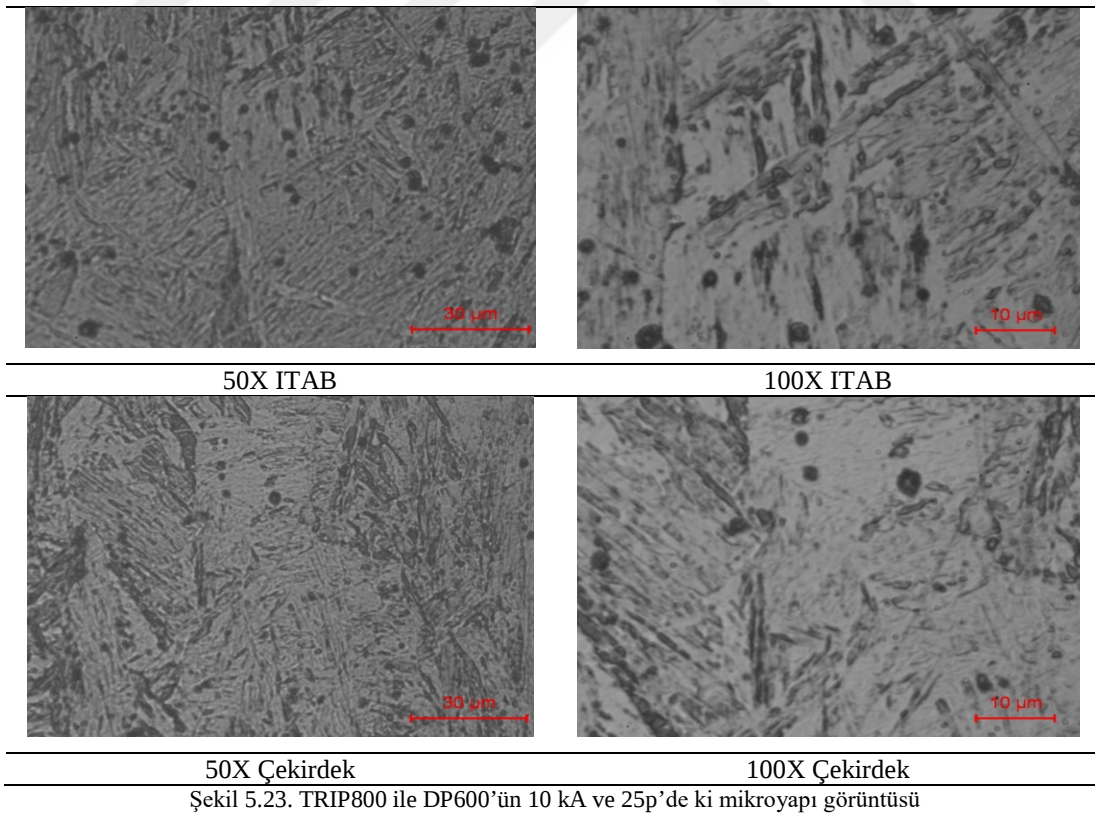
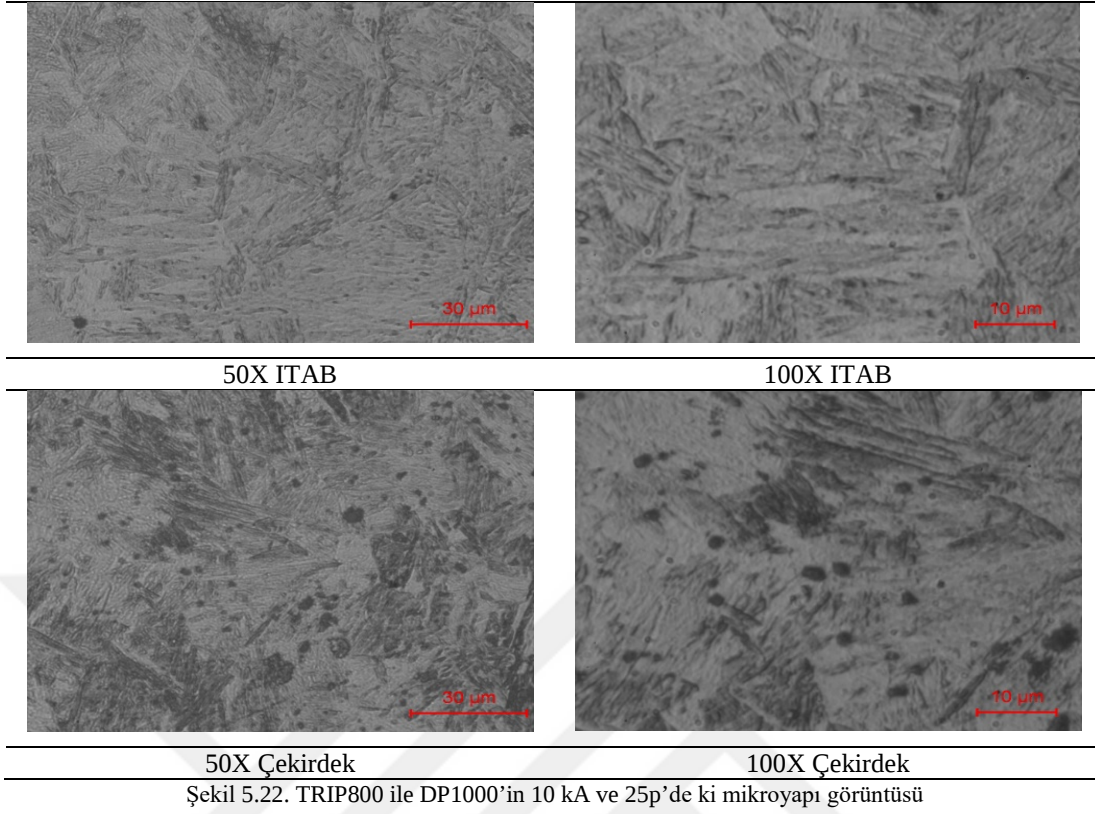
Kaynak işlemi esnasında malzemenin göstermiş olduğu dirence bağlı olarak artırılan kaynak akımı, ısı girdisinin artmasına neden olduğu düşünülmüştür. Bu ısı girdisi kaynak süresinde etkisiyle mikro yapının değişmesini sağladığı düşünülmüştür.

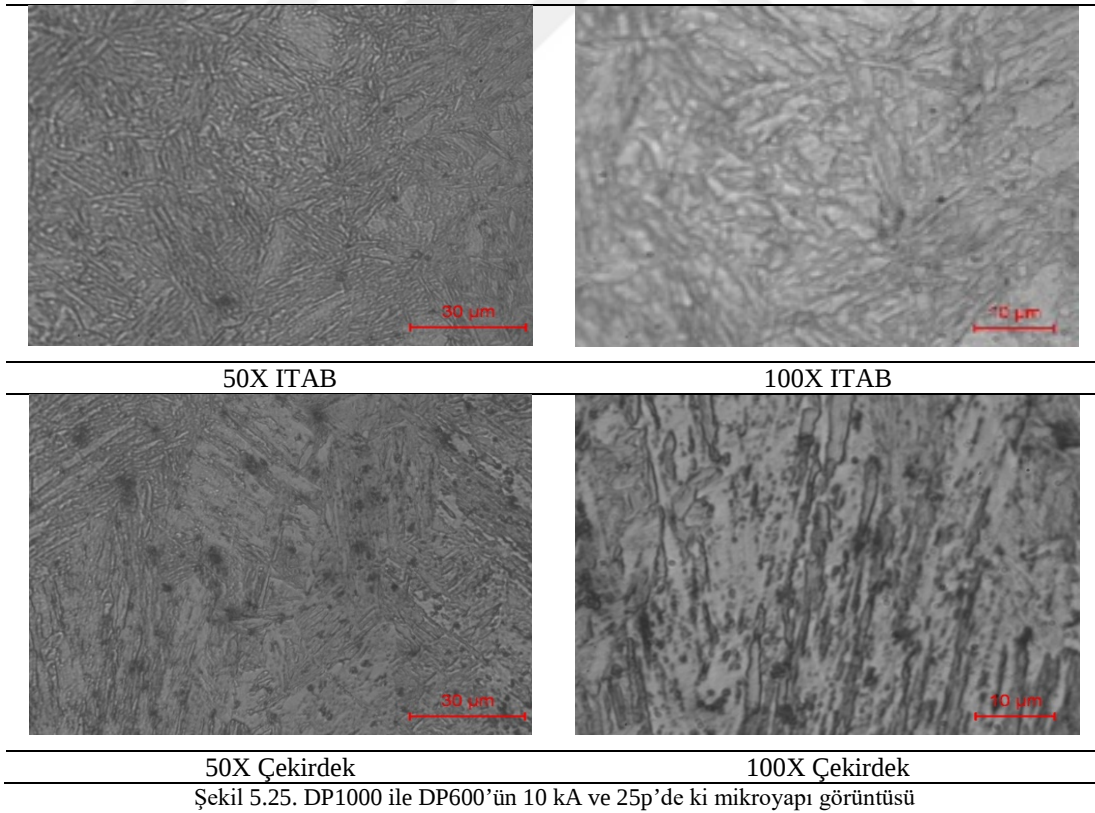
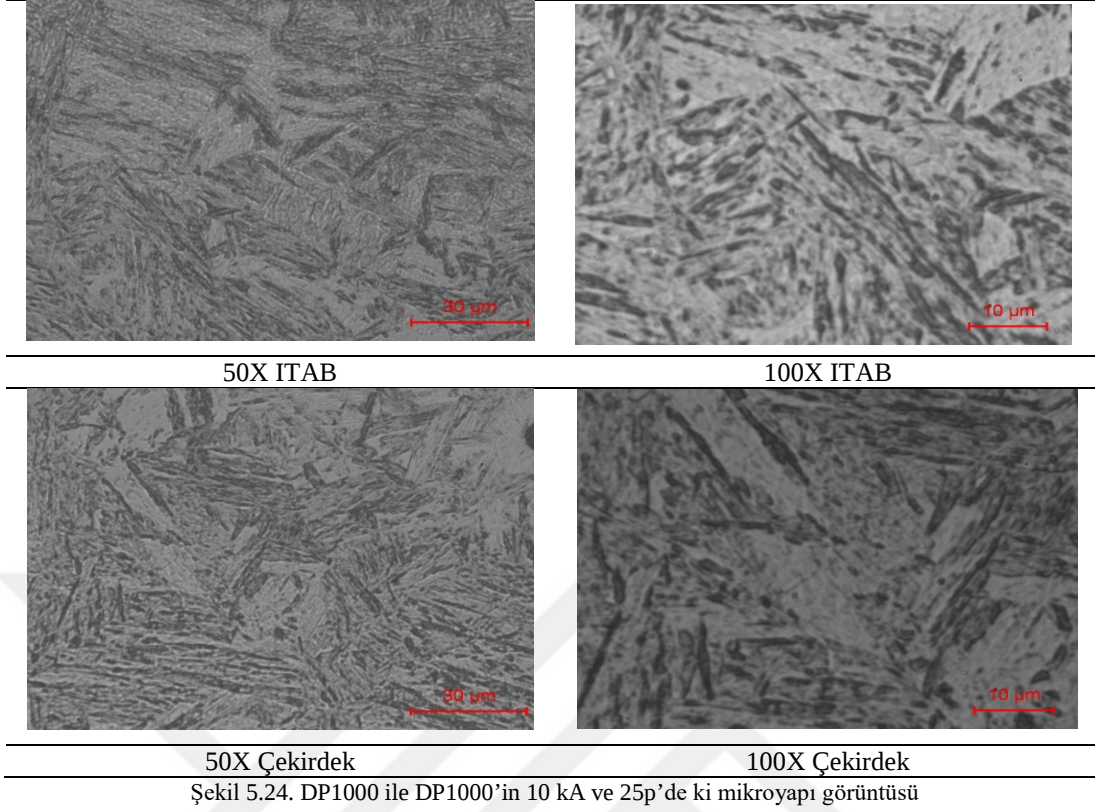
Bu yapılarda buluna ferrit ve martenzitin kaynak esnasındaki ani ısı girdisi ve soğuma sebebiyle kaynak sonrası yapıda değişikliklerin meydana geldiği görülmüştür. Bunlar ITAB ve çekirdek olarak ayrı ayrı 50X ve 100X büyütmede incelenmiştir (Şekil 5.17. - Şekil 5.26.).

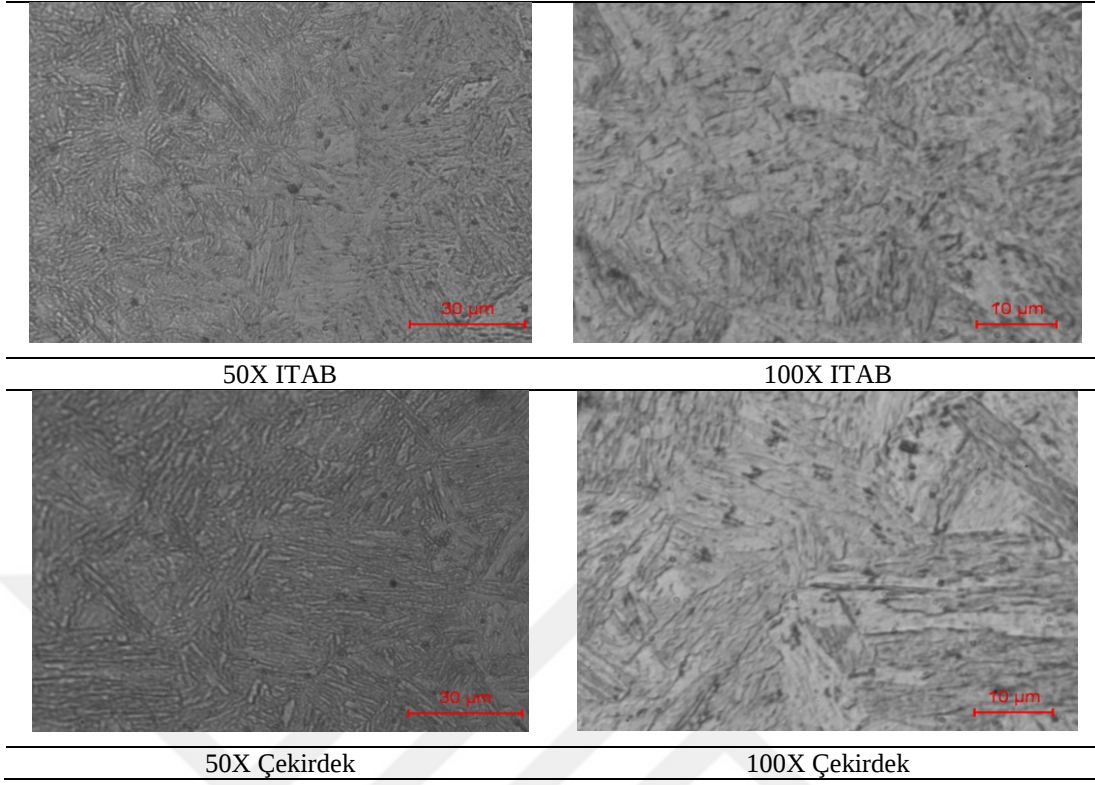










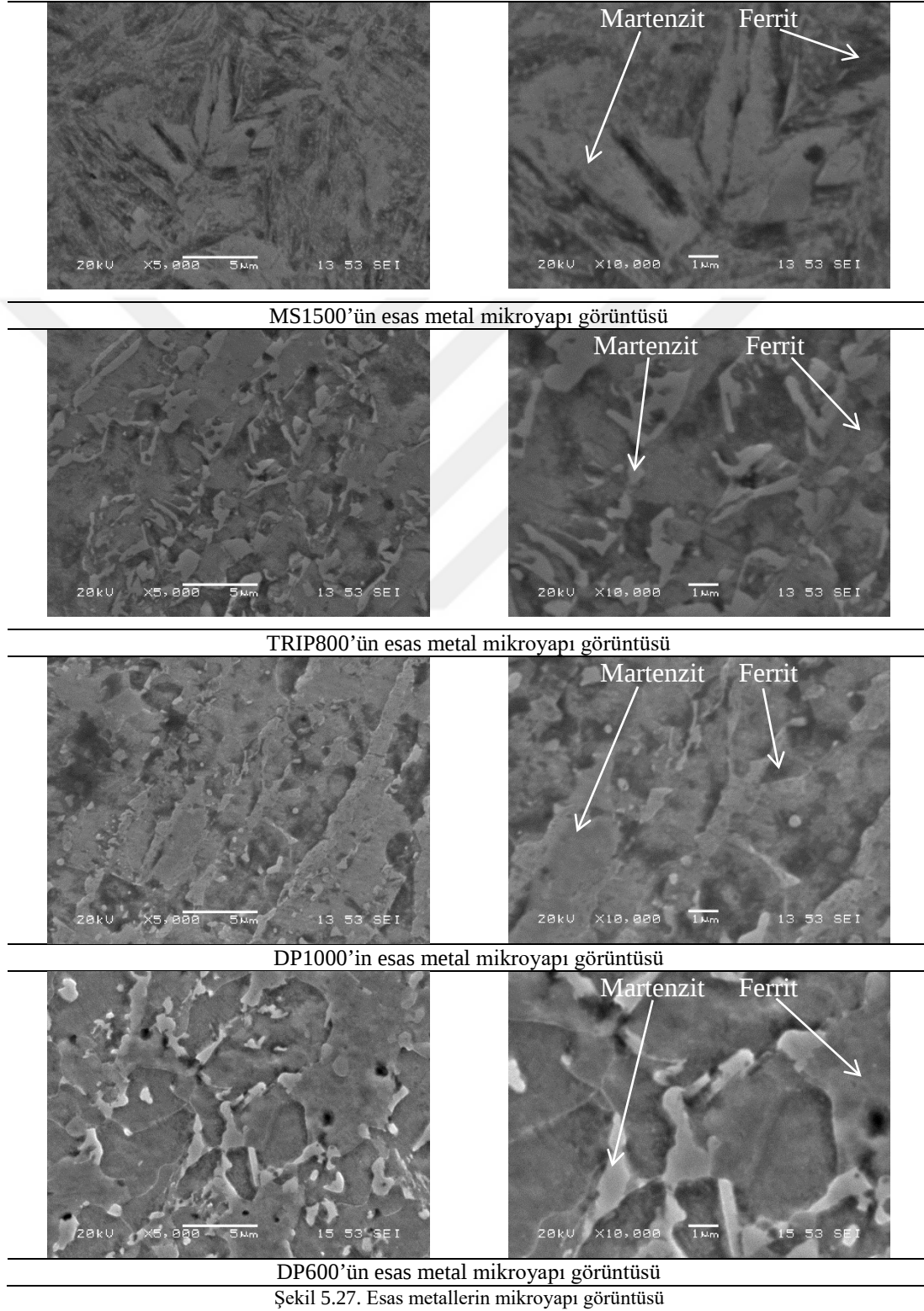


Şekil 5.26. DP600 ile DP600'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü

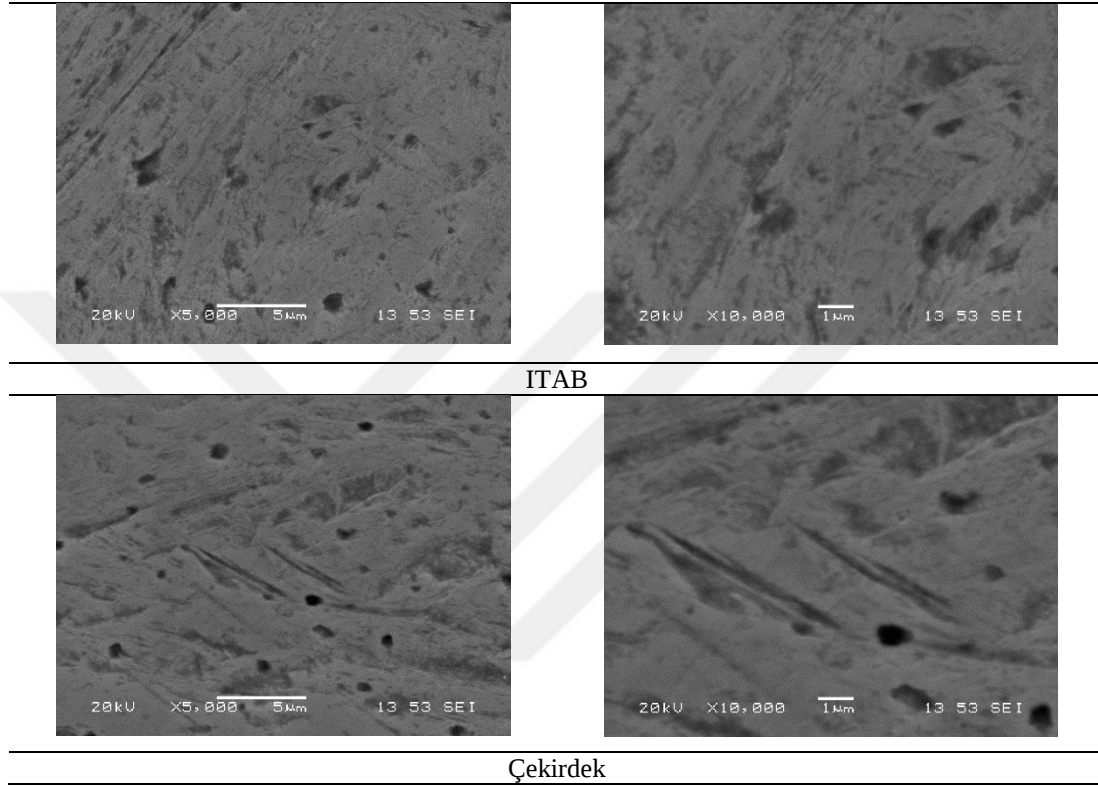
Optik mikroskop görüntüler incelendiğinde genel olarak çekirdek bölgesinde martenzitin oluştuğu görülmüştür. Özellikle çekirdek bölgesinde miktarı oldukça fazla olan martenzit ile birlikte ferrit de görülmüştür (Şekil 5.17. - Şekil 5.26.).

5.4.2. SEM sonuçları

SEM ile esas metal, ITAB ve çekirdek 5000 ve 10000 büyütmede incelenmiştir.

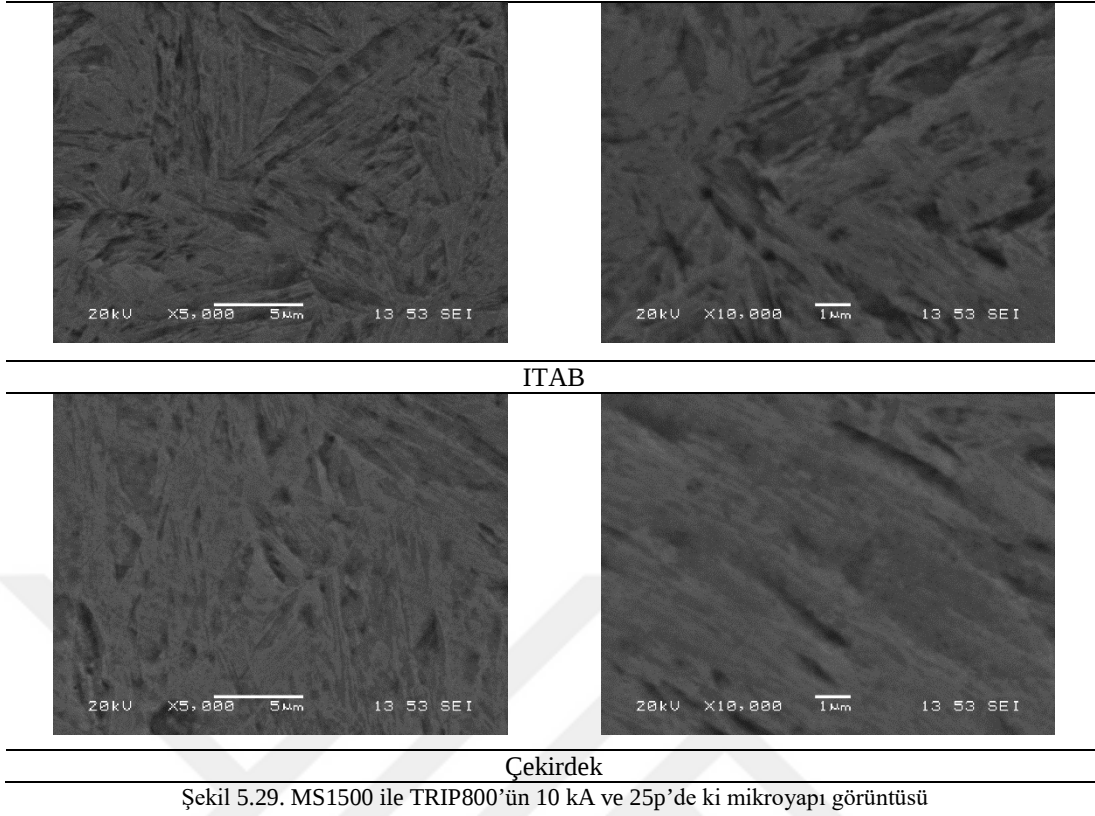


Esas metalden alınan sem görüntüleri incelendiğinde MS1500'ün tamamen martenzitten oluştuğu, TRIP800'ün ferrit matris üzerine yayılmış beynit ve martenzitlerden oluştuğu görülmüştür. DP1000 ve DP 600'ün ise ferrit matris üzerine yayılmış martenzitlerden oluştuğu görülmüştür (Şekil 5.27.).

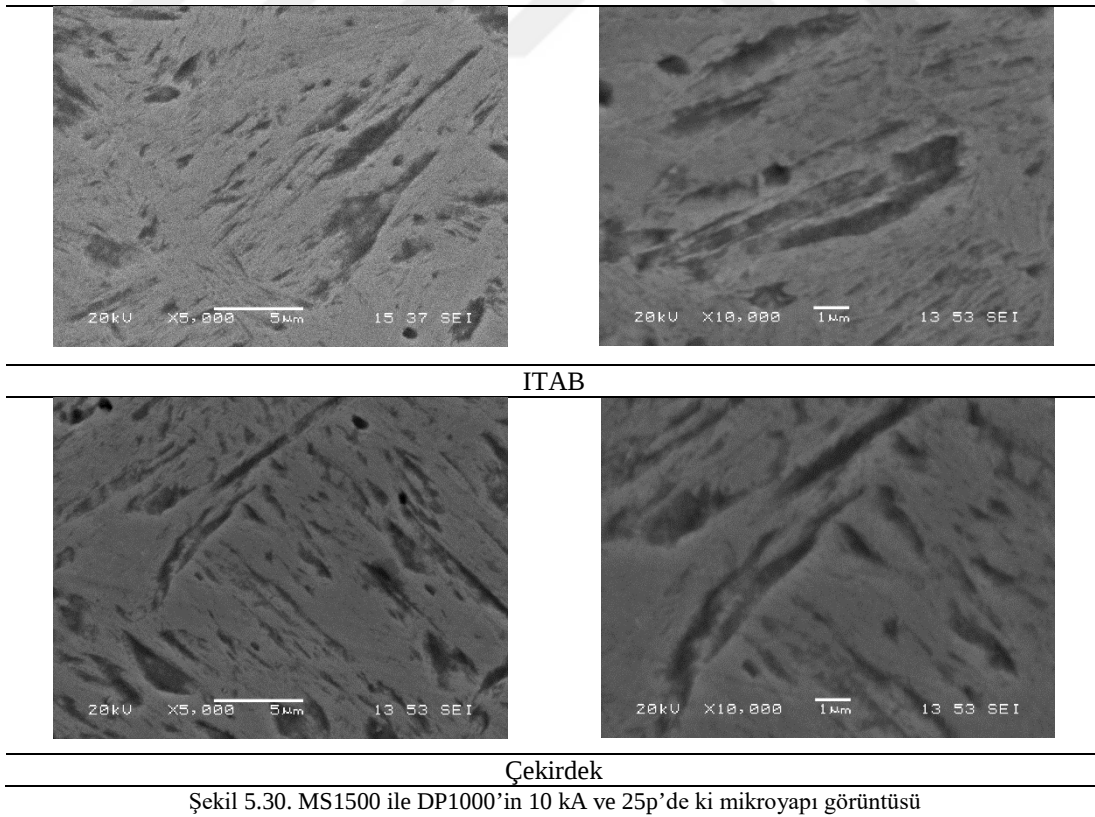


Çekirdek

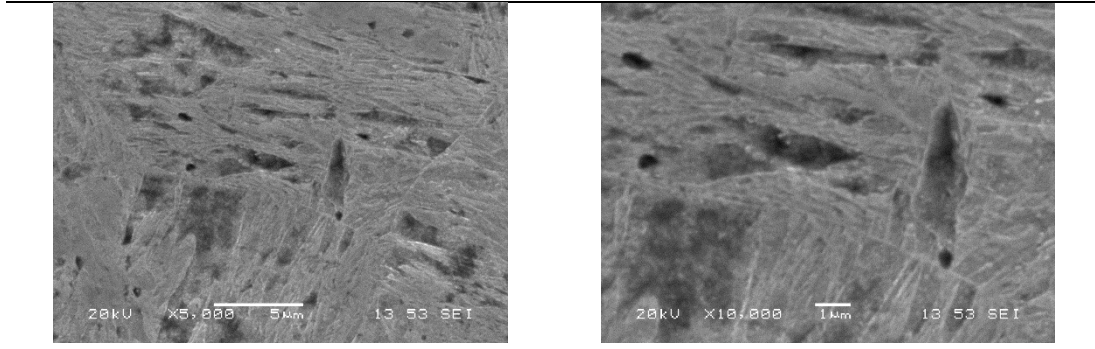
Şekil 5.28. MS1500 ile MS1500'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü



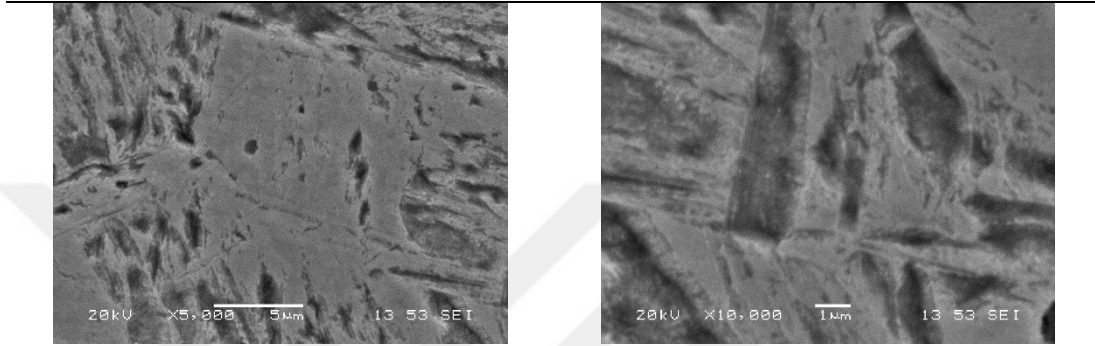
Şekil 5.29. MS1500 ile TRIP800'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü



Şekil 5.30. MS1500 ile DP1000'in 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü

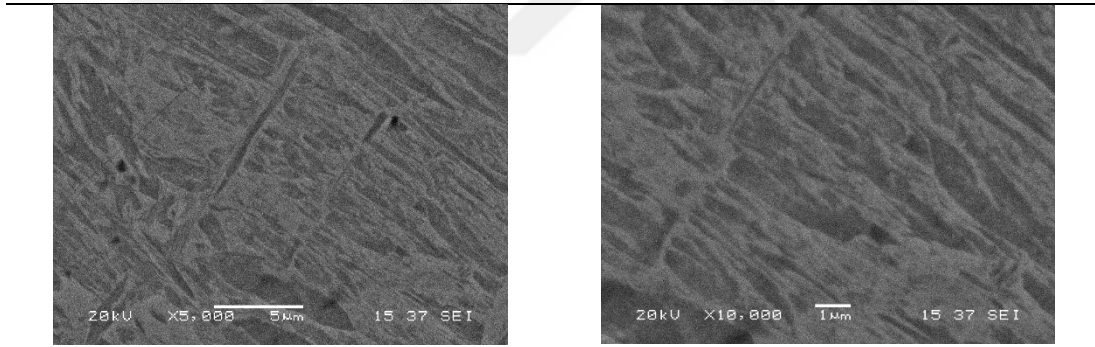


ITAB

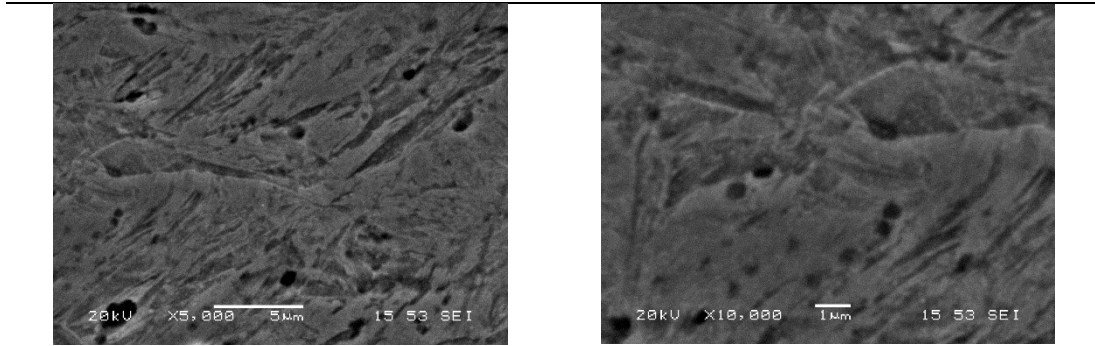


Çekirdek

Şekil 5.31. MS1500 ile DP600'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü

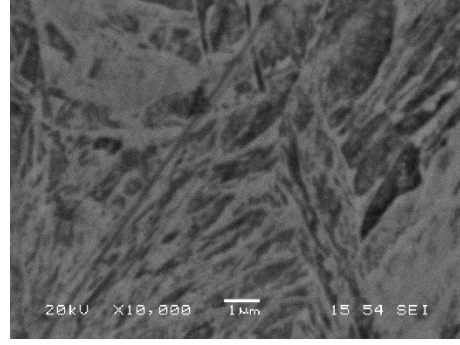
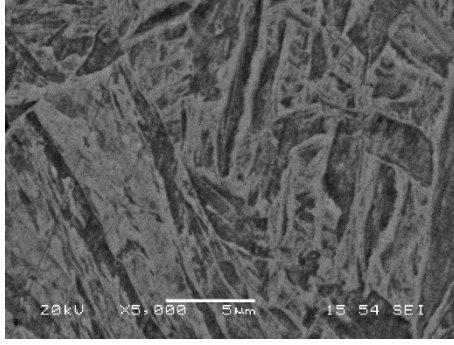


ITAB

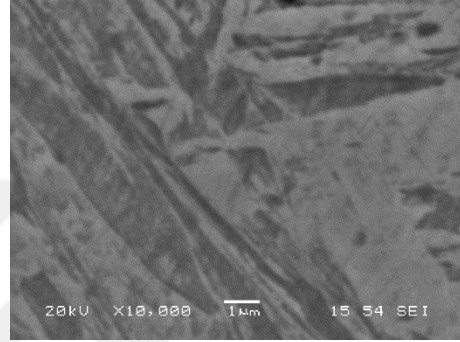
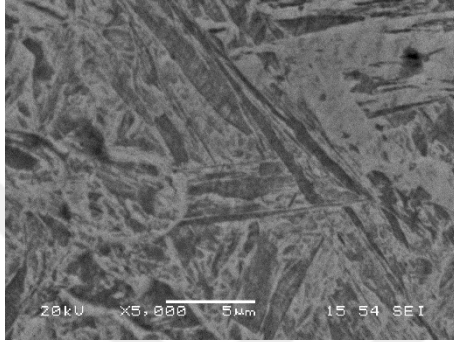


Çekirdek

Şekil 5.32. TRIP800 ile TRIP800'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü

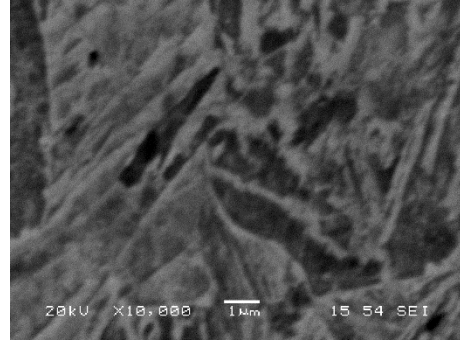
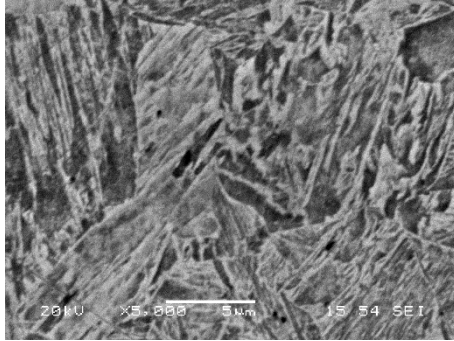


ITAB

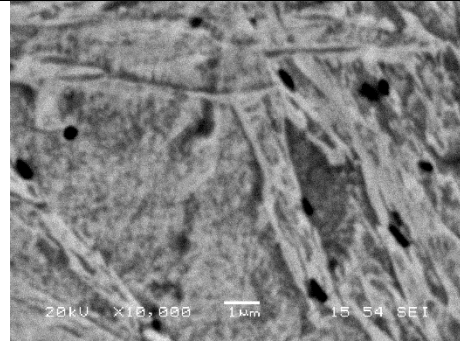
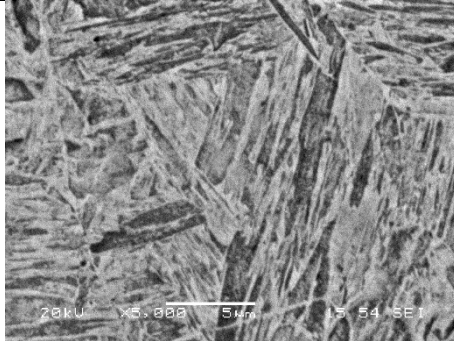


Çekirdek

Şekil 5.33. TRIP800 ile DP1000'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü

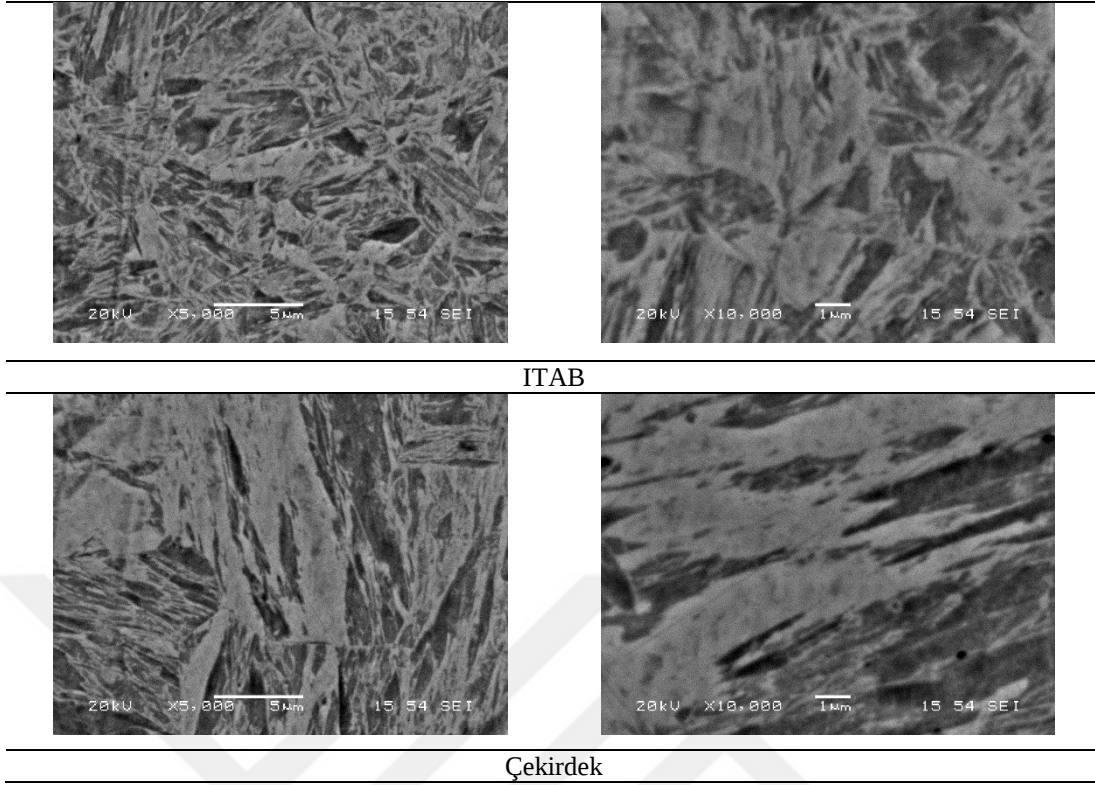


ITAB

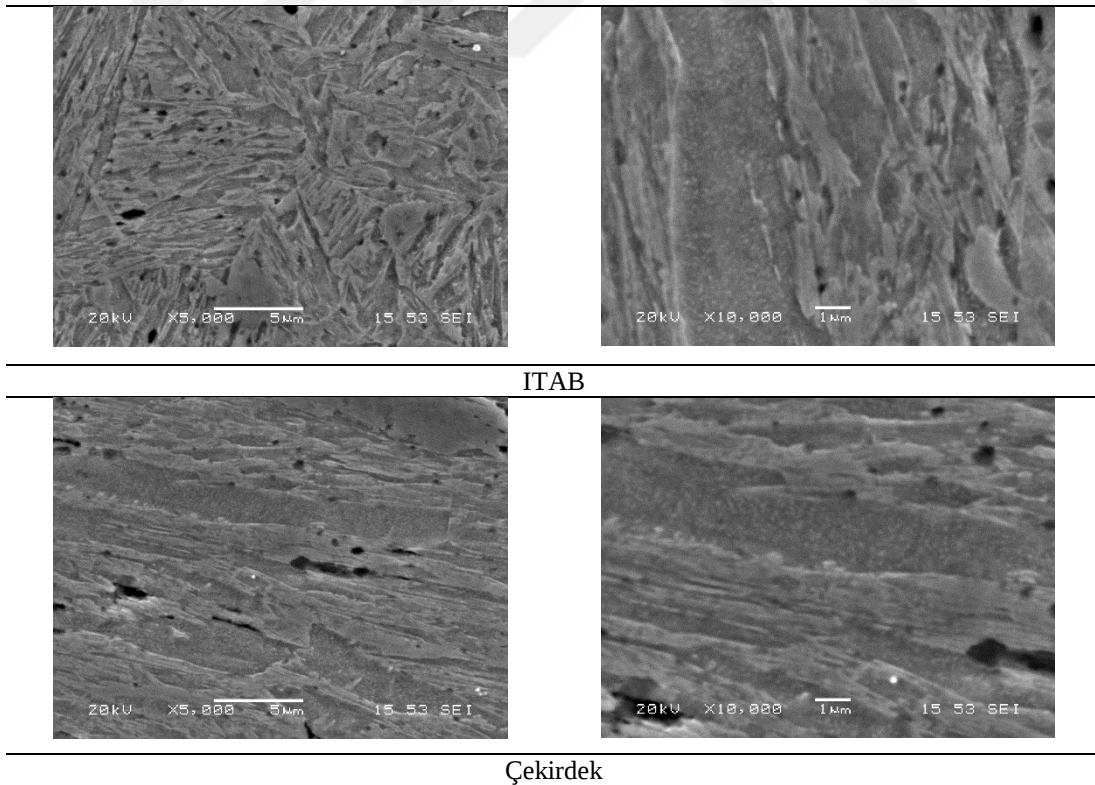


Çekirdek

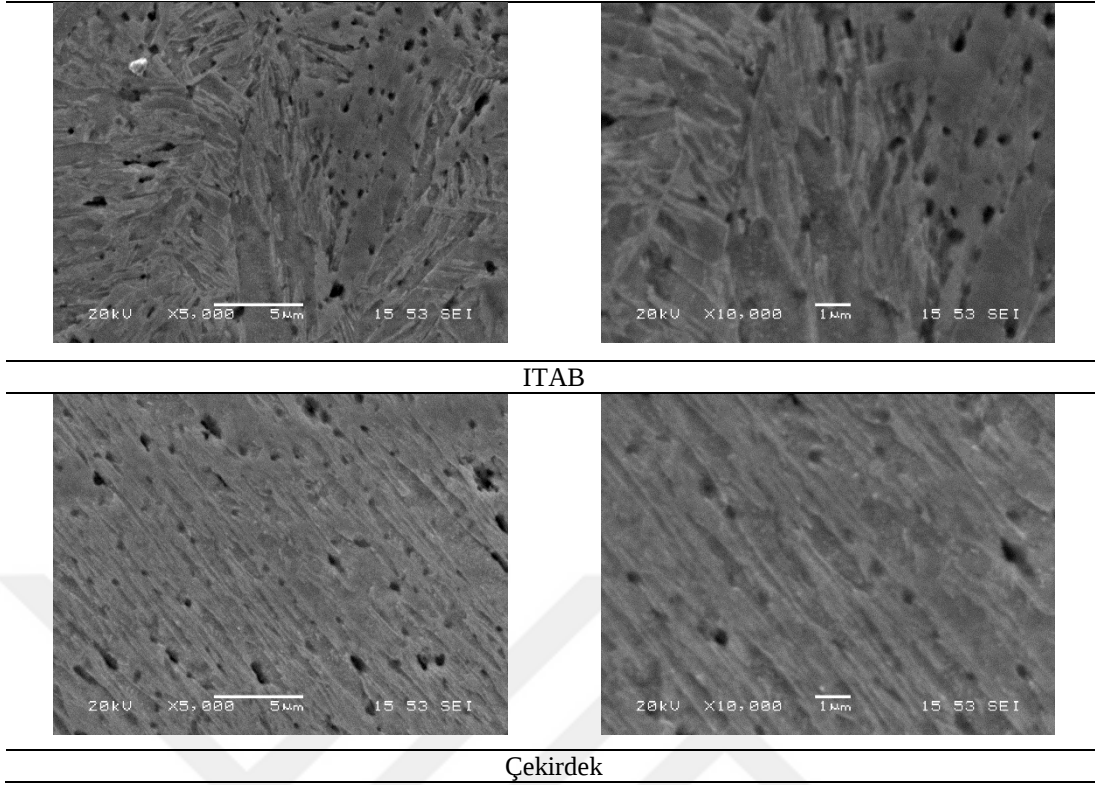
Şekil 5.34. TRIP800 ile DP600'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü



Şekil 5.35. DP1000 ile DP1000'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü



Şekil 5.36. DP1000 ile DP600'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü

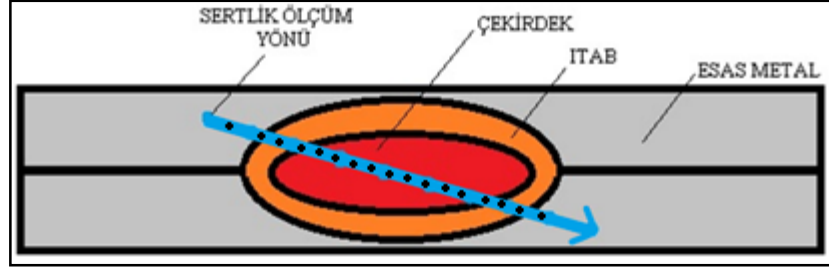


Şekil 5.37. DP600 ile DP600'ün 10 kA ve 25p'de ki mikroyapı görüntüsü

Kaynaklanan malzemelerin SEM görüntüleri incelendiğinde ITAB ve çekirdek bölgelerinde meydana gelen yapı farklılıkları görülmüştür (Şekil 5.28. - Şekil 5.37.). Bunun sebebinin ani soğuma olduğunu düşünülmüştür.

5.4.3. Mikro sertlik testi sonuçları

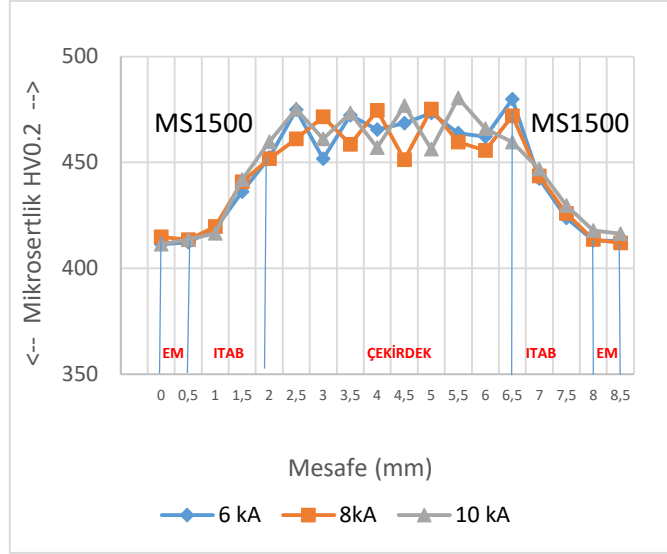
Sertlik değerleri Şekil 5.38.'de belirtilen sertlik ölçüm yönünde 0,5 mm'lik aralıklarla 200 gr yük altında alınmıştır.



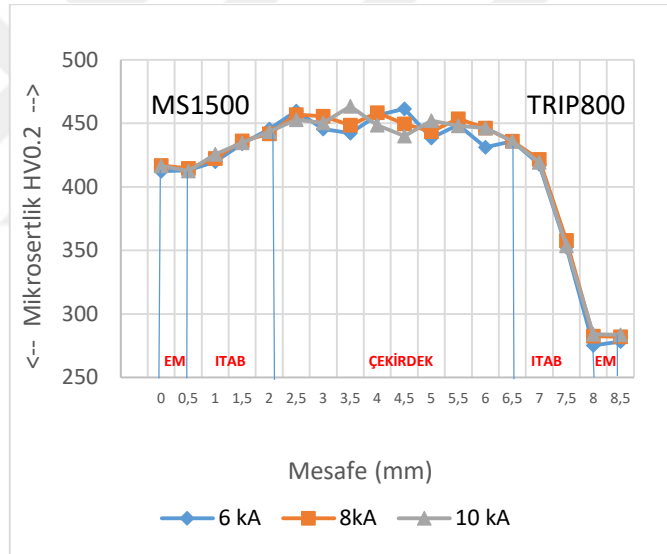
Şekil 5.38. Sertlik ölçüm yönü ve bölgeleri

Yapılan diyagonal sertlik ölçümün yönü birinci levhadan ikinci levhaya doğru esas metalden başlayıp ITAB ve çekirdek bölgelerini geçerek ikinci esas metalde sonlanmaktadır.

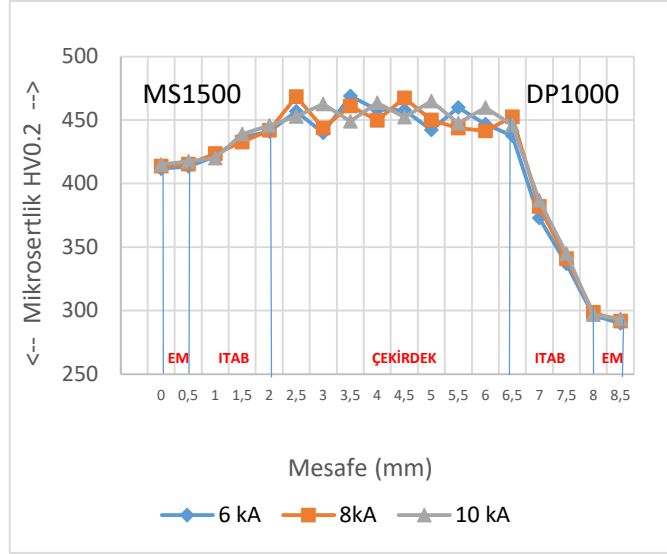
Elde edilen sertlik değerleri grafik yardımı ile yorumlanmaya çalışılmıştır. Her bir grafikte 6,8 ve 10kA'lık akımlarda ve 25 periyot kaynak süresinde yapılan kaynakların sertlik değerleri yer almaktadır.



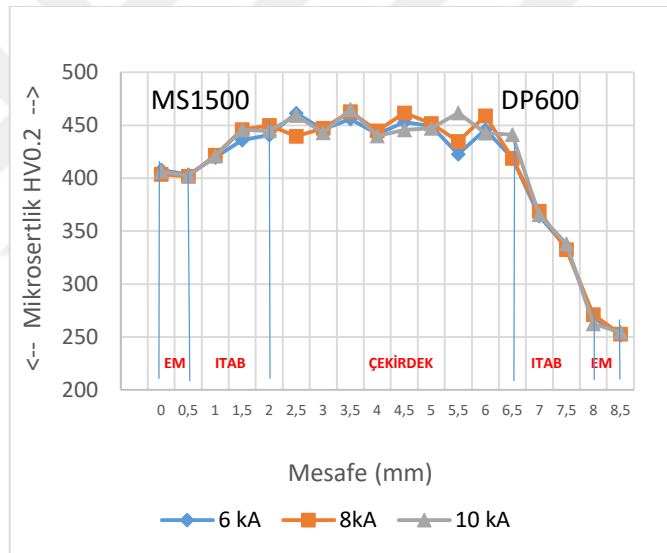
Şekil 5.39. MS1500 ile MS1500'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri



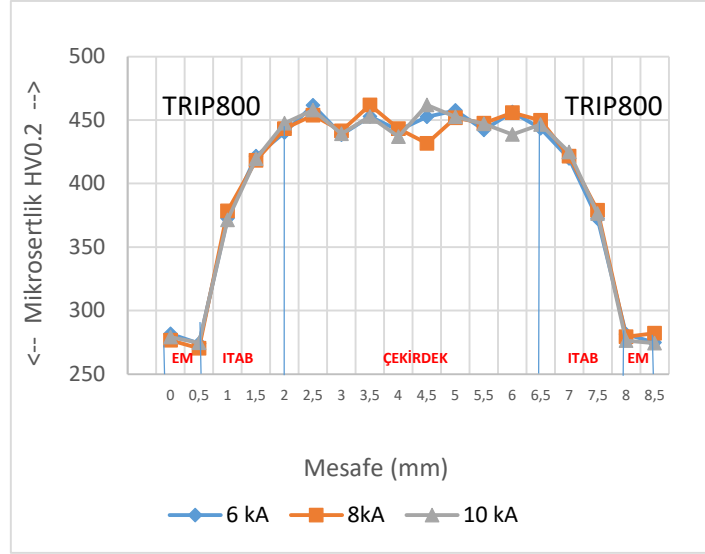
Şekil 5.40. MS1500 ile TRIP800'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri



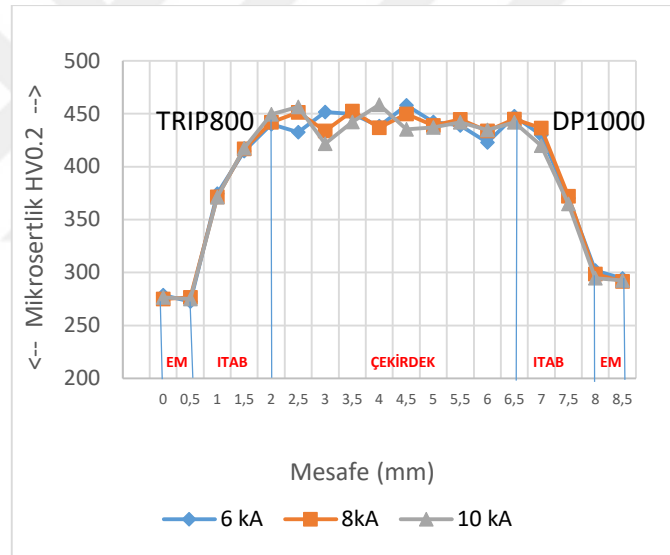
Şekil 5.41. MS1500 ile DP1000'in 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri



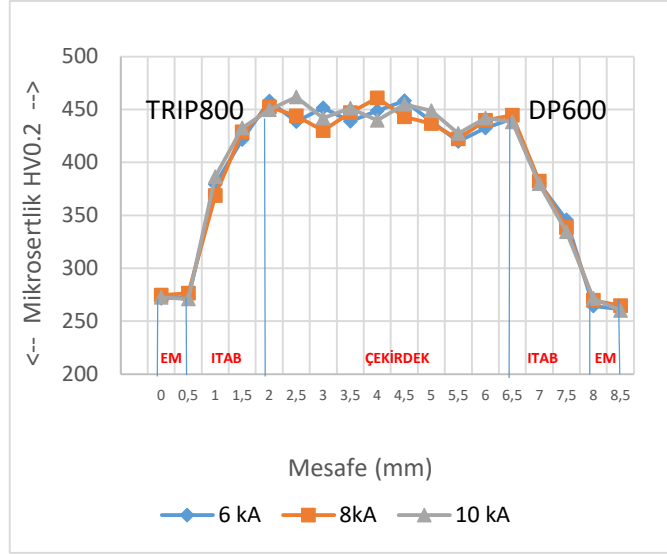
Şekil 5.42. MS1500 ile DP600'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri



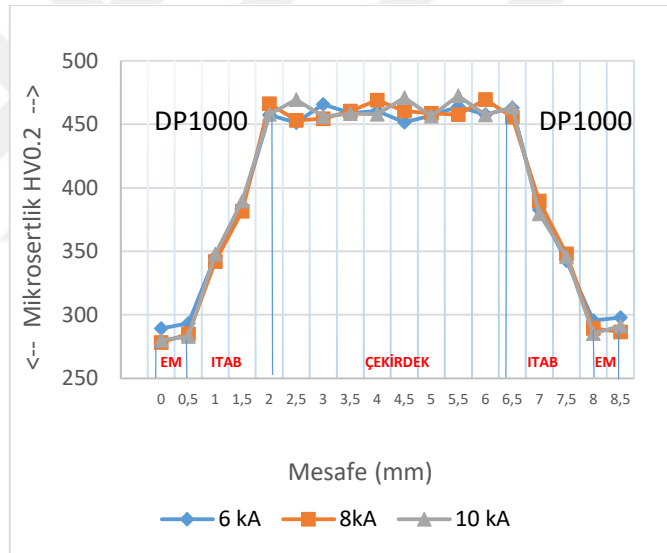
Şekil 5.43. TRIP800 ile TRIP800'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri



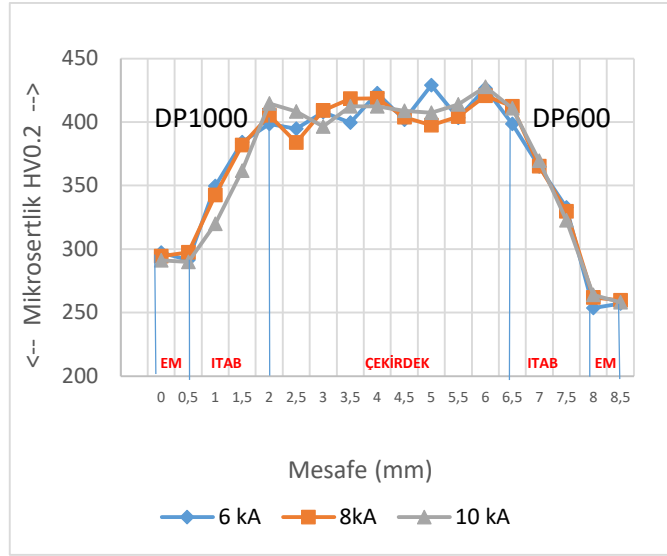
Şekil 5.44. TRIP800 ile DP1000'in 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri



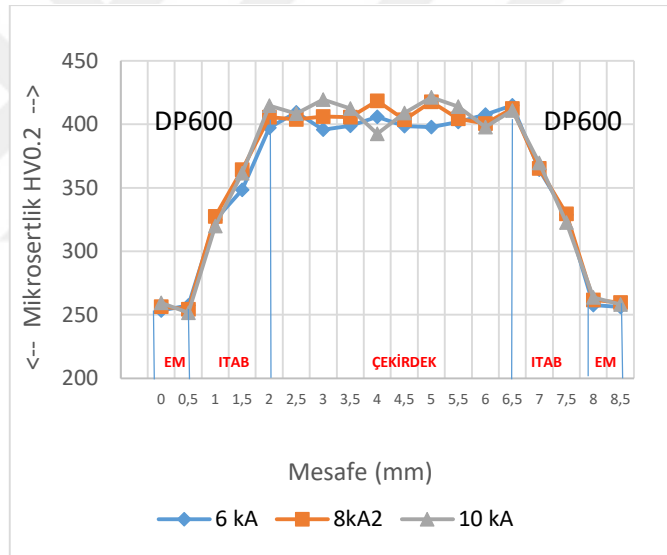
Şekil 5.45. TRIP800 ile DP600'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri



Şekil 5.46. DP1000 ile DP1000'in 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri



Şekil 5.47. DP1000 ile DP600'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri



Şekil 5.48. DP600 ile DP600'ün 6-8-10 kA ve 25p'de ki sertlik değerleri

Yapılan diyagonal sertlik ölçümü sonuçlarına bakıldığında 10 kA kaynak akımı ile yapılan kaynakların çekirdeğindeki sertlik değerlerinin genel olarak en yüksek olduğu görülmüştür. Ancak 6 ve 8 kA ile yapılan kaynakların çekirdek sertlik değerleri de çok farklılık göstermemektedir (Şekil 5.39. - Şekil 5.48.).

Bu çalışmadaki MS1500 ile kaynatılan TRIP800, DP1000 ve DP600'ün bir tarafında martenzitik yapıya sahip MS1500 çeliğin bulunması ve hızlı soğuma sonucu bu kaynakların mikro sertlik değerleri en yüksek 475 vickers olarak ölçülmüştür (Şekil 5.40. - Şekil 5.42.).

Esas malzemeye göre farklılığın asıl sebebinin MS1500'ün üretim aşamasında yapılan son işlemin temperleme olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Çekirdekte ise kaynak sonrası herhangi bir ısıtım işlem olmadığından sertlik değerinin yüksek çıkması normal olarak değerlendirilmiştir.

TRIP800 ile kaynatılan, DP1000 ve DP600'ün, sertlik değerlerinin esas metale göre yaklaşık iki katına ulaştığı görülmüştür (Şekil 5.44., Şekil 5.45.). Bunun nedeninin ani soğuma olduğu düşünülmektedir. Ölçüm değeri birinci plakadan ikinci plakaya doğru yapıldığından grafiklerde çekirdeğin ortasından yani iki plakanın birleşim noktasından sonra ikinci plakaya doğru gidildikçe sertlik değerinin azaldığı görülmüştür. Yine en yüksek sertlik değeri 10kA ile yapılan çekirdek bölgesinde olmasına rağmen 6 ve 8kA ile yapılan kaynaklarda sertlik değeri çok fazla bir değişiklik göstermediği gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 6. GENEL SONUÇLAR

1. Yapılan incelemeler neticesinde ince taneli yapıya sahip bu çelik türlerinin kaynak sırasında ki kaynak akımı, kaynak süresi ve soğuma hızının etkisi ile kaynakların çekme makaslama ve mekanize soyma dayanımlarını değiştiği düşünülmüştür.
2. Kaynatılan malzemelerin çekme makaslama dayanım grafikleri incelendiğinde genel olarak sonuçların artan kaynak akımı ve kaynak süresine bağlı olarak arttığı görülmüştür. Burada ki artışın sebebinin ani ısı girdisine ve hızlı soğumaya bağlı olarak oluşan yapı oranlarıyla alakalı olduğunu düşünülmektedir.
3. Ön testler neticesinde bu çeliklerin yüksek kaynak akımlarında ve uzun kaynak sürelerinde çekme dayanımlarının düştüğü ve bu nedenle optimum aralığın belirlenmesinin gerektiği düşünülmüştür.
4. Farklı dayanımlara sahip (1500 MPa ve 600MPa) çeliklerin birbiri ile kaynatılması sonucunda kaynağın dayanımının düşük dayanıma ve ince kesite sahip (600 MPa) çeliğin özelliklerini taşıdığı ve bu sonucunda tasarım ve imalat süreçlerinde dikkate alınması gerektiği düşünülmüştür.
5. Kaynak çapları incelendiğinde soyma testi sonrası kopan kaynakların çaplarının test öncesi çaplarına göre çap farklılıkları olduğu görülmüştür.
6. Kabul kriterlerini genel anlamda incelediğimizde bu kriterlerin yerine getirilebilmesi için öncelikle malzemenin iyi tanınması akabinde de parametrelerin uygun seçilmesinin ön plana çıkmakta olduğunu görülmüştür.
7. Kaynak işlemi sırasında ısı girdisi arttıkça yüzey girintisi arttığı ve buna bağlı olarak çekirdeğin yüksekliğinde azalma meydana gelirken eninde artış meydana geldiği görülmüştür. Bu durumun kabul kriterleri kapsamında reddedildiğinden parametrelerin optimum olarak belirlenmesi gerektiği düşünülmüştür.

8. Optik mikroskop görüntüleri incelendiğinde genel olarak çekirdek bölgesinde martenzitin oluştuğu görülmüştür. Özellikle çekirdek bölgesinde miktarı oldukça fazla olan martenzit ile birlikte ferrit de görülmüştür.
9. Kaynaklanan malzemelerin SEM görüntüleri incelendiğinde ITAB ve çekirdek bölgelerinde meydana gelen yapı farklılıkları görülmüştür. Bunun sebebinin ani soğuma olduğunu düşünülmüştür.
10. Yapılan diyagonal sertlik ölçümü sonuçlarına bakıldığında 10 kA kaynak akımı ile yapılan kaynakların çekirdeğindeki sertlik değerlerinin genel olarak en yüksek olduğu görülmüştür.



KAYNAKLAR

- [1] Akyol, M., Otomotiv Sanayiinde Kullanılan Direnç Nokta Kaynak Uygulamaları Ve Karşılaşılan Sorunlar. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2001.
- [2] Yuan, X., C. Li, J. Chen, X. Li, X. Liang, and X. Pan, Journal of Materials Processing Technology Resistance spot welding of dissimilar DP600 and DC54D steels, 2017.
- [3] Ramazani, A., K. Mukherjee, A. Abdurakhmanov, M. Abbasi, and U. Prah, Characterization of Microstructure and Mechanical Properties of Resistance Spot Welded DP600 Steel, 2015.
- [4] Uijlden, N., Resistance spot welding of a complicated joint in new advanced high strength steel, 2012.
- [5] Donders, S., M. Brughmans, L. Hermans, and N. Tzannetakis, The effect of spot weld failure on dynamic vehicle performance, 2005.
- [6] Esendir, E., Farklı Metallerin Nokta Direnç Kaynağı İle Birleştirilmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi 2009.
- [7] Marashi, P., M. Pouranvari, S. Amirabdollahian, A. Abedi, and M. Goodarzi, Microstructure and failure behavior of dissimilar resistance spot welds between low carbon galvanized and austenitic stainless steels, 2008.
- [8] Nemecek, S., T. Muzik, and M. Misek, Differences between Laser and Arc Welding of HSS Steels , 2012.
- [9] European Standard, TS EN 25822, Spot Welding Equipment Tapes Plug Gauges and Tapes Ring Gauges, 1999.

- [10] European Standard, TS EN ISO 14270 , Specimen dimensions and procedure for mechanized peel testing resistance spot, seam and embossed projection welds, 2016.
- [11] European Standard, TS EN ISO 14273, Specimen dimensions and procedure for shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds, 2016.
- [12] American National Standard, American Welding Society, AWS D8.1M, Specification for Automotive Weld Quality Resistance Spot Welding of Steel, 2013.
- [13] Keeler, S., M. Kimchi, and P. J Mooney, Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0, 2017.
- [14] Jin, Y., Development of advanced high strength steels for automotive applications, 2015.
- [15] İncekar, E., İleri Dayanımlı Çeliklerin Nokta Kaynaklı Birleştirmelerinde Mikroyapının Kırılmaya Etkisi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Bölümü ,Yüksek Lisans Tezi, 2015.
- [16] Dilger, K., Adhesive bonding techniques for advanced high strength steels (AHSS), 2015.
- [17] Mohrbacher. H., Martensitic automotive steel sheet Fundamentals and metallurgical optimization strategies, 2012.
- [18] Shim, J., Characteristics of Resistance Spot Welding for 1 GPa Grade Twin Induced Plasticity Steel, 2012.
- [19] Cooman, B., High Mn TWIP Steels for Automotive Applications, 2011.
- [20] Guo, Z., In fluences of alloying elements on warm deformation behavior of high-Mn TRIP steel with martensitic structure, 2016.
- [21] Ruscassier,N., Effect of hydrogen on the properties and fracture characteristics of TRIP 800 steels, 2011.
- [22] Ramazani, A., Development and application of a microstructure-based approach to characterize and model failure initiation in DP steels using XFEM, 2016.

- [23] Spena, P., Mechanical Strength and Fracture of Resistance Spot Welded Advanced High Strength Steels, 2015.
- [24] Beres, L., Welding of Martensitic Creep-Resistant Steels, 2001.
- [25] Tamarelli, C., The evolving use of advance high-strength steel for automotive applications, 2011.
- [26] Eva, S., Dynamic fracture behavior of the martensitic high strength steel after spot welding, 2016.
- [27] www.arslankaynakmetal.com/urunler.aspx?code=251300000000, Erişim Tarihi: 16.04.2017.
- [28] American National Standard, American Welding Society, AWS D17.2, Specification for Resistance Welding for Aerospace Applications, 2013.
- [29] European Standard, TS EN ISO 10447, Resistance welding Testing of welds - Peel and chisel testing of resistance spot and projection welds, 2015.
- [30] American National Standard, American Welding Society Weld Defects and Causes, 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Yunus Emre ANTİKA, Bayburt'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Antalya'da, lisans öğrenimini Ankara'da tamamladı. Yüksek Lisans eğitimini Sakarya'da sürdürmektedir.

