

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

**ZIRH ÇELİKLERİNİN FERRİTİK VE ÖSTENİTİK
DOLGU MALZEMELERİ İLE KAYNAĞININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Volkan YAKUT

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Zafer TATLI

Nisan 2015

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ZIRH ÇELİKLERİNİN FERRİTİK VE ÖSTENİTİK
DOLGU MALZEMELERİ İLE KAYNAĞININ
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Volkan YAKUT

Enstitü Anabilim Dalı : İMALAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 28/ 05 / 2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Salim ASLANLAR
Jüri Başkanı

Prof. Dr. İlyas UYGUR
Üye

Doç. Dr. Zafer TATLI
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.

Volkan YAKUT

18.04.2015

ÖNSÖZ

Zırh çeliği ile imalat yapan firmalar, zırh çeliklerinin mekanik özelliklerini etkilemeyecek şekilde imalat yöntemleri geliştirebilmek için büyük çaba harcamaktadırlar. Kaynak prosesi, zırh çeliği imalat yöntemleri içinde büyük önem arz eden bir konuma sahiptir. Zırh çeliğinin kaynak sonrasında oluşacak mikro yapı ve mekanik özelliklerinin değişimi ile ilgili, sektörde önemli çalışmalar yapılmaktadır. Zırh çeliğinin kaynak prosesi ile ilgili yapılmış çalışmalar incelendiğinde, çalışma konularının iki değişik kaynak dolgu metali olan östenitik ve ferritik mikro yapılı kaynak dolgu malzemeleri için için ayrı ayrı olduğu görülür. Östenitik ve ferritik yapıdaki iki tip kaynak dolgu metali ile aynı koşullarda birleştirilmiş zırh çeliklerinin birbirleriyle, mekanik özellikleri ve mikro yapı değişimleri bazında kıyaslanması ile elde edilen bilgilerin, diğer çalışmalara ve savunma sanayi uygulamalarına faydalı bilgiler sağlamasını dilerim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	xiv
ÖZET	xv
SUMMARY	xvi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 2.

ZIRH ÇELİKLERİ	5
2.1. Zırh Çeliklerinin Tarihçesi	6
2.2. Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalürjisi	8
2.2.1. Kimyasal kompozisyon	8
2.2.2. Isıl işlemler ve oluşan mikroyapılar	10

BÖLÜM 3.

ZIRH ÇELİKLERİNİN KAYNAK KABİLİYETİ	13
3.1. Kaynak Kabiliyetini Etkileyen Faktörler	13
3.1.1. Kimyasal kompozisyon ve karbon eşdeğeri	13
3.1.2. Malzeme kalınlığı	15
3.1.3. Isı girdisi ve mikroyapının korunması	16
3.1.4. Armox 500 T Kaynak Kabiliyeti	17

BÖLÜM 4.

ZIRH ÇELİKLERİNDE KULLANILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ	19
4.1. Elektrik Ark Kaynağı	19
4.1.1 Elektrotlar	21
4.1.2. Kaynak Makinaları	23
4.1.2.1. Doğru Akım kaynak makineleri	24
4.1.2.2. Alternatif akım kaynak makineleri	24
4.2. MIG/MAG Gazaltı Kaynağı	25
4.2.1. Kaynak makinaları	30
4.2.2. Tel elektrotlar	32
4.2.3. Gazlar	34
4.2.3.1. Helyum	34
4.2.3.2. Argon	34
4.2.3.3. Karışım	34
4.2.3.4. Karbondiyoksit	35
4.3. TIG Kaynağı	35
4.3.1. Kaynak makinaları	37
4.3.2. Erimiyen elektrot	40
4.3.3. Gazlar	42
4.3.3.1. Argon	42
4.3.3.2. Helyum	43
4.3.3.3. Argon-Helyum karışımı	43
4.3.3.4. Argon-Hidrojen karışımı	43
4.3.3.5. Azot	44
4.4. Tozaltı Kaynağı	44
4.4.1. Kaynak makinaları	47
4.4.2. Tel/Toz kombinasyonları	48

BÖLÜM 5.

KAYNAKLARIN TAHRİBATLI VE TAHRİBATSIZ MUAYENELERİ	50
5.1. Tahribatsız Muayene	50
5.1.1. Görsel muayene	52

5.1.2. Penetrant muayene	53
5.1.3. Manyetik parçacık muayenesi	56
5.1.4. Girdap akımları ile muayene	62
5.1.5. Radyografik muayene	66
5.1.6. Ultrasonik muayene	71
5.1.6.1. Faz kontrollü ultrasonik muayene	77
5.2. Tahribatlı Muayene	85
5.2.1. Çekme testi	86
5.2.2. Eğme testi	90
5.2.3. Çentik darbe testi	91
5.2.4. Sertlik testi	93
5.2.5. Makro/Mikro yapı testi	95
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	96
6.1. Kaynak İşlemi ..	97
6.2. Tahribatsız Muayeneler ..	99
6.2.1. Görsel muayene	99
6.2.2. Penetrant muayene	100
6.2.3. Manyetik parçacık muayenesi	100
6.2.4. Radyografik muayene	101
6.3. Tahribatlı Muayeneler	104
6.3.1. Çekme testi	104
6.3.2. Çentik darbe testi	105
6.3.3. Sertlik testi	107
6.3.4. Makro/Mikro yapı testi	108
BÖLÜM 7.	
DENEYSEL SONUÇLAR	110
7.1. Tahribatsız Test Sonuçları	110
7.2. Tahribatlı Test Sonuçları	110
7.2.1. Çekme testi sonuçları	110

7.2.2. Çentik darbe testi sonuçları	116
7.2.3. Sertlik testi sonuçları	119
7.2.4. Makro/Mikro yapı testi sonuçları	122
BÖLÜM 8.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	150
8.1. Sonuçlar	150
8.2. Öneriler	152
KAYNAKLAR	154
ÖZGEÇMİŞ	161

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

d	: Malzeme et kalınlığı
e	: Gerinim
EH	: Ergime hattı
EN	: Avrupa standartı
HB	: Brinell sertliği
HRC	: Rockwell C sertliği
Mpa	: Mega paskal
HV	: Vickers sertliği
Hz	: Herz
I	: Akım
ISO	: Uluslararası standart
ITAB	: Isı tesiri altındaki bölge
J	: Joule
KM	: Kaynak metali
n	: Kaynak proses verimi
Q	: Isı girdisi
S	: Gerilme
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TS	: Türk standartı
V	: Voltaj
ϑ	: Kaynak hızı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Zırhlı askeri araç	2
Şekil 2.1. Roma dönemine ait Carlisle yakınlarında yapılan kazılar sonrası metalografik olarak incelenen koruma amaçlı zırh malzemeleri. (a) ve (b): çelik,(c) ve (d) : demir	7
Şekil 2.2. Roma dönemine ait Vindolanda yakınlarında yapılan kazılar sonrası metalografik olarak incelenen koruma amaçlı zırh malzemeleri. (a) ve (b): uzamış eksenli ferrit taneleri, (c) ve (d) oryantasyon farklılığı nedeniyle olarak farklı kontrastlarda gözlenen eş eksenli ferrit taneleri	8
Şekil 2.3. Karbür yapıcı elementlerin oluşturduğu karbürlerin temperleme karakteristikleri	11
Şekil 4.1. Elektrik ark kaynağı ark bölgesi	20
Şekil 4.2. Elektrik ark kaynağı şematik gösterimi	24
Şekil 4.3. MIG/MAG gazaltı ark kaynağı ark bölgesi	25
Şekil 4.4. MIG/MAG gazaltı ark kaynağı şematik gösterimi	26
Şekil 4.5. Akım şiddet ayarı ile ark boyunun sabit tutulması	27
Şekil 4.6. Kısa ark	28
Şekil 4.7. Uzun ark	28
Şekil 4.8. Sprey ark	29
Şekil 4.9. MIG/MAG Kaynak torcu	31
Şekil 4.10. Tel sürme ünitesi	31
Şekil 4.11. Regülatör	32
Şekil 4.12. TIG kaynağı ark bölgesi ve torç düzeneği	36
Şekil 4.13. TIG kaynağı şematik gösterimi	39
Şekil 4.14. TIG kaynak torcu düzeneği	40
Şekil 4.15. TIG erimeyen elektrot	41

Şekil 4.16. Tozaltı kaynağı şematik gösterimi	45
Şekil 4.17. Tozaltı kaynağı şematik gösterimi ve ark bölgesi	46
Şekil 4.18. Tozaltı kaynak makinaları	47
Şekil 5.1. Görsel muayenede bakış açısı (a) aralığı	53
Şekil 5.2. Penetrant muayene işlem sırası akış diyagramı	54
Şekil 5.3. Penetrant muayene işlem sırası	55
Şekil 5.4. Flor ışık penetrant yöntemi	56
Şekil 5.5. Yüzey ve yüzey altı kusurlarda manyetik akı geçiş çizgileri	57
Şekil 5.6. Boyunduruk tipi manyetikleme cihazı	58
Şekil 5.7. Bobin tipi manyetikleme cihazı	59
Şekil 5.8. Doğrudan manyetikleme tezgahı	59
Şekil 5.9. Bağlantılı bobinle manyetik muayene	60
Şekil 5.10. Prodlarla manyetik muayene	60
Şekil 5.11. Girdap akımlarıyla muayene çalışma prensibi	63
Şekil 5.12. Girdap akımı muayenesi işlem sırası akış diyagramı	64
Şekil 5.13. Girdap akımlarıyla muayene	65
Şekil 5.14. X ışınları ile radyografik muayene	66
Şekil 5.15. X ışını tüpü	67
Şekil 5.16. Radyografi çalışma prensibi şeması	67
Şekil 5.17. Kurşun zırlı doğal radyoaktif element saklama tüpü	68
Şekil 5.18. Görüntü kalite belirteçleri	69
Şekil 5.19. Radyografik film çıktısı	70
Şekil 5.20. Ultrasonik cihazı ve problemleri	71
Şekil 5.21. Ultrasonik ses dalgalarının malzeme içerisinde yankı hareketi	72
Şekil 5.22. Ultrasonik muayenede kalibrasyon blokları	73
Şekil 5.23. Ultrasonik muayenenin yapılışı	74
Şekil 5.24. Ultrasonik probun iç yapısı ve piezoelektrik element	74
Şekil 5.25. Ultrasonik muayenede ekran çıktısı	75
Şekil 5.26. Ultrasonik muayene tarama planı	76
Şekil 5.27. Prob temas yüzeyleri	76
Şekil 5.28. Piezo elektrik kristaller	77
Şekil 5.29. Faz kontrollü ultrasonik probu	78
Şekil 5.30. Faz kontrolünün sağlanma şeması	78

Şekil 5.31. Faz gecikmelerinin uygulanması şeması	79
Şekil 5.32. Gecikmeli tetiklemeyle ses dalgası demetlerinin yönlendirilmesi	79
Şekil 5.33. Faz kontrollü ultrasonik ekran çıktısı örneği	80
Şekil 5.34. Doğrusal S dik tarama türü dalga formu ekran görüntüsü	80
Şekil 5.35. Doğrusal S açılı tarama türü dalga formu ekran görüntüsü	81
Şekil 5.36. Açılı S tarama türü dalga formu ekran görüntüsü	81
Şekil 5.37. Muayene planı örneği	82
Şekil 5.38. Faz kontrollü ultrasonik cihazı	82
Şekil 5.39. Faz kontrollü ultrasonik cihazı konvansiyonel prob hareketi veya otomasyonu	83
Şekil 5.40. Faz kontrollü ultrasonik muayene B, C, S, ekranları	83
Şekil 5.41. Faz kontrollü ultrasonik muayene A, S, C, ekranları cihaz ekran görünümü	84
Şekil 5.42. PAUT ve TOFD tekniklerinin beraber kullanımı ekran görüntüsü örneği	85
Şekil 5.43. Çekme testi düzeneği	87
Şekil 5.44. Çekme gerinme diyagramı	87
Şekil 5.45. Kopma şekilleri	88
Şekil 5.46. Gerilim gerinim diyagramı	88
Şekil 5.47. Çekme testi cihazı	89
Şekil 5.48. Çekme testi esnasında test numunesi davranışları	90
Şekil 5.49. Kaynaklı numune dairesel mandren ile eğme testi şematik gösterimi ...	90
Şekil 5.50. Darbe testi şematik gösterimi	92
Şekil 5.51. Darbe testi cihazı	93
Şekil 5.52. Sabit ve portatif sertlik test cihazları	94
Şekil 5.53. Vickers sertlik testi baskı ucu	95
Şekil 6.1. X kaynak ağzı profili	97
Şekil 6.2. Kaynak öncesi 2 nolu test parçası	98
Şekil 6.3. Kaynak öncesi 1 nolu test parçası	98
Şekil 6.4. Kaynak sırasında yapılan sıcaklık kontrolleri	99
Şekil 6.5. Kaynaklı test parçaları	99
Şekil 6.6. Penetrant sıvısının uygulanması	100
Şekil 6.7. Penetrant geliştiricinin uygulanması	100

Şekil 6.8. Manyetik parçacık testi uygulanması	101
Şekil 6.9. 1 nolu test parçasına ait radyograf	101
Şekil 6.10. 2 nolu test parçasına ait radyograf.....	101
Şekil 6.11. Test parçasının fiziksel özelliklerinin cihaza tanıtılması	102
Şekil 6.12. Test parçasının muayene planı	103
Şekil 6.13. Muayene kalibrasyonlarının yapılışı	103
Şekil 6.14. Faz kontrollü ultrasonik testin uygulanması	103
Şekil 6.15. Çekme testi numune boyutları	104
Şekil 6.16. Çekme testi cihazı	104
Şekil 6.17. Çekme testi numuneleri	105
Şekil 6.18. Çekme testi	105
Şekil 6.19. Çentik darbe testi numune boyutları	106
Şekil 6.20. Çentik darbe testi	106
Şekil 6.21. Çentik darbe test numuneleri	106
Şekil 6.22. Sertlik test numuneleri.....	107
Şekil 6.23. Sertlik test cihazı	107
Şekil 6.24. Sertlik testi	108
Şekil 6.25. Yüzey işleme cihazı	108
Şekil 6.26. Optik mikroskop	109
Şekil 6.27. Philips XL 30 S model SEM	109
Şekil 7.1. 1.Numune A parçası için çekme testi grafiği	112
Şekil 7.2. 1.Numune B parçası için çekme testi grafiği	112
Şekil 7.3. 2.Numune A parçası için çekme testi grafiği	113
Şekil 7.4. 2.Numune B parçası için çekme testi grafiği	113
Şekil 7.5. Çekme testi sonuçlarının grafiksel gösterimi	114
Şekil 7.6. Çekme testi numunelerinin test sonrası görüntüleri	114
Şekil 7.7. 1 numaralı numune A parçası kopma yüzeyi	114
Şekil 7.8. 1 numaralı numune B parçası kopma yüzeyi	115
Şekil 7.9. 2 numaralı numune A parçası kopma yüzeyi	115
Şekil 7.10. 2 numaralı numune B parçası kopma yüzeyi	115
Şekil 7.11. Çekme testi sonuçları	115
Şekil 7.12. Çentik darbe testi sonuçları grafiği	117
Şekil 7.13. 1 numaralı numune ısı tesiri altında kalmış bölge kırılma yüzeyleri	117

Şekil 7.14. 1 numaralı numune ergime hattı kırılma yüzeyleri	118
Şekil 7.15. 1 numaralı numune kaynak metali bölgesi kırılma yüzeyleri	118
Şekil 7.16. 2 numaralı numune ısı tesiri altında kalmış bölge kırılma yüzeyleri	118
Şekil 7.17. 2 numaralı numune ergime hattı kırılma yüzeyleri	119
Şekil 7.18. 2 numaralı numune kaynak metali bölgesi kırılma yüzeyleri	119
Şekil 7.19. Sertlik ölçüm bölgeleri şematik gösterimi	119
Şekil 7.20. 1 nolu numunenin bölgelere göre sertlik dağılımı	120
Şekil 7.21. 2 nolu numunenin bölgelere göre sertlik dağılımı	121
Şekil 7.22. İki kaynaklı numunenin bölgelere göre sertlik dağılımı ortalamaları karşılaştırması	122
Şekil 7.23. 1 nolu numuneye ait makro görüntüsü	123
Şekil 7.24. 2 nolu numuneye ait makro görüntüsü	123
Şekil 7.25. 1 nolu numune kaynak kepi bölgesi kaynak metali 200X mikro görüntüsü	124
Şekil 7.26. 1 nolu numune kaynak kepi bölgesi kaynak metali 500X mikro görüntüsü	124
Şekil 7.27. 1 nolu numune kaynak kökü bölgesi kaynak metali 200X mikro görüntüsü	125
Şekil 7.28. 1 nolu numune kaynak kökü bölgesi kaynak metali 500X mikro görüntüsü	125
Şekil 7.29. 1 nolu numune sağ kepi ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü	126
Şekil 7.30. 1 nolu numune sağ kepi ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü	126
Şekil 7.31. 1 nolu numune sağ kök ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü	127
Şekil 7.32. 1 nolu numune sağ kök ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü	127
Şekil 7.33. 1 nolu numune sol kepi ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü	128
Şekil 7.34. 1 nolu numune sol kepi ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü	128
Şekil 7.35. 1 nolu numune sol kök ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü	129
Şekil 7.36. 1 nolu numune sol kök ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü	129
Şekil 7.37. 2 nolu numune kaynak kepi bölgesi kaynak metali 200X mikro görüntüsü	130
Şekil 7.38. 2 nolu numune kaynak kökü bölgesi kaynak metali 200X mikro görüntüsü	131

Şekil 7.39. 2 nolu numune kaynak kökü bölgesi kaynak metali 500X mikro görüntüsü	131
Şekil 7.40. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü	132
Şekil 7.41. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü	132
Şekil 7.42. 2 nolu numune sağ kök ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü	133
Şekil 7.43. 2 nolu numune sağ kök ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü	133
Şekil 7.44. 2 nolu numune sol kep ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü	134
Şekil 7.45. 2 nolu numune sol kep ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü	134
Şekil 7.46. 2 nolu numune sol kök ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü	135
Şekil 7.47. 2 nolu numune sol kök ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü	135
Şekil 7.48. 1 nolu numune ana malzeme bölgesi 1000X SEM görüntüsü	136
Şekil 7.49. 1 nolu numune ana malzeme bölgesi 2000X SEM görüntüsü	137
Şekil 7.50. 1 nolu numune ana malzeme bölgesi 5000X SEM görüntüsü	137
Şekil 7.51. 1 nolu numune kaynak metali bölgesi 500X SEM görüntüsü	138
Şekil 7.52. 1 nolu numune kaynak metali bölgesi 1000X SEM görüntüsü	138
Şekil 7.53. 1 nolu numune kaynak metali bölgesi 2000X SEM görüntüsü	139
Şekil 7.54. 1 nolu numune kaynak metali bölgesi 5000X SEM görüntüsü	139
Şekil 7.55. 1 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 250X SEM görüntüsü	140
Şekil 7.56. 1 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 500X SEM görüntüsü	140
Şekil 7.57. 1 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 1000X SEM görüntüsü	141
Şekil 7.58. 1 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 5000X SEM görüntüsü	141
Şekil 7.59. 2 nolu numune ana malzeme bölgesi 500X SEM görüntüsü	142
Şekil 7.60. 2 nolu numune ana malzeme bölgesi 1000X SEM görüntüsü	143
Şekil 7.61. 2 nolu numune ana malzeme bölgesi 2000X SEM görüntüsü	143
Şekil 7.62. 2 nolu numune ana malzeme bölgesi 5000X SEM görüntüsü	144
Şekil 7.63. 2 nolu numune kaynak metali bölgesi 500X SEM görüntüsü	144
Şekil 7.64. 2 nolu numune kaynak metali bölgesi 1000X SEM görüntüsü	145
Şekil 7.65. 2 nolu numune kaynak metali bölgesi 2000X SEM görüntüsü	145
Şekil 7.66. 2 nolu numune kaynak metali bölgesi 5000X SEM görüntüsü	146
Şekil 7.67. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 500X SEM görüntüsü	146
Şekil 7.68. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 1000X SEM görüntüsü	147
Şekil 7.69. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 2000X SEM görüntüsü	147
Şekil 7.70. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 5000X SEM görüntüsü	148

Şekil 7.71. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 10000X SEM görüntüsü	148
Şekil 7.72. 2 nolu numune kök ITAB bölgesi 1000X SEM görüntüsü	149
Şekil 7.73. 2 nolu numune kök ITAB bölgesi 5000X SEM görüntüsü	149

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Zırhlı çeliklerde imalat işlemleri doğrultusunda arzulan özellikler	3
Tablo 1.2. Zırh çeliklerinin karşılaştırması; plaka, saç kalınlığı: 25.4 mm	4
Tablo 2.1. Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri	9
Tablo 2.2. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri	9
Tablo 3.1. Armox serisi zırh çelikleri maksimum sıcaklık değerleri	17
Tablo 3.2. Armox serisi zırh çeliklerinin türüne göre karbon eşdeğeri değerleri	18
Tablo 4.1. Erimeyen TIG kaynak elektrotları çeşitleri	41
Tablo 5.1. Penetrant muayene tipleri	56
Tablo 5.2. Radyasyon kaynaklarının test malzemesi kalınlığına göre nüfuziyet tablosu	68
Tablo 5.3. Radyografik film çıktılarının kontrast değerleri	70
Tablo 5.4. Sertlik testi tipleri ve uygulama alanları	93
Tablo 6.1. Armox 500T zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu	96
Tablo 6.2. Armox 500T zırh çeliğinin mekanik özellikleri	96
Tablo 6.3. Ferritik dolgu metalinin kimyasal kompozisyonu	96
Tablo 6.4. Ferritik dolgu metalinin mekanik özellikleri	96
Tablo 6.5. Östenitik dolgu metalinin kimyasal kompozisyonu	97
Tablo 6.6. Östenitik dolgu metalinin mekanik özellikleri	97
Tablo 7.1. Çekme testi sonuçları	111
Tablo 7.2. Çentik darbe testi sonuçları	117
Tablo 7.3. 1 nolu numune sertlik testi sonuçları	120
Tablo 7.4. 2 nolu numune sertlik testi sonuçları	121
Tablo 7.5. Sertlik değerlerinin ortalamaları ile oluşmuş sonuçlar	122

ÖZET

Anahtar kelimeler: Zırh Çeliği, Mekanik Özellikler, Tahribatsız Muayene, Tahribatlı Muayene.

Savunma sanayii sektöründe, askeri araçların ve zırhlı yapıların üretiminde sertleştirilmiş ve yüksek dayanım kazandırılmış zırh çelikleri kullanılmaktadır. Zırh çelikleri, zırhlı araç imalatlarında uygulanacak tasarıma göre çeşitli imalat yöntemleriyle nihai ürüne dönüşmektedirler. Zırh çeliklerinin kullanıldığı ürünler için imalat yöntemlerinden olan kaynak, diğer imalat yöntemlerinin içinde tüm zamanların en çok üzerinde çalışılan konularından olmuştur. Özellikle zırh çeliklerinin yüksek sertlikleri ve dayanımlarından dolayı meydana gelebilecek kaynak problemleri ve kaynak bölgesinde oluşabilecek mekanik özellik kayıpları, sektörde, yüksek teknolojik kaynak dolgu malzemeleri kullanılarak aşılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada ArmoX 500 T zırh çeliği, ferritik ve östenitik ağırlıklı yapıdaki kaynak dolgu malzemeleri ile kaynatılarak, oluşabilecek kaynak hataları ve kaynak bölgesindeki mekanik özellik kayıpları belirlenmiş ve aralarında karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalar yapılırken, eşit şartların oluşturulabilmesi amacıyla, kaynak parametreleri sabit tutulmuş ve aynı koruyucu gaz ortamları sağlanmıştır. Ayrıca kaynaklı numuneler, karşılaştırılan mekanik özelliklerinin doğru veriler sağlaması amacıyla, görsel muayene, penetrant muayene, manyetik parçacık muayenesi, radyografik muayene ve faz kontrollü ultrasonik muayene, tahribatsız muayene yöntemleriyle, olası kaynak hatalarına karşı test edilmiş ve herhangi bir kaynak kusuruna rastlanmamıştır. Kaynaklı numuneler mikro yapılarının teste uygunluğuna göre, tahribatlı muayene yöntemlerinden çekme testi, çentik darbe testi, sertlik testi ve makro/mikro yapı testlerinden geçirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, çekme testi değerleri açısından ferritik kaynak dolgu metali ile birleştirilen parçanın değerleri yüksek sonuç verirken, çentik darbe testi değerleri açısından östenitik kaynak dolgu metali ile birleştirilen parçanın değerleri her bir kaynak bölgesi için yüksek sonuçlar vermiştir. Sertlik testi sonuçları ise her iki kaynaklı numune için benzer değerler vermiş ve benzer grafiksel eğriler çizmiştir. Sertlik değerleri sadece kaynak metali bölgesinde birbirine oranla farklılık göstermiş, bu bölgede ferritik kaynak dolgu metali bölgesi sertliği, östenitiğinkine oranla biraz daha yüksek çıkmıştır. Mikro yapı incelemelerinde saptanan mikro yapıların, sertlik testi değerleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

THE INVESTIGATION OF WELDING ON ARMOR PLATE WITH FERRITIC AND AUSTENITIC FILLER METAL

SUMMARY

Keywords: Armor Plate, Mechanical Properties, Destructive Examination, Non-destructive Examination.

Defence industry have been using armoured plates, which hardened and wrought steel. Armoured plates becomes final product after several manufacture process according to stuctural design. Welding is the one of the most studied manufacturing process ever before for product which using armor plate. Especially, armoured plates have some mechanic property losses and mismatch problems during the welding process, because of their hardened and wrought structure. To overcome these specific problems for armoured steel, high-tech welding filler metal products usage has been tried as a solution in this sector.

In this study, Armox 500T armor steels were joined with ferritic and austenitic type, micro structural welding filler metal. In this way, the welding mismatch problems and mechanic property losses were determined and compared. Welding parameters and covering gas environment were fixed in order to provide same condition between two type of welding filler metal. To provide reliable mechanic property datas, welding joints were examined with non-destructive test methods, which visual test, penetration test, magnetic particle test, radiographic test and phased array ultrasonic test, according to their micro structures. Hardness, toughness, tensile strenght, yield strenght properties have been determined. According to tensile test results, ferritic joint values higher then austenitic joint. In contrary, according to charpy test results, austenitic joint values higher then ferritic joint for every welding zone. Hardness test results showed very same values for two different joint and showed similar curves on grahph, just for weld metal zone, ferritic joint hardness values were higher then austenitic joint. Micro structural findings was compatible with hardness values at related zones during the micro structural investigation.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Gelişmekte olan ülkeler bazında savunma sanayisine yönelik araştırma-geliştirme faaliyetleri ile bu çalışmalara mali kaynak getiren askeri projeler gün geçtikçe artmaktadır. Teknolojik gelişmeler modern ateşli silahların geliştirilmesini ivmelendirmekte ve bunun sonucunda savunma sanayi malzemeleride geliştirmektedir.

Ateşli silahlardan çıkan merminin, penetratörün ya da ateşli parçacığın türü, geometrisi ve penetrasyon kinetiğine göre koruyucu malzeme seçimi söz konusudur. Tüm bu malzemeler arasında zırh çelikleri özellikle askeri platformlarda çok çeşitli personel ve mühimmat taşıyan araçlarda koruyucu malzeme olarak kullanılmaktadır. Ayrıca statik askeri yapılarda da balistik özellikleri nedeniyle yine zırh çelikleri kullanılmaktadır.

Zırh çelikleri özellikle askeri araç imalatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Zırhlı askeri araçlar (Şekil 1.1.) dış tehditlere karşı geliştirilmiş yüksek koruma sağlamalıdır. Ayrıca bu araçlar küçük kalibreli mühimmata iyi mekanik direnç göstermelidir. Çünkü düşük alaşımlı çelikler ve dökme demirler bu mekanik tehditlere karşı, zırh çelikleri kadar koruma sağlayamamaktadır. Bu sebeple zırh imalat sanayinde kullanılamazlar. Zırh uygulamalarında kullanılan çelikler, büyük kalibreli mühimmata maruz kaldığında çatlammamalıdır. Ayrıca balistik özelliklerininde iyi olması gerekir. Dünyada, zırh çelikleri genellikle menevişleme ile MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 standartlarına uygun olarak imal edilirler ve bu standartlarda geçen 7.62 mm, 12.7 mm, 14.5 mm, ve 20 mm çapındaki mühimmata karşı koruma sağlarlar [1-4].



Şekil 1.1. Zırhlı askeri araç [5].

Zırhlı araçlarda kullanılan zırh çeliklerinden beklenen koruma seviyelerinin sağlanabilmesi için zırhlı araçların imalat yöntemleri hassas olarak belirlenmelidir. Zırhlı araçların imalat yöntemlerinden olan kaynak yöntemi, zırh çeliklerinin yapılarını bozmamalıdır. Aynı şekilde, kaynak bölgeleri, hafif veya ağır taşıtların sürekli farklı engebeli arazilerdeki hareketleri ve ağır silah darbelerine karşı, yorulma dirençlerinin yüksek olması gereklidir. Koruma sağlanması istenen mühimmat tiplerine göre balistik özellikleri istenilen korumayı sağlaması gerekir. Sert zırh çeliklerinde gerilmeli korozyon sorunu ortaya çıkabilir. Özellikle gerinimli bölgelerde ve korozif bir ortamla karşılaştığında korozyon artar. Zırh çeliğindeki gelişmeler ile 500-600 HBW sertliklere ulaşılmıştır. Artan mukavemet ve sertliğe bağlı olarak tokluk kaybını azaltmak için ikincil metalürjik işlemlerle kükürt ve fosfor çok düşük seviyelere çekilmiştir [6, 7]. Kükürt ve fosfor ayrıca kaynak işlemi içinde istenmeyen iki element olup, bu elementler kaynağın fiziksel metalürjisinde olumsuz yönde etkilemektedir. Üretimde ise termomekanik haddeleme ve ısıl işlem tekniklerinin uygulanmasıyla mekanik özellikleri geliştirilmiştir [6, 8, 9].

Tablo 1.1.'de genelde kullanılan zırh çeliklerinin alaşım kimyası ve karbon eşdeğeri doğrultusunda mekanik özellikleri ile balistik performansları karşılaştırmalı olarak verilmiştir [10]. Tabloda verilen tüm zırh malzemeleri su verilmiş ve temperlenmiş düşük alaşımlı çeliklerdir. Sınıf 1 tipi çelikler standart zırh çelikleridir ve çoğu araç uygulamalarında kullanılır. Sınıf 2 tipi çelikler benzer kimyasal kompozisyona sahiptir, ancak penetrasyondan ziyade şokun önemli olduğu uygulamalar için daha yüksek temperlenir. Yüksek sertlik türleri genelde penetrasyon direnci ile ağırlık azaltmanın önemli olduğu durumlarda uygulanır [3, 4].

Tablo 1.1. Zırhlı çeliklerde imalat işlemleri doğrultusunda arzulanan özellikler [10].

	İmalat Yöntemleri			
	Isıl Kesme	Kaynak	Şekillendirme	Talaşlı İşlem
Metalürjik Özellikler	- düşük karbon eşdeğeri - sınırlı segregasyon - çok düşük hidrojen miktarı - düşük kalıntı gerilme	- düşük karbon eşdeğeri - düşük hidrojen miktarı - düşük kalıntı gerilmeleri	- yüksek süneklik	- yüksek olmayan sertlik

Tablo 1.2.'de verilen, zırh çeliklerinden beklenen balistik korumadan ötürü, kaynak işlemi nedeniyle meydana gelen sertliğin ana malzeme yapısını koruması istenir. Bunun için yakın zamana kadar, kaynak dikişinden 16 mm uzaklıktaki malzeme sertliğinin, zırh çeliğinden istenilen sertliklere eşit olması istenmekteydi [12]. Günümüzde bu istek tasarımcıların yaptıkları tasarımların, bilgisayar destekli gerinim analizleri ile elde edilen verilerin durumuna göre optimize edilmektedir. Zırh çeliklerinin temperleme sıcaklığı 600 °C civarında olduğundan, ısıl işleme tabi tutulmuş zırh çelikleri bu sıcaklığa yakın bir sıcaklığa maruz kalırsa, içyapı değişikliği oluşabilir. Bu nedenle, zırh çeliğinin hiçbir surette 315 °C'den yüksek sıcaklığa ısıtılması istenmez. Ön-tav sıcaklığının ise malzeme kalınlığına göre, belirlenmesi tavsiye edilmektedir [12, 33]. Kaynaklı bölgenin mekanik özelliklerine doğrudan etkileyen değişkenlerden biriside kaynak dolgu metalidir. Kaynak dolgu metali içerdiği alaşım elementleriyle ve gördüğü ısıl işlem durumuna göre meydana gelen mikro yapısına göre kaynak dikişleri oluşturur. Zırh çeliklerinde hidrojen çatlağı da denen soğuk çatlak problemini gidermek için östenitik yapıdaki kaynak dolgu metali kullanımı tavsiye edilir. Ancak martenzit yapıdaki zırh çeliğindeki mekanik özellikler, östenitik kaynak dolgu metali kullanımıyla yüksek oranda kayba

uğrayabilirler. Bu nedenle zırh çeliğinin değişik mekanik özelliklerinin önemli olduğu kritik tasarım bölgelerinde, kaynak tekniği açısından uygulanması daha zor olan ferritik kaynak dolgu metali kullanılmaktadır [13].

Tablo 1.2. Zırh çeliklerinin karşılaştırması; plaka, saç kalınlığı: 25.4 mm [11].

Zırh Çeliği	Sertlik (HBW)	Tokluk* (J/mm ²)	Balistik Performans**	Alaşım Kimyası	Karbon Eşdeğeri
MIL-A- 12560 Sınıf 1	335-375	21.6	1.00	Mn-Mo-B	0.64
MIL-A- 46100 Sınıf 1	490-532	13.5	1.20	Cr-Ni-Mo	0.85

* -40 °C'de enine çentikli numune

** 14.5 mm delici tip mühimmatla

BÖLÜM 2. ZIRH ÇELİKLERİ

Zırhlı araç yapımında kullanılan zırh çeliklerinin, balistik darbelere karşı yüksek dirençli, yüksek yorulma dirençli ve mekanik özelliklerinin iyi olması, aynı zamanda kesme, bükme, kaynak, işleme gibi üretim işlemlerinde uygun olması istenir [14].

Genel kural olarak zırh çeliğinin delinmeye veya merminin içeri doğru girişine dirençli olması için yüksek mukavemete ve sertliğe sahip olması istenir. Ancak 500 HB üzeri yüksek sertlikler çeliği kırılğan yapacağından saç malzeme alacağı darbe karşısında gevrek kırılacaktır. Dolayısı ile zırh çeliklerinin kimyasal kompozisyonu ve östenitleştirme, su verme ve temperleme gibi ısıl işlemleri çok önemlidir [15].

Balistik darbelere karşı direnç yüksek toklukla sağlanabilmektedir. Dolayısıyla zırh çelikleri yüksek darbe tokluğuna sahip olmalıdır. Uygulamada imalat güçlüklerini minimumda tutmak için uygun metalürjik özellikler sağlanmalıdır. Arzulanan özelliklerden mukavemet ve sertlik orta karbonlu çelik seçimiyle gerçekleştirilir. Bu seçimde karbon, kaynaklanabilirlik arzusu doğrultusunda sınırlanmıştır. Nihai olarak yapılan sertleştirme ve temperleme ısıl işlemiyle mukavemet ile tokluk dengelenir. Bu dengelemede etken rol östenitleştirmede karbon ve karbür yapıcı alaşım elementlerinin doyumu ile temperlemede sıcaklık ve zamana bağlı olarak gerçekleşen karbür çökmesi ve ilgili Ostwald olgunlaşmasıdır.

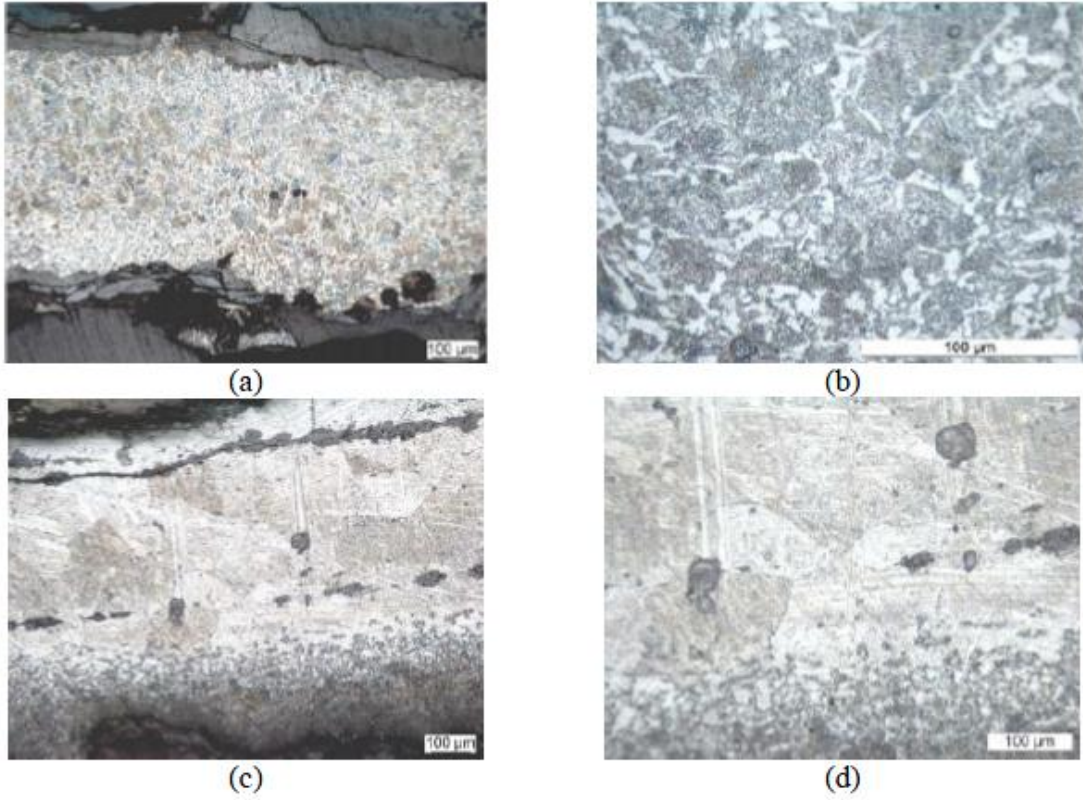
Zırh çelikleri için önemli bir konu da hafif veya ağır taşıtların sürekli farklı engebeli arazilerdeki hareketleri ve ağır silah darbelerine karşı kaynak bölgelerinde yorulma dirençlerinin yüksek olmasının gerekliliğidir. Brinell sertliği 500'ü aşan sert zırh çeliklerinde gerilmeli korozyon sorunu ortaya çıkabilir. Özellikle gerinimli bölgelerde ve korozif bir ortamla karşılaştığında korozyon artar. Üretimde ise

kontrollü haddeme ve ısıl işlem tekniklerinin uygulanmasıyla mekanik özellikler geliştirilmiştir [7, 8].

MIL-A-12560 ve MIL-A-46100 standartlarında verilen zırh çelikleri su verilmiş ve temperlenmiş düşük alaşımlı martenzitik yapıda çeliklerdir. Sınıf 1 tipi çelikler standart zırh çelikleridir ve çoğu araç uygulamalarında mühimmat penetrasyonuna karşı kullanılır. Sınıf 2 tipi çelikler benzer kimyaya sahiptir, ancak mühimmat penetrasyonundan ziyade mayın ve el bombalarından kaynaklanan şokun önemli olduğu uygulamalar için kullanılırlar ve bu amaçla daha yüksek temperlenirler. Yüksek sertlikteki zırh çelikleri genelde, penetrasyon direncinin ve ağırlığın azaltılmasının önemli olduğu tasarım uygulamalarında kullanılırlar [3, 4].

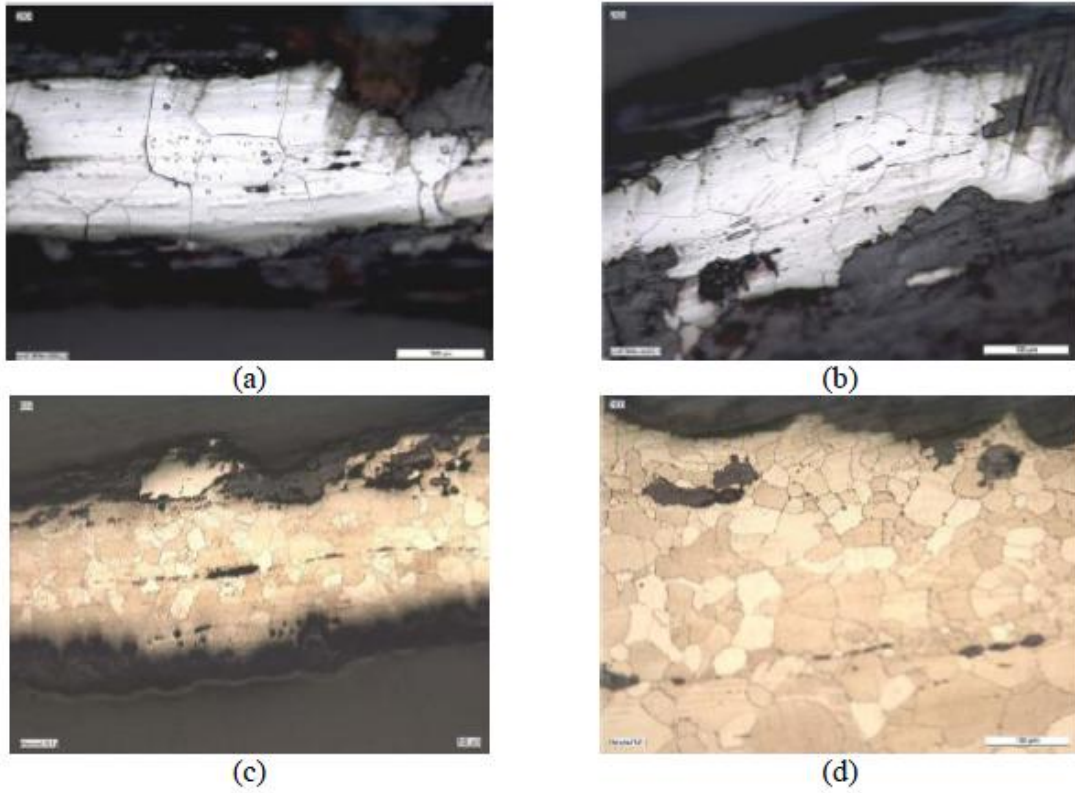
2.1. Zırh Çeliklerinin Tarihçesi

Tarihsel açıdan zırh ele alınacak olursa ilk kullanımları milattan önce 1500 yıllarında eski Mısır toplumlarına ait olup bronz esaslı plakaları içeren gömlek tipindeki kıyafetlerden ibarettir. Bunun yanında milattan önce 900-600 yılları arasında ise Asurlular küçük dikdörtgen şekilli ve çok katlı birbirine göre paralel dizili bronz esaslı tabakalardan oluşan zırh kıyafetlerini kullanmıştır. Asurlular aynı zamanda bronz miğfer, kalkan ve kolluk kullanan ilk toplumdur. Milattan önce VIII. yy' da ise Yunanlılar ön ve arka olmak üzere iki parçalı üst zırhları ile diz ve kolları kuşatan bronz esaslı zırhları geliştirmişlerdir. Romalılar, Yunanlılardan etkilenip o dönemlerde askeri kuşanımlarını tamamen değiştirip benzer bir tarz oluşturmuştur. Bu tarz askeri kuşanım, milattan sonraki dönemlerde de devam etmiştir. Ancak bu dönemlerde bronzun yanı sıra demir esaslı zırhlar da yapılmış ve özellikle Avrupa tarihinde özel bir yeri olan şövalyelik açısından önem kazanmıştır. Tüm bu zamanlar içerisinde miğfer, kalkan gibi askeri araç-gereçlerde yeni tarz biçimlendirilmelere yönelimlere katkı olarak darbelere dayanıklı malzemelere de doğru bir arayış içerisine girilmiştir. Bu malzemeler arasında demir ve demir esaslı bir alaşım ürünü olan çelik popüler olmuştur. Günümüzde ise özellikle çelik ve çelik ailesine giren alaşımlar zırh teknolojisinde öne çıkan malzeme gruplarıdır [16, 17].



Şekil 2.1. Roma dönemine ait Carlisle yakınlarında yapılan kazılar sonrası metalografik olarak incelenen koruma amaçlı zırh malzemeleri. (a) ve (b) : çelik, (c) ve (d) : demir [18].

Roma dönemine ait zırh amaçlı kullanılan çoğu malzemede demir ve çelik ailesi öncelikli sırayı almıştır. Çoğunlukla bu malzemeler sıcak veya soğuk deformasyon ile sertleştirilmiş demir ve çeliktir. Orta karbonlu çeliklerin yanında karbürize çelikler de koruma amaçlı olarak kullanılan çeliklerdir. Genelde bu tür çeliklerin sertlikleri 200 ve 415 HB arasında değişmektedir. Arkeolojik çalışmalar sonrasında bulunan ve Roma dönemine ait çeşitli koruma amaçlı çeliklere ait mikro yapısal örneklemeler Şekil 2.1 ve 2.2’de verilmiştir [18]. Şekil 2.1 Avrupa’da Carlisle yakınlarında yapılan kazılar sonrası çıkartılan yaklaşık 0.87 mm kalınlıktaki muhafız malzemelerine ait metalografik içyapı örneklerini göstermektedir. Çelik esaslı matriksin merkezinde eş eksenli lameller perlit ve ferritin (Şekil 2.1. a-b) yanında diğer malzeme olan demir alaşımında cüruf halinde kalıntılar (Şekil 2.1. c-d) gözlenmektedir. Yüzeypden merkeze doğru bir miktar dekarbürizasyonun gerçekleştiği ise aşikârdır. Şekil 2.2. ise Vindolanda yakınlarında yapılan çalışmalar sonrası açığa çıkartılan zırh başlıklara ait içyapı örnekleri göstermektedir. Demir esaslı bu malzemelerde ise uzamış/eş eksenli ferrit yapıları mevcuttur [18].



Şekil 2.2. Roma dönemine ait Vindolanda yakınlarında yapılan kazılar sonrası metalografik olarak incelenen koruma amaçlı zırh malzemeleri (a) ve (b) uzamış eksenli ferrit taneleri, (c) ve (d) oryantasyon farklılığı nedeniyle olarak farklı kontrastlarda gözlenen eş eksenli ferrit taneleri [18].

2.2. Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalürjisi

2.2.1. Kimyasal kompozisyon

Günümüzde kullanılan MIL-A-12560 çeliği birçok uygulamada kullanılan standart zırh çeliğidir. Yüksek sertliğe sahip MIL-A-46100 çeliği ise balistik korumanın MIL-A-12560'a göre % 20 daha etkili olduğu (14.5 mm delici mühimmatla) bir zırh çeliğidir. Tablo 2.1'de verilen temel alaşım elementlerinin yanı sıra bu tür çelikler, vanadyum, titanyum, niobyum, alüminyum, bor gibi mikro alaşım elementleri de içerebilir. Bu zırh çeliklerinin mekanik özellikleri ise Tablo 2.2'de verilmiştir. [3, 4, 19-21].

Tablo 2.1’de verilen zırh çelikleri düşük karbonlu çeliklerdir. Bu çeliklerin kimyasal bileşiminde verilen maksimum karbon miktarı % 0.3 civarındadır ve daha düşük seviyelerdeki karbon miktarı, tokluk ile kaynaklanabilirlik açısından tercih edilir.

Tablo 2.1. Zırh çeliklerinin kimyasal bileşimleri [3. 4. 19-21].

Kimyasal Bileşim (Maksimum)	MIL-A-12560 (%)	MIL-A-46100 (%)	Armox 500 T (%)
Karbon	0.30	0.32	0.32
Mangan	0.30	1.20	1.20
Kükürt	0.025	0.020	0.015
Fosfor	0.015	0.010	0.010
Silisyum	0.40	0.60	0.40
Nikel	0.50	1.85	1.80
Krom	0.40	1.25	1.00
Molibden	0.15	0.20	0.70

Zırh çeliklerinin düşük karbonlu olması darbe dayanımı açısından son derece önemlidir. Çelik içindeki alaşım elementleri, özellikle de karbon, kaynaklanabilirliği önemli ölçüde etkiler. Karbon miktarı arttıkça kaynak bölgesinde çatlak oluşum riski artar. Bu tür çatlaklar, kaynaklı yapının performansını olumsuz yönde etkilediğinden kaynak sonrası bazı işlemlerle bunların giderilmesi gerekir. Ek işlemlerin imalat maliyetlerini olumsuz yönde etkilemesi nedeniyle bu tür çeliklerin düşük karbonlu olması iyi kaynaklanabilirlik açısından gereklidir. Dolayısıyla zırh çeliklerinin düşük karbon içermesi tokluk ve kaynaklanabilirlik özellikleri açısından son derece önemlidir. Her iki özellik de zırh çeliklerinin etkin olarak kullanımında belirleyici bir role sahiptir [1].

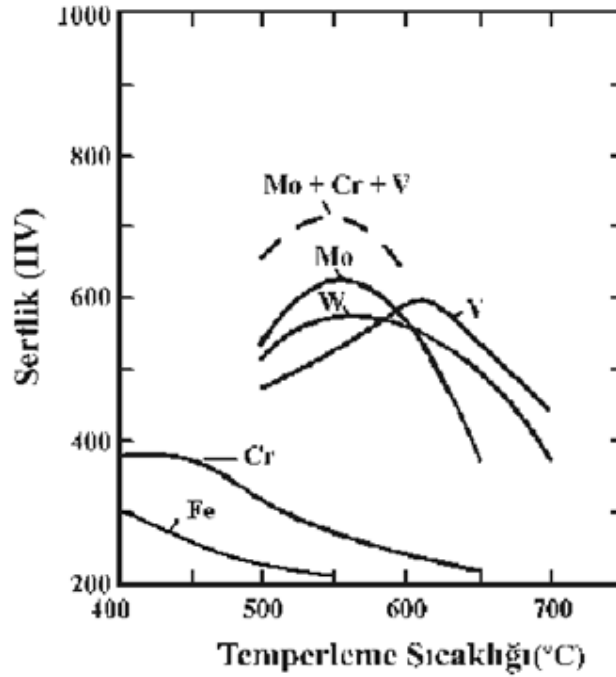
Tablo 2.2. Zırh çeliklerinin mekanik özellikleri [3. 4. 19-21].

Mekanik Özellikler	MIL-A-12560	MIL-A-46100	Armox 500 T
Sertlik (HBW)	277-388	477-600	480-540
Akma Mukavemeti (MPa)	1150 (minimum)	1100 (minimum)	1250 (minimum)
Çekme Mukavemeti (MPa)	1250 (minimum)	1450 (minimum)	1450-1750
Uzama (%)	10 (minimum)	9 (minimum)	8 (minimum)
Tokluk (-40 °C’de) (J)	20-30	30-40	25 (minimum)

Ticari zırh çeliği örnekleri ve deneysel zırh çelikleri incelendiğinde özellikle alaşım kompozisyonu açısından karbon ve borun sertleşebilirliğe doğrudan katkı sağladığı, mangan ve silisyumun katı ergiyik sertleştirici etkisinden fayda sağladığı, düşük oranda kükürt ve fosfor içeriğinin daha yüksek mukavemet değerlerine ulaştıracağı, molibden ve krom gibi yer alan elementlerinin özellikle soğuma koşulları altında denge reaksiyonlarını öteleyerek martenzitik/beynitik dönüşümü dolayısı ile sertleşebilirliği teşvik ettiği, nikel ve kobalt gibi elementlerin zırh çeliğinin tokluğuna katkı sağladığı, niobyum, titanyum, vanadyum gibi mikro alaşım elementlerinin güçlü karbür oluşumuna neden olduğu ve sertlik kazanımına katkı sağladığı literatür araştırmaları ve deneysel alaşım tasarımı ile mikro yapısal karakterizasyonlar sonrasında ortaya konmuştur [1].

2.2.2. Isıl işlemler ve oluşan mikroyapılar

Zırh çelikleri martenzitik karakterde oldukları için optimum mukavemet, sertlik ve tokluk kombinasyonu gibi kullanım özelliklerini östenitleme ve su verme sonrası yapılan temperleme ile elde ederler. Genelde yalın karbonlu çeliklerin temperlemesinde su verme sonrası martenzit içinde bulunan karbon, demir ile birleşerek sementit çökmesine yol açar ve böylece çökeltme sürecinde martenzitin ferrite dönüşmesiyle sertlik düşer. Ancak çelik bileşiminde var olan kuvvetli karbür yapıcı elementler karbon ile çok daha yüksek temperleme sıcaklıklarında birleşerek değişik tip özel karbür çökeltilerine neden olurlar. Bunun sonucu olarak artan sertliğe “ikincil sertlik” adı verilir. Bu karakteristik sertlik artışı karmaşık bir çökelti sertleşmesi mekanizmasıyla oluşur. Şekil 2.3’te değişik karbür yapıcı elementlerin oluşturduğu karbürlerin temperleme karakteristikleri verilmiştir [22]. Görüldüğü gibi molibden, krom ve vanadyum içeren çeliklerde yüksek temperleme sıcaklıklarında oluşan kararlı karbürler matrislerinin başlangıç sertliğini daha da arttırabilmektedir. Bu diyagramdan zırh çelikleri için neden öncelikle krom ve molibdenin alaşım elementi olarak seçildiği açık olarak görülmektedir.



Şekil 2.3. Karbür yapıcı elementlerin oluşturduğu karbürlerin temperleme karakteristikleri [19].

Sertleştirme işleminde ise zırh çeliklerinde 900-950 °C seviyesinde yapılan östenitleştirme sonucu matriksin gerekli karbon ve karbür oluşturuca alaşım elementleriyle doyumu sağlanarak su verilir. İşleminde oluşan latta tipi martenzit standart bileşimlerde ortalama 600 °C’de temperlenir.

İkincil sertlik doğrudan sertleştirme sürecinde östenitin karbon ve alaşım elementleriyle doyumu seviyesine bağlıdır. Aynı şekilde martenzitik matriksin tipi de çözünmüş karbon ve kısmen diğer alaşım elementlerinin miktarı ile belirlenir. Genelde zırh çeliği matriksi su verme sonrası % 0.2-0.3 karbon içerir ve yüksek miktarda dislokasyon içeren latta tipi martenzitten oluşur [23].

Çeliğin darbe direncini ve böylece balistik davranışını belirleyen temperleme mekanizmasının açıklanabilmesi için öncelikle dengeden uzak olarak çökelen ve çok ince olan ikincil sertlik çökeltilerinin tipi, boyutu, şekli, miktarı ve dağılımının bilinmesi gerekir. İkincil sertliğe ve daha yüksek sıcaklıklarda yumuşamaya neden olan reaksiyonların kimyasının anlaşılması için çökelti karakteristiği ve değişimiyle, matriks ve çökelti kompozisyonları 550-650 °C’lik sıcaklık aralığında bilinmelidir. Bu nedenlerle çökelti boyutu, şekli ve dağılımının belirlenmesi geçirimli elektron mikroskopisi ile gerçekleştirilir. Karbürlerin yeterince kabalaşmasıyla karbür

bileşimleri enerji dağılım spektrometresi ataçmanlı taramalı geçirimli elektron mikroskobu ile belirlenebilir. Ancak ikincil sertlik, yani maksimum sertlik konumunda bu teçhizat yeterli değildir. Bu nedenle ilgili kompozisyonel saptamalar günümüzde kullanılan mikro analiz yöntemleri içerisinde ayırma gücü en yüksek olan atom prob alan iyon mikroskobu ile gerçekleştirilir [24-29].

Zırh çelikleri ve mikro yapılarının balistik performansa olan etkileri üzerine güncel birçok çalışma yapılmıştır. Tane boyutu ve lata boyutunun da performansa etkisi olduğu sonucuna varılmıştır. Azalan tane boyutu ve lata boyutlarında performans yüksektir [18].

Maweja ve Stumpf ile diğer araştırmacıların yaptığı güncel çalışmalar zırh çeliğinin sertliğinin, balistik performansa karşı direnci belirleyen en önemli faktör olmadığını ortaya koymuştur. Akma ve çekme mukavemeti ile sertlik zırh çeliğinin gerçek dinamik kırılma ve parçalanma direnci yaklaşımında önemli olan kavramlar olarak düşünülmektedir. Örneğin, beynitik bir çeliğin düşük gerinme hızlarında çekme mukavemeti 2 GPa olup balistik darbe şartlarında meydana gelen dinamik gerilmeler 28 GPa gibi yüksek bir değerdedir [30].

Srivathsa ve Ramakrishnan birim alan-yoğunluk başına balistik darbe enerjisinin hesabını içeren bir model ortaya koymuş olup zırh plakalarının performansını tahmin etmek için balistik performans indeksini tanımlamışlardır. Bu indeks için değişkenler çelik yoğunluğu, elastik modül, akma ve çekme mukavemeti, poisson oranı, kesit azalması veya darbe boyunca uzama kesri ve çarpma hızıdır. Balistik performans indeksi, gerinme enerjisinin elastik ve plastik bileşenlerinin yanında darbe sonrası hedef-çevre esaslı sistemin kinetik enerjisi gibi terimleri de içermektedir [31].

BÖLÜM 3. ZIRH ÇELİKLERİNİN KAYNAK KABİLİYETİ

Zırh çelikleri, kullanıldıkları savaş araçlarında aranılan mekanik özellikleri gerçekleştirmek amacıyla, çeşitli ısıtım işlemlere tabi tutulmaktadır. Genel olarak zırh çeliklerine, yapısal görevi itibarıyla iki tür ısıtım işlemi uygulanmaktadır. Bunlar homojen ve homojen olmayan zırh çelikleri olmak üzere adlandırılır. Homojen zırh çelikleri kinetik enerjili olmayan mermilerin darbe etkisini karşılamak üzere komple ısıtım işlemine tabi tutulurlar. Malzeme sertliği 25 mm'lik et kalınlıkları için 321 ile 375 HBW arasında değişmektedir [3]. Homojen olmayan zırh çelikleri kinetik enerjili mermilerin delip geçme özelliğine karşı, yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulurlar. Dış yüzeyleri sertleştirilmiş olduğundan, dış yüzeylerine kaynak uygulanması daha fazla tedbir gerektirir. Bu tür malzemelerin sertliği 477 ila 534 HBW arasında değişiklik gösterir [4].

Zırh çeliklerinden beklenen balistik mukavemetten ötürü aşırı sertleşmenin istenmediği gibi, kaynak işlemi nedeniyle kaynak bölgesi sertliğinin azalmaması da istenir. Bunun için kaynak bölgesi sertliğinin, zırh çeliğinden istenilen sertliklere yakın olması gerekmektedir. Ayrıca malzemedeki beklenen yüksek mukavemet değerlerini sağlayan mekanik özelliklerin korunması ve kaynak sonrası oluşabilecek fiziki kaynak hatalarında önlenmesi gerekmektedir.

3.1. Kaynak Kabiliyetini Etkileyen Faktörler

3.1.1. Kimyasal kompozisyon ve karbon eşdeğeri

Zırh çelikleri, Karakterizasyonu olan, optimum mukavemet, sertlik ve tokluk kombinasyonu itibarıyla, Düşük alaşımlı yüksek mukavemetli çelik sınıfına girmektedir. Bu mekanik özellikler düşük alaşımlama ve ısıtım işlemi ile verilse de

malzemenin karbon içeriği, sertlik açısından gereklidir. MIL-A-46100 standart sınıfına göre üretilen zırh çeliklerinin yüzde karbon içeriğinin kaynak kabiliyetine etkisi, karbon eşdeğeri açısından formülü yine bu standartta Denklem 3.1'deki gibi verilir [4].

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (3.1)$$

Zırh çeliklerinin bileşimden kaynaklanan yüksek karbon eşdeğerinden dolayı sertleşme ve çatlamaya eğiliminin yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, zırh çeliğinin kalın uygulamalarının kaynağında ısıtma işlemi gerek duyulmaktadır. Kaynağın ısıtma işlemi, kaynak öncesi ön ısıtma, kaynak sırasında pasolar arası sıcaklık ve kaynak sonrasında kontrollü soğumayı kapsamaktadır.

Kaynak işlemi aslında bir ısıtma prosesidir. Bu ısıtma prosesinde ısı radyasyonunun çok dik olmasına, soğuma hızının büyük olması sonucunu doğurur ki iç gerilmelerin ve çarpılmaların çok büyük değerlere çıkmasına sebep olur. Ön ısıtma, kaynak dikişi çevresinde sıcaklık dağılımını yumuşatmak ve dikişin soğuma hızını yavaşlatmak suretiyle dikişin sertleşmesini, iç gerilim oluşumunu ve çarpılmayı bir ölçüde önler. Kaynak dikiş sıcaklığının martenzit bitiş sınırına inmesi geciktirilerek ferrit, perlit ve beynit dönüşümlerine zaman kazandırır. Böylece martenzit oluşumu azalır. Martenzitin mikro gerilmeyle dolu sert ve kırılabilir bir yapı olduğu bilinmektedir.

Sıcaklık, hidrojenin yayılımı için gerekli sınır düzeyinin üzerinde tutularak, şayet dikiş hidrojen almış ise hidrojenin dikişi terk etmesi sağlanmış olur. Böylece zırh çeliklerinde önemli bir sıkıntı olan hidrojen çatlağı riski azaltılır.

Ön ısıtmanın uygulandığı durumlarda bu sıcaklığın pasolar arasında da muhafaza edilmesi gereklidir. Bazen kaynağın kendi ısısı, dikişi istenen sıcaklıkta tutmaya yeterlidir. Bu durumlarda dışarıdan ayrıca ısı vermeye gerek kalmayabilir. Otomatik kaynaklarda durum böyledir. El ile yapılan ark kaynağında çok pasolu çalışmak ve sürekli dikiş çekmek gibi uygulamalar dışarıdan müdahaleye gerek bırakmayabilir. Geniş kaynak ağzı, yüksek amper kullanarak kalın elektrotla ve yavaş kaynak hızı kullanıldığında pasolar arası kaynak ısısı yüksek bir değerde kalır ancak bu

uygulamaların tümü zırh çeliklerinin kaynağındaki ısı girdisini arttıracaktır. Zırh çeliklerinin sahip oldukları mikro yapılar bu tür yüksek ısı girdileriyle, kaynakta ısı tesiri altındaki (ITAB) bölgenin mekanik özellikleri bozacaktır. Bu nedenle zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu, mikro yapısı ve üretim sırasında uygulanan ısı işlem çeşitlerine göre belirlene maksimum ön tav ve pasolar arası sıcaklık değerleri aşılmamalıdır.

Ön ısıtmasız soğuk bir metal kütle üzerinde kaynağa başlandığında başlangıç kısımları çok hızlı soğur. Çünkü kaynak ısısı aynı zamanda metal kütleği ısıtmaya harcanır. En hızlı soğuma kalın kesitli parçalar üzerine atılan kısa punta kaynaklarında olur. Nitekim bunların genellikle çatladıkları bilinmektedir.

Kaynak işlemi bittikten sonra, kaynak bölgesinin ani soğumasının önlenmesi amacıyla kontrollü soğuma yapılır. Daha çok kalın malzemelerin kaynak bölgelerinde gerçekleşen ani soğuma yine ITAB'da istenmeyen yapıların oluşumuna neden olabileceği gibi yüksek sertlik ve hidrojen gevrekliğı ile oluşabilecek çatlak riskini artırır. Yavaş soğuma işlemi ile dönüşmeden kalabilen östenitin beynite dönüşmesi sağlanır. Düşük sıcaklıkta varlığını hala koruyan östenit miktarı azaltılmış olacağından soğumada martenzit oluşumu da azaltılmış olacaktır. Ön ısıtma, kaynak dikiş çevresinde sıcaklık dağılımını yumuşatmak ve dikişin soğuma hızını yavaşlatmak suretiyle dikişin sertleşmesini, iç gerilim oluşumunu ve çarpılmayı bir ölçüde önler. Kaynak dikiş sıcaklığının martenzit bitiş sınırına inmesi geciktirilerek ferrit, perlit ve beynit dönüşümlerine zaman kazandırır. Böylece martenzit oluşumu azalır. Martenzitin mikro gerilmeyle dolu sert ve kırılğan bir yapı olduğu bilinmektedir.

3.1.2. Malzeme kalınlığı

Zırh çelikleri, kullanma gayeleri nedeniyle, alışılmış olan kesit kalınlıklarından daha kalın olarak imal edilmektedir. Bu bakımdan, kaynak kabiliyeti açısından kalınlık faktörü de önem kazanmaktadır. Kalın malzemelerde yüksek ısı iletimi nedeniyle oluşacak sıcaklık kaybının önlenmesi için ön ısıtma (ön tav) uygulaması gereklidir.

Et kalınlığı “d” olan malzemenin kalınlığının ön ısıtmaya olan etkisini Denklem 3.2.’deki Daniel Seferian formülüne göre belirleyebiliriz [32].

$$T_{\text{öntav}} = 350\sqrt{CE (1 + 0.005d) - 0,25} \quad (3.2)$$

Burada dikkat edilmesi gereken husus, ön ısıtma sıcaklığının, ilgili zırh çeliği malzemesi için istenen maksimum sıcaklığı geçmeyecek şekilde seçilmesidir. Maksimum sıcaklık değeri bilgisi üretici firma kataloglarından ve MIL-HDBK-1941 gibi ilgili zırh çeliği kaynağı dokümanlarından elde edilebilir [21, 33].

3.1.3. Isı girdisi ve mikroyapının korunması

Zırh çeliklerinin yüksek mukavemet ve balistik özelliklerinin sağlanması için oluşturulan mikro yapıların kaynak işlemi sonrasında korunması gereklidir. Kaynak işlemi sırasında oluşan ısının kontrol altına alınarak mikro yapılar korunabilir. Metal ark kaynağı ile homojen zırh çelikleri kaynağı için, bu amaca yönelik hazırlanmış MIL-HDBK-1941 askeri dokümanında ısıtma sıcaklığının 260 °C’yi ve pasolar arası sıcaklığında 149°C’yi geçmemesi tavsiye edilir. Aynı doküman 15.6 °C altındaki sıcaklıklarda da hiçbir şekilde kaynak yapılmamasını belirtir [33].

Isı girdisi zırh çeliklerinin kaynağında önemli bir parametredir. Isı girdisi formülünden (Denklem 3.3) anlaşılacağı gibi düşük kaynak akım ve voltaj değerleri ısı girdisini de düşük tutacaktır. Yüksek kaynak hızı ısı girdisini azaltıcı yönde hareket eder. Yine ısı girdisi formülü gereği düşük proses verimine sahip bir kaynak yöntemi seçilerek ısı girdisi azaltılabilir.

$$Q = n \left(\frac{V \times I}{\theta} \right) \quad (3.3)$$

3.1.4. Armox 500 T Kaynak Kabiliyeti

Armox 500 T yüksek mekanik özellikleri, tokluğu ve sertlik değerleriyle sektörde en çok kullanılan zırh çeliği malzemelerinden birisidir. İsveç menşei SSAB firması tarafından üretilen Armox 500 T zırh çeliği malzemesi balistik amaçla üretilen Armox serisi zırh çeliklerindedir [21].

Kaynak ağzı hazırlığı, kaynak gerinimlerini en aza indirmek suretiyle çatlak riskini azaltmak için esastır. Kaynak ağzındaki aralığı bozan her türlü süreksizlik, freze dalması düzeltilmeli, yüzey, pas, yağ, boya ve nemden uzaklaştırılmalıdır [21].

Punta kaynakları ani soğuma soğuk çatlak riskini artırır. Punta kaynak bölgeleri hidrojen çatlağını önlemek amacıyla 50 mm uzunluğunda tutulmalıdır. Östenitik kaynak dolgu metali kullanımında, zırh çeliği malzemesi en azından 18-25 °C oda sıcaklığında olmalıdır. Östenitik dolgu metali ile 30 mm'den kalın plakaların kaynağında ön ısıtma önerilir [21].

Kalın plakalar için et kalınlığına göre belirlenen ön ısıtma sıcaklığı, punta kaynağı ve kök paso dâhil, kaynak işlemi süresince tüm pasalarda muhafaza edilmelidir. Kaynak işlemi süresince, zırh çeliklerinin yapısını bozmamak için geçilmemesi gereken maksimum sıcaklık değerleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir [21].

Tablo 3.1. Armox serisi zırh çelikleri maksimum sıcaklık değerleri [21].

Zırh Çeliği	Armox 370 T CL1 & CL2	Armox 440 T	Armox 500 T	Armox 600 T	Armox Advance
Maksimum Sıcaklık (°C)	400	200	200	180	150

Tablo 3.1'deki değerler ısı girdisinin 1.7 kJ/mm olduğu durumlarda geçerlidir. Eğer ortam nemi çok yüksekse veya sıcaklık 5 °C'den düşükse tabloda verilen minimum sıcaklık değerlerine 25 °C eklenir. Isı girdisinin 1.0 ila 1.6 kJ/mm aralığında olduğu kaynak uygulamalarında yine bu kural uygulanabilir. Isı girdisinin 1.0 kJ/mm den düşük olduğu kaynak uygulamalarında kullanılacak ön ısıtma sıcaklığı EN 1011-2 standartından belirlenebilir. Isı girdisi 1.7 kJ/mm'yi aşan kaynak uygulamalarında

ise, verilen minimum ön ısıtma ve pasolar arası sıcaklık değerleri geçerli değildir [21].

Armox zırh çelikleri istenen sertlikte, dayanımda ve balistik özelliklerde kayıp olmayacak şekilde, en düşük karbon eşdeğeri ile geliştirilmiştir. Zırh çeliğinin türüne göre karbon eşdeğerleri Tablo 3.2’de gösterilmiştir [21].

Tablo 3.2. Armox serisi zırh çeliklerinin türüne göre karbon eşdeğeri değerleri [21].

Zırh Çeliği Türü	Kalınlık Aralığı (mm)	Karbon Eşdeğeri
Armox 370 T CL1 & CL2	3-80	0.67-0.75
Armox 400 T	4-30	0.68-0.72
Armox 500 T	3-80	0.67-0.75
Armox 600 T	4-20	0.85
Armox Advance	5-7	0.95

Kaynak dolgu metali türü belirlenirken kaynak dayanımı ve tokluk gerekleri baz alınır. Kaynak işleminde 500 MPa’a kadar akma dayanımı olan yumuşak dolgu metalleri önerilir. Dayanımın ve tokluğun optimum kombinasyonunun sağlanması için mümkün olan aralıktaki en düşük dayanımlı kaynak dolgu metali seçilmelidir. Düşük dayanımlı kaynak dolgu elektrotu kullanımının çeşitli faydaları vardır. Bunlar, kaynak metalindeki en yüksek tokluğun, en yüksek hidrojen çatlak direncinin ve kaynak dikişinde en düşük artık gerilmenin sağlanmasıdır. Kaynak metali seçiminde hidrojen içeriğide düşük tutulmalıdır [21]. Ancak düşük dayanım bazı uygulamalarda avantajını yitirmekte ve kaynaklı yapıyı zayıflatmaktadır. Tasarımın bu tür bölgelerinde ise tokluktan feragat edilerek dayanımı daha yüksek kaynak dolgu elektrotları kullanılır.

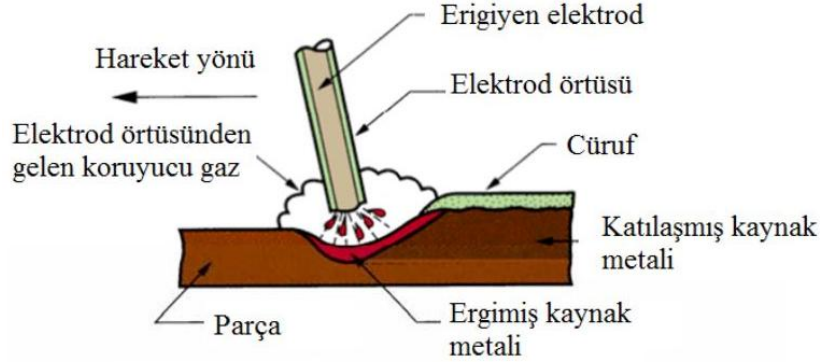
BÖLÜM 4. ZIRH ÇELİKLERİNDE KULLANILAN KAYNAK YÖNTEMLERİ

Zırh çeliklerinin kaynağında kullanılan belli başlı kaynak yöntemleri, elektrik ark kaynak yöntemi, gaz altı kaynak yöntemi, soy gaz erimeyen tungsten elektrik ark kaynak yöntemi ve toz altı kaynak yöntemidir. İçlerinde en eski ve sık kullanımı olan elektrik ark kaynak yöntemi zırh çeliği kaynağında hidrojen çatlağı riski en yüksek olan kaynak yöntemidir. Bunun nedeni kullanılan örtülü elektrotun nemlenmesi sonucu kaynak banyosuna giren hidrojenin soğuma sonrası genişleşerek çatlak oluşturmasıdır. Elektrik ark kaynak yönteminde kullanılan elektrotların hidrojen içerikleri düşük seçilmeli ve kaynak öncesi elektrotlar fırınlanmak suretiyle kurutulmalıdır. Daha teknolojik olan ve otomasyona imkan veren gazaltı kaynak yöntemleri gün geçtikçe sektörde daha yoğun kullanım alanı bulmaktadır. Ayrıca gaz altı kaynak yöntemlerinde kullanılan elektrotun örtü yapısı olmadığından nemden daha az etkilenen kaynak banyosu sağlanır. Ancak zırh çeliklerinin gazaltı kaynak yöntemlerindedeyine hidrojen içeriği düşük elektrot tercih edilmelidir. Kaynak dikişlerinin doğrusal ve boyutlarının uzun olması durumunda ise toz altı kaynak yöntemi kullanılabilir. Bu yöntem daha hızlı dolgu sağlayarak kalın et kalınlıklarının seri kaynaklarında önemli kazançlar sağlar. Yine toz altı kaynak yönteminde kullanılan tozun hidrojen içeriği ve fırınlanması hususlarına özen gösterilerek, olası çatlak oluşum riskleri minimuma indirilmelidir [21, 34-36].

4.1. Elektrik Ark Kaynağı

Örtülü elektrot kullanılarak yapılan elektrik ark kaynağında ark, iş parçası ile ergiyen elektrot arasında oluşur ve böylece eriyen elektrot kaynak metali haline geçer. Ark ile birlikte elektrot örtüsü de ısıdan dolayı yanarak ergir ve ergime esnasında açığa çıkan gaz, ark bölgesini atmosferden korur. Ergime sırasında oluşan cüruf da kaynak dikişini örterek kaynak metalinin korunmasını sağlar. Ayrıca elektrotun örtü

maddesine katılan alaşım elementleri sayesinde, kaynak dikişini alaşımlandırmak ve istenilen özelliklerde kaynaklı bağlantı elde etmek mümkündür. Örtülü elektrot ile ark kaynağında kaynak bölgesi Şekil 4.1'deki gibi oluşmaktadır [37].



Şekil 4.1. Elektrik ark kaynağı ark bölgesi [38].

Elektrik ark kaynağında ergimeyi oluşturan ark, kızgın bir katottan yayılan elektronların, yüksek bir hızla anoda doğru yönelmesi neticesinde oluşur. Bu yönelme sonucu oluşan çarpma sonunda nötr moleküllerin iyonize olmasına sebep olduğundan, kuvvetli bir sıcaklık yükselmesi meydana gelir. Ortaya çıkan toplam enerjinin %85'i ısı ve %15'i de ışık enerjisine dönüşmektedir [39].

Arkın uçları arasındaki gerilim ve arkta geçen akım şiddeti, Ohm kanununa göre değişmez. Akım şiddeti arttıkça, uçlardaki gerilim önce hızla ve daha sonra da yavaş bir şekilde düşer. Aynı zamanda gerilim ve akım şiddeti ark boyuna da bağlıdır. Elektrod ile iş parçası arasındaki uzaklık, "ark boyu" olarak adlandırılır. Ark boyu arttıkça, gerilim de artar [39].

Elektrik ark kaynağı esnasında metallerin erime miktarı, arkın gücüne (sabit kaynak hızlarında) bağlıdır. Arkın gücü denilince, ark gerilimi ve akım şiddeti söz konusudur. Düzgün bir kaynak yapılabilmesi için, ark geriliminin sabit tutulması lazımdır böylece akım şiddeti sabit kalır. Ark geriliminin sabit kalması, arkın kararlılığı olarak adlandırılmaktadır [39].

4.1.1. Elektrotlar

Kaynak yöntemlerinin çoğunda elektrik ark yöntemleri için gerekli ısıyı temin ederken bir akıcı dekapan da koruma, temizleme ve çoğu zaman da bunlarla beraber metalürjik kontrol işlemini yerine getirir. Akıcı (cüruf) korumalı ark kaynağının en çok kullanılan ve pratik olanı örtülü elektrot kullanılarak yapılan metal-ark kaynağıdır [37].

Örtülü elektrot, çekirdek ve örtü olmak üzere iki kısımdan oluşur. Çekirdek, kaynak metalinin oluşmasını ve akınım geçişini sağlar. Örtü ise, kaynak metalini havanın olumsuz etkilerinden koruyarak alaşım elementleri sayesinde kaynak dikişini alaşımlandırır ve kaynak dikişinin geç soğumasını ve düzenli görünümünü sağlar [37].

Elektrot örtüsü arkın tutuşmasını ve oluşmasını kolaylaştırır. Bu sayede doğru akım ve alternatif akımda kaynak yapabilme imkânı doğar. Ergiyik haldeki metal damlalarının yüzey gerilimlerine etki ederek tavan ve dikine kaynak işlemlerinin yapılmasına imkân sağlar. Koruyucu bir gaz atmosferi sağlayarak kaynak dikişini atmosferin olumsuz etkilerinden korur. Kaynaktan sonra dikişin üzerini kaplayarak yavaş soğumasını sağlar. Gerektiği hallerde dikişi alaşımlandırarak kaynak bölgesinin mekanik özelliklerini iyileştirir [40].

Elektrot örtüleri hazırlanırken örtü maddeleri belirli oranlarda harmanlanarak ekstrüzyon veya başka bir yöntemle elektrot çekirdeği üzerine kaplanır. Bu maddelerin harmanlanması sırasında bazı önemli hususlar göz ardı edilmemelidir. Her tür elektrot örtüsü için özellikle ana bileşenlerin bazı oranlar dâhilinde kalmaları gerekir. Bu elektrotun ana özelliğini belirler. Aksi takdirde elektrot örtüsü kendinden beklenen özellikleri sağlayamayacaktır. Bu da kaynak dikişinin metalürjik ve mekaniksel özellikleri açısından istenen özellikleri vermemesine yol açacaktır. Örtülü elektrotlar, örtülerinde bulunan ana bileşenlerin türüne, rutil (titandioksit), oksit, asit, bazik, selülozik karakterli ve özel elektrotlar olarak sınıflandırılır [40].

Rutil karakterli elektrotlar örtüsünün büyük kısmını, titandioksit teşkil eder. Titandioksidin örtüdeki oranı yaklaşık %35'tir. Örtü kalınlığı ince, orta ve kalın tipte olabilir. Örtü kalınlığı arttıkça, dikişin kalitesi iyileşir. Rutil karakterli örtünün kaynaktan sonra meydana gelen cürufunun rengi kahverenginden siyaha kadar değişir. Cüruf çabuk katılaşır ve kaynaktan sonra dikiş üzerinden kolayca kalkar. Bu elektrotlarla hem doğru (elektrot negatif kutupta), hem de alternatif akımda kaynak yapılabilir. Tutuşturulmaları kolay olup, yumuşak bir ark ile sakin bir çalışma sağlarlar ve sıçrama kayıpları azdır [39].

Asit karakterli elektrotların örtülerinde daha çok, demir oksit ve manganez bulunur. Genellikle kalın örtülü olarak imâl edilirler. Asit karakterli elektrotların cüruflarının tersinden görünüşü bir arı peteğini andırır ve dikiş üzerinden kolayca kalkar. Bu elektrotlar, çabuk akan düz dikişler verir ve dikey pozisyonda yukarıdan aşağıya doğru kaynaklardan başka, her pozisyon için uygundur. Hem doğru hem de alternatif akım ile kullanılabilir. Bu elektrotların aralık doldurma kabiliyetleri iyi olmadığından, kaynak ağızlarının çok iyi hazırlanması ve parçaların birbirine iyice alıştıırılması gerekir [39].

Oksit karakterli elektrotların örtülerinin %60'lık kısmını, demiroksit oluşturur. Kalın örtülü olarak imal edilirler ve kaynak esnasında metal geçişi, sprey şeklindedir. Oksit karakterli elektrotlar düz görünüşlü, ince dikişler verirler. Yalnız düşük karbonlu ve alaşımsız çeliklerin oluk pozisyonundaki kaynaklarında kullanılırlar. Aralık doldurma kabiliyetleri kötü olduğundan, birleştirilecek parçaların birbirlerine iyice uymaları gerekir. Bu elektrotlarla yapılan dikişlerin sıcak çatlama meyilleri daha fazladır [39].

Bazik karakterli elektrotların örtülerinin büyük kısmını kalsiyum, kalsiyum florür ve diğer toprak alkali metallerin karbonatları teşkil eder. Genellikle kalın örtülü olarak imâl edilirler. Cüruflarının kalkması, diğer elektrotlara nazaran daha zordur. Bazik elektrotlarla çoğunlukla, doğru akımda pozitif kutuba bağlanarak veya alternatif akımla kaynak yapılır. Bütün kaynak pozisyonları için uygun olup, iyi bir aralık doldurma kabiliyetleri vardır. Bazik elektrotlarla, sünekliği diğer elektrotlara göre yüksek olan dikişler elde edilir. Bu özellikleri bakımından zırh çeliği

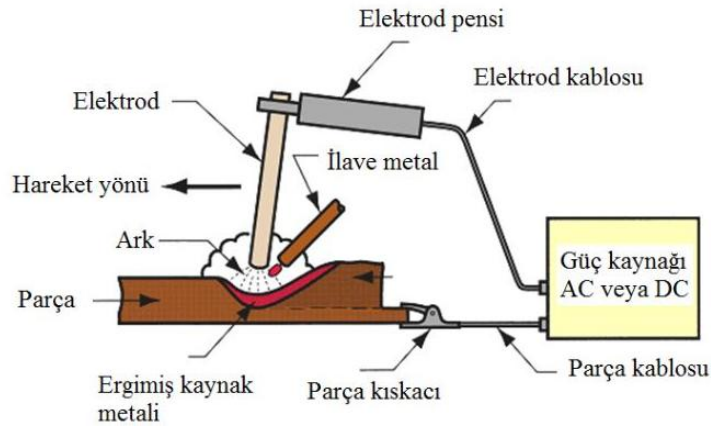
uygulamalarında tercih edilirler. Bazik tip elektrotların kaynaktan önce 200 ila 300 °C'de en az bir saat kurutulmaları ve kaynak esnasında termos içinde muhafaza edilmeleri gerekir. Aksi takdirde kaynak dikişinde hidrojen kaynaklı gözenekler ve çatlaklar oluşabilir [39].

Selülozik karakterli elektrotların örtülerinde, yandıkları zaman gaz haline geçen organik maddeler bulunur. Çoğunlukla kalın örtülü olarak imâl edilirler. Dikiş üzerinde çok az cüruf meydana getirirler, sıçrama kayıpları yüksektir. Doğru akımda (pozitif kutba bağlanarak) veya alternatif akımda kullanılabilirler. Her pozisyondaki kaynakta, bilhassa yukarıdan aşağıya doğru dikişlerde kullanılabilir. Aralık doldurma kabiliyetleri yüksektir [39].

Bunların dışında kalan özel elektrotlar, derin nüfuziyet elektrotları ve demir tozlu elektrotlardır. Derin nüfuziyet elektrotları ile malzemenin iki tarafından birer paso çekilerek kalın et kalınlığına sahip malzemelere kaynak ağzı açmadan, alın kaynağı yapmak mümkündür. Her bir taraftan çekilen pasonun, sac kalınlığının yarısını kaynak etmesi gerekir. Böylece ağız açma masrafı ortadan kalkmış olur. Bu elektrotlar kalın örtülü olarak imâl edilirler. Demir tozlu elektrotların örtülerinin büyük kısmını, demir tozu teşkil eder. Bu tür elektrotlarla yapılan kaynak metali tartılırsa, ağırlığının elektrodun çekirdek telinin ağırlığından fazla olduğu görülür. Çünkü örtüyü teşkil eden demir tozu da eriyerek, dikişe karışarak bu fazlalığı meydana getirmektedir. Bu sebepten bu elektrotlara, yüksek verimli elektrotlar da denir. Yüksek verimli elektrotlar daha kısa sürede daha uzun kaynak dikişleri üretiminde büyük avantajlar sağlamaktadır. Sağladığı kaynak avantajları yanısıra ekonomiklik açısından da büyük girdiler sağlamaktadır [39].

4.1.2. Kaynak makinaları

Örtülü elektrot ile elektrik ark kaynağında akım türüne göre doğru akım ve alternatif akım kullanılarak kaynak yapmak mümkündür. Bundan dolayı kaynak makinelerini temel olarak iki gruba ayırabiliriz.



Şekil 4.2. Elektrik ark kaynağı şematik gösterimi [38].

4.1.2.1. Doğru akım kaynak makineleri

Kaynak jeneratörleri ve kaynak redresörleri doğru akımla ark oluşturan düzeneklerdir. Kaynak jeneratörleri, elektrik motoru ve kaynak dinamosundan meydana gelir. Bu makineler mekanik enerjiyi kaynak için gerekli olan enerjiye çevirerek kaynak akımını çalışma yerinde üretir. Kaynak jeneratörlerinde akım üreten dinamo tahrik edildiğinde, rotoru manyetik bir alan içinde dönmeye başlar, böylece elektrik akımını üretmiş olur. Elde edilen elektrik, rotor milindeki kollektörden kömür fırçalar yardımıyla çekilir ve kaynak işleminin yapılacağı yere gönderilir [41].

Kaynak redresörleri de jeneratörlere benzerler. Kaynak redresörleri bir transformatör ve bir de redresörden meydana gelirler. Transformatör, şebekeden aldığı akımı kaynak için gerekli olan düşük gerilim, yüksek akım şiddetine çevirir. Redresör de alternatif akımı doğru akıma çevirir [41].

4.1.2.2. Alternatif akım kaynak makineleri

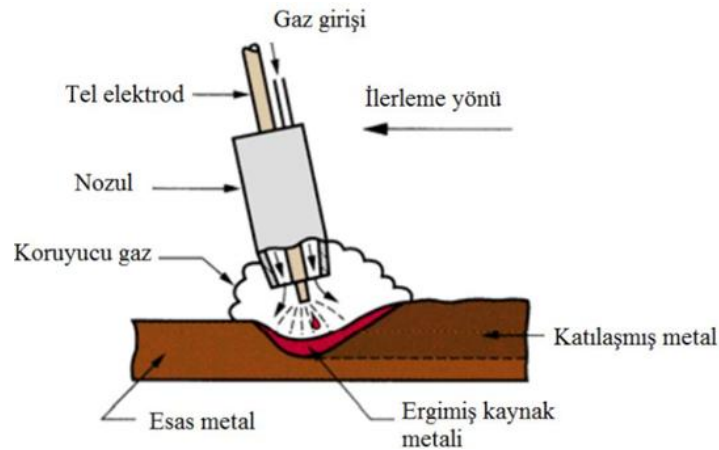
Bu grupta ise transformatörler yer almaktadır. Alternatif akım veren kaynak makineleri olan transformatörler, gerilimi yüksek ve akım şiddeti düşük olan şebeke akımını, gerilimi düşük fakat akım şiddeti yüksek olan kaynak akımına çevirirler. Transformatörler, kaynak jeneratörü gibi yeni bir akım üretmezler, sadece mevcut

olan akımın gerilimini ve akım şiddetini değiştirirler. Transformatörlerde dönen bir parça olmadığı için aşınma gibi sorunlar söz konusu değildir [41].

4.2. MIG/MAG Gazaltı Kaynağı

Gazaltı ark kaynağında sıcaklığın bir eriyen metal elektrod ve is parçası arasında oluşan ark tarafından sağlandığı bir ark kaynağı prosesidir. Kaynak bölgesine sürekli olarak beslenen bir tel elektrod dolgu metali olarak tüketilmektedir. Elektrod, kaynak havuzu, ark ve ana metale komşu olan bölge, kaynak bölgesine sürekli olarak beslenen bir akıcı gazla, atmosferin zararlı etkilerinden korunmaktadır. Gaz koruması tam koruma sağlamalıdır. Çünkü çok küçük bir boşlukta bile hava teması kaynak metalini kirletebilir [42].

Eriyen metal elektrot ve soy gaz kullanımı nedeniyle yönteme MIG (Metal inert gas) kaynağı adı verilmiştir. Yöntemde daha sonra düşük akım yoğunlukta ve darbeli akımla çalışma, daha değişik metallere uygulama ve koruyucu gaz olarak aktif gazların ve gaz karışımlarının kullanılması gibi işlemler meydana gelmiştir. Bu gelişmeler, aktif koruyucu gazın kullanıldığı yönteme MAG (Metal active gas) kaynağı adının verilmesine neden olmuştur [43].



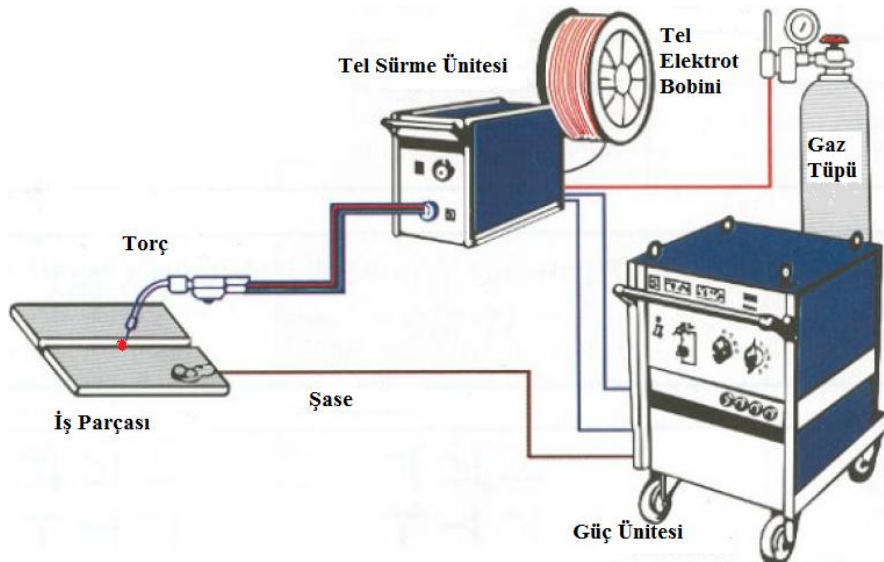
Şekil 4.3. MIG/MAG gazaltı ark kaynağı ark bölgesi [38].

Gazaltı kaynağında gerekli sıcaklık, sürekli beslenen ve eriyen bir tel elektrotla kaynak banyosu arasında oluşturulan ark yoluyla ve elektrottan geçen kaynak akımının elektrotta meydana getirdiği direnç ısınmasıyla oluşur. Elektrot çıplak bir

tel olup bir elektrot tel sürme ünitesiyle kaynak bölgesine sabit bir hızla sevk edilir. Çıplak elektrot, kaynak banyosu, ark ve esas metalin kaynak bölgesine komşu bölgeleri, atmosfer kirlenmesine karşı dışardan sağlanan ve bölgeye bir gaz memesinden iletilen uygun bir gaz veya gaz karışımı tarafından korunur [44].

Kaynak akımı, belirli bir elektrot çapı, bileşimi ve serbest elektrot boyu (kontakt borusu mesafesi) için elektrot ilerleme hızı ile orantılıdır. Uygun ölçüde bir sabit gerilimli akım üretici, belirli bir ark geriliminde (ark boyunda) elektrotu belirli bir hızda eritir. [46].

Ark gerilimi ve ark boyu, birbiriyle alakalı kavramlardır. Kaynak makinesi üzerinden okunan ark gerilimi, kaynak devresindeki gerilim düşüşlerinin toplamıdır. Bu değer, kaynak kablodaki, serbest elektrot boyundaki, arktaki, parçadaki ve parça dönüş akım kablolarındaki düşüşlerin toplamıdır. Bu nedenle ark gerilimi, ancak diğer devre elemanları sıcaklıkları sabit kaldığında makinede okunan değerlerle orantılıdır [46].

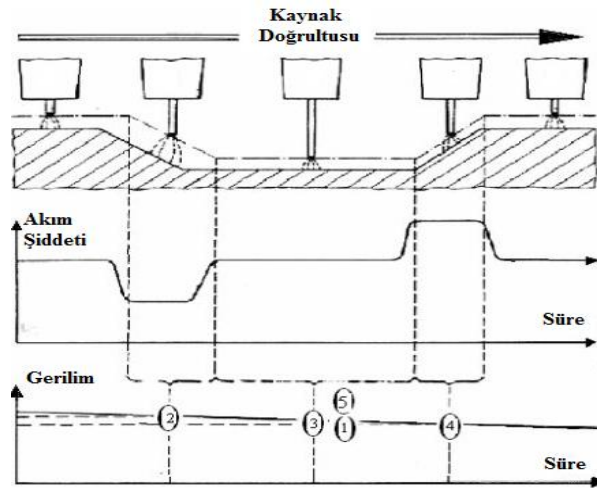


Şekil 4.4. MIG/MAG gazaltı ark kaynağı şematik gösterimi [35].

Serbest elektrot boyunun artışı, elektrotun direnç ısısının artmasına neden olur. Bu ısı, elektrota bir ön tavlama uygular ve ark içindeki gerilim düşümünü azaltır. Aynı zamanda kaynak akımı düşürülmüş olur. Bu düşüş, esas metalin erimesi için gerekli

ısıyı da azaltır. Sonuçta oluşan kaynak metali dar ve sığdır. Özlü telle ark kaynağında serbest elektrot boyunun etkisi, koruyucu gazla ve ilgili diğer kaynak değişkenleriyle dengede tutulmalıdır. Diğer etkenler sabitken serbest elektrot boyunun çok uzun olması, kararsız bir arka ve aşırı bir sıçramaya yol açar. Çok kısa olması ise belirli bir gerilim ayarı için ark boyunun çok uzun olmasına neden olur [46].

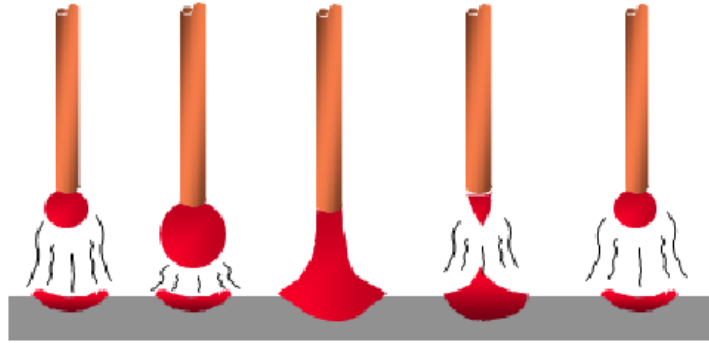
Ark gerilimi güç kaynağındaki çıkış gerilimi düğmesiyle saptanmaktadır. Güç kaynağı, ön gerilimin veya göreceli ark uzunluğunun korunmasıyla istenen oranda kaynak telinin erimesi için gerekli olan amperi sağlar. Arkı ve kaynak metalini sağlayan elektrodun kaynak yerine sabit hızla sürüldüğü MIG/MAG kaynağında ark boyunda herhangi bir nedenle ortaya çıkan ani değışmelerin süratle dengelenmesi gerekir. Dengeleme akım şiddetinin otokontrolüyle sağlanmaktadır. Bu özellik sadece sabit gerilimli yani yatay karakteristikli güç kaynaklarında mevcuttur. Kaynak esnasında herhangi bir nedenle ark boyu uzadığı zaman, Sekil 4.5'te görüldüğü gibi akım şiddeti büyük miktarda azalır. Buna bağılı olarak da eriyen tel miktarı azaldığından ark normal boyuna döner [35].



Şekil 4.5. Akım şiddet ayarı ile ark boyunun sabit tutulması [35].

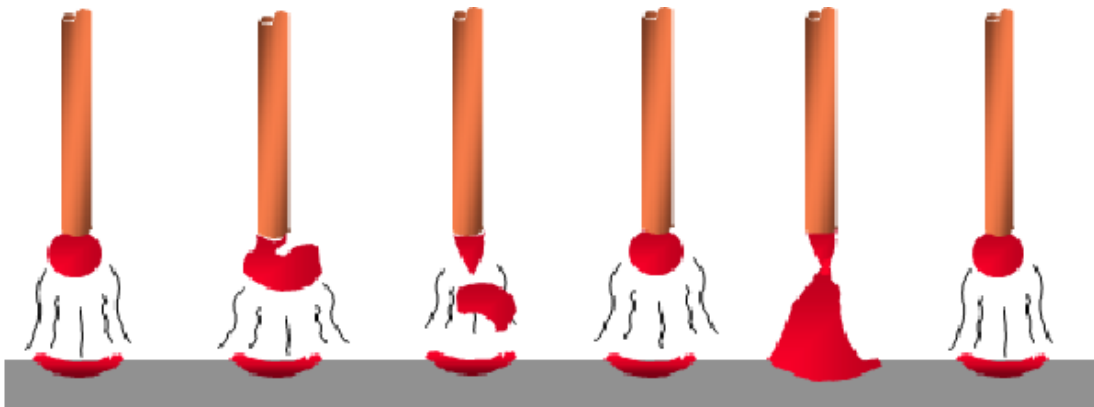
Gazaltı kaynağında kaynak teli kıvılcımın ısıyla erir ve ana metale sıçrar. Eriyen metalin ana metale atılmasına damla iletimi denir (Şekil 4.6). Kısa devre iletimi, gazaltı kaynağındaki en düşük kaynak akımı aralığında ve en küçük elektrot çaplarında gerçekleştirilir. Bu tip bir iletim ince kesitlerin birleştirilmesinde, zor pozisyonlarda ve büyük kök açıklarının kapatılmasında gerekli olan küçük ve hızla

katılaşan bir kaynak banyosu oluşturmak için kullanılır. Metal, elektrottan iş parçasına, sadece elektrot kaynak banyosu ile temas hâlinde olduğu sırada iletilir. Elektrot iş parçasına saniyede 20 ila 200 kez temas eder [43].



Şekil 4.6. Kısa ark [43].

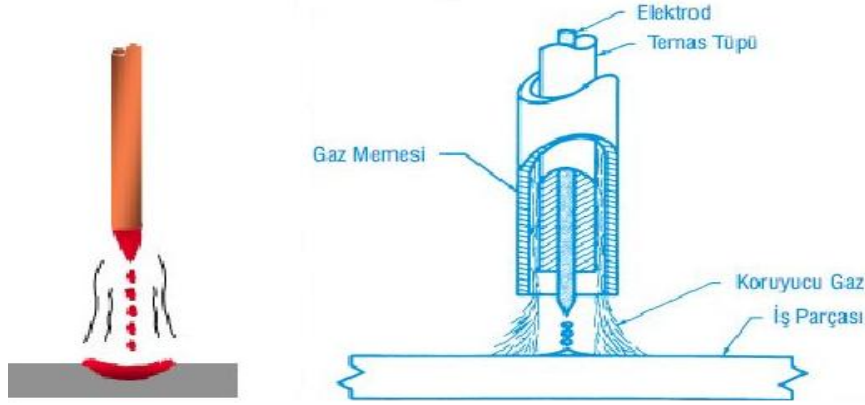
Kısa arka göre akım Şiddeti ve ark gerilimi fazla tutulursa ortaya uzun ark çıkar. Bu ark türünde elektrottan iş parçasına geçiş yapan metal damlacıklar halindedir. Koruyucu gaz olarak karbondioksit kullanılan kaynaklarda hemen hemen her konuma uygundur [43].



Şekil 4.7. Uzun ark [43].

Sprey arkta, kaynak metalinin iş parçasına geçişi, sprey Şeklinde görülür. Şekil 4.8'de sprey ark ve kaynak elemanları görülmektedir. Kaynak metalinin iş parçasına bu Şekilde taşınması elektrodun sivrilmiş uçlarının koparak iş parçasına çok küçük damlalar halinde geçişiyle gerçekleşir. Kalın gereçlerin kaynağına çok uygundur ve sıçramalar azdır. Argonca zengin, gaz korumasında kararlı, sıramasız bir iletim elde etmek mümkündür. Bunun için elektrot pozitif kutupta doğru akım kullanılması ve

akım şiddetinin geçiş akımı adı verilen kritik bir değerin üzerinde olması gerekir [43].



Şekil 4.8. Sprey ark [43].

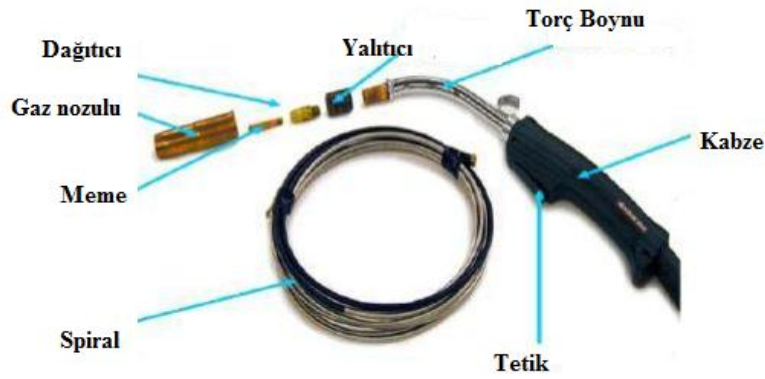
Kaynak hızı, kaynak dikişinin nüfuziyetini ve dikiş formunu belirler. Diğer faktörler sabitken düşük hızlardaki nüfuziyet, yüksek hızlara göre daha fazladır. Yüksek kaynak akımında düşük kaynak hızında kaynak yapmak, kaynak metalinin aşırı ısınmasına neden olur. Bu da cürufkların kaynak metali içinde hapsolmesinden dolayı dikişin görünüşünün bozulmasına veya esas metalin aşırı erimesine yol açar. Yüksek kaynak hızları ise düzensiz dikişlere neden olmaktadır [35].

Gaz akış hızı kaynak kalitesini etkileyen bir değişkendir. Yetersiz gaz akışı, erimiş banyonun yetersiz korunmasına dolayısıyla gözenekliğe ve oksitlenmeye neden olur. Aşırı yüksek gaz akışı ise türbülansa ve koruyucu gazın hava ile karışmasına yol açar. Kaynak kalitesi yetersiz akış ile aynı olur. Doğru gaz akış miktarı, torcun gaz memesinin tipine ve çapına, parça ile meme arasındaki mesafeye ve kaynak işleminin yapıldığı bölgedeki ani hava hareketlerine bağlıdır. Kaynak için gerekli olan gaz, tüp içindeki veya merkezi buharlaştırma ünitesinin çıkışındaki basınçla kullanılmaz. Bu bakımdan kaynak için yeterli debide gaz sevk edebilmek amacı ile kaynak donanımına tüp çıkışına veya merkezi dağıtım hatlarında tüketim noktalarına bir basınç ayar ventili ve akış ölçer diye adlandırılan aynı anda da kaynak bölgesine sevk edilen gazın miktarını ölçen bir cihaz takılır. Regülatörün tüpe yakın olan manometre tüp basıncını, diğeri ise gaz debisini gösterir. Gaz debisi bu şekilde ölçüp ayarlanabildiği gibi, akış ölçer adı verilen bir konik cam tüp içindeki hareketli bir bilye ile de yapılabilir [35, 46].

4.2.1. Kaynak makinaları

MIG/MAG kaynak makineleri yatay karakteristiğe sahip (sabit gerilimli) makinelerdir. Normal şartlarda kaynak akımı ile gerilimi denge halindedir. Kaynak esnasında herhangi bir nedenle, ark boyu uzadığında ark gerilimi artar. Ark geriliminin artması, akım şiddetinin azalmasına neden olur. Tel elektrot iş parçasına sabit hızla geldiği için akım şiddeti azaldığında, ergime gücünde azalır. Ergime gücünün azalması da sabit hızla ilerleyen telin, iş parçasına yaklaşmasına neden olur. Tel iş parçasına yaklaştığında, ark boyu statik karakteristik gereği düşer ve ergime gücü artar, tel daha fazla ergir. Tel boyu kısalır ve ark boyu eski değerine gelir. Bir redresörün ön kısmında kaba ayar için bir anahtar bulunur. Bununla ayar yapıldıktan sonra ikinci ayar anahtarıyla hassas ayarlama yapılır. Tristör veya transistör bulunan akım üreteçlerinde kademesiz ayar yapmak da mümkündür. Kaynak esnasında herhangi bir nedenle ark boyu uzadığında ark gerilimi artar. Ark gerilimin artması akım şiddetinin azalmasına yol açar. Tel elektrot kaynak bölgesine sabit hızla geldiğinden akım şiddetinin azalması ergime gücünün azalmasına neden olur. Ergime gücünün azalması da sabit hızla ilerleyen telin parçaya doğru yaklaşmasına yani ark boyunun (geriliminin) azalmasına yol açar. Ark geriliminin düşmesi, yine karakteristik gereği akım şiddetinin yükselmesine yol açtığından ergime gücü artar ve tel daha fazla ergir. Böylece tel boyu kısalır ve arkboyu eski değerine ulaşmış olur [46].

MIG/MAG kaynak makinaları çeşitli ünite ve ekipmandan oluşur. Torç bunlardan birisidir. Bir kaynak torcunun ana görevleri, kaynak bölgesine koruyucu gazın iletilmesi, tel elektrotun beslenmesi ve arktan küçük bir mesafede elektrota akımın verilmesidir. Bu görevlerin yerine getirilmesi için torç üreticileri farklı formlarda ve amaçlarda çok sayıda opsiyon geliştirmişlerdir. Torç seçimi yapılırken, kontak borusundaki ve gaz memesindeki sıcaklıklar, gaz memesinin yalıtımı, girdapsız bir gaz akısı için koruyucu gaz kanallarının ve memesinin yapısı, sızdırmazlık sisteminin güvenilirliği, torcun ağırlığı ve hortum paketinin esnekliği, aşınan parçaların değiştirilebilme olanağı ve maliyeti, göz önünde bulundurulur [47].



Şekil 4.9. MIG/MAG Kaynak torcu [38].

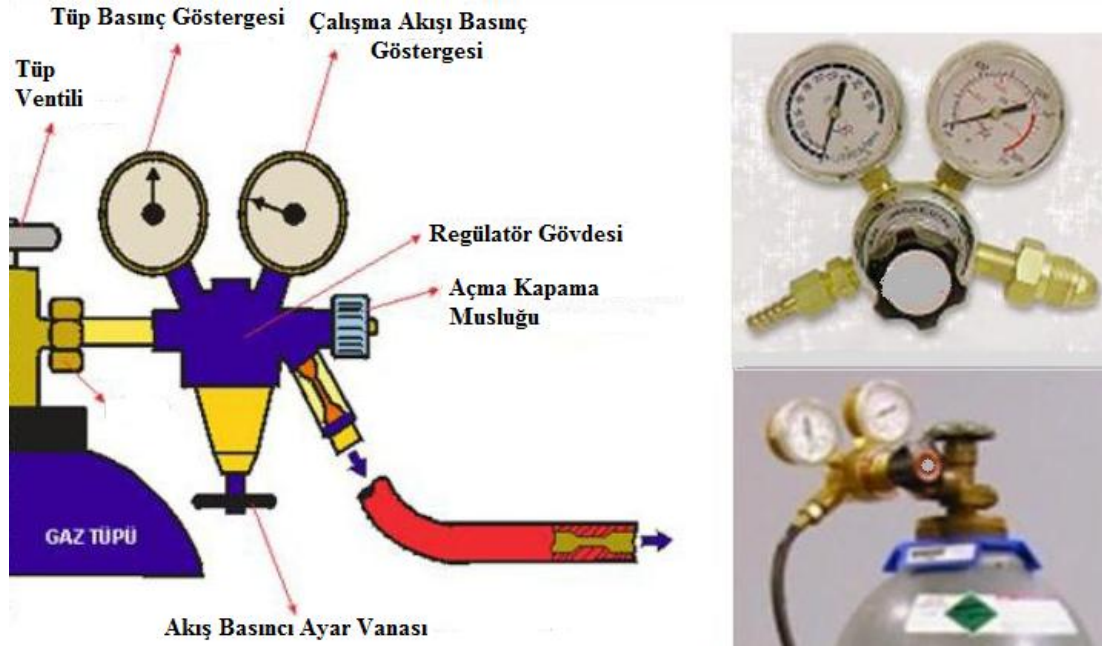
Bir diğer ünite olan, tel sürme tertibatı kural olarak, dönme kademesiz olarak ayarlanabilen bir doğru akım paralel bağlantılı motorudur. Modern cihazlarda motorun dönüş hızı, yükten bağımsız olarak sabit besleme sağlayan tristör üzerinden ayarlanır. MIG/MAG kaynağında tel besleme hızları 2 ila 20 m/dak arasında değişir. Motorlar tel sürme ruloları olan bir sisteme bağlıdır, tel çıkış memesi, makaradan salınan telin belirli bir yönde itilmesi görevini yapar. Tel makarasından belirli bir eğiklikle açılır, ilerletme ruloları bu eğikliği tamamen gideremez. Tel doğrultulmazsa, hortumun paketinden belirli bir dalgalıkla geçer ve kuvvetli şekilde sürtünme eğiliminde olur [47].



Şekil 4.10. Tel sürme ünitesi [47].

Kaynak için gerekli olan gaz, tüp içindeki veya merkezi buharlaştırma ünitesinin çıkışındaki basınçla kullanılmaz. Bu bakımdan kaynak için yeterli debide gaz sevk edebilmek amacı ile kaynak donanımına tüp çıkışına veya merkezi dağıtım hatlarında tüketim noktalarına bir basınç ayar vanası ve akış ölçer diye adlandırılan aynı anda da kaynak bölgesine sevk edilen gazın miktarını ölçen bir cihaz takılır. Bir diğer

ekipman olan regülatörün tüpe yakın olan manometre tüp basıncını, diğeri ise gaz debisini gösterir. Gaz debisi bu şekilde ölçüp ayarlanabildiği gibi, akış ölçer adı verilen bir konik cam tüp içindeki hareketli bir bilye ile regülatörden veya torcun ucundanda yapılabilir [35].



Şekil 4.11. Regülatör [38].

4.2.2. Tel elektrotlar

MIG/MAG gazaltı kaynak tekniğinde kullanılan sürekli elektrotlar iki türdür. Masif ve özlü tel olarak adlandırılan bu tellerin birbirlerine göre değişik avantaj ve deavantajları mevcuttur. Özlü tel boru şeklinde üretilmiştir ve içlerinde öz diye adlandırılan arkin stabilizasyonunu ve kaynak metalinin alaşımlanması sağlayan bir madde vardır. Özün yanmasıyla oluşan gaz dolayısıyla bu elektrotlarda havanın kaynak banyosuna olumsuz etkisi daha azdır. Özlü elektrotların çubuk halinde olanları ancak bazı özel sert dolgu işlemleri için genellikle bugün MIG/MAG yöntemleri için çok çeşitli türde makaraya sarılı tel halinde özlü tel üretimi yaygındır. Özlü telle elektrot ark kaynağı, her şeyden önce bir ark kaynak yöntemidir ve sürekli bir ilave metal elektrot ile kaynak banyosu arasında ark oluşturulması esnasına dayanır. Bir koruyucu gaz örtüsünün altında ve tüp şeklindeki elektrotun içindeki tozdan oluşan bir örtü korumasıyla birlikte uygulanır. Özlü tel elektrotla ark kaynağı

diğer ark kaynak yöntemlerinden ayıran özellik cüruf yapan maddelerin, sürekli beslenen bir tel elektrot içinde olmasıdır. Elektrot içinde çeşitli toz malzeme bulunan metal bir tüp formunda kompozit bir ilave metaldir. Kaynak sırasında kaynak metalinin yüzeyini yoğun bir cüruf tabakası kaplar [35].

Özlu telle ark kaynağı üstünlüğü, üç özelliğı birleştirmesinde yatmaktadır. Sürekli telle kaynağın verimliliğı. Bir cürufun varlığıyla elde edilen metalürjik üstünlükler (deoksidasyon, alaşımlandırma v.s.) ve kaynak banyosunu koruyan ve şekillendiren cüruf. İlave gaz korumalı özlu telle ark kaynağında koruyucu gaz, erimiş metali havanın azot ve oksijeninden korumak üzere arkın ve kaynak banyosunun üzerinde bir örtü oluşturmaktadır. Azot havadan kaynak metaline böylece ulaşamaz. Ancak karbondioksitin ayrışması sırasında oksijen açığa çıktığından koruyucu gaz örtüsünde bir miktar oksijen bulunmaktadır. Elektrotların bileşimleri, gaz örtüsünde bir miktar oksijen bulundurmaktadır. Bu özellik hafif metallerin kaynak yapılabilmesi ve kökte aralık doldurma kabiliyetini artmasını sağlar. Eğer ark boyu ve kaynak akımı (kaynak makinesinde daha yüksek ark gerilimini ayarlayarak ve tel besleme hızının arttırarak) korunabilirse, daha büyük serbest elektrot boyu, kaynak metali yığıma miktarında artırır [46].

Özlu telin içerdiği özün tipine göre bazik, metal ve rutil karakterli olmak üzere üç çeşidi bulunmaktadır. Bazik karakterli özlu tel sağladıkları yüksek mekanik özellikler nedeniyle ince taneli ve yüksek dayanımlı çeliklerin kullanıldığı konstrüksiyonlardaki kaynak işlemlerinde kullanılır. Metal karakterli özlu tel ise, spreyl ark modunda ve yatay pozisyonda gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde yüksek yığıma hızı sağlar. Bu gruba giren özlu teller çok az sıçrama yaparlar ve kaynak dikişinde cüruf oluşturmazlar. Rutil karakterli özlu teller; yumuşak ark karakteristiğı, yüksek kaynak kabiliyeti, kolay cüruf kalkışı ve güzel bir dikiş görüntüsü sağlarlar [48].

Özlu tel elektrotlar ile yapılan kaynakların hızı ve görüntü kalitesi daha iyidir. Kaynakçı için avantajlıdır. Ancak masif tele oranla çok daha pahalıdır. Zırh çelikleri için gereken mekanik özellikler nedeniyle bu çelikler için savunma sanayinde kullanım alanları çok sınırlıdır. Gelişen teknoloji ile savunma sanayi

uygulamalarında kullanılabilen özlü tel üretimi gelecekte mümkün olursa, bu teknolojik tellerin sektörde geniş kullanım alanları olabilir.

4.2.3. Gazlar

Koruyucu gazların kullanım amacı örtülü elektrotla ark kaynağı veya tozaltı kaynağındaki örtü ve kaynak tozlarının gördüğü işlevleri yerine getirmektir. Koruyucu gazlar, elektrotun oksitlenmesini önler, ark iyonizasyonunu kolaylaştırır, atmosferdeki hidrojeni kaynak banyosundan uzak tutar [43].

4.2.3.1. Helyum

Boğucu bir gazdır. Kimyada “He” harfleri ile gösterilir. Havadan yaklaşık %13,8 daha hafiftir. Hidrojenden sonra bilinen en hafif elementtir. Kimyasal olarak inert bir soy gazdır. Sıvı hâlde sıcaklığı çok düşüktür Kaynama noktası, bilinen en düşük gazdır. Yurdumuzda üretimi fazla olmadığından yaygın kullanım alanına sahip değildir. Helyum gazı genellikle doğal gaz kuyularından elde edilmektedir. Sıvı ve veya gaz fazlarında ticari olarak bulunur [43, 44].

4.2.3.2. Argon

Havadan ağır bir gazdır. Kimyada “Ar” harfleri ile gösterilir. Argon arkının gerilimi ve argonun sıcaklık iletme kabiliyeti diğer koruyucu gazlara göre daha düşüktür. Sonuçta, argon ortamında oluşan ark sütunu daha geniştir. Merkezde yüksek olan sıcaklık dış sıcaklıklarda düşüktür. Bunun bir sonucu olarak da nüfuziyet dikişin ortasında yüksek, kenarlarında düşüktür [43,44].

4.2.3.3. Karışım

Ark atmosferinin karakteri, kullanılan gaz ve gaz karışımlarına göre değişir. Pratikte saf koruyucu gazlardan ziyade, karışım gazlar kullanılmaktadır. Kaynak yöntemine, kaynaklanacak parçanın cinsine, kalınlığına ve şekline göre çeşitli karışım gazlar mevcuttur. Ar ve He çeşitli oranlarda karıştırılarak TIG ve MIG yöntemlerinde

kullanılmaktadır. Ar , CO₂ ve O₂ karışımı kullanılırsa oluşan ekzotermik bir reaksiyon sebebiyle kaynak banyosunun sıcaklığı yükselir ve yüzey gerilimi zayıflar, böylece akıcılığı yükselmiş olan kaynak banyosunun gazı da giderilmiş olur [43].

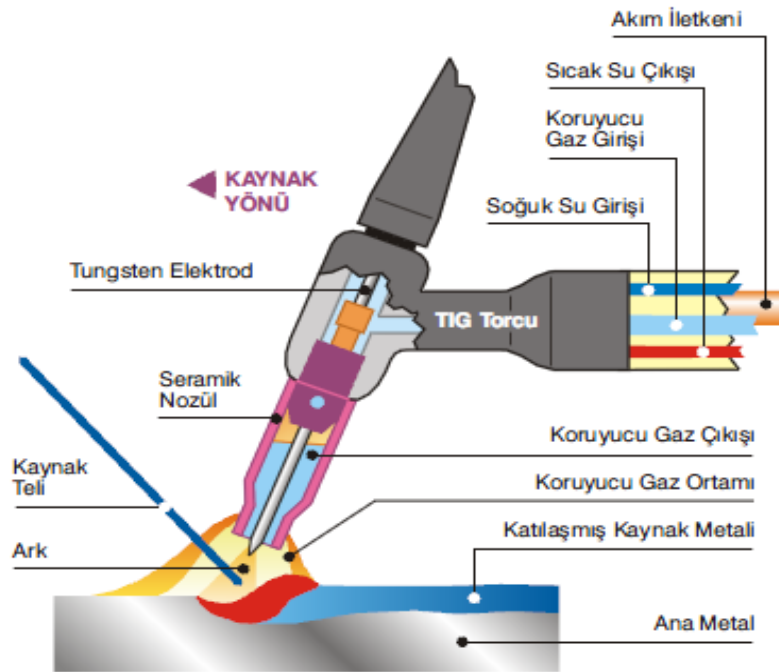
4.2.3.4. Karbondiyoksit

Renksiz, kokusuz, havadan ağır, çok atomlu bir gazdır. Kimyada CO₂ harfleri ile gösterilir. Diğer koruyucu gazlardan farklı olarak tüp içindeki CO₂'nin büyük çoğunluğu sıvı hâdedir. Tüpün üst kısmında (sıvının üzerinde) gaz hâlinde CO₂ bulunur. Kullanım sırasında gazın basıncı düştükçe sıvı da buharlaşarak basınç normale döner. CO₂ gaz hâline geçerken çevreden sıcaklık alır, sıcaklık düşer. Bir tüpten sürekli olarak 12 litre/dk. dan daha fazla gaz çekilmemelidir. Aksi takdirde alınan buharlaşma ısısı ile sıcaklığın düşmesi sonucunda CO₂ buzu oluşur. Çıkış borusu ve manometrede akış tıkanabilir. Fazla debide gaz gerektiğinde birkaç tane tüp bir manifold ile birleştirilerek kullanılabilir veya tek tüpün çıkışına buharlaşma ısısını karşılamak üzere bir ısıtıcı yerleştirilir. Bu tüpler, içinde sıvı CO₂ bulunduğu için hiçbir zaman eğik veya yatık olarak kullanılmamalıdır [43].

4.3. TIG Kaynağı

TIG kaynağında ark, tungsten elektrot ile parça arasında oluşur. Koruyucu gaz olarak argon, helyum veya bunların karışımı kullanılabilir. Ark, elektrik iletkeni ve ark taşıyıcısı olan tungsten elektrot ile iş parçası arasında yanar. İlave malzeme, kaynak banyosuna önden, yandan, elle sevk edilen çubuk telle veya ayrıca bir sevk aparatı ile verilir. Kaynaktan sonra korozif artıkların temizlenmesine gerek olmaması, yüksek dayanımlı, korozyona dirençli ve sünek dikiş kalitesi vermesi, malzemeleri kaynaktan sonra minimum distorsiyona uğratması ve sıçrama kayıplarının olmaması bu ark kaynağı türünün önemli avantajlarıdır. Uygulama alanı olarak genellikle paslanmaz çelikler, bakır ve alaşımlarının, alüminyum ve alaşımlarının kaynaklarında kullanılmaktadır. TIG kaynağı, boyama prosesi öncesi yapılan raspalama işlemi sonrası ortaya çıkan kaynağın içindeki hatalarının (gözenek, cüruf sıkışmaları) ve saç yüzeyindeki haddeleme hatalarının tamirlerinde de kullanılabilir [49].

Yöntemin adı olan TIG (Tungsten inert gas), almanca da tungsten metaline Wolfram denildiği için, bu kaynak yöntemi WIG olarak da anılmaktadır. TIG kaynağı esasen gazaltı elektrik ark kaynak yöntemlerinden biridir. Kullanılan Tungsten kelimesi, arka elektrik akımını iletmeyi sağlayan erimeyen elektrodu, Inert kelimesi, diğer elementlerle kimyasal olarak birleşmeyen bir gazı ve gaz kelimesi de, koruyucu atmosferi simgeler [50].



Şekil 4.12. TIG kaynağı ark bölgesi ve torç düzeneği [38].

Tükenmeyen bir tungsten elektrot ve arkın bir soy gaz tarafından korunduğu TIG kaynağı, son derece önemli bir ark kaynak yöntemidir. Bu yöntemde, tungsten elektrot ile iş parçası arasında bir elektrik arkı oluşturulur. Ark bölgesi soy gaz veya karışımları ile korunur. Bu kaynak yönteminde genel olarak tek bir elektrot kullanılmasına rağmen, bazı durumlarda birkaç elektrot da kullanılabilir. Bu kaynak metodu paslanmaz çelik, alüminyum, magnezyum, bakır ve diğer birçok demir dışı metaller gibi kaynak yapılması zor olan metallerin kaynatılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır [49].

TIG kaynağının metal yığıma hızı diğer ark kaynak yöntemlerine göre düşüktür. Kalın kesitli malzemelerin kaynağında ekonomik bir yöntem değildir. Açık ve

rüzgârlı havalarda gaz altı koruma tam yapılamayacağı için kullanımı tavsiye edilmeyen bir kaynak yöntemidir [49].

TIG kaynağı, hem elle, hem de otomatik kaynak sistemlerine ile uygulanabilir. Elektrot tükenmediği için ana metalin ergitilmesiyle veya ilave bir kaynak metali kullanarak kaynak yapılır. Her pozisyonda kaynak yapılabilir ve özellikle ince malzemelerin kaynağına çok uygun bir kaynak yöntemidir. Düzgün kaynak dikişi verir ve cüruf olmaması sebebiyle kaynak dikişini temizlemeye gerek yoktur. Kök paso kaynaklarında yüksek nüfuziyet ve gözeneksiz kaynak dikişleri verir [50].

4.3.1. Kaynak makineleri

TIG kaynak metodunda sabit akım tipi kaynak makineleri kullanılır ki bu makinelerden hem alternatif akım hem de doğru akım elde edilebilir. Bunlar ya döner tip (jeneratör) ya da sabit tip (transformatör-redresör) kaynak makineleridir.

Jeneratör tipi kaynak makineleri, ya elektrik motoru ile (fabrika veya atölyede kullanmak için) veya içten yanmalı (gazyağı, benzin veya mazotlu) bir motorla (arazi de kullanmak için) tahrik edilirler. Jeneratör tipi kaynak makineleri genellikle elektrik ark kaynağı için kullanılır. Ancak koruyucu gaz ve/veya yüksek frekans aygıtları adapte edilerek TIG kaynağında da kullanılabilir. Jeneratör tipi kaynak makinelerinden çoğunlukla doğru akım elde edilir. Ancak bu makinelerden, yapılacak bazı dizayn değişiklikleriyle hem alternatif hem de doğru akım elde edilmesi mümkündür. Alternatör tipi kaynak makineleri de yine TIG kaynağına adapte edilebilirler. Bu makinelerden de genelde alternatif akım elde edilir [49].

TIG kaynağı metodunda transformatör-redresör tipi kaynak makineleri motor-jeneratör tipi kaynak makinelerine nazaran çok daha fazla ve yaygın olarak kullanılan makinelerdir. Bu makinelerden hem alternatif hem de doğru akım alınabilir. Alternatif akımı üreten tek fazlı transformatör, alternatif akımı doğru akıma çeviren bir redresörle bağlantılıdır. Dolayısıyla TIG kaynağında bu tip kaynak makineleriyle değişik cins metallerin kaynağı mümkün olmaktadır. Ayrıca bu makinelerin programlanabilir tipleri çok daha fazla ve yaygın olarak

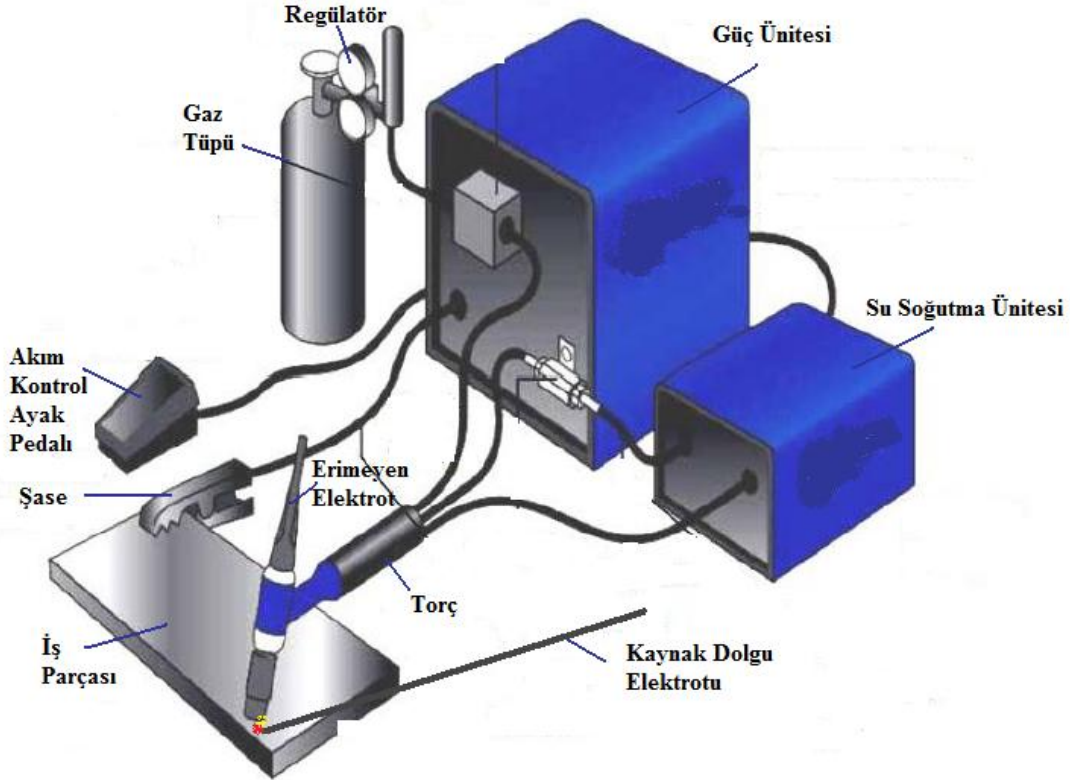
kullanılmaktadır. Makine üzerindeki bir kol ile veya düğme ile ya redresör devreye sokularak doğru akım alınır ya da transformatör devreye sokularak alternatif akım alınır. Bu seçimi kaynakçının kendisi, yapılacak kaynağın cinsine göre yapar. Bunları statik tip (döner parçaları olmadığından) kaynak makineleri diye de isimlendirebiliriz [49].

Transformatör tipi kaynak makineleri TIG kaynağının çok az kullanıldığı bazı küçük veya orta büyüklükteki işyerlerinde genellikle ark kaynağı için kullanılır ancak gerektiğinde gaz sistemi ve mümkün olursa yüksek frekans cihazı da adapte edilerek TIG kaynağında da kullanılabilir. Ancak bu makinelerden sadece alternatif akım alınabildiğinden genellikle alüminyum ile magnezyumun TIG kaynağı için uygun olabilirler [49].

TIG kaynak donanımı, Şekil 4.13'de görüldüğü gibi uygun bir akım üretici, koruyucu gaz tüpü, gaz basınç ve debi ayar tertibatı, tungsten elektrotu taşıyan torç, akım kabloları ve gaz hortumu ile genelde akım üretici üzerine monte edilmiş bir kontrol panelinden oluşur. Ayrıca yüksek akım şiddeti ile çalışma halinde bir de torcu soğutmak için soğutma suyu devresi vardır. El kaynağı halinde torcun hareketi ve kaynak metali beslemesi kaynakçı tarafından yapılır; yarı otomatik yöntemde torç yine kaynakçı tarafından hareket ettirilir, burada tek fark kaynak ek metalini sağlayan telin ark bölgesine otomatik olarak bir tertibat tarafından sokulması ve sürekli olarak sabit bir hızla beslenmesidir [49].

TIG kaynak yönteminde torç özel olarak tasarlanmış olup, iş parçası ile ucundaki tungsten elektrot arasında kaynak için gerekli olan elektrik arkını oluşturabilmek için, akım kablосundan aldığı akımı elektroda iletmek, koruyucu gaz ile kaynak banyosunun üzerini örtecek biçimde görevleri yerine getirmek için dizayn edilmiş bir elemandır. Kaynak torçları, çeşitli boyutlarda tungsten elektrotları kolaylıkla kullanabilecek tarzda ve uygulama koşulları göz önünde bulundurularak çeşitli tür ve boyutlar da üretilmektedirler. El ile yapılan TIG kaynağında kullanılan torçlar hafif, küçük ve elektrik akımı kaçaklarına karşı etkin bir biçimde yalıtımlı olarak tasarlanmış ve üretilmişlerdir. Torç ile akım üretici, gaz tüpü ve soğutma suyu bağlantıları değişik kalınlıklardaki kablolar ve hortumlarla sağlanır. Bunların tümü

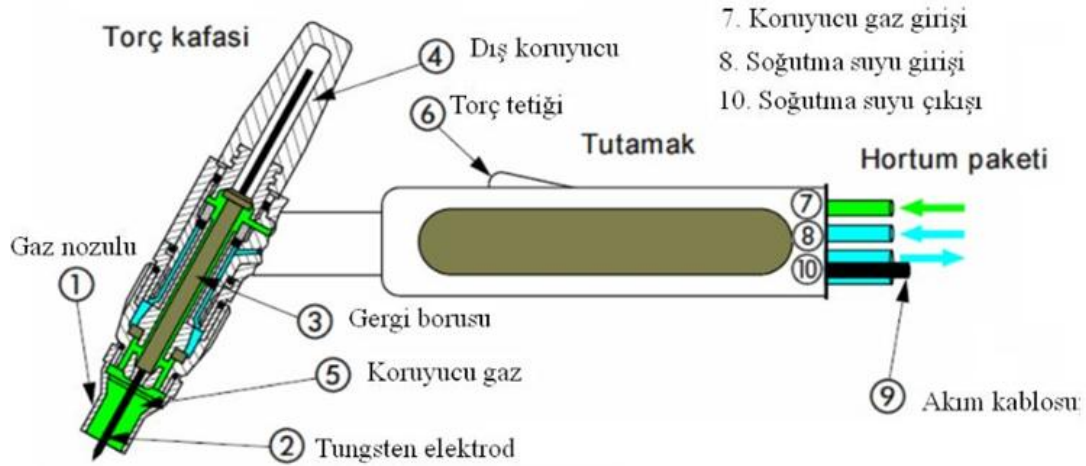
torç bağlantı paketi adı verilen çelik spiral takviyeli bir kalın hortum içine yerleştirilmiştir [50].



Şekil 4.13. TIG kaynağı şematik gösterimi [50].

Torçlar uygulamada kullanılabilecekleri en yüksek akım şiddetine göre sınıflandırılırlar. Her büyüklükteki torca belirli sınırlar içinde kalmak koşulu ile çeşitli çap ve türlerde elektrot ve gaz nozulu takılabilir. Torçları sınıflandırmada en önemli kriter yüklenebilecekleri akım şiddeti olduğundan ve bu konu da torcun soğutma sistemini belirlediğinden, genelde torçlar hava soğutmalı ve su soğutmalı olarak iki ana gruba ayrılırlar [50].

TIG kaynak torçlarına takılan gaz nozulları, torcun biçimine, türüne, kapasitesine, hava veya su soğutmalı olmasına, kullanılan gaz debisine ve kaynak yerine göre değişik çap ve türde olabileceği gibi değişik malzemelerden de üretilmiş olabilirler. Günümüzde endüstride kullanılan gaz nozulları malzemeleri açısından 4 gruba ayrılırlar. Bunlar, seramik gaz nozulları, metal gaz nozulları, saydam gaz nozulları ve çift gaz akışlı gaz nozulları olarak adlandırılırlar [50].

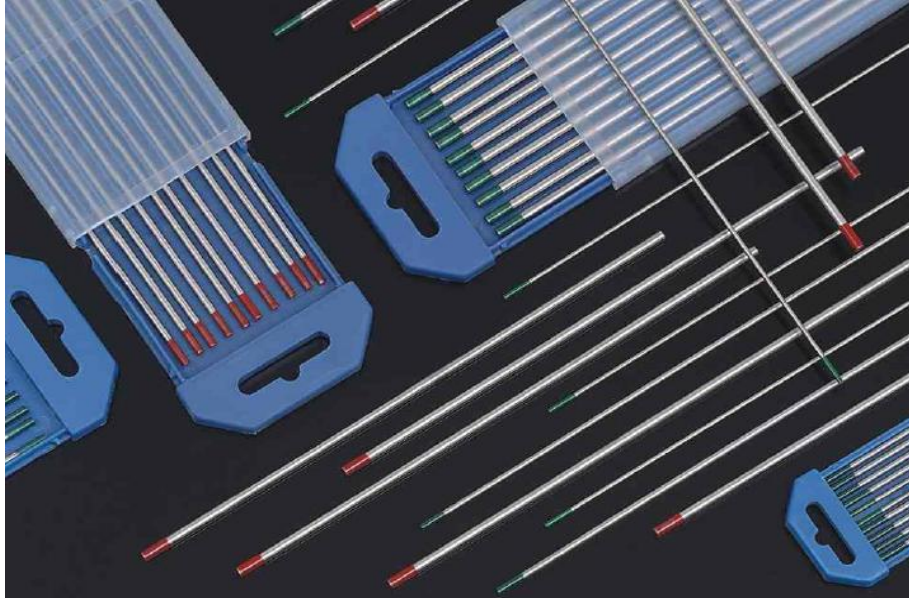


Şekil 4.14. TIG kaynak torcu düzeneği [38].

TIG kaynak düzeneğinin diğer ekipmanları MIG/MAG kaynağında anlatılmıştır. Buradaki ekipmanlarda aynı işleve sahiptir ancak özellikleri TIG kaynağına uygun olarak seçilmelidir. Elle dolgu teli beslemeli bir yöntem olduğundan MIG/MAG kaynağında kullanılan tel sürme ünitesi çok özel uygulamalar haricinde kullanılmamaktadır.

4.3.2. Erimiyen elektrot

TIG kaynak yöntemini diğer kaynak yöntemlerinden ayıran en önemli fark, bu yöntemde kullanılan elektrodun görevinin sadece ark oluşturması, ek kaynak metali görevi yapmamasıdır. Erime sıcaklığı 3500°C civarında olan tungsten, yüksek erime sıcaklığı ve de kuvvetli bir elektron yayıcısı olduğundan dolayı elektrot malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yayınan elektronlar ark sütunu içinde kuvvetli bir elektron akımı oluşturarak arkın kararlılığını sağlarlar. Doğru akımla TIG kaynağında toryum oksit, zirkonyum oksit, lantan oksit, seryum oksit ve bu oksitlerin karışımlarını içeren tungsten elektrotlar kullanılır. %1-5 arası oksit ilavesi, arkın tutuşmasını iyileştirmekte olup elektrodun akım yüklenebilirliğini arttırmaktadır. Alternatif akımla TIG kaynağında ise çoğunlukla %100 tungsten elektrotlar kullanılmaktadır [51].



Şekil 4.15. TIG erimeyen elektrot [38].

Günümüz endüstrisinde ticari saflıktaki tungsten (% 99.5 W) ile toryum, zirkonyum ve lantanyum ile alaşımlandırılmış elektrotlar kullanılmaktadır. Uygulamada karşılaşılan TIG kaynak elektrotlarını, saf tungsten elektrotlar, alaşımlı elektrotlar ve çizgili elektrotlar olmak üzere üç grup altında toplamak mümkündür. TIG kaynak elektrotları, AWS A5.12 ile EN 26848'de bileşimlerine göre sınıflandırılmış ve bunları birbirlerinden kolaylıkla ayırt edebilmek için de renk kodları kullanılmıştır. Tablo 4.1'de tungsten elektrotların kimyasal bileşimleri ve renk kodları gösterilmektedir [51].

Tablo 4.1. Erimeyen TIG kaynak elektrotları çeşitleri [51].

Kısa İşaretle	Malzeme Numarası	Oksit Katkı Miktarı Ağırlığının % si olarak	Tanıtm Rengi
W	2.6005	Hiç Yok	Yeşil
WT 10	2.6022	0.9 - 1.2 Toryumoksit	Sarı
WT 20	2.6026	1.9 - 2.1 Toryumoksit	Kırmızı
WT 30	2.6030	2.8 - 3.2 Toryumoksit	Açık
WT 40	2.6036	3.8 - 4.2 Toryumoksit	Mavi
WZ 4	2.6050	0.3 - 0.5 Zirkonyumoksit	Turuncu
WZ8	2.6062	0.7 - 0.9 Zirkonyumoksit	Kahve
WZ 10	2.6010	0.9 -1.2 Lantanyumoksit	Beyaz

4.3.3. Gazlar

TIG kaynağında en çok kullanılan koruyucu gazlar, argon ve helyum ile bunların karışımları olan gazlardır. Her ikisi de soygaz olup kaynak bölgesinde herhangi bir kimyasal ve metalürjik etkileri yoktur (bileşik teşkil etmezler). Koruyucu gazın görevi, tungsten elektrodu ve erimiş haldeki kaynak banyosunu havanın zararlı (oksitlenme, nem, vb.) etkilerine karşı korumaktır. Argon-hidrojen karışımı ile azot gazı da koruyucu gaz olarak kullanılır. Kullanılan koruyucu gazın saflığı da kaynak kalitesini etkileyen en önemli faktörlerdendir. Ancak orta ve düşük karbonlu çeliklerin, paslanmaz çeliklerin, bakır ve alüminyumun kaynağında gazın saflığında bir miktar (çok az) toleranslı davranabiliriz. Şüphesiz en iyi sonuçlar için safsızlık derecesinin %99,99 olması gerekmektedir. Koruyucu gaz; ya silindir biçimindeki tüplerden veya sabit ve taşınabilir tanklardan borularla dağıtılarak kullanım alanına getirilebilir. Seri işlerin yapıldığı büyük firmalarda dağıtım hattına bağlamak üzere tank sistemleri tercih edilmektedir. Gazın akış kontrolü bir regülatörle sağlanır. Gazın birim zaman da akma miktarı ise regülatörden ‘debi ölçer’ cihazından ayarlanır veya torç ucundan harici bir debi ölçer’den okunur. Genellikle debi ölçer cihazı ile regülatör beraber kullanılır. Farklı gazlar için farklı cihazlar kullanılır: Şöyle ki bu cihazlar koruyucu gazın cinsine göre kalibre edilmişlerdir. Koruyucu gazı tüpten veya tanktan torça kadar iletken hortumların plastik olmasına dikkat etmek gerekir. Zira helyum ve argon gazının lastik hortumdan difüzyon yoluyla sızması söz konusu olmaktadır. Gaz hortumları ya direkt olarak torca yada kaynak makinesinden veya koruyucu gaz cihazından geçirilerek torca bağlanır [52].

4.3.3.1. Argon

Argon, havadan ağır bir gazdır ve havanın sıvılaştırılması metoduyla elde edilir. Argon gazı, ya gaz olarak veya sıvılaştırılarak piyasaya sürülür, bu kullanılacak hacime bağlıdır. Argon gazı TIG kaynağında yoğunlukla kullanılan bir gazdır. Helyum gazına göre avantajları, sessiz ve düzgün bir ark sağlar, ince et kalınlıklı malzemelerin kaynağını kolaylaştıran bir özellik olan ark voltajı daha düşüktür, alüminyum ve magnezyum gibi oksit tabakası kaplı malzeme yüzeyleri kaynak öncesi temizleme özelliği iyidir, havadan ağır olması nedeniyle dikişi koruma (örtme)

kabiliyeti daha fazladır, ark tutuşması daha kolaydır, piyasada bol miktarda bulunur, maliyeti düşüktür, farklı metallerin kaynağında da kullanılabilir, zor kaynak pozisyonlarında dahi kaynak banyosunun kontrolü iyidir [53].

4.3.3.2. Helyum

Helyum havadan hafif bir gazdır. Tabii gazların ayrıştırılmasıyla elde edilir. Helyum piyasaya genellikle basınçlı olarak doldurulmuş tüpler içinde sürülür. Havadan hafif olması nedeniyle helyum gazı kaynak alanından çok hızlı bir şekilde ayrılır. Bu yüzden yüksek bir gaz akış hızı oranı gerekir. Helyumun diğer bir dezavantajı da daha az bulunması ve daha pahalı olmasıdır [49]. Argon gazına avantajları, ısı etki bölgesi daha küçüktür, kalın et kalınlıklı malzemelerin kaynağını kolaylaştıran bir özellik olan ark voltajı daha yüksektir, daha hızlı kaynak yapmaya elverişlidir, zor kaynak pozisyonlarında daha iyi koruma sağlar, daha dar bir alana daha fazla ısı girişi olduğundan derin bir nüfuziyet sağlar, kök koruma gazı olarak kullanıldığında kök pasosunu iyileştirici görevi yapar [53].

4.3.3.3. Argon-Helyum karışımı

Bu karışım daha ziyade otomatik TIG kaynağı için kullanılır. Burada Argon, daha iyi dikiş kontrolü için, Helyum ise daha derin bir nüfuziyet sağlanmasıyla amacıyla kullanılmaktadır. Çok değişik karışım oranlarında kullanılabilirler. Ancak en çok kullanılan karışım oranları %75 Helyum ile %25 Argon veya %80 Helyum ile %20 Argon şeklindedir [53].

4.3.3.4. Argon-Hidrojen karışımı

Bu karışım ise genellikle; paslanmaz çeliklerin, nikel alaşımlarının ve gözeneğin problem olduğu kaynaklarda kullanılabilir. Bu karışımın diğer bir özelliği de kaynak ısını artırarak dikiş kontrolünü kolaylaştırmaktır. Argon-Hidrojen karışımı, düşük alaşımlı çeliklerin kaynağında kesinlikle kullanılmamalıdır, ancak paslanmaz çeliklerin kaynağında kullanılabilir [53].

4.3.3.5. Azot

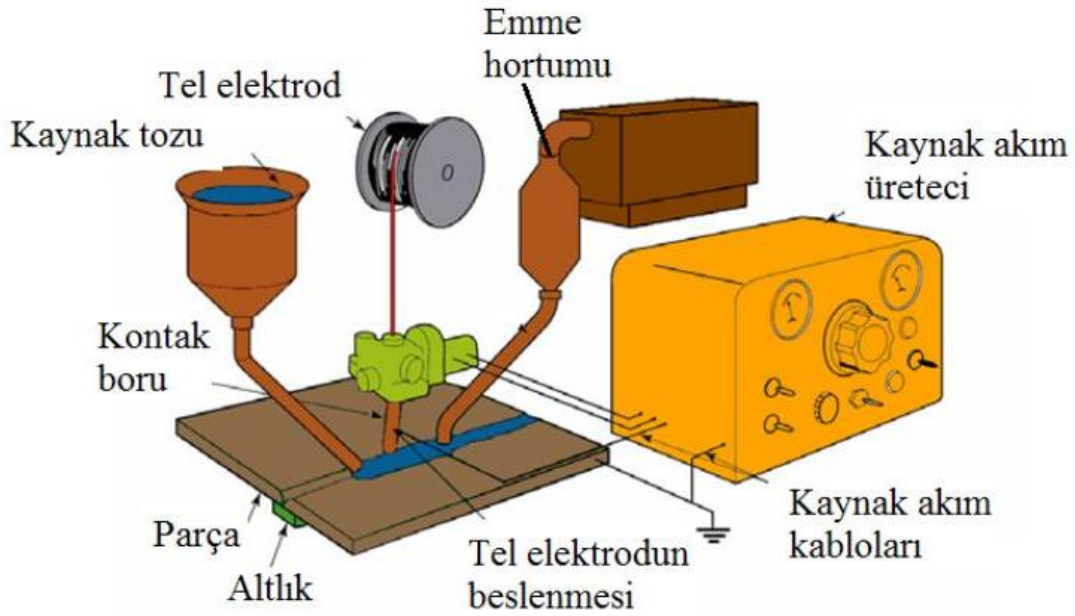
Nadir olarak kullanılan bir koruyucu gazdır. Ark voltajını ve amperini yükseltici etkisi vardır. Kaynak bölgesindeki ısı transferi, helyumun ve argonunkine nazaran daha yüksektir. Bu etkisinden dolayı da azot gazı bakır ve alaşımlarının kaynağında kullanılabilir. Ancak ark'ın kararlılığı azalır ve elektrot kısa sürede kirlenir. Çünkü azot gazı soy gaz değildir. Toryumlu tungsten elektrotlar bu problem azaltabilmektedir [49].

4.4. Tozaltı Kaynağı

Bir bobinden gelen kaynak teli, bir motorun tahrik ettiği makaralar arasından ve bir memeden gelir. Tel ile is parçası arasında oluşan ark, ayrı bir kanaldan gelen silikat ve toprak alkali metalleri içeren, tozlar tarafından atmosferin olumsuz etkilerinden korunur. Kaynak teli ve is parçası arasında oluşan arkın sıcaklığında tel ve esas metalin bir kısmı ergiterek istenilen birleşmeyi sağlar. Arkın sıcaklığında bir miktar toz da eriyerek cüruf haline geçerek kaynak banyosunu ve dikişi örter ve bu cüruf çok sıcak olan kaynak dikişini ve banyoyu atmosferin olumsuz etkilerinden koruduğu gibi, içerdiği deoksidasyon ve alaşım elementleri sayesinde kaynak banyosunun deoksidasyonunu ve alaşımlanmasını sağlar. Toz altı kaynak yöntemi şematik gösterimi Şekil 4.16'de verilmiştir [54].

Toz altı kaynağında kullanılan kaynak dolgu telleri yüksek kaliteli bir çeliktir. Özellikle kimyasal bileşimleri ve ihtiva ettikleri yüksek manganez miktarı ile normal tellerden ayırt edilebilirler. Özellikle bu teller bakır kaplı olarak üretilirler. Telin üzerindeki ince bakır tabakası meme içerisinden akım geçişini iyileştirir ve teli paslanmaya karşı da korumuş olur [54].

Toz altı kaynağında kullanılan kaynak dolgu telleri yüksek kaliteli bir çeliktir. Özellikle kimyasal bileşimleri ve ihtiva ettikleri yüksek manganez miktarı ile normal tellerden ayırt edilebilirler. Özellikle bu teller bakır kaplı olarak üretilirler. Telin üzerindeki ince bakır tabakası meme içerisinden akım geçişini iyileştirir ve teli paslanmaya karşı da korumuş olur [54].



Şekil 4.16. Tozaltı kaynağı şematik gösterimi [38].

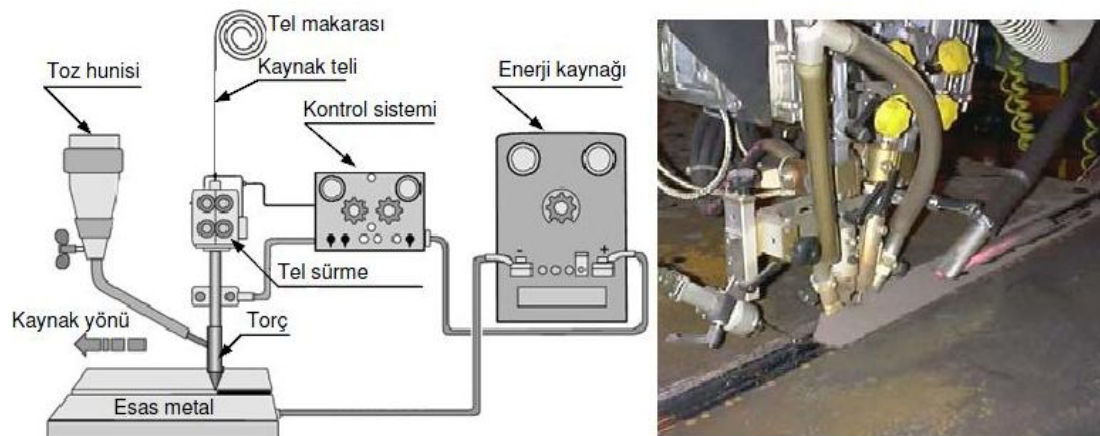
Toz altı tozları, kaynak işlemi sırasında arkın kararlılığını sağlar, kaynak esnasında erimiş banyoyu havanın zararlı etkilerinden korur, kaynak tozunun türüne göre alaşımlandırma yapılmasını sağlar, dikişin çabuk soğumasını önler ve uygun bir dikiş formu elde edilmesini sağlar, kaynakla beraber oluşan cüruf dikişinin kenarlarındaki çentik oluşumuna mani olur, istenilen kimyasal bileşimde, mekanik ve teknolojik özellikler sağlar ve uygun bir içyapı sağlar [55].

Kaynak arkı ve kaynak banyosunu çevreleyen kaynak tozları, şu görevleri yerine getirmelidir; Cüruf oluşturarak, kaynak arkını ve ergimiş metal banyosunu atmosferin zararlı etkilerinden korumak, gerektiğinde alaşım ve oksidasyon sağlayarak, istenen bileşim ve mekanik özelliklerde kaynak dikişlerinin elde edilmesine yardımcı olmak, ark kararlılığını sağlamak, is parçasından ısının dışarıya yayılmasını yavaşlatmak, ısı transfer hızını düşürmek [55].

Tozaltı kaynak yöntemi, yüksek ısıtma gücü ve derin nüfuziyeti sayesinde kullanılan akım gücüne göre kalın parçaları kaynak ağzı açmadan kaynatmaya uygundur. Yüksek ark stabilizasyonu sağlar, özel koruyucu donanımlara gerek duyulmaz. Isının çok azı esas metal tarafından absorbe edildiği için büyük enerji tasarrufu sağlar, sıçrama kaybı olmadığı ve yüksek akım yoğunluğunda

çalışılabilirliğinden dolayı elektrot ekonomisi sağlar. Emniyetli ve düzgün kaynak dikişi görüntüsü elde edilir ve boya yüzeyi açısından problem teşkil etmez, kaynak dikişinin kalitesine kaynakçının diğer yöntemlere göre etkisi daha azdır. Kaynak dikişinde elde edilen derin nüfuziyet sayesinde, yüksek dayanıma sahip bağlantıları gerçekleşmesi için gerekli kaynak metali miktarı azalmaktadır. Tozaltı kaynağında yüksek akımlarda hızlı dolgu kaynağı yapılabilir. Kaynak tellerinin ve tozlarının kaynak banyosunda meydana getirdiği temizleyici etkiler sayesinde hatasız, ana metalden çok daha iyi mekanik özelliklere sahip saf kaynak metalleri elde edilebilir [56].

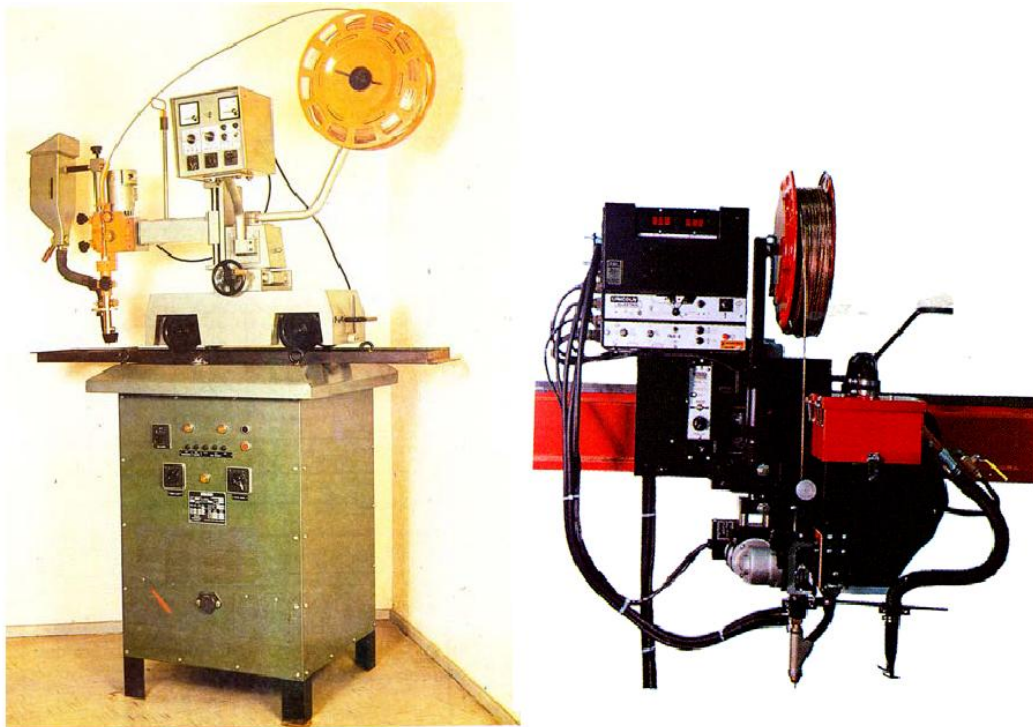
Yüksek kaynak metali yığılma hızı, yüksek kaynak hızı ve düşük deformasyon riski. tek bir kaynak teli ile ve otomatik kaynak sistemi kullanılarak yapılan uygulamalar, birden fazla telin aynı anda kullanılması ile daha ekonomik olarak gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte iki tel üzerinde oluşan toplam akım değeri, tek tel üzerinde yoğunlaşan akım değerinden daha yüksek olacaktır. Buna bağlı olarak metal yığılma hızı artacak böylece maliyet giderleri düşecektir. Yüksek kaynak hızları ile çalışılması ile kaynak edilen parçadaki deformasyon riski de en aza inecektir. Birden fazla telle gerçekleştirilen tandem kaynak proseslerinde tek bir kaynak dikişinin oluşması için her biri kendi özel akım kaynağından beslenen iki ya da üç kaynak kafası aynı anda kullanılır [57].



Şekil 4.17. Tozaltı kaynağı şematik gösterimi ve ark bölgesi [57].

4.4.1. Kaynak makinaları

Tozaltı kaynağında kullanılan kaynak makineleri doğru ve dalgalı akımda çalışabilen makinelerdir. Her iki yöntem ile kaynağın yapılması mümkündür. Doğru akım üreteçlerinde arkın başlaması özel yapılmış bir buton (anahtar) ile sağlanır. Buton devreye sokulduktan sonra yüksek kaynak gerilimi ya da frekansı oluşturularak kaynak arkını başlatır. Tozaltı kaynağı otomatik ya da yarı otomatik kaynak makineleri ile yapılır. Her iki uygulamada elektrot ve toz, tel ve toz verme sisteminden kaynak bölgesine otomatik olarak gönderilerek, kaynak yapılır. Kaynağın hızı çevre faktörleri göz önünde bulundurularak kaynakçı tarafından ayarlanır. Tozaltı kaynak makinalarında redresörlü, transformatörlü veya jenaratörlü güç üniteleri kullanılabilir. Tozaltı kaynak makinaları tertibatları, traktör tabir edilen, kaynak yapılacak iş parçası üzerinde kendiliğinden veya ray üzerinde kaynak yönünde hareketi sağlayan ekipmanla olduğu gibi kiriş ve sutuna bağlanmış hallerinde iş malzemesinin hareket ettirildiği düzeneklerdende oluşabilir [58]



Şekil 4.18. Tozaltı kaynak makinaları [58].

4.4.2. Tel/Toz kombinasyonları

Toz altı kaynak yöntemi ile ister birleştirme kaynağı yapılınsın, isterse sert dolgu kaynağı, kaynak dikişinden beklenen mekanik mukavemetler ve metalürjik yapı ile istenen sertlik sadece kaynak telini uygun seçmekle sağlanamaz. Çünkü, toz altı kaynağında kullanılan tellerin, imalat esnasında soğuk haddelerden problemsiz çekilebilmesi için düşük alaşımlı, yumuşak karbonlu çeliklerden olması zorunludur.

Kaynak dikişinden istenen mukavemetler, mekanik yapı ve sertlik derecesi, tel ve toz kombinasyonu seçiminin uygun yapılması ile sağlanır. Toz altı kaynağında kullanılan toz çeşitlerini aşağıdaki gibi sınıflandırmak mümkündür [59];

İmal usullerine göre,

- Ergitilmiş tozlar,
- Sinterlenmiş tozlar,
- Aglomere tozlar,

Kimyasal yapılarına göre,

- Asit tip tozlar,
- Nötr tip tozlar,
- Bazik tip tozlar,

Mineral yapılarına göre,

- Mangan silikat esaslı tozlar,
- Kalsiyum silikat esaslı tozlar,
- Alumina esaslı tozlar,
- Alumina-Bazik esaslı tozlar,
- CaO esaslı tozlar,

Zırh plakalarının toz altı kaynak yöntemiyle birleştirmelerinde kullanılan toz, imal usulüne göre aglomere, kimyasal yapısına göre bazık, mineral yapısına göre ise mangan silikat esaslıdır.

BÖLÜM 5. KAYNAKLARIN TAHRİBATLI VE TAHRİBATSIZ MUAYENELERİ

Kaynak prosedür testleri, Amerika kıtasında ASME Sec.IX standartı kapsamında ve Avrupa kıtasında ve ülkemizde EN 15614 standartı kapsamında hazırlanmaktadır. Bu standartlar kaynak sonrası yapılması gereken tahribatlı ve tahribatsız testleride belirtmektedir. Zırh çeliklerinin kaynak prosesinin uygunluğunun belirlenmesi için kullanılan tahribatlı ve tahribatsız muayeneler ve bu prosedürün uygulanacağı imalatın kalite kontrol ve kalite güvencesinin sağlanması için uygulanacak tahribatsız muayeneler iki ana başlık altında sıralanacaktır.

5.1. Tahribatsız Muayene

Tahribatsız muayene, NDT (Non-destructive examination), bir malzeme ya da sistemin bütünlüğüne zarar vermeden malzemenin kullanılabilirliğini etkileyen herhangi bir süreksizliğin olup olmadığını tespit etmek ya da diğer malzeme özelliklerini değerlendirmek için inceleme yapan tüm test yöntemlerini kapsamaktadır. Bu uygulamayı tanımlamak için NDE (Non-destructive examination), NDI (Non-destructive inspection) gibi başka terimler de kullanılmaktadır. Tahribatsız yöntemler malzemelerin boyut, görünüş veya alaşım içeriği, sertlik, tane boyutu gibi diğer karakteristik özelliklerini tayin etmede de kullanılır. Tahribatsız muayene teknolojisi yıllardan beri var olmasına rağmen bu teknolojinin hafife alınmış olması yıllardır süregelen uçak kazaları, inşaat yıkıntıları ve malzemelerin servis sürelerini erken doldurmalarına sebep olmuştur. Tahribatsız teknolojisi hata oluşumuna garanti veremese de bir hata oluşma olasılığını en aza indirmede önemli rol oynamaktadır. Yanlış dizayn ve malzemenin hatalı kullanımı gibi faktörler tahribatsız yöntemler uygun kullanılsa dahi hata oluşumuna sebep olabilirler [60].

Tahribatsız test yöntemleri mamul malzemeler üzerinde yaygın olarak uygulanmaktadır. Tahribatsız oluşu ve tahribatlı yöntemlere göre daha hızlı olması bu test yöntemlerinin hemen hemen her sahada yaygın olarak kullanılmalarını sağlamıştır. Tahribatsız Test Metotları iki ana temel üzerinde oturmaktadır. Bu iki temelden bir nüfuziyet diğeri ise algılama fonksiyonudur. Algılama fonksiyonu nüfuz ediciden aldığı bilgileri test operatörünün algılayacağı belirtiler haline getirmek, nüfuziyet fonksiyonu ise nüfuz edici elemanın test malzemesi içine giriciliği ve fiziksel süreksizliği algılama elemanına aktarmaktır. Radyografide algılayıcı radyografi filmi, nüfuz edici ise radyasyondur. Radyografi filmine kimyasal işlem uygulanmasından sonra belirtiler test operatörünün incelemesi için gözle algılanır belirtiler oluşturmaktadır. Tahribatsız muayene gelişmiş elektronik cihazlarla ve diğere özel ekipmanların kullanımıyla insan duyularının geliştirilmiş hali olarak düşünülebilir. Bu gelişmiş cihaz ve ekipmanların kullanımı insan duyularının hassaslığını arttırmaktadır. Ancak diğere bir yandan tahribatsız bir muayenenin yanlış uygulanması veya suistimal edilmesi kötü sonuçlar doğurabilir. Testin doğru uygulanmaması veya test sonuçlarının yanlış yorumlanması yıkıcı sonuçlara neden olabilir [60].

Tüm tahribatsız test metotlarının çeşitli sınırlamalarının olduğu bilinmelidir. Çoğu muayenede en az iki farklı yöntem ihtiyacı duyulur. Bunlardan bir tanesi parça içerisindeki koşullar için diğere ise parçanın yüzeyindeki koşullara daha duyarlıdır. Her metodun sınırlamaları kontrol öncesinde bilinir. Örneğin, süreksizlik kontrol için uygun olmayan bir şekilde yönelmiş olabilir. Ayrıca hatayı tespit etmek için gereken eşik değeri de her yöntem için bilinmesi gereken bir faktördür. Süreksizliğin tipi ve boyutunu açıklayan standartlara bağlı olarak kabul, red kararları verilir. Ancak uygulanan yöntem, malzemedeki kusurları açığı çıkarmada yetersizse, kullanılan standartlar anlamsızdır. İncelenecek parçanın özelliklerine ilişkin yeterli bilgi edinilmezse, kullanılacak tahribatsız muayene metodunun seçimi uygun olarak yapılamaz. Bunun yanında, muayeneyi gerçekleştirecek personelin teknik yetersizliği, gelişmiş cihazlarla ve tekniklerle yapılan kontrollerin yetersiz sonuçlar vermesine neden olabilir. Bu sebeple personel eğitimleri tahribatsız muayene teknolojisinde çok büyük önem arz eder [61].

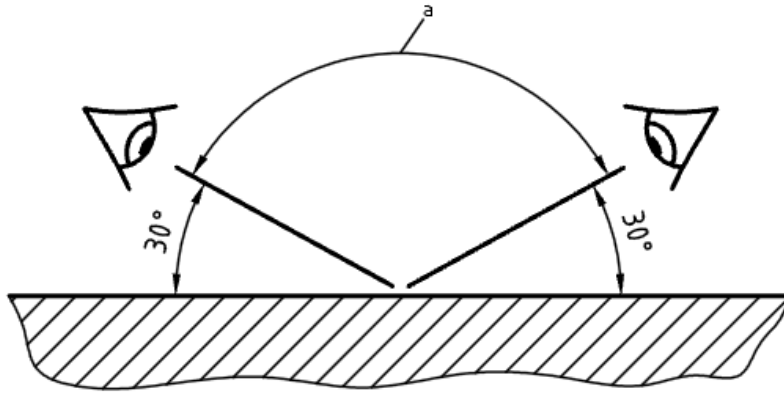
Yüzeysel tahribatsız muayeneler malzemelerin yüzeyinde ve yüzey altında, yüzeye yakın bulunan kusurların tespitinde kullanılırlar. Hacimsel tahribatsız muayeneler test bölgesinin tamamına nüfuz etmek suretiyle kusurların tespitinde kullanılırlar. EN 17635 standardı metalik malzemeler için uygulanabilecek 6 çeşit tahribatsız muayene ile ilgili genel kuralları içermektedir.

Malzemeler üretimleri esnasında çeşitli problemler nedeni ile istemeyen kusurlara sahip olabilir. Bunlar malzeme çalışırken problemlere neden olur. Bu hataların kritikliğinin ve kabul, red kararının verilmesi, hatanın büyüklüğü veya şiddetinin standartta belirtilen sınır değeri aşıp aşmamasına göre değerlendirilir. Kullanılan standartta hata olarak nitelendiği sınırı aşan kusurlar hatadır. Bu sınırı aşmayan malzeme kusurları, süreksizlik olarak adlandırılır [60].

5.1.1. Görsel muayene

Gözle muayene, kaynak yüzeyinin dikkatlice incelenmesidir ve kaynak dikişi muayenesinde en önemli yeri tutar. Bu metot mümkün olan durumlarda kaynağın her iki tarafında da uygulanmalıdır. Bu metodun uygulanışı esas olarak kaynak gözetmeninin işi olup, bir kaynağın kalitesi hakkında ilk izlenimi verir. Kural olarak, kaynak tamamlandıktan sonra yapılmalıdır. Her ne kadar hacimsel hatalar görülmesi de gözle muayene sonuçlarına göre bir kaynağın red edilmesi söz konusu olabilir. Kaynak yüzeyinin iyi olması da her zaman kaynak kalitesinin yüksek olduğu anlamına gelmez. Yine de dış hatta belirtilerinin erken tespiti, imalat prosesinde hızlı bir geri bildirim sağlar. Böylece takip eden işlem öncesi gerekli tamir yaptırılarak, tüm işlem süreçlerinin teslim aşamasında farkedilecek yüzeysel hata ile tekrarlanmasının önüne geçilmiş olur. Çelik malzemeler için genellikle EN 5817, kullanılır. Kabul kriterleri, kaynak yapılan işletmelerde istihdam edilmiş sertifikalı gözle muayene uzmanlarınca uygulanmalıdır. Gözle muayenede en önemli husus iyi aydınlatmadır. Bir atölyedeki ışık şartları yeterli olmaz ise ek aydınlatma ekipmanları ile ilave aydınlatma gerekir. EN 17637 standardı en az 350 lüks aydınlatma şiddeti talep eder ancak aydınlatma şiddetinin 500 ila 1000 lüks arasında olması tavsiye edilmektedir. Özellikle küçük kaynak hacimlerinde görmeyi iyileştirmek için görüntüyü en az 5 kat büyüten bir büyüteç veya bir stereo mikroskop kullanılmalıdır.

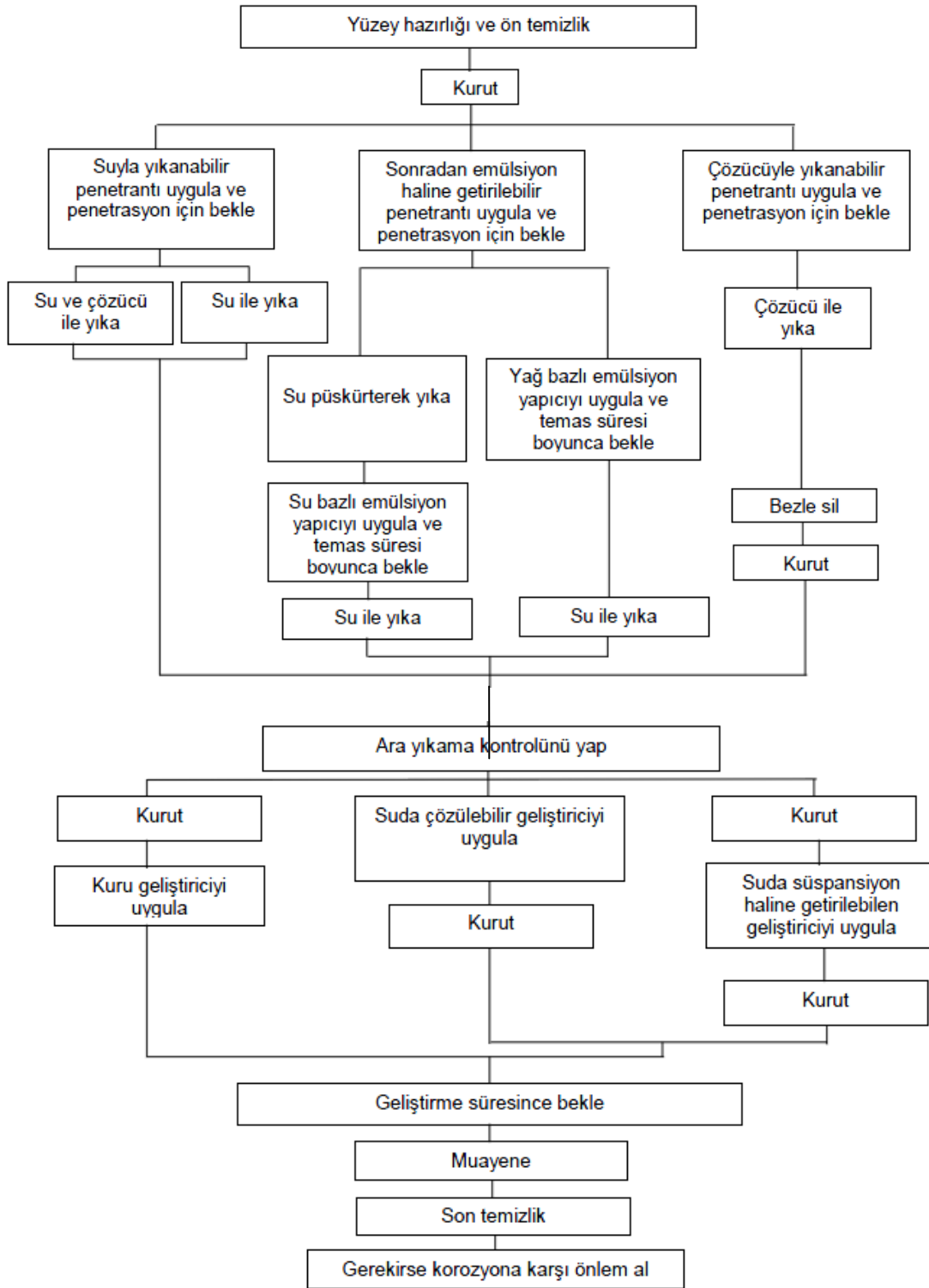
Ulaşılamayan bölgeler için ayna veya endoskop kullanımı önerilir. Tespit edilebilen yüzeysel hatalar, konumlama hataları, malzeme yüzey hataları, kaynak boyut hataları, yanlış kaynak parametrelerinden kaynaklanan kaynak yüzey hataları veya kaynakçı teknik yetersizliğinden kaynaklanan kaynak hataları olarak sınıflandırılabilir. Bu tespit işlemi, kusurun cinsine ve büyüklüğüne göre büyüteç ve aydınlatma ekipmanlarının yanı sıra, çeşitli kaynak kumpasları ve ölçüm cihazları yardımıyla yapılabilir. Gözle muayenede, yüzey mutlaka kuru, yağsız, metalik parlaklıkta ve mükemmel bir şekilde ulaşılabilir olmalı ve muayene yüzeyine en az 30° bakma açısı ile bakılmalıdır. Kayıt için fotoğraflama, video kaydı veya replika alma tekniği kullanılabilir [61, 62].



Şekil 5.1. Görsel muayenede bakış açısı (a) aralığı [62].

5.1.2. Penetrant muayene

Penetrant Muayenesi yüzeye açık kusurların tespiti için diğer tahribatsız muayene metotlarına kıyasla ucuz ve basit bir yöntemdir. Penetrant muayenesinin prensibi, penetrant maddesinin kullanılan geliştirici üzerinde oluşturduğu güçlü kontrast etkisi ile çok küçük hataların büyümüş ve kolay ayırt edilebilir görüntüler oluşturmasına dayanır. Ancak belirtinin büyüklüğü ile şekli hatanın gerçek büyüklüğü ve şekli ile orantılı olmak durumunda değildir [63].



Şekil 5.2. Penetrant muayene işlem sırası akış diyagramı [64].

Yukarıdaki Şekil 5.2.'deki EN 3452-1 standartında belirtildiği gibi muayenenin yapılışı ön temizlik ile başlar. Yüzey pas, yağ, çapak ve testi engelliyebilecek her türlü kirden arındırılır. Olası hata oluşma zamanına göre yüzeyde ki kaplama vb. temizlenmeli ve

ön temizlik metodunun etkinliği referans bloklarla ispatlanmalıdır. Temizlik aşamasından sonra girşim yapacak penetrant sıvısı yüzeye uygulanır. Penetrant malzemesi kullanılacak geliştirici ile güçlü bir görsel kontrast oluşturmalıdır. Penetrasyon sıvısının yüzeyde bekleme süresi yüzey ve ortam sıcaklığına göre 5 ve 60 dakika aralığında olabilir. Bekleme süresi sonrasında muayene yüzeyinde ki penetrantın fazlası uygulanan penetrant testinin tipine göre belirlenen ara temizlik maddesi ile temizlenir. Genellikle ara temizleyici olarak pürüzlü kaynak yüzeylerin de su, düzgün yüzeylerde ise çözücü ile nemlendirilmiş havsız kağıt veya bez kullanılır.Çözücünün yüzeye doğrudan püskürtülmesine izin verilmez. Daha sonra yüzey silinerek, hava üfleyerek veya en fazla 50 °C'ye dikkatlice ısıtarak kurutulur. Ara temizliği yapılmış yüzey, geliştirme özellikte ve penetrantla görsel kontrast oluşturan bir emici madde ile kaplanır. Bu madde genellikle bir sıvı içinde süspansiyon halinde sprey olarak uygulanır. Penetrantın süreksizlikler içinde kalan kısmı yüzeydeki geliştirici tarafından emilerek yüzeye çıkar ve süreksizlikten daha büyük boyutlarda bir belirti oluşturur. Geliştirme süresi sonunda muayene yüzeyi en düşük 350 lüks ışık şiddetinde incelenir. Değerlendirme belirlenen değerlendirme standartı kabul kriterlerine göre yapılır. Değerlendirmede belirtinin şekli ve büyüklüğü değil belirtinin geliştirme süresi sonundaki büyüklüğü esas alınır [64].



Şekil 5.3. Penetrant muayene işlem sırası [65].

Tablo 5.1' de görüldüğü gibi çok çeşitli kombinasyonlarda amaca uygun penetrant muayeneleri uygulanabilir. Bunlardan biride ultraviyole (UV) ışık ile yapılan penetrant muayenesidir. Gözle görülemeyen ultraviyole ışınının, ışık spektrumu içinde gözle görülebilir hale çevrilmesiyle ilave bir kontrast sağlanır. Bunun sonucunda flor ışımaya yapan yerler çevreye göre daha aydınlık olarak parıldar ve

gerçekte olduğundan daha büyük görünür. Penetrant muayenesi sonucunun başarılı olması pek çok etkene bağlıdır.

Tablo 5.1. Penetrant muayene tipleri [64].

Penetrant		Penetrant Ara Temizleyici		Geliştirici	
Tip	Tanımlama	Metot	Tanımlama	Şekil	Tanımlama
I	Flor ışıl penetrant	A	Su	a	Kuru toz
II	Renkli kontrast penetrant	B	Lipofilik emülsiyon yapıcı	b	Suda çözünebilir
			Yağ esaslı emülsiyon yapıcı	c	Suyla süspansiyon haline getirilebilir.
			Akarsuda durulama	d	Çözücü esaslı (susuz-yaş)
III	Çift amaçlı (flor ışık renkli kontrast penetrant)	C	Çözücü (sıvı)	e	Özel uygulamalar için su veya çözücü esaslı (sıyrlabilir geliştirici vb.)
		D	Hipofilik emülsiyon yapıcı 1. Uygun ön durulama (su) 2. Emülsiyon yapıcı (suyla seyreltilmiş) 3. Son durulama (su)		
		E	Su ve çözücü		

Bu nedenle penetrant muayenesi yüksek duyarlıklı olsa bile muayene sistemlerinin ve bunların kullanım şekillerinin uygun olması şarttır. Bu tür penetrant sistemlerinde, kesitten geçen ultraviyole ışık enerjisi en az 10 W/m² olduğu sistemlerde, görünür ışık şiddeti en fazla 20 lüks olmalıdır [64].

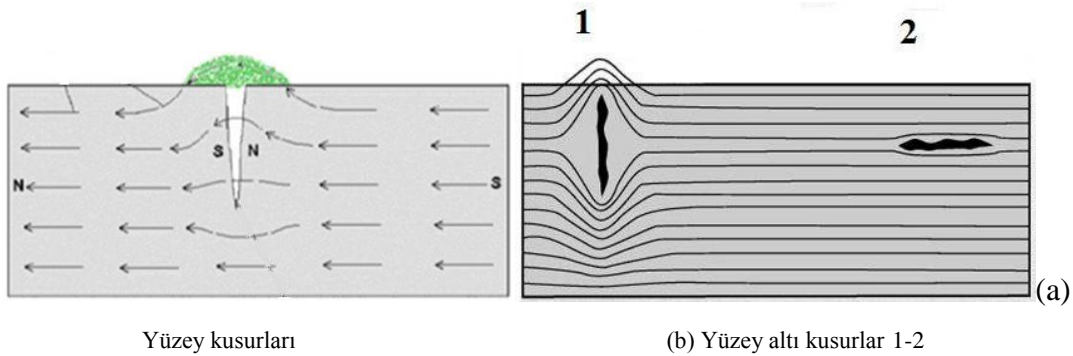


Şekil 5.4. Flor ışık penetrant yöntemi [65].

5.1.3. Manyetik parçacık muayenesi

Manyetik parçacık kontrolü, mıknatıslanabilen malzemelerde, malzemenin yüzeyinde ve yüzeyin hemen altındaki yerlerdeki kusurları tespit etmeden kullanılan tahribatsız test metotlarından biridir. Manyetik parçacık testinin esasını kontrol edilecek

olan malzemelerin mıknatıslanabilme (ferromanyetik) özelliğine sahip olması teşkil eder. Kontrol edilecek olan malzemeye cihaz tarafından akım verilerek malzemenin mıknatıslanması sağlanır. Mıknatıslanması sonucunda rasgele dizilmiş moleküller, düzgün sıralı bir şekilde geçer ve bir mıknatıs görevi yapar. Moleküller bu şekilde dizildiğinde demir parçaları bir kuzey ve bir güney kutbuna sahip olacaktır. Her molekülün kuvvetlerinin toplamına eşit bir toplam kuvvet ortaya çıkar. Mıknatısın etrafında kuvvet çizgilerinin belirli bir yönü vardır. Bunlar kuzeyden (North) çıkar güneyden (South) girer ve mıknatısın içinde güneyden kuzeye doğru yollarına devam ederler. Manyetik kuvvet çizgileri devamlı ve daima kapalı bir çevrim oluşturur. Kuvvet çizgileri birbirini kesmez ve diğer kuvvet çizgileri ile çakışmaz. Bir mıknatısın etrafında kuvvet çizgilerinin etkilerinin görüldüğü alana manyetik alan denir. Yukarıdaki çizgilerin hepsi, mıknatısın etrafındaki manyetik alanı oluşturur. Manyetik alan mıknatısın uçlarında daha yoğundur. Malzemeye akım verilip, malzemede manyetik bir alan oluşturduktan sonra eğer malzemede kusur var ise kusurların uçlarında N-S kutupları oluşur (Şekil 5.5-a) [60].



Şekil 5.5. Yüzey ve yüzey altı kusurlarda manyetik akı geçiş çizgileri [65].

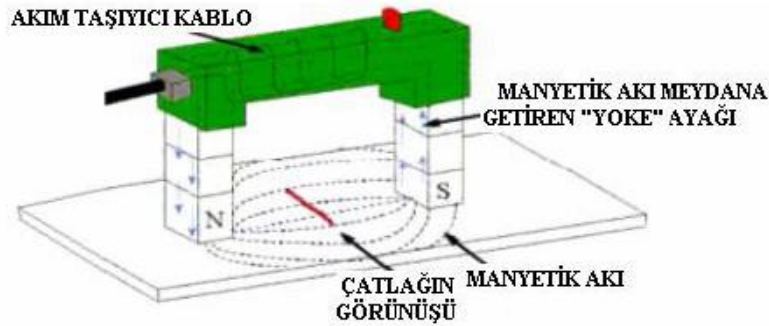
Manyetik akı kaçaklarının genliği yüzeye kadar ulaşıyorsa malzeme yüzeyine uygulanan demir tozlarını kusurun üzere toplar (Şekil 5.5-b-1). Eğer süreksizlik yok ise veya manyetik akı genliği yüzeye ulaşmıyacak şekilde kusur derinde, yönlenmiş veya tesbit edilemeyecek kadar küçükse, demir tozları malzeme yüzeyinde toplanmadan malzeme yüzeyini terk edecektir (Şekil 5.5-b-2) [65].

Penetrant muayenedekine benzer olarak florışık manyetik parçacık muayenesinde de, demir tozları taşıyıcı bir sıvı içinde süspansiyon halde bulunur ve bu sıvı içinde

flöresan maddede bulunur. Bu sıvı mıknatıslandırılmış malzeme üzerine dökülerek veya sıkılarak, kusurların üzerinde demir tozlarının toplanmasına neden olur [66].

Manyetik parçacık kontrolünün prensibi, test parçası içinde manyetik alan meydana getirmeye dayanır. Bundan dolayı kontrol edilecek olan malzemelerin iyi mıknatıslanması gerekir. Ferromagnetik malzemeler en iyi mıknatıslanabilen malzemelerdir. Demir, çeliklerin birçoğu, nikel, kobalt ve bunların alaşımlarının çoğu ferromagnetik malzemelerdir. Manyetik olmayan malzemeler, bakır ve alaşımları, alüminyum ve alaşımları, magnezyum, titan ve bazı paslanmaz çelikler [66].

Bu metotla muayene olunacak parçanın önce manyetikleştirilmesi ve muayene bitince de bu manyetikliğin kaldırılması gerekir. Test parçasının manyetizasyonu için çeşitli teknikler vardır. Kalıcı mıknatıslarla veya elektromıknatıslarla manyetizasyon yönteminde, test yüzeyi ile temas, "U" şeklindeki bir boyunduruk (Yoke) ile sağlanır.



Şekil 5.6. Boyunduruk tipi manyetikleme cihazı [65].

Temas yüzeyleri, parçanın bu kısımlarında mevcut manyetik alanın kuzey ve güney kutuplarını oluşturur. Yukarıdaki Şekil 5.6'da görüldüğü gibi manyetik akı çizgileri iki kutbu birleştiren doğruya paraleldir ve bu doğruya dik olan çatlakların algılanması maksimumdur [66].

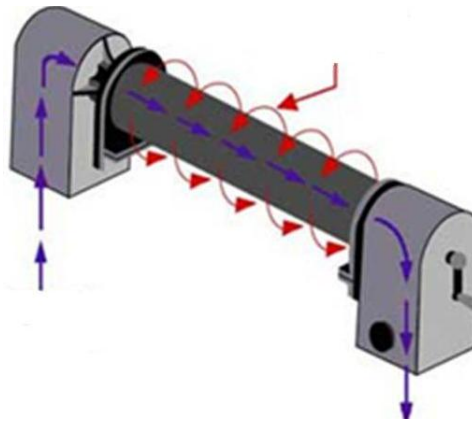
Bobin ile manyetizasyon tipinde ise test edilecek parça, enerji verilmiş bobinin iç yüzeyine yakın olacak şekilde yerleştirilir. Çünkü bobin etrafında dönen kuvvet

çizgileri yönünden dolayı, burada manyetik alan maksimumdur. Parça eksenine boyunca manyetize edilir ve bu yüzden en büyük hassasiyet bizzat eksene dik olan çatlaklar için geçerlidir.



Şekil 5.7. Bobin tipi manyetikleme cihazı [66].

Üç iletken ile manyetizasyon tipi muayenede manyetizasyon ortası delik parçalar için uygundur. Parça içine bir iletken yerleştirilir. Enerji verildiğinde etrafındaki boşlukta dairesel manyetik alan meydana gelir. Deliksiz düzlemsel parçalarda ise manyetik akı akım geçirilen test numunesi üzerinde doğrudan oluşturulur EN 9934 standardı manyetik parçacık muayenesinin genel standardı olup içeriğinde manyetikleme tipine göre yapılabilecek manyetik parçacık testleri çeşitlerinde bahsetmektedir.



Şekil 5.8. Doğrudan manyetikleme tezgahı [65].

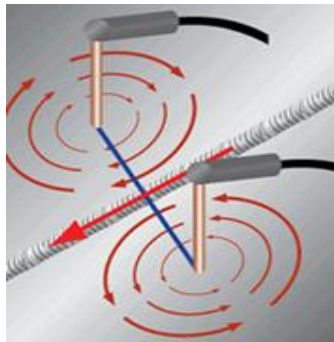
Bağlantılı bobinle manyetizasyon tipi muayenede manyetizasyon, parçasının etrafına bir kablo sarılarak yapılır. Maksimum hassasiyet, test parçasının eksenine boyunca olan çatlaklar için elde edilir.



Şekil 5.9. Bağlantılı bobinle manyetik muayene [65].

Temas kafaları ile manyetizasyonda farklı kesitlere sahip içi boş parçalarda manyetizasyon her bir kesitin gerçek çapına göre hesaplanmalıdır. Dairesel olmayan kesitlerde maksimum köşegen göz önüne alınır. Çapta çok fazla değişim var ise geniş kısmı test etmek için gereken akım dar kısım için çok fazla gelebilir ve arada ısı oluşur. Bu ısı, ısıl işlem görmüş parçaların mekanik özelliklerini etkileyebilir. Bu durumda, büyük kısımları manyetize ederken malzemenin uç kısımlarına akım verilmemelidir. Bakır ayırıcılarla manyetizasyon yapılır.

Prodlarda manyetizasyonda bir güç kaynağına bağlı portatif elektrotlarla parçanın bu elektrotlar arasında kalan kısmından elektrik akımı bölgesel bir manyetizasyon meydana getirilir. Manyetizasyon, malzemedeki akım geçirilerek temas alanlarında meydana gelen zıt dairesel alanların birleşiminden ve iki prod arasında meydana gelen dairesel manyetizasyondan oluşur.



Şekil 5.10. Prodlarla manyetik muayene [65].

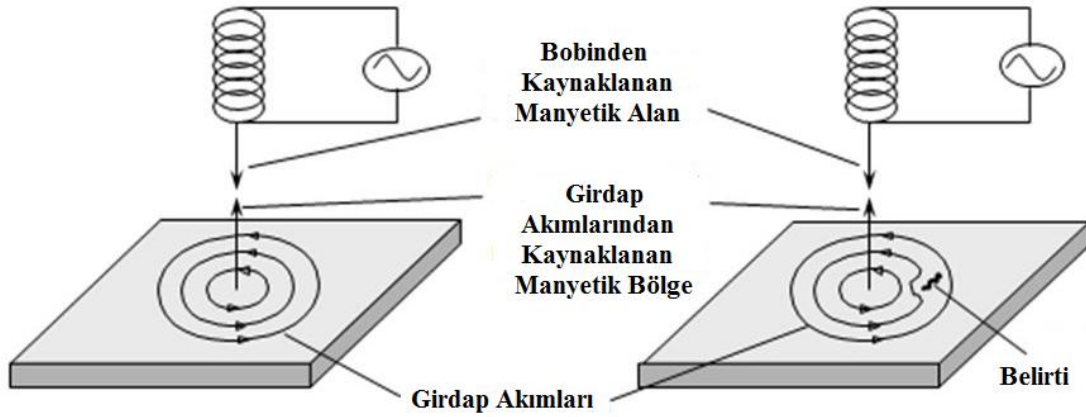
Manyetizasyon, temas noktaları arasındaki merkezi doğruya maksimumdur ve bunlardan geçen çizgilere dik olacak şekilde yönlendirilir. Burada, maksimum hassasiyetin temas noktalarını birleştiren doğruya paralel olan çatlaklar için olacağı anlaşılır. Manyetizasyon durumları, prodlar arasındaki uzaklığa ve manyetizasyon akımına bağlıdır. Prodlar arasındaki uzaklık 80-120 mm arasında değişir. Daha büyük mesafeler kullanılmaz. Çünkü o zaman temas noktaları arasındaki merkezi doğrunun ortasında akı yoğunluğu aşırı derecede düşebilir ve bu da muayene hassasiyetini düşürecektir. 80mm'den düşük uzaklıklardan sakınmak gerekir. Aksi takdirde temas noktalarından dairesel yollar oluşur ve bunlar küçük belirtileri engelleyebilir. Manyetizasyon akım miktarı, prodlar arasındaki uzaklığa (Amp/mm) ve parça kalınlığına göre yapılır [66]. Malzeme mıknatıslandıktan ve malzeme üzerine kuru demir tozu veya süspansiyon halindeki demir tozları yüzeye uygulandıktan sonra kontrol işlemine geçilir. Malzeme kontrol edildiğinde, çatlak var ise siyah olarak toplanmış demir tozları belirtisi keskin bir şekilde görülecektir [60].

Ferromagnetik malzemeler, manyetik parçacık testinin odak noktasıdır ve bu malzemeler retentivite (mıknatıslığı tutma yöntemi) ile karakterize edilir. Bu yüzden test edilen parçada belli bir artık alan kalır ve bunun derecesi malzemenin kimyasal kompozisyonuna ve yapısına bağlıdır. Manyetik parçacık testi standardı olan EN 1290 artık manyetikliğin düşük olduğunu ve özel durumlarda bu manyetize edilmiş malzemenin mıknatıslığının giderilmesinden bahseder. Bazı durumlarda, artık manyetik alan parçanın özel fonksiyonunu bozabilir veya daha sonraki fabrikasyon işlemlerinden güçlükler çıkabilir. Örneğin, demagnetizasyon aşağıdaki durumlarda gereklidir. Parça daha sonra işlenirken talaşlar parçanın yüzeyine veya alete yapışabilir. Daha sonra elektrik ark kaynağı yapılırken kuvvetli artık alanlar, ark alevini gitmesi gereken yerlerden başka yere saptırabilir. Hareketli yerlerde güçlükler çıkabilir. Örneğin, bilyeli yataklarda ve çark dişlilerinde metal parçalarını tutar. Tanecikleri tutarlar ve bu da daha sonra kaplama veya boya yapılacaksa bu işlemleri etkiler. Demanyetizasyon işlemi yapıldıktan sonra malzemenin yapısı eski şekline geri döner. Askeri araçlarda kullanılacak zırh çeliklerinde, daha önceden yapılmış manyetikleme işleminden kaynaklanan kalıntı manyetik alan, aracın elektronik sistemlerini etkileyebilir. Bu bakımdanda demanyetizasyon işlemi büyük önem taşır [60, 66].

5.1.4. Girdap akımları ile muayene

Girdap akımları yöntemi elektrik iletkenliği olan malzemelerde yüzey ve yüzeye yakın süreksizlikleri bulmakta kullanılır. Girdap akımları yöntemi temel olarak iletken malzemelerin incelenmesinin esası olan elektromagnetikliğe dayanmaktadır. Girdap akımları, elektromagnetik indüksiyon denilen işlem doğrultusunda elde edilir. İletken bir malzemeye alternatif akım uygulanırsa bu malzeme içinde manyetik alan oluşur. Oluşan bu manyetik alana bir iletken yaklaştırılırsa iletken malzeme içerisinde dairesel yolla akan girdap akımları indüklenir. İletken içerisinde oluşan girdap akımları telde oluşan birincil manyetik alanı karşılayan kendi ikincil manyetik alanlarını oluşturur. Malzeme içerisinde var olan kusurlar, geometrik ve metalurjik değişimler, elektriksel iletkenlik ve geçirgenlik değişimleri dolayısıyla indüklenen girdap akımlarının yolu ve gücü değişir. Bu değişim ikincil manyetik alanın dolayısıyla birincil manyetik alanın gücünü değiştirir. Malzeme iletken olduğunda bu gerilim malzemenin içerisinde bir akım indükler. Bu akım girdap akımı olarak bilinir. Girdap akımı kendini oluşturan akımın özelliklerini taşır fakat doğrultusu terstir. Malzeme yüzeyindeki girdap akımı doğrudan doğruya kendini oluşturan akımın frekansı ile ilgilidir. Bu açıdan, girdap akımının etkilediği derinlik bu frekansın artmasıyla azalacaktır. Girdap akımlarındaki bu yerel değişimler bir ekran ya da sayaçla tespit edilir. Böylece malzemenin elektriksel, manyetik ve geometrik süreksizlikleri indirekt olarak ölçülmüş olur [67, 68].

Girdap akımları şayet çatlak, boşluk, yüzey hasarları veya hatalı kaynak birleştirmeleri gibi malzeme kusurları ile karşılaşılırsa, hareketi olması gerektiği doğrultuda yayınamaz. Bunun sonucunda manyetik alanda bir değişiklik oluşur ve buna bağlı olarak test bobini de reaksiyon verir. Bu reaksiyon eski tip cihazlarda hesaplamalarla yeni tip dijital cihazlarda ise doğrudan cihaz üzerinden okunarak, hata tespit edilir. Tespit edilen bu hatanın yüzeydeki konumu, hatanın şekli ve büyüklüğü, test bobininin reaksiyonu ile saptanır ve yorumlanır. Hatanın yorumlanması ve istenen eşik değeri ile olan karşılaştırması, uygulamada istenen yapının kritikliğine bağlıdır.

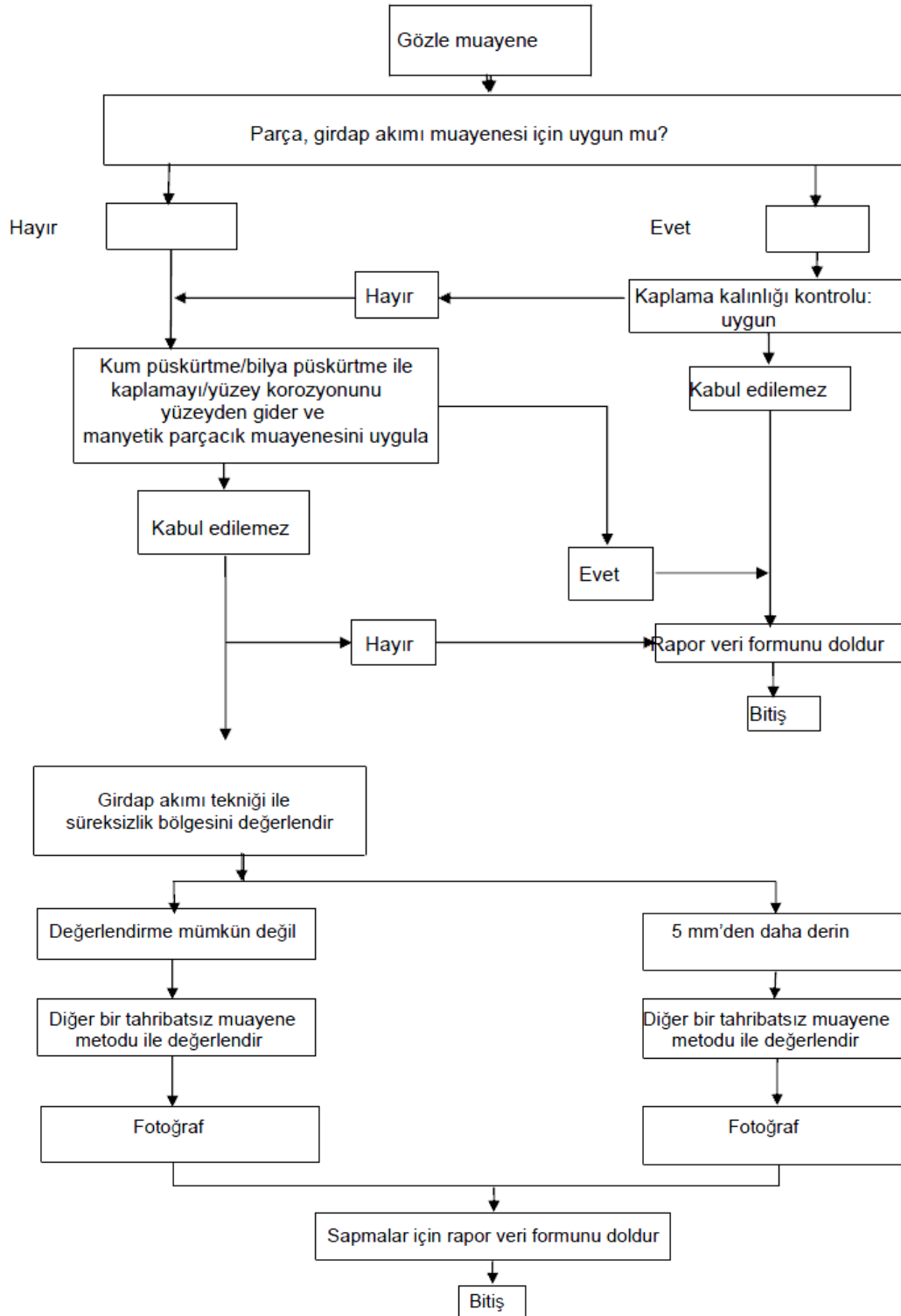


Şekil 5.11. Girdap akımlarıyla muayene çalışma prensibi [65].

Tahribatsız muayene olarak girdap akımlarının temel avantajlarından biri çeşitli kontrol ve ölçümlerin gerçekleştirilebilmesidir. Genel olarak, girdap akımları yüzey ve bazı yüzey altı kusurlarda, malzeme içindeki kusurlarda, iletkenlik ölçümünde, ince metal kalınlık ölçümünde, iletken malzeme üzerindeki yalıtkan ve yalıtkan olmayan kaplama kalınlıkları ölçümünde, korozyonun ve buna bağlı metal kaybı tespitinde kullanılırlar [69].

Girdap akım muayenesini etkileyen faktörler, parçanın boyut ve şeklindeki değişimler, çatlak, korozyon oyukları, gözeneklilik, boşluk ve inklüzyonlar, alaşım veya kimyasındaki değişimler, ısıtım işlem veya mekanik işlemler, test parçası ve prob arasındaki boşluk etkisi (lift-off), manyetik geçirgenlikteki değişimlerdir [69].

Muayene parametresi değişkenlerinden frekans, girdap akımları kontrolünde, kontrolü yapılacak malzemenin kalınlığına göre seçilir. Malzemeye indüklenen girdap akımları şiddeti çalışma frekansının artmasıyla artar. şiddetli girdap akımlarının yaratacağı ikincil manyetik alan da fazla olacağından bu alan bobinin yarattığı birinci manyetik alanın etkisini azaltır ve girdap akımları parça yüzeyinde toplanır. Bu nedenle yüzey süreksizliklerinin tespitinde yüksek frekans kullanımı tercih edilir. Yüksek frekansın avantajlarının yanısıra uygulamaya yönelik olarak bazı sakıncaları da olabilir, bu nedenle frekans ayarı hassas bir şekilde yapılmalı ve en optimum frekans seçimi yapılmalıdır [68].



Şekil 5.12. Girdap akımı muayenesi işlem sırası akış diyagramı [70].

Bobin tarafından oluşturulan birincil manyetik alan ile test parçasının yarattığı manyetik alan arasında bir etkileşim vardır. Muayene parametre değişkenlerinden manyetik temasın muayeneye etkisi ile bobinden olan mesafesi arttıkça manyetik

alanın gücü azalır. Bunun sonucunda parça yüzeyindeki girdap akımlarının yoğunluğu düşer [68].



Şekil 5.13. Girdap akımlarıyla muayene [65].

Sıcaklık gerek malzemelerin iletkenliği gerekse manyetik özellikleri üzerine etki eden bir parametredir. Sıcaklığın düşmesi ise iletkenliği artırır. Sıcaklığın manyetik özellikler üzerine etkisi vardır. Malzemelerin sıcaklıkları curie noktasını aşarsa manyetiklik yok olur. Sıcaklığın etkisiyle parçanın yüzeyindeki girdap akımlarının şiddeti düşer ve nüfuziyet derinliği artar. Girdap akımları kontrolü yapılan test malzemesi içinde her yerde eşit olarak yayılamaz. İletkenlik, manyetik geçirgenlik ve frekans, nüfuziyet derinliğini etkileyen faktörlerdir. Standart nüfuziyet derinliği test parçasının yüzeyindeki girdap akım yoğunluğunun parça içerisinde % 37'sine düştüğü derinliktir [71].

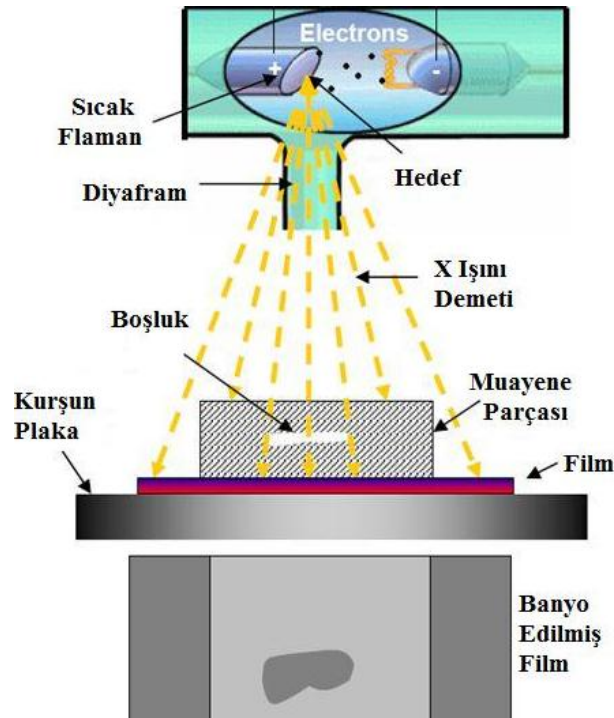
Frekansla iletkenlik arasında da bir ilişki vardır. Yüksek iletkenlikli malzemede güçlü girdap akımları yüzeyde oluşur. Şiddetli girdap akımlarının yaratacağı ikincil manyetik alan da fazla olacağından bu alan bobinin yarattığı birinci manyetik alanın etkisini azaltır ve girdap akımları parça yüzeyinde toplanır. Bunun sonucu olarak yüzey altındaki derinliğin artmasıyla birincil alanın gücü hızla azalır. İletkenlik; alaşımlama, tavlama, yaşlandırma gibi ısıl işlemlerden etkilenir. Yabancı element ilavesi alaşımın iletkenliğini saf haline göre düşürecektir. Isıl işlemler de elde edilen sertlik değerine göre malzemenin iletkenliğini değiştirecektir [68].

Endüstride, girdap akımları genel uygulama standardı olan EN 1711 kullanılmaktadır. Bu çalışma sırasında kullanılacak diğer kaynak tahribatsız muayene yöntemleri

yüzeysel ve hacimsel kaynak muayenelerini yeterli oranda sağlayacağından dolayı bu muayene yöntemi kullanılmayacaktır.

5.1.5. Radyografik muayene

Radyografik muayene, X veya Gama ışınlarının kullanılarak, incelenecek malzemelerin hacimsel görüntüsünün elde edilmesidir. X ve gama ışınları yüksek enerjili elektromanyetik dalgalardır. Bu dalgaların doğrusal ilerleme, zayıflama, iyonlaştırma ve nüfuz edebilme özelliklerinden yararlanılarak radyografik muayenelerde kullanılması sağlanmaktadır [72].



Şekil 5.14. X ışınları ile radyografik muayene [65].

X ışını yönteminde kullanılan X ışınları, elektronik bir cihaz tarafından; Gama ışınları ise, radyoaktif doğal elementler tarafından üretilir. Bu ışınlar, malzemenin kalınlığına ve yoğunluğuna bağlı olarak kısmen absorbe edilir. Malzeme tarafından absorbe edilmeyen enerji, film üzerine etkir. Film üzerinde görülen koyu renkli bölgeler o bölgeye çok fazla enerjinin gittiğini gösterir. Malzeme içindeki gözenek, çatlak, boşluk gibi kusurlar o noktada malzeme kalınlığının azalmasına neden olduklarından film üzerinde koyu şekiller halinde

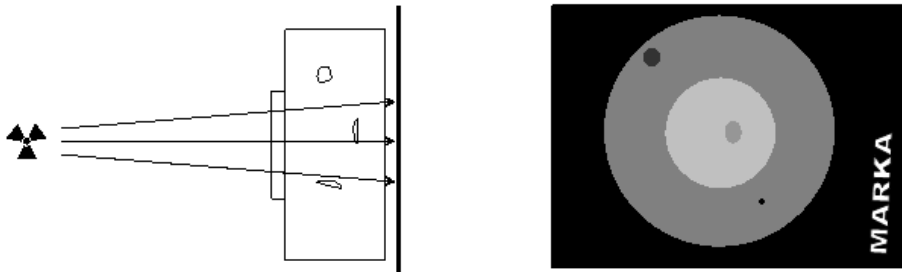
görülür. Buna karşın malzeme içinde tungsten gibi ağır metal kalıntısının bulunması durumunda ise bu kısım film üzerinde beyaz olarak görülür [73].

X ışınlarının üretimi doğanın genel bir yasasına dayanır ve X ışını tüpleriyle elde edilir. Hareket eden elektrik yüklü parçacıklar, örneğin elektronlar, yollarında bulunan bir engele çarptıklarında kinetik enerjilerini yitirirler ve bu enerjinin küçük bir kısmı X ışınlarına dönüşür ve oluşum alanından ışınarak uzaklaşır. Elektronların çarpma anında ivme kaybetmeleriyle, kinetik enerjinin diğer kısmı ısı enerjisine dönüşür. X ışınlarının üreteçlerinin verimi çok düşüktür; öyle ki toplam enerjilerinin % 1'ini X ışınına, % 99'u ise ısı enerjisine dönüşür [74, 75].



Şekil 5.15. X ışını tüpü [65].

Doğal radyoaktif bir maddede, atomik kararsızlığa neden olan fazla enerji ışınım enerjisi olarak açığa çıkar. Bozunum türüne göre, alfa (α), beta (β) ya da gama (γ) ışınları veya bunların karışımları gözlenir. Radyografik muayene için genellikle gama ışınları kullanılır. alfa ya da beta parçacıkları ile görüntüleme ve nötron radyografisi ise endüstriyel radyografi açısından çok önemlidir [75].



Şekil 5.16. Radyografi çalışma prensibi şeması [65].

Gama ışınımı doğal olarak izotop halinde bulunan maddelerden de yayınır. Nötronlarla bombardıman edilen atom çekirdeğinde yapay olarak oluşturulmuş aşırı

enerji, doğal haliyle ışınım yaymayan bir maddeyi ışınım yayar hale getirebilir. Bu işlem, bir nükleer reaktörde olduğu gibi, kararlı haldeki bir atom çekirdeğinin nötron bombardımanına tutularak kararsız hale getirilmesiyle yapılabilir. Bu işlem sonunda atomun çekirdeğindeki nötron ve protonların toplamı olan, atom kütle numarası değişir. Bu tip aşırı yüklü ve kararsız çekirdekler radyoizotop olarak adlandırılır. Ir 192, Co 60, Tm-170, Yb-169 ve Se-75 piyasada en çok kullanılan radyoizotoplardır [72].



Şekil 5.17. Kurşun zırlı doğal radyoaktif element saklama tüpü [65].

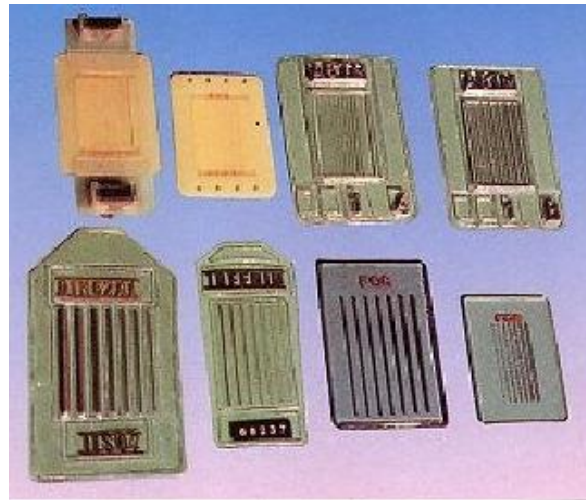
EN 1435 kaynaklı birleştirmelerin radyografik muayenesi standarttır. Standartta malzeme kalınlıklarına göre radyasyon kaynağı seçimi Tablo 5.2'deki gibidir.

Tablo 5.2. Radyasyon kaynaklarının test malzemesi kalınlığına göre nüfuziyet tablosu [76].

Radyasyon Kaynağı	Nüfuz Edilen Kalınlık (mm)	
	Muayene Sınıfı A	Muayene Sınıfı B
Tm 170	5'ten küçük	5'ten küçük
Yb 169	1 - 15	2 - 12
Se 75	10 - 40	14 - 40
Ir 192	20 - 100	20 - 90
Co 60	40 - 200	60 - 150
1 MeV'den 4 MeV'a kadar X ışını teçhizatı	30 - 200	50 - 180
4 MeV'den 12 MeV'a kadar X ışını teçhizatı	50'den büyük	80'den büyük
12 MeV' den yüksek enerjili X ışını teçhizatı	80'den büyük	100'den büyük

Radyografiye etki eden film faktörleri filmin hızı ve emülsiyonunda bulunan gümüş bromür kristallerinin boyutlarıdır. Kristal boyutları filmin kontrast ve tanımına etki

eder. Diğer faktörler sabit kaldığında filmin hızı, kristallerin boyutlarıyla ters orantılıdır. Bilinen radyasyon poz süresinde filmin hızının bilinmesi ile film yoğunluğu tayin edilir. Hızlı film daha az poz süresi ister. Fakat uygulamalarda hızlı filmler tercih edilmez. Çünkü bu tür filmlerde tanımlama tam sağlanamaz. Yavaş ve orta hızlı filmler tercih edilir. Film tabanı olarak saydam asetat veya polyester kullanılır. Filmlerin iki tarafı da elektromanyetik radyasyona ve ışığa duyarlı emülsiyonla kaplanmıştır. Filmin iki tarafının da emülsiyon tabakası ile kaplı olması poz süresini kısaltır ve daha ekonomik sürede film çekmemize olanak sağlar. Bu duyarlı emülsiyon tabakası genellikle gümüş halojenür kristalleri içeren sodyum bromid den meydana gelir. Filmin en dış tabakası ise emülsiyon tabakasını, çizilme ve hasarlara karşı koruyan jelatin tabakasıdır. Film üzerindeki gizli görüntü gümüş bromür kristallerinin elektromanyetik radyasyon tarafından iyonize edilmesi sonucu oluşur. Ancak bu görüntü geliştirilmeden görünür hale gelmez. Filmin banyosu esnasında gelişen gümüş bromür tanecikleri siyah metalik gümüş taneciklerine indirgenerek gizli görüntü görünür hale gelir [75].



Şekil 5.18. Görüntü kalite belirteçleri [65].

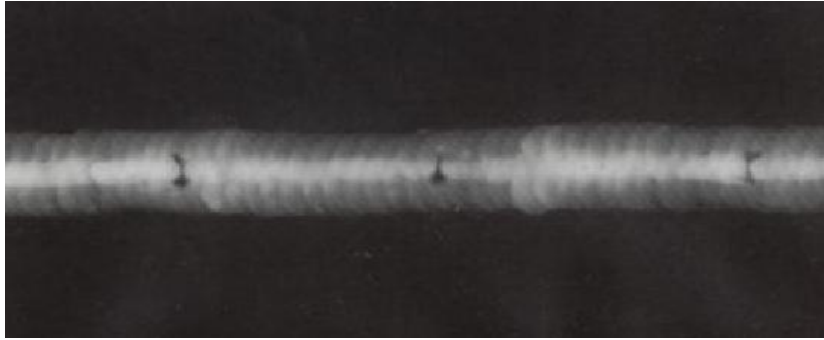
Diğer tahribatsız muayene metotlarının aksine muayene sonucu çıktısı olan filmde muayenenin uygunluğunu anlamak mümkündür. Bunun için mümkün olan durumlarda ışınım kaynağı tarafına kaynak dikişi üzerinde, mümkün olmayan durumlarda da film tarafına görüntü belirteçleri konur. Görüntü kalite belirteçleri filmde görüntülenir. Delikli tip ve basamaklı görüntü kalite belirteçleride mevcutsada en çok kullanılan tip, telli tip kalite belirteçleridir. Telli tip görüntü kalite belirteçleri

bir plastik folyo içine yerleştirilmiş farklı kalınlıklarda tellerden oluşur (Şekil 5.18). Ayrıca tel malzemesi, muayene parçasının malzemesiyle aynı olmak zorundadır çünkü filmde ki yoğunluk farkı kalınlık farkından kaynaklanmaktadır. Böylece bir filmde görülebilen tel numarasıda ışınlanan kalınlığa göre EN 1435 standartından belirlenir. Filmde beklenen veya beklenenden daha ince bir tel görülüyorsa film yeterli kaliteyi sağlamış olur. Bununla birlikte çekimin kalitesinin yeterliliğinin kontrol edilmesine yarayan optik yoğunluk denen birde kontrast ölçümü vardır. Tablo 5.3'te sağlanması istenen kontrast değerleri verilmiştir [75].

Tablo 5.3. Radyografik film çıktılarının kontrast değerleri [76].

Muayene Sınıfı	Optik Yoğunluk
A	$2,0 \leq$
B	$2,3 \leq$

Kaynak içinde metalik olmayan kalıntılar kalmış bir kaynaklı numuneye ait radyografik muayene çıktısı olan örnek film Şekil 5.19'da gösterilmiştir. Açık renkle görülen kaynak hacmi içinde daha açık renk olan kısım kaynak kökünü göstermektedir. Kapak ve kök pasolarının uygun olduğu görülen kaynaklı numune yüzeysel tahribatsız muayene metodlarından başarıyla geçecektir. Ancak kaynak hacmi içinde oluşmuş olan belirtiler radyografik muayenede saptanmıştır.



Şekil 5.19. Radyografik film çıktısı [65].

Gelişmiş teknoloji ile birlikte, radyografik muayenenin en büyük sıkıntılarından olan film geliştirme süreçleride iyileşmiştir. Otomatik film banyolar, özellikle boru muayenelerinde tam zamanlı radyografi sistemleri, dijital radyografi gibi teknolojik sistemler radyografide büyük kolaylıklar sağlamışlardır. Ancak yaydığı radyasyonun canlılarda yaratabileceği sağlık sorunları nedeniyle radyografik muayenenin en

büyük sıkıntısı olan iş güvenliği hala bu muayenenin kullanımını kısıtlamaktadır. Gerekli iş güvenliğinin sağlandığı uygulamalarda tehlikesi düşük olan bu yöntem genelde canlılardan uzak bölgelerde, kurşun plakalar ile kapatılmış bölmelerde veya mesai saatleri dışında insansızlaştırılan bölgelerde uygulanmaktadır [75].

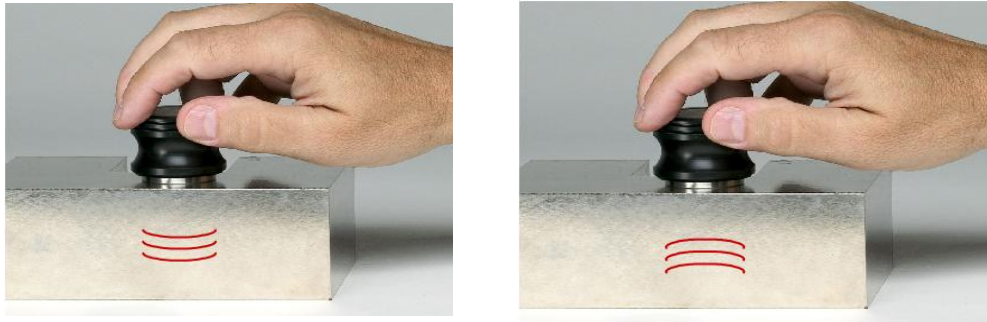
5.1.6. Ultrasonik muayene

Fiziksel olarak ses, elastik ortamların mekanik titreşimlerinden meydana gelir. Bu titreşimler, elastik bir maddenin moleküllerinin veya atomlarının sükunet durumlarının dışarıdan bir kuvvetin etkisiyle bozulmasından oluşur. Sesin işitilebilmesi veya özel dedektörler tarafından algılanabilmesi frekansına ve şiddetine bağlıdır. Ses dalgalarının yayılması, ortamın molekülleri veya atomları arasındaki bağ kuvvetlerine elastik sınırlar dahilinde etki edilmesiyle olur. Dalgaların uyguladığı basınç, yayıldığı ortamın atomlarını titreşim haline uyarır. Titreşimler elastik olarak atomdan atoma iletilir. Ultrasonik, katı, sıvı ve gaz ortamlarda yayılabilir, vakumda yayılamaz. Atomlar veya moleküller arası bağ kuvvetleri katılarda çok yüksek olup, sıvılarda zayıf ve gazlarda yok denecek kadar azdır. Sıvılarda ve gazlarda parçacıklar hareketlidir. Buna rağmen, sıkıştırmaya ve genişletmeye karşı bir direnç gösterirler ve elastik dalgaları iletebilirler. Titreşimler, ortamda dalga olarak yayılırlar. Ultrasonik ses dalgaları bu prensibler doğrultusunda katı içinde rahatlıkla yayılırlar böylece ultrasonik muayene mümkün olur [77].



Şekil 5.20. Ultrasonik cihazı ve problemleri [80].

Ultrasonik dalgalar, piezoelektrik, magnetostriktif, elektrotinamik, mekanik, termik, elektrostatik, optik vs. fiziksel olaylarla üretilebilir. Piezoelektrik olay, ultrasonik dalga üretiminde en yaygın olarak kullanılan tekniktir. Ses, piezoelektrik özelliğe sahip kristallerle üretilir ve test malzemesi ortamına bir kontak maddesi vasıtasıyla malzemeye iletilir. Tahribatsız muayenede kullanılan ultrasonik yani ses ötesi dalgaların frens aralığı 0.5 ile 10 MHz aralığındadır. Kaynak kontrollerinde genellikle 2 ve 4 MHz'lik probalar kullanılmaktadır. Bu probalarda bulunan piezoelektrik materyal elektrik ile tetiklenerek doğrudan piezoelektrik etkisiyle istenen frekans ve genlikte ses dalgası meydana getirir. Malzeme içerisine bir kontak sıvısı sayesinde iletilen bu ses dalgaları, malzeme içerisinde bir engelle veya arka duvara çarparsa geriye dönen ses yankıları oluşturur (Şekil 5.21). Oluşan bu yankılardan proba ulaşabilenleri, yine piezoelektrik malzeme, bu sefer ters piezoelektrik etkiyle elektrik akımına dönüştürülür ve bu sayede malzeme içerisindeki kusurlar belirlenmiş olur [77].

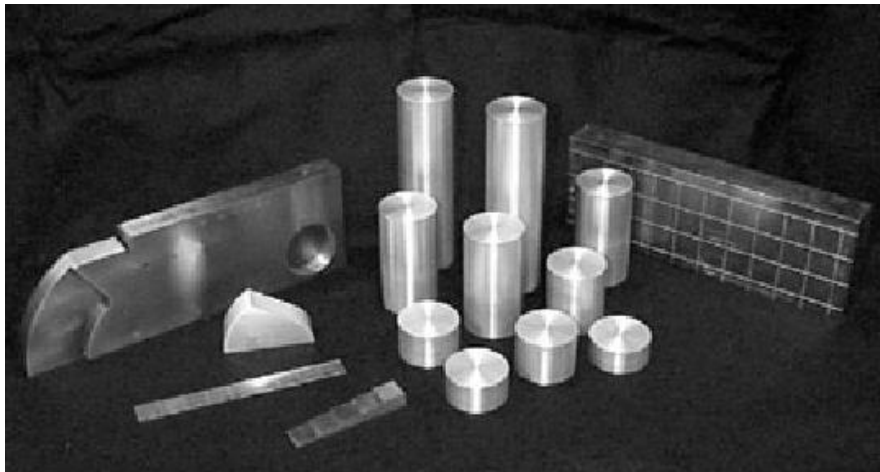


Şekil 5.21. Ultrasonik ses dalgalarının malzeme içerisinde yankı hareketi [65].

Malzeme içerisinde oluşturulan dalgalar malzemenin akustik empedans sabitine göre değişiklikler gösterir. Snell kanununda ses dalgalarının malzeme içerisindeki özel ses hızları ve dalga açıları arasındaki bağıntıyı verir. Bu açıyı veya yüzeye dik oluşturulan dalgalarda muayenenin türüne göre belirlenir ve gerekli sistem kalibrasyonları buna göre yapılır. Bu dalgalarda boyuna dalgalar, parça yüzeyine dik olarak girerler. Parça içerisinde en hızlı iletilen dalga tipidir. Dalganın hızı malzemenin elastik modülü ve yoğunluğuna bağlıdır ve her malzeme için sabittir. Parça kalınlığı ölçmede, korozyon inceleme tayininde kullanılabildiği gibi özellikle laminasyon hatası gibi malzeme yüzeyine paralel her tip süreksizlik tespitinde de kullanılır. Enine dalgalar parça içerisine enlemesine dalga gönderirken test parçası

yüzeyle prob arasına plastik takoz yerleştirilir. Enlemesine dalgalar boyuna dalgalara oranla malzeme içerisinde daha yavaş ilerler. Ayrıca bu dalgalar boyuna dalgalara göre daha kısadır. Yüze dalgaları parça içerisine girmeden yüze yollarına devam eder. Bu dalgaları oluşturmak için pabuç (wedge) kullanılır. Yüze hatalarını tespit etmekte bu dalgardan faydalanılır [68, 74, 77].

Ultrasonik muayenede tabi tutulacak malzemelerin yüze, prob hareketini engellemeyecek oranda düzgün olmalıdır. Ultrasonik muayenenin yapılacağı malzemenin yapısına ve şekline göre frekans ve problar seçilmelidir. Bu seçim muayenenin sıhhatli yapılabilmesi için çok önemlidir. Ayrıca ultrasonik cihaza yapılacak muayene kalibrasyonunda doğru malzeme ve tipe ait kalibrasyon bloğu seçimi ve hatasız kalibrasyon işlem sıralamasıda büyük önem arz eder.



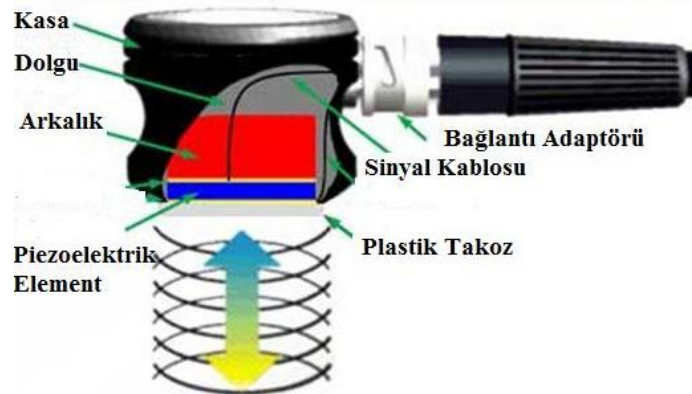
Şekil 5.22. Ultrasonik muayenede kalibrasyon blokları [60].

Ultrasonik testinde uygulanan teknikler üç parametre göz önüne alınarak sınıflandırılabilir. Bunlar; ölçülmek istenen fiziksel büyüklük (genlik, faz, zaman), ses üretim şekli (sürekli, darbe) ve süreksizliklerin etki şekli (yansıtıcı, gölgeleyici, ses üretici) olarak yapılabilir. Test tekniği bu parametreler göz önüne alınarak seçilir. Muayene için seçilecek dalga boyu test malzemesinin tane boyundan daha büyük olmalıdır, aksi takdirde ses dalgaları malzeme içinde iletilemez [60].



Şekil 5.23. Ultrasonik muayenenin yapılışı [65].

Darbe yankı yöntemi, prob tarafından yayılan ses dalgalarının malzeme içindeki bir belirtiye çarpıp, geri yansiyarak tekrar proba yankı yapması esasına dayanır. Bu yöntemde ölçülen büyüklükler ses basıncı genliği ve pulsun girdap dönüşü süresi (time of flight) olup, belirti bir yansıtıcı olarak etki eder. Alınan yankının şiddeti üretilen sesin enerjisine, verici kristalin karakteristiğine, yansıtıcının boyutuna, hatanın geometrik yapısına, hatanın konumuna, alıcı kristalin karakteristiğine, yansıma ve kontak kayıplarına, absorpsiyon ve saçılmadan dolayı zayıflamalara, hatanın önünde bulunabilecek hataların ses dalgalarını gölgelemesine, bağlıdır [78].

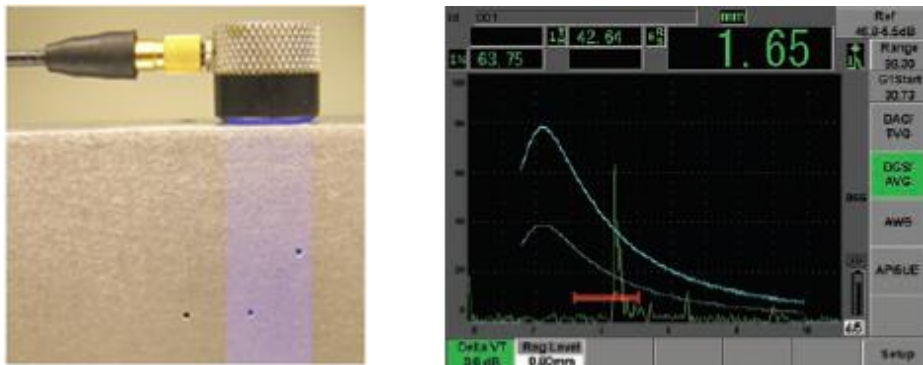


Şekil 5.24. Ultrasonik probun iç yapısı ve piezoelektrik element [65].

Doğrudan temas ile muayene probun test malzemesi yüzeyine, bir ara sıvısı vasıtası ile doğrudan temas ettirildiği muayene şeklidir. Tek kristalli prob kullanıldığında, prob hem alıcı hem de verici olarak çalışır. Çift kristalli problarda ise alıcı ve verici ayrıdır. Daldırma yoluyla muayene tekniğinde prob ve test parçası bir su tankının

içerisine daldırılır. Bu amaç için özel su sızdırmaz problar kullanılır. Bu yöntem karmaşık şekilli malzemelerin muayenesinde avantajlıdır. Diğer bir yöntem olan dik prob kullanılarak yapılan tandem muayene tekniğinde, problardan birisi tarafından gönderilen ultrasonik dalgalar önce hatadan ve sonra arka yüzeyden yansdıktan sonra alıcı proba ulaşır. Problar birbirine özel bir düzenekle bağlanmış olup, aralarındaki mesafe ses açlarına bağlıdır. Bu yöntem rayların muayenelerinde standarta bağlanmıştır. Çift prob tekniği problar malzemenin karşılıklı yüzeylerine yerleştirilmek suretiyle de uygulanabilir. Burada hata yansıtıcı olarak etki eder [60].

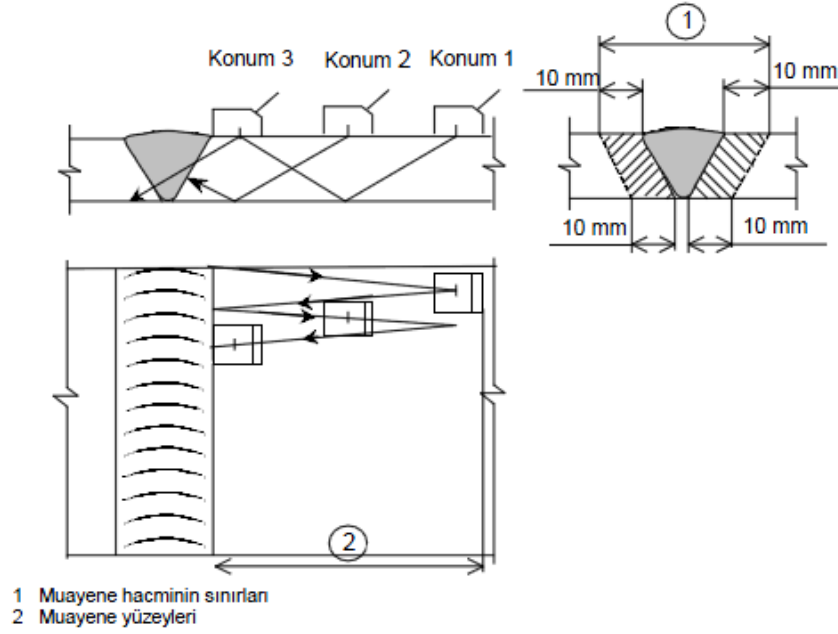
Ultrasonik muayenede çıktı elektronik muayene skalasıdır. Gönderilen ses dalgası, test malzemesinde bir yansıtıcıya rastlarsa, muayene kalibrasyonunun sağladığı geri bildirim göre skalanın öngörülen noktasında pik olarak görünür (Şekil 5.25). Pik genliğide yine yapılan kalibrasyonda seçilen ses siddetiyle orantılıdır. Elde edilen çıktı sinyali, malzeme içindeki belirtinin konum bilgilerini sağlasada, belirtinin türünün ne olduğunu kesin olarak söyleyemez. Yapılacak ek ultrasonik muayenelerle yada diğer tahribatsız muayene yöntemleriyle malzemedeki kusurun yapısı anlaşılabilir. Ultrasonik yöntem diğer tahribatsız muayene yöntemlerine göre anlaşılması ve hata yorumlaması en karmaşık yöntemdir. Bundan dolayı muayeneyi gerçekleştirecek personelin, iyi eğitilmiş, tecrübeli teknik, ve yorum gücünün yüksek olması gerekir [60].



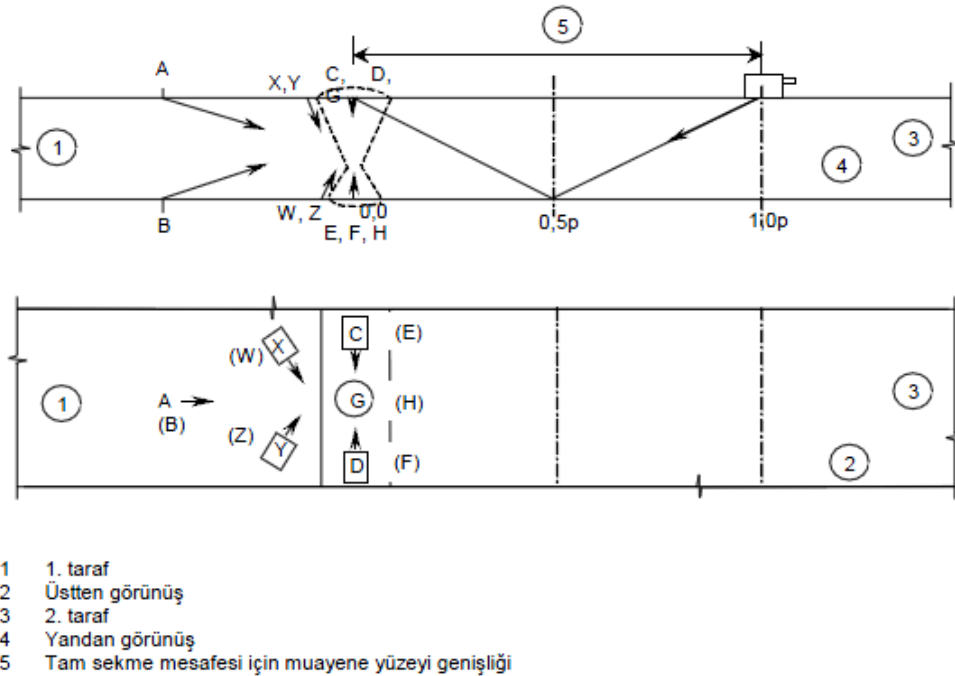
Şekil 5.25. Ultrasonik muayenede ekran çıktısı [60].

EN 1714 kaynaklı dikişlerin ultrasonik muayene standardı, kaynak dikişlerinin ultrasonik yöntemle muayenelerinin genel kurallarını kapsamaktadır. Standart malzeme kalınlıklarına göre yapılması gereken muayene türlerini, seçilmesi gereken

prob açılarını ve muayene frekanslarını belirtmektedir. Ayrıca tarama planlarını (Şekil 5.26) ve problemlerin temas edeceği yüzeyleride (Şekil 5.27) belirtir [79].



Şekil 5.26. Ultrasonik muayene tarama planı [79].



Bütün muayeneler, mümkünse, her iki yüzeyden de yapılmalıdır.

Şekil 5.27. Prob temas yüzeyleri [79].

5.1.6.1. Faz kontrollü ultrasonik muayene

Konvansiyonel ultrasonik muayene, teknik itibariyle istismara açık kullanım imkanı içermektedir. Operatöre bağımlılık çok yüksektir ve muayene çıktısı olarak saklanabilir bir veri sağlanamamaktadır. Konvansiyonel radyografik ve ultrasonik yöntemlerin ortak sıkıntıları gelişmiş teknolojilerle giderilmeye çalışılmıştır. Ultrasonik muayene yönteminde operatöre bağımlılık ve muayene çıktısı bazında çok büyük gelişmeler ortaya çıkmıştır. Bu bağlamda geliştirilen faz kontrollü ultrasonik muayene, operatöre bağımlılığı azaltmış ve arşivlenebilen ve ihtiyaç olduğunda tekrar tekrar incelenebilen data çıktıları sunmuştur. Özellikle yurdumuzda sektörde çok yeni olan bu yöntem sadece bir kaç büyük işletme veya kontrol kuruluşu tarafından uygulanabilmektedir. Orta düzeyde ilk yatırım maliyeti ve muayene planı kalibrasyonları için teknik yeterlilikler gerektiren bu yöntem, bu yönüyle muayene yönteminin yaygınlaşmasını yavaşlatmaktadır.

Faz kontrolü deyimini oluşturan ses dalgalarında zamansal gecikme ile oluşturulan dalga fazlarından ötürü meydana çıkmıştır. Konvansiyonel ultrasonik yönteminin aksine bu yöntemde kullanılan problarda birden çok piezoelektrik element kullanılmıştır (Şekil 5.28).



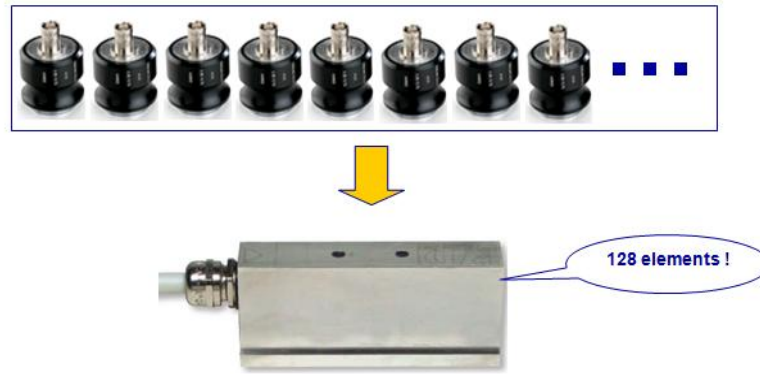
(a) Konvansiyonel ultrasonik



(b) Faz kontrollü ultrasonik

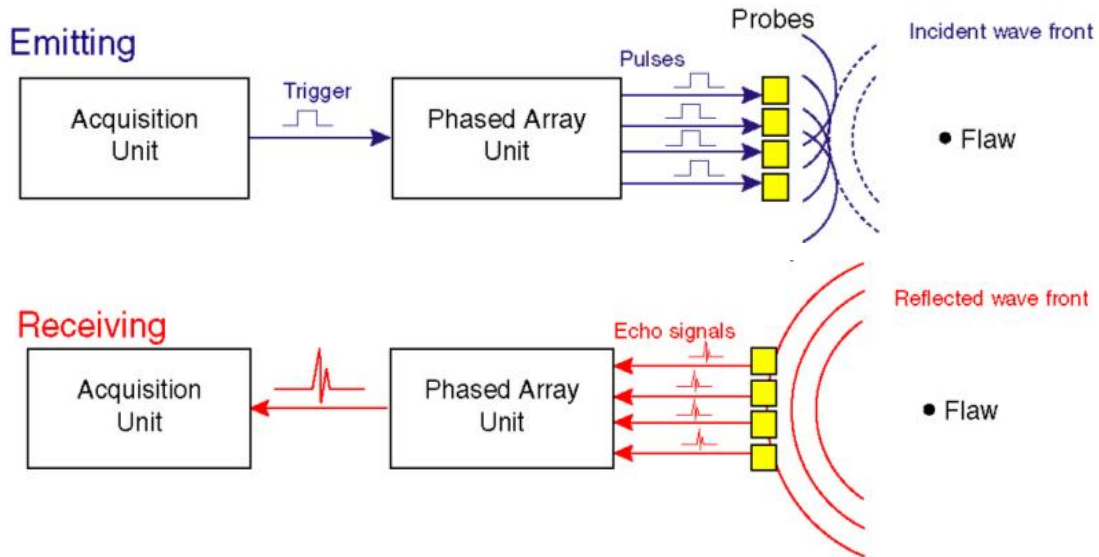
Şekil 5.28. Piezo elektrik kristaller [80].

Bu yönüyle düşünüldüğünde 128 elementli bir faz kontrollü ultrasonik probunun içinde 128 adet konvansiyonel ultrasonik prob bulunmaktadır denebilir [80].



Şekil 5.29. Faz kontrollü ultrasonik probu [80].

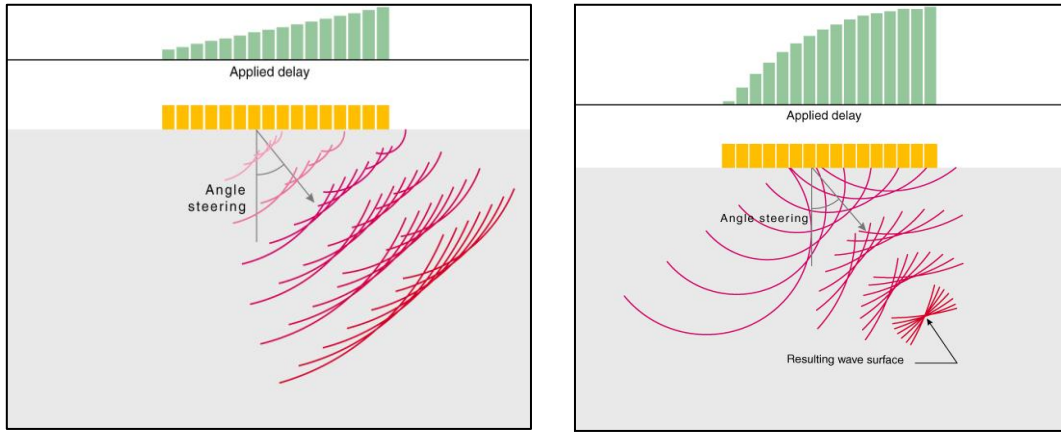
Faz kontrolünün çalışma sistemi öncelikle piezoelektrik elementleri tetikleyecek elektrik akımının kazanç ünitelerinde üretilmesiyle başlar akım buradan, gerekli faz kontrollerinin uygulanacağı faz kontrolü ünitelerine geçer. Akımlar buradan, istenen faz gecikmesine göre piezoelektrik kristallerine gönderilirler ve böylece muayene için istenen dalga yüzeyi formu oluşturulmuş olur [80].



Şekil 5.30. Faz kontrolünün sağlanma şeması [80].

Muayene gereklerine göre oluşturulan faz kontrollü dalgaların yüzeyi, malzeme içerisinde bir yansıtıcıya veya arka duvara çarptığında işlem tersine dönerek yansıyan dalgalardan alınan yankı ekoları ile faz kontrollü ultrasonik cihaz dijital olarak gerekli hesaplamaları yaparak ekranında muayene çıktısı olarak bir çok bakış açısından gösterilmiş hata konumu ve şekli bilgilerini sağlamaktadır [80].

Faz kontrollü tetikleme geciktirmeleri doğrusal olarak uygulandığında doğrusal. Faz kontrollü tetikleme gecikmeleri parabolik olarak uygulandığında ise sektörel dalga demetleri elde edilmektedir (Şekil 5.31) [80].

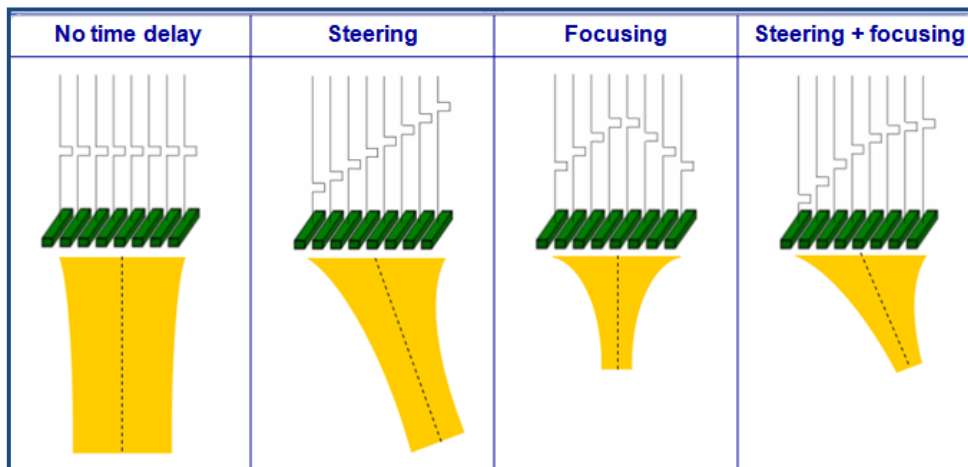


(a), Doğrusal gecikmeli tetikleme

(b) Parabolik gecikmeli tetikleme

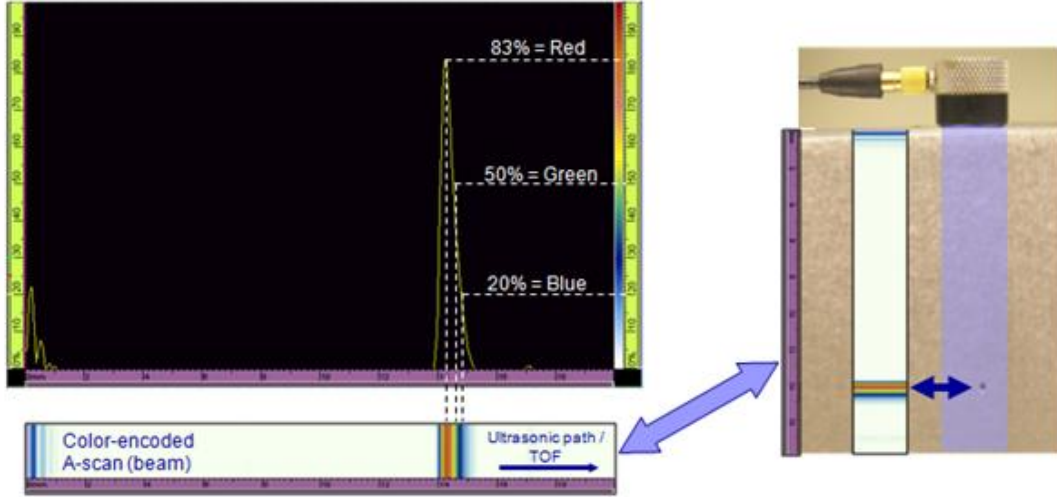
Şekil 5.31. Faz gecikmelerinin uygulanması şeması [80].

Konvansiyonel ultrasonikte her bir prob ayrı bir açı değerine sahip olduğundan bir tek muayenede bile bir çok prob kullanma gerekliliği vardır. Ancak faz kontrollü ultrasonik muayenesinde dalga demetlerinin türü ve açısı yine bu faz kontrolü ile sağlanmaktadır. Bunun avantajı, bir proba birçok değişik dalga demeti ve açısı oluşturulabilmesidir. Yine bu yolla, test parçasında istenilen bir derinliğe odaklanmak mümkün olmakta ve böylece tasarım için kritik olan alanların çok daha detaylı muayenesine imkan sağlanmaktadır [81].



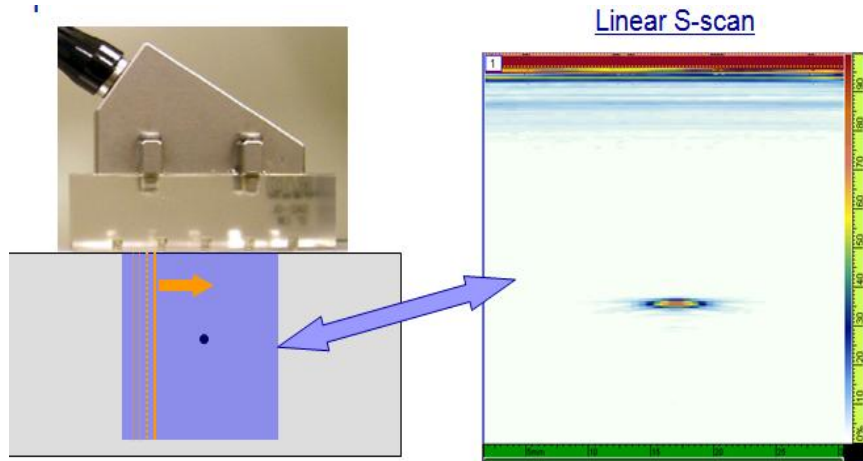
Şekil 5.32. Gecikmeli tetiklemeyle ses dalgası demetlerinin yönlendirilmesi [80].

Konvansiyonel ultrasonik muayene ekran çıktısının aksine, faz kontrollü ultrasonik muayene detaylı, anlaşılır ve saklanabilir bir muayene ekran çıktısı sağlamaktadır. Buda analizi kolaylaştırmakta ve muhtemel hata türü tanımlamaları yapmaya olanak sağlamaktadır [82].



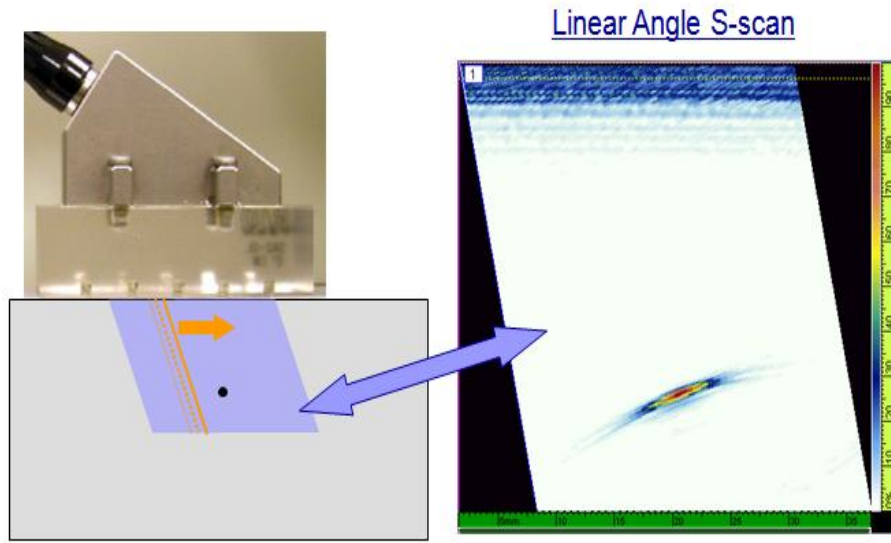
Şekil 5.33. Faz kontrollü ultrasonik ekran çıktısı örneği [80].

Doğrusal S dik tarama türü dalga formunda yansıtıcı kusur faz tarama ekranında Şekil 5.34'deki gibidir.



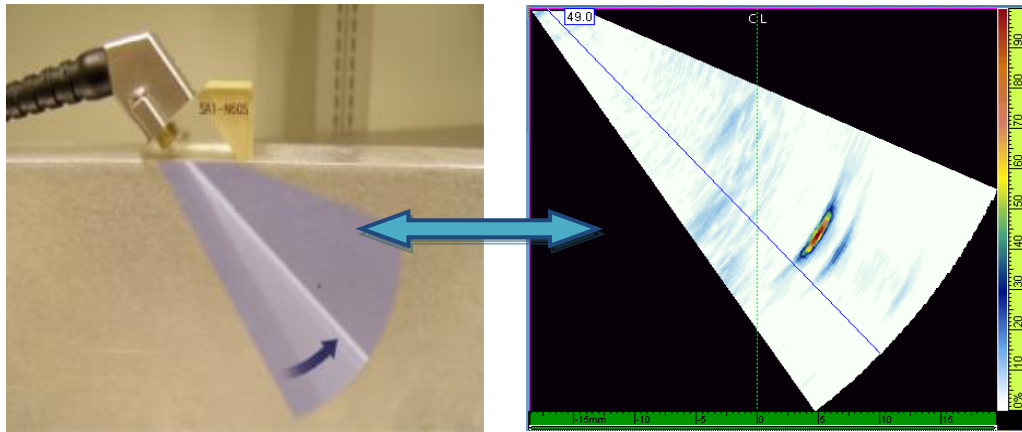
Şekil 5.34. Doğrusal S dik tarama türü dalga formu ekran görüntüsü [80].

Doğrusal S açılı tarama türü dalga formunda yansıtıcı kusur faz tarama ekranında Şekil 5.35'deki gibidir.



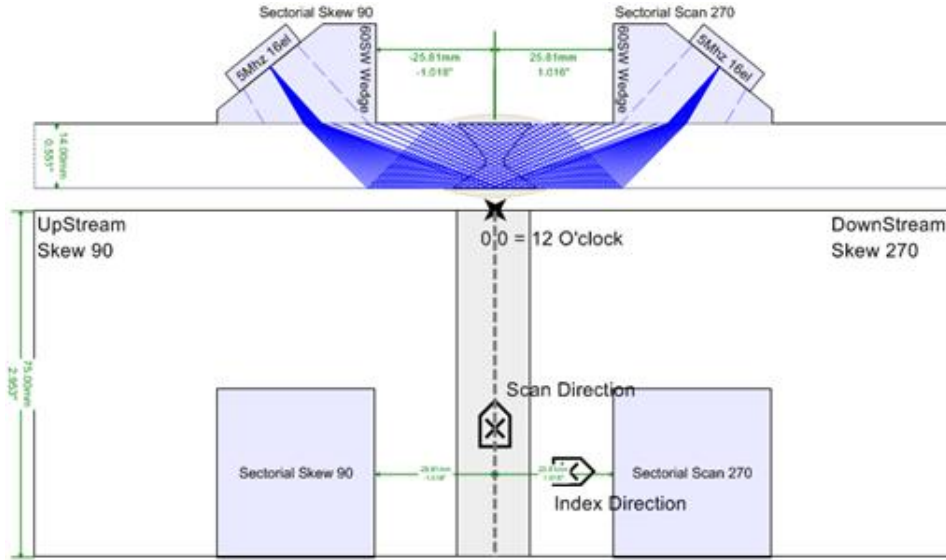
Şekil 5.35. Doğrusal S açılı tarama türü dalga formu ekran görüntüsü [80].

Açılı S tarama türü dalga formunda yansıtıcı kusur faz tarama ekranında Şekil 5.36'deki gibidir.



Şekil 5.36. Açılı S tarama türü dalga formu ekran görüntüsü [80].

Faz kontrollü ultrasonik muayenede ilk adım muayene planı hazırlamaktır. Muayene planında, ses demeti biçimi, kaynağın merkezinden prob ucuna kadar olan indeks mesafesi, muayene yapılacak bölge ve tarama grupları belirlenir.



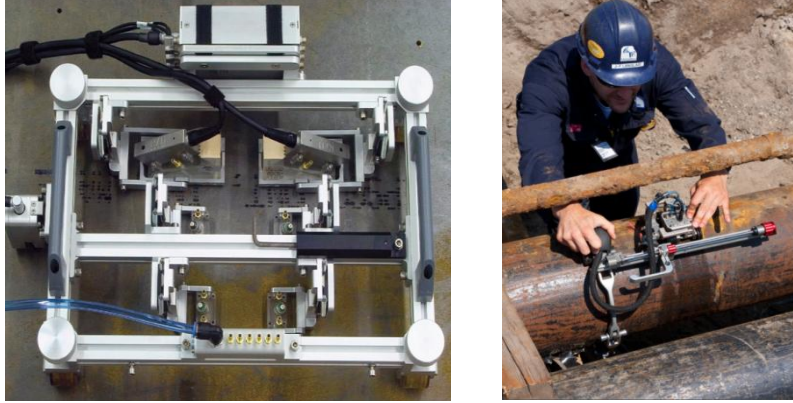
Şekil 5.37. Muayene planı örneği [80].

Belirlenen muayene değişkenleri cihaza girilir ve kalibrasyon işlemi yapılır. Faz kontrollü cihaza konvansiyonel olarak yapılan ses hızı kalibrasyonunun yanı sıra, takoz gecikmesi kalibrasyonu, hassasiyet kalibrasyonu, zaman mesafe düzeltme kalibrasyonu ve mesafe kodlayıcı kalibrasyonuda yapılmalıdır. Bu işlemler zaman alan ve yüksek teknik bilgi ve kabiliyet gerektiren bir süreç olduğundan, faz kontrollü ultrasonik muayene yönteminin, ilk kez karşılaşılan bir test numunesine muayene kalibrasyonu yapma zamanı, tecrübeyle ters orantılı olarak oldukça uzun sürer. Ancak daha önceden yapılan kalibrasyonların bellekten çekilerek cihaza tanıtılması işlemi saniyeler içinde gerçekleşir ve bundan sonraki muayene sürecide oldukça kısadır. Çünkü faz kontrollü muayenede konvansiyoneldeki gibi zig zag prob hareketine ihtiyaç olmaz. Prob muayene bölgesine paralel bir biçimde doğrusal çekilir [81].



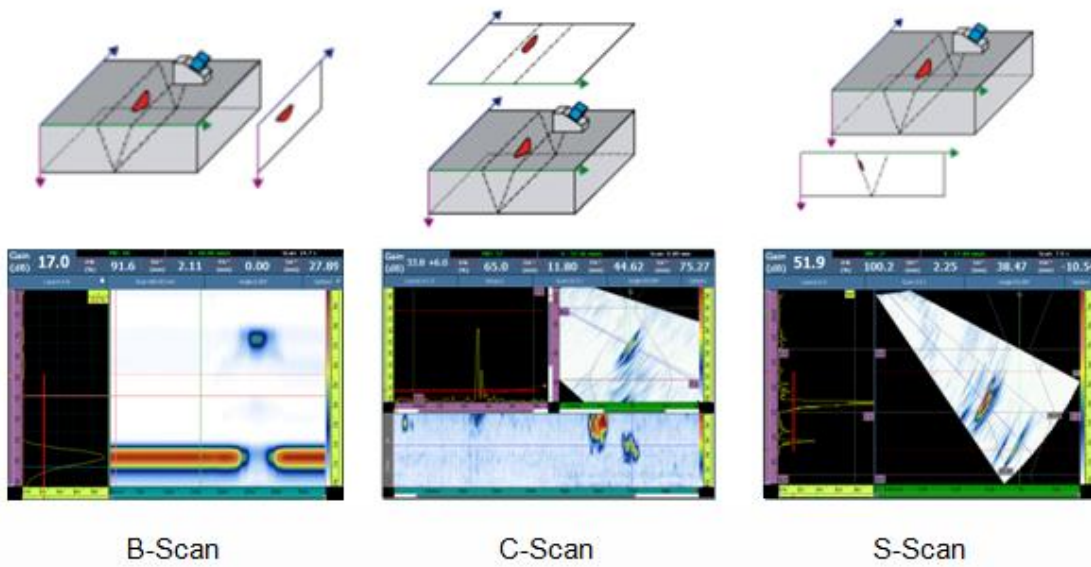
Şekil 5.38. Faz kontrollü ultrasonik cihazı [80].

Faz kontrollü ultrasonik muayenede prob hareketi doğrusal olduğundan dolayı bu muayene otomasyonada elverişlidir. Muayenede prob hareketi elle sağlanabileceği gibi özel uygulamalar için üretilen prob sabitleyicilerlede hareket otomatik olarak sağlanabilir (Şekil 5.39).



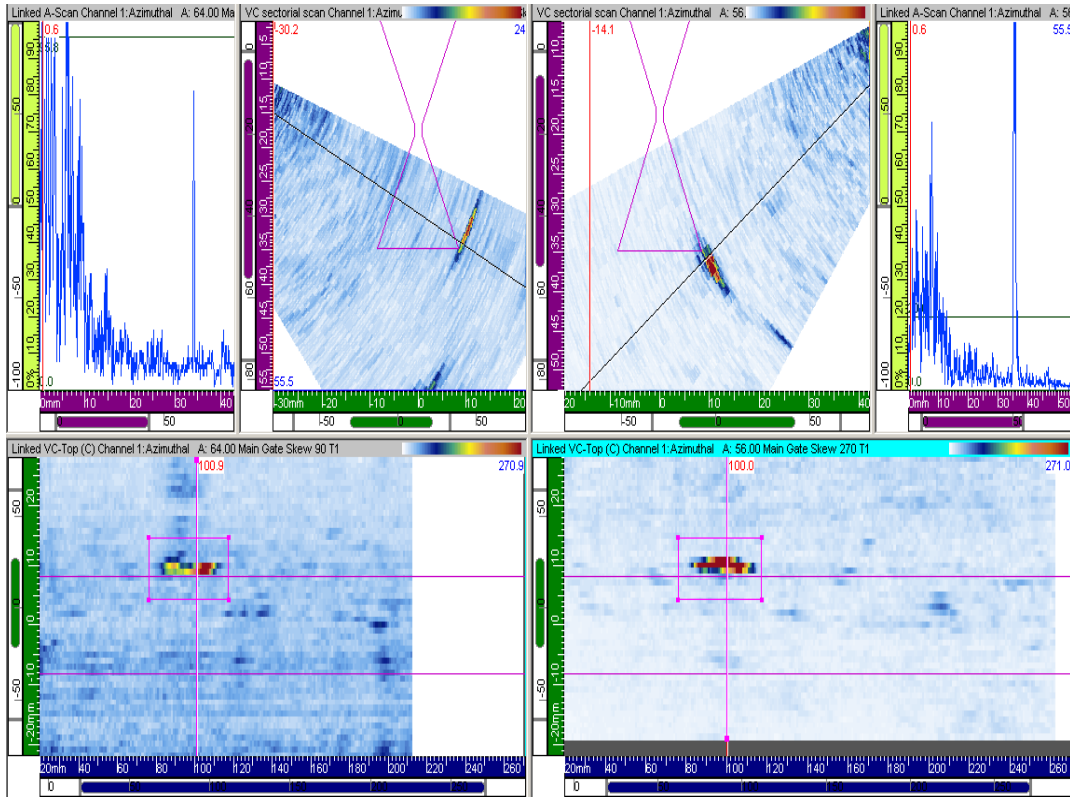
Şekil 5.39. Faz kontrollü ultrasonik cihazı konvansiyonel prob hareketi veya otomasyonu [80].

Muayene sonrasında bilgi cihaza kaydedilir ve analiz edilir veya daha ayrıntılı analiz için bilgisayarda ilgili yazılımda incelenebilir. Faz kontrollü ultrasonik muayenede sonuçların incelenmesi için, yaygın olarak 3 ekran kullanılır. Şekil 5.40'de gösterilen bu ekranlar incelendiğinde hatanın konumu ve şekli hakkında gerekli bilgiler edinilebilir [80].



Şekil 5.40. Faz kontrollü ultrasonik muayene B, C, S, ekranları [80].

Konvansiyonel ultrasonik A tarama skalalı ekranın yanı sıra, faz kontrollü ultrasonik muayene tekniğinde, B tarama ekranı kaynağa paralel görüntü sağlar ve bu yönde kesitler verir. C tarama ekranı radyografik muayene çıktısı olan film, görüntüsü denilen üstten bakış sağlar ve bu yönde kesit verir. S tarama ekranı ise kaynak boyunca kaynak dikişine dikey kesit verir (Şekil 5.41) [82].

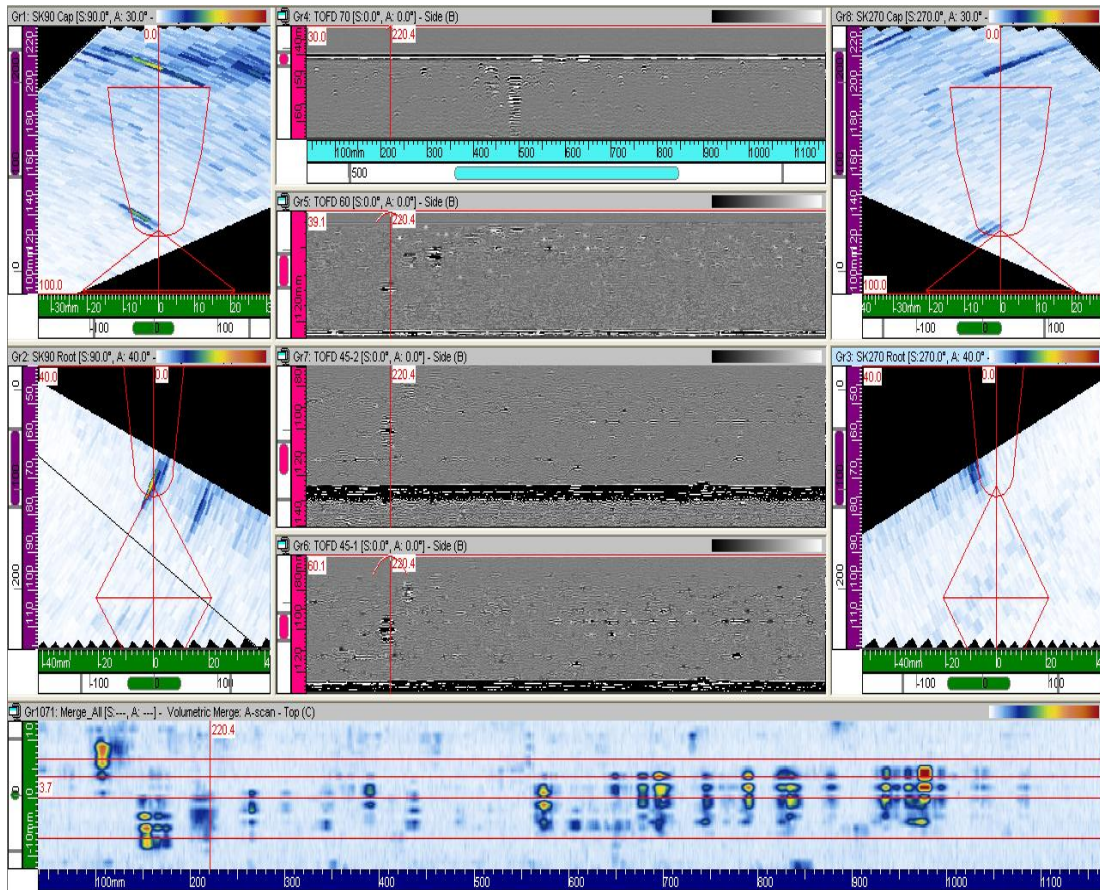


Şekil 5.41. Faz kontrollü ultrasonik muayene A, S, C, ekranları cihaz ekran görünümü [80].

Bu ekranlar ayrı ayrı incelenip bir muayene sonucuna varılabileceği gibi, çok kritik uygulamalarda kullanılmak üzere bu tarama ekranlarını birleştirip üç boyutlu görüntü sağlayan bilgisayar yazılımlarında kullanılabilir. Ancak bu tür yazılımların kullanılması için muayene edilecek test parçasının daha önceden hazırlanmış bilgisayar destekli çizimlerinin yapılmış ve yazılıma yüklenmiş olması gerekmektedir.

Faz kontrollü ultrasonik (PAUT) ve difraksiye ultrasonik yöntem (TOFD) en teknolojik hacimsel muayene yöntemleridir. Ancak Savunma sanayindeki uygulamalarında TOFD uygulamaları yeterince uygulanabilir değildir. Askeri araçların tasarım yapısından ötürü TOFD için gerekli muayene alanı ve problemlerin

teması için gerekli karşılıklı düzlem sağlanamamaktadır. Bu nedenle tek proba iki yönden yapılacak PAUT muayeneleri tercih edilmektedir. PAUT cihazlarına takılacak TOFD kiti ile iki muayenenin aynı anda tek cihazla yapılması mümkündür (Şekil 5.42). Ancak yukarıda belirtildiği gibi pozisyon ve geometrik yetersizlikler, zırr çeliklerinin askeri uygulamaları için kaynak muayenelerinde PAUT tekniğini ön plana çıkartmaktadır. PAUT tekniği için gerekli prob kontak alanlarının sağlanabilmesi için, askeri araçlar işleme prosesine gitmeden önce muayene edilmelidir. Böylelikle hem gerekli muayene yüzeyi sağlanmış olur hemde muhtemel kaynak hataları işlemede elde edilecek final ölçülerden önce giderilmiş olur.



Şekil 5.42. PAUT ve TOFD tekniklerinin beraber kullanımı ekran görüntüsü örneği [80].

5.2. Tahribatlı Muayene

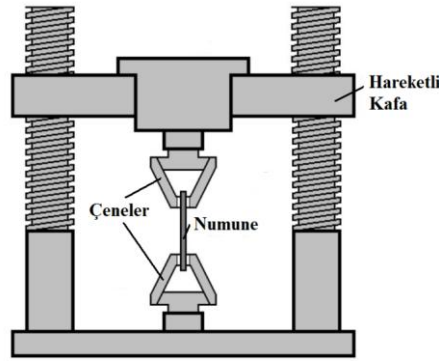
Malzemelerin sertlik, süneklik ve mukavemet gibi mekanik özellikleri temel olarak içyapılarına bağlıdır. Bu nedenle malzemelerin içyapı özellikleri iyi bilinmelidir. Malzemelerin içyapıları ısıl işlemlerle değiştirilerek mekanik özellikleri iyileştirilebilir.

Malzemelere istenilen özelliklerin kazandırılabilmesi için uygun ısıl işlemlerin uygulanması gerekir. Uygulanan ısıl işlemin uygun olup olmadığı genellikle tahribatlı muayene ile belirlenir. Tahribatlı malzeme muayenesi adından da belli olacağı gibi malzemeyi tahribata uğratarak yani kalıcı şekil değişikliklerine uğratacak mekanik deneylerle gerçekleştirilir. Bir çok değişik tahribatlı muayene metoduyla malzemelerin incelenmek istenen özellikleri araştırılır. Bir çeşit tahribatlı muayeneden bir çok malzeme mekanik özelliği araştırılabileceği gibi bir çeşit muayeneden bir tür mekanik özellikte elde edilebilir. Daha hassas veya kaba uygulamalar için tahribatlı muayeneler mikro veya makro boyuttada uygulanabilir [83].

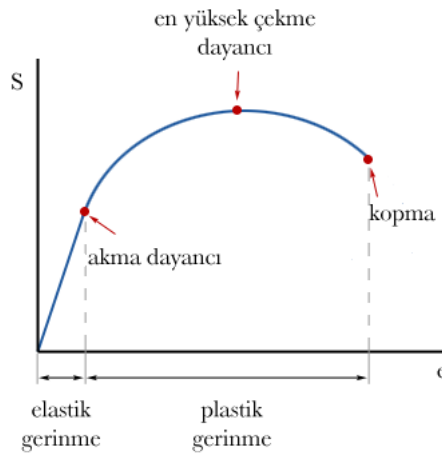
5.2.1. Çekme testi

Çekme testi, malzemelerin, akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma uzaması, rezilyans ve tokluk değerlerinin bulunabilmesi için uygulanır. Böylece malzemenin mukavemeti hakkında istenen değerler sağlanmış olur. Çekme testi standartlarına göre hazırlanmış deney numunesinin tek ekseninde, belirli bir hızla uygulanan yükte ve sabit atmosfer şartlarında, koparılmaya kadar çekilmesidir. Test sırasında, standart numuneye devamlı olarak artan bir çekme kuvveti uygulandığından, aynı esnada numunenin uzaması kaydedilir.[83].

Çekme testi yapılacak numunenin mekanik özellik değerlerinin sağlıklı olarak alınabilmesi için; numune malzemeyi tam olarak temsil etmeli, imalat şeklinin (döküm, kaynak, sıcak dövme veya haddeleme soğuk dövme) bilinmesi ve numunenin alınışı uygun olmalıdır. Çekme deneyinde oluşan uzama ikiye ayrılır. Numuneye yük uygulandığında akma sınırına gelene kadar bir miktar uzama görülür. Yük kaldırıldığında bu uzaman kaybolur ve test numunesi eski haline geri döner, buna elastik deformasyon denir. Yük akma sınırından sonra uygulanmaya devam edildiğinde numunede kalıcı şekil değişikliği meydana gelir. Yani yük kaldırıldığında numune eski haline dönemez, bunada plastik deformasyon denir [83].



Şekil 5.43. Çekme testi düzeneği [84].

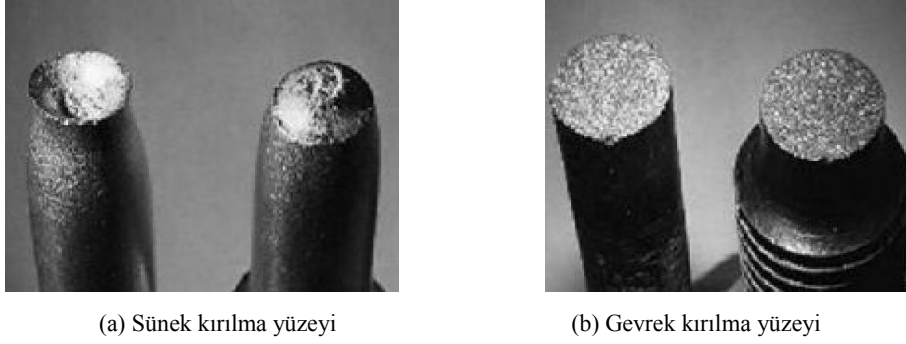


Şekil 5.44. Çekme gerinme diyagramı [87].

Deney sonuçlarının irdelenmesinde, numunenin alındığı malzemenin durumu yani, numunenin alındığı bölgeler, numunenin alınış şekli ve hazırlanışı önemlidir. Çekme deneyine tabi tutulacak numunelerin şekil ve boyutları standartlarda belirtilmektedir. Sonuçlar, numune boyut ve biçimine göre değişiklik arz edebilir. Numuneler iki kısımdan ibarettir. Baş kısımlar, yük tatbik edilmek için çenelerle tutulan kısımlardır ve diğer bölgeye göre daha büyük boyutludur. Orta kısmı, yük uygulandığında deformasyonun yer alması arzu edilen daha küçük boyutlu bölgedir. Deney sonuçları bu kısımda yapılan ölçümlerle tespit edilir. Numunenin bu kısmında, kesit ile uzunluk arasında belli bir ilişki vardır. Elastik ve plastik gerinme bölgeleri Şekil 5.44'de görülmektedir [85].

Çekme testinde kırılma yüzeylerine bakıldığında numunelerin gevrek veya sünek kırıldığı kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Akma dayanımı aşan numunelerde kalıcı

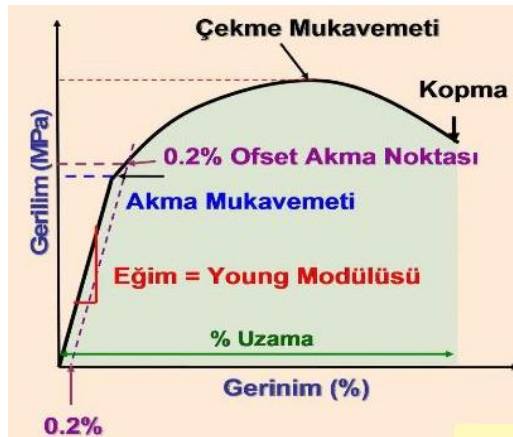
şekil değişimleri meydana gelir. Yüksek çekme dayanımlarına karşılık kesit daralmasının az olduğu malzemelerin toklukları yüksektir. Çekme deneyi sonucunda oluşan gevrek ve sünek kopma şekilleri Şekil 5.45'te verilmektedir [86].



Şekil 5.45. Kopma şekilleri [86].

Akma Dayancı Şekil 5.44'de görülen noktadır ve uygulanan çekme kuvvetinin yaklaşık olarak sabit kalmasına rağmen plastik şekil değişiminin önemli ölçüde arttığı ve çekme diyagramının süreksizlik gösterdiği bölgeye karşılık gelir. Belirgin akma göstermeyen numunelerin akma sınırı % 0,2'lik plastik uzamaya denk gelir (Şekil 5.46) [83].

Çekme dayancı, bir numunenin kopmadan ve kırılmadan dayanabileceği en yüksek çekme gerilmesi olarak tanımlanır. Bu gerilme çekme diyagramındaki en yüksek gerilme değeri olup maksimum yükün ilk kesit alanına oranı ile tespit edilir [83].



Şekil 5.46. Gerilim gerinim diyagramı [87].

Kopma uzaması ise numune boyunda meydana gelen en yüksek yüzde plastik uzama miktarına denir. Çekme deneyine tabi tutulan numunenin kopan kısımlarının bir araya getirilmesiyle son boy ölçülür [85].

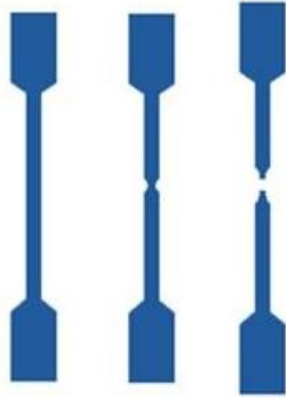
Rezilyans, numunenin yalnızca elastik şekil değişimi için harcanan enerji veya elastik şekil değişimi sırasında numunenin depolandığı enerji anlamına gelir. Bu enerji, gerilme gerinim eğrisinin elastik kısmının altında kalan alanına eşittir ve malzeme kırıldığında bu enerji geri verilir. Tokluk, numunenin kırılıncaya kadar absorbe ettiği enerjiye denir. Genellikle gerilme gerinim eğrisinin altında kalan alanla hesaplanır. [85].



Şekil 5.47. Çekme testi cihazı [84].

Çekme testi esnasında test numunesinin çekme yükü altındaki durumu şu şekildedir. Numune akma dayanımının üzerine çıktığında plastik şekil değişimi gerçekleşmeye başlar. Numune bir yandan uzarken, diğer yandan kesit alanı da gittikçe daralır. En yüksek çekme dayanımına ulaştığımızda numune üzerindeki yük tepe noktasına ulaşır. Eğri üzerindeki bu tepe noktasında, numune boyun vermeye başlar. Diğer bir deyişle, yük tepe noktasına ulaştıktan sonra numune artık homojen bir şekilde uzamaz. Plastik kararsızlık olarak da adlandırılan bu durum gerçekleştiğinde, numune sadece boyun veren bölge içerisinde uzamaya devam eder. Boyun veren kısmın kesit alanının numunenin diğer kısımlarına göre daha küçük olması nedeniyle, numuneyi uzatmak için uygulanması gereken yük miktarı azalmaya başlar. Mühendislik gerilimi numunenin testten önceki yüzey alanını dikkate aldığı için, yükteki bu

düşme mühendislik gerilimi değerlerine de yansır. Kesit alanındaki bu azalmayı hesaba katarak gerilimi hesapladığımızda, gerilimin artmaya devam ettiğini, yani malzemedeki gerinim sertleşmesinin sürdüğü görülür. Uzama sadece boyun kısmıyla sınırlandıktan bir süre sonra, numunenin kopmasıyla test tamamlanır.

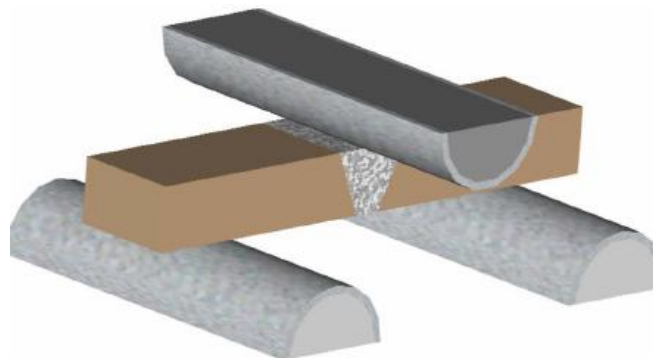


Şekil 5.48. Çekme testi esnasında test numunesi davranışları [87].

EN 895 standardı, kaynaklı metalik malzemelerin tahribatlı testlerinden enine çekme testini kapsamaktadır. Bu standart, numunenin alınışından test sonuçlarının tesbitine kadar bir çok konuda bilgi sağlamaktadır.

5.2.2. Eğme testi

Eğme deneyi, iki ucu iki ayrı desteğe serbest olarak oturtulan, genellikle daire veya dikdörtgen kesitli düz bir deney parçasının, yön değiştirmeksizin orta noktasına (üç nokta eğme deneyi) veya her iki destekten eşit mesafede iki noktaya (dört nokta eğme deneyi) eğme kuvveti uygulanarak yapılan deneydir.



Şekil 5.49. Kaynaklı numune dairesel mandren ile eğme testi şematik gösterimi [86].

Eğme deneyinde soyut sonucun yanında eğme momenti, esneklik modülü ve eğme miktarı gibi somut değerler de hesaplanır. Eğme deneyleri genellikle dökme demir ve yüksek mukavemetli çelikler gibi gevrek ve kırılğan malzemeler için yapılır. Deneyi yapılacak numuneye bir kuvvet etki ettiğinde numune kesitinin bir kısmında basma gerilmesi, numune kesitinin geri kalan kısmında ise çekme gerilmesi meydana geliyorsa numune eğilme halindedir. Eğilme halindeki numunelerin kesitinde, yükün uygulandığı yüzeye yakın bölgelerde basma gerilmeleri, dış yüzeye yakın bölgelerde ise çekme gerilmeleri meydana gelmektedir [88].

Şekil 5.47'teki çekme cihazı ve benzeri bir çok ticari çekme cihazı aynı zamanda eğme testide yapabilmektedir. Bunun için cihazın çekme çeneleri demonte edilip yerine istenen eğme testi tipine göre eğme testi aparatlarının takılması yeterlidir.

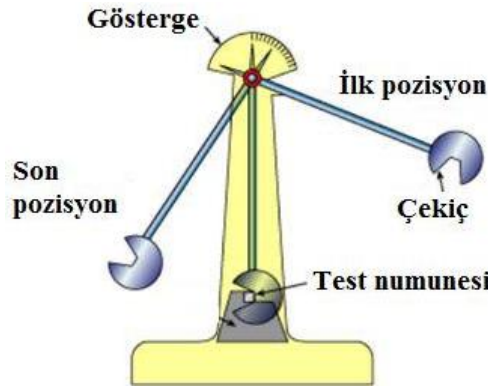
EN 910 standardı, kaynaklı metalik malzemelerin tahribatlı testlerinden eğme testini kapsamaktadır. Bu standart, numunenin alınışından test sonuçlarının tesbitine kadar bir çok konuda bilgi sağlamaktadır.

Kaynaklı zırh çeliklerine yapılacak tahribatlı muayeneler esnasında eğme testi uygulanmayacaktır. Zırh çeliklerinin mekanik özellik isterlerinde ve ilgili imalat standartlarında tanımlanmış eğme testi değerleri bulunmamaktadır. Bunun sebebi zırh çeliklerinden beklenen mekanik özelliklerin sağlanabilmesi için uygulanan alaşımlama ve ısıt işlemler sonucunda oluşan sert ve mukavim yapının eğilmeye karşı zayıf oluşudur. Zırhlı araç üretiminde bir imalat prosesi olan bükme işlenmi de çok dikkatli ve yavaş yapılmalıdır. Büküm işleme için, imalat prosesinde kullanılan zırh çeliği türü ile ilgili, minimum bükme mandren çapları ve büküm açlarına uyulsa bile, büküm sonrasında çatlaklar oluşabilir. Büküm bölgelerinin yüzeysel çatlak muayenesinden geçirilmesi uygun olacaktır.

5.2.3. Çentik darbe testi

Çentik darbe deneyi malzemelerin çarpma dayanımlarını ya da kırılma enerjilerini ölçmek amacıyla yapılır. Çentik darbe deneyi standart çentik tipleri içeren numunelerin darbe etkisi ile kırılması için gerekli enerjinin ölçülmesi esasına

dayanmaktadır. Ölçülen bu enerji darbe dayanımı olarak adlandırılır ve birimi Joule'dür. Uygulamada Charpy ve İzod olmak üzere iki çeşit darbe deneyi mevcuttur. Charpy deneyinin prensibi iki mesnede yatay olarak yaslanan basit bir kiriş durumundaki numunenin çentik tabanına bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe yapıp kırılması için harcanan enerjinin ölçülmesi esasına dayanmaktadır. İzod deneyinde ise numune kavrama çenesine dikey tespit edilir ve yüzeyine kavrama çenesinden belirli yükseklikte bir sarkacın ucundaki çekiçle darbe uygulanır. Bu deneyde ağırlığı olan bir sarkaç belli bir yüksekliğe çıkarıldığında belli bir potansiyel enerjisi olur. Sarkaç bu yükseklikten serbest bırakıldığında düşey bir düzlem içerisinde test numunesine çarparak kırar ve diğer yönde daha düşük bir yüksekliğine kadar çıkabilir. Bundan dolayı numunenin kırılmasından sonraki sarkacın sahip olduğu potansiyel enerji daha düşük olur. Sarkacın ilk durumundaki potansiyel enerjisi ile son durumundaki potansiyel enerjisi arasındaki fark test numunesinin kırılması için gerekli enerjiyi yani darbe direncini verir [83, 87].



Şekil 5.50. Darbe testi şematik gösterimi [87].

EN 875 standardı, kaynaklı metalik malzemelerin tahribatlı testlerinden darbe testini kapsamaktadır. Bu standart, numunenin alınışından test sonuçlarının tesbitine kadar bir çok konuda bilgi ve alınacak numunelerin boyutlarında sağlamaktadır. Ayrıca kalın malzemelerde numunelerin adetleri ve malzemedan alınış konumlarında verilmektedir. Yine araştırılacak malzeme özelliğine göre numunelere açılacak çentik tipleri de verilmektedir.



Şekil 5.51. Darbe testi cihazı [84].

5.2.4. Sertlik testi

Sertlik, çeliğin çizilmeye, kesilmeye, aşınmaya ve delinmeye karşı gösterdiği dirence verilen isimdir. Bunu ölçmek için sertlik ölçer aygıtları kullanılır. Bilimsel olarak ise malzemenin dislokasyon hareketine veya plastik deformasyona karşı gösterdiği direnç sertlik olarak ifade edilir. Sertliği ölçülecek yüzeye ya sert bir bilye ya da sivri bir uç uygulanarak çıkarılan izin alanı ya da derinliği uygulanan test tipine göre ölçülür. Bu değer, çeliğin sertliğinin bir ölçüsü olarak kullanılır. Tablo 5.4'te çeliklerde en çok kullanılan sertlik ölçüm yöntemleri ve uygulama alanları özetlenmiştir [83, 89].

Tablo 5.4. Sertlik testi tipleri ve uygulama alanları [89].

Sertlik Test Tipi	Baskı Ucu	Yük (kg)	Uygulama
Knoop	Elmas piramit	1-2000	İnce sertlik
Vickers	Elmas piramit	1-2000	İnce sertlik
Rockwell C	Elmas konik	150	Kalın ve sert metaller
Rockwell B	Çelik bilye	100	Sertliği yüksek olamayan çelik ve demir dışı metal
Rockwell T	Çelik bilye	15,30,45	Çok ince ve yumuşak metaller
Rockwell N	Elmas konik	15,30,45	Sert ve ince metaller
Brinell	Çelik bilye	500-3000	Sertliği 40 HRC' ye kadar çeliklere

Herbir sertlik ölçme yönteminin kendine özgü üstünlükleri ve kısıtları vardır. Değişik sertlik ölçekleri arasında çevrim olasıdır. Fakat bir ölçekten diğerine geçerken iki önemli husus göz ardı edilmemelidir. Bunlardan ilki, her sertlik deneyinin en uygun

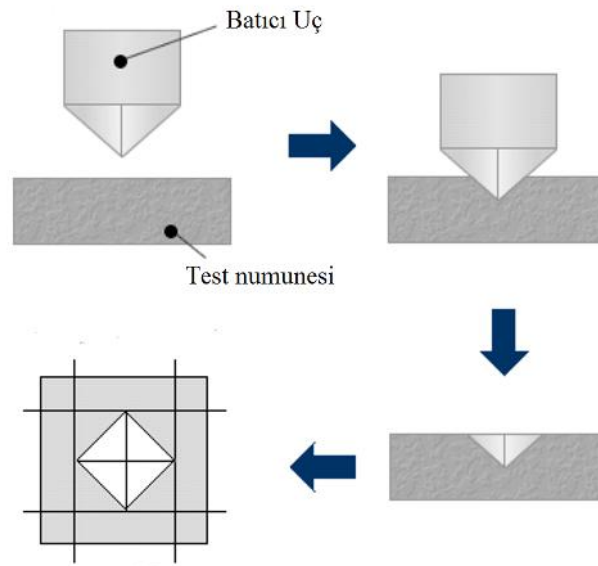
olduğu uygulama alanı vardır, örneğin, çok ince yumuşak çelik saçlara Rockwell B ya da Rockwell T uygulanabilir; fakat, Rockwell C asla düşünülmemelidir. ikincisi de, ilkinine bağlı olarak, her sertlik ölçeğinin bir geçerlilik aralığı vardır, örneğin, Rockwell C 20 değerinin altında, Rockwell B ise 100 değerinin üzerinde geçersiz ve anlamsızdır. Sertlik değerleri arasında karşılaştırma yapılacağı zaman aynı ölçek değerleri karşılaştırılmalı, zorunlu olmadıkça çevrim çizelgelerine başvurulmamalıdır. Mutlak sertlik değerleri mikrosertlik ölçen aygıtlarla ve hassas sertlik değeri olarak ölçülmelidir [89].



Şekil 5.52. Sabit ve portatif sertlik test cihazları [84].

Bu çalışmada, Vickers sertlik ölçme yönteminden faydalanılacaktır. Vickers yönteminde elmas pramit dört köşe baticı uç belirli bir yük ile malzemenin yüzeyine bastırılır ve malzeme yüzeyinde meydana gelen izin diyagonelleri ölçülür. Yük, malzemenin cinsine göre seçilir ve uygulama süreside buna bağlı olarak değişir [83].

EN 1043 standardı, kaynaklı metalik malzemelerin tahribatlı testlerinden sertlik testini kapsamaktadır. Ayrıca kaynak kesitleri üzerinden sertlik alınacak derinlikler ve kaynak erime hattı boyunca yapılacak sertlik kontrol hatları verilmektedir. Sertlik ölçmeleri yapılırken kullanılan ölçme yöntemi ne olursa olsun, numunelerin üzerinde birkaç ölçme yapıp ortalamasının alınması gerekir.



Şekil 5.53. Vickers sertlik testi baskı ucu [87].

5.2.5. Makro/Mikro yapı testi

Makro ve mikro yapı testleri, kaynaklanmış numunelerde, paso dizilimleri, ergime hattı, tanecik yapıları ve bunların geçiş bölgelerindeki durumlarının incelenmesi amacıyla uygulanır. TS EN 1321 standardı, kaynaklı metalik malzemelerin makroskobik ve mikroskobik tahribatlı testlerini kapsamaktadır.

Mikroskobik incelemede kullanılan optik mikroskobun yanı sıra yeni teknoloji taramalı elektron mikroskobu kullanımında yaygınlaşmıştır. Temel olarak taramalı elektron mikroskobu, tungsten, lantan hekza borit katottan veya alan emisyonlu spreyden ortaya çıkan elektronların kullanımı, incelenecek malzeme yüzeyine gönderilmesi sonucu oluşan etkileşimlerden yararlanılması esasına dayanır. Bu amaçla, yoğunlaştırıcı elektromanyetik mercekle toplanan, objektif mercekle odaklanan elektron demeti, yine elektromanyetik saptırıcı bobinlerle örnek yüzeyinde tarama işlemini gerçekleştirir. Bir taramalı elektron mikroskobunda görüntü oluşumu temel olarak; elektron demetinin incelenen örneğin yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşimlerin sonucunda ortaya çıkan sinyallerin toplanması prensibine dayanır. Ayrıca bu etkileşim prensipleri doğrultusunda ortaya çıkan X ışınlarının her atoma özel ortaya çıkan karakteristikleri, incelenen malzemenin element bakımından muhtevasının nitel ve nicel olarak tespit edilmesinde yardımcı olur [91].

BÖLÜM 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Ferritik ve östenitik dolgu metalleriyle birleştirilecek olan ana malzeme Armox 500T'nin kimyasal kompozisyonu Tablo 6.1'de verilmiştir. [21].

Tablo 6.1. Armox 500T zırh çeliğinin kimyasal kompozisyonu [21].

Karbon	Mangan	Kükürt	Fosfor	Silisyum	Nikel	Krom	Molibden
% 0.32 maksimum	% 1.20 maksimum	% 0.015 maksimum	% 0.010 maksimum	% 0.40 maksimum	% 1.80 maksimum	% 1.00 maksimum	% 0.70 maksimum

Armox 500T'ye ait mekanik özellikler tablosu Tablo 6.2'de verilmiştir [21].

Tablo 6.2. Armox 500T zırh çeliğinin mekanik özellikleri [21].

Sertlik	Akma Mukavemeti	Kopma Mukavemeti	Uzama	Tokluk (-40 °C'de)
480-540 HBW	1250 MPa	1450-1750 MPa	% 10 minimum	25 J minimum

Kaynak prosesinde kullanılacak ferritik dolgu metalinin kimyasal kompozisyonu Tablo 6.3'de ve mekanik özellikleri Tablo 6.4'de verilmiştir. [90].

Tablo 6.3. Ferritik dolgu metalinin kimyasal kompozisyonu [90].

Karbon	Mangan	Molibden	Silisyum
% 0.10	% 1.15	% 0.50	% 0.60

Tablo 6.4. Ferritik dolgu metalinin mekanik özellikleri [90].

Akma Mukavemeti	Kopma Mukavemeti	Uzama	Tokluk (-40 °C'de)
490 MPa	600 MPa	% 23 minimum	50 J minimum

Kaynak prosesinde kullanılacak östenitik dolgu metalinin kimyasal kompozisyonu Tablo 6.5’de ve mekanik özellikleri Tablo 6.6’de verilmiştir. [90].

Tablo 6.5. Östenitik dolgu metalinin kimyasal kompozisyonu [90].

Karbon	Mangan	Silisyum	Nikel	Krom
% 0.08	% 7	% 0.8	% 9	% 19.0

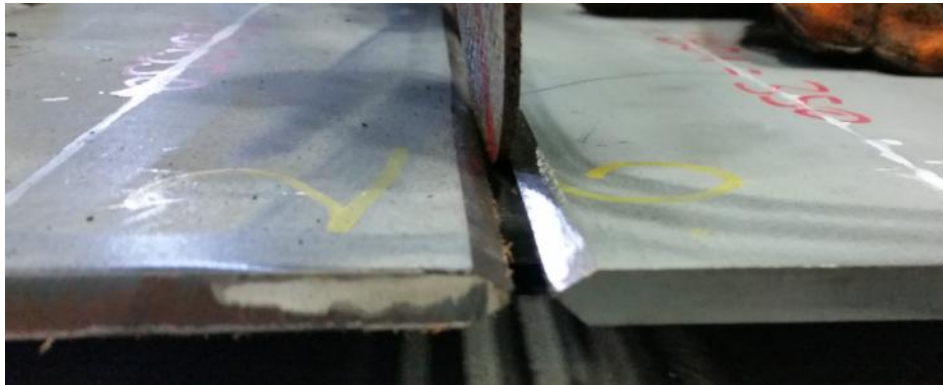
Tablo 6.6. Östenitik dolgu metalinin mekanik özellikleri [90].

Akma Mukavemeti	Kopma Mukavemeti	Uzama	Tokluk (-50 °C’de)
400 MPa	600 MPa	% 35 minimum	100 J minimum

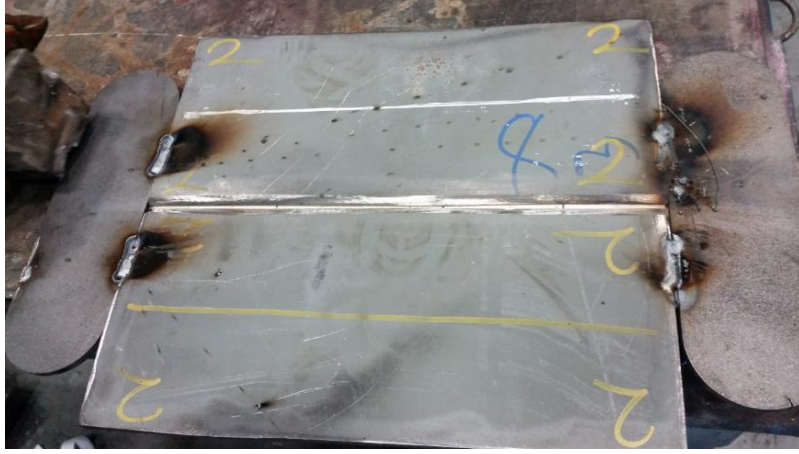
Kaynak prosesinde iki kaynak dolgu metali içinde uygun olan %10 karbon dioksit ve balans argon koruyucu gaz ortamında çalışılmıştır. Kullanılan gazın EN 439 koruyucu gaz sınıflandırma standardına göre kısa kodu “M21” şeklindedir.

6.1. Kaynak İşlemi

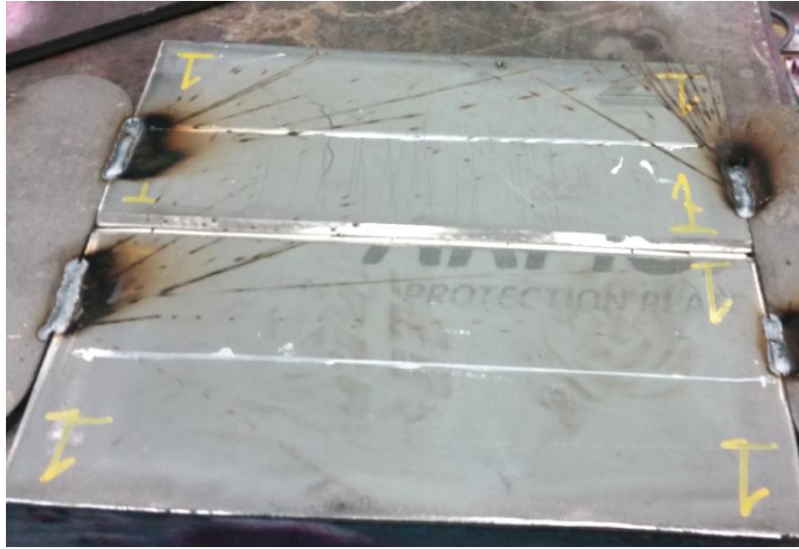
Kaynak işlemi, t8x150x350 mm boyutlarındaki plakaların birbirleriyle X kaynak ağzı formunda alın altına birleştirilmesi şeklinde uygulanmıştır. Kaynaklar Askaynak MIGSter 351 marka kaynak makinasında gazaltı asal gaz kaynak yöntemiyle yapılmıştır. Ferritik dolgu metali ile kaynatılan parça 1 nolu parça ve östenitik dolgu metaliyle kaynatılan parça 2 nolu parça olarak numaralandırılmıştır.



Şekil 6.1. X kaynak ağzı profili.



Şekil 6.2. Kaynak öncesi 2 nolu test parçası.



Şekil 6.3. Kaynak öncesi 1 nolu test parçası.

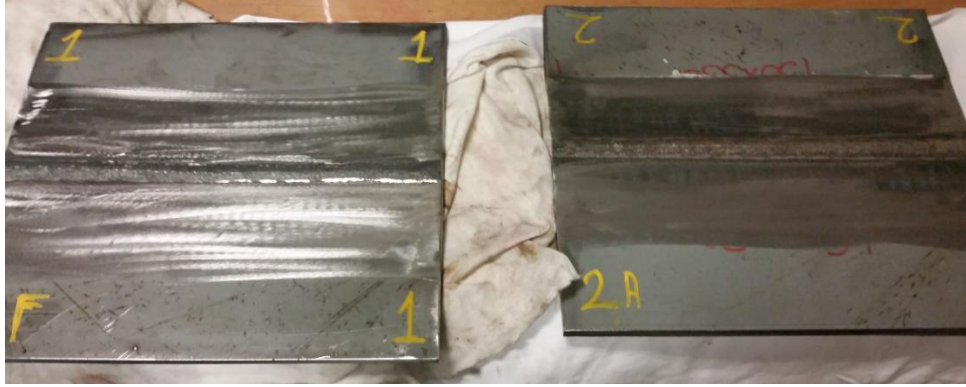
Her iki dolgu malzemesi doğru akımda artı kutuba bağlanmıştır. Kaynak parametreleri seçilirken yapılan optimizasyon, zırh çeliklerinin kaynağında istenen düşük ısı girdisi dikkate alındığından, düşük akım ve voltaj değerleri ile sağlanmıştır. Her iki dolgu malzemesi için seçilen kaynak parametreleri 200 Amper ve 23 Volt'tur. Kaynak ilerleme hızı dakikada 150 mm olarak uygulanmıştır. Koruyucu gaz debisi torcun ucunda dakikada 15 litre olarak ayarlanmıştır.

Kaynak işlemleri sırasında maksimum ulaşılan sıcaklık 170 °C'dir. Ölçümler standartlarda belirtildiği gibi kaynak dikişinin 75 mm uzağından çift nokta lazer sıcaklık ölçer ile yapılmıştır (Şekil 6.4) [21].



Şekil 6.4. Kaynak sırasında yapılan sıcaklık kontrolleri.

Kaynağı tamamlanmış olan parçalar, mekanik testler sırasında elde edilecek verileri etkilemesini önlemek üzere, olası kaynak hatalarının araştırılması için tahribatsız olarak test edilmiştir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5. Kaynaklı test parçaları.

6.2. Tahribatsız Muayeneler

6.2.1. Görsel muayene

Kaynak dikişlerine EN 17637 standartına uygun olarak görsel muayeneler yapılmıştır. Görsel muayene ve sonrasında yapılacak yüzeysel kaynak muayeneleri için kabul kriteri olarak EN 5817 standartının B kalite seviyesi kullanılmıştır.

6.2.2. Penetrant muayene

2 Nolu test parçasının yüzeysel kaynak muayenesi, kaynak dikişinde kullanılan östenitik kaynak dolgu metalinin manyetiklenmeye müsait olmayan yapısı nedeniyle, penetrant muayene yöntemi ile yapılmıştır. EN 3452-1'e uygun olarak yapılan muayenede Tip II metod C, muayene yöntemi uygulanmıştır.



Şekil 6.6. Penetrant sıvısının uygulanması.



Şekil 6.7. Penetrant geliştiricinin uygulanması.

6.2.3. Manyetik muayene

1 Nolu test parçasının yüzeysel kaynak muayenesi, kaynak dikişinde kullanılan ferritik kaynak dolgu metalinin manyetiklenmeye müsait yapısı nedeniyle, manyetik parçacık muayene yöntemi ile yapılmıştır. EN 9934'e uygun olarak yapılan muayenede boyunduruk tipi manyetikleme yöntemi ve sprey tipi manyetik parçacık emilsiyonu ile uygulanmıştır.

Manyetik parçacık muayenesi, Ferrous-Probe marka ES-X model, boyunduruk tipi cihaz ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.8. Manyetik parçacık testi uygulanması.

6.2.4. Radyografik muayene

Test parçalarının her ikisinde EN 1435'e uygun olarak radyografik kaynak muayenesi yapılmıştır. Hacimsel kaynak muayene metodlarından olan radyografik kaynak muayenelerinde gama ışın kaynağı olarak Ir-192 doğal radyoaktif çekirdeği kullanılmıştır. Elde edilen radyograflar Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9. 1 nolu test parçasına ait radyograf.



Şekil 6.10. 2 nolu test parçasına ait radyograf.

6.2.5. Faz kontrollü ultrasonik muayene

1 nolu test parçasına, hacimsel kaynak yöntemlerinden ultrasonik muayenenin gelişmiş bir tekniği olan faz kontrollü ultrasonik muayene uygulanmıştır. Bu muayene türü östenitik kaynak dolgu metali ile kaynatılan 2 nolu test parçasında uygulanamamıştır. Bunun sebebi kaynağın ısıdan etkilenmiş bölgesindeki ferritik östenitik geçiş bölgelerindeki tane yapıları değişiminin ultrasonik ses dalgalarının yönlendirilmesini ve kalibrasyon yapısını bozmasıdır.

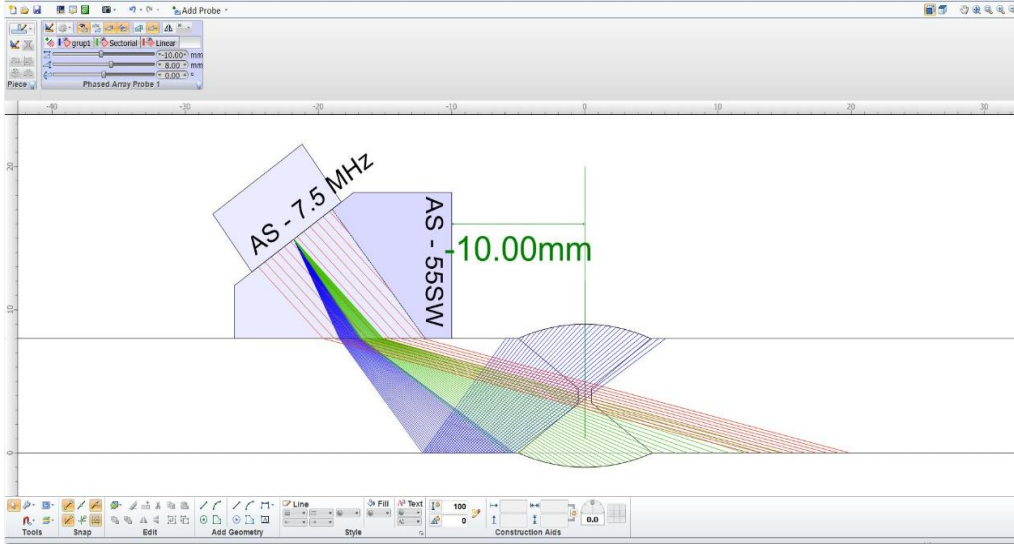
Faz kontrollü ultrasonik muayene, Zetec marka Topaz model, 32:128 kanallı cihaz ile gerçekleştirilmiştir.

1 nolu test parçasının boyutları, kaynak ağızı formu ve muayene uzunluğu cihaza girilmiştir (Şekil 6.11).



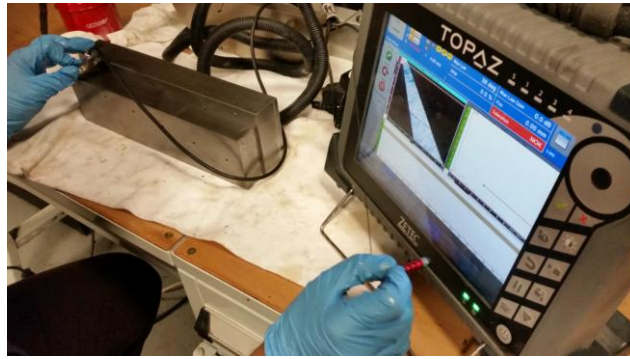
Şekil 6.11. Test parçasının fiziksel özelliklerinin cihaza tanıtılması.

Test parçasının muayene yapısına göre 3 tarama grubu içeren muayene planı hazırlanmıştır (Şekil 6.12).



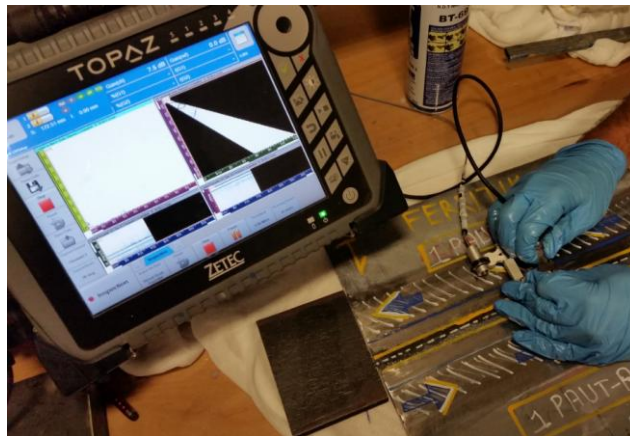
Şekil 6.12. Test parçasının muayene planı.

Hazırlanan muayene planına göre cihaz kalibrasyonları yapılmıştır (Şekil 6.13).



Şekil 6.13. Muayene kalibrasyonlarının yapılması.

Muayene kalibrasyonları yapılan cihaz ile 1 nolu test parçası taranmıştır (Şekil 6.14).

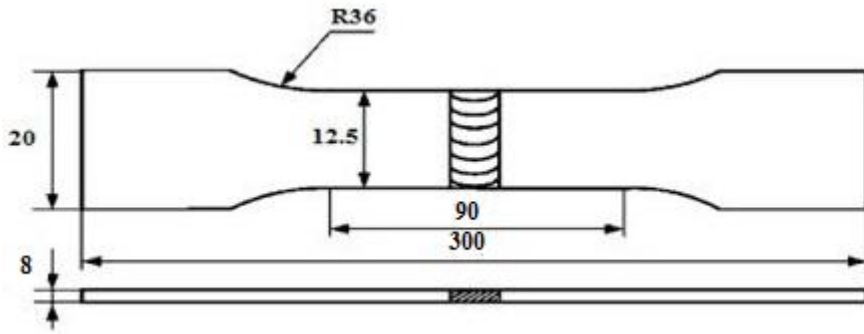


Şekil 6.14. Faz kontrollü ultrasonik testin uygulanması.

6.3. Tahribatlı Muayeneler

6.3.1. Çekme testi

Çekme testleri için 1 ve 2 nolu kaynaklı test numunelerinden 2'şer adet olmak üzere toplamda 4 adet, TS EN ISO 6892-1'e göre Şekil 6.15'deki gibi numuneler hazırlanmıştır. Standartta belirtildiği gibi numuneler ısıl işlem içermeyen talaş kaldırma yöntemiyle kesilmiş ve fazla kaynak metalide işlenmiştir. Testler 20°C malzeme sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Testler için Zwick/Roell marka çekme testi cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.16). Çekme testi numuneleri Şekil 6.17'de gösterilmiştir.



Şekil 6.15. Çekme testi numune boyutları.

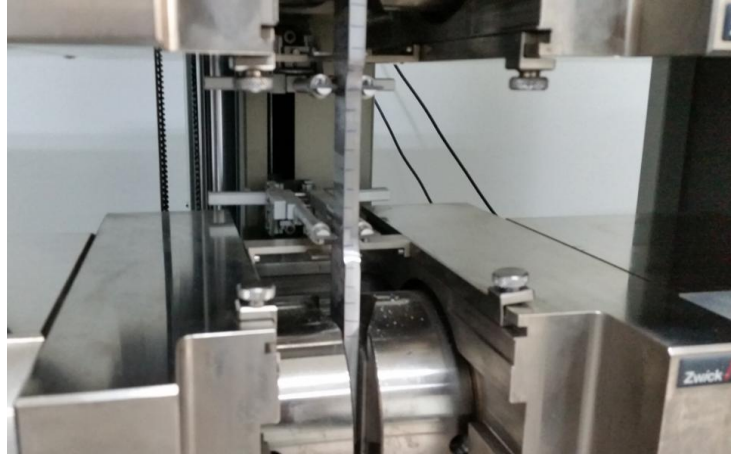


Şekil 6.16. Çekme testi cihazı.



Şekil 6.17. Çekme testi numuneleri.

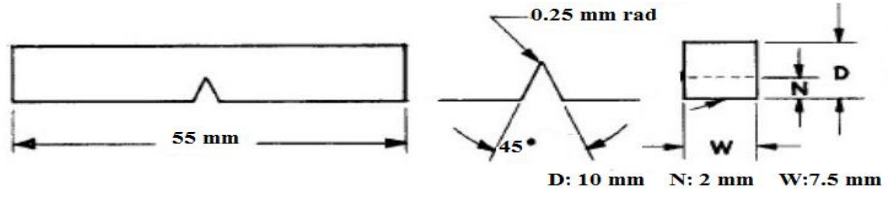
Numuneler çekme test cihazına bağlanarak testler gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.18).



Şekil 6.18. Çekme testi.

6.3.2 Çentik darbe testi

1 ve 2 nolu kaynaklı testi numunelerinden, kaynak metali, ergime hattı ve ısı tesiri altındaki bölgelerden 3'er adet olmak üzere toplamda 18 adet v-çentik darbe test numunesi TS EN 10045-1'e göre Şekil 6.19'daki gibi hazırlanmıştır. Standartta belirtildiği gibi numuneler ısı işlem içermeyen talaş kaldırma yöntemiyle kesilmiş ve TS EN 875 ek standartında belirtilen bölgelerden işlenerek çıkartılmıştır. Testler -40 malzeme sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Testler için Losenhausenwerk 15/30 marka çentik darbe testi cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.20). Çentik darbe test numuneleri Şekil 6.21'de gösterilmiştir.



Şekil 6.19. Çentik darbe testi numune boyutları.



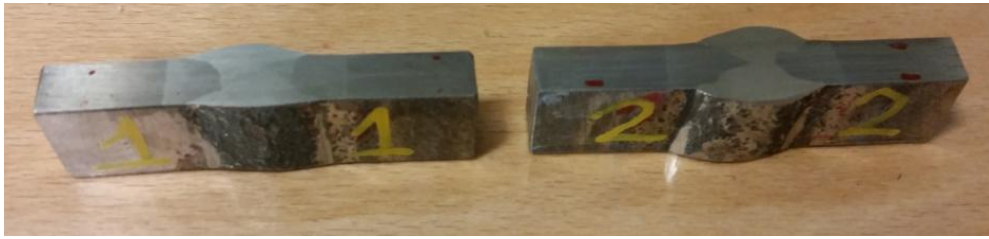
Şekil 6.20. Çentik darbe testi.



Şekil 6.21. Çentik darbe test numuneleri.

6.3.3. Sertlik testi

Sertlik testi için numuneler, 1 ve 2 nolu kaynaklı testi numunelerinden, EN 10003-1'e göre hazırlanmıştır. Standartta belirtildiği gibi numuneler ısıl işlem içermeyen talaş kaldırma yöntemiyle kesilmiş ve EN 1043-1 standartında belirtildiği gibi ölçümler yüzeyin 2 mm altından alınmıştır. Testler için Emcotest Duravision marka sertlik test cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.23). Sertlik test numuneleri Şekil 6.22'de gösterilmiştir.



Şekil 6.22. Sertlik test numuneleri.



Şekil 6.23. Sertlik test cihazı.

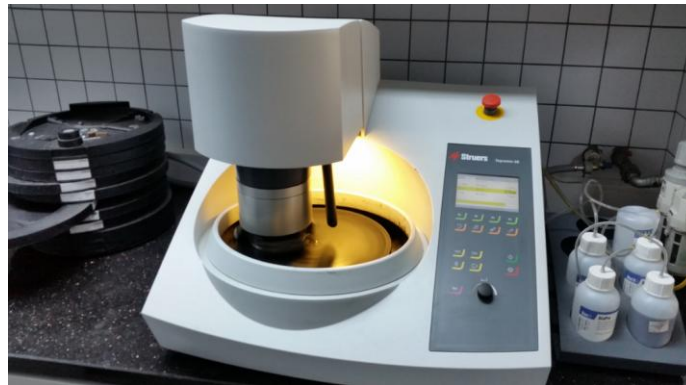
Sertlik test numuneleri tam otomatik sertlik ölçüm cihazına yerleştirilerek, Vickers sertlik ölçümü yöntemine göre 10 kg'lık yük ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.23).



Şekil 6.24. Sertlik testi.

6.3.4. Makro/Mikro yapı testi

Makro test numuneleri, 1 ve 2 nolu kaynaklı testi numunelerinden, EN 1321'e göre hazırlanmıştır. Numune inceleme yüzeyleri 80-220-480-600-800-1000-1200 numaralı zımparalarla zımparalanmış ve 6 μ , 3 μ , 1 μ ' luk keçelerle çizik kalmayacak şekilde parlatma işlemi yapılmıştır. Yüzey işlemleri için Struers Tegramin-30 marka cihaz kullanılmıştır (Şekil 6.25). Parlatma işlemi tamamlanan numuneler, birleşim bölgesinin incelenebilmesi amacıyla ferritik numune için HNO₃ ile ve östenitik numune için 10 ml HNO₃ ve 30 ml HCL çözeltisi ile dağlandıktan sonra makro yapı fotoğrafları çekilmiştir.



Şekil 6.25. Yüzey işlemleri cihazı.

Makro yapı test numuneleri ile mikro yapısında incelenmesi için numuneler Zeiss Scope A1 marka optik mikroskop ile incelenmiştir (Şekil 6.26).



Şekil 6.26. Optik mikroskop.

Kaynaklı numuneler, ana metal, ısı tesiri altındaki bölge ve kaynak metali bölgesindeki mikro yapı dönüşümlerinin daha net anlaşılması ve yorumlanabilmesi amacıyla taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir. İncelemeler 200 ila 10.000 kat büyütme aralığında incelenen bölgedeki oluşumlara göre yapılmıştır. İncelemeler için Philips XL 30S marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır (Şekil 6.27).



Şekil 6.27. Philips XL 30 S model SEM.

BÖLÜM 7. DENEYSEL SONUÇLAR

7.1. Tahribatsız Test Sonuçları

Ferritik ve östenitik kaynak dolgu metali ile birleştirilmiş kaynaklı numunelere, kaynak yapıldıkları kaynak dolgu metalinin özelliğine göre yapılan yüzeysel ve hacimsel kaynak muayeneleri sonucunda, herhangi bir hata veya süreksizliğe rastlanmamıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda seçilen kaynak parametrelerinin gerekli kaynak banyosu formunu oluşturabildikleri ve birleştirilecek malzemelerde tam ergime sağlayarak istenilen birleştirme düzeyine ulaşıldığı söylenebilir. İlgili tahribatsız muayenelerle elde edilen sonuçlara ait fotoğraflar bir önceki bölüm olan deneysel çalışmalar kısmında verilmiştir.

7.2. Tahribatlı Test Sonuçları

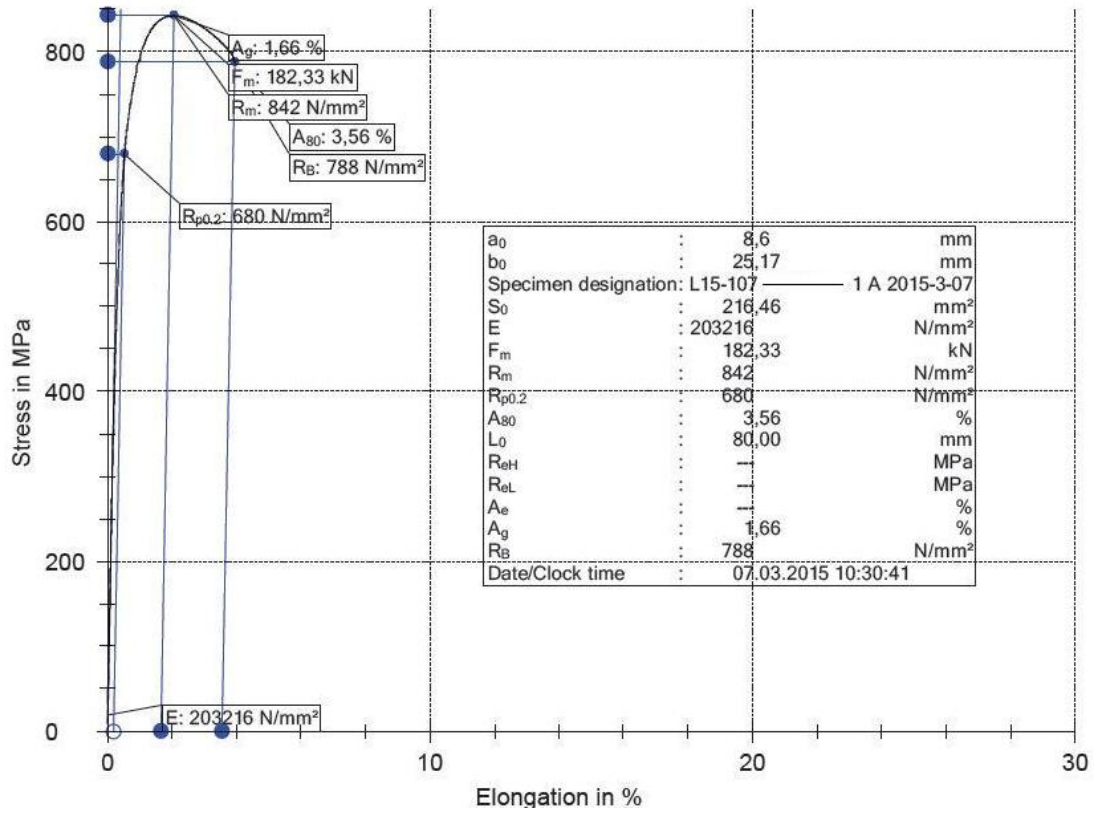
7.2.1. Çekme testi sonuçları

Çekme testi sonucunda bütün numuneler için kopma kaynak metalinden olmuştur. Çok yüksek mekanik özellikleri bulunan zırh Çelikerlerinin kaynaklanması sonucunda oluşan kaynaklı yapının, ana malzemenin mekanik özelliklerine çıkması bugünün teknolojisiyle mümkün değildir. Bu bağlamda, kullanılan iki değişik yapıdaki kaynak dolgu metalinin mekanik özellikleri ana malzemeninkinden daha düşük değerdedir. Bunun sonucunda kaynaklı birleşimlerin kopma yerinin kaynak metali bölgesi olması beklenen bir durumdur. Ancak kopma ve akma değerlerinin birbirlerine göre karşılaştırılmasının sağlanması iki değişik yapıdaki kaynak dolgu metali ile yapılmış birleşimlerin mekanik olarak birbirlerine olan üstünlüklerinin saptanmasında faydalı olacaktır. Çekme testi ile elde edilen akma, çekme, kopma mukavemetleri ve yüzde uzama değerleri birleştirme tipleri arasında istenen özelliklere göre seçim yapmayı sağlayacaktır. Çekme testi için elde edilen test

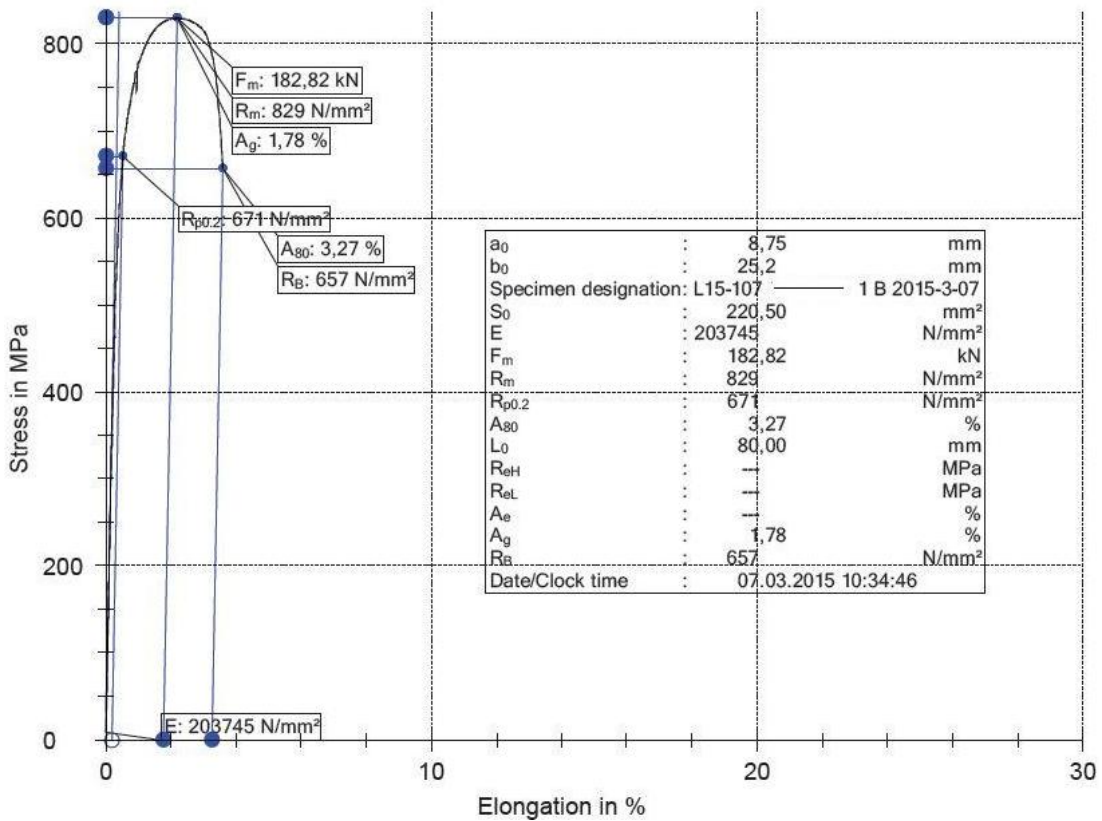
sonuçları yüksek akma ve çekme mukavemeti istenen kaynak birleşimi tasarımlarında, ferritik yapıda kaynak dolgu malzemesiyle kaynatılan 1 numaralı birleştirme tipi avantajlı olacaktır. Ancak bu seçim yapılırken tasarımdan beklenen diğer özelliklerde değerlendirilmeli ve optimum birleştirme özellikleri sağlanmaya çalışılmalıdır. Ferritik kaynak dolgu metali ile yapılan çekme testleri sonucunda belirlenen 836 MPa çekme mukavemeti değerleri, D. M. Robledo ve çalışma arkadaşlarının 2011 yılında yapmış oldukları, zırh çeliklerinin kaynaklı birleştirmelerinde gaz altı kaynak prosedürü geliştirme [93], çalışmalarında ulaşılan 929 Mpa çekme mukavemeti değerlerinin altında kalmıştır, bunun sebebinde referans çalışmada kullanılan kaynak dolgu telinin martenzitik ferritik yapıda daha mukavemetli kaynak dolgu metalinden kaynaklandığı görülmüştür. Yine aynı şekilde numuneler arasında elde edilen akma mukavemeti farkı, numunelerin çekme mukavemetleri arasındaki farktan yaklaşık olarak iki katından fazla olduğu görülmüştür. Ferritik kaynak dolgu metali ile yapılan akma testleri sonucunda belirlenen 676 MPa çekme mukavemeti değerleri, referans çalışmada ulaşılan 690 Mpa çekme mukavemeti değerlerinin altında kalmıştır, bunun sebebinde yine referans çalışmada kullanılan kaynak dolgu telinin martenzitik ferritik yapıda daha mukavemetli kaynak dolgu metalinden kaynaklandığı görülmüştür. Ayrıca referans çalışmada kullanılan farklı kompozisyondaki koruyucu gaz ortamının ve farklı kaynak parametrelerinde çekme mukavemeti değeri üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Çekme testi sonucunda elde edilen grafikler, 1. Numune A parçası için Şekil 7.1’de, 1 Numune B parçası için Şekil 7.2’de, 2. Numune A parçası için Şekil 7.3’te ve 2. Numune B parçası için Şekil 7.4’te verilmiştir. 1 ve 2 nolu her bir kaynaklı numunedan A ve B nolu ikişer adet çekme testi yapılmıştır. Çekme testi sonuçları Tablo 7.1’de verilmiştir. Ayrıca 1 ve 2 nolu kaynaklı numunelere ait çekme testi sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 7.5’te gösterilmiştir. Çekme testi sonuçları ortalamaları ile oluşturulmuş grafik ise Şekil 7.11’de verilmiştir.

Tablo 7.1. Çekme testi sonuçları.

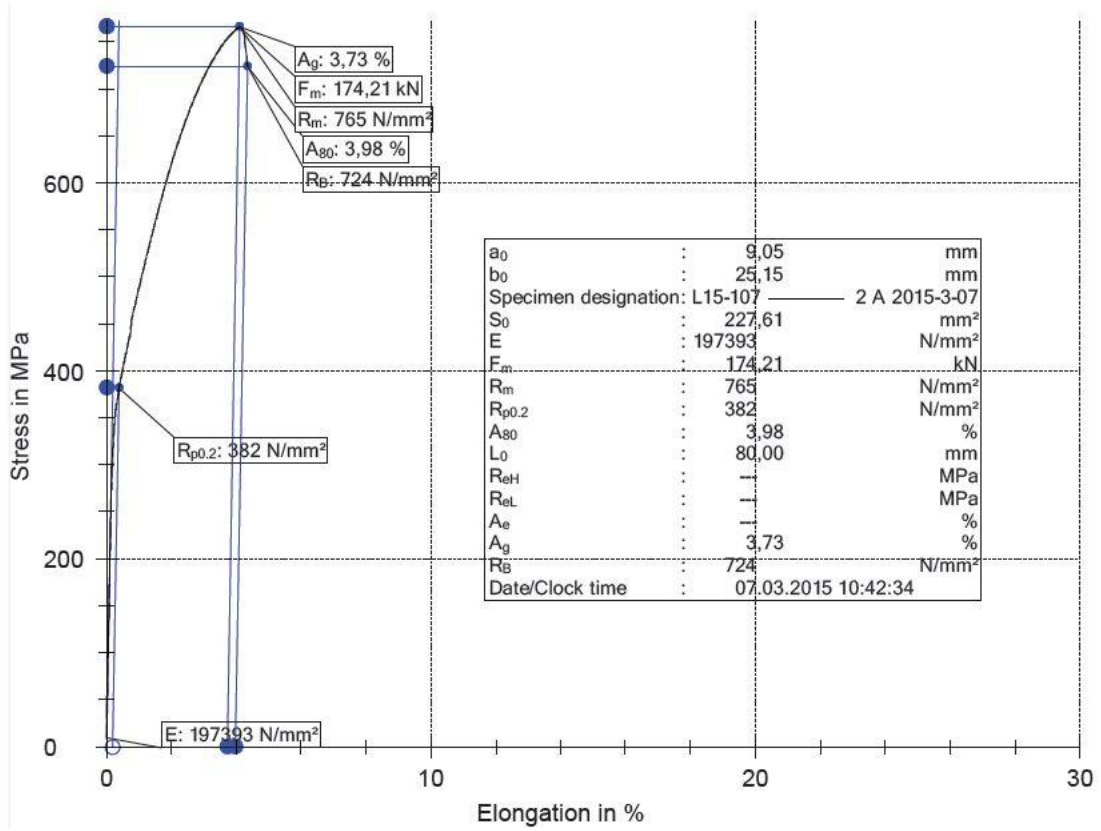
Numuneler		Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	Akma Mukavemeti (N/mm ²)	Uzama (%)
1 Nolu numune	A	842	680	3.56
	B	829	671	3.27
2 Nolu numune	A	765	382	3.98
	B	725	397	4.01



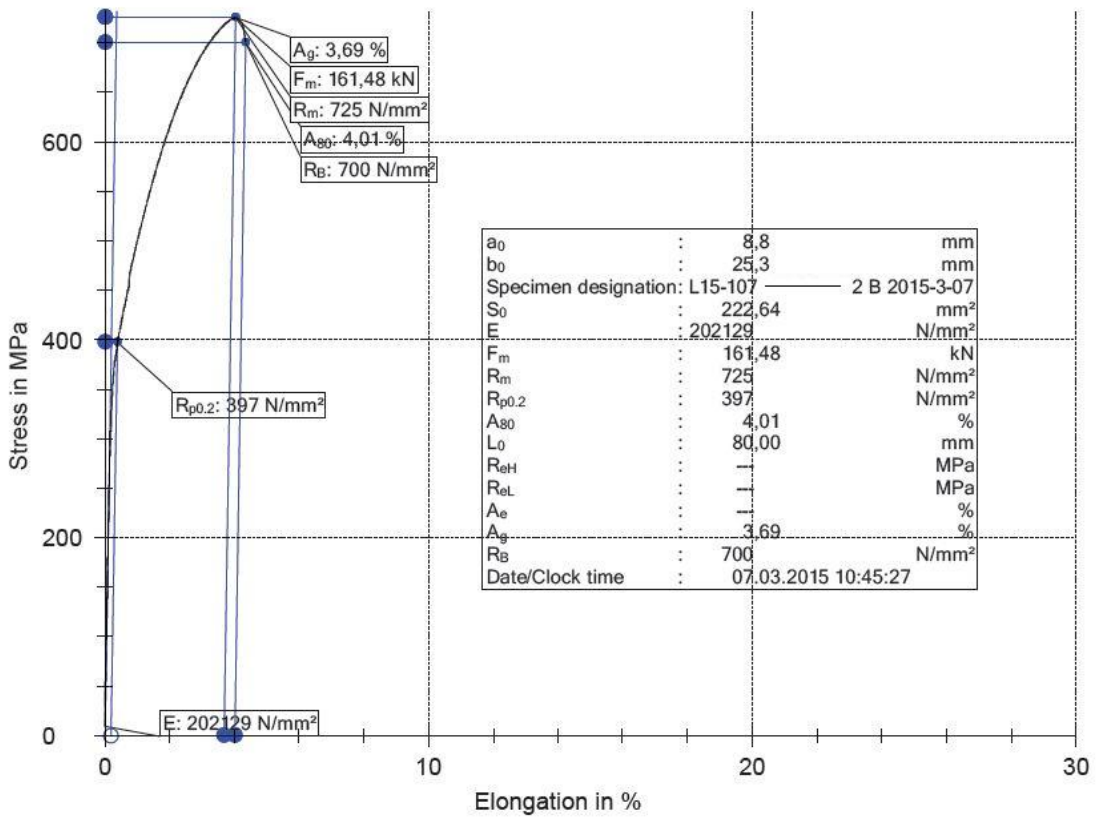
Şekil 7.1. 1.Numune A parçası için çekme testi grafiği.



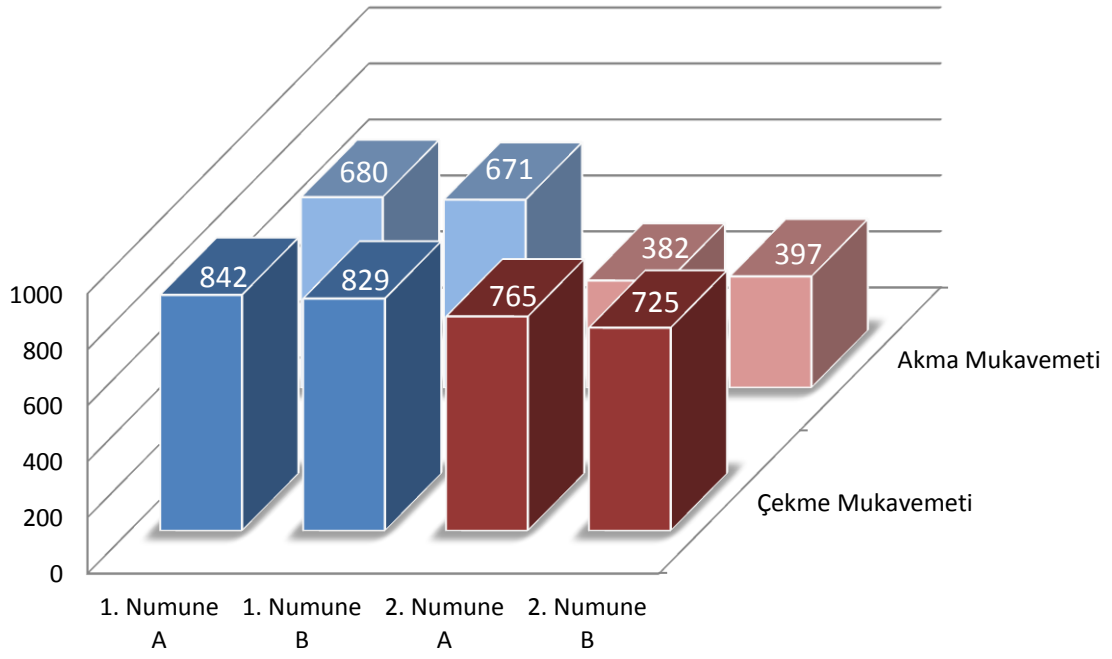
Şekil 7.2. 1.Numune B parçası için çekme testi grafiği.



Şekil 7.3. 2.Numune A parçası için çekme testi grafiği.



Şekil 7.4. 2.Numune B parçası için çekme testi grafiği.



Şekil 7.5. Çekme testi sonuçlarının grafiksel gösterimi.



Şekil 7.6. Çekme testi numunelerinin test sonrası görüntüleri.



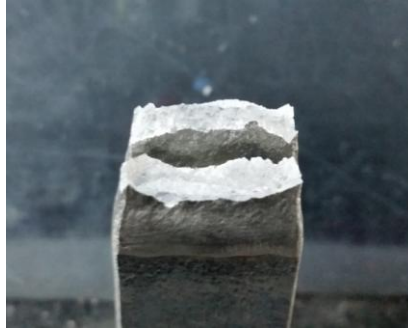
Şekil 7.7. 1 numaralı numune A parçası kopma yüzeyi.



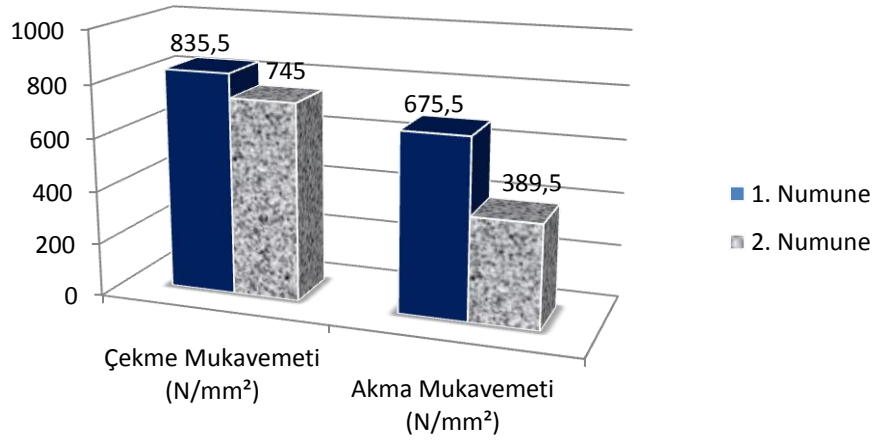
Şekil 7.8. 1 numaralı numune B parçası kopma yüzeyi.



Şekil 7.9. 2 numaralı numune A parçası kopma yüzeyi.



Şekil 7.10. 2 numaralı numune B parçası kopma yüzeyi.



Şekil 7.11. Çekme testi sonuçları.

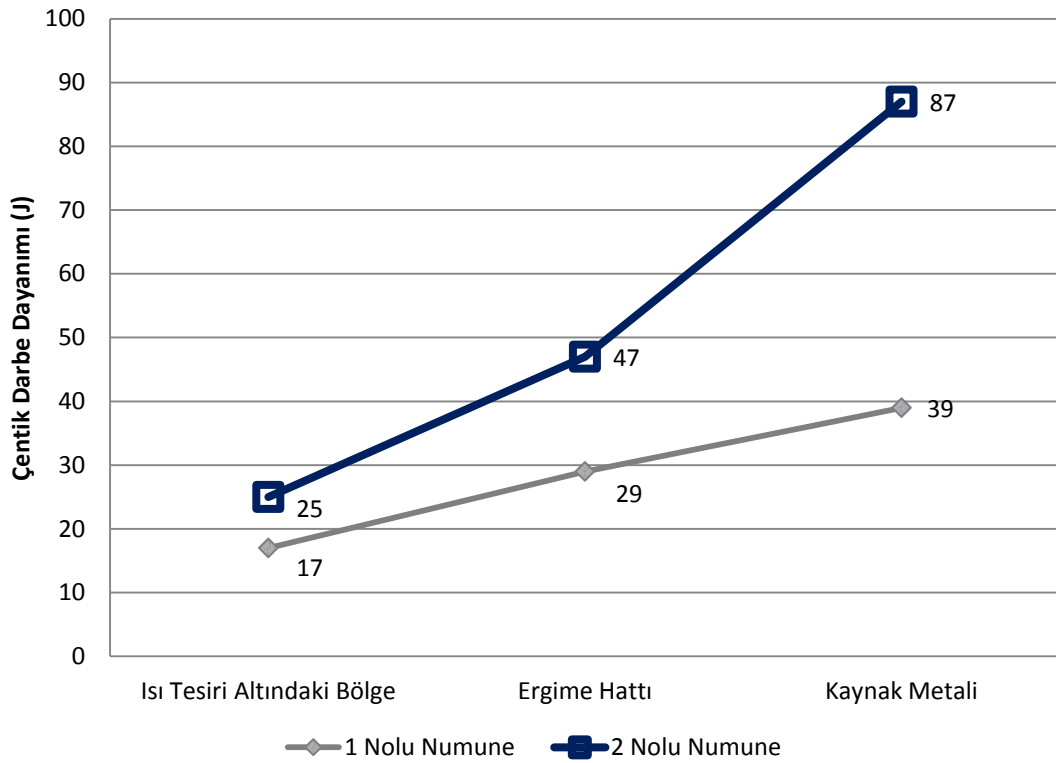
7.2.2. Çentik darbe testi sonuçları

1 ve 2 nolu kaynaklı numunelerin, ısıdan etkilenmiş bölgesi, ergime hattı ve kaynak metali bölgelerinden 3'er adet olmak üzere her iki numuneden 9'ar adet olmak üzere toplam 18 adet v-çentik darbe testi yapılmıştır. -40 °C malzeme sıcaklığında gerçekleştirilmiş çentik darbe testi sonuçları Tablo 7.2'de verilmiştir. Elde edilen test sonuçları incelendiğinde, 2 numaralı östenitik kaynak dolgu metali ile birleştirilen kaynaklı birleşimin çentik darbe dayanımının yüksek olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda, tasarımda kaynaklı bağlantılardan beklenen mekanik özellik tokluk ise, tokluk değeri yüksek olan östenitik kaynak metali dolgu malzemesi kullanılarak imal edilmiş 2 numaralı kaynak birleşimi tipi daha uygun olacaktır, ancak kaynak tasarımından beklenen diğer mekanik özelliklerde değerlendirilip genel bir yaklaşım yapmak kaynak tasarımının optimizasyonu için faydalı olacaktır. Numunelerin çentik darbe dayanımları arasındaki farklar, ergime hattında 18 J, ısı tesiri altındaki bölgede 8 J, kaynak metalinde ise 48 J olarak görülmüştür. Çentik darbe direnci açısından en kritik bölgenin en düşük çentik darbe dayanımı değerleri saptanan ısı tesiri altındaki bölge olduğu görülmüştür. Çentik darbe testlerinin her bir bölge için ortalamaları alındığında oluşan değerlerin grafiği Şekil 7.12'de verilmiştir.

Kırılma yüzeyi morfolojileri incelendiğinde, 1 numaralı numunenin yalnızca ısı tesiri altında kalan bölgesinden çıkartılan test numunelerinde sünek kırılma diğer bölgelerde ise gevrek kırılma profili gözleniyor. Buda ısı tesiri altında kalan ve kaynak ısı nedeniyle temperlenen bölgenin kısmen sünek yapıda olduğunu gösteriyor. Bunun haricinde 1 numaralı numunenin diğer bölgelerinin sert ve kırılğan bir yapıda olduğu görülüyor. 2 numaralı numunenin kırılma yüzeylerine ait fotoğraflar incelendiğinde, yalnızca östenitik kaynak metali bölgesinden çıkartılan test numunelerinin sünek yapıda olduğu ve diğer bölgelerden çıkartılan test numunelerinin ise gevrek kırılma profili sergiledikleri görülüyor. Numunelerin kırılma yüzeylerinin görüntüleri Şekil 7.13, 7.14, 7.15, 7.16, 7.17 ve 7.18'da gösterilmiştir.

Tablo 7.2. Çentik darbe testi sonuçları

		Isı Tesiri Altındaki Bölge	Ergime Hattı	Kaynak Metali
1 Nolu numune	1. test	16 J	24 J	37 J
	2. test	21 J	33 J	36 J
	3. test	15 J	31 J	45 J
2 Nolu numune	1. test	20 J	55 J	86 J
	2. test	27 J	40 J	84 J
	3. test	28 J	45 J	93 J



Şekil 7.12. Çentik darbe testi sonuçları (-40°C).



Şekil 7.13. 1 numaralı numune ısı tesiri altında kalmış bölge kırılma yüzeyleri.



Şekil 7.14. 1 numaralı numune ergime hattı kırılma yüzeyleri.



Şekil 7.15. 1 numaralı numune kaynak metalı bölgesi kırılma yüzeyleri.



Şekil 7.16. 2 numaralı numune ısı tesiri altında kalmış bölge kırılma yüzeyleri.



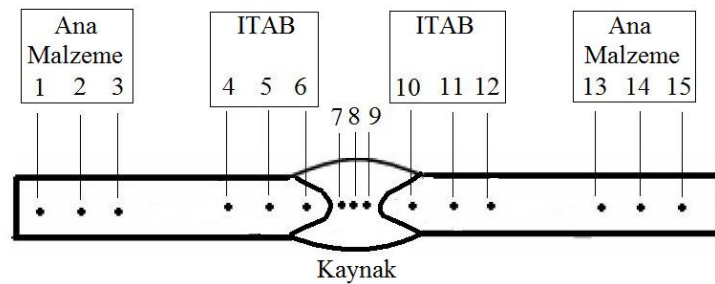
Şekil 7.17. 2 numaralı numune ergime hattı kırılma yüzeyleri.



Şekil 7.18. 2 numaralı numune kaynak metal bölgesi kırılma yüzeyleri.

7.2.3. Sertlik testi sonuçları

Sertlik testi Vickers sertlik ölçümü yöntemine göre 10 kg'lık yük ile yapılmıştır. Sertlik testi ölçümlerinin yapıldığı bölgelerin numaralandırılmış şematik gösterimi Şekil 7.19'deki gibidir.

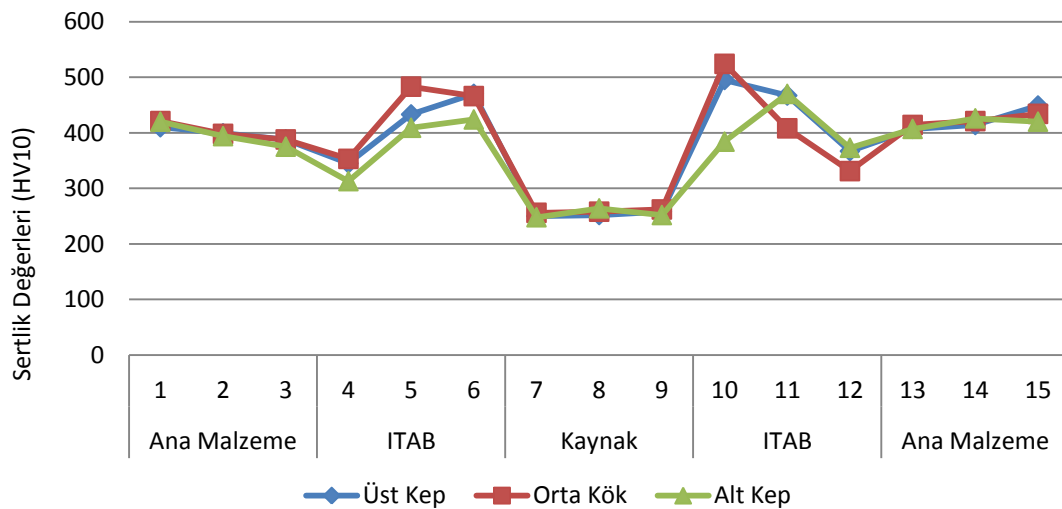


Şekil 7.19. Sertlik ölçüm bölgeleri şematik gösterimi.

Her iki kaynaklı numunenin üst kep, alt kep ve kök bölgelerinden olmak üzere 3'er sıra sertlik değerleri araştırılmıştır. Her bir sıradan, soldan sağa doğru, ana malzeme, ısı tesiri altındaki bölge, kaynak ve yine ısı tesiri altındaki bölge, ana malzeme olmak üzere ayrı bölgelerden değerler alınmıştır. Elde edilen sertlik değerlerinin, 2012 yılında benzer bir çalışma yapan S. Kara ve M. H. Korkut'un, zırh çeliklerinde kaynak sonrası ısıtılma işleminin birleşme mukavemetlerine etkisinin araştırılması [94], çalışmasında ısıtılmamış numuneden elde edilen sertlik değerleriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Her bir bölgeden 3'er adet değer alınmıştır. 1 nolu numune için elde edilen sertlik değerleri Tablo 7.3'te grafiksel gösterimi ise Şekil 7.20'de. 2 nolu numune için elde edilen sertlik değerleri Tablo 7.4'te grafiksel gösterimi ise Şekil 7.21'de, iki kaynaklı numunenin birbirleri arasında karşılaştırılabilmesi için her bir numunenin kendi içinde, kaynak bölgelerine göre sertlik dağılımlarının her bir sıra için (üst kep, orta kök, alt kep) ortalamaları alındığında, oluşacak olan sertlik dağılımları karşılaştırmasına ait grafik Şekil 7.22'te verilmiştir.

Tablo 7.3. 1 nolu numune sertlik testi sonuçları.

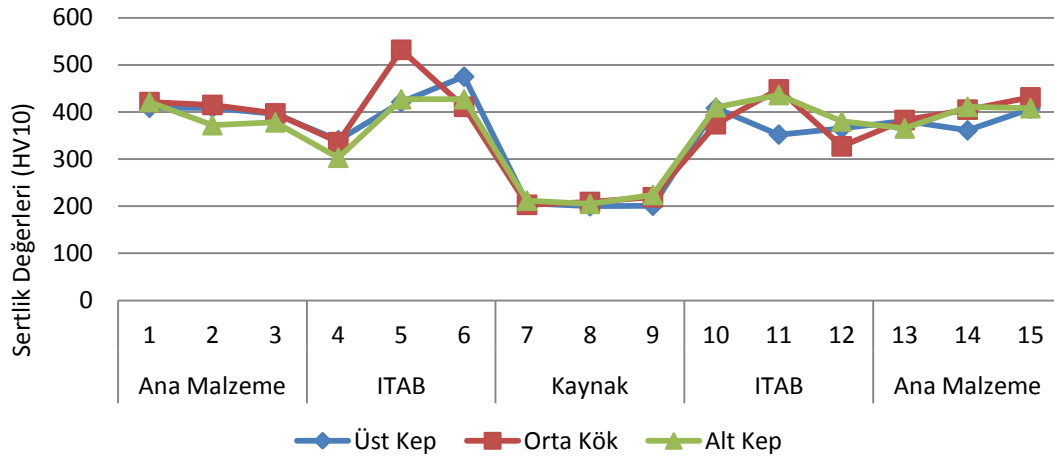
(HV)	Ana Malzeme			ITAB			Kaynak			ITAB			Ana Malzeme		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Üst Kep	410	399	388	345	433	470	250	252	258	495	467	367	407	414	449
Orta Kök	421	398	388	353	483	466	256	258	262	524	408	331	414	421	434
Alt Kep	420	394	375	313	409	424	248	264	252	384	470	373	407	426	420



Şekil 7.20. 1 nolu numunenin bölgelere göre sertlik dağılımı.

Tablo 7.4. 2 nolu numune sertlik testi sonuçları.

(HV)	Ana Malzeme			ITAB			Kaynak			ITAB			Ana Malzeme		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Üst Kep	409	409	396	340	421	475	206	200	201	408	352	365	381	361	407
Orta Kök	421	415	397	336	532	411	203	209	219	374	448	327	383	405	431
Alt Kep	421	372	378	303	427	427	212	205	224	410	436	380	365	411	408

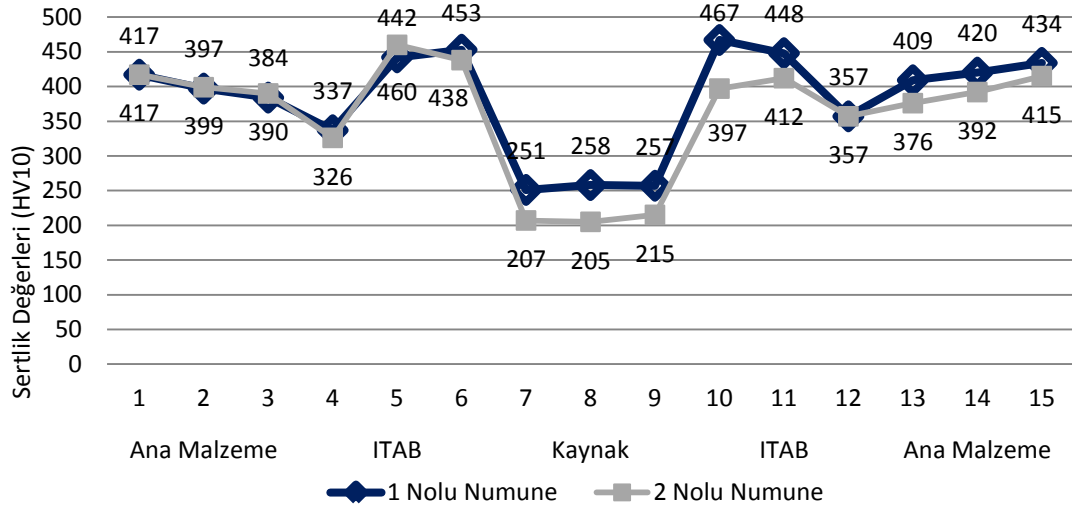


Şekil 7.21. 2 nolu numunenin bölgelere göre sertlik dağılımı.

İki numune arasında karşılaştırılan sertlik değerlerinin, Şekil 7.22’teki grafikte görüleceği üzere, kaynak metalindeki değerler hariç diğer bölgelerde neredeyse birbirleriyle tam örtüştüğü görülüyor. Buradan hareketle, zırh çeliklerinin ferritik ve östenitik yapıya kaynak dolgu metalleri ile kaynağında, sabit kaynak parametreleri ve koruyucu gaz ortamı altında farklı mikro yapıya sahip kaynak dolgu metali ile yapılan kaynaklarda, sertlik değerlerinin ısı tesiri altındaki bölgede ve ısı etkisiyle temperlenmiş bölgede hemen hemen eşit olacağı yorumu yapılabilir. Kaynağın kaynak dolgu metali sertliği değerleri ise beklendiği gibi ferritik yapıya kaynak dolgu metalinde östenitik yapıya kaynak dolgu metaline oranla daha yüksek olduğu ancak her iki kaynak dolgu malzemesinin kaynak sonrası sertliğinin de, sert yapıdaki zırh çeliği ana malzemesinden, yaklaşık yarı yarıya düşük olduğu görüldü.

Tablo 7.5. Sertlik değerlerinin ortalamaları ile oluşmuş sonuçlar.

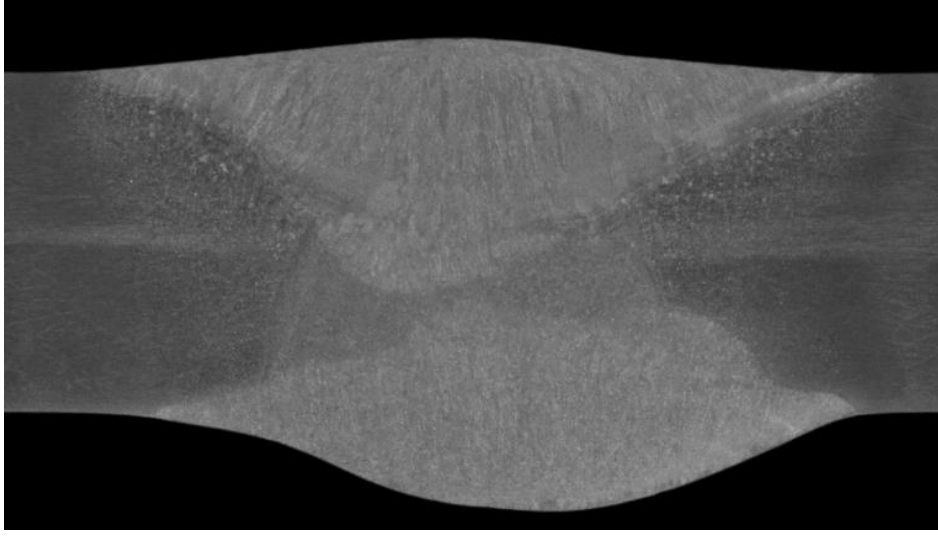
No	Ana Malzeme			ITAB			Kaynak			ITAB			Ana Malzeme		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	417	397	384	337	442	453	251	258	257	467	448	357	409	420	434
2	417	399	390	326	460	438	207	205	215	397	412	357	376	392	415



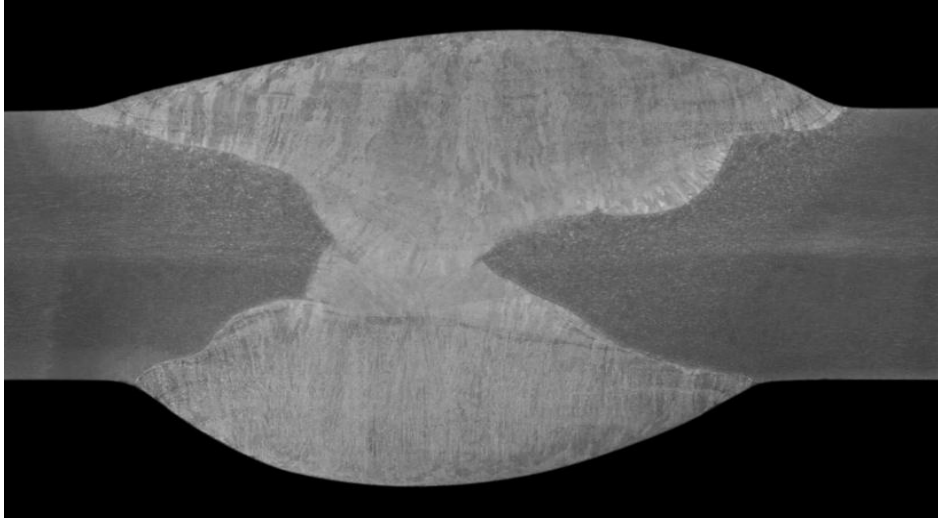
Şekil 7.22. İki kaynaklı numunenin bölgelere göre sertlik dağılımı ortalamaları karşılaştırması.

7.2.4. Makro/Mikro test sonuçları

Makro test numuneleri, numune inceleme yüzeyleri 80-220-480-600-800-1000-1200 numaralı zımparalarla sırasıyla zımparalanmış ve 6 μ , 3 μ , 1 μ ' luk keçelerle çizik kalmayacak şekilde parlatma yapılmıştır. Parlatma işlemi tamamlanan numuneler birleşim bölgelerinin incelenebilmesi amacıyla, numune 1 için %3 HNO₃ özeltisi ile ve numune 2 için 10 ml HNO₃ ile 30 ml HCL özeltisi ile dağlandıktan sonra makro yapı fotoğrafları çekilmiştir. Parlatılmış ve dağlanmış numunelerden elde edilen makro görüntüler Şekil 7.23'de ve Şekil 7.24'te gösterilmiştir. Makro yapı numuneleri incelendiğinde kök paso ve kapak pasosu ve arkası çevrilen test parçasına atılmış diğer kapak pasosu rahatlıkla görülebilmektedir.

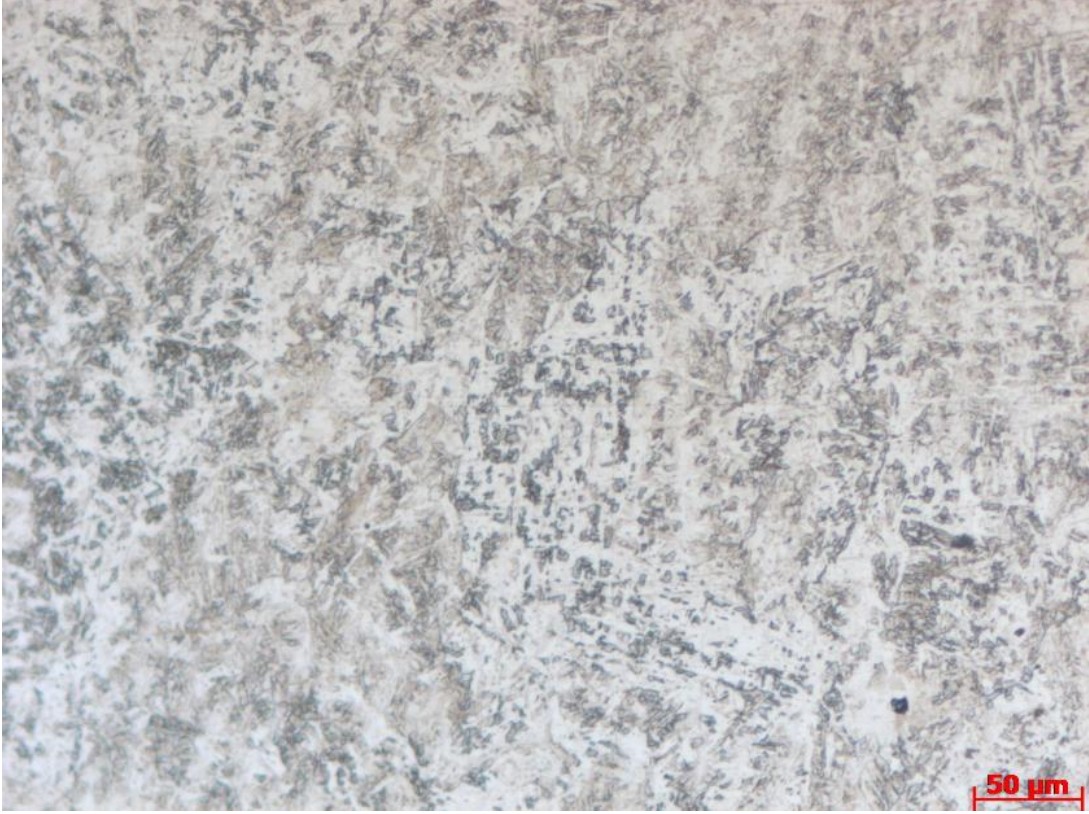


Şekil 7.23. 1 nolu numuneye ait makro görüntüsü.

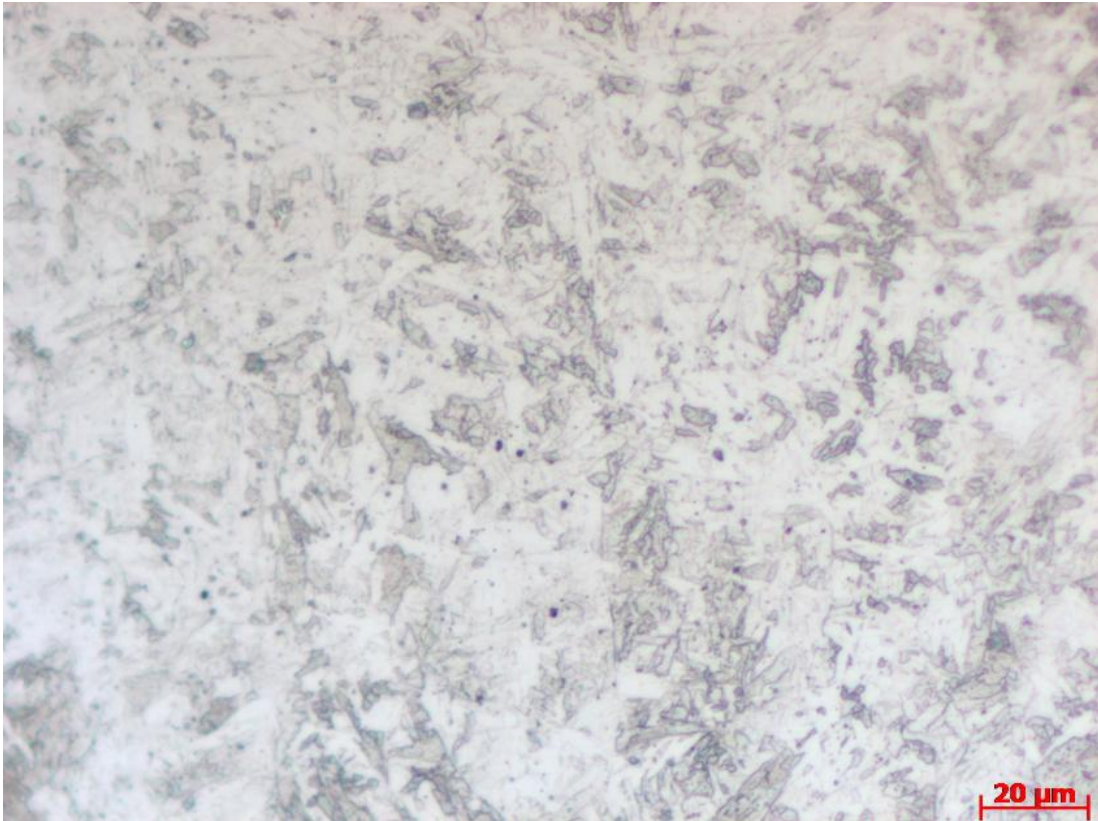


Şekil 7.24. 2 nolu numuneye ait makro görüntüsü.

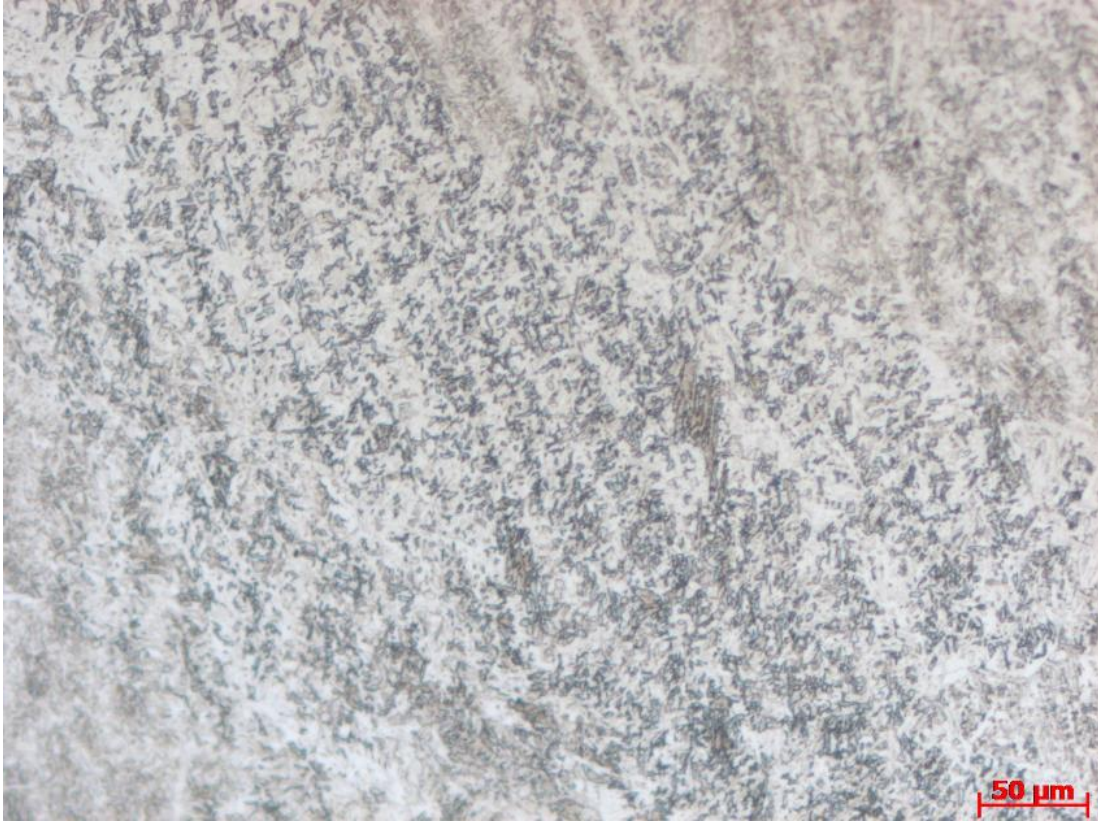
Ferritik yapıdaki kaynak dolgu metali ile birleştirilen 1 numaralı numunenin mikro yapısı incelendiğinde ana metalin martenzitik yapısı görülmektedir. Kaynak bölgesine doğru ilerledikçe temperlenmiş martenzitik yapıların varlığı görülüyor. Mikro yapı görüntülerinde ısı tesiri altındaki bölgedeki ergime hattında martenzitik ten ferrit ve beynit yapılarına geçiş görülüyor. Kaynak sonrasındaki kaynak metalinin yapısı incelendiğinde ise iğnemsî beynit ve ferrit matriksin yanı sıra dendrit ve beynit oluşumları da görülüyor. Numunelerden alınan mikro yapı görüntüleri Şekil 7.25, 7.26, 7.27, 7.28, 7.29, 7.30, 7.31, 7.32, 7.33, 7.34, 7.35, 7.36, 7.37, 7.38, 7.39, 7.40, 7.41, 7.42, 7.43, 7.44, 7.45, 7.46, 7.47’de gösterilmiştir.



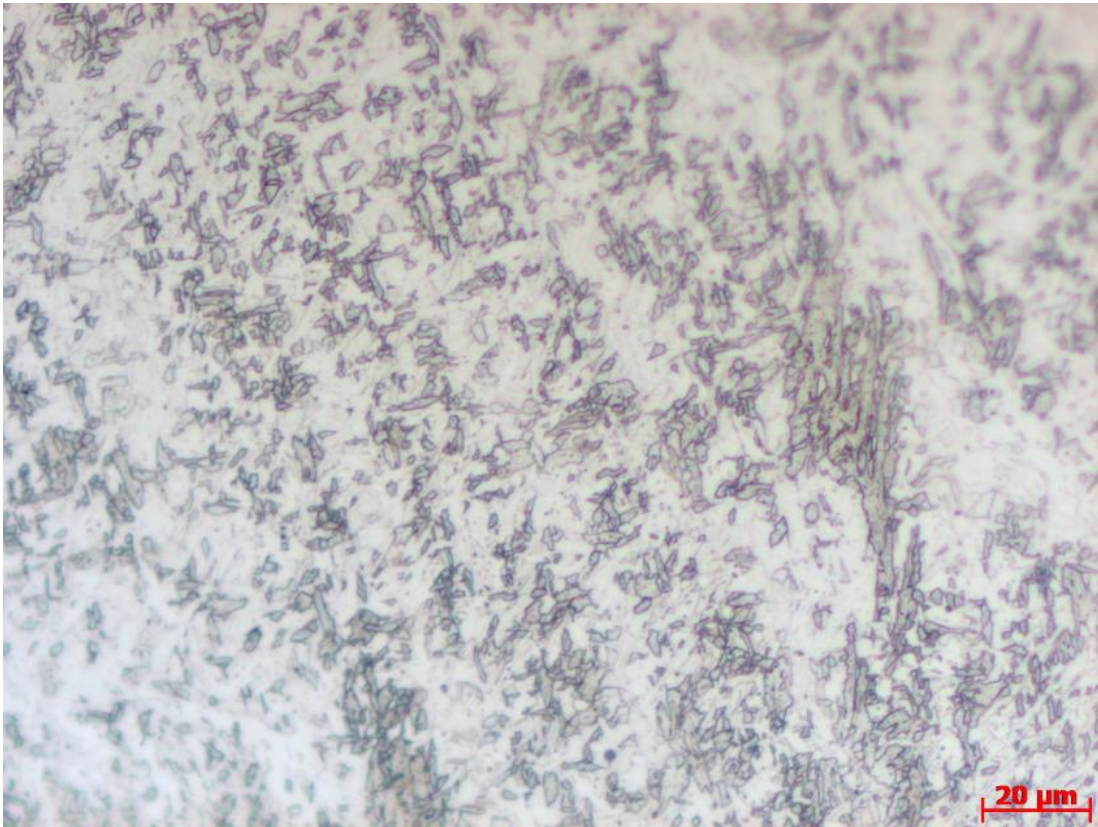
Şekil 7.25. 1 nolu numune kaynak kepi bölgesi kaynak metali 200X mikro görüntüsü.



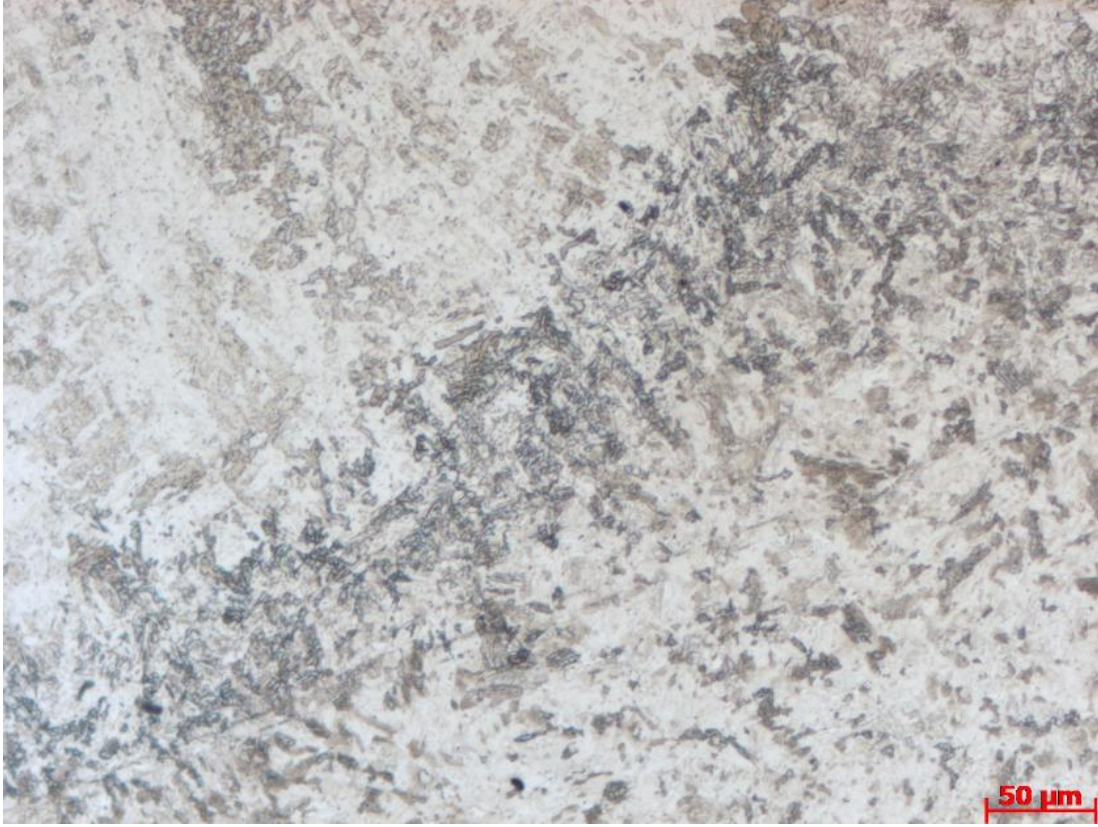
Şekil 7.26. 1 nolu numune kaynak kepi bölgesi kaynak metali 500X mikro görüntüsü.



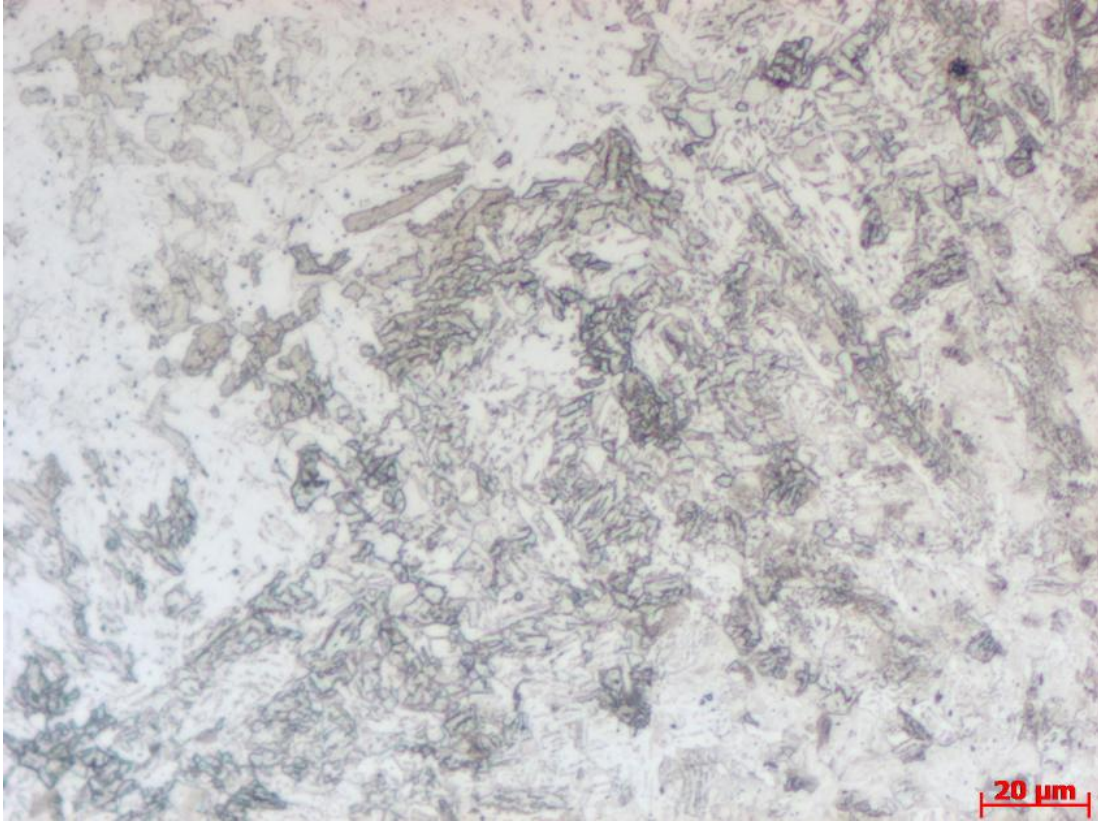
Şekil 7.27. 1 nolu numune kaynak kökü bölgesi kaynak metali 200X mikro görüntüsü.



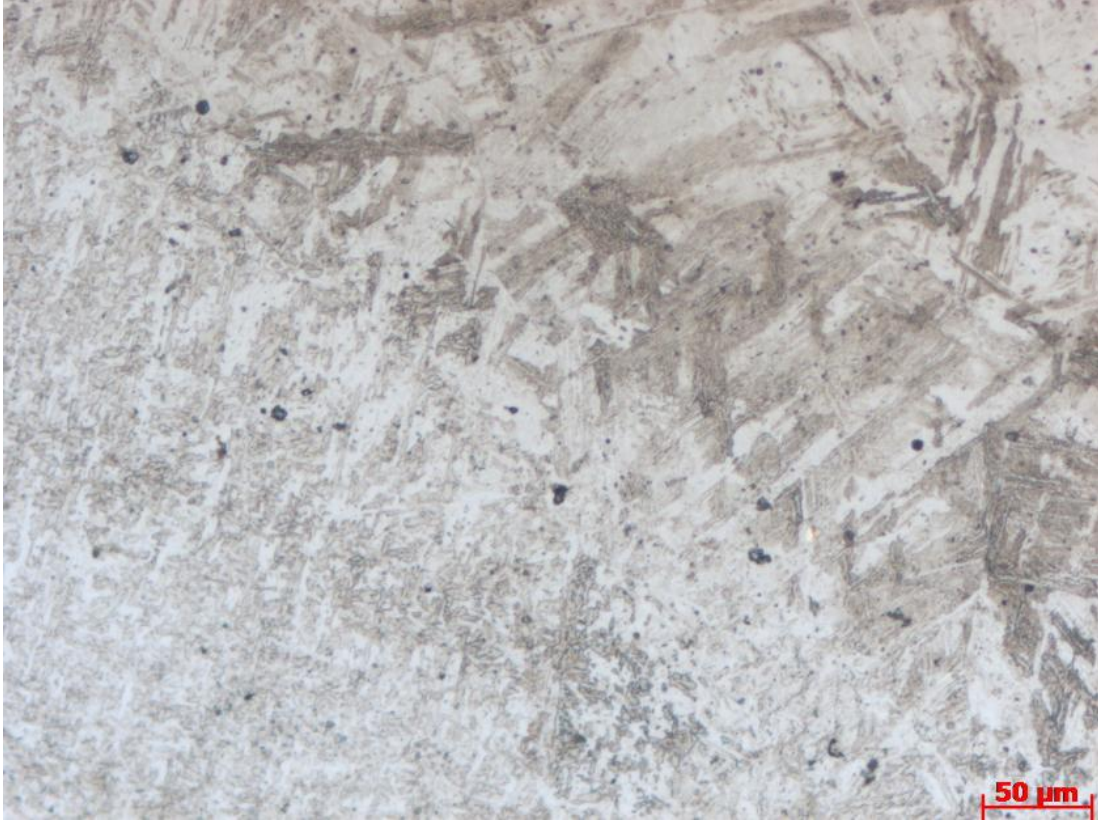
Şekil 7.28. 1 nolu numune kaynak kökü bölgesi kaynak metali 500X mikro görüntüsü.



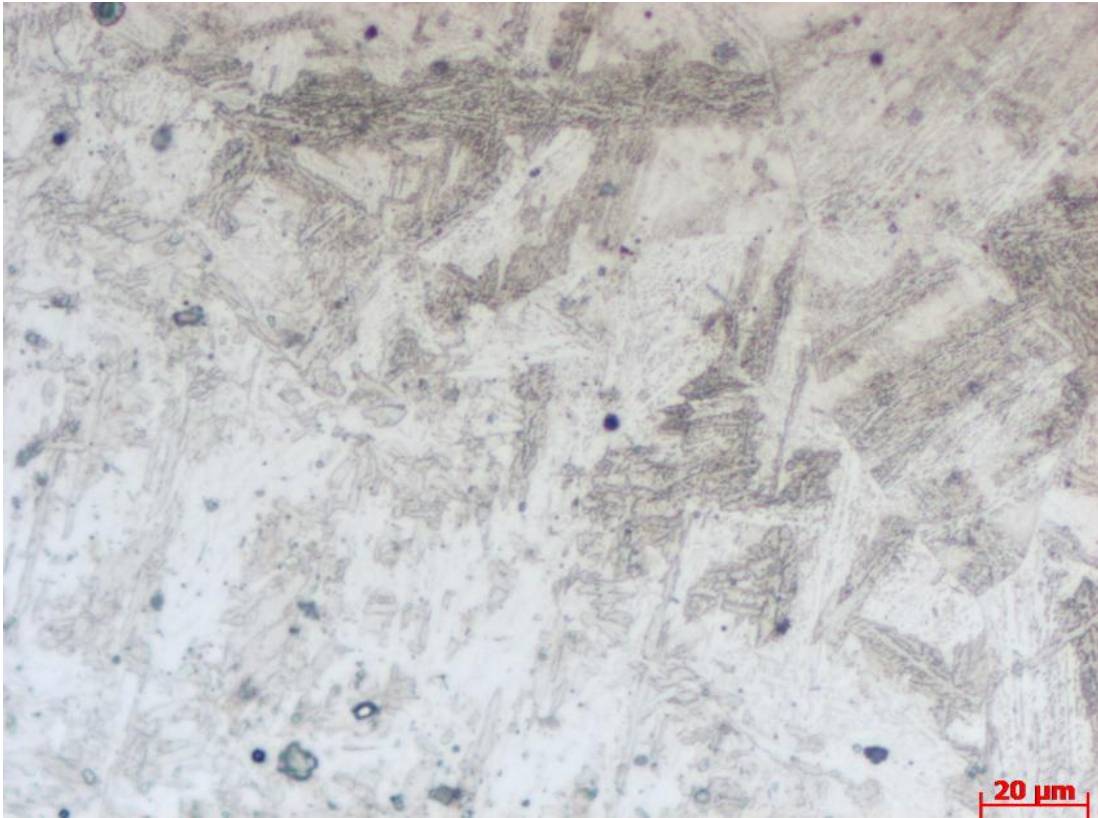
Şekil 7.29. 1 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü.



Şekil 7.30. 1 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü.



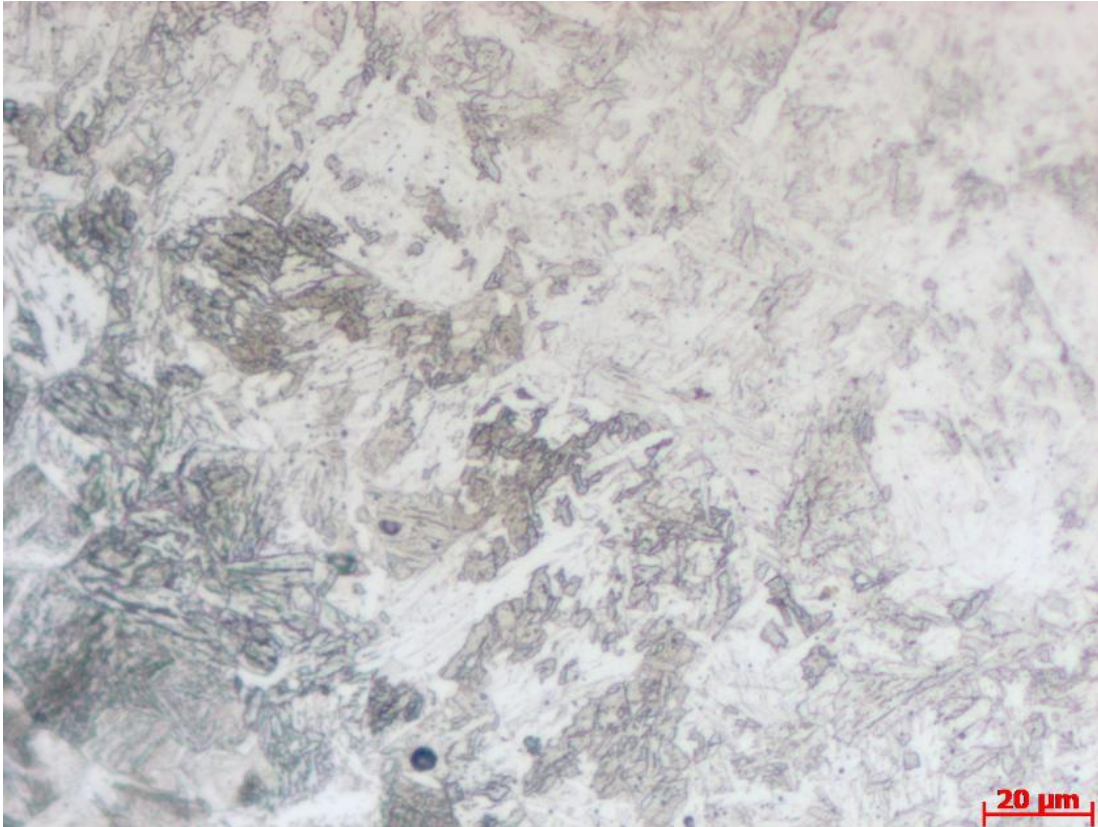
Şekil 7.31. 1 nolu numune sağ kök ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü.



Şekil 7.32. 1 nolu numune sağ kök ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü.



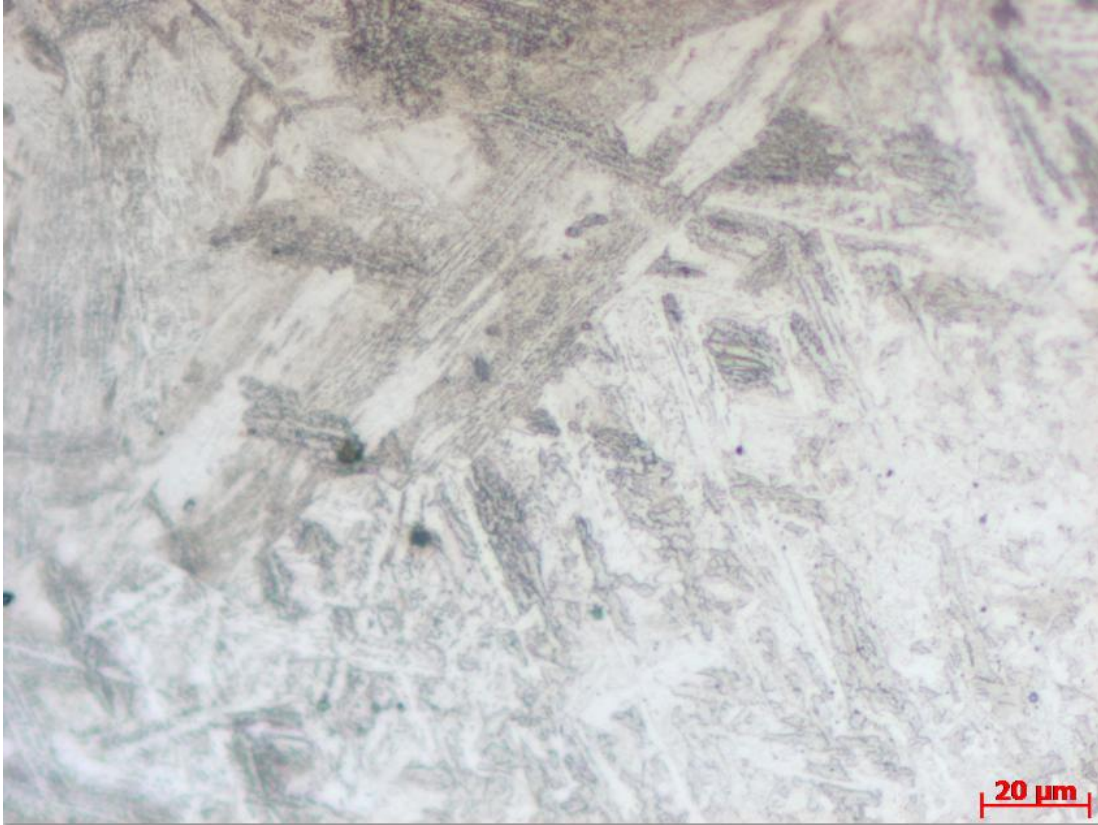
Şekil 7.33. 1 nolu numune sol kep ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü.



Şekil 7.34. 1 nolu numune sol kep ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü.



Şekil 7.35. 1 nolu numune sol kök ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü.

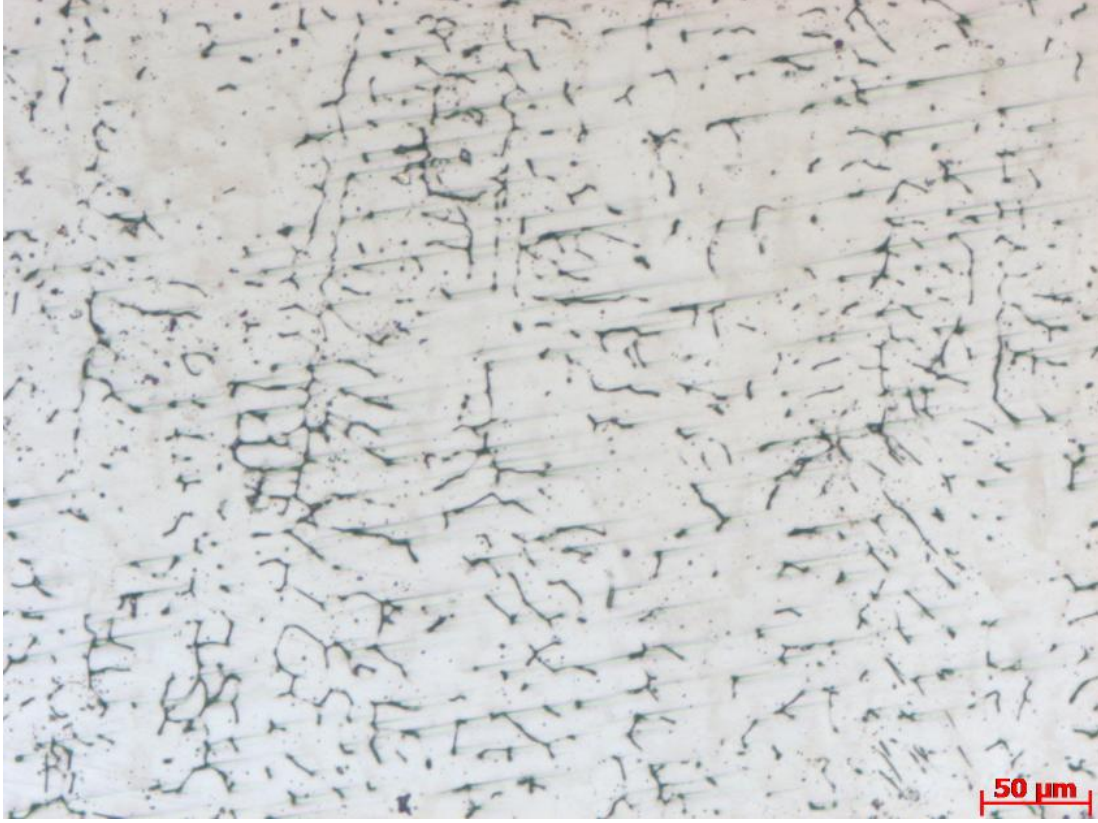


Şekil 7.36. 1 nolu numune sol kök ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü.

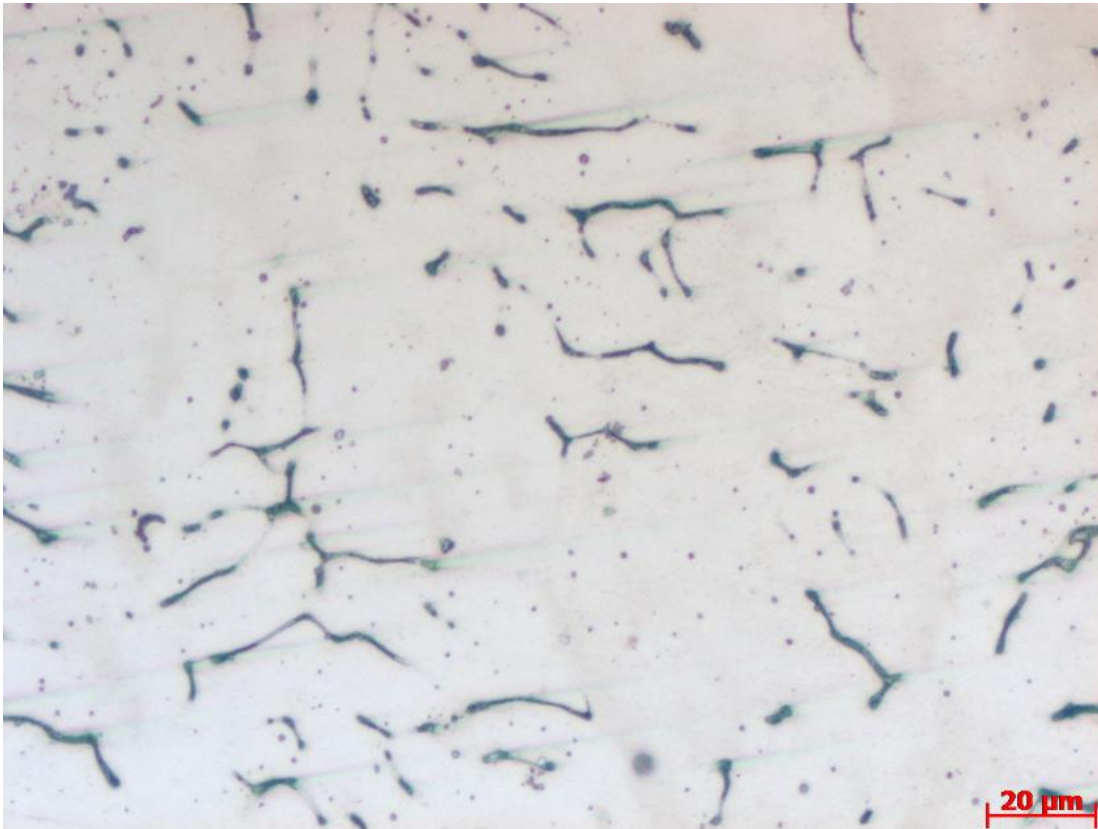
Östenitik yapıdaki kaynak dolgu metali ile birleştirilen 2 numaralı numunenin mikro yapısı incelendiğinde, kaynak bölgesine doğru ilerlerken temperlenmiş martenzitik yapılar görülüyor, sertlik testiyle saptanan değerlerde de bu bölgedeki nispeten daha yumuşak yapı tespit edilmiştir. Ergime hattında ise küçük oranda delta-ferrit ve ağırlıklı östenitik yapı görülüyor. Kaynak sonrasındaki kaynak metalinin yapısı incelendiğinde ise yine östenitik matriksin içinde yayılmış ve ergime hattındaki oranla daha yüksek oranda delta-ferrit yapıları görülüyor. Östenitik kaynak metali yapısı, yapılan sertlik testinde en düşük sertliğe sahip bölge olarak kendini gösteriyor. Kaynak dikişinde belirlenen östenitik matrisli ferrit yapılarının, M.Balakrishnan ve çalışma arkadaşlarının 2012 yılında yapmış oldukları, kaynaklı zırh çeliklerinde östenitik ara paso uygulamalarının balistik performansa etkileri [92], çalışmalarındaki mikro incelemelerle örtüştüğü görülmüştür.



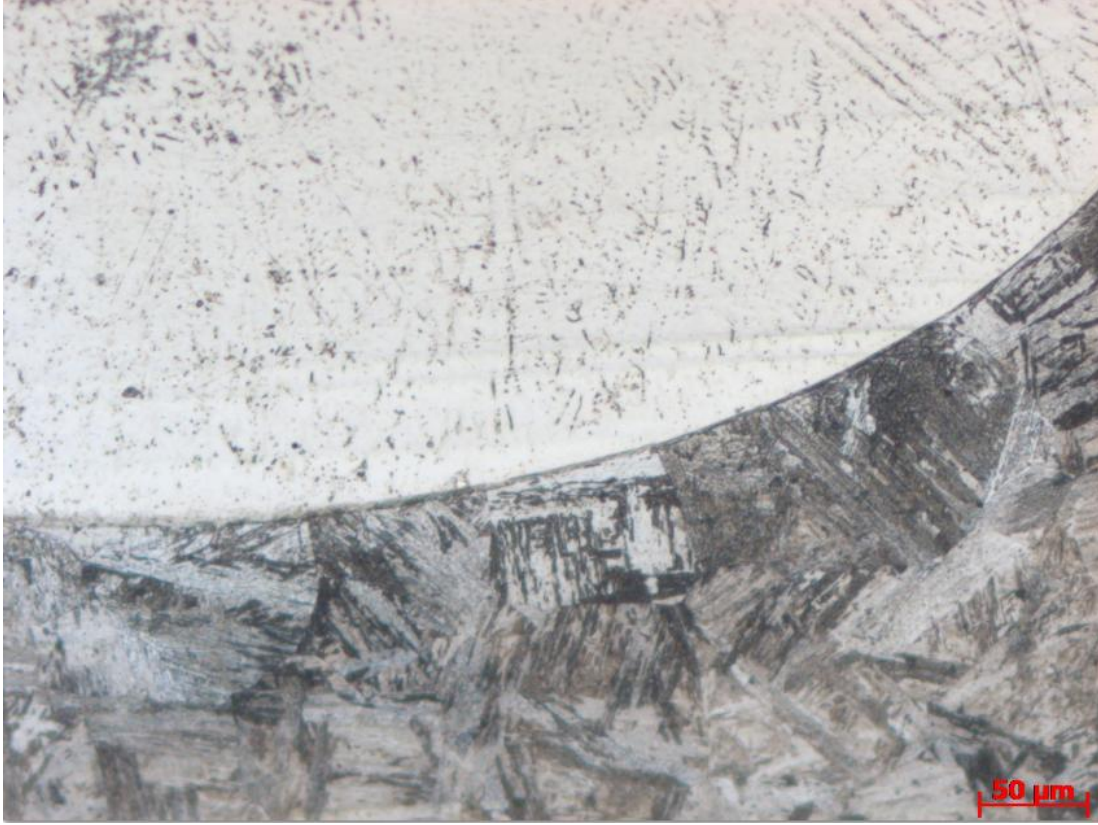
Şekil 7.37. 2 nolu numune kaynak kepi bölgesi kaynak metali 200X mikro görüntüsü.



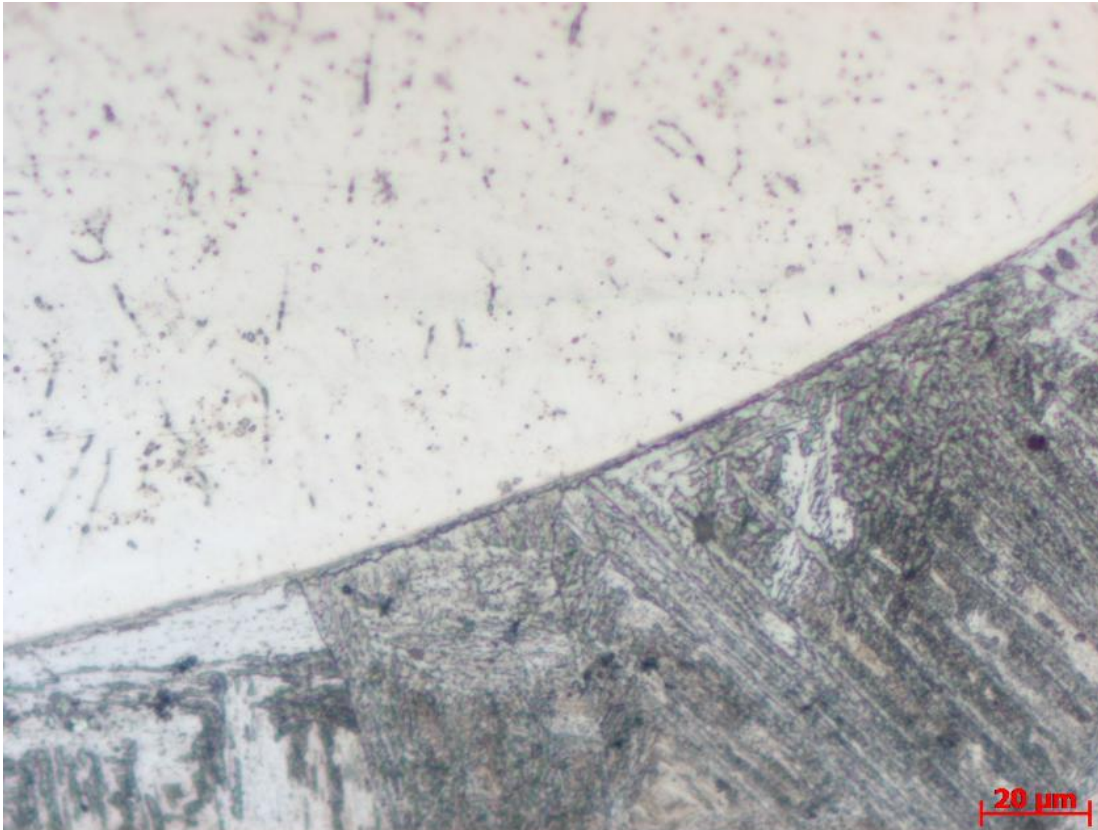
Şekil 7.38. 2 nolu numune kaynak kökü bölgesi kaynak metali 200X mikro görüntüsü.



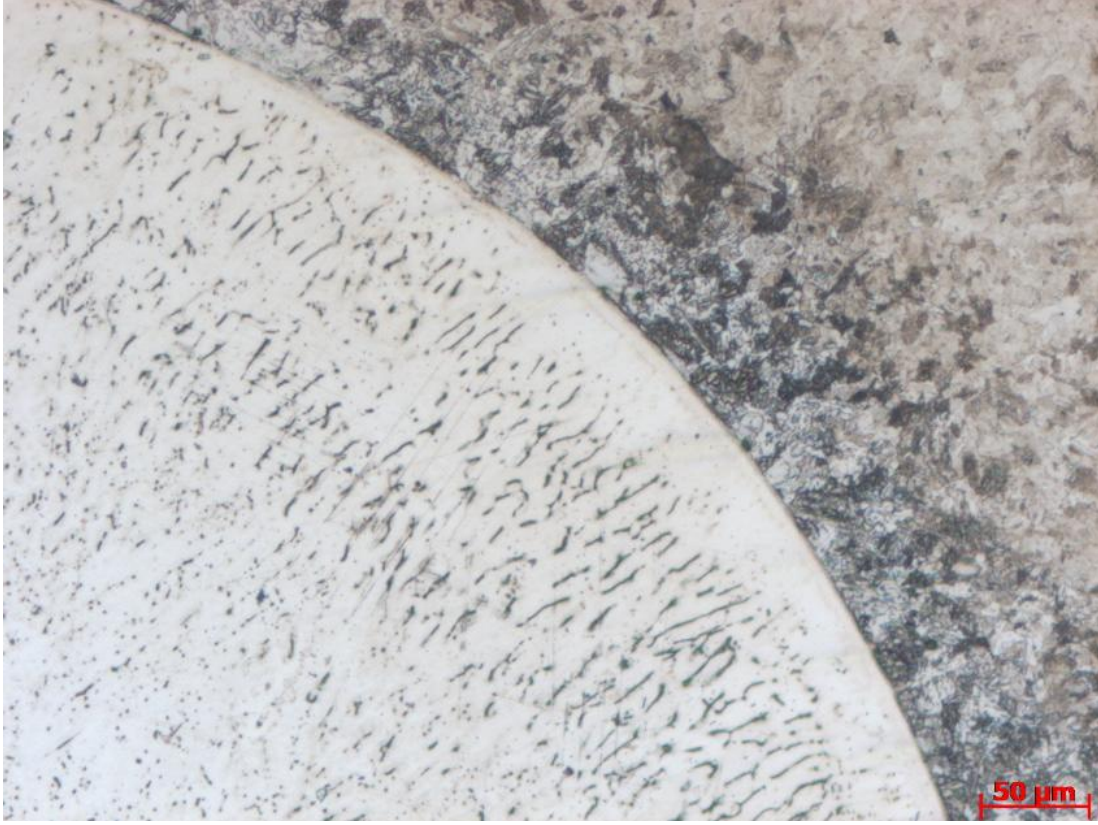
Şekil 7.39. 2 nolu numune kaynak kökü bölgesi kaynak metali 500X mikro görüntüsü.



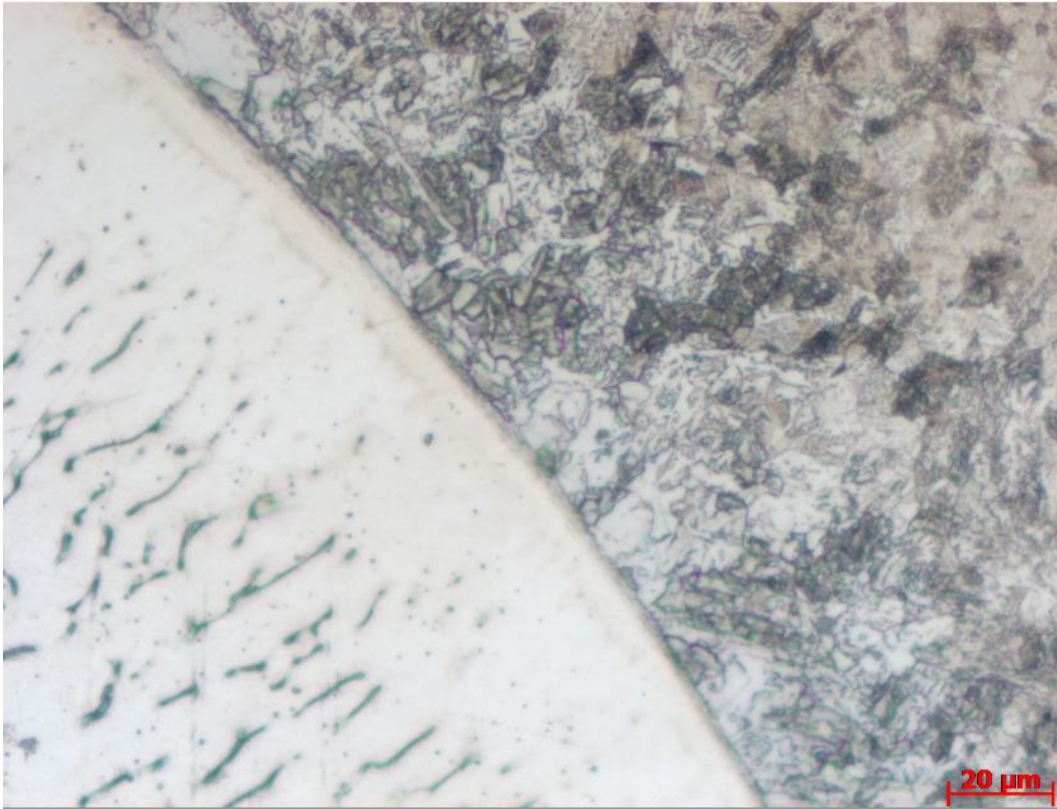
Şekil 7.40. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü.



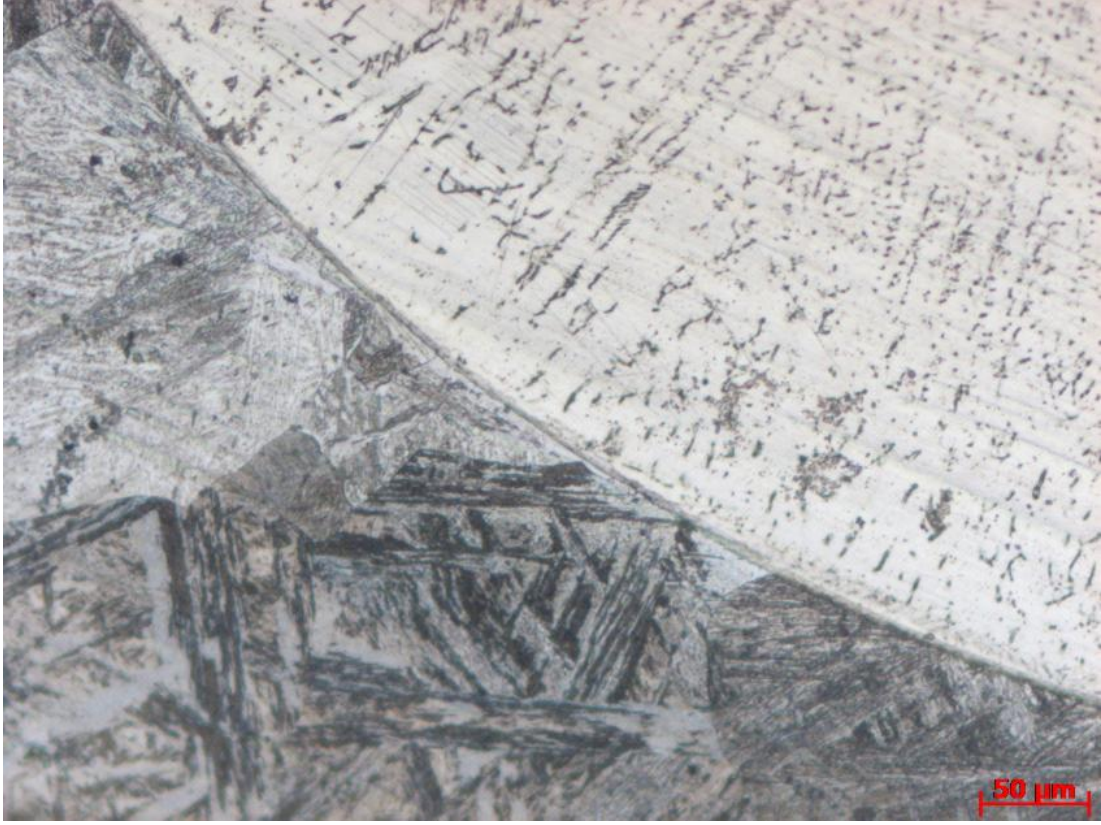
Şekil 7.41. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü.



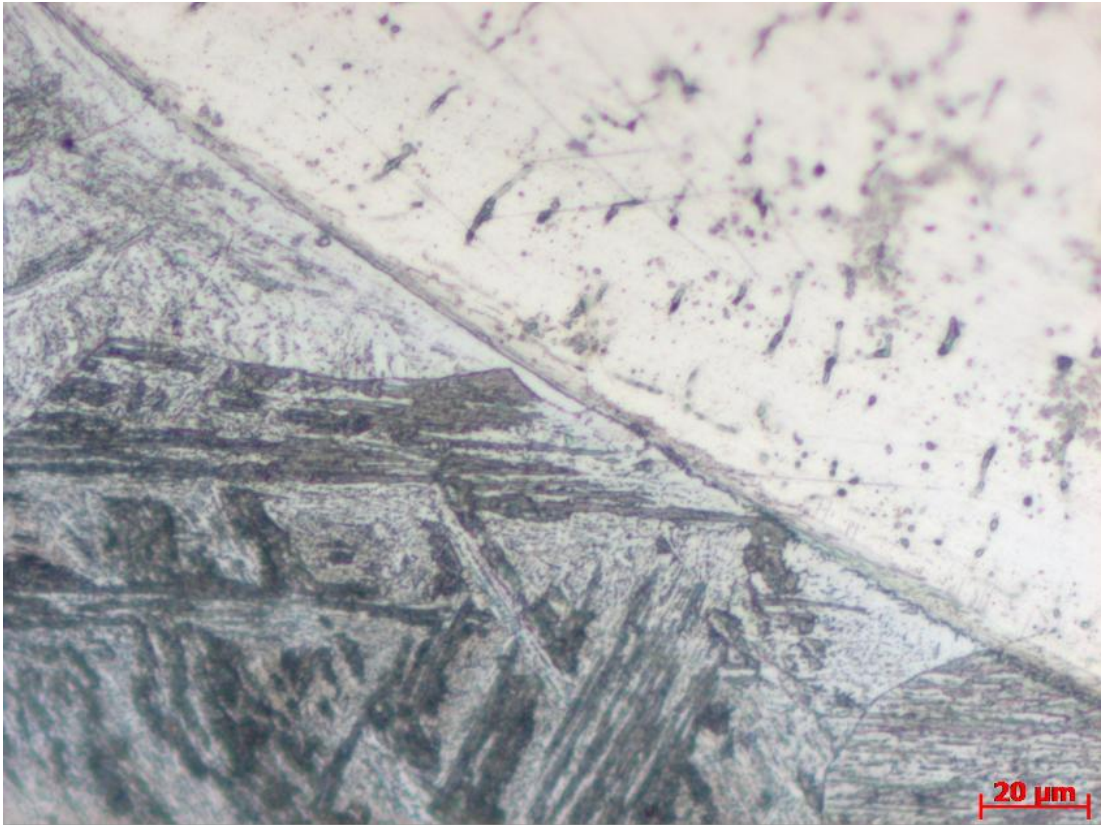
Şekil 7.42. 2 nolu numune sağ kök ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü.



Şekil 7.43. 2 nolu numune sağ kök ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü.



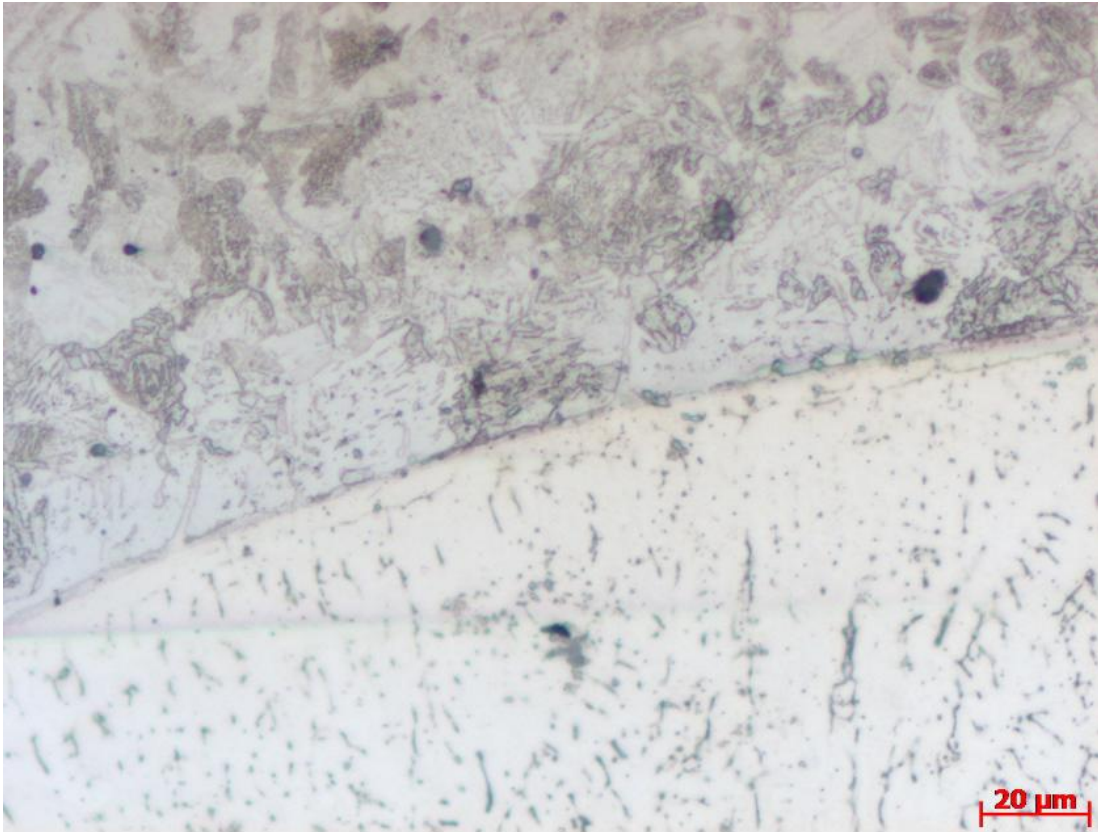
Şekil 7.44. 2 nolu numune sol kep ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü.



Şekil 7.45. 2 nolu numune sol kep ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü.

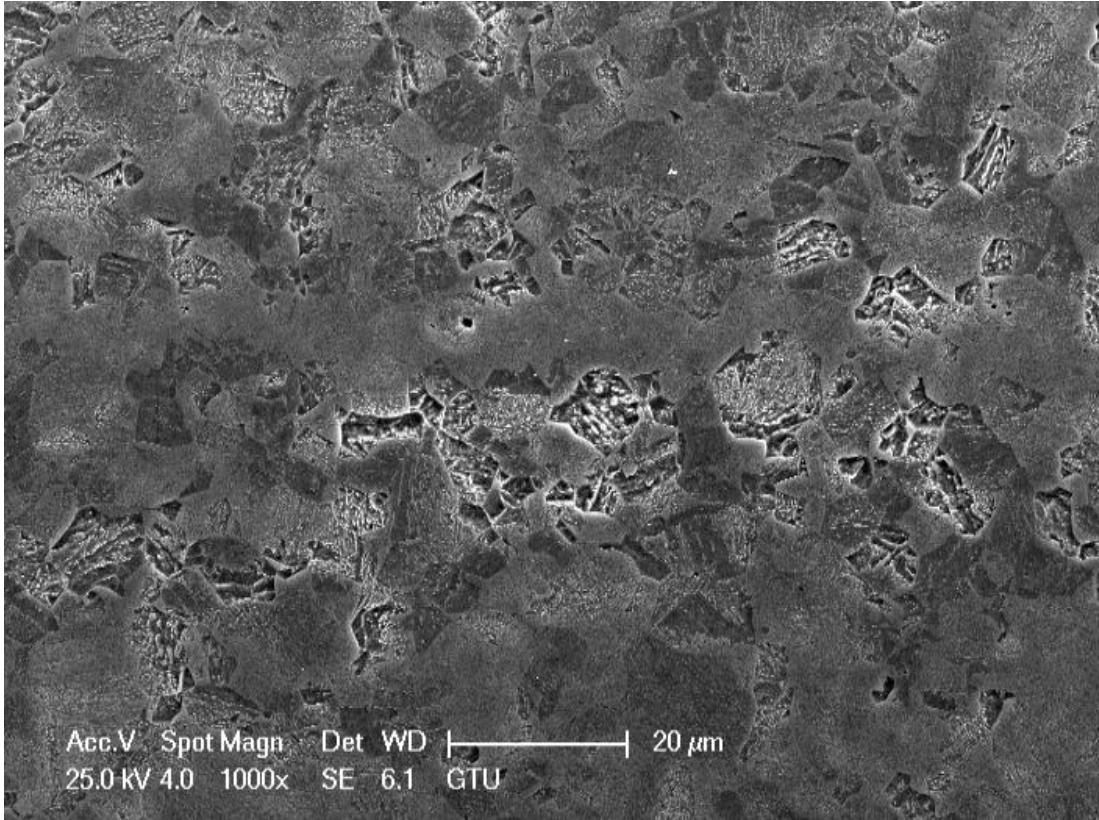


Şekil 7.46. 2 nolu numune sol kök ITAB bölgesi 200X mikro görüntüsü.

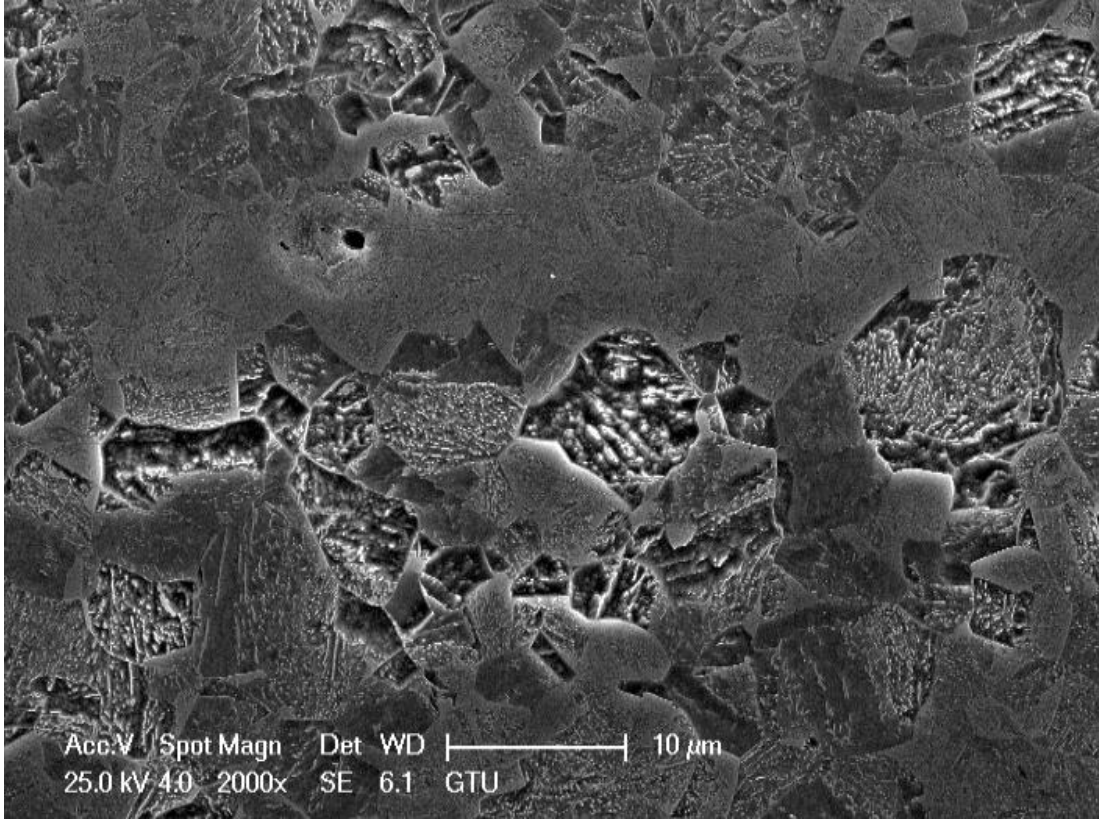


Şekil 7.47. 2 nolu numune sol kök ITAB bölgesi 500X mikro görüntüsü.

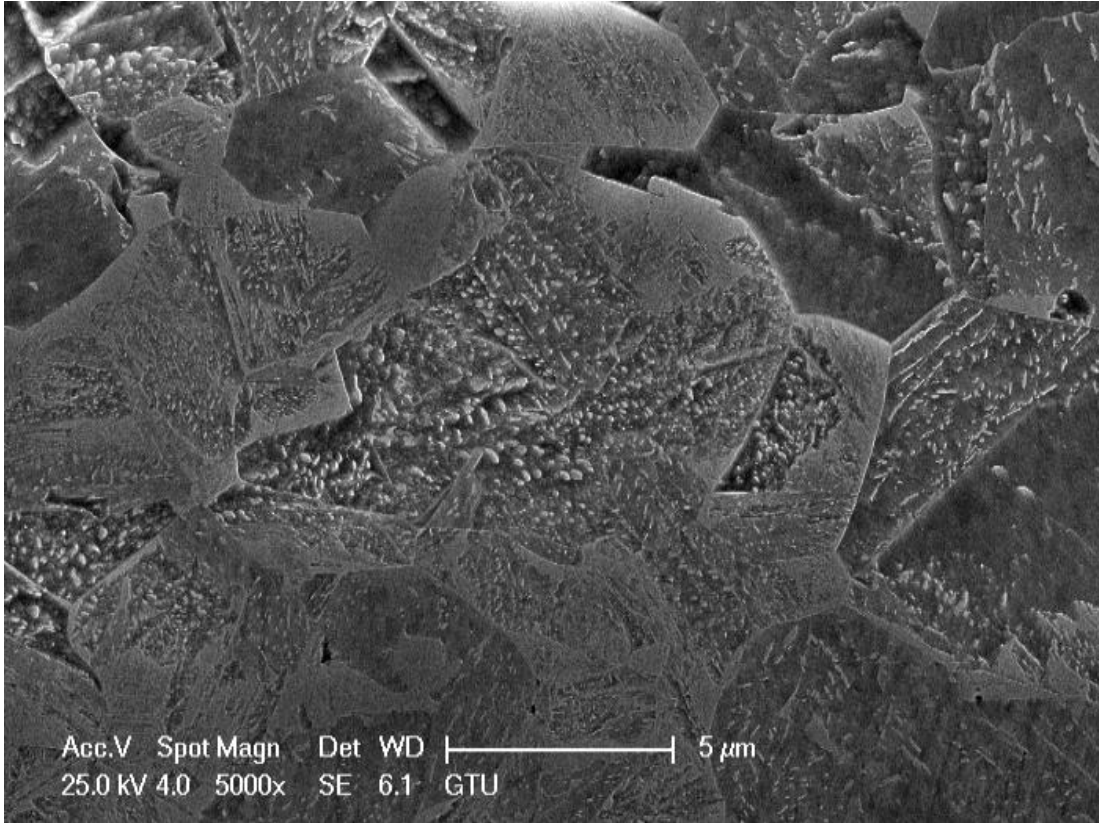
Mikro yapı incelemesindeki optik mikroskop görüntüleri, taramalı elektron mikroskobu görüntüleriyle desteklenerek daha detaylı bir inceleme sağlanmıştır. Şekil 7.48, 7.49, 7.50, 7.51, 7.52, 7.53, 7.54, 7.55, 7.56, 7.57, 7.58'deki ferritik kaynak dolgu metali ile kaynak yapılmış 1 numaralı numunenin elektron tarama mikroskobu görüntüleri incelendiğinde ana malzemedeki lata martenzit yapının ergime hattına doğru iğnemsiz martenzit yapıya dönüştüğü görülebilmektedir. SEM görüntülerinde ergime hattında martenzit, ferrit ve beynit yapıları görülüyor. Kaynak sonrasındaki kaynak metalinin yapısı incelendiğinde ise ve ferritik matrisin yanı sıra dendrit ve beynit oluşumları da görülmektedir.



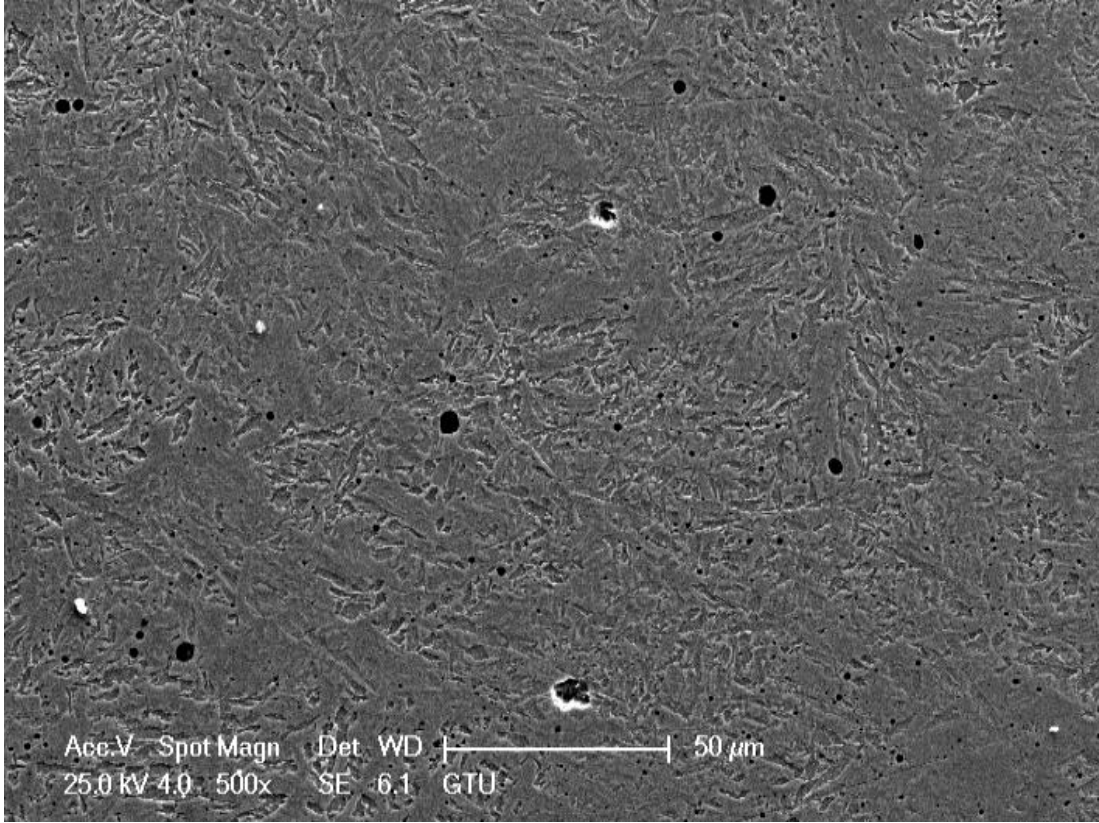
Şekil 7.48. 1 nolu numune ana malzeme bölgesi 1000X SEM görüntüsü.



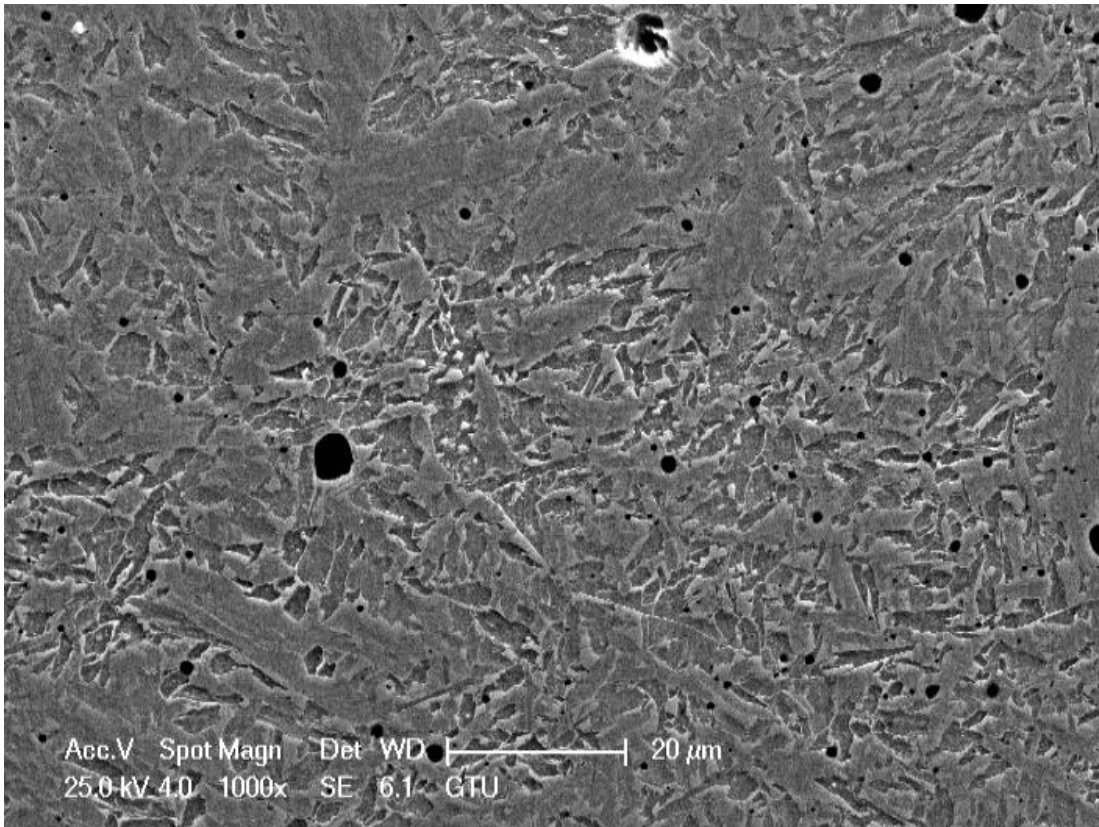
Şekil 7.49. 1 nolu numune ana malzeme bölgesi 2000X SEM görüntüsü.



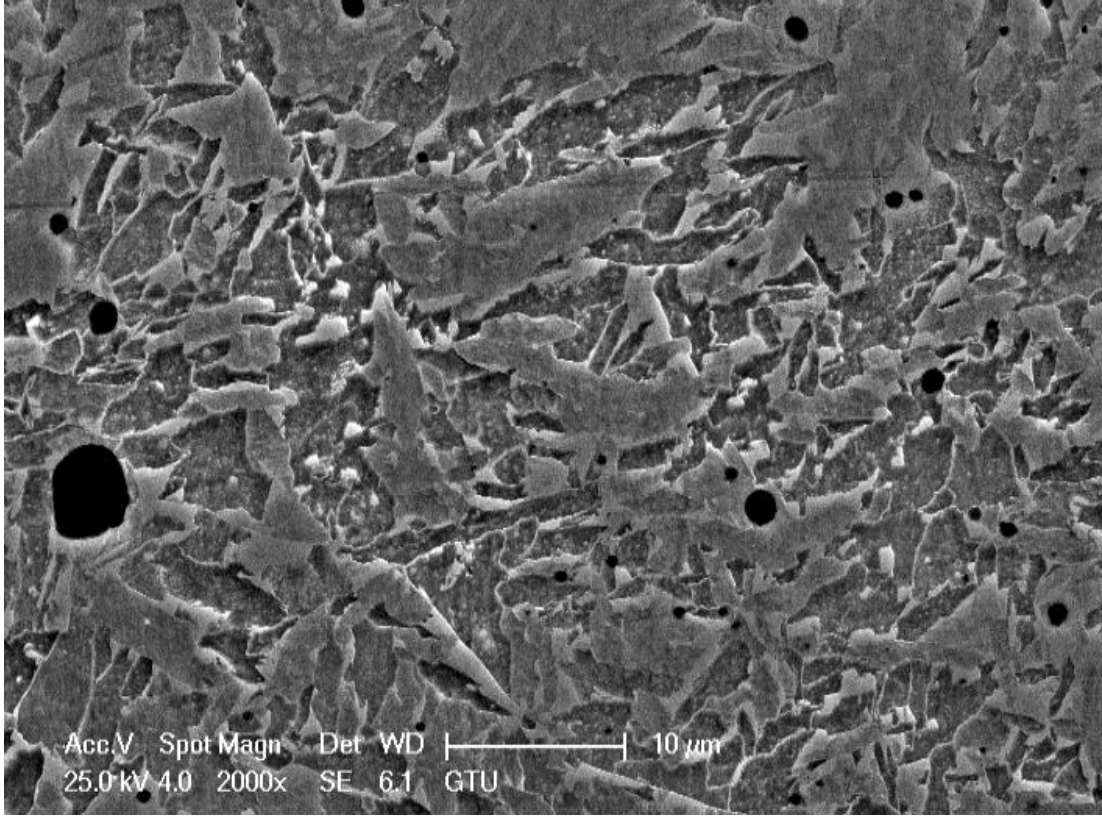
Şekil 7.50. 1 nolu numune ana malzeme bölgesi 5000X SEM görüntüsü.



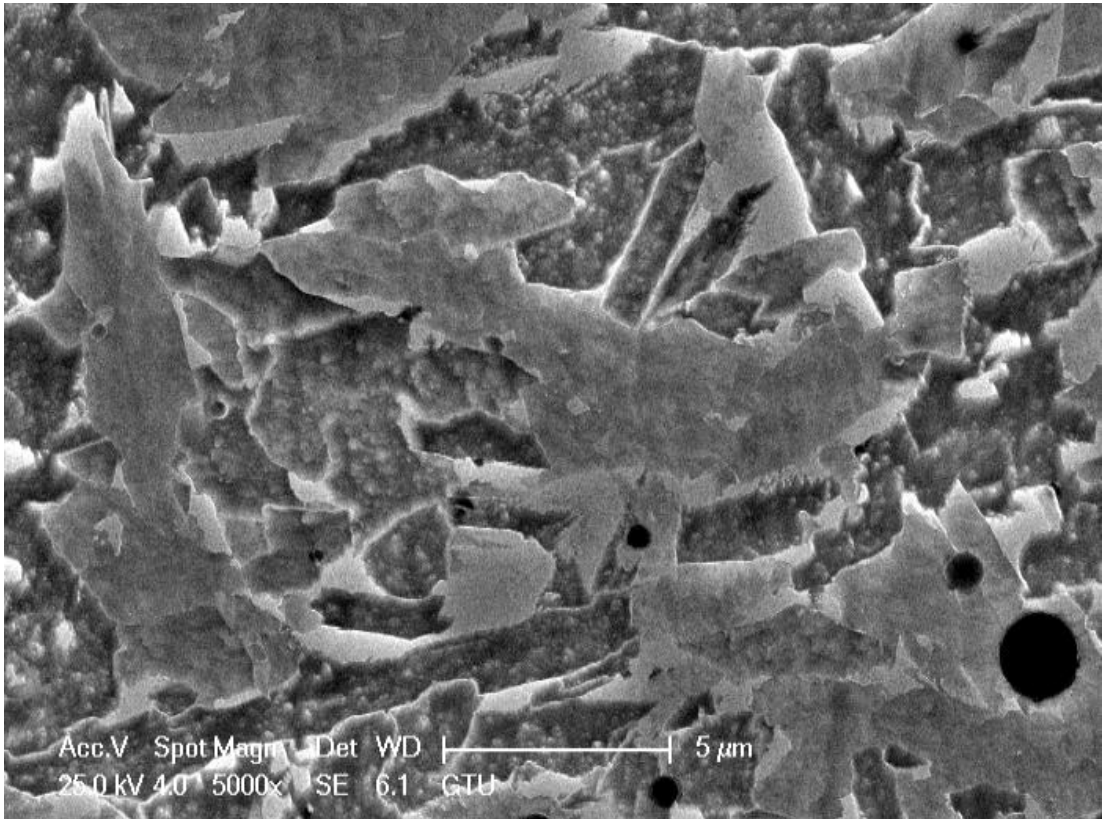
Şekil 7.51. 1 nolu numune kaynak metali bölgesi 500X SEM görüntüsü.



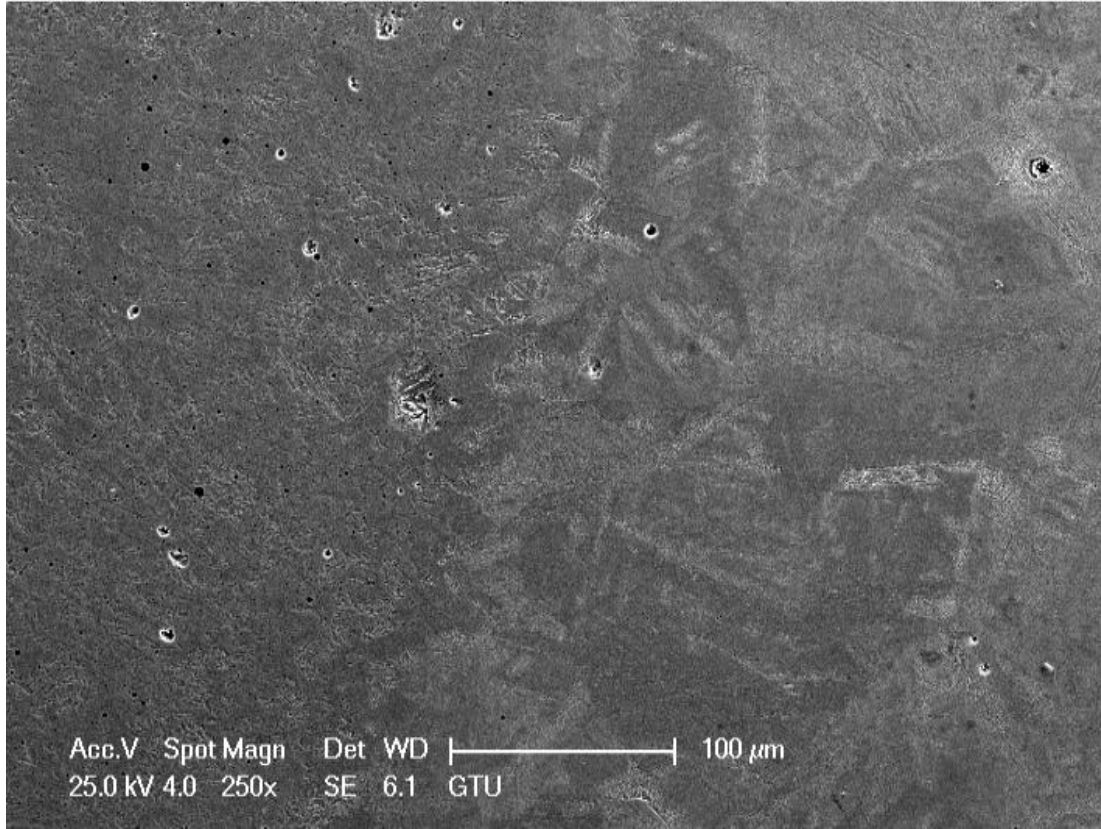
Şekil 7.52. 1 nolu numune kaynak metali bölgesi 1000X SEM görüntüsü.



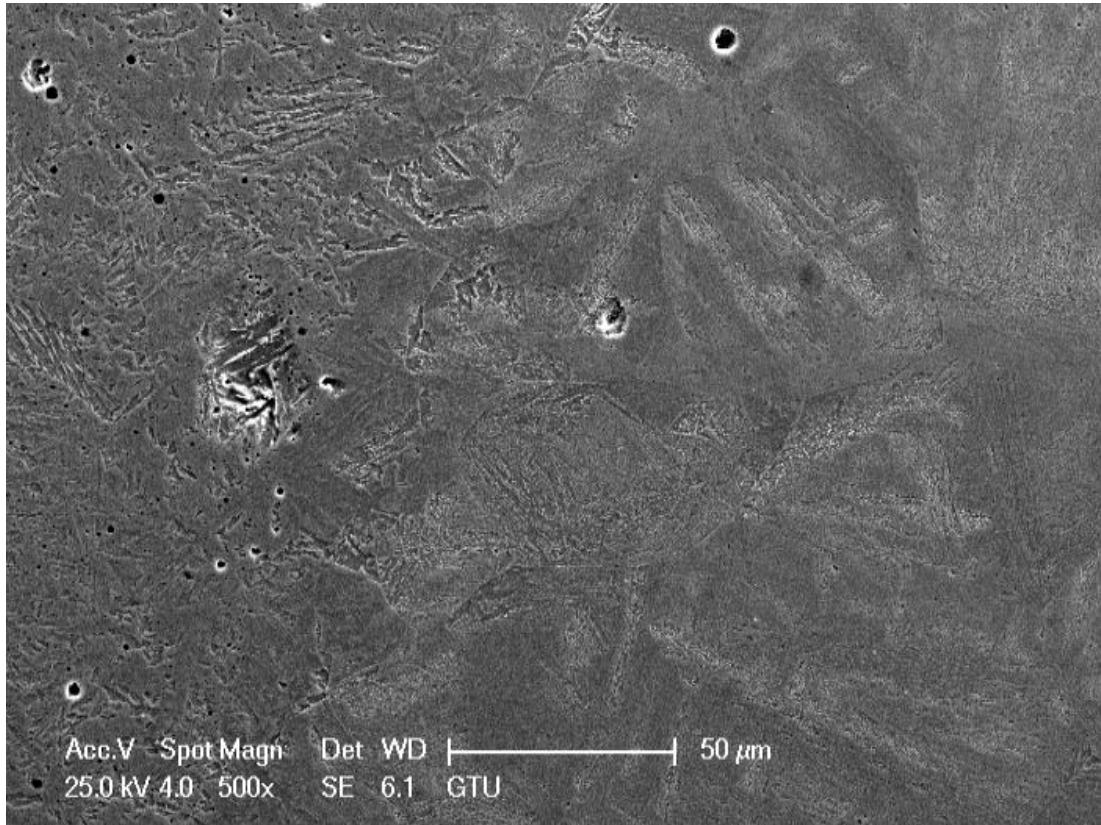
Şekil 7.53. 1 nolu numune kaynak metali bölgesi 2000X SEM görüntüsü.



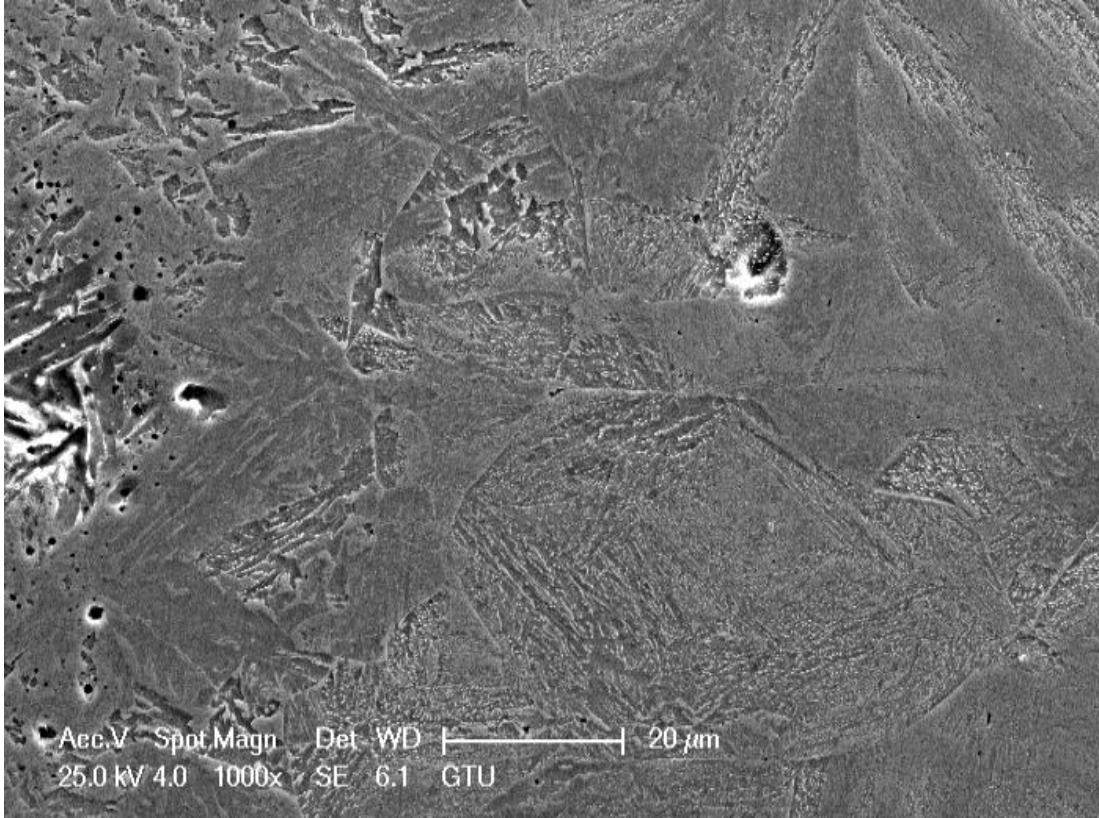
Şekil 7.54. 1 nolu numune kaynak metali bölgesi 5000X SEM görüntüsü.



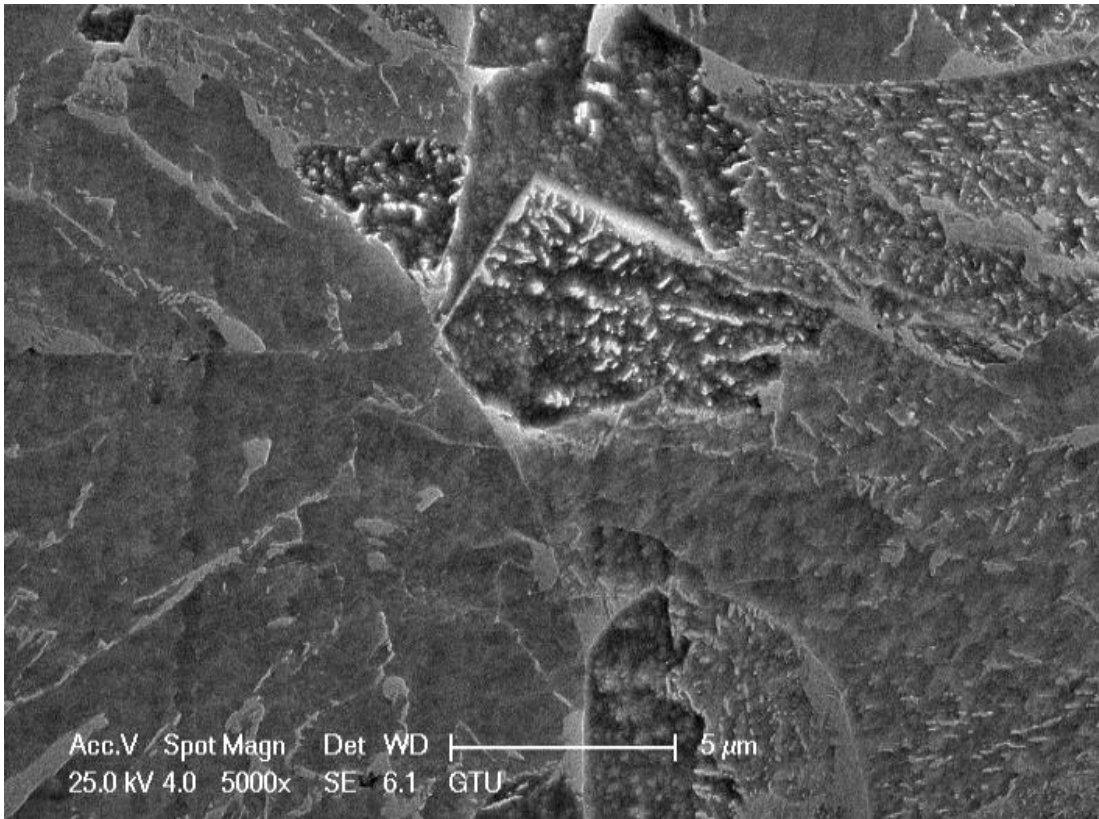
Şekil 7.55. 1 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 250X SEM görüntüsü.



Şekil 7.56. 1 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 500X SEM görüntüsü.

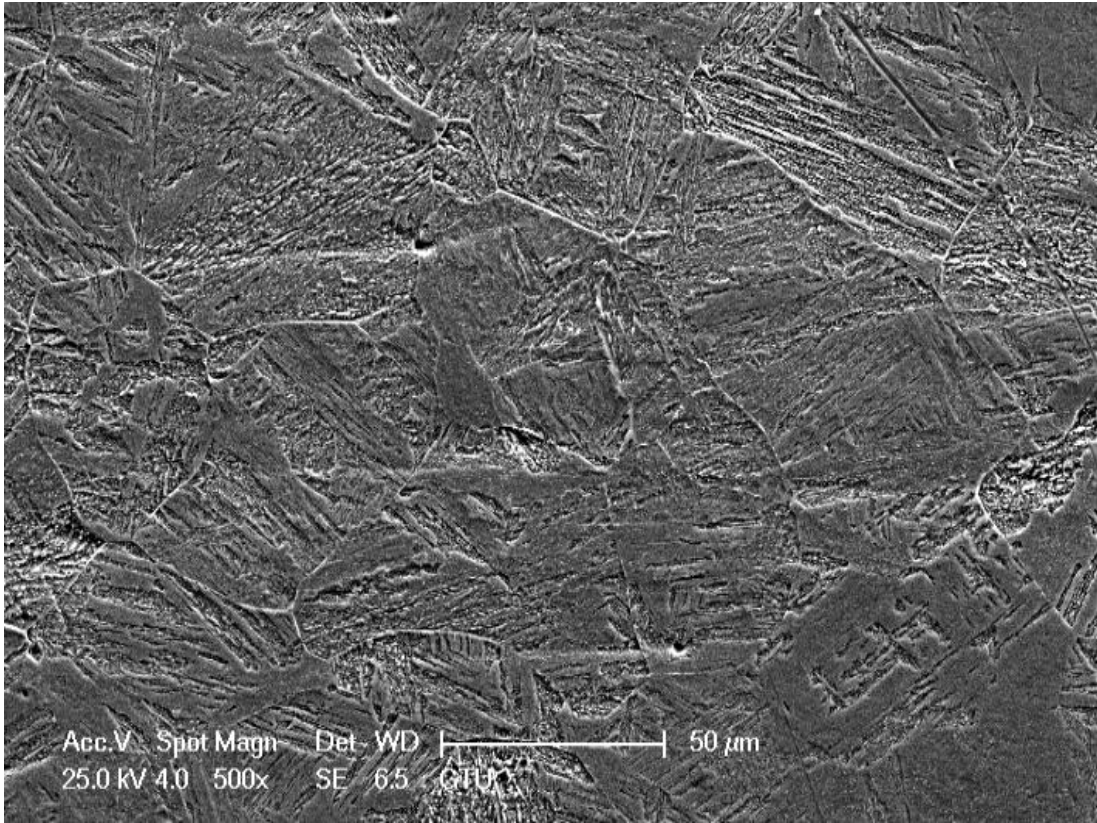


Şekil 7.57. 1 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 1000X SEM görüntüsü.

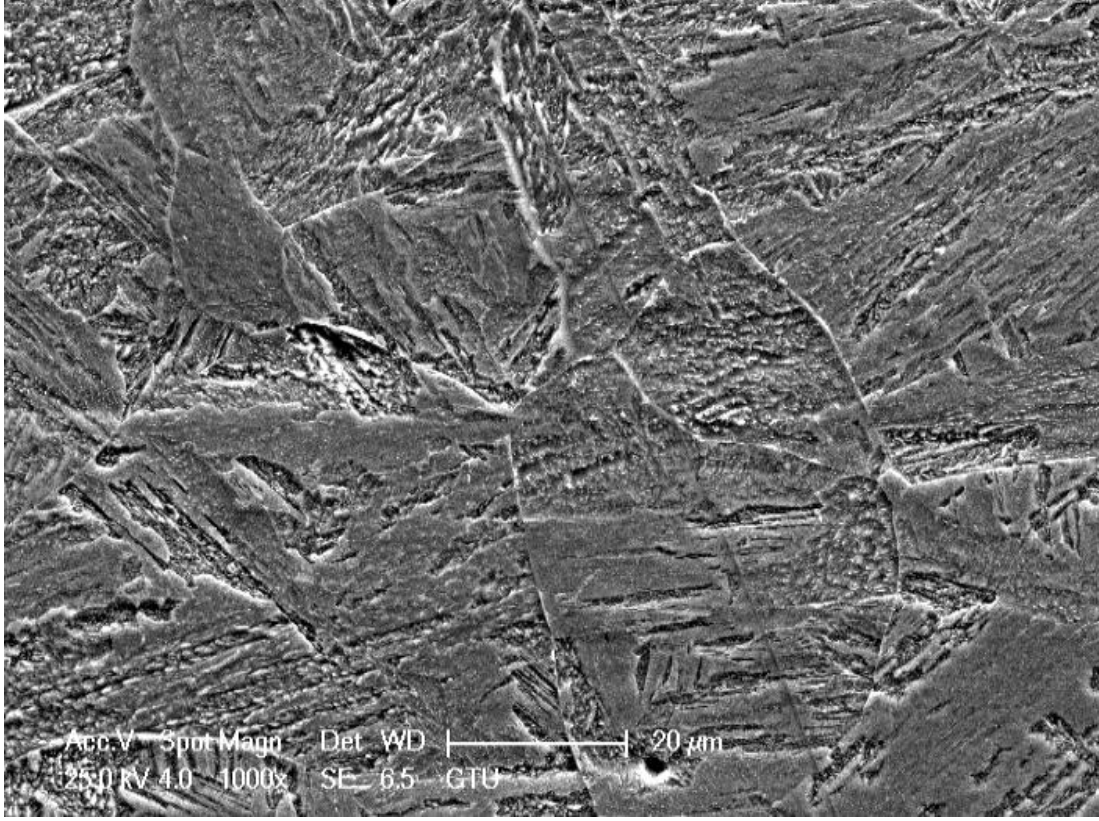


Şekil 7.58. 1 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 5000X SEM görüntüsü.

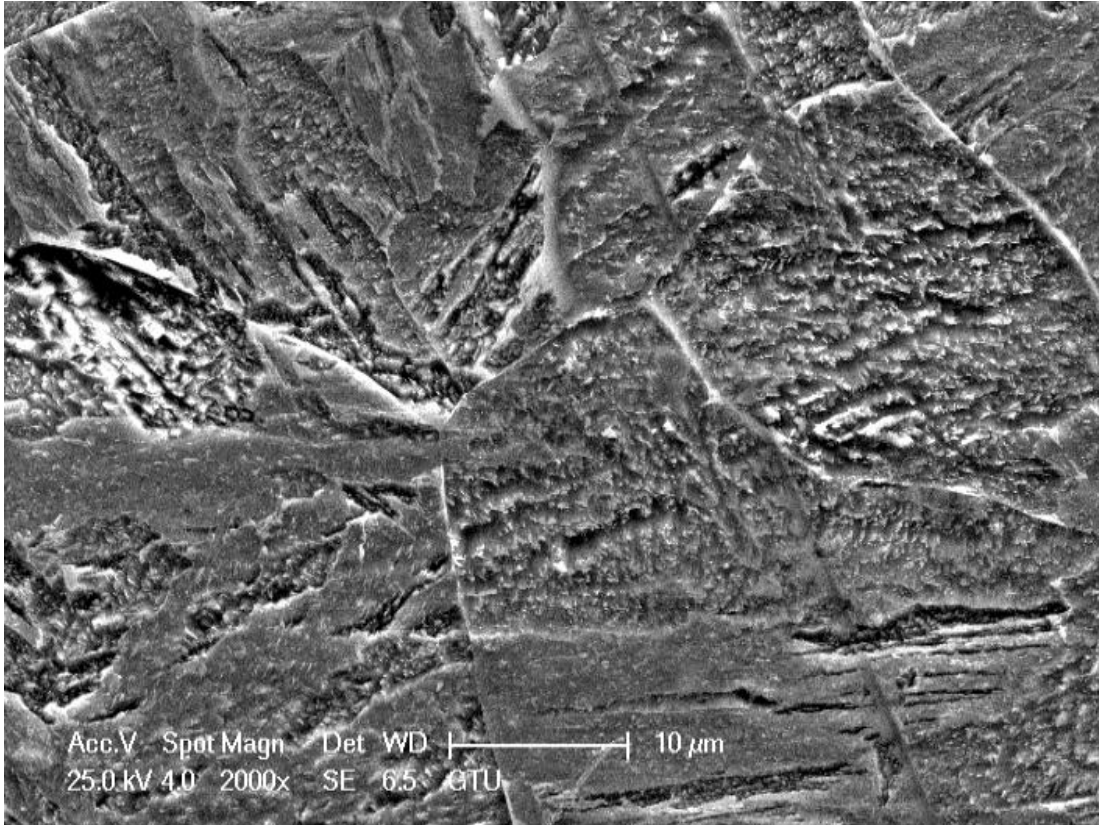
Östenitik kaynak dolgu metali ile kaynak yapılmış 2 numaralı numuneye ait elektron taramalı mikroskobu görüntüleri Şekil 7.59, 7.60, 7.61, 7.62, 7.63, 7.64, 7.65, 7.66, 7.67, 7.68, 7.69, 7.70, 7.71, 7.72, 7.73'de gösterilmiştir. Kaynak bölgesindeki ısı tesiri altındaki bölgedeki farklı yapı geçişleri 1 numaralı numuneninkine oranla çok daha net bir biçimde görülebilmektedir. Özellikle Şekil 7.71'deki 10.000 büyütme sonrasında net bir şekilde görüldüğü gibi bu bölgede kaynak metalindeki östenitik yapı ile ana malzemedeki martenzitik yapı çok keskin bir biçimde dönüşmüştür. Bu bölgede sementit oluşumları da görülmüştür. Kaynak sonrasındaki kaynak metalinin yapısı incelendiğinde ise yine östenitik matrisin içinde yayılmış ve ergime hattından kaynak metali bölgesi içlerine doğru artış gösteren oranda delta-ferrit yapıları görülmektedir. Yapıdaki delta-ferrit östenitiği sertleştirecektir, ancak sertlik testinde belirlenen değerler doğrultusunda 2 numaralı numune, kaynak dolgusu bölgesinde, 1 numaralı numunenin sertlik değerlerine ulaşamamıştır.



Şekil 7.59. 2 nolu numune ana malzeme bölgesi 500X SEM görüntüsü.



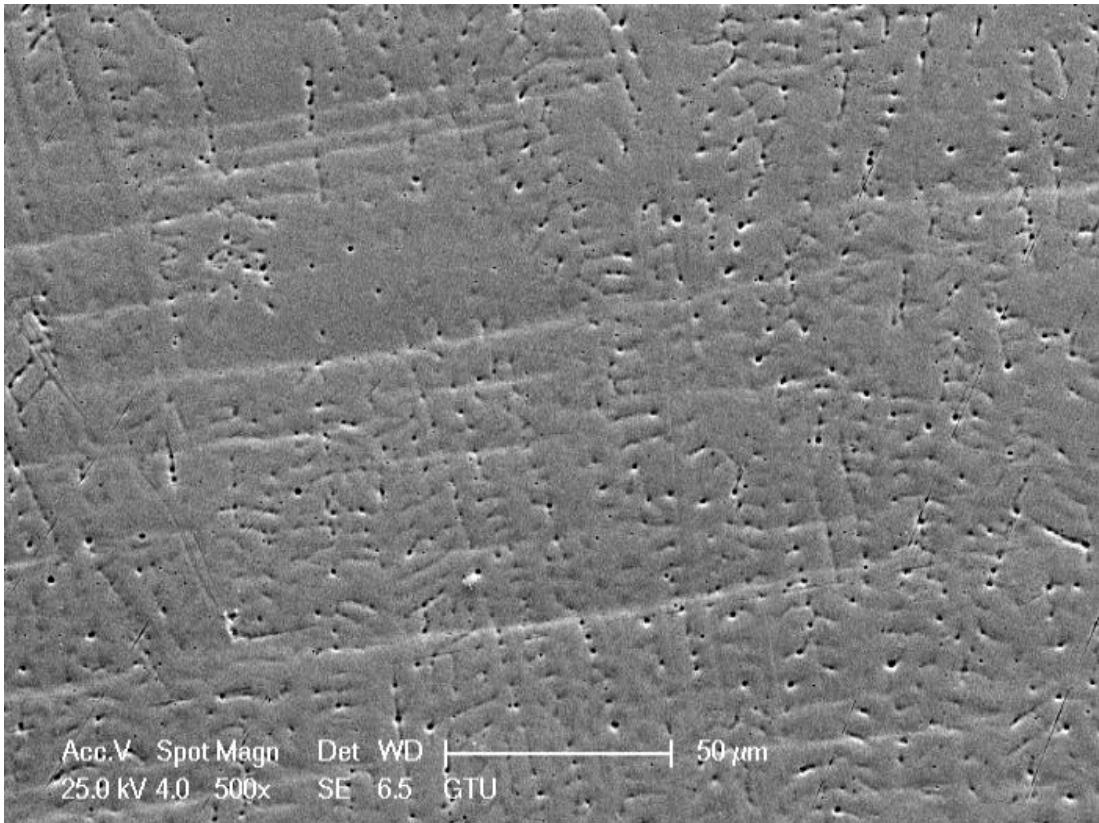
Şekil 7.60. 2 nolu numune ana malzeme bölgesi 1000X SEM görüntüsü.



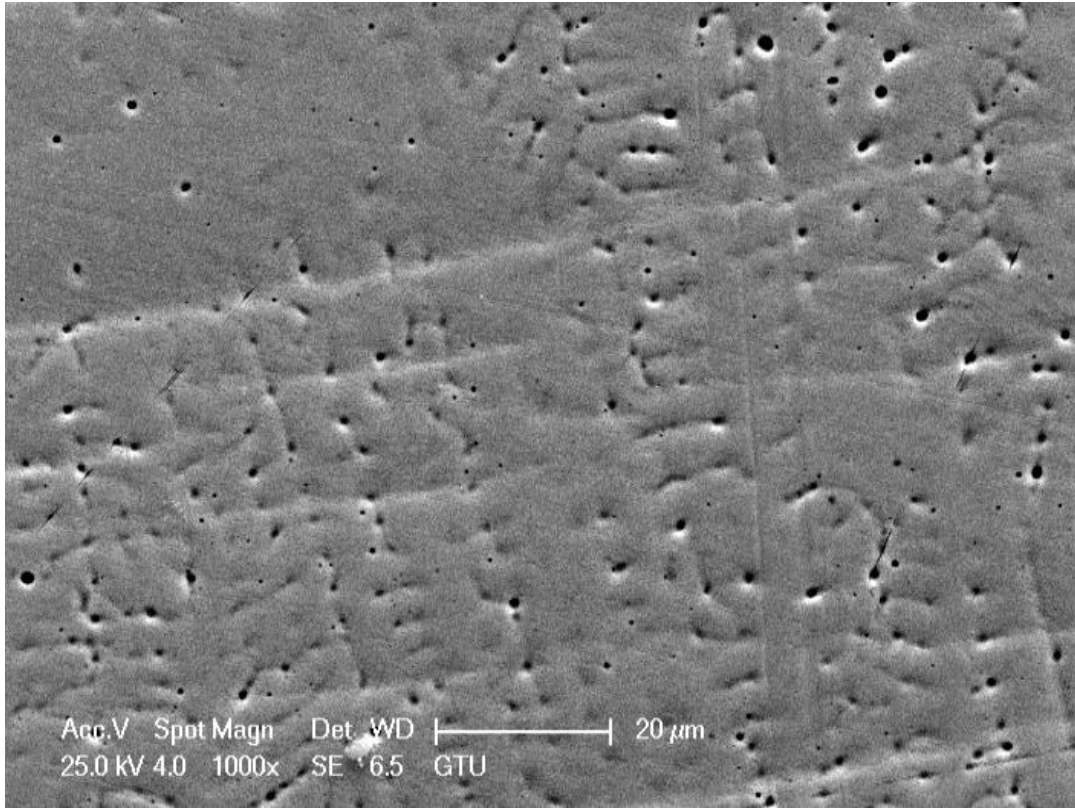
Şekil 7.61 2 nolu numune ana malzeme bölgesi 2000X SEM görüntüsü.



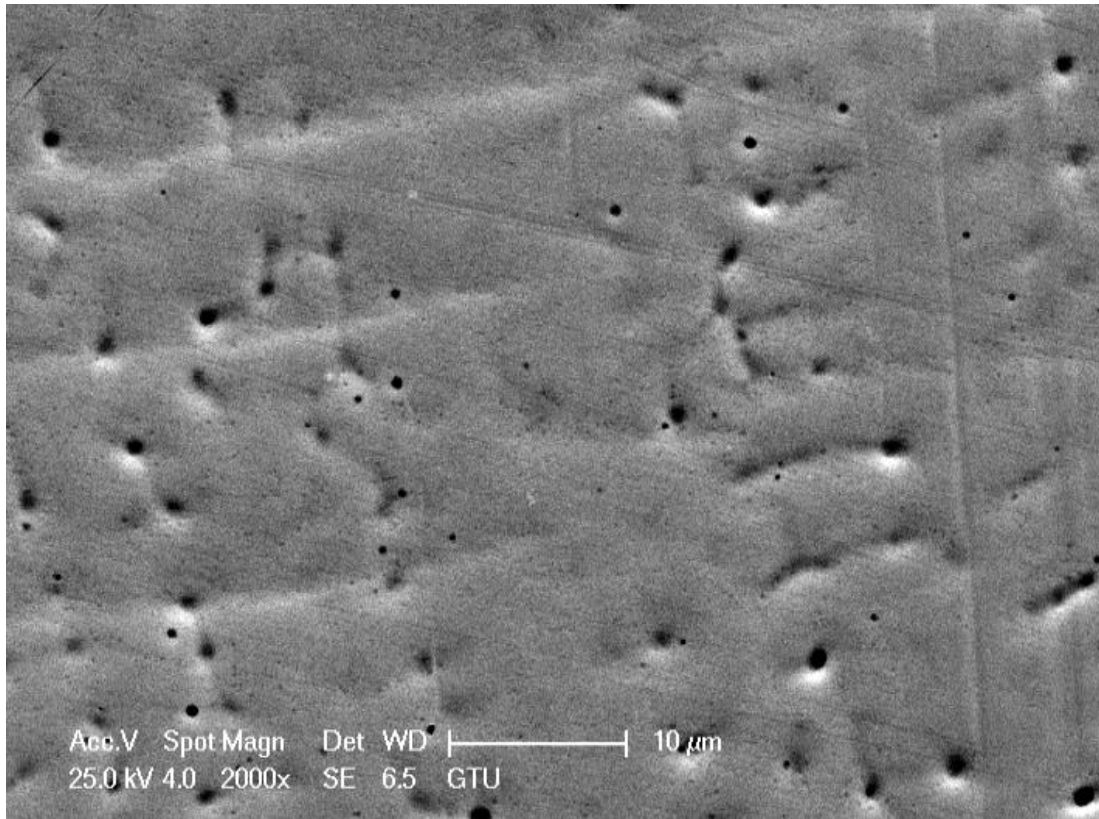
Şekil 7.62. 2 nolu numune ana malzeme bölgesi 5000X SEM görüntüsü.



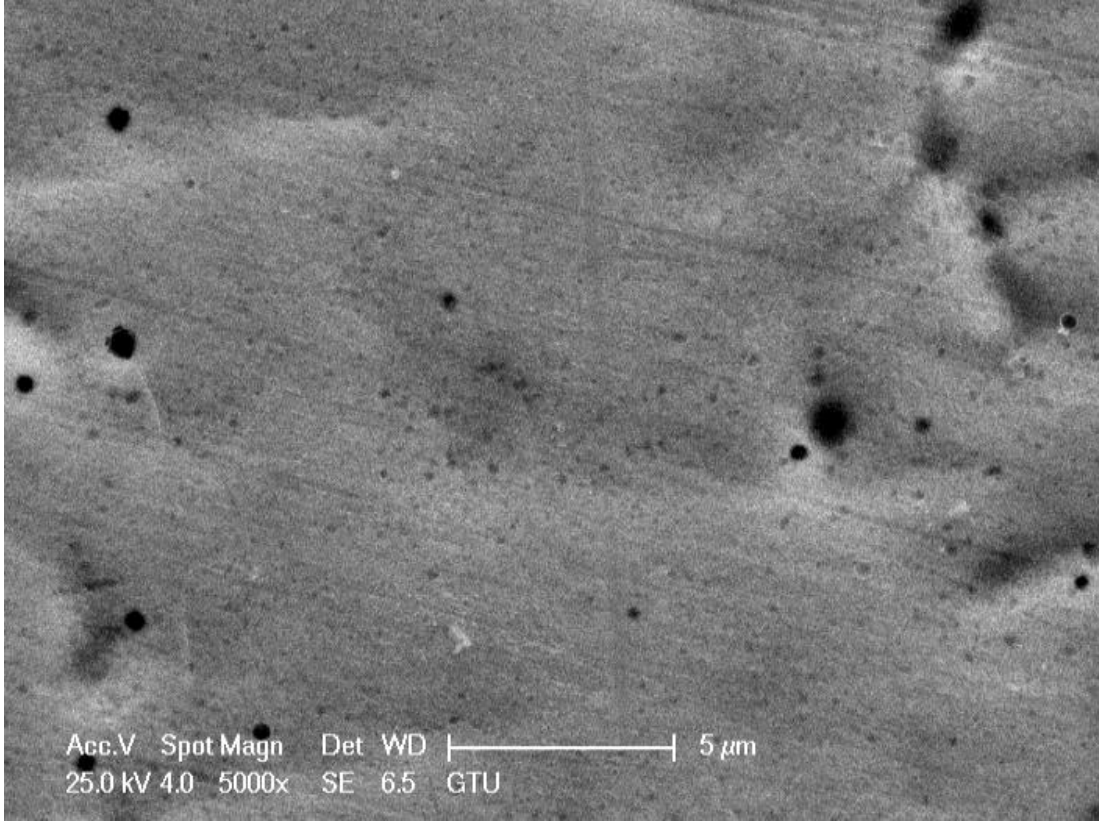
Şekil 7.63. 2 nolu numune kaynak metali bölgesi 500X SEM görüntüsü.



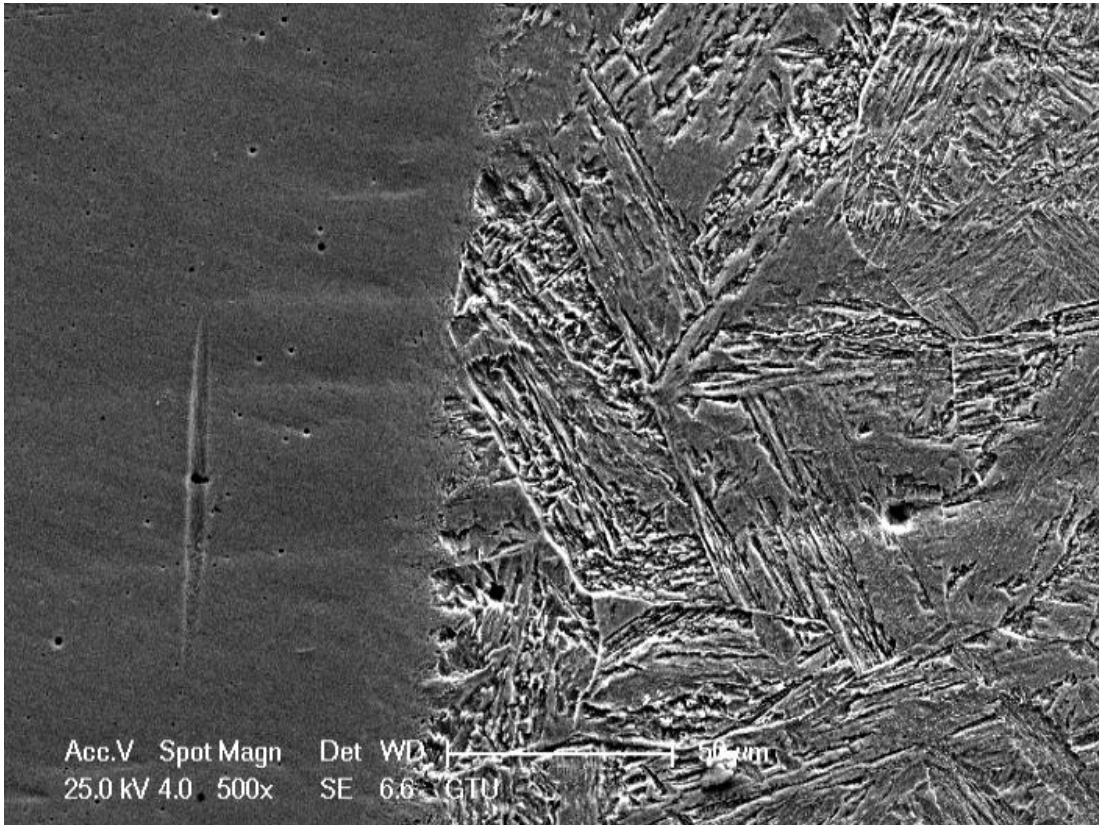
Şekil 7.64. 2 nolu numune kaynak metali bölgesi 1000X SEM görüntüsü.



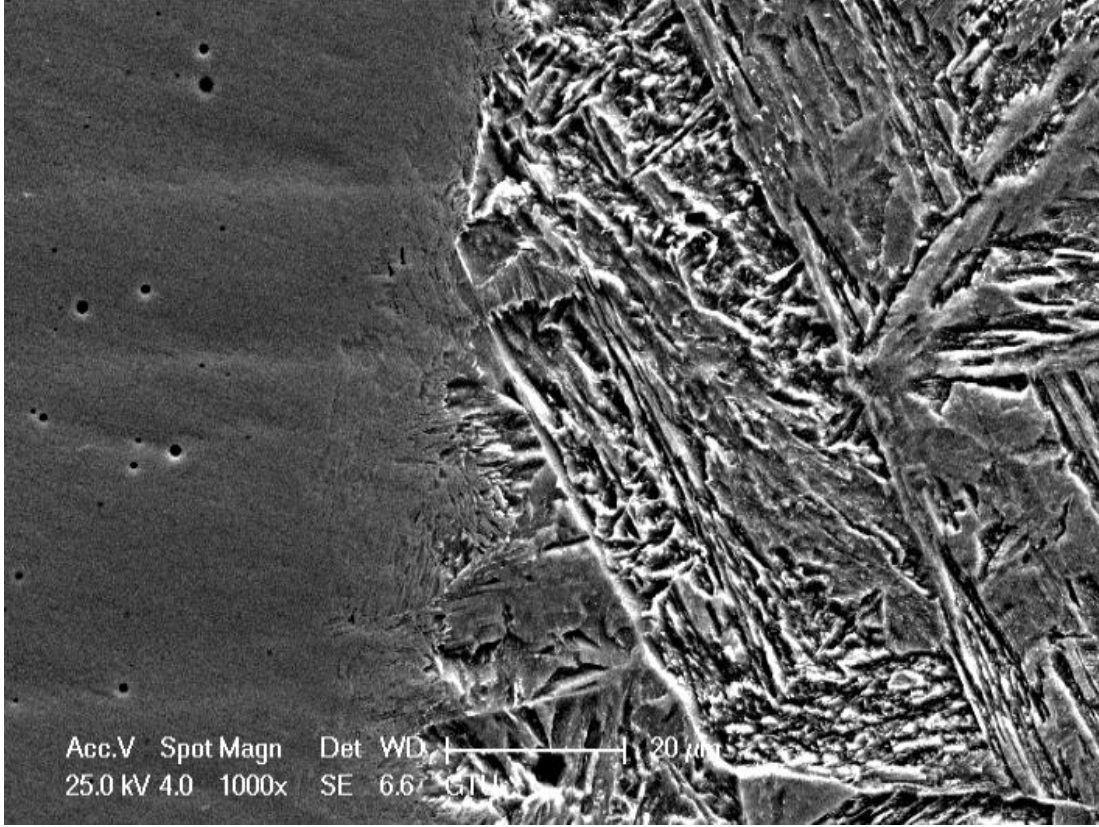
Şekil 7.65. 2 nolu numune kaynak metali bölgesi 2000X SEM görüntüsü.



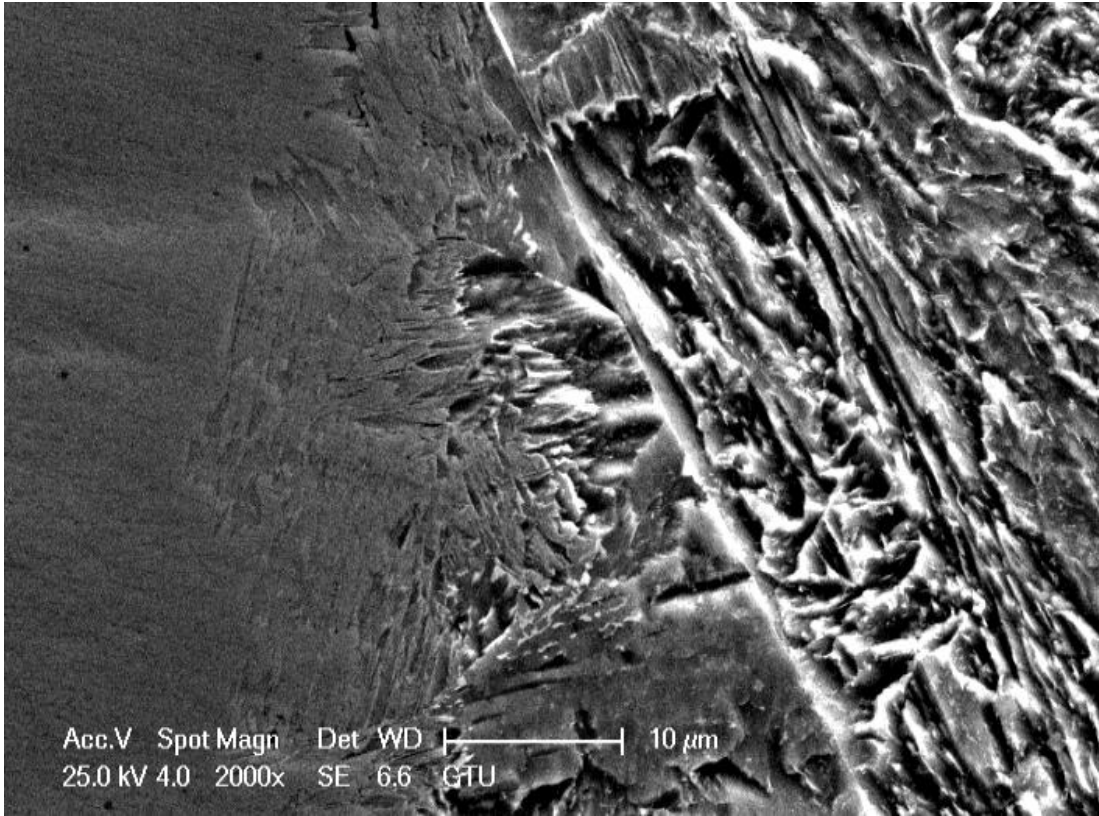
Şekil 7.66. 2 nolu numune kaynak metali bölgesi 5000X SEM görüntüsü.



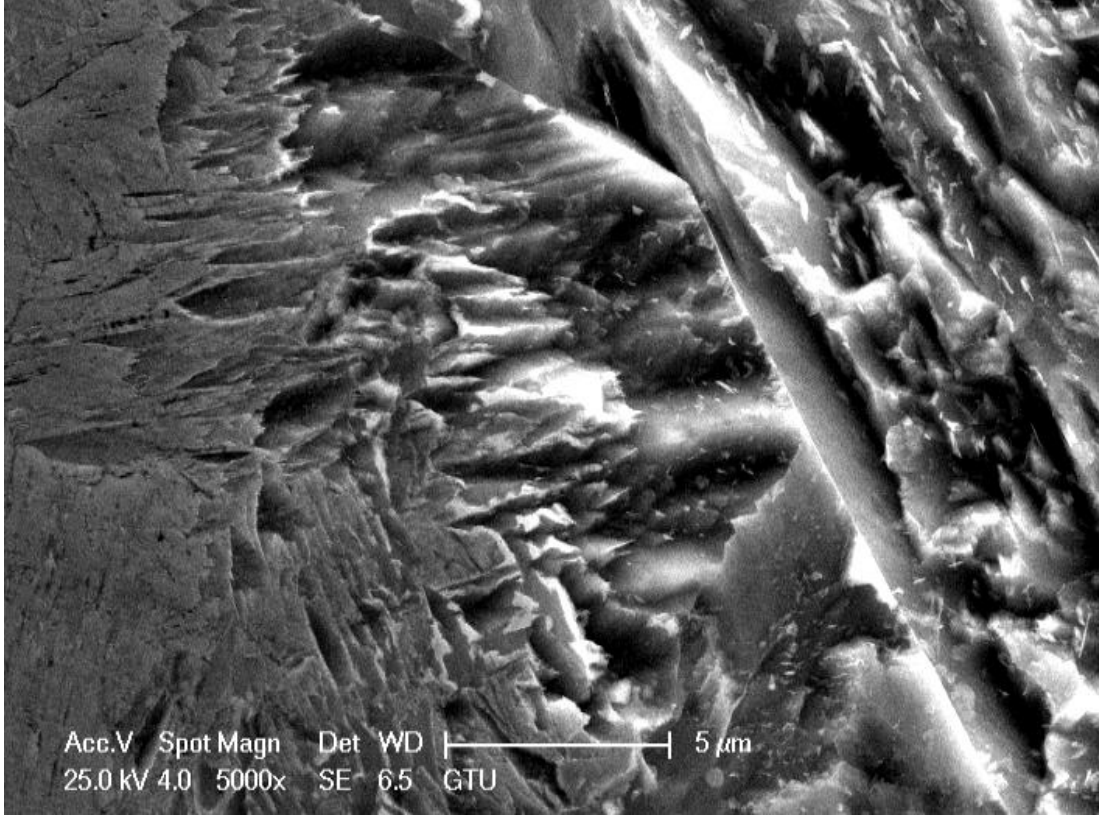
Şekil 7.67. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 500X SEM görüntüsü.



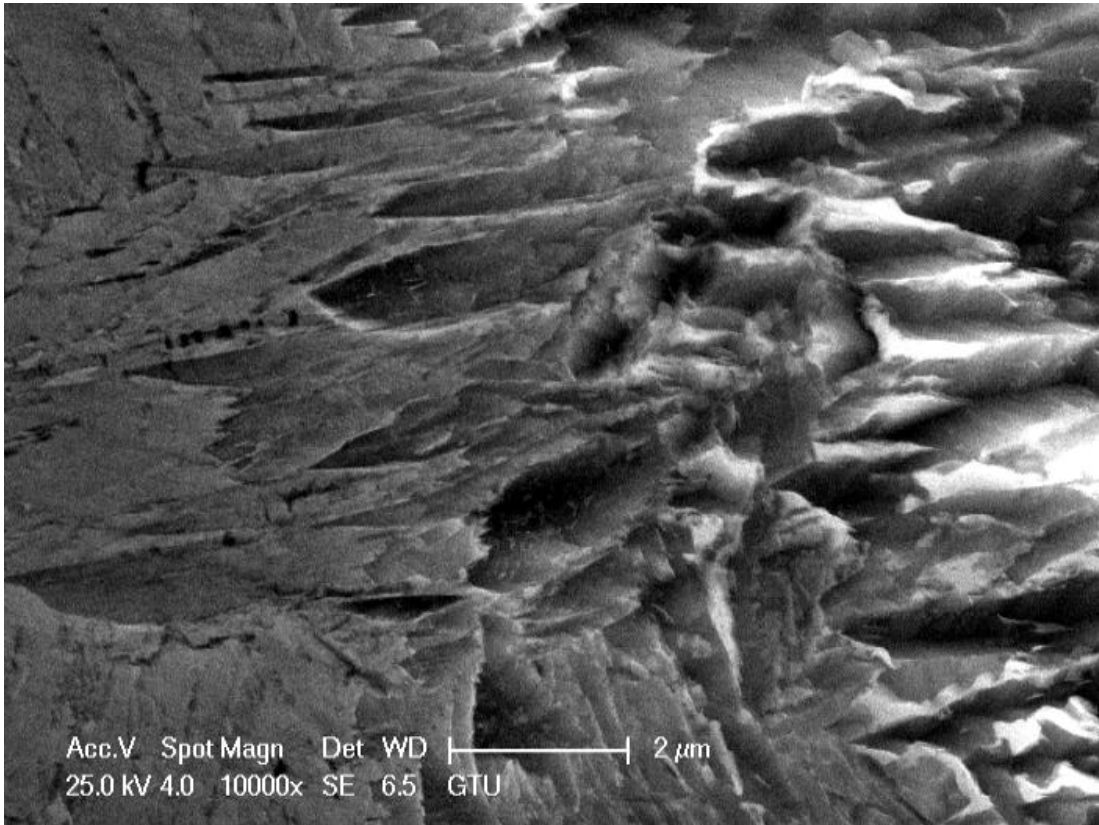
Şekil 7.68. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 1000X SEM görüntüsü.



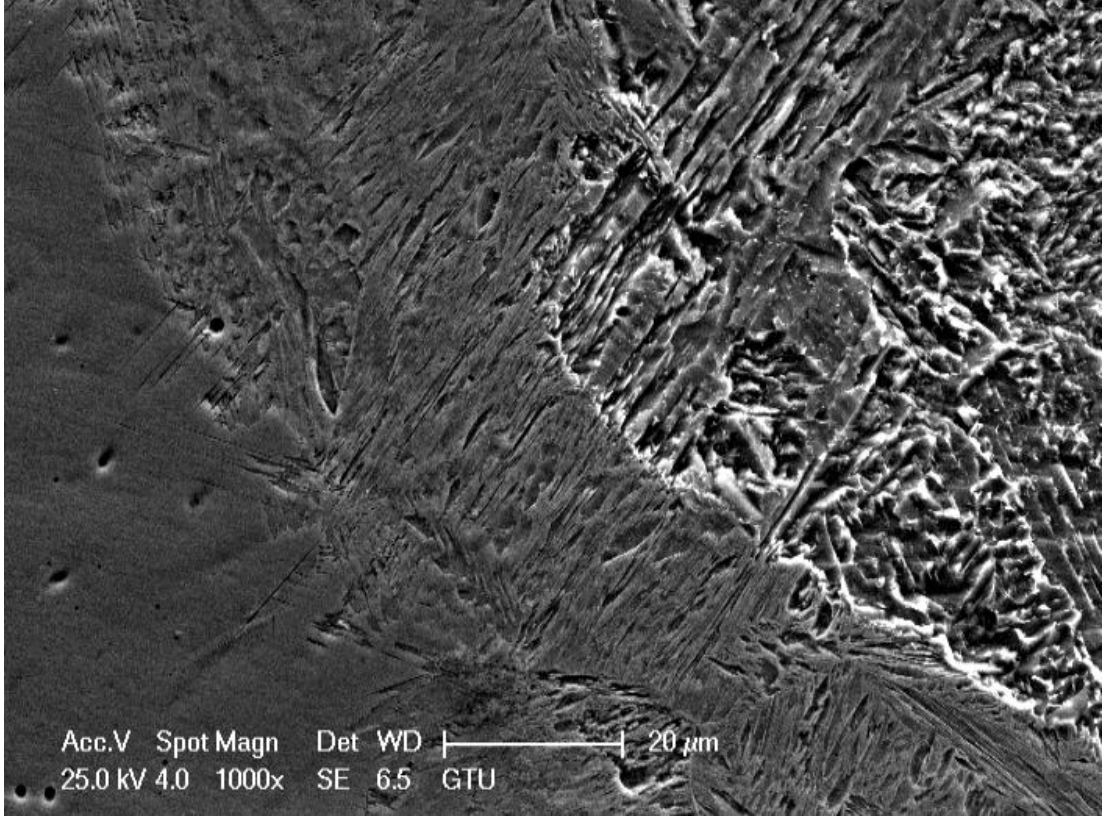
Şekil 7.69. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 2000X SEM görüntüsü.



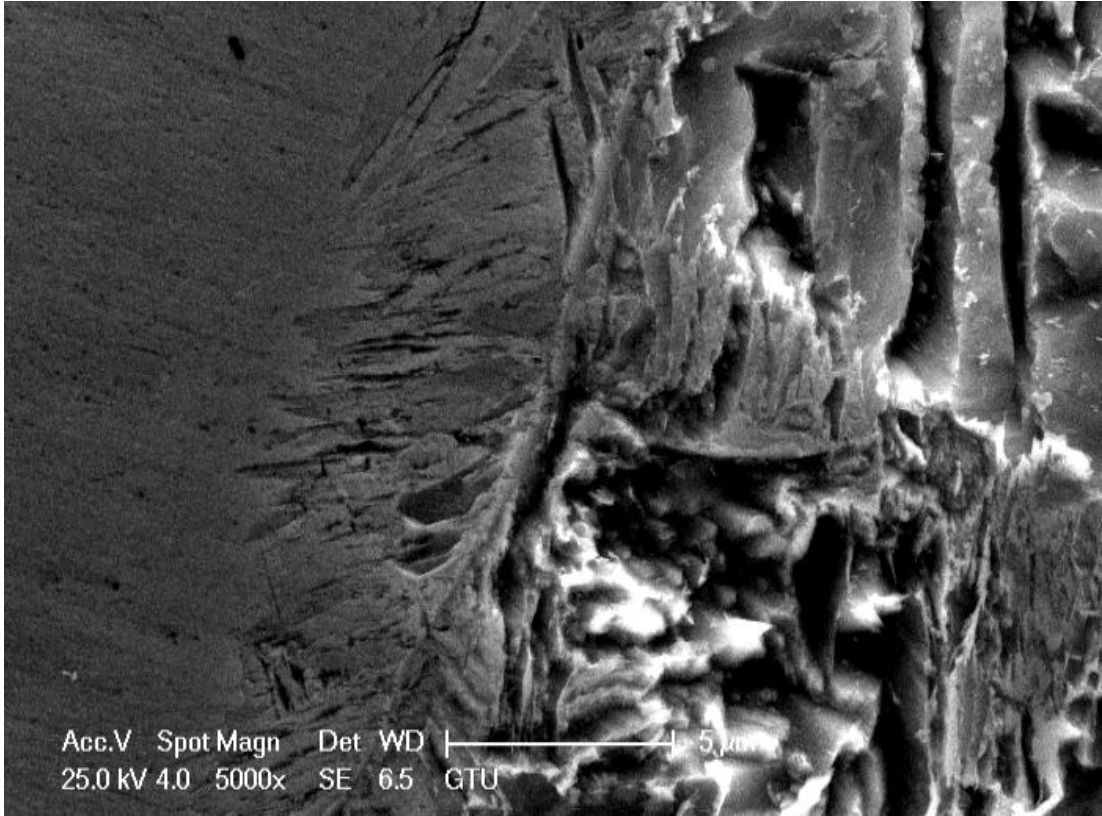
Şekil 7.70. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 5000X SEM görüntüsü.



Şekil 7.71. 2 nolu numune sağ kep ITAB bölgesi 10000X SEM görüntüsü.



Şekil 7.72. 2 nolu numune kök ITAB bölgesi 1000X SEM görüntüsü.



Şekil 7.73. 2 nolu numune kök ITAB bölgesi 5000X SEM görüntüsü.

BÖLÜM 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ArmoX 500T zırh çeliğinin iki ayrı faz ve kimyasal kompozisyon içeren kaynak dolgu malzemeleri ile birleşimleri, birçok mekanik özellik ve faz değişimleri özelliklerine göre incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ve varılan sonuçlar doğrultusunda yapılan öneriler, gelecekte benzer konularda çalışma yapacak araştırmacılar için aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

8.1. Sonuçlar

- 1) Her iki kaynak dolgu malzemesi ile yapılan test parçalarının çekme testi sonrası, parçalar beklendiği gibi, ana malzemeden daha düşük mekanik özelliklere sahip, kaynak dolgu metallerinden kopmuştur.
- 2) Ferritik özellikli dolgu malzemesi ile birleştirilen zırh çeliğinin çekme mukavemeti değerleri östenitik dolgu malzemesi ile birleştirilen test parçasına göre daha yüksek çıkmıştır..
- 3) Ferritik özellikli dolgu malzemesi ile birleştirilen zırh çeliğinin akma mukavemeti değerleri östenitik dolgu malzemesi ile birleştirilen test parçasına göre daha yüksek çıkmıştır.
- 4) Çentik darbe testleri sonucunda, östenitik kaynak dolgu malzemesi ile yapılmış birleştirimin sağladığı çentik darbe dayanımı değerlerinin, ferritik yapıdakine oranla daha fazla olduğu görülmüştür.
- 5) Sertlik değerleri her iki malzemede de ana malzemede, ısı tesiri altındaki ve kaynak metali bölgelerinde, benzer eğriler çizmiş ve benzer değerler

sağlamıştır. Test parçalarının sertlik değerleri kaynağın ısı girdisinin etkisiyle temperlenmiş bölgede azalmış ve ısı tesiri altındaki bölgede ise ana malzemenin sertlik değerlerinin üstüne çıkmıştır. Ancak bu çıkışın kabul edilebilir makul ölçülerde kaldığı görülmüştür.

- 6) Kaynak metali bölgesinde sertlik değerleri her iki test parçasında da ana malzemeye göre düşüş göstermekle beraber, ferritik yapılı kaynak dolgu malzemesi ile yapılan birleştirmenin östenitik yapıdakine oranla daha sert olduğu görülmüştür.
- 7) Kaynak metali bölgesindeki sertlik değerlerinin zırh çeliklerinin sertlik değerlerinin çok altında olduğu görülmüştür. Balistik koruma seviyesi açısından önem arz eden sertlik değerinin kaynak dolgu metali bölgelerinde istenenin çok altında değerler çıkması, zırh çeliğinin kullanıldığı kaynaklı konstrüksiyon ve araçlarda, kaynak dikişi bölgelerinin ek tedbirleriyle korunması gereğini meydana çıkarmıştır.
- 8) Mikro yapı incelemelerinde her iki test parçasında da, ergime hattı net bir biçimde gözlenmiştir. Ferritik yapılı kaynak dolgu malzemesi ile birleştirilen test parçasında martenzitik yapının yanı sıra dendrit ve beynit oluşumları görülmüştür. Östenitik yapılı kaynak dolgu malzemesi ile birleştirilen test parçasında martenzitik östenitik geçişi ve östenitik matrisin içerisinde ferrit yapıları görülmüştür.
- 9) Taramalı elektron ile yapılan mikro yapı incelemelerinde, martenzitik yapıdaki zırh çeliğinin, östenitik yapıya sahip kaynak dolgu metali ile kaynaklanması sonucu oluşmuş ince ergime hattı daha net bir biçimde gözlenmiş ve böylelikle bu bölgede oluşan yapılara ek olarak sementit fazıda belirlenmiştir.

8.2. Öneriler

- 1) Kaynak işlemleri sonucunda elde edilen kaynaklı yapının mekanik özelliklerinin optimizasyonu için ferritik ve östenitik kaynak dolgu malzemesi için ayrı ayrı kaynak parametreleri optimizasyonları çalışılabilir.
- 2) İstenen mekanik özelliklere göre ferritik ve östenitik kaynak dolgu malzemeleri için ayrı ayrı koruyucu gaz kompozisyonları karşılaştırması incelenebilir.
- 3) Ferritik ve östenitik kaynak dolgu malzemeleri için ayrı ayrı, ana malzeme kaynak ağzı çeşitlerinin bu kaynak dolgu metalleriyle yapılmış kaynaklı yapılarına olan etkileri araştırılabilir.
- 4) Kalın malzemelerin kaynağında önerilen kaynak öncesi ön ısıtma ve kaynak sonrası yavaş soğutma işlemlerinin kaynaklı yapının mekanik özelliklerine etkisi ferritik ve östenitik tip kaynak dolgu metali için araştırılabilir.
- 5) Zırh çeliklerinin gazaltı kaynak yöntemiyle elde edilen mekanik değerleri, elektrik ark, tungsten asal gaz ve tozaltı kaynak prosesleri ile elde edilecek değerlerle karşılaştırılması incelenebilir.
- 6) Yapılan bu kaynaklı birleştirmelere EDS analizleri yapılarak fazların kimyasal kompozisyonları ve mikro yapılarındaki kimyasal element oranları araştırılabilir.
- 7) Bilgisayar destekli analiz programlarında, zırhlı araç şasi yapılarının değişik bölgelerinde sağlanması istenen mekanik özelliklere göre, araçların ilgili bölgelerinde kullanılacak kaynak dolgu malzemesi tipi tayini çalışılabilir.
- 8) Bu çalışmada elde edilen kaynaklı yapıların askeri araçlarda oluşabilecek yorulma davranışları incelenebilir.

- 9) Zırhlı araçların etkilenebileceği çevresel şartlar altında ve amfibik araçların etkilendiği tuzlu sularda oluşabilecek korozyonun, ferritik ve östenitik yapıdaki dolgu malzemeleriyle birleştirilmiş kaynaklı yapıya olacak farklı etkiler araştırılabilir.
- 10) Ferritik ve östenitik kaynak dolgu metalleri ile birleştirilmiş kaynaklı yapılardaki, kaynak sonrası oluşmuş artık gerilmeler incelenebilir.
- 11) Martenzitik yapıdaki ana malzemeye uygulanmış östenitik kaynak metali bağlantısına, faz kontrollü ultrasonik tahribatsız muayene yöntemiyle hata tespiti araştırılabilir.
- 12) Çekme testi ve çentik darbe testi sonucu oluşmuş kırılma yüzeylerinin morfolojileri ve mikro analizleri incelenebilir. Burda çıkacak sonuçlara göre kaynak parametresi optimizasyonu çalışılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] ATAPEK, Ş. H., Bor Katkılı Bir Zırh Çeliğinin Fiziksel Metalürjik Esaslar Doğrultusunda Geliştirilmesi Ve Balistik Performansının Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011.
- [2] KARAGÖZ, Ş., ATAPEK, Ş. H., YILMAZ, A., Zırh Çeliklerinde Perforasyon ve Balistik Korumanın Anlaşılması Açısından Fraktografik Etüt, Metal Dünyası, 182, 102-107, 2008.
- [3] MIL-A-12560H, Military Specification: Armor Plate , Steel, Wrought, Homogeneous (For Use In Combat-Vehicles And For Ammunition Testing), US Military: Watertown, MA, USA, 2007.
- [4] MIL-A-46100E, Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness, U.S. Military Specification, 2008.
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Battle_vehicle, Erişim Tarihi: 11.10.2014
- [6] ADE, F., Balistic Qualification of Armor Steel Weldments, Welding Journal, 70, 53-58, 1991.
- [7] JACOBI, H., BATINMANN, H. J., GRONSFELD, J., New Method of Determining the Macrocleaness of Unconventionally Rolled Continuously Cast Steel, Stahl Eisen, 108 (20), 54-66, 1988.
- [8] MATSUBARA, H., OSUKA, T., KOZASU, I., TSUKADA, K., Optimization of Metallurgical Factors for Production of High Strength, High Toughness Steel Plate by Controlled Rolling, Transactions ISIJ, 12, 435-443, 1972.
- [9] MANGANELLO, S. J., WILSON, A. D., Direct Quenching and its Effects on High-Strength Armor Plate, Int. Symp. Low Carbon Steels for the 90's, Ed. R. Asfahani, G. Tither, The Minerals, Metals & Materials Society, 235-241, 1993.
- [10] SANGOY, L., MEUNIER, Y., PONT, G., Steels for Ballistic Protection, Israel Journal of Technology, 24, 319-326, 1988.

- [11] ATAPEK, Ş. H., Zırh Çeliklerinin Fiziksel Metalürjik Esaslar Doğrultusunda Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmit, 2006.
- [12] MIL-STD-1185, Military Standart Welding, High Hardness Armor, Us Army Tank-Automotive Material Readines Command, Michigan 48090 31 December, 83-88 1979.
- [13] MAGUDEESWARAN, G., BALASUBRAMANIAN, V., MADHUSUDHAN R. G., Effect of Welding Processes and Consumables on Fatigue Crack Growth Behaviour of Armour Grade Quenched and Tempered Steel Joints, Defence Technology 10(2014) 47-59 2014.
- [14] BHADESHIA, H. K. D. H., Bainite in Steels – Transformations, Microstructure and Properties, The University Press, Cambridge, UK, 2001.
- [15] GALZVEZ, F., CENDON, D., GARCIA, N., ENFEDAQUE, A., SANCHEZ G. V., Dynamic Fracture Toughness of a High Strength Armor Steel, Engineering Failure Analysis, 16, 2567–2575, 2009.
- [16] <http://www.themiddleages.net/armor.html> Erişim Tarihi: 10.01.2015.
- [17] <http://www.globalsecurity.org/military/library/report/1988/CJ2.htm> Erişim Tarihi: 14.01.2015.
- [18] FULFORD, M., SIM, D., DOIG, A., PAINTER, J., In Defence of Rome: A Metallographic Investigation of Roman Ferrous Armour from Northern Britain, Journal of Archaeological Science, 32, 241–250, 2005.
- [19] MANGANELLO, S. J., WILSON, A. D., Direct Quenching and its Effects on High-Strength Armor Plate, Int. Symp. Low Carbon Steels for the 90's, Ed. R. Asfahani, G. Tither, The Minerals, Metals & Materials Society, 235-241, 1993.
- [20] THYSSEN STAHL AG, Special High-Strength Quenched and Tempered Steel, Specification.
- [21] <http://www.ssab.com/en/Product--Services/Service--Support/Downloads/>. Erişim Tarihi: 11.01.2015
- [22] KARAGÖZ, Ş., ATAPEK, Ş. H., Çökelti Sertleştirilmiş bir Sac Çeliğinde Mikroyapı-Kırılma Karakteristiği İlişkisi, Deformasyon Sac İşleme, 11-12, 62-65, 2008.
- [23] MAWEJA, K., STUMPF, W., VAN DER BERG, N., Characteristic of Martensite as a Function of the Ms Temperature in Low-Carbon Armour Steel Plates, Materials Science and Engineering A, 519, 121-127, 2009.

- [24] GINGELL, A. D. B., BHADSHIA, H. K. D. H., JONES, D. G., MAWELLA, K. J. A., Carbide Precipitation in Some Secondary Hardened Steels, *J. Mater Sci.* 32, 4815- 4820, 1997.
- [25] KARAGÖZ, Ş., ATAPEK, Ş. H., YILMAZ, A., Microstructural and Fractographical Studies on Quenched and Tempered Armor Steels, *MP Materials Testing*, 52 (5), 316-322, 2010.
- [26] FISCHMEISTER, H. F., KARAGÖZ, Ş., ANDREN, H. O., An Atom Probe Study of Secondary Hardening in High Speed Steels, *Acta Metall.*, 36, 817-825, 1988.
- [27] HETZNER, D. W., VAN GEERTRUYDEN, W., Crystallography and Metallography of Carbides in High Alloy Steels, *Materials Characterization*, 59, 825-841, 2000).
- [28] KARAGÖZ, Ş., FISCHMEISTER, H. F., ANDREN, H. O., GUANG-JUN, C., Microstructural Changes During Overtempering of High Speed Steels, *Metal. Trans. A*, 23, 1631-1640, 1992.
- [29] THOMSON R. C., Characterization of Carbides in Steels Using Atom Probe Field-Ion Microscopy, *Materials Characterization*, 44 (1-2), 219-233, 2000.
- [30] MAWEJA, K., STUMPF, W., Fracture and Ballistic-Induced Phase Transformation in Tempered Martensitic Low-Carbon Armour Steels, *Materials Science and Engineering A*, 432 (1-2), 158–169, 2006.
- [31] SRIVATHSA, B., RAMAKRISHNAN, N., Ballistic Performance Maps for Thick Metallic Armour, *Journal of Materials Processing Technology*, 96 (1-3), 81-91, 1999.
- [32] ANIK, S., Kaynak Tekniği, İ.T.Ü Kütüphanesi, İstanbul, 1981.
- [33] MIL-HDBK-1941, Metal-Arc Welding of Homogeneous Armor, Department of Defence Handbook, U.S. 1998.
- [34] KALUÇ, E., Kaynak Teknolojisi El Kitabı. Cilt 1, Ergime Esaslı Kaynak Yöntemleri, Makina Mühendisleri Odası Kocaeli Şubesi, Kocaeli, 2004.
- [35] TÜLBENTÇİ, K., MIG-MAG Eriyen Elektrot ile Gazaltı Kaynağı, Gedik Holding A.Ş. Yayınları, İstanbul, 1990
- [36] ERYÜREK, B., Gazaltı Kaynağı, Eczacıbaşı Yayınları, İstanbul, 2003.
- [37] OĞUZ B., Ark Kaynağı, Oerlikon, ISTANBUL, 1989.
- [38] <http://www.trdocs.org/docs/index-58376> Erişim Tarihi: 29.01.2015.

- [39] ANIK, S., Kaynak Tekniği El Kitabı, Yöntemler ve Donanımlar, Gedik Eğitim Vakfı Yayınları, 1998.
- [40] ANIK S., TÜLBENTCİ K., KALUNÇ E., Örtülü Elektrot ile Elektrik Ark Kaynağı, Gedik Holding Yayınları, İSTANBUL, 1981.
- [41] ANIK S., Kaynak Tekniği ,Cilt:1.İ.T.Ü. Makine Fakültesi Ofset Atölyesi, İSTANBUL, 1981.
- [42] GEÇMEN, İ., Çeliklere Gazaltı Kaynağının Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul, 2006.
- [43] SERFİÇELİ, S., Kaynak Teknolojisi, Form Ofset Yayınevi, Ankara, 2003.
- [44] ANIK, S., ANIK, E. S., VURAL, M., 1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000.
- [45] AICHELE, G., SMITH, A.A., MAG – Schweissen, DVS–Verlag, 1-193, Düsseldorf, 1975.
- [46] ANIK, S., VURAL, M., Gazaltı Ark Kaynağı, Gedik Eğitim Vakfı Kaynak Teknolojisi Eğitim Araştırma ve Muayene Enstitüsü Yayın No:3, 15-237 İstanbul, (1997).
- [47] ESAB Product Catalogue, ESAB AB, Göteborg, Sweden, 2006.
- [48] ENGİNDENİZ, E., Seamless Flux Cored Wires, Drahtwarenfabrik Drahtzug Stain GmbH&Co. KG, Germany, 2005.
- [49] ANIK, S., Kaynak tekniği , İstanbul Teknik Üniversitesi, F.B.E., 1991.
- [50] GEDİK EĞİTİM VAKFI, IIW Kaynak Mühendisliği Eğitim Notları, İSTANBUL, 2009.
- [51] ERTÜRK, İ., Gazaltı Kaynak Yöntemleri, İSTANBUL, 2004.
- [52] ODTÜ, DVS, IIW, Kaynak Mühendisliği Eğitim Notları, ANKARA, 2004.
- [53] GANAHA, T., PEARCE, B. P.,KERR, H. W., Grain Structures in Alüminyum Aloy GTA Welds, Metallurgical Transactions and Microstructures, 9, 1980.
- [54] ANIK, S., Kaynak Tekniği, Tozaltı Kaynağı ve Koruyucu Gazla Kaynak, İ.T.Ü., Makine Fakültesi, İstanbul, 20–40, 1975.
- [55] ASKAYNAK, Tozaltı Kaynak Tozları ve Tozaltı Kaynak Sistemleri, Eczacıbaşı Ürün Kataloğu, İstanbul, 2001.

- [56] TÜLBENTÇİ, K., Tozaltı Kaynak Yönteminin Üstünlükleri ve Uygulama Alanları, Kaynak Dünyası Dergisi, Gedik Holding A.S., Sayı: 1998/1, İstanbul, 1998.
- [57] KAHRAMAN, N., GÜLENC, B., Modern Kaynak Teknolojisi, EPA-MAT Basım Yayın, Ankara, 30-38, 2009.
- [58] LAYIKTEZ, C., Oerlikon Kaynak Bilimi, Oerlikon Kaynak Elektrotları ve Sanayi A.Ş. Adana, 1985.
- [59] KÜLAHLI, E., Kaynak Bilimi, Oerlikon Yayını, Sayı 2, 1988.
- [60] HELLIER, C. J., Handbook of Nondestructive Evaluation, Mcgraw-Hill, 2003.
- [61] SEÇİM, C., Tahribatsız Muayene Yöntemleri ve Uygulama Alanları, Yüksek Lisans Tezi, Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hatay, 2011.
- [62] EN 17637, Ergitme Kaynaklı Birleştirmelerin Gözle Muayenesi, 2011.
- [63] SWEENEY, M., Penetrant Testing and Applications, Ireland, 2000.
- [64] EN 3452-1, Tahribatsız Muayene, Penetrant Muayenesi, Bölüm 1, Genel Kurallar, 2013.
- [65] ÖZBEK, Y. Y., Tahribatsız Muayene Yüksek Lisans Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, Malzeme ve Metalürji Mühendisliği, Sakarya, 2013.
- [66] SELMA, A., Tahribatsız Muayene Metotları ve Doğalgaz Boru Hatlarındaki Kaynaklı Bağlantıların Radyografik Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, 2011.
- [67] MERAL, D., Uçak Parçalarına Uygulanan Tahribatsız Muayene Yöntemleri, YTÜ yayınları, 2009.
- [68] TO 33B-1-1, Nondestructive Testing and Inspection, 2010.
- [69] BOEING, 51-06-00, Boeing 737 Nondestructive Testing Manual, 1982.
- [70] EN 1711, Karmaşık Düzlem Analizi ile Kaynakların Girdap Akım Muayenesi, 2003.
- [71] KORKMAZ, Ö., E., Uçaklarda Kullanılan Alüminyum Malzemelerdeki Korozyonun İncelenmesi, Önlenmesi ve Tahribatsız Muayene ile Tespiti, Yüksek Lisans Tezi F.B.E., Met. ve Malz. Müh. Anabilim Dalı, 2010.

- [72] YAŞAR, T., Radyografi Yöntemi ile Kaynak Dikişlerinde Hata Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2010.
- [73] ÖZKIRMAZ, E., Kaynaklı Bağlantıların Tahribatsız Muayene Yöntemiyle Optimum Kaynak Değerlerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 2009.
- [74] TUNCER, E., Kaynaklı Bağlantıların Ultrasonik ve Radyografik Muayenelerinin Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
- [75] ODTÜ, Kaynak Teknolojisi ve Tahribatsız Muayene Merkezi, Radyografik Muayene Kurs Notları, Ankara, 2004.
- [76] EN 1435, Kaynaklı Birleştirmelerin Radyografik Muayenesi, 2002.
- [77] TEKKON, Kaynaklı Birleştirmelerin Ultrasonik Muayenesi Kurs Notları, Ankara, 2005.
- [78] HKK, Endüstriyel Tahribatsız Muayene El Kitabı, 2. Hava İkmal Bakım Merkezi Komutanlığı, Kayseri, 1994.
- [79] EN 1714, Kaynaklı Birleştirmelerin Ultrasonik Muayenesi, 2002.
- [80] <http://www.olympus-ims.com/en/weld-solutions>, Erişim Tarihi: 06.02.2015.
- [81] TEKKON, Kaynaklı Birleştirmelerin Faz Kontrollü Ultrasonik Muayenesi Kurs Notları, Ankara, 2012.
- [82] TWI, Phazed Array Ultrasonic Examination Training Program, İstanbul, 2014.
- [83] KAYALI, E. S., ENSARİ, C., DİKEÇ, F., Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul, 14-139, 1988.
- [84] <http://www.aoblab.com/index.php>, Erişim Tarihi: 09.02.2015.
- [85] ERDOĞAN, M., Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 1997.
- [86] CILIZ, Ö. M., Gazaltı Kaynak Yöntemlerinin Akustik Olarak İncelenmesi, Marmara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Programı, İstanbul, 2013.
- [87] <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/jobknowledge/mechanical-testing>, Erişim Tarihi: 09.02.2015.

- [88] BACAĞ, S., Düşük Mukavemetli Malzemeler için Mekanik Deneylerin Yapılabileceği Masaüstü Deney Cihazının Tasarımı ve Kurulması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2006.
- [89] <http://muhendishane.org/kutuphane/malzemelerin-mekanik-davranisi>, Erişim Tarihi: 09.02.2015.
- [90] <http://esab.ae/ae/en/products/index.cfm?fuseaction=home.product&product> Erişim Tarihi: 16.02.2015.
- [91] <http://www.taek.com.tr/sem/tr.cfmhome>, Erişim Tarihi: 22.02.2015.
- [92] BALAKRISHNAN, M., BALASUBRAMANAN, V., MADHUSUDHAN, R., Effect of PTA Hardfaced Interlayer Thickness on Ballistic Performance of Shielded Metal Arc Welded Armor Steel Welds, 2012.
- [93] ROBLEDO, D., M., GOMEZ, J., A., S., BARRADA, J., E., G., Development of A Welding Procedure For MIL A 46100 Armor Steel Joint Using Gas Metal Arc Welding, 2011.
- [94] KARA, S., KORKUT, M., H., Zırhlı Muharebe Araçlarında Kullanılan Zırh Plakalarında Kaynak Sonrası Isıl İşlemin Birleşim Mukavemetine Etkisinin Araştırılması, Savunma Bilimleri Dergisi, 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Volkan YAKUT, 28.09.1979 tarihinde Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. 2003 yılında Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2004 yılında ODTÜ-SLV Kaynak Teknolojisi Merkezinden Kaynak Mühendisi ünvanıyla mezun oldu. Takip eden yıllarda, ultrasonik test, radyografik test, manyetik parçacık testi, kaynak inspektörlüğü ve gözle muayene yöntemlerinden uluslararası geçerli seviye 2 sertifikasyonuna sahip oldu. Gama A.Ş. şirketler gurubunda, Arabistanda ve Rusyada Kalite müdürlüklerinde çeşitli pozisyonlarda bulundu. Çimtaş-Soli tersanesinde, gemi bloğu üretim müdürü olarak çalıştı. Dekra-Norisko tarafsız gözetim kuruluşu adına, Eren Enerji 1360 Mev termik santrali inşaaı projesinde çalıştı. Halen 2011 yılında göreve başladığı Otokar Otomotiv ve Savunma A.Ş. işletmesinde Altay milli ana muharebe tankı prototip geliştirme projesinde uzman mühendis olarak çalışmaya devam etmektedir. Aynı zamanda , Sakarya Üniversitesi'nde yarı zamanlı öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. Sakarya Üniversitesi Sürekli Eğitim Merkezi'nde, kaynakçı sertifikasyonu biriminde sınav yapıcı olarak görev yapmaktadır. 2015 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği bölümünden yüksek lisans derecesi almıştır. Akademik derecede İngilizce bilgisine, kendi literatürünü takip edebilecek kadar Rusça bilgisine ve temel Korece bilgisine sahiptir.